

A rendszer, amely emlékezett a jövőre

Vokony István – Hartmann Bálint – Sörös Péter Márk



Közreműködők, szakmai lektorok

Decsi Gábor
Juhász Kristóf Péter
Péter Gábor Mihály

Dr. Sörös Milán Attila
Dr. Táci István
Dr. Tombor Antal

Nyelvi lektor: Dr. Wenszky Nóra

© Dr. Vokony István, Dr. Hartmann Bálint, Sörös Péter Márk, 2026

© BME FASTER Kutatócsoport, 2026

BME VIK Villamos Energia Tanszék, BME FASTER Kutatócsoport

1111 Budapest, Egry József utca 18.

A kiadásért felel a BME Villamos Energetika Tanszék tanszékvezetője

Felelős szerkesztő: Dr. Wenszky Nóra

A kötetet és a borítót tervezte: Balázs Ildikó

Tördelő: Balázs Ildikó – brildi Kiadványok

ISBN 978-615-112-042-2 (nyomtatott változat)

ISBN 978-615-112-043-9 (elektronikus változat)

A rendszer, amely emlékezett a jövőre

Vokony István – Hartmann Bálint – Sörös Péter Márk



BME FASTER Kutatócsoport
Budapest, 2026

Tartalom

Előszó	7
Bevezetés	9
1. A rendszer, amelyből elindulunk	11
1.1 Hosszú életű infrastruktúra egy gyorsan változó világban	13
1.2 Három paradigmaváltás, amely elvezetett a jelenlegi rendszerhez	15
2. Mi biztos és mi bizonytalan?	19
2.1. Ami a legtöbb jövőképben azonos	19
2.2. Amiben valódi bizonytalanság van	21
2.3. Stratégiák a változó világban	23
2.3.1. Nem megjósolni, hanem kezelni	23
2.3.2. Az XLRM-mátrix: négy kérdés a bizonytalanság rendezésére	24
2.3.3. Az X-ek: tizennégy bizonytalansági tényező, amelyeket nem hagyhatunk figyelmen kívül	25
2.3.4. Tizennégy változóból négy jövődimenzió	26
3. Három lehetséges 2050-es jövőkép	29
3.1. Fizikai alkalmazkodási rés	29
3.2. Digitális bizalomra épülő energiarendszer	31
3.3. Értékláncszorítás egy szétagolt Európában	33
4. Reziliencia 2050 – felkészülés arra, amit nem tudunk pontosan előre jelezni	37
4.1. Fizikai reziliencia – a tegnap időjárására épített hálózat a holnap éghajlatában	39
4.2. Digitális reziliencia – amikor a rendszernek már nemcsak működnie, hanem értenie is kell önmagát	43
4.3. Anyag- és értéklánc-reziliencia – lehet-e zöld az átmenet új függőségek nélkül?	47
5. TSO 2050 – a hálózatüzemeltetőtől a rendszerintegrátorig	51
5.1. A TSO mint a hálózat üzemeltetője	52
5.2. TSO–DSO–aggregátor–európai koordináció	54
5.3. A jövő rendszerszintű képességei és szolgáltatásai	58
5.4. Adat, ember és szervezet	61
6. A jövőt nem választhatjuk, de kezelhetjük	67
6.1. Három jövő, három különböző próba	67
6.2. Amit minden jövőben érdemes megtenni	70
6.3. Amit ma még nem kell végleg eldönteni	73
6.4. Korai jelzések: mikor kell módosítani a fejlesztés irányát?	74
6.5. Ki fizeti meg a robusztusságot?	77

7. A BME FASTER Kutatócsoport kapcsolódó kutatásai	81
7.1. Hol van a fizikai infrastruktúra helyettesíthetőségének határa?	81
7.2. Hol van a klasszikus rendszerüzemeltetési paradigma érvényességének határa?	85
7.3. Hol van a piac koordinációs képességének határa?	94
7.4. Három határ, egy közös kutatási program	99
8. Epilógus	101
Köszönetnyilvánítás	103
Felhasznált és ajánlott irodalom	104
Rövidítésjegyzék	105
Közreműködők	106

Az emberiség által tudatosan hasznosított energia története valójában a tűz használatával kezdődött. Ez a technológiai áttörés alapjaiban változtatta meg az ember életét. A tűz fénye és hője meleget és világosságot adott, lehetővé tette a hideg időszakok átvészelését, és egyben megnövelte a produktív órák számát is. Egy egyszerűnek tűnő felfedezés új lehetőségeket nyitott meg az emberiség előtt.

Az ipari forradalmak során a fát mint fűtőanyagot egyre inkább felváltotta a kőszén, megjelent a gőzgép. Majd a kőolaj hasznosítása és a belső égésű motorok elterjedése hozta el a következő, robbanásszerű fejlődést. Ezt követte az elektromosság, a villamos energia mind szélesebb körű alkalmazása.

Ma már nehéz olyan területét találni az életünknek, amelyet ne hatna át az elektrifikáció. A villamos energia ott van a közlekedésben, a fűtésben és a hűtésben, az iparban, a kommunikációban, a mindennapi életünk szinte minden területén. A fekete aranyat egyre inkább felváltja a láthatatlan rezgés.

De mit várunk a villamosenergia-rendszertől?

Legyen mindig elérhető. Legyen megfizethető. Legyen megbízható. Mindeközben egyre inkább képesek vagyunk saját magunk is energiát termelni, tárolni, sőt akár értékesíteni is. Amikor azonban ez a képességünk valamilyen okból ellehetetlenül, természetesnek vesszük, hogy ott van a villamosenergia-rendszer, amely majd megoldja a problémát és kiszolgálja az igényeinket.

De feltesszük-e vajon a kérdést: mi mit tehetünk a villamosenergia-rendszerért?

Tágabb értelemben ugyanez a kérdés társadalmi vonatkozásban is feltehető: mit tehetünk egymásért?

Érdemes időről időre mérlegre tenni az elvárásaink sokaságát annak tükrében, hogy mi magunk mivel járulunk hozzá ahhoz a rendszerhez, amelytől folyamatos és zavartalan működést várunk.

Az együttműködő villamosenergia-rendszer egy értéklánc. Olyan, amely csak annyira erős, amennyire erősek és megbízhatóak az egyes elemei. A termelésnek, az átvitelnek, az elosztásnak, a kereskedelemnek és a fogyasztásnak nem egymástól független szereplőkként, hanem egyetlen összefüggő rendszer részeként kell működniük.

Ez a rendszer már régen túllépett a nemzeti határokon. Európában egymásra vagyunk utalva: együtt dolgozunk, hatással vagyunk egymásra, és közösen viseljük döntéseink következményeit. Az európai szinkron villamosenergia-rendszer hálózata ezért nem csupán villamos energiát szállít. Kapcsolatot teremt. Együttműködést kényszerít ki. És bizonyos értelemben kultúrát is közvetít.

Öveges professzortól megtanulhattuk, hogy a természetben a rendszerek mindig egyensúlyra töreksenek. Az egyensúly azonban csak akkor tud kialakulni, ha az igények és a ráfordítások, az elvárások és a lehetőségek összhangba kerülnek egymással. Ez az energetikában különösen fontos felismerés.

Egy rohanó világban élünk, ahol az idő gyorsan szalad. A technológiai fejlődés felgyorsult, és az „mindent azonnal szeretnénk” típusú elvárások egyre inkább általános társadalmi és politikai normává válnak. Az energetikai fejlesztésekkel szemben is egyre nagyobb az igény a gyorsaságra.

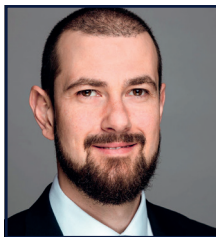
Csakhogy az energetikai rendszerek nem egyik napról a másikra születnek. A rendszerszintű, biztonságos és hosszú távon működőképes energetikai infrastruktúra létrehozása időigényes folyamat. Precíz tervezést, következetes döntéseket, jelentős beruházásokat és mindenekelőtt hosszú távú gondolkodást igényel. Nem tűzhetünk ki rossz célokat. Egy infrastruktúra megvalósítása akár öt-tíz évet vagy még hosszabb időt is igénybe vehet. Ha rossz irányba indulunk, nem egyszerűen később érünk célba: lehet, hogy egyáltalán nem oda érkezünk, ahová szerettünk volna.

Ezért a jövőre való felkészülés nem 2050-ben kezdődik. A jövő a jelenünkben kezdődik. A tervezők legnagyobb ereje pedig nem egyetlen nagy döntésben, hanem a folyamatos, napi szintű munkában van, amelyet a kitűzött cél elérése érdekében végzünk. Lehetőleg közösen, egymást segítve, egymásra figyelve.

A kötet, amelyet a tisztelt Olvasó a kezében tart, a jelen kor tudásának összefoglalása mellett már gondolatiságában is a jövőre készül. Tematikusan foglalja össze mindazt, amit érdemes átgondolnunk, és azokat a kérdéseket is, amelyekre muszáj válaszokat találnunk ahhoz, hogy megfeleljünk az emberiség által saját maga számára támasztott kihívásoknak.

2050 ma még a jövő. De az odavezető út már elkezdődött. A kérdés pedig nem csupán az, hogy milyen energetikai rendszert szeretnénk 2050-ben. A kérdés az is, hogy milyen társadalmat, milyen együttműködést és milyen világot szeretnénk akkorra felépíteni.

Legyünk kíváncsiak. Tegyük fel magunknak a nehéz kérdéseket. Merjünk hosszú távon gondolkodni, és vállaljuk a jelen döntéseinek felelősségét. Mert 2050 nem egyszerűen egy évszám. 2050 az a jövő, amelyet ma kezdünk el megépíteni.



Jó olvasást kívánok!

Batta Gergő

Bevezetés

2050. július 17., 22:41

Az egyik pillanatban a szinkron járó európai villamosenergia-rendszer még működött. Ezt lehetett biztosan tudni. A vezénylőterem falán Magyarország hálózata villódzott. Többnyire zölden.

A déli átviteli folyosó egyik vezetéke karbantartás miatt nem állt rendelkezésre. A tehermentesítésére tervezett új kapcsolatnak három évvel korábban kellett volna elkészülnie. Nem készült el. Mindig volt rá jó magyarázat: engedélyezés, beszállítói késés, kivitelezői kapacitás, újratervezés, költségnövekedés. Külön-külön mindegyik kezelhető problémának tűnt.

A hőhullám napok óta tartott, nyugat felől pedig vihar közeledett.

22:43-kor kiesett az első nagyfeszültségű távvezeték.

A rendszer reagált. Az akkumulátorok működésbe léptek, a tartalék erőművi kapacitásokat aktiválták. Az ipari fogyasztók terhelését csökkentették. A határkeresztező áramlások átrendeződtek. A megmaradt átviteli folyosó terhelése gyorsan közelített a dinamikus számított határértékhez. A számítás szerint még volt tartalék kapacitás.

Ez volt a jó hír.

A helyi meteorológiai állomás azonban fél órája nem küldött adatot. A hiányzó értéket a rendszer becsülte. A becslés jó volt. Csak éppen a vezeték mentén nem fújt a szél. És a vezeték nem azt tudta, amit a modell szerint tudnia kellett.



2050. július 17., 22:41

Egy másik világban nem hiányzott távvezeték. A hálózatfejlesztések elkészültek. Volt elegendő tároló kapacitás, szabályozható kapacitás és rugalmasság. A rendszert minden korábbinál részletesebben monitorozták: szenzorok, digitálisiker-technológia, elosztói és átviteli adatok és prediktív modellek álltak rendelkezésre, automatizált volt a döntéstámogatás. Első látásra minden rendelkezésre állt.

22:43-kor több százezer akkumulátor egyszerre váltott kisütés üzemmódba.

Senki nem adott ki ilyen utasítást. A regionális koordinációs központ szerint nem fenyegetett üzemzavar. A hazai hálózati digitális iker néhány percen belül kritikus állapotot jelzett. Az elosztói rendszer eközben továbbra is megfelelő tartalékot érzékelt. Mindenki ugyanazt a villamosenergia-rendszert figyelte. Mégsem ugyanazt látta.

– Mi váltotta ki? – kérdezte a szolgálatvezető.

– Lehet hibás adat. Lehet hibás beavatkozás. Lehet támadás.

– És melyik?

A kiberbiztonsági vezető nem válaszolt azonnal. A döntéstámogató rendszer három lehetséges beavatkozást ajánlott. Mindhárom működött a modellben. Ez azonban már nem volt elegendő.

A kritikus kérdés ugyanis nem az volt, hogy melyik beavatkozás optimális a modellben. Hanem az, hogy a modellben szereplő rendszer ugyanaz-e még, mint amely odakint fizikailag működik: de azt a diszpécser nem tudta.



2050. július 17., 22:41

Az este kifejezetten nyugodtan indult. Egy kelet-magyarországi alállomáson aktiválódott egy transzformátor védelme. A berendezés lekapcsolt. A hálózat átrendeződött. A fogyasztók többsége semmit nem vett észre. Tulajdonképpen pontosan így kell működnie egy jól tervezett villamosenergia-rendszernek.

Másnap azonban kiderült, hogy a transzformátort cserélni kell. A szállítási idő huszonkilenc hónap volt. Az egyik korábbi gyártó már nem gyártotta az adott típust. A másik gyártó kapacitását évekre előre lekötötték. Egy kritikus vezérlőmodul félvezetőjére pedig exportkorlátozás vonatkozott.

A rendszer ettől természetesen nem állt le. A transzformátorhiány miatt az alábbi intézkedéseket hozták. Elhalasztottak egy karbantartást. Megváltoztattak néhány kapcsolási állapotot. Egy másik fejlesztést előrehoztak. Találtak ideiglenes megoldást. Majd még egyet. A rendszer működött. Csak minden egyes döntés után valamivel közelebb került működési határaihoz.

A vezénylőterem hálózati térképén távvezetékek, transzformátorok és alállomások látszottak. A valódi villamosenergia-rendszer azonban több volt, mint amit látni lehetett ezen a térképen.

A rendszer folytatódott bányákban. Réz- és acélgyárakban. Félvezetőüzemekben. Kikötőkben. Szállítási útvonalakon. Szoftverekben. Beszállítói szerződésekben. És emberek tudásában. Ez is a rendszer része volt. Csak ezt a térképet ritkábban nézték.



Három 2050. július 17., 22:41-et láttunk.

Az első világban a fizikai infrastruktúra maradt le a rendszer átalakulása mögött. A másodikban a digitális rendszer vált olyan összetetté, hogy már nemcsak maga a fizikai állapot, hanem az arról alkotott kép megbízhatósága is kérdésessé vált. A harmadikban pedig kiderült, hogy egy szükséges rendszerelem akkor is hiányozhat, ha a hálózati tervben és a kapacitásmérlegben papíron minden rendelkezésre áll. Három különböző probléma. Mégis ugyanaz a kérdés:

Mit jelent valójában reziliens villamosenergia-rendszert építeni 2050-re?

Egyik történet sem jóslat. Talán egyik sem történik meg pontosan így. Talán mindháromból megtörténik valami.

A jövő ugyanis ritkán lép úgy meg bennünket, hogy teljesen ismeretlen problémát hoz. Sokkal gyakrabban úgy, hogy egymás mellé rendez több olyan problémát, amelyeket külön-külön már jól ismertünk. És éppen az derül ki, hogy együtt már nem ugyanazt a problémát jelentik.

1. A rendszer, amelyből elindulunk

A villamosenergia-rendszer jövőjéről nem lehet úgy gondolkodni, mintha a 2050-es év egy üres lap lenne, amelyre tetszőleges hálózatot rajzolhatunk. A rendszer, amelynek a következő évtizedekben működni kell, jelentős részben már ma is létezik. A távvezetékek, alállomások, feszültség szintek, üzemviteli elvek, a biztonsági kritériumok, intézmények és szabályozási megoldások évtizedek alatt alakultak ki, és ezek meghatározzák azt a mozgásteret is, amelyben a jövő döntéseit meg kell hoznunk. A 2025-ben megjelent A rendszer, amely nem tudta, hogy meg kell újulnia című kiadványunk, amelyre a továbbiakban többször visszautalunk, ezt az örökséget vizsgálta: hogyan alakult ki a magyar villamosenergia-hálózat mai struktúrája, milyen műszaki és intézményi logika mentén működik, és mi történik akkor, amikor a környezet gyorsabban kezd változni, mint maga az infrastruktúra.

Fontos hangsúlyozni: a ma működő rendszer nem azért került nehéz helyzetbe, mert eredendően rossz szul tervezték meg. Éppen ellenkezőleg! A saját korának igényeire hosszú időn keresztül megbízható és műszakilag sikeres választ adott. A második világháborút követően kialakított országos hálózat, majd a 220 kV-os és 400 kV-os átviteli rendszer, a szomszédos országokkal kiépített kapcsolatok, a 120 kV-os – később névlegesen 132 kV-os – főelosztó-hálózat, valamint a közép- és kisfeszültségű elosztóhálózat olyan infrastruktúrát hozott létre, amely évtizedeken keresztül képes volt kiszolgálni a növekvő fogyasztói igényeket. Az alapelv világos és jól kezelhető volt: viszonylag kevés nagyermű termelt, a villamos energia egy hierarchikusan felépített hálózaton keresztül jutott el a fogyasztóhoz, a nagyobb feszültség szintek felől a kisebbek irányába. A szerepkörök is egyértelműek voltak: az erőmű termelt, a hálózat szállított, a fogyasztó fogyasztott.

Ez a struktúra azonban nem tűnt el attól, hogy a környezete időközben alapvetően megváltozott. Az 1950-es és 1960-as években kialakított hálózati megoldások jelentős része ma is a villamosenergia-rendszerünk része. Ezért az öregedő eszközállomány kérdését sem lehet egyszerűen karbantartási problémaként kezelni. Egy ötven-hatvanéves távvezeték vagy alállomás cseréje nem pusztán azt jelenti, hogy egy régi berendezés helyére egy újat teszünk. Felmerül a kérdés: ugyanazt kell-e újraépíteni?

Ez a kérdés azért különösen fontos, mert az új berendezés ismét több évtizeden keresztül a rendszer része lesz. Amit ma megépítünk, annak jó eséllyel 2050-ben, sőt azon túl is működni kell. Mindeközben már ma sem tudjuk pontosan, hogy az adott berendezésnek az élettartama második felében milyen termelési szerkezetet, fogyasztási igényt, teljesítményáramlást vagy üzemviteli helyzetet kell majd kiszolgáltatnia. Ezáltal egy eszközcsere valójában hosszú távú rendszertervezési döntés is. Nemcsak azt kell eldönteni, hogy mit cserélünk le, hanem azt is, hogy milyen jövő számára építjük újjá a hálózatot.

Közben maga a villamosenergia-rendszer működési logikája is átalakul. A decentralizált, mindenekelőtt a megújuló energiával történő termelés tömeges megjelenésével az elosztóhálózatokon kétirányúvá váltak a teljesítményáramlások. Megjelent a termelő-fogyasztó, az energiatároló, az elektromos jármű, a hőszivattyú és az energiaközösség. Vagyis azok a korábban jól elkülöníthető szerepkörök, amelyekre a hálózat hagyományos működése épült, fokozatosan összemosódnak.

Ennek közvetlen műszaki következménye is van. A hálózatot már nem lehet egyetlen, jól definiált csúcsterhelési állapotra méretezni és ellenőrizni. (Vagyis ha szélsőséges állapotra méretezünk akkor ezek ha-

tását összegezve egy minden szempontból irreális körülményt vizsgálunk. Ha beépítünk rugalmasságot, korlátozást stb. annak kihatása van a fizikai rendszerre, a digitális igényekre és a folyamatokra.) Egy mástól lényegesen eltérő üzemállapotokat kell biztonságosan kezelni: téli fogyasztási csúcsot alacsony napelemes termeléssel; nyári, napközbeni jelentős teljesítménynybbletet; területileg koncentrált új ipari fogyasztókat; vagy olyan üzemállapotokat, amikor nagy a megújuló alapú termelés, miközben kevés hagyományos erőmű üzemel, vagy egyáltalán nincs megújuló alapú termelés. Ezek nem ugyanannak az üzemállapotoknak a kisebb eltérései, hanem műszaki szempontból is különböző rendszerek.

Ehhez társul a digitalizáció és a teljesítményelektronika térnyerése. A villamosenergia-rendszer működését egyre kevésbé kizárólag a primer berendezések fizikai tulajdonságai határozzák meg. Egyre nagyobb szerepet kapnak a mérések, a kommunikáció, az informatika, a szabályozási algoritmusok és a teljesítményelektronikai eszközök. Első látásra ezeknek az új lehetőségeknek az alkalmazása újabb problémának tűnhet, azonban lehetőséget is jelent. A korábban alapvetően passzív hálózat fokozatosan mérhető, kommunikáló, és beavatkozásra képes rendszerré válik. A kérdés tehát nem az, hogy történik-e digitalizáció, hanem az, hogy miként használjuk fel úgy, hogy abból valódi érték keletkezzen.

A 2025-ös kiadvány egyik fontos tanulsága éppen ezért nem az volt, hogy a régi hálózat helyett egyszerűen újat kell építeni. Ennél összetettebb a helyzet. Azokat az alapfeltevéseket kell újra-gondolni, amelyeket hosszú időn keresztül adottnak tekintettünk.

Biztosan ugyanaz lesz-e a 132 kV-os hálózat szerepe húsz-harminc év múlva, mint ma? A városi elosztó-hálózatok eddig alkalmazott feszültségszintje megfelel-e a jövőben? Minden hálózati szinten ugyanúgy kell-e értelmezni az $n-1$ biztonsági kritériumot? A fizikai hálózatfejlesztés mekkora része helyettesíthető flexibilitással, energiatárolással vagy aktív hálózatüzemeltetéssel? Mit vásárol majd valójában a fogyasztó a hálózattól: energiát, kapacitást, rendelkezésre állást – vagy ezek valamilyen kombinációját? Mennyi digitalizációra van szükség egy olyan rendszerben, ahol a primer berendezések műszaki élettartama akár többszöröse lehet az őket felügyelő elektronikai és informatikai megoldások élettartamának?

Ezekre a kérdésekre ma nincs egyetlen, minden körülmények között helyes válasz. Mindazonáltal nem mehetünk el amellett, hogy ezeket a kérdéseket feltegyük, hangosan kimondjuk. Ha ugyanis az infrastruktúra élettartama több évtized, akkor a rosszul megfogalmazott kérdések következményeit is több évtizedig viselhetjük.

A 2025-ös kiadvány végkövetkeztetése ezért túlmutatott az egyedi műszaki problémákon. Magyarországnak olyan átfogó, hosszú távú és lehetőség szerint konszenzusos hálózatstratégiai – hovatovább energiastratégiai – koncepcióra van szüksége, amely legalább 2040–2050-ig tekint előre. Ennek kialakítása nem lehet kizárólag a szakma egyetlen szereplőjének feladata. A rendszerirányító, az elosztói engedélyesek, a műszaki szakemberek, a szabályozó, a döntéshozók és a fogyasztói oldal különböző szempontokat képviselnek, azonban ugyanannak a villamosenergia-rendszernek a működéséről döntenek.

A hálózatfejlesztés tehát nem egyszerű mérnöki optimalizálási feladat vagy műszaki kérdés, hanem egyidejűleg ellátásbiztonsági, gazdasági, szabályozási és társadalmi kérdés is. Egy adott beruházás műszaki optimuma nem feltétlenül jelenti a teljes rendszer optimumát. Komplexen kell kezelni a problémákat: a lokális döntéseknek egy hosszú távú rendszerstratégiát kell kiszolgálniuk.

Ezen a ponton ér véget a 2025-ös kiadvány gondolatmenete, és innen indul a jelen könyv.

Az előző munka alapvetően arra kereste a választ, hogyan jutottunk el a jelenlegi rendszerig, és miért nem folytatható változatlan formában az a fejlődési pálya, amely korábban sikeres volt. A mostani kérdés már más: ha elfogadjuk, hogy a rendszernek változnia kell, akkor mire kell felkészülnünk?

Erre azonban egyetlen előrejelzés nem tud megbízható választ adni. Egy 2050-ig előretekinthető energiarendszer esetében túl sok olyan műszaki, gazdasági, társadalmi és geopolitikai tényező van, amelyeknek alakulását ma már nem tudjuk ugyan olyan pontosan meghatározni. Nem az a probléma, hogy nincs elegendő prognózis. Éppen ellenkezőleg: sok prognózis van, amelyek különböző feltételezésekből indulnak ki és különböző jövőket írnak le.

Ezért először azt kell eldönteni, hogy mi az, ami nagy valószínűséggel bekövetkezik és mi az, ami valóban bizonytalan. Ezt követően nem egyetlen jövőképet kell optimalizálni, hanem több lehetséges állapotot kell egyszerre vizsgálni. Végül pedig olyan műszaki és stratégiai döntéseket kell keresni, amelyek nemcsak akkor bizonyulnak helyesnek, ha a ma készített prognózisaink pontosak. Ezért a döntéseket rendszeresen felül kell vizsgálni. Talán ez a legfontosabb szemléletváltás.

Nem 2050-et kell „eltalálnunk”. Olyan villamosenergia-rendszert kell kialakítanunk, amely akkor is működőképes marad, ha 2050-ben a rendszer nem pontosan olyan lesz, amilyennek ma elképzeljük. A cél tehát nem egyetlen optimális jövő megtervezése, hanem egy olyan robusztus rendszer kialakítása, amely több, egymástól akár lényegesen eltérő jövőben is képes biztonságosan, gazdaságosan és megfelelő rugalmassággal működni. Tudjunk időben reagálni a változásokra, és ha kell, újratervezni, de a távlati célokat és a sokszínű scénáriókat ne tévesszük szem elől.

1.1. Hosszú életű infrastruktúra egy gyorsan változó világban

A villamosenergia-hálózat tervezésének egyik alapvető problémája két teljesen eltérő időlépték találkozásából következik. A hálózati infrastruktúra egy lassan változó rendszer, míg az a környezet, amelyben működnie kell, egyre gyorsabban változik.

Egy nagyfeszültségű hálózati beruházást nem lehet néhány hónap alatt megvalósítani. Egy új távvezeték megtervezése, engedélyezése és kivitelezése öt-tíz évet is igénybe vehet. Eközben az elkészült eszköztől azt várjuk, hogy ezt követően több évtizeden keresztül biztonságosan működjön. A 2025-ös kiadványban bemutatott magyar tapasztalat is ezt az állítást támasztja alá. Az ötven-hatvan évvel ezelőtt telepített távvezetékek, transzformátorok és alállomások jelentős része ma is a rendszer része. Egy megfelelően kialakított kábel, távvezeték vagy alállomási berendezés műszaki élettartama negyven-ötven év, de akár ennél hosszabb is lehet. Tehát a villamosenergia-hálózat szükségszerűen lassan változó rendszer. Amit ma eldöntünk, annak következménye 2050-ben is velünk lesz. Esetenként még jóval később is!

Ehhez képest a hálózat környezete akár néhány év alatt alapvetően megváltozhat. A magyarországi napelemez kapacitás felfutása jól mutatja ezt: a növekedés sebességét a korábbi tervek folyamatosan kénytelenek voltak követni. Hasonlóan rövid idő alatt több száz megawattos új ipari fogyasztási gócpontok is megjelenhetnek, és megváltozhatnak a támogatási rendszerek, az energiahordozók árai vagy akár az ellátásbiztonság geopolitikai feltételei.

Egy technológia, amely egy tízéves terv indulásakor még marginális jelentőségű, a tervezési időszak végére meghatározóvá válhat. Egy másik fejlesztési igény, amelyet a terv készítésekor szinte biztosnak tekintettünk,

időközben teljesen eltűnhet. A hálózat fizikai időállandója mellett tehát létezik egy sokkal gyorsabb technológiai, gazdasági és politikai időállandó is.

Hogyan lehet ebben a környezetben hosszú távra tervezni?

A probléma nem pusztán elméleti. A 2010 és 2024 között készült tizenöt egymást követő magyar nagyfeszültségű hálózatfejlesztési terv 748 beruházását vizsgáló elemzése (Hartmann és mtsai, megjelenés alatt) jól mutatja, hogy egy hálózatfejlesztési terv időbeli stabilitása lényegesen kisebb lehet annál, mint amit egyetlen terv elolvasása alapján gondolnánk.

A projektek már első megjelenésükkor átlagosan 4,61 évvel előzték meg a tervezett üzembe helyezést. Az átviteli hálózati beruházások esetében ez az érték közel hat év volt. Vagyis éppen a legnagyobb, a legdrágább és a később legnehezebben módosítható beruházások esetében kell a legtávolabbra előre látni. Mindazonáltal ugyanezeknél a projekteknél volt nagyobb a tervezett üzembe helyezési időpontok szórása is, miközben tényleges megvalósításuk átlagosan több mint öt évet vett igénybe.

Még érdekesebb eredményt adnak azok a beruházások, amelyek végül nem valósultak meg. A törölt projektek már első megjelenésükkor is hosszabb időtávra tekintettek előre, mint a később valóban elkészült fejlesztések. Az összes törölt beruházás átlagos kezdeti előretekintése 5,15 év volt, a TSO (*Transmission System Operator*) átviteli hálózati projektek esetében pedig közel 7,9 év. A vizsgált portfólióban a négyéves kezdeti projektek több mint fele végül nem valósult meg.

Mit jelent ez? Bizonyosan nem azt, hogy felesleges négy, öt vagy akár tíz évre előre tervezni. Éppen ellenkezőleg! A hálózati beruházások hosszú átfutási ideje miatt erre feltétlenül szükség van. A probléma inkább az, hogy minél inkább szükségünk van a hosszú távú tervre, annál bizonytalanabbá válik annak konkrét tartalma. Ez a hálózattervezés egyik alapvető paradoxona.

A jelenség az *institutional drift*, azaz az *intézményi sodródás* fogalmával is leírható. A hálózatfejlesztés formális eljárásai, tervezési ciklusai és döntési mechanizmusai hosszabb ideig változatlanok maradhatnak, miközben a technológiai, gazdasági, társadalmi és szabályozási környezet, amelyben működniük kell, alapvetően átalakul. Nem feltétlenül maga a szabály változik meg. Ugyanaz a szabály egyszer csak más környezetben kezd működni, és ezáltal más eredményt is adhat.

Egy korábban alapvetően inkrementális hálózatfejlesztésekre kialakított tervezési rendszernek ma már egyszerre kell kezelnie a tömeges megújuló alapú kapacitások csatlakozásait, az új ipari fogyasztási gócpontok ellátását, a megváltozó határkeresztező teljesítmény áramlásokat és az egymással versengő technológiai alternatívákat. A formális folyamat akár változatlan is maradhat, miközben maga a probléma, amelyre választ kell adnia, teljesen megváltozik.

A 2025-ös kiadvány erre a gördülő tervezést és az adaptivitást jelölte meg lehetséges válaszként. A hosszú távú tervet nem célszerű egy húsz vagy harminc év múlva kialakuló rendszer pontos tervrajzaként értelmezni. Erre valószínűleg amúgy sem lennének képesek. Sokkal inkább egy olyan iránytűre van szükség, amely kijelöli a hosszú távon szükséges képességeket és fejlődési irányokat, miközben lehetőséget hagy a konkrét projektek módosítására az új információk alapján. Tehát a proaktivitás és az adaptivitás ebből a szempontból nem egymás ellentétei.

Bizonyos döntéseket évtizedekre előre meg kell hozni. Egy lehetséges nyomvonal biztosítását, egy kulcsfontosságú alállomási terület fenntartását vagy egy később bővíthető hálózati struktúra kialakítását nem lehet akkor elkezdni, amikor az igény már ténylegesen megjelent. Akkor már késő! Más döntéseket viszont éppen ellenkezőleg: tudatosan nyitva kell hagyni. Ha nincs szükség az azonnali döntésre, miközben néhány év múlva lényegesen több információ állhat rendelkezésre, akkor nem biztos, hogy érdemes ma visszafordíthatatlanul elköteleződni egyetlen megoldás mellett. Ez a gondolkodásmód azonban újabb problémát vet fel. Nemcsak a rendszer külső környezete változik különböző sebességgel, hanem maga a villamosenergia-rendszer is eltérő időállandójú rétegekből épül fel.

A primer hálózati infrastruktúra élettartama évtizedekben mérhető. Egy betonoszlop, kábel, transzformátor vagy nagyfeszültségű kapcsolóberendezés akár negyven-ötven évig is a rendszerben maradhat. Ezzel szemben az egyre fontosabb elektronikai, informatikai és kommunikációs réteg élettartama ennek töredéke. Egy szenzor, kommunikációs berendezés, irányítástechnikai eszköz vagy informatikai platform néhány év vagy egy-két évtized alatt technológiailag elavulhat.

A jövő villamosenergia-rendszere tehát különböző időállandójú rendszerek együttese lesz. Lesz egy hosszú életű fizikai infrastruktúránk, egy középtávon változtatható szabályozási és piaci környezetünk, valamint egy gyorsan fejlődő és cserélődő digitális technológiai rétegünk. Ezeket pedig együtt kell működtetni!

Nem feltétlenül az a jó megoldás, ha a negyven évre tervezett primer eszközhöz negyven évre próbáljuk rögzíteni az informatikát is. Sokkal inkább olyan architektúrára van szükség, amelyben a különböző életciklusú rétegek egymástól megfelelően elválaszthatók, cserélhetők és fejleszthetők. A hosszú távú rendszerstratégia egyik fontos feladata éppen ezeknek az eltérő időállandóknak az összehangolása.

A hálózattervezés időbeli paradoxonát tehát nem lehet azzal feloldani, hogy egyszerűen rövidebb távra tervezünk. Ha csak addig tekintenénk előre, ameddig a jövőt viszonylag pontosan látjuk, rendszeresen túl későn kezdődnének el azokat a beruházásokat, amelyek megvalósításához öt-tíz évre van szükség. De az ellenkező végtel sem működik. Nem készíthetünk egyetlen harmincéves prognózist, majd nem építhetjük erre változatlanul a következő évtizedek fejlesztési döntéseit. A kérdés tehát nem az, hogy rövid vagy hosszú távra tervezünk. Mindkettőre szükség van, csak más módon.

A hosszú távú hálózattervezés feladata egyre kevésbé az, hogy pontosan „megjósolja” a jövőt. Sokkal inkább azt kell meghatározni, hogy mely döntéseket kell már ma meghoznunk, mert később már nem marad időnk rájuk, és mely döntéseket kell tudatosan nyitva hagynunk, mert ma még túl keveset tudunk ahhoz, hogy jól döntsünk. Ebből következik egy fontos szemléletváltás is. A bizonytalanságot nem lehet a tervezésből eltávolítani. A bizonytalanság nem hiba, amit megfelelő előrejelzéssel egyszer majd megszüntetünk. A bizonytalanság maga is a tervezési probléma része. Vagyis nem az a kérdés, hogyan készítünk olyan tervet, amely biztosan helyesen írja le 2050-et. Hanem az, hogyan tervezünk ma úgy, hogy akkor is legyen megfelelő mozgásterünk, ha 2050-es időszak lényegesen másképpen alakul, mint ahogyan most elképzeljük.

1.2. Három paradigmaváltás, amely elvezetett a jelenlegi rendszerhez

A bizonytalanság természetesen nem új jelenség a villamosenergia-iparban. Érdemes ezért egy pillanatra visszatekinteni: mi az, ami az elmúlt nagyjából három évtizedben alapvetően megváltoztatta azt a rendszert, amelyet ma működtetünk?

A jelen kötet készítésénél inspirációt adott korábbi szakértői interjúkban újra és újra megjelenő három, egymással szorosan összefüggő folyamat. Az első a villamosenergia-piac és az európai integráció. A második a termelési struktúra decentralizációja és a megújuló energia nagyfokú alkalmazása. A harmadik pedig a digitalizáció, pontosabban az informatika egyre mélyebb beépülése a villamosenergia-rendszer működésébe. Természetesen az egyes interjúalanyok eltérő hangsúlyokat helyeztek ezekre a változásokra. Mindazonáltal figyelemre méltó, hogy több, különböző szakmai háttérrel rendelkező szakértő visszatekintésében ugyanez a három folyamat jelent meg meghatározó fordulópontként.

A villamosenergia-rendszer piaci és intézményi rendszerének átalakulása ▼ Az ezredforduló előtti rendszerben a műszaki és gazdasági döntések lényegesen szorosabban kapcsolódtak egymáshoz, egy alapvetően vertikálisan integrált iparági struktúrán belül. A piacnyitás ezt a világot változtatta meg. A villamos energia egyre inkább kereskedelmi terméké vált. Új szereplők jelentek meg, új piaci mechanizmusok alakultak ki, és egyre nagyobb szerepet kapott a határkeresztező kapacitásokat igénybe vevő kereskedelem. Emellett az ellátásbiztonságért felelős szervezet nincs egyértelműen kijelölve.

Az egyik szakember jól érzékeltette a változás nagyságrendjét: pályája elején a vállalatnál „talán két ember” foglalkozott a villamosenergia-kereskedelemmel, mára viszont ez önálló, jelentős szervezeti területté vált. Más szakértők hasonlóan a piacnyitást nevezték meg az elmúlt huszonöt év egyik legfontosabb változásaként.

De mit jelentett valójában a piacnyitás? Semmiképpen nem pusztán azt, hogy a villamos energiát áruvá minősítve kereskedni kezdtünk. Ezzel párhuzamosan alakult át a rendszerirányítás intézményi környezete, erősödött az európai szabályozási integráció, kialakultak az átviteli hálózati engedélyesek, azaz a TSO-k mai újszerepköre és egyre nagyobb jelentőséget kapott a regionális koordináció. A nemzeti villamosenergia-rendszerek fizikai összekapcsoltsága természetesen ennél régebbi. Azonban az elmúlt két-három évtizedben ehhez egy mind szorosabb piaci és intézményi integráció társult. Ezáltal a villamosenergia-rendszert és -kereskedelmet ma már nem lehet kizárólag országhatárok között értelmezni.

Egy másik ország termelési szerkezetének változása, egy erőmű bezárása, egy kereskedelmi döntés vagy esetleg egy hálózati szűk keresztmetszet kialakulása közvetlenül megjelenhet a magyar rendszer teljesítményáramlásaiban és üzemviteli feladataiban. A rendszer fizikailag is együtt működik, de egyre inkább együtt is kell tervezni és irányítani. Nem véletlen tehát, hogy az interjúkban az együttműködés erősödése több helyen a piacnyitás természetes következményeként jelent meg. Ráadásul európai szinten is. Ugyanez a kérdés egyre hangsúlyosabban jelenik meg a TSO–DSO együttműködésben is, azaz az átviteli hálózati engedélyesek és az elosztói engedélyesek kooperációjában is.

Termelési struktúra átalakulása ▼ A 20. századi villamosenergia-rendszer viszonylag kevés, nagy és jól irányítható erőműre épült. Az egyik beszélgetésben ez úgy jelent meg, hogy korábban „10–15 nagy erőmű” lényegében meghatározta, hol keletkezik a villamos energia és milyen irányban kell azt a fogyasztókhoz eljuttatni. Ehhez képest ma már sok ezer, sőt százezres nagyságrendű kisebb termelőegység működhet különböző hálózati szinteken.

Ez nem egyszerűen mennyiségi változás! A megújuló energiaforrások – Magyarországon mindenképp a fotovillamos termelés – felfutása nemcsak azt jelenti, hogy új erőművek jelentek meg a rendszerben. Felbomlott az a korábbi, egyértelmű szereposztás is, amelyben az egyik szereplő termelt, a másik szállított, a harmadik pedig fogyasztott. Ma a fogyasztó is termelhet. A termelő tárolhat is villamosenergiát. A tároló egyik pillanatban fogyasztóként, a másikban termelőként viselkedhet. Ráadásul ezt a termelést egy rosszul becsülhető, időjárásfüggő forrásból fedezi. Az aggregátor több száz vagy több ezer különálló piaci egységet foghat össze, az energiaközösség pedig olyan szereplőket kapcsolhat össze, amelyek korábban egymástól függetlenül működtek. Az egyik szakember ezt talán a legtömörebben fogalmazta meg: a korábbi világhoz képest mára „mindenki csinál mindent is”.

Első látásra ez akár szervezési vagy piaci kérdésnek is tűnhet. Azonban a műszaki következménye legalább ilyen jelentős. A rendszer egyre nagyobb része teljesítményelektronikai átalakítókön keresztül kapcsolódik a hálózathoz. Ezáltal megváltozik a villamosenergia-rendszer inerciája, zárlati viselkedése, meddőteljesítmény-szabályozása és végső soron maga a rendszerstabilitás biztosításának módja is. A korábban természetes fizikai tulajdonságok egy részét egyre inkább szabályozástechnikai úton kell biztosítani. Ez kihívás. De együttal lehetőség is.

A teljesítményelektronika ugyanis gyorsan és széles tartományban szabályozható. Vagyis miközben bizonyos hagyományos rendszertulajdonságok eltűnnek, új szabályozási képességek jelennek meg. Az a kérdés tehát, hogy képesek vagyunk-e a decentralizáció során megjelenő új technológiák tulajdonságait értékké alakítani.

Természetesen az elosztóhálózat szerepe is alapvetően megváltozik. Többé nem egyszerűen az energia továbbításának utolsó, passzív szakasza. Egyre inkább aktív a rendszer, ahol termelés, fogyasztás, tárolás és szabályozás egyszerre jelenik meg. A decentralizáció tehát nem pusztán azt jelenti, hogy máshol vannak az erőművek. Azt is jelenti, hogy a hálózat korábbi hierarchiája, a szereplők közötti határok és a rendszerirányítás eszközei is átalakulnak.

A nemzetközi partnerekkel folytatott beszélgetések ugyanezt erősítik meg. Más országok természetesen eltérő helyzetből indultak, eltérő technológiai és szabályozási utat jártak be, azonban a hagyományos foszszilis termelési struktúráról a jelentős nagyságú megújuló és decentralizált rendszer felé történő elmozdulás mindenhol alapvető változást jelentett.

Digitalizáció ▼ A digitalizáció első látásra talán kevésbé látványos változás, mint a több ezer megawattnyi napelem és szélerőmű megjelenése vagy a piac liberalizációja. Mégis nehéz olyan részét találni a mai villamosenergia-rendszernek, amelyet ez a folyamat ne alakított volna át. Az egyik szakember visszaemlékezése szerint pályája kezdetén az informatika lényegében arra szolgált, hogy egy helyen láthatók legyenek a terhelések, a feszültségek és a hálózat kapcsolási helyzete. Ma ehhez képest az erőművezérlés, a piac-összekapcsolás, az üzemirányítás és a hálózati folyamatok jelentős része informatikai rendszereken keresztül működik. Vagyis nem egyszerűen arról van szó, hogy a papírt számítógépre cseréltük: sokkal több információból kell tudjuk a hasznosat szintetizálni és jó döntést hozni, rövidebb idő alatt!

A szenzorok, a kommunikáció, a szinkronfazormérések, az automatizált irányítás, a központi adatközpontok, a digitális ikrek és egyre inkább a mesterséges intelligencia egy egészen más működési logikájú rendszer felé vezetnek. A fizikai infrastruktúra és annak digitális modellezése mind szorosabban összekapcsolódik. Ezáltal olyan információk állhatnak rendelkezésre, amelyek korábban nem. Gyorsabb beavatkozás lesz lehetséges. Több elem vonható be a szabályozásba. Olyan flexibilitások is láthatóvá, és használhatóvá válhatnak, amelyek korábban gyakorlatilag elérhetetlenek voltak.

Mindazonáltal ennek a változásnak ára is van. Minél inkább függ a villamosenergia-rendszer az informatikától, annál fontosabbá válik ezen a téren is a szabványosítás, az interoperabilitás, a kiberbiztonság és annak meghatározása, hogy mely döntéseket bízhatunk automatizált rendszerekre. Meddig támogassa az az automatizált folyamatirányító rendszer az operátort, és mikortól döntsön helyette? Mi történik akkor, ha a fizikai rendszer működőképes, de az azt felügyelő kommunikációs rendszer nem? Mekkora új kockázatot vállalunk azzal, hogy egyre több rendszerfunkciót digitalizálunk? A digitalizáció tehát egyszerre flexibilitási erőforrás és új kockázat.

A három paradigmaváltást ugyanakkor hiba lenne egymástól független folyamatként kezelni. A liberalizált és egyre szorosabban integrált európai villamosenergia-piac nem működhetne nagy mennyiségű, gyorsan hozzáférhető információ nélkül. A decentralizált termelőegységek tömege digitalizáció nélkül nem lenne megfelelően megfigyelhető, koordinálható és szabályozható. A megújuló technológiák költségsökkenése és piaci térnyerése pedig lebontotta a hagyományos szereplők közötti határokat, amelyekre a korábbi ipar-

ági struktúra épült. A mai villamosenergia-rendszer tehát nem egyetlen technológiai forradalom eredménye. Több, egymással kölcsönhatásban álló és egymást erősítő átalakulás formálta.

Ennek a visszatekintésnek van azonban egy további, a jelen kötet szempontjából talán még fontosabb tanulsága is. Képzeljük el, hogy az ezredforduló környékén megpróbáltuk volna pontosan meghatározni a mai 2026-os villamosenergia-rendszert. Vajon hány napelemet feltételeztünk volna? Milyen szerepet tulajdonítottunk volna a teljesítményelektronikának? Megjósoltuk volna a mai piaci integrációt, a digitalizáció mélységét vagy az aggregátorok, energiaközösségek megjelenését? Valószínűleg több fontos folyamat irányát fel lehetett volna ismerni. A változás sebességét, konkrét formáját és különösen az egyes folyamatok egymásra hatását azonban már sokkal nehezebb, vagy lehetetlen lett volna pontosan előre jelezni.

És éppen ez a lényeg. A jövő legfontosabb változásai sokszor nem teljesen váratlanul jelennek meg. Az alapjukat adó erők már jóval korábban láthatók. Ami bizonytalan, az a sebességük, a kombinációjuk, és az, hogy végül milyen konkrét rendszerállapotot hoznak létre.

Ma hasonló helyzetben vagyunk. A következő huszonöt év konkrét eseményeit nem ismerjük. A villamosítás, a dekarbonizáció, a decentralizáció, a digitalizáció, a regionális együttműködés és ezzel párhuzamosan a geopolitikai bizonytalanság azonban már most is jelen lévő, erős folyamatok. A kérdés tehát nem az, hogy ezek bekövetkeznek-e valamilyen formában. Sokkal inkább az, hogy milyen sebességgel, milyen arányban és milyen kombinációban alakítják majd át a rendszert.

A hosszú távú stratégia feladata ezért ismét nem a jövő pontos becslése. Azt kell megértenünk, hogy a már ma is látható változási irányok hogyan kapcsolódhatnak egymáshoz, milyen egymástól lényegesen eltérő jövőket hozhatnak létre, és melyek azok a döntések, amelyek több ilyen lehetséges világban is értelmesnek bizonyulnak. Vagyis nem feltétlenül azt kell eltalálnunk, hogy melyik jövő fog bekövetkezni. Sokkal fontosabb, hogy olyan villamosenergia-rendszert építsünk, amely több lehetséges jövőre is fel van készülve.

2. Mi biztos és mi bizonytalan?

A fentiekben ismertetett paradox helyzetben fontos lenne tudnunk, mi tekinthető biztosnak és bizonytalanoknak a villamosenergia-rendszer fejlődésében. A kérdés megválaszolásához jó kiindulási alapot adnak a nemzetközi jövőképek. Az európai rendszerirányítók, szakpolitikai intézmények, kutatóintézetek és energetikai vállalatok által készített forgatókönyvek ugyanakkor nem ugyanazokra a kérdésre keresik a választ. A tízéves hálózatfejlesztési tervek változatai elsősorban az infrastruktúra méretezéséhez és a szükséges beruházások azonosításához szolgálnak bemenetnek. Más tanulmányok azt vizsgálják, milyen technológiai és intézményi feltételek mellett működhet egy karbonsemleges európai energiarendszer. Megint más elemzések pedig arra helyezik a hangsúlyt, hogy a geopolitikai széttagolódás, a technológiai fejlődés gyorsulása, a decentralizáció vagy éppen az energiabiztonság felértékelődése miként változtathatja meg az előttünk álló évtizedeket.

A jövőképekben meglepően sok a közös pont. Döntő többségük egy erősen villamosenergia-központú, nagyrészt karbonmentes, az időjárási viszonyoktól jelentősen függő, lényegesen rugalmasabb és sokkal adatintenzívebb energiarendszert vetít előre. A bizonytalanság tehát elsősorban nem abban rejlik, hogy ezek a változások bekövetkeznek-e. Sokkal inkább az a kérdés, hogy ezek a változások milyen ütemben mennek végbe, milyen erőmű-technológiai összetétel mellett valósulnak meg, mennyire lesz együttműködő Európa, és vajon a szükséges infrastruktúra fejlesztése képes lesz-e lépést tartani velük.

A következőkben először azokat a folyamatokat vesszük számba, amelyek 2050 felé tekintve már ma is viszonylag biztos kapaszkodónak tekinthetők. Ezt követően ennek mintegy tükörképeként azokkal a tényezőkkel foglalkozunk, amelyek kimenetelét nem ismerjük, miközben alapvetően eltérő működési környezetet hozhatnak létre a magyar villamosenergia-rendszer számára. Végül arra keressük a választ, hogyan lehet mindezt módszertanilag kezelni.

2.1. Ami a legtöbb jövőképben azonos

A különböző 2050-es jövőképek talán legerősebb közös állítása a villamos energia szerepének további növekedése. Ez elsőre magától értetődőnek tűnhet, jelentősége azonban messze túlmutat azon, hogy a jövőben egyszerűen „több áramra” lesz szükségünk. A villamos energia fokozatosan olyan közös energiahordozóvá válik, amely korábban részben elkülönülten működő ágazatokat kapcsol össze. Az elektromos közlekedés, a hőszivattyúk, az ipari elektrifikáció, az adatközpontok ellátás, vagy éppen a hidrogéntermelés mind új fogyasztói igényeket jelenítenek meg. A villamosenergia-rendszer ezért egyre kevésbé kezelhető önmagában álló infrastruktúráként: működésére mindinkább támaszkodik majd a közlekedés, a hőellátás, az ipar és részben más energiahordozók rendszere is. Ennek megfelelően az ellátásbiztonság jelentősen felértékelődik. Fontos ugyanakkor különválasztani egymástól a teljes energiafelhasználás és a villamosenergia-igény változását, a kettő ugyanis nem feltétlenül mozog azonos irányba. Több európai tanulmány jövőképe szerint a primerenergia- és a végsőenergia-felhasználás jelentősen csökken, miközben a villamosenergia-igény és különösen a rendszer csúcsterhelése növekszik.

A második közös pont a termelési szerkezet átfogó dekarbonizációja. Abban lényegesen nagyobb különbségeket találunk, hogy ezt pontosan milyen technológiai portfólió valósítja meg. Az európai jövőképek meghatározó része a fosszilis villamosenergia-termelés erős visszaszorulásával és a karbonmentes termelés

dominanciájával számol. Ehhez szorosan kapcsolódik az időjárásfüggő megújuló alapú termelés további térnyerése. Szinte valamennyi vizsgált európai jövőképből a nap- és szélenergiaforrások a termelési portfólió meghatározó elemeivé válnak. Ez alapvetően más működési környezetet jelent: a termelés mind nagyobb része olyan energiaforrásból származik majd, amelynek pillanatnyi teljesítménye elsősorban nem a fogyasztók igényétől vagy a rendszerirányító döntésétől, hanem az aktuális időjárási viszonyoktól függ. A változás ráadásul nem merül ki az energiamérleg átalakulásában. A nap- és szélenergiaforrások, valamint az akkumulátoros vagy más energiatároló rendszerek döntő része teljesítményelektronikai átalakítókra keresztül kapcsolódik a hálózathoz. Így fokozatosan megváltozik az is, ahogyan a rendszer frekvenciataartása, lengéseinek nagysága és frekvenciája, feszültség szabályozása, zárlati viselkedése vagy dinamikus stabilitása alakul. A jövő hálózatainak tehát nem egyszerűen nagyobb mennyiségű megújuló energiát kell kezelnie, hanem alkalmazkodnia kell egy egyre inkább konverterdomináns környezethez.

Ebből szinte közvetlenül adódik a jövőképek harmadik közös eleme, a rugalmasság felértékelődése. Egy olyan rendszerben, ahol a termelés és részben a fogyasztás is gyorsan és nagy tartományban változhat, a teljesítmény-egyensúly fenntartása nem alapozható néhány nagy, szabályozható erőműre. Gyors beavatkozásként energiatárolók, fogyasztóoldali befolyásolás vagy a gyorsan szabályozható termelőegységek lesznek mozgósíthatók. Többórás és többnapos tárolásra az ipari fogyasztók bevonása, a hő- vagy hidrogéntárolás, a vízerőművek és a szivattyús-tárolós erőművek kaphatnak szerepet. A szezonális eltérések kezelése pedig már egyértelműen túlnyúlik a hagyományos villamosenergia-rendszer határain és szektorok közötti összekapcsolódást tesz szükségessé. Az egyes európai modellezési eredmények pedig arra világítanak rá, hogy a rugalmasság hosszú távon nem néhány százaléknyi, marginális szerepet játszó tartalékot jelent, hanem a villamosenergia-rendszer egyik alapvető képességévé válik.

A negyedik visszatérő elem a decentralizáció, amely párhuzamosan fog zajlani az európai rendszer méretének növekedésével. A decentralizáció azt jelenti, hogy a napelemes háztartások, az akkumulátorok, az elektromos járművek, a hőszivattyúk, az energiaközösségek és a rugalmas ipari fogyasztók milliói jönnek létre. A rendszer mérete pedig az új tengeri szélenergiaforrások, az új határkeresztesítő összeköttetések és az egyenáramú kapcsolatok jóvoltából fog növekedni. A kihívást az jelenti, hogy ezek miként szervezhetők közös működési rendszerbe. Mindez az átviteli hálózati engedélyes szerepét sem feltétlenül csökkenti. Ha a rendszer számára értékes rugalmasság egyre nagyobb része az elosztóhálózatokon jelenik meg, akkor az átviteli hálózati engedélyesnek tudnia kell azt is, hogy mennyi elosztott erőforrás áll ténylegesen rendelkezésre, ezek hol helyezkednek el, milyen gyorsan aktiválhatók és aktiválásuk milyen következményekkel jár az elosztóhálózat működésére. A TSO–DSO együttműködés ezért az egyszerű információcserétől fokozatosan a közös rendszerüzemeltetés felé mozdulhat el, közös felelősségi- és munkakörnyezetbe helyezve a szereplőket.

A jövőképekben közös pontként jelenik meg a digitalizáció is. A jövő rendszere egyszerűen túl összetett lesz ahhoz, hogy kizárólag a ma megszokott információs és döntési struktúrára támaszkodva működtessük. Nagyobb mennyiségű mérés, pontosabb előrejelzések, valós idejű állapotbecslés, digitális ikrek, automatizált elemzések és mesterséges intelligenciával támogatott döntéshozatal jelenik meg szinte valamennyi szakértői jövőképből, egy olyan rendszert vetítve elélni, amely nemcsak energiát, hanem adatot is mozgat. A digitalizáció kulcsa ugyanakkor nem abban áll, hogy a humán rendszerirányítást autonóm algoritmusokkal váltsuk ki. A mesterséges intelligencia és a fejlettebb automatizálás ebben az értelemben elsősorban az üzemeltetési döntéseknél rendelkezésre álló időtávot hosszabbíthatja meg, lehetőséget adva megelőző beavatkozásokra. Másodszorban pedig ezek az új technológiák a hosszú távú, stratégiai döntések bizonytalanságát csökkenthetik.

Elkerülhetetlennek tűnik az energiaszektorok egyre szorosabb összekapcsolódása is. A hidrogén, a dekarbonizált gázok, a hő- és a villamos energia közötti kapcsolat 2050-ben várhatóan lényegesen szorosabb lesz, mint napjainkban. Például egy elektrolizáló berendezés nem csak új fogyasztó lesz, hanem üzemeltetésétől függően rugalmas terhelés, megújulóenergia-feltevő, hidrogéntermelő, közvetve pedig egy hosszabb időtávú energiatárolási lánc része is lehet. Nem véletlen, hogy az ENTSO-E hosszútávú tervezési logikája már nem egymástól független villamosenergia-, hidrogén- és metánjövőképeket vizsgál, hanem azok kölcsönhatását is igyekszik egységesen kezelni.

Végül szinte valamennyi jövőképből stratégiai szerepet kap maga a hálózat, hiszen a termelést és a fogyasztást térben és időben továbbra is össze kell kapcsolni. Az európai integráció mélyülése nem csökkenti, hanem inkább növeli a határkeresztesz infrastruktúra jelentőségét. Egyes 2050-es klímasemlegességet célzó modellek az EU27 országai között megközelítőleg 200 GW határkeresztesz-kapacitással és mintegy 1600 TWh éves bruttó villamosenergia-kereskedelemmel számolnak. A hálózat ezzel sajátos kettős szerephez kerül: egyrészt az energiaátmenet egyik legfontosabb eszköze lesz, ugyanakkor maga is könnyen szűk keresztmetszetté válhat. Ha a távvezetékek, állomások és összeköttetések lassabban épülnek, mint a hozzájuk kapcsolódó termelői és fogyasztói kapacitások, akkor nem feltétlenül a technológia vagy az energiaforrás hiánya szab majd korlátot az átmenetnek, hanem a csatlakozási és szállítási képesség is.

Mindezek alapján a 2050-es jövő legbiztosabb tulajdonsága valószínűleg az, hogy a villamosenergia-rendszer integráltabb, időjárásfüggőbb, rugalmasabb, adatintenzívebb és stratégiai szempontból még fontosabb lesz a mainál. Ez a közös mag már kellően erős ahhoz, hogy bizonyos hosszú távú képességek szükségességét ma is felismerjük. A következő kérdés ennél nehezebb: ha az alapvető fejlődési irányok ennyire hasonlóak, mitől térhetnek mégis drámaian el egymástól a 2050-re kialakuló jövőképek?

2.2. Amiben valódi bizonytalanság van

A különböző 2050-es jövőképek között talán abban találjuk a legnagyobb eltérést, hogy milyen körülmények között megy végbe az energiaátmenet. Nem mindegy ugyanis, hogy ugyanaz a nagyarányú elektrifikáció rendezett, kiszámítható és összehangolt folyamat eredménye lesz-e, avagy rövid idő alatt, földrajzilag koncentráltan és a hálózatfejlesztést megelőzve jelentkezik. Ugyanaz a megújuló részarány egészen más rendszert eredményezhet kiegyensúlyozott nap- és szélportfólió mellett, mint erősen napenergia-domináns szerkezetben. És ugyanaz a villamosenergia-igény is eltérő következményekkel jár, ha rugalmasan vezérelhető ipari fogyasztókhoz kapcsolódik, mint ha változatlanul merev terhelésként jelenik meg.

Az első nagyobb kérdéskört a bizonytalanságok kapcsán az átmenet sebességéhez és térbeli szerkezetéhez köthető. Az elektrifikáció mint technológiai irány jól kijelölhető, mélysége és időbeli lefutása azonban már lényegesen kevésbé. Mekkora részben válik elektromossá a közlekedés és a hőellátás? Milyen gyorsan valósulnak meg az ipari elektrifikációs beruházások? Hol jelennek meg az új adatközpontok, akkumulátorgyárak vagy hidrogéntermelő létesítmények? Néhány, ugyanazon térségben rövid idő alatt megjelenő nagyberuházás egészen más hálózatfejlesztési szükségletet eredményezhet, mint ugyanekkora többletigény térben és időben elosztott megjelenése. Hasonló bizonytalanságot hordoz a megújuló termelési portfólió összetétele is. Abban viszonylag nagy az egyetértés, hogy a nap- és széltermelés súlya növekedni fog. A két technológia egymáshoz viszonyított aránya, térbeli elhelyezkedése, a tengeri széltermelés szerepe vagy az ezeket kiszolgáló hálózati infrastruktúra azonban már korántsem tekinthető hasonlóan biztosnak.

A következő kérdés az, hogy a rendszer rugalmassága képes-e lépést tartani az időjárásfüggő termelés és az új fogyasztók növekedésével. A hosszú távú jövőképek ezen a téren kifejezetten széles eszköztárral számolnak: akkumulátorokkal, fogyasztói beavatkozással, elektromos járművekkel, hőtárolással, elektrolizálókkal, szabályozható erőművekkel, hidrogénnel és természetesen az energiakereskedelem eszközeivel. A rugalmasság ugyanakkor csak akkor válhat valódi rendszererőforrássá, ha tudjuk, hol található, milyen irányban képes módosítani teljesítményét, milyen gyorsan reagál, mennyi ideig képes fenntartani a szolgáltatást és mekkora valószínűséggel áll rendelkezésre éppen akkor, amikor szükség van rá. A fizikai eszközök mellett megfelelő piacokra, azt kiszolgáló szervezeti egységekre és folyamatokra és egyértelmű felelősségi struktúrákra is szükség van. Ehhez szorosan kapcsolódik a decentralizáció mélységének kérdése is. Elképzelhető olyan jövő, amelyben a háztartási és elosztóhálózati erőforrások jelentős része aktívan reagál az árakra és a rendszer állapotára, aggregátorok szervezik őket portfóliókba, szolgáltatásaik pedig az átviteli szint számára is hozzáférhetők. De ugyanilyen könnyen elképzelhető olyan út is, ahol a decentralizált eszközök száma gyorsan nő, koordinációjuk, megfigyelhetőségük és tényleges rendszerintegrációjuk azonban ettől jóval elmarad.

A harmadik nagy bizonytalanságot a megbízhatóan rendelkezésre álló kapacitások jövője jelenti. Egy időjárásfüggő termelésre erősen támaszkodó rendszerben továbbra is szükség lesz olyan erőforrásokra, amelyek a tartósan alacsony, akár zérus nap- és széltermeléssel járó időszakokban is biztosítani képesek az ellátást. Az azonban már korántsem egyértelmű, hogy ezt milyen technológiai portfólió fogja megteremteni és ez milyen társadalmi költségen lesz megvalósítható. A bizonytalanság itt sem kizárólag technológiai eredetű. Egy nagy erőművi vagy átviteli beruházás többéves késése önmagában is érdemben módosíthatja a rendszer ellátásbiztonsági helyzetét. A hosszú távú stratégia szempontjából ezért fontos kérdés, hogyan működik a rendszer akkor, ha egy beruházás később készül el, más technológiával valósul meg vagy végül egyáltalán nem jön létre.

Európa mai villamosenergia-rendszerének működése szoros regionális integrációra épül. Számos 2050-es jövőkép ennek további mélyülésével számol. Ugyanakkor a geopolitikai konfliktusok, az ellátásbiztonsági megfontolások, a stratégiai autonómia felértékelődése vagy egyszerűen a politikai széttagolódás ismét erősítheti a nemzeti és regionális önellátás szerepét. Magyarország szempontjából ez különösen fontos kérdés. Egy erősen összekapcsolt európai rendszerben a földrajzi diverzitás, a nagyobb piac és a határkeresztesző rugalmasság komoly értéket képvisel. Egy széttagoltabb környezetben azonban veszélyes lehet abból kiindulni, hogy az importkapacitás vagy a külföldön rendelkezésre álló tartalék minden kritikus helyzetben automatikusan igénybe vehető. Az erős regionális integráció ebből a szempontból egyszerre lehet a reziliencia, azaz az ellenálló képesség egyik fontos forrása és egy új típusú függőség létrehozója. Közvetlenül ide kapcsolódik a hidrogén és az importált energiahordozók jövőbeni szerepe is: egy erősen európai termelésre építő jövőkép jelentős elektrolizálókapacitást, megújuló termelést és belső energetikai infrastruktúrát kíván.

Bizonytalanságokat fedezhetünk fel a fizikai infrastruktúra megvalósíthatóságához kapcsolódóan is. Egyáltalán nem magától értetődő azonban, hogy az új távvezetékek, állomások, határkeresztesző összeköttetések és erőművek ugyanolyan ütemben meg is épülnek, ahogyan arra az energetikai modellek szerint szükség lenne. Az engedélyezés, a társadalmi elfogadás, a nyomvonal, a finanszírozás, a kivitelezői kapacitások, a megfelelően képzett munkaerő, valamint a nyersanyagok és a kritikusan fontos berendezések ellátási láncai egyaránt korlátozó tényezővé válhatnak. A rendszer jövőjét ezért nemcsak az határozza meg, hogy műszakilag mit lenne célszerű megépíteni, hanem legalább ennyire az is, hogy mindebből mit lehet és mit tudunk ténylegesen és időben megvalósítani.

Végül pedig két, egymással egyre szorosabban összekapcsolódó bizonytalansági területről kell beszélnünk: ezek a klímaváltozás és a digitalizáció. Azt viszonylag biztosan állíthatjuk, hogy a villamosenergia-rendszer időjárási kitettsége növekedni fog. Sokkal kevésbé látjuk azonban biztosan, hogy az egyes szélsőséges események milyen regionális gyakorisággal és intenzitással jelentkeznek majd, illetve mennyire válnak térben korrelálttá. Ugyanez igaz a digitalizációra is. A digitális technológiák további terjedése aligha kérdéses, érettségük, megbízhatóságuk, szabályozási környezetük és kiberbiztonsági kitettségük azonban már sokkal kevésbé jelezhető előre.

A 2050-es rendszer bizonytalansága nem egyszerűen abból fakad, hogy sok olyan változó van, amelynek jövőbeni értékét nem ismerjük. A nehézséget az jelenti, hogy ezek a bizonytalanságok egymással is kölcsönhatásba lépnek. Nem feltétlenül arra kell tehát választ keresnünk, hogy az egyes tényezők közül melyik milyen valószínűséggel következik be, és végül melyik jövőkép lesz a „legvalószínűbb”. Sokkal inkább arra, hogy milyen döntéseket tudunk ma meghozni úgy, hogy azok több, egymástól érdemben eltérő jövőben is elfogadható eredményt adjanak. Innen vezet tovább gondolatmenetünk a kockázatkezelési tervekhez és a robusztus döntéshozatal módszertanához.

2.3. Stratégiák a változó világban

A hagyományos tervezési módszertanok logikája egyszerű: megpróbáljuk előre jelezni a jövőbeni körülményeket, megkeressük az ezekhez legjobban illeszkedő megoldást, majd érzékenységvizsgálatokkal ellenőrizzük, mi történik akkor, ha valamelyik feltételezésünk kissé eltér a várttól. Ez a gondolkodás jól működik olyan problémáknál, ahol a változók viszonylag szűk tartományban mozognak, a bekövetkezési valószínűségek elfogadható pontossággal becsülhetők, és magának a rendszernek a működését is kellően jól ismerjük. Aligha sorolható azonban ebbe a kategóriába jövőképet alkotni 2050-re, ahol sok esetben még abban sincs egyetértés, hogy mely folyamatok lesznek meghatározók, milyen technológiák állnak majd rendelkezésre, milyen szakpolitikai és geopolitikai környezetben kell működtetnünk a rendszert, vagy akár abban, hogy a ma használt modellek milyen mértékben írják le helyesen a jövő működését. A döntéstámogatási szakirodalom ezt nevezi nagyfokú bizonytalanságnak, az angol terminológiában *deep uncertainty*-nek.

2.3.1. Nem megjósolni, hanem kezelni

Mit tehetünk akkor, ha a bizonytalanságot nem tudjuk egyszerűen egy valószínűségi eloszlás mögé rejtetni? Az egyik lehetséges megoldás a nagyfokú bizonytalanság melletti döntéshozatal módszertani családja, ezen belül pedig a robusztus döntéshozatal. Ennek kiindulópontja, hogy ne próbáljuk mindenáron kiválasztani azt az egyetlen jövőt, amelyet a legvalószínűbbnek gondolunk. Vizsgáljuk inkább meg, hogy a ma meghozható döntéseink hogyan viselkednek sok, egymástól érdemben különböző, de még hihető jövőben. Klasszikus optimalizálási problémák esetén azt keressük, hogy melyik megoldás teljesíti a legjobban az általunk előre jelzett körülmények között. Robusztus döntéshozatal esetén a kérdés inkább az, hogy milyen körülmények között kezd elfogadhatatlanul működni a stratégiánk? Ha ezeket a sebezhetőségeket sikerül azonosítani, akkor olyan döntési portfólió alakítható ki, amely egyetlen konkrét jövőben talán nem matematikailag vagy gazdaságilag optimális, viszont az elképzelhető jövők lényegesen szélesebb körében ad elfogadható eredményt.

Az energetikai infrastruktúrák esetében ennek különös jelentősége van. Egy távvezeték, alállomás vagy akár egy rendszerirányítási képesség élettartama évtizedekben mérhető. Kevésbé megnyugtató ezért olyan beruházást választani, amely egyetlen 2050-es modellállapotban kiválóan működik, néhány alapfeltevés megvál-

tozásával azonban gyorsan elveszíti értékét. Sokkal érdekesebb lehet az a fejlesztés, amely több különböző keresleti, termelési és geopolitikai környezetben is hasznos marad. Ugyanez igaz a döntések által nyitva hagyott lehetőségekre is. Értéket jelenthet például egy olyan nyomvonal biztosítása, amely később többféleképpen használható; egy eleve bővíthető alállomás; egy összekapcsolható adatkezelési rendszer vagy olyan csatlakozási követelmények kialakítása, amelyek nem zárják ki idő előtt valamely technológia későbbi alkalmazását.

A robusztus döntéshozatal ezért elemzések és szakértői egyeztetések ismétlődő sorozatát teszi szükségessé. Meg kell határoznunk, mely bizonytalanságokat tekintjük lényegesnek, milyen döntések állnak rendelkezésünkre, hogyan írható le a rendszer működése, illetve milyen mutatók alapján tekintünk egy eredményt sikeresnek vagy elfogadhatatlannak. Ezt követően különböző feltételek mellett tesztelhetjük a stratégiákat, majd az eredmények alapján azonosíthatjuk azokat a helyzeteket, ahol valamely döntés sebezhetővé válik. Innen újabb kör indulhat: módosíthatjuk a stratégiát, új bizonytalanságokat emelhetünk be vagy pedig részletesebben vizsgálhatjuk azokat a területeket, amelyek kritikusnak bizonyultak, és újra meg kell vizsgálni a stratégia ellenálló képességét mértékadó stresszhelyzetekben.

2.3.2. Az XLRM-mátrix: négy kérdés a bizonytalanság rendezésére

A robusztus döntéshozatal egyik gyakran alkalmazott kiindulási kerete az úgynevezett XLRM-mátrix, mely négy, meglehetősen egyszerű kérdést választ szét: mit nem tudunk irányítani, mivel tudunk beavatkozni, hogyan kapcsolódnak egymáshoz ezek a tényezők, és végül milyen eredmények alapján ítéljük meg, hogy jól döntöttünk-e.

Az **X** (*exogenous uncertainties* – külső bizonytalanságok) azokat a tényezőket jelenti, amelyeket a döntéshozó közvetlenül nem képes irányítani. Ide tartozik például a geopolitikai környezet, a gazdasági növekedés, a villamosítás növekedésének sebessége, a klimatikus körülmények vagy éppen egy új technológia piaci elterjedése.

Az **L** (*Levers* – beavatkozási lehetőségek) ezzel szemben azokat a lehetőségeket foglalja össze, amelyek felett már van döntési szabadságunk, amelyek alkalmazása már a döntéshozók megítélésétől függ. Ilyen lehet a hálózatfejlesztés, a csatlakozási feltételek módosítása, a rugalmassági programok kialakítása, a regionális együttműködés erősítése, a digitalizáció vagy valamely reziliencianövelő intézkedés.

Az **R** (*Relationships* – kapcsolatok) a rendszer működését leíró kapcsolatokat és modelleket jelenti. Ezek mutatják meg, hogy egy adott külső környezet és egy választott beavatkozás együttesen milyen következményhez vezet. Villamosenergia-rendszerre alkalmazva ebbe a körbe tartozhatnak hálózati, és piaci modellek, kapacitásmegfelelőségi vizsgálatok, szimulációk vagy ezek összekapcsolt változatai.

Végül az **M** (*Metrics* – mérőszámok) a teljesítménymutatók köre. Ezek alapján döntjük el, hogy az adott stratégia elfogadhatóan működik-e. Ide tartozhat az ellátásbiztonság, a költség, a túlterhelések gyakorisága, a megújuló alapú termelés korlátozása, a kibocsátás vagy valamely rezilienciamutató.

Az XLRM-mátrix alkalmazásának egyik legfontosabb hozadéka tehát a döntési tér rendezése. Világosan szétválasztja azt, amit befolyásolni tudunk és azt, amit nem. Egy rendszerirányító nem döntheti el, milyen geopolitikai környezet alakul ki Európában 2050-ben. Azt sem, hogy milyen gyakorisággal következnek majd be szélsőséges időjárási események. Dönthet viszont arról, mennyire diverzifikált hálózatot épít, milyen tartalékokat tart fenn, mennyire teszi megfigyelhetővé a rendszert, illetve milyen együttműködési és adatkapcsolatok kialakítására készül fel, milyen biztonságra méretezi az átviteli hálózatot. A stratégiai cél

ezért nem az X-ek megszüntetése, hanem annak a lehetőségnek a csökkentése, hogy kedvezőtlen alakulásuk jelentős mértékben képes legyen veszélyeztetni a rendszer működését.

2.3.3. Az X-ek: tizennégy bizonytalansági tényező, amelyeket nem hagyhatunk figyelmen kívül

A nemzetközi jövőképek és a magyar villamosenergia-rendszer hosszú távú kérdéseinek összevetése tizennégy olyan külső bizonytalansági tényezőt rajzol ki, amelyek érdemben módosíthatják a 2050-ig vezető utat.

Az európai és regionális koordináció mértéke ▼ A kérdés az, hogy 2050 felé egy egyre mélyebben integrált európai energiarendszer alakul-e ki, vagy az energiabiztonság, a geopolitikai feszültségek és a stratégiai autonómia felértékelődése ismét erősebb nemzeti és regionális megoldások felé tereli az országokat. A régiók között lesz-e zavar esetén igénybevehető, váltakozó áramú vagy egyenáramú összeköttetés. Magyarország számára ennek közvetlen rendszerüzemeltetési jelentősége van, hiszen a határkeresztesző kereskedelem, a tartalékmegosztás, az üzemviteli biztonság és a regionális infrastruktúra ma is szerves részét képezi a villamosenergia-rendszer működésének.

A magyar gazdasági és iparszerkezeti pálya ▼ Egészen más villamosenergia-igényt eredményez egy mérsékelt növekedésű gazdaság, mint egy intenzív iparosítási folyamat, amely nagy adatközpontok vagy villamosenergia-igényes ipari klaszterek megjelenésével jár. Ráadásul nemcsak az országos energia-kereslet nagysága számít, hanem annak térbeli koncentrációja és időbeli megjelenése is.

A hazai és európai szakpolitikai ösztönzők stabilitása ▼ A támogatási rendszerek, tarifák, engedélyezési szabályok és uniós források gyorsíthatják vagy lassíthatják a megújuló alapú termelés, az elektromobilitás, a hőszivattyúk vagy az energiahatékonysági beruházások terjedését. Ezek felett a rendszerirányítás és a hálózattervezés közvetlen kontrollja korlátozott, hatásuk azonban végül fizikai igényként jelenik meg a hálózaton.

A nagyfogyasztói csatlakozási igények tényleges megvalósulása ▼ Egy bejelentett beruházás és egy meghatározott időpontban valóban üzembe álló nagyfogyasztó hatása között jelentős különbség lehet. Az új ipari fogyasztók, adatközpontok vagy elektrolizálók helye és megvalósulási üteme ezért a hálózatfejlesztés egyik legerősebb bizonytalansága.

A következő bizonytalanságok már közvetlenebbül kapcsolódnak magának a villamosenergia-rendszernek az átalakulásához.

A végfelhasználási elektrifikáció mélysége ▼ Milyen gyorsan és milyen mélységben terjed el a közlekedésben, a hőellátásban, az iparban és a lakosság körében a villamosenergia-felhasználás?

A decentralizáció, a fogyasztói aktivitás és az elosztói szintű rugalmasság ▼ Egy nagymértékben decentralizált rendszer önmagában még nem jelent nagy rendszerszintű rugalmasságot. Döntő kérdés, hogy az elosztott erőforrások kommunikálnak-e a rendszerrel, összefoghatók-e, az általuk nyújtott szolgáltatások hitelesíthetők-e, és az átviteli, illetve elosztói szereplők mennyire tudják őket koordináltan használni.

Az időjárásfüggő megújuló portfólió szerkezete és térbeli eloszlása ▼ A megújuló alapú termelés további növekedését viszonylag biztosnak tekinthetjük. A nap- és szélerőművek aránya, földrajzi koncentrációja és

hálózati elhelyezkedése azonban már jóval kevésbé kiszámítható. Ez egyidejűleg befolyásolja a hálózatfejlesztési igényt, a tartalékokat és a rendszer dinamikai viselkedését.

A rendszerszintű rugalmasság tényleges rendelkezésre állása ▼ Kérdés, hogy a telepített potenciálokból mennyi mobilizálható megbízhatóan. Az eszközök mellett a piacok, az összefogás, a TSO–DSO koordináció, a kommunikáció és a szabályozás együtt dönti el, hogy az elméleti potenciál valóban aktiválható-e.

A hazai megbízhatóan rendelkezésre álló kapacitások és a nagy erőművi projektek időzítése ▼ Atomerőművi, gázerőművi vagy más szabályozható kapacitások belépési és kilépési időpontjai alapvetően módosíthatják a kapacitásmegfelelőségi helyzetet. Egy hosszú távú stratégiának ezért nemcsak a tervezett végállapotra, hanem a késésekre és az esetleges átmeneti kapacitáshiányokra is választ kell adnia.

A regionális határkeresztező infrastruktúra és az importképesség ▼ Az összeköttetések fejlődése növelheti a földrajzi diverzitást és a rendszer rugalmasságát, csúszásuk viszont nagyobb hazai kapacitásigényt eredményezhet.

A hidrogén, az e-üzemanyagok és a földgáz jövőbeni szerepe ▼ Ez egyszerre keresleti, rugalmassági és geopolitikai bizonytalanság. A hidrogén belföldön jelentős villamosenergia-fogyasztással állítható elő vagy érkezik importként, felhasználható ipari alapanyagként vagy hosszabb energiatárolási lánc részeként. Mindeközben a földgáz szerepe visszaszorulhat, de egyes esetekben hosszabb ideig fennmaradhat biztonsági vagy rugalmassági tartalékként.

Az utolsó három bizonytalanság már közvetlenül a rendszer nagyobb rezilienciájához vezet.

A klímaváltozásból fakadó időjárási szélsőségek és terhelési mintázatok bizonytalansága ▼ A hőmérséklet, a szél, a jegesedés, a csapadék és más szélsőséges események egyszerre befolyásolhatják a hálózat fizikai állapotát és terhelhetőségét, a termelést és a fogyasztást. Hosszú távon ezért nemcsak az átlagos klímaváltozással kell számolnunk, hanem azokkal a ritka, esetenként nagy területet egyszerre érintő stresszhelyzetekkel is, amelyek egy hagyományos tervezési modellben könnyen elvesznek az átlagok között.

A mesterséges intelligencia, a digitalizáció és a kiberreziliencia érettsége ▼ A fejlett digitális rendszer jelentősen növelheti a megfigyelhetőséget, javíthatja az előrejelzéseket és segítheti a meglévő infrastruktúra jobb kihasználását. Ugyanez a digitalizáció azonban új függőségeket és támadási felületeket is teremt. Igen fontos kérdés, hogy ezek a megoldások mennyire lesznek megbízhatók, auditálhatók és biztonságosak vagy incidenstűrők.

A hálózatfejlesztés engedélyezésének, társadalmi elfogadásának és az ellátási láncoknak az alakulása ▼ Ez az aspektus köti össze legközvetlenebbül az energetikai modellek világát a fizikai valósággal. Létrehozhatunk ugyanis olyan 2050-es célállapotot, amely műszakilag teljesen konzisztens, miközben a hozzá szükséges eszközök nem készülnek el időben. Ilyen esetben már maga a megvalósítási képesség válik szűk keresztmetszetté.

2.3.4. Tizennégy változóból négy jövődimenzió

A tizennégy bizonytalansági tényező együtt már nehezen kezelhető kombinatorikus teret eredményez. A következő lépés ezért ennek a bizonytalansági térnek a szűkítése. Erre kínál megoldást az általános morfológiai elemzés. Ez a módszer néhány, egymástól lehetőleg jól elkülönülő dimenziót választ ki, majd mindegyikhez

néhány alternatív állapotot rendel hozzá. A cél az, hogy viszonylag kis számú dimenzió kombinációjából is egymástól valóban eltérő, mégis belsőleg következetes jövőképeket lehessen létrehozni. A magyar villamosenergia-rendszer 2050-es környezetére négy ilyen dimenziót választottunk ki.

Az európai-regionális koordináció és energiaszuverenitási környezet ▼ Ez azt írja le, milyen külső energetikai térben működik majd Magyarország. Egyik állapota a koordinált európai *net-zero* integráció, mély piaci és infrastrukturális együttműködéssel, erős határkeresztező kapcsolatokkal, valamint összehangolt villamosenergia-, hidrogén- és más energiahordozó-rendszerekkel. Ettől eltérő pálya a reziliencia- és energiaszuverenitás-központú Európa, ahol az együttműködés fennmarad, de nagyobb szerepet kap az önállóság, a stratégiai autonómia és az importfüggőség mérséklése. A harmadik lehetőség a széttagolt vagy erősen külső kitettségű átmenet, gyengébb koordinációval, nagyobb geopolitikai és importkockázattal, illetve erősebb áringadozással.

A hazai villamosítási és ipari keresleti nyomás ▼ Ez a magyar rendszer fogyasztói oldalát foglalja egyetlen tengelybe. A mérsékelt és stabilizált keresleti pályán az elektrifikáció fokozatosan terjed, a bejelentett nagyfogyasztói beruházásoknak pedig csak egy része valósul meg. A célkompatibilis, dinamikus elektrifikáció már erős, de még kezelhető keresletnövekedéssel számol az ipar, az elektromobilitás, a hőszivattyúk és más villamosenergia-alapú technológiák terjedése miatt. A harmadik állapot magas keresleti stresszt jelent: újraiparosítás, adatközpontok, mesterségesintelligencia-alkalmazások, hidrogéntermelés és nagy fogyasztói klaszterek gyors, területileg koncentrált felfutásával számol.

A rugalmasság, decentralizáció és digitális rendszerintegráció érettsége ▼ Mindez azt mutatja meg, mennyire tudja a rendszer a megjelenő új erőforrásokat ténylegesen koordinálni. A passzív, rugalmatlan rendszerben korlátozott a fogyasztó oldali befolyásolás lehetősége, gyenge az aggregáció és alacsony az elosztói erőforrások rendszerirányítói láthatósága. A részben integrált, eszköz-vezérelt rugalmasság világában már jelentős akkumulátoros, ipari és hagyományos szabályozható kapacitások állnak rendelkezésre, de ezek még nem alkotnak egységes működési rendszert. A harmadik állapot egy digitális, aggregált „rendszerek rendszere”, amelyben a TSO–DSO adatplatformok, az elosztott erőforrások, az elektromos járművek, hőszivattyúk, elektrolizálók, digitális ikrek és aktív rugalmassági piacok már közös működési ökoszisztémát alkotnak.

A fizikai infrastruktúra és megbízhatóan rendelkezésre álló kapacitások megvalósulási képessége ▼ A négy dimenzió közül talán a legkézzelfoghatóbb. Az egyik állapotban az infrastruktúra és a megbízhatóan rendelkezésre álló kapacitások lépést tartanak az átalakulással: a szükséges hálózatok, összeköttetések, szabályozható források, új FACT-eszközök, tárolók és üzemirányítási képességek megfelelő ütemben fejlődnek. A másik állapotban hálózati és megbízhatóan rendelkezésre álló kapacitási szűk keresztmetszetek alakulnak ki. Nem feltétlenül azért, mert nem ismertük fel időben a szükséges beruházásokat. Elképzelhető, hogy engedélyezési, finanszírozási, társadalmi, kivitelezési vagy ellátásiláncbeli korlátok miatt egyszerűen a fizikai rendszer marad le a termelési és fogyasztási oldal változásától.

A négy dimenzióhoz tartozó 3 3 3 2 lehetséges állapot összesen 54 elméleti kombinációt eredményez. Ezek bekövetkezési valószínűsége természetesen nem egyforma. Bizonyos állapotok kölcsönösen erősítik egymást, mások nehezen képzelhetők el ugyanabban a jövőképben. A morfológiai elemzés ezért keresztkonzisztencia vizsgálattal folytatható. Ennek során azt értékeljük, hogy az egyes állapotpárok mennyire illeszkednek egymáshoz, illetve mennyire képesek ugyanabban a világban tartósan együtt létezni. Ebben az értelemben a jövőképek nem előrejelzések vagy egymással versengő fejlesztési tervek, hanem olyan stresszhelyzetek, amelyben kipróbálhatjuk, hogyan viselkednek a ma rendelkezésünkre álló döntési

lehetőségek. A jövő ilyen értelemben kevésbé hasonlít egy térképen kijelölt célpontra, mint egymást követő elágazások sorozatára.

A következő fejezetben ezért már nem azt keressük, hogy melyik jövő a legvalószínűbb, hanem próbára tesszük a magyar villamosenergia-rendszer hosszú távú stratégiáját. Három plauzibilis, de feszített jövő-képet vázolva keressük a választ, arra, hogy mi történik akkor, ha a digitális képességek gyorsabban fejlődnek, mint a fizikai infrastruktúra? Mi történik, ha egy magas szinten integrált rendszer működése egyre nagyobb mértékben adatokba és automatizált döntésekbe vetett bizalomra épül? És hogyan változnak a szükséges döntések akkor, ha az energiaátmenetet geopolitikai széttagoltság és tartós értéklánckorlátok között kell végrehajtani?

3. Három lehetséges 2050-es jövőkép

2025-ös kiadványunk egyik fontos következtetése az volt, hogy a villamosenergia-hálózat jövőjéről nem gondolkozhatunk pusztán a következő néhány beruházási ciklus időtávján. Az infrastruktúra több évtizedes élettartama, a beruházások hosszú előkészítési és megvalósítási ideje, valamint az energiaátmenet gyorsasága miatt aligha lenne célszerű egyetlen kitüntetett jövőképet kijelölni. A következőkben bemutatott három világ ezért nem előrejelzés, hanem három stresszteszt.

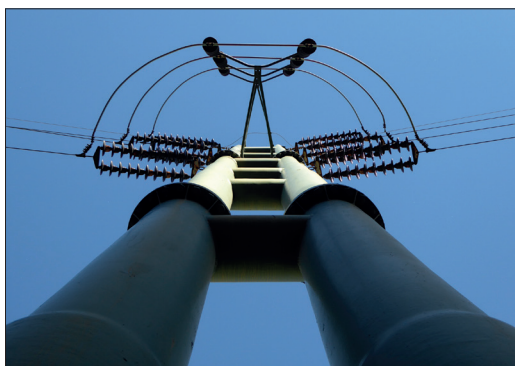
Kettő közülük, a fizikai alkalmazkodási rés (3.1. *alfejezet*) és a digitális bizalomra épülő energiarendszer (3.2. *alfejezet*) ugyanannak az alapvetően sikeres európai energiaátmenetnek két eltérő változatát mutatja. Mindkét világban előrehalad az elektrifikáció, fennmarad a regionális együttműködés, és a villamosenergia-rendszer magas digitális érettséget ér el. A lényegi különbséget a megvalósítás sebessége adja: képes-e a fizikai infrastruktúra lépést tartani a rendszer egyéb részeinek átalakulásával? A harmadik jövőkép szerint (3.3. *alfejezet*), az értékláncszorítás világában ennél mélyebben változik meg a környezet. Az elektrifikáció továbbra is előrehalad, de már egy széttagoltabb Európában, nagyobb geopolitikai és értéklánc-kitettség mellett. Ebben a világban a legfontosabb kérdés az lesz, hogy a kívánt jövőkép megvalósításhoz szükséges berendezések, nyersanyagok, gyártókapacitások és ipari képességek megfelelő időben és megfelelő mennyiségben rendelkezésre állnak-e.

A három jövőkép ilyen értelemben közvetlen folytatása a 2025-ös kiadványunkban megfogalmazott kérdésnek. Akkor azt vizsgáltuk, hogyan kell megújítani egy olyan rendszert, amelynek jelentős része egy korábbi korszak műszaki, gazdasági és társadalmi feltételei között alakult ki. Most egy lépéssel tovább megyünk és arra keressük a választ, milyen eltérő rendszerekhez vezethet maga az átalakulás, és mi történik akkor, ha 2050 felé haladva nem ugyanott jelenik meg a szűkösség.

3.1. Fizikai alkalmazkodási rés

Első pillantásra ez a jövőkép nem is tűnik kedvezőtlennek. Európa alapvetően együttműködő marad, a klímasemlegességi átmenet előrehalad, Magyarország elektrifikációja dinamikus, miközben a villamosenergia-rendszer digitalizációja és rugalmassági képessége is lényegesen magasabb szintet ér el a mainál. A feszültséget a negyedik dimenzió teremti meg: a hálózati infrastruktúra és a megbízhatóan rendelkezésre álló kapacitások fejlesztése tartós szűk keresztmetszetekbe ütközik.

Ez a világ azért különösen érdekes, mert az energiaátmenet egyik könnyen háttérbe szoruló sajátosságát teszi láthatóvá. A gazdaság, a fogyasztói igények és a digitális technológia lényegesen gyorsabban változhatnak, mint a fizikai infrastruktúra. 2050-re a villamosenergia-rendszer várhatóan sokkal nagyobb szerepet tölt be a gazdaság egészében: nagy villamosenergia-igénnyel jelentkezik a közlekedés, a hőellátás és számos ipari folyamat, miközben új fogyasztási igényként megjelenik például a hidrogéntermelés is. A jövőkép alapjául szolgáló európai hosszú távú elképzelések nagyságrendjét jól érzékelteti, hogy egyes klímasemleges pályákon az EU27 villamosenergia-igénye 2050-re az 5000 TWh-t is meghaladhatja, ami körülbelül 85%-os növekedést jelent.



1. ábra.

Múlt és jelen (Forrás: Fortepan 43559 / Konok Tamás id; Fortepan 26445 / Domonkos Éva; Wikimedia Commons, Yoshieslunchbox; Wikimedia Commons, Mariojan photo)

Ezt a feszültséget már 2025-ös kiadványunkban is előrevetítettük. Magyarország villamosenergia-hálózata maga is több technológiai korszak örökségét hordozza. A mai topológia alapjai nagyrészt az 1950-es és 1960-as évek fejlesztései során alakultak ki. Bár az átviteli alállomások rekonstrukciója jelentős részben megtörtént, a távvezetékek korszerűsítése továbbra is folyamatban van. A kisebb feszültségszinteken pedig ma is jelentős számban üzemelnek ötven-hatvanéves hálózati elemek. Korábbi kiadványunk arra is rámutatott, hogy egyes, korábbi hőmérsékleti és terhelési viszonyokra méretezett 132 kV-os vezetékek már napjainkban is szűk keresztmetszetként jelenhetnek meg az új igények kiszolgálásában. A fizikai alkalmazkodási rés bekövetkezésekor ez a meglévő infrastruktúra találkozik egy gyorsan elektrifikálódó gazdasággal. Nem arról van szó, hogy 2050-re egyszerűen „elfogy” a magyar hálózat, hanem hogy a rendelkezésre álló fizikai mozgástér tartósan kisebb lehet annál, mint amit az energiaátmenet optimális végrehajtása igényelne. Egyes térségekben a csatlakozási kapacitás válhat szűkössé, máshol az országon belüli transzfer növekszik gyorsabban, mint az azt kiszolgáló infrastruktúra. A probléma ezért nem pusztán mennyiségi, hanem erősen térbeli természetű is.

A jövőkép feszültségét tovább növeli, hogy mindeközben a rendszer digitális oldalról kifejezetten fejlett. A villamos járművek, akkumulátorok, ipari fogyasztók, épületek és más decentralizált erőforrások jelentős része összefogható. A TSO és a DSO között intenzív információcsere működik, a hálózat állapotáról pedig a mainál nagyságrendekkel több adat áll rendelkezésre. A rendszer egyre pontosabban képes előre jelezni a várható szűkületeket, és egyre több beavatkozási lehetőséggel rendelkezik azok kezelésére. Az információ ugyanakkor nem helyettesítheti az infrastruktúrát, legfeljebb időt biztosít és mozgásteret növel.

Éppen ezért felértékelődik a meglévő infrastruktúra intelligensebb használata. A dinamikus távvezeték-terhelhetőség, az új típusú ACCC-sodronyok (*Aluminum Conductor Composite Core*), a fejlett állapotbecslés, a topológia rugalmas kezelése, rendszer-automatikák alkalmazása, amelyek a folyamatos ellátást tesznek lehetővé $n-1$ hiba esetében, a teher újraelosztása, a lokációérzékeny rugalmasság, az időjárás-előrejelzésekre épülő preventív üzemvitel vagy a tudatosan viselt kockázat vállalása mind ugyanabba az irányba mutatnak: ugyanabból a fizikai hálózathoz nagyobb értéket próbálunk kinyerni. A jövőkép egyik legfontosabb kérdése azonban éppen az, hogy meddig tehetjük ezt meg. Egy átmeneti szűkület kezelhető fogyasztói rugalmassággal vagy dinamikus terhelhetőséggel. Egy tartósan elégtelen átviteli kapacitást azonban ezek az eszközök nem feltétlenül képesek kiváltani.

A 2025-ös kiadvány gördülő tervezésről szóló gondolatmenete ebben a jövőképben különös jelentőséget kap. Az új hálózati elemek megvalósítása hosszú időt igényel, miközben egy naperőmű, akkumulátor vagy nagyfogyasztó ennél lényegesen gyorsabban jelenhet meg a rendszerben. A különböző technológiák tehát eltérő sebességgel alakítják ugyanazt az infrastruktúrát. Ha a hálózatfejlesztés túl későn reagál, a hálózat már nem egyszerűen követi az energiaátmenetet, hanem korlátozni kezdi azt. Ha viszont minden bizonytalan jövőbeli igényre előre túlméretezett infrastruktúrával válaszolunk, könnyen jelentős, részben kihasználatlan beruházásokat hozhatunk létre.

A stratégiai feladat ezért annak felismerése, hogy mely fejlesztések maradnak hasznosak több eltérő jövőben is, mely beruházások bővíthetők később, és mely döntéseket érdemes addig nyitva hagyni, amíg több információ áll rendelkezésre. A fizikai szűkösség ráadásul nem választható el a környezeti feltételek változásától sem. A hálózat jelentős része több évtizedig működik, ezért a ma megépített infrastruktúra élettartamának számottevő részét már a század közepének éghajlati viszonyai között tölti. A korábbi méretezési feltételek egy része a változó klíma mellett korláttá válhat. Ebben a jövőképben pedig ez a probléma felnagyítva jelenik meg: egy eleve magas kihasználtságú rendszerben néhány, szélsőséges időjárás miatt kieső kritikus hálózati elem is lényegesen kisebb fizikai tartalékot hagy az áramlások átrendezésére.

A fizikai alkalmazkodási rés e tekintetben nem egy sikertelen, hanem egy részben sikeres energiaátmenet képe. Ebben fel kell ismerni, hogy mely korlátokat tudjuk valóban „okosabban” kezelni, és melyeket lehet csak „vassal” feloldani.

3.2. Digitális bizalomra épülő energiarendszer

Második jövőképünk ugyanabból a kiindulópontból indul, mint a fizikai alkalmazkodási rés, ám egy meghatározó különbség van a két változat között. Európa együttműködő marad, az elektrifikáció dinamikusan halad előre, a rugalmasság magas szinten digitalizált és aggregált, akárcsak az első elképzelés szerint. A második jövőkép szerint azonban a fizikai infrastruktúra és a megbízhatóan rendelkezésre álló kapacitások is képesek lépést tartani a változással. A kedvező jövőkép azonban láthatóvá tesz egy kevésbé kézzel-

fogható problémát: minél több feladatot bízunk egy jól működő digitális energiarendszerre, annál nagyobb részben függünk olyan folyamatoktól, amelyek helyes működésében meg kell bízunk.

2025-ös kiadványunkban ennek a jövőképnek az alapjai is kirajzolódtak. Az intelligens hálózatot kétirányú kommunikáció, nagyfokú megfigyelhetőség, automatizált vezérlés és egyre inkább elosztott működés jellemzi. A rendszer folyamatosan adatot gyűjt a termelőkről, a fogyasztókról és a hálózati elemekről, továbbítja és feldolgozza ezeket az információkat, értékeli a rendszer állapotát, majd automatikusan vagy humán döntés alapján beavatkozik. Mindez az elosztóhálózatokon valóban jelentős paradigmaváltást jelent, miközben az átviteli rendszer évtizedek óta nagymértékben mérhető és távvezérelhető infrastruktúra.



2. ábra. Elektromos autó töltése (Forrás: Wikimedia Commons, Tom Ackroyd)

2050-re a TSO már nem csak a nagy erőművek és a nagyfeszültségű hálózat működését koordinálja. Az elosztóhálózatra kapcsolódó akkumulátorok, elektromosjármű-flották, hőszivattyúk, ipari fogyasztók, energiaközösségek és aggregátorok együttesen rendszerszintű erőforrássá válhatnak. Ez alapvetően átalakítja a TSO és a DSO kapcsolatát is. Az átviteli hálózati engedélyesnek természetesen nem kell minden egyes végpontot közvetlenül vezérelnie. Tudnia kell azonban, hogy az elosztói szinten milyen rugalmasság áll rendelkezésre, ez hol található és milyen gyorsan aktiválható, mennyi ideig tartható fenn és milyen helyi hálózati következményekkel jár a felhasználása. Ugyanaz az akkumulátor vagy aggregált fogyasztói portfólió egyszerre lehet értékes a TSO számára rendszeregyensúlyozási célból, miközben a DSO ugyanarra az erőforrásra helyi szükséglet kezeléséhez számít. A digitális infrastruktúra feladata ezért nem egyszerűen az, hogy ezeket az eszközöket bekapcsolja a rendszerbe. A valódi kihívást az egymással esetenként versengő rendszerigények összehangolása, optimalizációja jelenti.

A mesterséges intelligencia (MI) és a nagy számítási kapacitás éppen ennek a komplexitásnak a kezelésében kaphat szerepet. A 2050-es diszpécserközpontot aligha érdemes képzeletünkben a maival összehasonlítani. Egy algoritmus rövid idő alatt üzemállapotok, időjárás helyzetek, kiesési kombinációk és lehetséges beavatkozások ezreit értékelheti. Az emberi operátor feladata ennek megfelelően fokozatosan átalakulhat. Kevesebb hangsúly kerülhet az összes rendelkezésre álló nyers információ manuális feldolgozására. Sokkal inkább a bizonytalan, kivételes vagy egymással ütköző célokat, kockázatos állapotokat tartalmazó helyzetek értelmezése kerülhet előtérbe. Az MI ebben a világban nem elveszi a döntést az embertől, inkább kibővíti azt a tartományt, amelyről az ember megalapozott döntést tud hozni. Hasonló változás várható a digitális ikrek alkalmazásában is, amik a hálózat üzemi modelljének részévé válnak. A topológiai, ter-

helési, berendezésállapot- és környezeti adatok összekapcsolása lehetővé teszi, hogy az átviteli hálózati engedélyes ne csak azt lássa, mi történik éppen a rendszerben, hanem azt is értékelje, mi minden történhet néhány perccel, órával vagy nappal később.

Mindez azonban egy új alapfeltételt helyez a rendszer működésének középpontjába: a bizalmat. Meg kell bízunk a mérésben, az adatátvitelben, az adatgazdában, a modellben, a szoftverben, a szolgáltatóban és végső soron abban a szervezeti folyamatban is, amely egy algoritmikus ajánlást fizikai beavatkozássá alakít. A digitális bizalom ezért ebben az értelemben ellenőrizhető műszaki és intézményi tulajdonságokat jelent: megfelelő adatminőséget, egyértelmű felelősségi viszonyokat, rekonstruálható döntési folyamatokat, kiberbiztonságot, emberi felülbírálnakodást és működő tartalék eljárásokat.

Ennek a jövőképeknek a legfontosabb infrastruktúrája ezért alig látható a tájban, hiszen az maga az adatarchitektúra lesz. Moduláris, jól definiált és szabványosított interfészekkel rendelkező ökoszisztémára van szükség, amely képes új szereplők, eszközök, és alkalmazások későbbi befogadására. A jövőállóság itt hasonló jelentést kap, mint a fizikai hálózatban. Nem kell ma ismernünk a 2050-ben használt összes technológiát, de a ma létrehozott rendszernek nem szabad eleve kizárnia azok későbbi integrálását. Érdekes párhuzam vonható egy alapvető tervezési dilemmával is: hogyan lehet évtizedekig működő fizikai infrastruktúráról dönteni egy ennél lényegesen gyorsabban változó környezetben? Egy túlságosan zárt, egyetlen technológiához vagy szállítóhoz kötődő informatikai rendszer néhány év alatt elavult örökségrendszeré válhat, amelynek cseréje az elvárt üzemfolytonosság miatt rendkívül nehéz. A modularitás, az együttműködési képesség, a nyílt vagy legalább pontosan definiált interfészek és az adatok hordozhatósága ezért hasonló hosszú távú opcióértéket képvisel, mint a bővíthetőség a fizikai infrastruktúrában.

A legnagyobb kockázat paradox módon éppen abból következhet, hogy a rendszer normál üzemen nagyon jól működik. Minél sikeresebben automatizálunk egy feladatot, annál jobban felértékelődik az emberi irányítás szerepe. Egy kritikus adatforrás, kommunikációs platform vagy MI-alapú szolgáltatás kiesése ezért 2050-ben egészen más jelentőségű lehet, mint ma. Nem engedhető meg, hogy egy fizikailag ép és működőképes villamosenergia-rendszer azért váljon irányíthatatlanná, mert valamely magasabb szintű digitális funkció átmenetileg elérhetetlenné válik. A digitális redundancia, incidenstűrősség és a degradált üzem képessége hasonló jelentőségűvé válhat, mint a hagyományos villamos hálózatban az $n-1$ szemlélet.

A 2025-ös kiadványunk végén megfogalmazott gondolat – miszerint ami ma új technológia, holnapra megszokott üzemeltetési gyakorlattá válhat, ezért a műszaki tudásnak és a szervezeteknek is folyamatosan alkalmazkodniuk kell – ebben a világban teljesedik ki igazán. A 2050-es TSO és a DSO-k egyik legfontosabb infrastruktúrája továbbra is a fizikai hálózat marad. A TSO és a DSO-k egyik legfontosabb képessége azonban már az lesz, hogy pontosan tudják, hogy melyik adatban, melyik modellben és melyik automatizált döntésben milyen mértékben bízhatnak meg.

3.3. Értékláncszorítás egy szétagolt Európában

Ez a fejezet az előző két jövőképhez képest alapvetően eltérő környezetbe helyezi a magyar villamosenergia-rendszert. Az elektrifikáció ebben a világban sem torpan meg: tovább nő a közlekedés, a hőellátás és az ipar villamosenergia-igénye, az energiaátmenet technológiai iránya tehát nem fordul vissza. Az európai villamosenergia-rendszer működési környezete azonban megváltozik. Ez a jövőkép szétagoltabb, nagyobb külső kitettséggel jellemezhető átmenetet feltételez, amelyhez továbbra is dinamikus elektrifikáció társul. A rendszer rugalmasabb, de inkább eszközvezérelt és csak részben integrált marad, miközben

a hálózati infrastruktúra és a megbízhatóan rendelkezésre álló kapacitások fejlesztése is tartós szükségességekké ütközik.

Fontos ugyanakkor pontosan értelmezni ezt a világot, ugyanis ez nem az Európai Unió szétesésének és még kevésbé az európai villamosenergia-rendszer nemzeti szigetekre történő felbomlásának forgatókönyve. A belső energiapiac működik, az országok továbbra is kereskednek egymással, és a fizikai hálózatok is összekapcsoltak maradnak. A közös döntéshozatal azonban nehezebbé válik, a nagy határkeresztező beruházások több érdekkonfliktussal szembesülnek, és a tisztán gazdasági optimalizálás mellé sokkal hangsúlyosabban belép a nemzeti szintű ellátásbiztonság, a stratégiai autonómia és a beszállítói függőségek kérdése, sajátos feszültséget hozva létre.

Miközben a rendszer egyre nagyobb mértékben villamosenergia-alapúvá válik, éppen azoknak a fizikai eszközöknek a létrehozása válik nehezebbé, amelyekre ehhez szükség lenne. Több hálózati kapacitásra, transzformátorra, teljesítményelektronikai berendezésre, tárolóra és szabályozható forrásra van szükség, miközben az ezeket kiszolgáló ellátási láncok az országok elszigetelődése miatt kevésbé kiszámíthatók. A rugalmasság modellje is kevésbé támaszkodik a széles körben aggregált fogyasztói erőforrásokra. Nagyobb szerepet kapnak a jól azonosítható, fizikailag rendelkezésre álló eszközök: akkumulátorok, gázturbinás vagy más biztosan szabályozható kapacitások, nagy ipari fogyasztóoldali szabályozás és más, központibb rugalmassági megoldások. Ez a rendszer ezért nemcsak infrastruktúra-, hanem kifejezetten anyagintenzív is.

Az energiaátmenetnek ezt az oldalát a 2025-ös kiadványban még kevésbé állítottuk a fókuszba. Bár részletesen foglalkoztunk azzal, hogy a rendelkezésünkre álló technológiai eszköztár folyamatosan bővül, kevésbé tárgyaltuk, hogy mi történik akkor, ha a technológia műszakilag már rendelkezésre áll, de a megvalósításához szükséges berendezés, alkatrész vagy alapanyag nem érhető el mindig megfelelő mennyiségben, megfelelő határidővel és elfogadható áron? Az energiafüggőség ebben a világban folyamatos anyagáram helyett egy, az értékláncban előrébb tolódó függőség formájában jelenik meg: a beruházás, a bővítés és később a pótlás pillanatában válik kritikussá a nyersanyag, a feldolgozókapacitás, a gyártóüzem, a szállítási útvonal és a szükséges technológiai kompetencia.

Ez a hálózatfejlesztés hagyományos logikáját is módosítja. A jelenleg is évtizedes perspektívában történő gondolkodáshoz új bizonytalanság társul, hiszen már a beruházási döntés meghozatala sem garantálja, hogy a kritikus berendezések az eredetileg tervezett ütemezéssel valóban beszerezhetők lesznek. A TSO beszerzési döntése ebben a világban ezért már nem írható le egyszerű ár–minőség–határidő optimalizálásként. Felértékelődik a beszállítói diverzifikáció, a csereszabotosság, a javíthatóság, a szabványosítás, a tipizálás és az alternatív ellátási útvonalak létezése. Bizonyos kritikus eszközöknél hasonlóképpen újra felértékelődhet a készletezés is. A minimális raktárkészlet normál körülmények között pénzügyileg hatékony. Ám tartós ellátási zavar esetén könnyen maga válik a helyreállítás sebességét meghatározó korláttá.

Különösen jól példázza ezt az akkumulátoros energiatárolás. A villamosenergia-rendszer felől nézve az akkumulátor a rugalmasság egyik legvonzóbb eszköze: gyorsan reagál, képes energiát időben áthelyezni, rendszerszintű szolgáltatásokat nyújtani és egyes hálózati szűkületek következményeit mérsékelni. Minden új tároló ugyanakkor új fizikai kapcsolatot teremt a lítium, a grafit, a réz, a nikkel, a kobalt vagy más anyagok értékláncával. Egy rendszerkockázat csökkentése tehát könnyen új kitettséget hozhat létre. Lehetőség van ugyanakkor az akkumulátortechnológiák célzott diverzifikációjára is, egyszerre integrálva a rendszerbe lítium-, nátrium-, vanádium- és más technológiákat.

2050-re a jelen évtizedben nagy számban telepített akkumulátorok, napelemek, kábelek és más berendezések jelentős része eléri vagy megközelíti életciklusa végét. A bennük található réz, alumínium, lítium és más anyagok visszanyerése nem szünteti meg a primer nyersanyagigényt, különösen egy tovább növekvő energiarendszerben. Az újrafeldolgozás és -hasznosítás létrehozhat ugyanakkor egy olyan európai másodlagos nyersanyagforrást, amely kevésbé érzékeny valamely távoli bányára, feldolgozóüzem vagy kereskedelmi útvonal kiesésére. Ugyanaz a redundanciaelv jelenik meg tehát az értékláncokban, amelyet a villamosenergia-rendszer tervezői a fizikai hálózatban régóta természetesnek tekintenek.

Az értékláncszorítás alapjaiban változtatja meg azt is, hogy mit tekintünk racionális beruházásnak. Egy kizárólag minimális beruházási költségre optimalizált rendszer jól működhet egy olyan világban, ahol minden szükséges komponens rövid határidővel, versenyző piacról beszerezhető. Széttagolt környezetben azonban a tartalék alkatrész, a második szállító, az európai javítási képesség vagy akár a valamivel kevésbé optimális, de több forrásból helyettesíthető technológia is önálló értéket hordozhat. A reziliencia ára ebben az értelemben részben éppen az, hogy normál körülmények között nem mindig a rövid távon legolcsóbb megoldást választjuk. Ugyanilyen fontos kérdéssé válhat, hogy milyen technológiai családokra építjük a rendszert, mennyire helyettesíthetők ezek egymással, milyen szállítói struktúra áll mögöttük, mely kritikus komponensekből célszerű készleteket fenntartani, illetve milyen hazai és európai ipari, javítási és szakmai képességeket érdemes megőrizni.

4. Reziliencia 2050 – felkészülés arra, amit nem tudunk pontosan előre jelezni

A kritikus infrastruktúrák közé azokat a létesítményeket és rendszereket soroljuk, amelyek működése nélkülözhetetlen a társadalom és a gazdaság alapvető funkcióinak fenntartásához, tartós kiesésük pedig súlyos biztonsági, gazdasági vagy társadalmi következményekkel járhat. Ide tartozik az energiaellátás, a közlekedés, a vízellátás, rendvédelem és az infokommunikáció, tágabb értelemben pedig az egészségügyi, pénzügyi és élelmiszer-ellátási rendszerek is. Ezek természetesen önmagukban is létfontosságúak. Sérülékenységük egyre jelentősebb része azonban már nem az egyes rendszereken belül, hanem a közöttük kialakuló függőségekben jelenik meg.

Ebben az összekapcsolt infrastruktúrában a villamosenergia-ellátás sajátos, kitüntetett szerepet tölt be. Az infokommunikáció, a közlekedésirányítás, a vízellátás, az egészségügy, az ipari termelés és egyre több lakossági szolgáltatás közvetlenül támaszkodik a folyamatos villamosenergia-ellátásra. Egy kiterjedt áramszünet ezért ritkán marad kizárólag energetikai probléma. A 2001-es kaliforniai események például jól mutatták, hogy a villamosenergia-kimaradás az olaj- és gáziparon, a finomítókon és a csővezetékes szállításokon keresztül más gazdasági területekre is gyorsan tovább terjedhet. Ugyanezt a rendszerszintű sérülékenységet mutatta meg több mint két évtizeddel később a 2025. április 28-i ibériai áramszünet is, amely Spanyolország és Portugália jelentős részén rövid idő alatt a közlekedés, a távközlés, a fizetési rendszerek és számos alapvető szolgáltatás működését is érintette. Hasonló helyzetben az infokommunikáció tartalék energiaforrásai csak korlátozott ideig működnek, csökkenhet a vízellátás szivattyúzási képessége, akadózhat az üzemanyag-elosztás és a logisztika, az egészségügyi intézmények pedig egyre nagyobb mértékben szorulnak saját tartalék ellátásra. Ami tehát hálózati zavarként indul, megfelelő körülmények között rövid idő alatt regionális gazdasági és társadalmi problémává válhat.

1. táblázat. Területi érintettség az egyes kritikus infrastruktúrák meghibásodása esetén

Szektor	Ágazat	Nemzeti	Regionális	Helyi
Energiahálózat	Villamosenergia-rendszer	+	+	+
	Kőolajvezeték-rendszer	+	+	
	Földgázvezeték-rendszer	+	+	+
	Szintetikus metán (SNG) és H ₂ -rendszer	+	+	+
	Távhőrendszer			+
Víziközmű-hálózat	Ivóvízellátó rendszer		+	+
	Szennyvízelvezető és -tisztító rendszer			+
	Vízvezető rendszerek		+	+
Közlekedés és szállítmányozás	Közúti közlekedés és szállítmányozás	+	+	+
	Vasúti közlekedés és szállítmányozás	+	+	
	Vízi közlekedés és szállítmányozás	+	+	
	Légi közlekedés és szállítmányozás	+	+	

Szektor	Ágazat	Nemzeti	Regionális	Helyi
Infokommunikációs rendszerek	Telekommunikáció	+	+	
	Internet	+	+	+
	Rádió- és televízió-műsorszolgáltatás	+	+	
	Postai szolgáltatás	+	+	
	Digitális közigazgatási szolgáltatások	+		

Az elektrifikáció ezt a kapcsolatot tovább erősíti. A közlekedés, a hőellátás és az ipari folyamatok villamosítása azt jelenti, hogy a dekarbonizáció előrehaladásával párhuzamosan egyre több alapvető társadalmi és gazdasági funkció kerül közvetlen kapcsolatba a villamosenergia-rendszerrel. Ez sajátos paradoxont eredményez: minél sikeresebben elektrifikáljuk a gazdaságot, annál nagyobb érték koncentrálódik ugyanabban az infrastruktúrában. A villamosenergia-rendszer rezilienciája ezért egyre kevésbé kezelhető pusztán ágazati műszaki vagy hatékonysági kérdésként. Fokozatosan az egész gazdaság működőképességének egyik alapfeltételévé válik.

Mindezt ráadásul nem változatlan környezetben kell biztosítani. 2025-ös kiadványunk egyik központi tanulsága az volt, hogy a hosszú távú előrelátást és az adaptív tervezést egyszerre kell alkalmaznunk. Bizonyos fejlesztéseket jóval azelőtt elő kell készíteni, hogy ténylegesen szükség lenne rájuk, miközben magát a fejlesztési pályát folyamatosan újra kell értékelni. Ebben az összefüggésben kap valódi jelentést a *reziliencia* fogalma. A kifejezést gyakran egyszerűen ellenálló képességként használjuk, a villamosenergia-rendszer esetében azonban ennél többről van szó. Nem azt jelenti, hogy olyan rendszert kell építenünk, amelyet semmilyen külső hatás nem képes megbontani. Ilyen infrastruktúra műszakilag aligha hozható létre, gazdaságilag pedig biztosan nem lenne racionális erre törekedni. A reziliens rendszer ehelyett képes korlátozni a zavar következményeit, alapvető funkcióinak jelentős részét fenntartani, megfelelő ütemben helyreállni, majd a tapasztalatokból tanulva alkalmazkodni a megváltozott környezethez.

Ez a szemlélet a bizonytalanság kezelésére is más választ ad. Nem szükséges pontosan tudnunk, milyen lesz a magyar villamosenergia-rendszer 2050-ben ahhoz, hogy ma értelmes döntéseket hozzunk. Sokkal fontosabb annak felismerése, hogy mely beruházások és rendszerképeségek teremtenek értéket több, egymástól eltérő jövőben is. Hol szükséges valódi fizikai tartalékot létrehozni? Hol célszerűbb a megfigyelhetőséget, az alkalmazkodási lehetőséget vagy a gyors helyreállítás képességét növelni? És melyek azok az új sérülékenységek, amelyeket éppen az energiaátmenet hoz létre?

A 3. fejezetben vázolt három jövőképhez hozzá tudjuk rendelni azokat a változásokat, amelyek módosítják a rezilienciáról alkotott mai képünket.

- **A fizikai reziliencia.** Hogyan készíthető fel egy több évtizedes élettartamra tervezett infrastruktúra olyan éghajlati és időjárási körülményekre, amelyek maguk is változnak, miközben jövőbeni alakulásukat csak jelentős bizonytalansággal tudjuk megbecsülni? A kérdés itt nem pusztán az, hogy egy hálózati elem elbír-e egy szélsőséges eseményt, hanem az is, hogy a rendszer egésze mennyi mozgásteret őriz meg akkor, amikor több elem egyszerre kerül terhelés alá vagy esik ki a rendszerből.
- **A digitális reziliencia.** A jövő villamosenergia-rendszerének működtetéséhez egyre több mérésre, automatizálásra, fejlettebb állapotbecslésre és várhatóan mesterséges intelligenciára lesz szükség. A kérdés azonban nemcsak az, hogyan használhatók ezek a technológiák a rendszer jobb működtetésére, hanem

az is, miként kerülhető el, hogy maga a digitalizáció hozzon létre új, nehezen kontrollálható sérülékenységeket. Egyre fontosabbá válik tehát az is, mi történik akkor, ha valamely adatforrás, kommunikációs kapcsolat vagy magasabb szintű digitális funkció átmenetileg elérhetetlenné válik.

- **Az anyag- és értéklánc-reziliencia.** Az elektrifikáció és a fosszilis energiahordozók szerepének csökkenése számos korábbi függőség mérséklését teszi lehetővé. Ebből azonban nem következik, hogy a függőség maga eltűnik. Könnyen lehet, hogy részben áthelyeződik a nyersanyagokra, a feldolgozókapacitásokra, a technológiákra, a beszállítókra, illetve az ezek működtetéséhez szükséges energia-, víz- és szakmai kompetenciákra. A kérdés ezért az, hogyan kerülhető el, hogy a korábbi kitettségek csökkentése közben új, hasonlóan kritikus függőségeket építsünk ki.

A három terület szorosan összekapcsolódik. Egy időjárásálló hálózat sem igazán reziliens, ha egy nagyobb káresemény után hónapokig nem áll rendelkezésre a helyreállításhoz szükséges berendezés vagy szakmai kapacitás. Egy fejlett, adatvezérelt rendszer sérülékennyé válhat, ha működése néhány kritikus digitális szolgáltatástól függ. Egy nagy mennyiségű energiatárolóra épülő rugalmas rendszer pedig új kitettséget teremthet, ha az akkumulátorok anyag-, gyártási vagy újrahasznosítási értéklánca erősen koncentrált.

2050 felé ezért nem egyszerűen több hálózatra, több digitalizációra vagy több energiatárolóra lesz szükség. Olyan villamosenergia-rendszert kell kialakítani, amely képes változni anélkül, hogy minden jelentős külső változából válsághelyzet alakulna ki. A fejezet következő három része ennek fizikai, digitális és értéklánci oldalát vizsgálja.

4.1. Fizikai reziliencia – a tegnap időjárására épített hálózat a holnap éghajlatában

A villamosenergia-hálózatok tervezése hagyományosan abból indult ki, hogy a múlt megfelelő támpontot ad a jövőre nézvést. A vezetékek mechanikai méretezéséhez historikus szélterhelési, jegesedési és más meteorológiai adatokból határozzuk meg azokat a karakterisztikus értékeket, amelyeket az infrastruktúrának egy előre rögzített biztonsági szint mellett el kell viselnie. A nagyon ritka, rendkívüli események teljes körű kivédése soha nem lehetett reális tervezési cél. Egy olyan hálózat, amelyet minden elképzelhető szélsőségre sérülésmentesre méretezünk, műszakilag ugyan megközelíthető lenne, gazdaságilag azonban aligha lenne vállalható. A tervezés ezért szükségszerűen kompromisszum a bekövetkezési valószínűség, a várható következmény és a beruházási költség között. A kihívást az jelenti, hogy az a statisztikai háttér, amelyre a méretezés épült, fokozatosan változik. Ha egy korábban ritkának tekintett szél-, jég- vagy hőterhelés visszatérési ideje rövidül, akkor ugyanaz a méretezési döntés már nem ugyanazt a kockázati szintet jelenti.

Ez a villamosenergia-rendszert különösen érzékenyen érinti, hiszen a hálózati infrastruktúra élettartama és az éghajlatváltozás időléptéke összemérhető. A magyar átviteli rendszer meghatározó elemei évtizedekkel ezelőtt épültek: a 220 kV-os és a 400 kV-os rendszer kialakulása az 1960-as évekre nyúlik vissza. A jelenlegi távvezetési tervezési követelmények az MSZ EN 50341 szabványcsaládra épülnek, a mechanikai határértékek meghatározása azonban alapvetően historikus meteorológiai szélsőértékekből indul ki. A klímaváltozás jövőbeni hatásai tehát jelenleg nem közvetlenül jelennek meg a méretezési logikában.

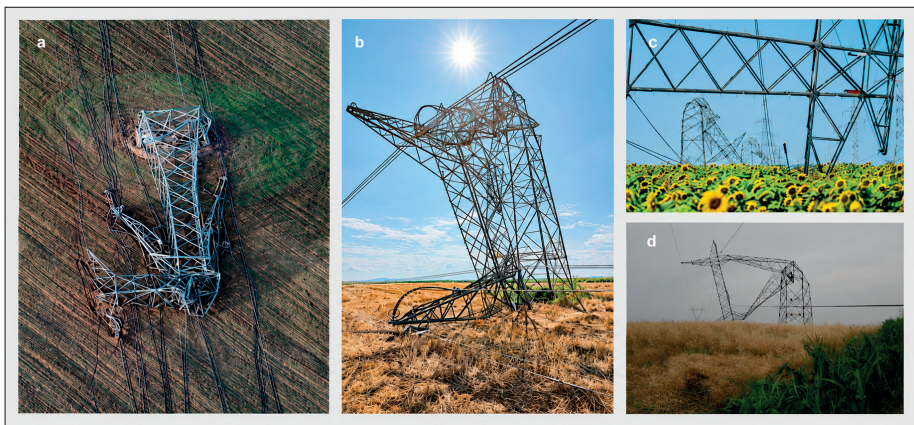
A 2025-ös kiadványunk ugyanezt a problémát egy másik oldalról világította meg. A magyar hálózat számos eleme elérte vagy megközelítette eredetileg feltételezett élettartamát. A korábban meghatározott termikus méretezési feltételek is egyre inkább korláttá válhatnak. A 132 kV-os hálózat egyes vezetékei például olyan

hőmérsékleti és terhelési viszonyokra készültek, amelyek mellett a mai, és még inkább a jövőbeni igények kezelése egyre nehezebbé válhat. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy a klímaváltozás nem egyetlen, országosan azonos irányú terhelésváltozást jelent. A magyar átviteli hálózatra végzett modellezések ennél lényegesen összetettebb képet mutatnak. A regionális klímamodellek alapján egyes időszakokban és térségekben növekedhet az extrém széllal összefüggő kitértés, máshol a tapadó hó vagy a kristályos jég kialakulására kedvező meteorológiai helyzetek maradhatnak meghatározok. A Dunántúl egyes részein elsősorban a szélterhelés erősödhet, míg az Alföldön és a Kisalföldön a téli tapadóhó-kockázat mellett a nyári hőterhelés is releváns lehet. Egyes jegesedési formák, például a zúzmara, hosszabb távon ritkulhatnak, miközben a nedves hó vagy a kristályos jég bizonyos időszakokban továbbra is jelentős kockázatot hordozhat.

A jövőbeni időjárást ugyanakkor nem tudjuk olyan pontossággal leírni, mint amilyen pontosságra egy hagyományos determinisztikus tervezési feladat első látásra igényt tartana. A vizsgálatok ezért több EURO-CORDEX regionális klímamodellet és több kibocsátási pályát alkalmaznak, a szimulált adatokat pedig a HungaroMet HuClim adatbázisa alapján torzításkorrekcióval igazítják a megfigyelésekhez. A nagyságrendileg 10–12 kilométeres térbeli felbontás már lehetőséget ad területi kockázati mintázatok azonosítására. A referenciaadatok időbeli felbontása azonban korlátozza annak lehetőségét, hogy egy konkrét jegesedési esemény vagy egy nagy erejű, rövid idejű széllökés valószínűségét nagy pontossággal meghatározzuk. Ez is arra mutat rá, hogy magának a tervezési módszertannak kell változnia. A választás ugyanis nem a „biztos historikus adatok” és a „bizonytalan jövőmodellek” között történik. A historikus adatok önmagukban sem írják le megbízhatóan a következő ötven évet, ha közben az éghajlat statisztikai tulajdonságai is változnak. Célszerűbb ezért a múlt megfigyeléseit és a jövőre vonatkozó modellinformációkat együtt használni, és különválasztani azt, amit nagy biztonsággal tudunk attól, amit csak valószínűnek tartunk, illetve attól, ami továbbra is jelentős bizonytalanságot hordoz.

A bizonytalanságnak van egy további, rendszertervezési szempontból fontos következménye is. A fizikai reziliencia szempontjából nem az országos átlagban legnagyobb változás a legfontosabb. Egyetlen kritikus távvezeték-nyomvonal vagy néhány stratégiai csomópont kiesének kockázata önmagában rendszerszintű jelentőségű lehet. A magyar hálózat ráadásul több helyen olyan távvezeteki folyosókba rendeződik, ahol több rendszer fut azonos vagy egymáshoz közeli nyomvonalon. Egy nagy kiterjedésű rendkívüli erősségű szél- vagy jégterhelés ezért nem feltétlenül egyetlen, statisztikailag független hálózati elem kiesését okozza, hanem több párhuzamos elemet is érinthet egyszerre. Ez fokozottan érvényes, ha több feszültség szintű távvezeték építésére kényszerül a rendszerirányító. Ez a klasszikus $n-1$ gondolkodás szempontjából is fontos. Az $n-1$ elv továbbra is nélkülözhetetlen, de önmagában nem írja le megfelelően azokat a közös okú, térben korrelált eseményeket, amelyekben ugyanaz a vihar vagy jegesedési helyzet több elemet egyszerre terhel.

A hazai tapasztalatok jól mutatják, hogy mindez nem pusztán elméleti probléma. A 2014-es nagy jegesedés során 400 kV-os, 220 kV-os és közvetve 132 kV-os hálózati elemek is károsodtak. A fizikai helyreállítás hónapokat vett igénybe, közel 200 kilométernyi új vezeték és több mint 470 tonna acélszerkezet beépítésével. A Pécs–Ernestinovo 400 kV-os távvezeték 2017-ben 142–145 km/h körüli széllökések hatására súlyosan sérült, 2023-ban pedig ugyanazon a távvezetéken ismét oszlopok dőltek ki 126 km/h feletti szélben. 2025 nyarán egy 132 kV-os vezetékszakaszon mintegy 120 km/h-s széllökések okoztak jelentős károkat.



3. ábra.
Szélsőséges szélteher miatt sérült távvezetékek; a) Ócsa–Zugló 220 kV; b–c)
Pécs–Ernestinovo 400 kV; d) Martonvásár–Litér 400 kV



4. ábra.
Szélsőséges jégteher miatt sérült távvezetékek a MAVIR hálózaton (2013. március és 2014. december)

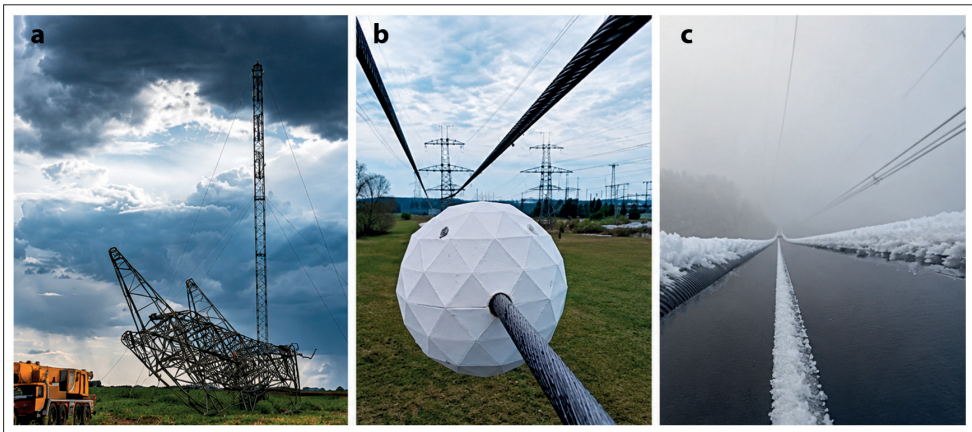
A fizikai reziliencia ezért legalább három, egymást kiegészítő képességet igényel: megelőzni, tompítani és helyreállítani.

Klímaadaptív tervezés ▼ A historikus időjárási adatok mellett a hálózati elem teljes várható élettartamára vonatkozó klimatikus kitettséget is értékelni kell. A rendelkezésre álló hazai vizsgálatok alapján indokolt lehet a szél-, jég- és kombinált terhelési határértékek, valamint a termikus terhelhetőség térségi különbségeinek rendszeres felülvizsgálata. A tervezési szabványokat ebben az értelemben a kockázatokról rendelkezésre álló legjobb ismeretek időszakonként frissített leképezéseként érdemes figyelembe venni.

A már meglévő infrastruktúránál azonban más logika szükséges. Az ország teljes távvezeték-hálózatának általános mechanikai megerősítése sem műszakilag, sem gazdaságilag nem lenne racionális. Itt a kockázatalapú prioritás válik meghatározóvá. Egyidejűleg kell figyelembe venni az adott eszköz állapotát és életkorát, a jövőben várható veszélyeztetettséget, a hálózatban betöltött szerepét, valamint kiesésének rendszerszintű következményét. Egy közlekedési infrastruktúrát keresztező oszlop célzott megerősítése, vagy egy olyan távvezeték folyosó, amelynek párhuzamos kiesése nagy terület ellátását veszélyeztetné, lényegesen nagyobb rezilienciaigényt teremthet, mintha az ugyanekkora beruházást általános, nem prioritásalapú rekonstrukcióra fordítanák.

Dinamikus üzemeltetés ▼ Ha egy szélsőséges eseményt nem tudunk megakadályozni, legalább arra törekedhetünk, hogy előre felismerjük, hol és mikor nő meg érdemben annak kockázata. A meteorológiai előrejelzések, lokális időjárási mérések és hálózati állapotadatok összekapcsolása lehetőséget teremthet arra, hogy a rendszerirányító még a kritikus időszak előtt csökkentse egy veszélyeztetett távvezeték terhelését, erőforrásokat csoportosítson át vagy felkészüljön egy esetleges kiesésre. A hazai alkalmazkodási javaslatok ezért helyeznek hangsúlyt a HuClim éghajlati adatbázis adatai, az időjárási monitoring és a hálózati állapotmérések integrálására.

Jó példa erre a dinamikus távvezeték-terhelhetőség, a DLR (*Dynamic Line Rating*) alkalmazása. A hagyományos statikus terhelhetőségi határértékek szükségszerűen konzervatív feltételezésekből indulnak ki. Valós idejű meteorológiai és sodronyhőmérséklet-adatok alapján azonban meghatározható, hogy az adott vezetékszakas az aktuális körülmények között ténylegesen mekkora terhelést képes biztonságosan elviselni. Ugyanez a mérési infrastruktúra jegesedési helyzetben preventív funkciót is kaphat: előre jelezhető a jég kialakulásának időpontja és típusa, megfelelő áramterheléssel pedig a sodrony hőmérséklete olyan szinten tartható, amely csökkenti a megtapadás valószínűségét. A hazai pilot monitoring eljárásokban a sodrony hőmérséklet-mérés, és a kameraalapú megfigyelés a tényleges állapot visszaellenőrzésére is ad lehetőséget.



5. ábra.

A szélsőséges időjárási események elleni védekezés lehetőségei: a) oszlop helyreállítása az Ócsa-Soroksár 132 kV-os távvezetéken; b) Sodronymonitorozó DLR-szenzor a MAVIR hálózaton; c) DLR-szenzor által rögzített jegesedési kamerakép

Helyreállítás gyorsasága ▼ A reziliencia szempontjából ez legalább annyira fontos, mint magának a káreseménynek az elkerülése. Egy szélsőséges időjárási esemény bekövetkezési valószínűsége soha nem csökkenthető nullára. Egy súlyosan sérült távvezetési oszlop végleges újjáépítése pedig hónapokat vehet igénybe. Emiatt stratégiai jelentőségű lehet tartalékban tartani ideiglenes, provizórikus oszloprendszereket, amelyeket megfelelő földrajzi helyen célszerű elhelyezni. Ha a veszélyeztetett vezetékszszakok előzetesen azonosíthatók, akkor a helyreállító eszközök, tartalék szerkezetek és javítókapacitások is úgy helyezhetők el, hogy egy nagy sérüléssel járó esemény után rövid időn belül legalább részlegesen visszaállítható legyen az átviteli képesség. A hangsúly ezzel fokozatosan eltolódik a tudatosan vállalt kockázatok felé.

Az elosztóhálózatokon ugyanezen logika alkalmazása talán még fontosabb. A közép- és kisméretű hálózat ezzel szemben nagyságrendekkel több elemből áll, mint az átviteli hálózat, jelentős része idős. Eközben a fogyasztói technológiák átalakulása miatt ezen hálózat terhelési mintázata gyorsan változik, és a redundanciája is kisebb a topológiai kialakítása miatt. A szegmentálhatóság, a helyi tartalékel látás, a tárolók, mikrohálózatok, részleges szigetüzemi képességek vagy tartalék áramforrások alkalmazása ezért fontos rezilienciaeszközzé válhatnak.

A fizikai reziliencia hosszú távon követendő stratégiája nem írható le egyetlen beruházási tervvel. Sokkal inkább egy folyamatosan frissülő alkalmazkodási pályára van szükség. Ahol az éghajlati kockázatok és az eszközök kritikusságának mértéke egyértelműen indokolja, ott fizikai megerősítésre vagy rekonstrukcióra van szükség. Ahol a jövőbeni kockázat megítélése bizonytalanabb, ott a fokozott megfigyelés, a gyors helyreállítás és a rugalmas üzemeltetés növelheti a későbbi döntések mozgásterét. Új infrastruktúra esetén pedig már a tervezési fázisban számolni kell azzal, hogy az adott eszköz élettartamának jelentős részét a maitól eltérő időjárási környezetben tölti majd.

4.2. Digitális reziliencia – amikor a rendszernek már nemcsak működnie, hanem értenie is kell önmagát

A villamosenergia-rendszer fizikai átalakulásával párhuzamosan zajlik egy másik, kevésbé látványos, de legalább ilyen jelentős változás is. A rendszer egyre nagyobb része válik mérhetővé, kommunikálhatóvá, számíthatóvá és automatizálhatóvá. Okosmérők, állapotmonitoring-rendszerek, nagy felbontású hálózati mérések, időjárási adatforrások, automatizált hálózati irányítás, aggregátorok, digitális platformok és egyre inkább mesterséges intelligenciára épülő előrejelzések kapcsolódnak a fizikai infrastruktúrához. Ez óriási lehetőség. De természetesen új kockázat is.

Minden új mérési pont, kommunikációs kapcsolat vagy digitális interfész több információt és nagyobb beavatkozási lehetőséget jelent, ugyanakkor új függőséget, és potenciális meghibásodási pontot is létrehoz. A digitalizáció ezért a jövő villamosenergia-rendszerének egyik legfontosabb flexibilitási és rezilienciaeszköze lehet, de önmagában még semmilyen garanciát nem jelent a nagyobb ellenállóképességre.

A kiinduló probléma viszonylag egyszerű: a jövő villamosenergia-rendszere túl összetett lesz ahhoz, hogy kizárólag eseményvezérelt módon üzemeltessük. Az időjárásfüggő termelés, az elosztott energiatermelők és -tárolók, a villamos mobilitás, a flexibilis fogyasztás és a TSO–DSO közötti kapcsolatok növekvő száma olyan mennyiségű állapotinformációt és lehetséges döntési alternatívát eredményez, amelyet már nem lehet kizárólag hagyományos emberi információfeldolgozásra alapozva kezelni. Az operátor szerepe nem tűnik el, de szükségszerűen megváltozik.

Ebből a szempontból az MI és a prediktív elemzés jelentősége sem abban áll, hogy „okosabb” algoritmusokat szeretnénk használni. Sokkal inkább abban, hogy a hagyományos, események utáni beavatkozás egyre kevésbé lesz elegendő. A kérdés tehát nem az, hogy használunk-e mesterséges intelligenciát. Hanem az, hogy mire, milyen adatok alapján, milyen döntési jogkörrel és milyen biztonsági korlátok között használjuk.

Fontos különbséget tenni a digitalizáció és a digitális reziliencia között. Egy erősen digitalizált rendszer ugyanis lehet kifejezetten sérülékeny. A jobb megfigyelhetőséghez több szenzor, kommunikációs kapcsolat, adatbázis, szoftverkomponens és külső interfész szükséges. Ezek mind növelik a rendszer komplexitását és támadási felületét. A fizikai és digitális világ szoros összekapcsolódása miatt ráadásul egy informatikai hiba vagy kibertámadás közvetlen fizikai üzemzavarra is alakulhat. Ezáltal a rezilienciát nem lehet egyszerűen „több digitalizációval” megteremteni. Adatmenedzsmentre, modellkövetésre és biztonsági és krízismenedzsmentre is szükség van. A 2050-es rendszer digitális érettségét ezért célszerűen nem egyetlen technológiai mutatóval, hanem egymásra épülő képességek rendszerével értelmezni.

Megfigyelhetőség ▼ Ez talán triviálisnak tűnik, mégis alapvető: a rendszer csak arról tud érdemi döntést hozni, amit megfelelő minőségben mér vagy becsül. A prediktív reziliencia adatintenzív képesség. Mete-

orológiai adatok, hálózati topológia, eszközállapotok, terhelési és termelési információk, korábbi zavarok, beavatkozások, földrajzi pozíciók és helyreállítási tapasztalatok egyaránt szükségesek. Mindazonáltal az egyes adattípusok önmagukban keveset érnek. Az érték abból keletkezik, ha ezeket összekapcsolják. A jövő digitális hálózatának első követelménye ezért nem a mesterséges intelligencia. Előbb olyan megbízható, időben hozzáférhető és értelmezhető adatvagyonra van szükség, amelyből a rendszer saját fizikai állapotáról valós képet tud alkotni.

Integrált helyzetértékelés ▼ A mérés ugyanis még nem jelent tudást. Attól, hogy nagyszámú adatpont áll rendelkezésre, még nem feltétlenül értjük jobban a rendszer állapotát. Az adatokat közös időbeli és térbeli keretbe kell rendezni. Nem elegendő tehát azt tudni, hogy egy adott térségben vihar várható. Fontos kérdés az is, hogy mely konkrét hálózati elemeket érinti, milyen állapotban vannak ezek az eszközök, kiesésük mely más elemeknél okoz terhelést, hány fogyasztót érintene az esemény, és hol lenne szükség helyreállító erőforrásokra. A meteorológiai előrejelzés akkor válik hálózati információvá, amikor összekapcsoljuk a topológiával, az eszközállapottal, a karbantartási információkkal és a várható rendszerkövetkezményekkel.

Predikció ▼ Itt jelenik meg igazán látványosan a mesterséges intelligencia hozzáadott értéke. Rövid távon három, különösen reális alkalmazási terület azonosítható: az időjárásfüggő hálózati zavarok előrejelzése és az állapotváltozók alakulása, a helyreállítási idő becslése, valamint az ellátás szempontjából kritikus eszközök állapotalapú felügyelete és prediktív karbantartása.

Egy transzformátor esetében például a hőmérséklet, az olaj- és szigetelésvizsgálat, a terhelési profil, a túlterhelések száma, mértéke és más állapotinformációk kombinációjából a romló állapot még az üzemzavar bekövetkezése előtt felismerhető lehet. Ezeket a paramétereket ma is figyelik, monitoring rendszer ad figyelmeztetést, de azt egy mesterséges intelligencián alapuló technológia akár autonóm működéssel ezt tovább pontosíthatja. Ezek segítségével megakadályozható egy üzemzavar. Egy nagyobb hálózati eseménynél pedig a helyszín, az időjárás, az érintett fogyasztók száma, a párhuzamos hibák és a rendelkezésre álló erőforrások alapján megbecsülhető a helyreállítás várható időigénye.

Ez alapvető szemléletváltást jelent. A hagyományos karbantartás azt kérdezi: mikor jár le az eszköz előírt felülvizsgálati időszaka? A prediktív működés azt: az eszköz meghibásodási valószínűsége növekszik, és mi történik a rendszerrel, ha valóban meghibásodik? A hagyományos zavarirányítás azt kérdezi: hol történt hiba? A prediktív reziliencia azt mondja meg: melyik berendezésben várható hiba a következő órákban, és mit tudunk még megtenni az esemény előtt? Ez utóbbi a valódi változás.

Döntéstámogatás ▼ Egy pontos előrejelzés önmagában még nem jelent az operátor számára értéket. Ha a modell azt jelzi, hogy egy esemény bekövetkezési valószínűsége 60 vagy 80 százalék, abból még nem következik automatikusan, hogy mit kell az operátornak tenni.

A prediktív információt ezért riasztási szintekhez, cselekvési küszöbökhöz és felelős szereplőkhöz kell kapcsolni. A rendszernek azt is támogatnia kell, hogy az adott kockázati szinten milyen beavatkozási alternatívák állnak rendelkezésre, ezeknek milyen a költsége, és a költségek nagyságának sorrendje, milyen rendszerhatással járnak, és mikor szükséges emberi jóváhagyás vagy eskaláció, kockázatelemzés. A kockázati mátrixban a bekövetkezés valószínűsége és a hatás mértéke alapján lehet 1-1 ilyen eseményt besorolni. Vagyis a prediktív rendszer nem egy algoritmus, hanem egy döntéstámogatási keret.

Kontrollált automatizálás ▼ Nem minden hálózati művelethez szükséges emberi döntés. Számos rutinszerű folyamat automatizálható, különösen akkor, ha a döntési tér jól lehatárolható, a szabályok egyértelműek és egy hibás döntés következménye korlátozott.

A kritikus helyzetekben azonban már egészen más a helyzet. A mesterséges intelligencia alkalmazását nem szabad összekeverni a formális döntési jogkör átadásával. Ezt különösen jól mutatja a TSO–DSO együttműködés példája. Ahogy egyre több energiáról, elektromos jármű, flexibilis fogyasztó és elosztott termelő jelenik meg az elosztóhálózaton, ugyanaz a fizikai erőforrás több rendszerfunkciót is elláthat. Egy akkumulátor például kiegyenlítő energiát biztosíthat az átviteli rendszer számára, miközben ugyanabban az időszakban lokális feszültségszabályozási vagy szűkületkezelési szerepe is lehet.

Mi történik azonban akkor, ha a TSO számára optimális aktiválás helyi DSO-szűkületet okoz? Vagy fordítva: ha a DSO által igénybe vett flexibilitás éppen azt a tartalékot teszi elérhetetlenné, amelyre a rendszerirányítónak szüksége lenne? Ez már nem egyszerű optimalizálási probléma.

A vizsgált TSO–DSO koordinációs megközelítés ezeket a helyzeteket „sárga” állapotként kezeli. A zöld helyzetben a beavatkozás egyértelműen kompatibilis, a pirosban nem megengedhető. A sárga állapot viszont valódi koordinációs problémát jelent: további hálózati ellenőrzésre, korlátozásra, újra optimalizálásra, feltételes engedélyezésre, vagy a két hálózatüzemeltető közötti egyeztetésre van szükség. Éppen itt lehet igazán jelentős az MI hozzáadott értéke.

Az információigény nagy, az idő korlátozott, több lehetséges megoldás áll rendelkezésre, az alapadatok folyamatosan változnak. A prediktív MI előre jelezheti a várható korlátozásokat. Az előszűrési funkció azonosíthatja az érintett eszközöket és az ütköző kötelezettségeket. Az ajánló rendszer több beavatkozási alternatívát hasonlíthat össze. A magyarázó és auditfunkció pedig dokumentálhatja, hogy milyen információk és alternatívák alapján született meg végül a döntés. Mindazonáltal a lényeg nem technológiai. A sárga helyzetek valójában döntési és irányítási problémák.

Ha egy MI-rendszer javaslata korlátozza egy piaci szereplő hozzáférését, lekapcsol egy erőforrást, kiegyenlítő kapacitást tesz elérhetetlenné, vagy egy másik hálózatüzemeltető rendszerért befolyásolja, akkor már nem elegendő azt kérdezni, hogy az algoritmus mennyire pontos. Ki rendelkezik döntési joggal, mennyi idő van a beavatkozásra? Ki felel az eredményért? Milyen adatállapotból indult ki a modell? Melyik modellverzió futott? Milyen hálózati korlát aktiválódott? Milyen alternatívák voltak? Mekkora volt a bizonytalanság? Miért fogadta el az operátor a javaslatot vagy miért írta felül? Ezek már nem algoritmikus kérdések, hanem a rendszerirányítás felelősségi kérdései.

Ebből következik egy nagyon fontos követelmény: a mesterséges intelligenciával támogatott döntésnek rekonstruálhatónak kell lennie. A naplózásnak nemcsak a végső kimenetet kell megőriznie. Rögzíteni kell az esemény időpontját, az esemény előtti állapotot, az érintett szereplőket, az adatállapotot, a modell vagy döntéstámogató szoftver verzióját, az aktiválódó hálózati korlátokat, az ajánlásokat, az alternatívákat, a bizonytalanság szintjét, a végső emberi döntést, és adott esetben az MI-javaslat felülbírálásának indokát is. Kritikus infrastruktúrában a magyarázhatóság nem kényelmi funkció. Ha egy döntésnek fizikai, piaci és jogi következménye van, akkor utólag igazolni kell tudni, mi történt és miért. Egy egyszerű kockázati paraméter vagy „engedélyezd/ne engedélyezd” típusú kimenet nem elegendő. Az operátornak értenie kell, mely hálózati elem okozza a problémát, milyen feltételezések mellett készült a számítás, mekkora a bizonytalanság, és milyen más műszakilag megvalósítható alternatívák léteznek. A megfigyelhetőség és az auditálhatóság ezért nem utólag hozzáadott extra funkció, hanem a megbízható MI alapkövetelménye. Ugyanez igaz az emberi felügyeletre is.

A human in the loop, vagyis az ember szerepe a folyamatban önmagában még nem biztonsági mechanizmus. Csak akkor válik azzá, ha az ember valóban képes megérteni a rendszer korlátait, felismerni a rendellenes működést, a hibátlan berendezéseket, ellenállni az automatizálási torzításnak, felülbírálni a javaslatot és szükség esetén leállítani az automatizált rendszert. Ezért a formális vétő, a feltételes jóváhagyás, a vészhelyzeti felülírás és a végső TSO–DSO megállapodás joga a kritikus esetekben a felelős emberi vagy intézményi szereplőknél kell maradjon.

Ez 2050 szempontjából különösen fontos tervezési elv. Nagyon valószínű, hogy 2050-re a hálózati irányításban a mainál lényegesen több MI-alapú funkció működik. De ebből nem következik, hogy az operátornak el kell tűnnie a rendszerből. Éppen ellenkezőleg. A szerepe valószínűleg magasabb szintre kerül. Az egyszerű információfeldolgozás és rutindöntések helyett a szélsőséges helyzetek, az egymással ütköző célok, az alacsony bizonyosságú események és a felelősségi határokon átnyúló döntések kezelésére kell koncentrálnia. Mindebből egy további, klasszikusnak tekinthető rezilienciaelv is következik: a digitális rendszernek csökkentett funkciókkal is működőképesnek kell maradnia. Mi történik akkor, ha az MI-szolgáltatás kiesik? Ha nincs külső adatkapcsolat? Ha a kommunikációs platform részlegesen elérhetetlenné válik? A válasz nem lehet az, hogy a fizikai rendszer irányíthatatlanná válik. Szükség van manuális vagy hagyományos automatizmusokra épülő, a mesterséges intelligenciától függetlenül működő tartalékolásra, lokálisan is rendelkezésre álló kritikus adatokra, valamint az MI-javaslatoktól független vészhelyzeti kontrollra. Ez nem a digitalizáció ellen hat. Ugyanaz a redundanciaelv jelenik meg a digitális térben, amelyet a fizikai villamosenergia-hálózatban évtizedek óta természetesnek tekintünk.

Adatmenedzsment ▼ Egy prediktív rendszer nem lehet jobb annál az adatvagyonnál, amelyből tanul és amelyre működése közben támaszkodik. Ha a meteorológiai, hálózati, eszközállapot-, esemény- és kiberbiztonsági információk különböző szervezeteknél, eltérő formátumban és különböző hozzáférési szabályok mellett találhatók meg, akkor az adat fizikailag ugyan létezhet, de rendszerirányítási szempontból még nem feltétlenül használható. Ezért szükség van az átviteli és elosztói szereplőkre, a meteorológiai adatgazdák, a kiberbiztonsági szervezetek és a felügyeleti hatóságok információs rendszereinek összehangolására. Azonban itt ismét megjelenik egy paradoxon. Minél több adatot osztunk meg és minél több rendszert kapcsolunk össze, annál nagyobb érték teremthető. Ugyanakkor ezzel a változással annál több támadási és meghibásodási pontot is létrehozunk. A nagyobb adathozzáférés ezért csak magasabb biztonsági szinttel együtt fogadható el. Hálózatszegmentálásra, szigorú hozzáférés-szabályozásra, részletes naplózásra, a fizikai és logikai biztonság összehangolására, valamint érzékeny adatoknál kontrollált vagy anonimizált adatmegosztásra van szükség.

Modellkövetés ▼ Egy alkalmazott és használatba vett modell nem marad változatlanul használható harminc évig. A hálózat átépül, új technológiák jelennek meg, változik a fogyasztói viselkedés, módosul az időjárás kiértékelés, és maga az adatgeneráló rendszer, valamint a modell is folyamatosan alakul. A korábban jól működő modell ezért fokozatosan elavul. Téves riasztásokat adhat. Nem ismerhet fel új eseménytípusokat. Akár olyan torzításokat is hordozhat, amelyek a tanítás időpontjában még nem jelentettek problémát.

A hagyományos kiberbiztonsági keretek elsősorban a rendszerek és adatok védelmére koncentrálnak. Az olyan MI-specifikus jelenségek, mint a modellromlás, az adateltolódás, a téves riasztás vagy az automatizált ajánlásokba vetett túlzott bizalom már új feladatokat jelentenek. A megbízható mesterséges intelligencia ezért folyamatos visszamérést igényel. Egy nagyobb előrejelzési vagy riasztási esemény után ki kell értékelni, megfelelő volt-e a jelzés, helyesen választottuk-e meg a cselekvési küszöböt, milyen arányban fordultak elő téves vagy elmaradt riasztások, és szükség van-e a modell újra kalibrálására. Ebben az értelemben az MI-modell közelebb kerül a klasszikus infrastruktúrához, mint elsőre gondolnánk. A digitális modellt is karban tartani, és fejleszteni kell: folyamatosan felül kell vizsgálni a modell működését, és az állapotromlást figyelni kell.

2. táblázat. A modellkövetés fő pillérei

Modellkövetési pillér	Szabályozási szempontból releváns probléma	Intézményi és irányítási következmény
Validáció	A kutatási vagy laboratóriumi környezetben megfelelően működő modellek teljesítménye az üzemi, valós idejű alkalmazás során számottevően romolhat.	Kritikus infrastruktúrában egy modell nem tekinthető üzemkésznek kizárólag laboratóriumi eredmények alapján, ezért alkalmazását fokozatos, dokumentált, telepítés előtti és utáni validációs eljárásokhoz szükséges kötni.
Modellromlás	A működési környezet változása miatt a korábban megfelelően teljesítő modellek idővel megbízhatatlanná válhatnak.	A modell életciklusát a bevezetést követően is folyamatos felügyeleti, újrakalibrálási, újratanítási és minőségbiztosítási kötelezettségekhez szükséges kötni, beleértve a hamis riasztások szervezeti hatásainak rendszeres értékelését is.
Transzparencia és értelmezhetőség	A mesterséges intelligenciára épülő megoldások elterjedését az operatív gyakorlatban gyakran korlátozza az alacsony értelmezhetőség és az összetett paraméterhangolási igény.	A modell követésnek biztosítania kell az átlátható felelősségi kereteket, a humán felülvizsgálat egyértelmű szabályait, valamint azt, hogy a felhasználók értelmezni tudják a modell eredményeinek korlátait és alkalmazhatósági feltételeit.

Intézményi érettség ▼ A prediktív technológiák széles körű alkalmazásának sikere valószínűleg kevésbé azon múlik majd, hogy rendelkezésre áll-e megfelelő neurális hálózat, optimalizáló algoritmus vagy számítási kapacitás. Ezek a technológiák gyorsan fejlődnek. Sokkal nehezebb kérdés, hogyan alakítjuk ki az adatminőségi követelményeket, a felelősségi viszonyokat, a beszerzési és validációs eljárásokat, a kiberbiztonsági kontrollokat, az auditálást és az együttműködés szabályait.

Ezért indokolt egy szabályozott hibrid megközelítés. Bizonyos minimumkövetelményeket – például az adatminőség, a validáció, a naplózás és az emberi felügyelet kereteit – egységesen kell kialakítani. Ezzel párhuzamosan viszont lehetőséget kell hagyni arra, hogy az egyes hálózatuüzemeltetők a helyi problémákhoz és saját rendszerük sajátosságaihoz illeszkedő megoldásokat alkalmazzanak.

Mit jelent tehát mindez 2050-re? A digitális reziliencia nem teljes automatizációt jelent. Sokkal inkább egy olyan villamosenergia-rendszert, amely lényegesen többet lát saját állapotából, korábban felismeri a kialakuló kockázatokat, nagyszámú alternatívát képes rövid idő alatt értékelni és számos rutinfeladatot automatikusan elvégez. De közben a döntések eredete visszakövethető marad. A felelősségi viszonyok világosak. A kritikus funkciók megfelelő emberi felügyelet alatt maradnak. A digitális komponensek kiesése pedig nem okozhat automatikusan fizikai működésképtelenséget.

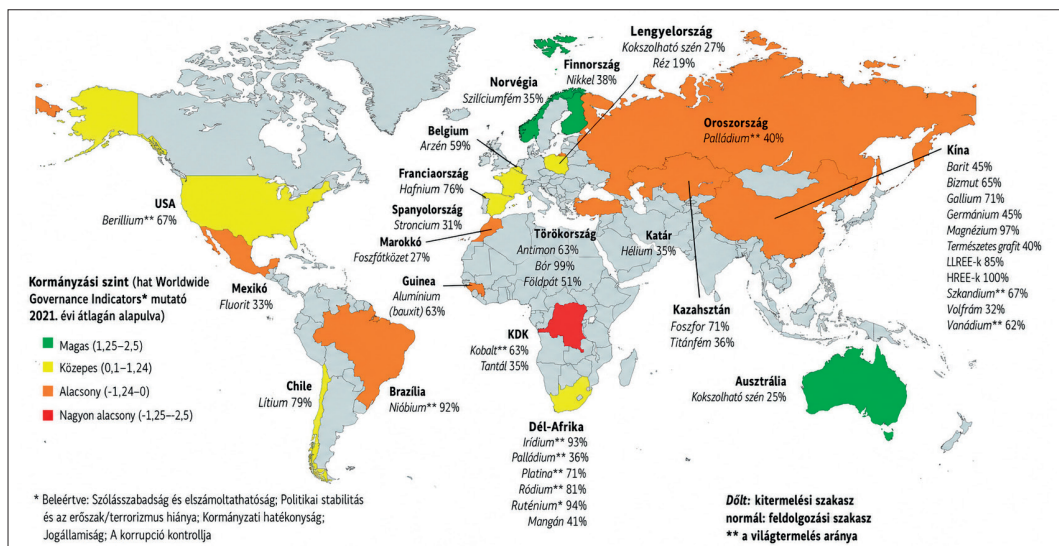
A digitális reziliencia legfontosabb kérdése ezért nem az, hogy mennyire intelligens lesz a hálózat. Hanem az, hogy mennyire tudunk megbízni abban, ahogyan ezt az intelligenciát használjuk.

4.3. Anyag- és értéklánc-reziliencia – lehet-e zöld az átmenet új függőségek nélkül?

Az energiaátmenet egyik legerősebb ígérete az importfüggőség csökkentése. Ha egy ország villamosenergia-igényének nagyobb részét nap-, szél- vagy más hazai energiaforrásból képes fedezni, kevesebb importált földgázra, kőolajra és szénre lehet szüksége. Első megközelítésben ez egyértelmű ellátásbiztonsági nyereség. A fosszilis energiarendszer egyik alapvető sérülékenysége ugyanis éppen abból fakad, hogy működéséhez folyamatos anyagáram szükséges.

Az elektrifikált, nagy arányban megújuló forrásokra épülő rendszer ebből a szempontból valóban más. Egy napelem vagy szélturbina megépítése után nem igényel folyamatos üzemanyagimportot, és az akkumulátor

sem fogyasztja el minden ciklusban a benne található lítiumot vagy nikkelt. Ebből azonban nem következik, hogy az energiaátmenettel maga a függőség is megszűnik. Sokkal inkább annak jellege változik meg. A folyamatos tüzelőanyagáram helyett a technológiák, nyersanyagok, feldolgozókapacitások, alkatrészek és végső soron az ipari kompetenciák hozzáférhetősége válik stratégiai kérdéssé. Ezzel az energiaátmenet egyik sajátos paradoxonához érkezünk. A fosszilis energiahordozóktól való függőség csökkentése nem szünteti meg automatikusan a geopolitikai kitettséget. Ennek egy része egyszerűen más értékláncokba helyeződik át.



6. ábra.
Kritikus fontosságú nyersanyagok
(European Commission, Raw Materials Information System ábrája alapján)

A nyersanyagfüggőség ráadásul több szinten jelentkezik. Az első maga a kitermelés: bizonyos kritikus fontosságú nyersanyagok globális termelése mindössze néhány országra koncentrálódik. A második a feldolgozás és a finomítás, amely földrajzilag még koncentráltabb lehet. Kevésbé segít ugyanis, ha valamely ásványi nyersanyag több országban is rendelkezésre áll, miközben a technológiailag szükséges köztes feldolgozási kapacitás csak néhány helyen található meg. A harmadik szint maga a technológiagyártás. Napjainkban az Európában felhasznált napelemcellák és -modulok több mint 90%-a kínai importból származik. Az energiatárolási technológiák importértéke a 2013–2014-es évi 2 milliárd euró alatti szintről 2023-ra 26 milliárd euró fölé emelkedett, miközben ugyanebben az évben a napenergia-technológiák importja is megközelítette a 20 milliárd eurót. Ezek a számok jól mutatják, hogy az energiaimport csökkenése mellett párhuzamosan jelentős technológiaimport épülhet fel. A kérdést ezért úgy érdemes feltenni, hogy milyen függőségeket tekintünk kezelhetőnek, és melyek válnak egyetlen hibaponthoz hasonlóan rendszerszintű kockázattá.

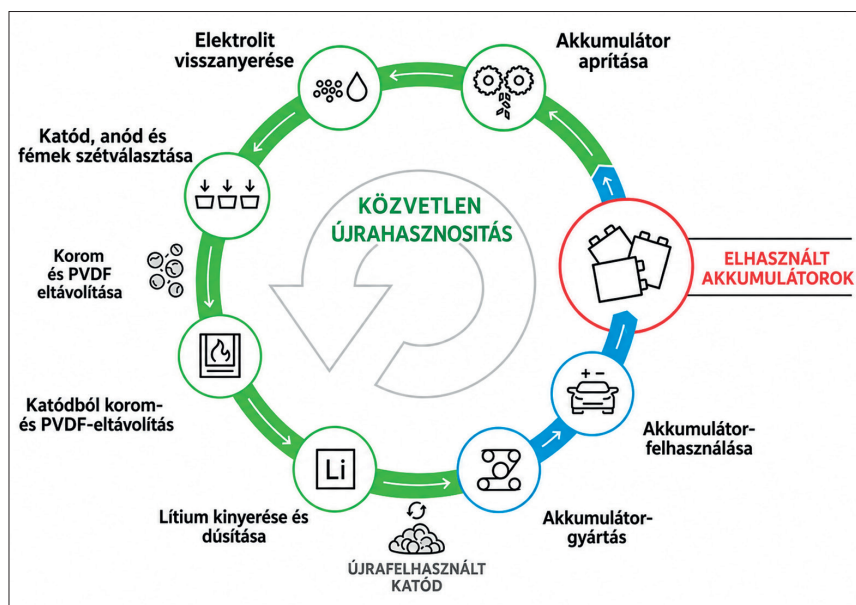
Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2024/1252 rendelete a kritikus fontosságú nyersanyagokkal való biztonságos és fenntartható ellátást biztosító keret létrehozásáról ezt a logikát számszerű célokkal is megpróbálja leképezni. A cél szerint 2030-ra az éves uniós felhasználás legalább 10%-ának megfelelő kitermelési, 40%-ának megfelelő feldolgozási és 25%-ának megfelelő újrahasznosítási kapacitásnak kellene rendelkezésre állnia az Európai Unión belül. Emellett stratégiai nyersanyagoként és feldolgozási szakaszonként legfeljebb 65%-os függőség maradhatna fenn egyetlen harmadik országtól.

Ez a rendelet az iparpolitika szerepét is új megvilágításba helyezi. A villamosenergia-rendszer ellátásbiztonságát korábban elsősorban erőművi kapacitásokkal, tüzelőanyag-készletekkel, hálózati redundanciával

és importlehetőségekkel írtuk le. Egy elektrifikált rendszerben ehhez hozzáadódik a kritikus fontosságú technológiák és alkatrészek előállításának és pótlásának képessége. Európai energiabiztonsági kérdésként kezelhetjük a fenntartható energiatechnológiák gyártásának bővítését, a beszállítói kör diverzifikálását és a stratégiai rendszerek esetében akár több hónapnyi alkatrészigény készletezését is.

Ez közvetlenül összekapcsolja az értéklánc- és a fizikai rezilienciát. Egy viharban megsérült távvezeték gyors helyreállításához nem elegendő a megfelelő műszaki terv és a képzett személyzet. Acélszerkezetre, vezetőre, szigetelőkre, szerelvényekre és működő logisztikára is szükség van. Ha ezek beszerzése egy sérült globális értéklánc miatt hónapokig tart, a hálózat helyreállítási képessége is romlik. Az értéklánc-reziliencia így nagyon is kézzelfogható hálózati kérdéssé válik: közvetlenül befolyásolja, hogy mennyi idő alatt tudjuk egy káresemény után helyreállítani a fizikai infrastruktúrát.

A 2050-es időhorizont különösen fontossá teszi a körforgásosság bevonását ebbe a gondolkodásba. Egy akkumulátor vagy napelem anyagainak jelentős része visszaforgatható a gazdaságba. A villamosenergia-rendszer növekvő anyagigénye ezért hosszabb távon nem feltétlenül jelent vele azonos ütemben növekvő primer nyersanyagigényt. Az újrahasznosítás azonban nem teszi zárttá az anyagkört. Maga is technológiát, energiát, vizet, vegyszereket és ipari infrastruktúrát igényel, miközben környezeti terheléssel is jár.



7. ábra. Akkumulátorok újrahasznosítási folyamata

A lítiumion-akkumulátorok két érettebb újrahasznosítási útvonala jól példázza ezt a kompromisszumot. A pirometallurgiai eljárások magas hőmérsékleten működnek, technológiailag kiforrottak és viszonylag robusztusak, ugyanakkor jelentős az energiaigényük, és egyes anyagok visszanyerési hatásfoka alacsonyabb. A hidrometallurgiai eljárások ezzel szemben akár 150 °C alatti hőmérsékleten is működhetnek, és több kritikus fontosságú fém esetében magasabb visszanyerési arányt érhetnek el. Cserébe jelentős vegyszer- és vízigénnyel, korróziós problémákkal és potenciálisan veszélyes melléktermékekkel kell számolni. A különbségek számszerűen is jelentősek lehetnek. A lítium visszanyerési aránya pirometallurgiai eljárásoknál 65–85 százalék, hidrometallurgiánál 90–95 százalék között alakulhat; nikkel és kobalt esetében a korszerű technológiák jellemzően 90 százalék feletti értékeket is elérhetnek. Az uniós akkumulátorszabályozás

ennek megfelelően fokozatosan szigorodó anyag-visszanyerési célokat határoz meg. Már 2031 végére a kobalt, a réz, az ólom és a nikkel esetében 95 százalékos, a lítiumnál pedig 80 százalékos visszanyerés a cél. A bemutatott technológiák több esetben már jelenleg is megközelítik ezeket az értékeket. Így a következő technológiai előrelépés egyik fontos területe már nem csak a visszanyerési arány további növelése, hanem az ehhez szükséges energia- és erőforrásigény csökkentése lehet.

Fontos ugyanakkor ennek a lehetőségnek a korlátját is látni. A 2050-ig tartó gyors növekedési időszakban az újrahasznosítás önmagában nem teszi feleslegessé a primer nyersanyagokat. Ha az akkumulátorok, hálózati berendezések és más villamos technológiák teljes állománya gyorsan növekszik, akkor hosszú ideig több anyagot építünk be az energiarendszerbe, mint amennyi a korábban telepített, életciklusa végére érő eszközökből visszanyerhető. A körforgásosság ezért először a függőség növekedésének ütemét mérsékelheti. Később, amikor az állomány növekedése lassul és egyre nagyobb mennyiségű eszköz ér életciklusa végére, a másodlagos anyagáram már a kereslet jóval nagyobb részét fedezheti.

Magyarország ebből a szempontból sajátos helyzetben van. Hazánkban és a környező régióban jelentős akkumulátorgyártási kapacitások épültek ki, miközben a nagy volumenű regionális újrahasznosítási kapacitás és primer nyersanyag-kitermelés csak korlátozottan áll rendelkezésre. Stratégiai lehetőség rejlik abban, hogy Magyarország az akkumulátor-értéklánc gyártás utáni szakaszában, az újrahasznosításban is nagyobb szerepet vállaljon. A 2024-ben Magyarországon és a vizsgált uniós szomszédos országokban üzembe helyezett mintegy 110 ezer elektromos jármű például átlagosan 450 kilogrammos akkumulátorcsomaggal számolva közel 50 ezer tonna jövőbeni anyagáramot jelent. Ezek az ipari eljárások ugyanakkor jelentős víz- és energiaigénnyel járhatnak, veszélyes anyagok kezelését, szigorú munkavédelmet és folyamatos ellenőrzést követelhetnek meg. Gazdaságosságuk ráadásul érzékeny az energiaárakra és a visszanyert nyersanyagok piaci értékére is. Ha az újrahasznosítás gazdaságossága magas és volatilis villamosenergia-árak mellett jelentősen romlik, akkor a primer nyersanyagfüggőség mérséklésére létrehozott kapacitás éppen egy energiaársook idején válhat sérülékennyé. A víz szerepe hasonlóan fontos. Különösen a hidrometallurgiai eljárások jelentős víz- és vegyszerigénye miatt egy újrahasznosító üzem telephelyválasztását aligha lehet kizárólag logisztikai és villamosenergia-ellátási szempontok alapján megítélni.

További bizonytalanságot jelent maga a technológiai változás. A jelenlegi jármű- és hálózati akkumulátorpiacot döntően lítiumion-technológiák uralják, de már az NMC (lítium–nikkel–mangán–kobalt-oxid) és az LFP (lítium–vas-foszfát) eltérő anyagösszetétele is jelentősen módosítja a visszanyerhető anyagok mennyiségét és értékét. A nátriumion-, szilárdtest- vagy más akkumulátortechnológiák további változást hozhatnak. Könnyen elképzelhető tehát, hogy a 2020-as évek végén megépített újrahasznosítási infrastruktúra a 2040-es években már részben más összetételű anyagárammal találkozik. Ez ugyanazt a dilemmát hozza vissza, amellyel a fizikai hálózat esetében már találkoztunk: hosszú életű infrastruktúráról kell döntenie gyorsan változó technológiai környezetben.

A teljes önellátás helyett ezért inkább egy portfóliójellegű rezilienciastratégia rajzolódik ki. Bizonyos stratégiai technológiákból indokolt lehet hazai vagy európai gyártókapacitást fenntartani, a kritikus fontosságú nyersanyagok forrásait diverzifikálni, a feldolgozókapacitások túlzott földrajzi koncentrációját mérsékelni, egyes kritikus fontosságú alkatrészekből pedig megfelelő készleteket létrehozni. Ezzel párhuzamosan az újrahasznosítást olyan másodlagos nyersanyagforrássá kell fejleszteni, amely érdemben mérsékli az importkittenetséget, hiszen a technológiai innováció egyik iránya éppen a kritikusanyag-igény csökkentése. Az értéklánc-reziliencia részben idővásárlást jelent: készletekkel, diverzifikációval, körforgásossággal, technológiai alternatívákkal és hazai vagy európai kompetenciákkal csökkenti a változásoknak való kitenetséget.

5. TSO 2050 – a hálózatüzemeltetőtől a rendszerintegrátorig

Az előző fejezet három különböző oldalról közelítette meg a villamosenergia-rendszer rezilienciáját. A fizikai reziliencia azt mutatta meg, hogy a hálózatnak olyan környezeti feltételek között kell még évtizedeken keresztül működnie, amelyek már nem feltétlenül azonosak azokkal, amelyekre eredetileg tervezték. A digitális reziliencia arra hívta fel a figyelmet, hogy a rendszer működése egyre nagyobb mértékben függ az adatoktól, a kommunikációtól, a modellektől és az automatizált döntéstámogatástól. Ez jelentős új képességeket teremt, de egyúttal új sérülékenységeket is. Az anyag- és értéklánc-reziliencia pedig egy harmadik korlátra mutatott rá. Egy műszakilag indokolt beruházásból még nem következik automatikusan, hogy az valóban meg is valósítható akkor és úgy, ahogyan azt a rendszertervező elképzei. Egy transzformátor, kábel, teljesítményelektronikai berendezés, akkumulátor, félvezető vagy akár a megfelelő kivitelezői kapacitás hiánya ugyanúgy rendszerkorláttá válhat, mint egy túlterhelt vezeték.

Első látásra három különböző problémáról beszélünk: valójában azonban ugyanabba az irányba mutatnak. A villamosenergia-rendszer működése egyre több, egymással kölcsönhatásban álló fizikai, digitális és gazdasági feltételtől függ. Ebből pedig közvetlenül következik, hogy maga a rendszerirányítói feladat is átalakul. Nem azért, mert az átviteli hálózat, a frekvencia, az egyensúly vagy az ellátásbiztonság jelentősége csökkenne. Éppen ellenkezőleg! Minél nagyobb a decentralizáció és a digitalizáció, minél digitalizáltabbá és egymástól kölcsönösen függőbbé válik az energiarendszer, annál fontosabb lesz az a szereplő, amelynek nemcsak az egyes részrendszereket, hanem azok együttes működését is látnia kell. Ez egy fontos paradoxon: a decentralizáció első látásra akár azt is sugallhatná, hogy a központi rendszerirányító jelentősége csökken. Hiszen egyre több termelés, tárolás és flexibilitás jelenik meg az átviteli hálózaton kívül, sokszor olyan szereplőknél, amelyeket a TSO közvetlenül nem is irányít.

A valóság azonban inkább az ellenkező irányba mutat. A rendszerirányító egyre kevesebb dolgot tud közvetlenül maga vezérelni, miközben egyre több szereplő, hálózati szint és technológia működését kell rendszer szinten összehangolnia. Vagyis a feladat nem feltétlenül kisebb lesz: más lesz. 2025-ös kiadványunk már megmutatta ennek előjeleit. Az elosztott termelés és az energiatárolás térnyerésével a hálózat fokozatosan kétirányú energiacsere-platformmá válik. A hosszú beruházási átfutási időket csak gördülő, folyamatosan korrigált tervezéssel lehet összeegyeztetni a gyorsan változó fogyasztási és termelési igényekkel. A teljesítményelektronikai eszközök pedig olyan korábban részben természetesnek tekintett rendszerfizikai képességeket helyeznek új alapokra, mint az inercia, a zárlati viselkedés vagy a feszültségtartás.

Mindebből egyre több olyan feladat következik, amely nem kezelhető kizárólag az átviteli hálózat határain belül. A TSO számára releváns flexibilitás jelentős része az elosztóhálózaton jelenhet meg. A rendszerstabilitást befolyásoló eszközök működését egyre nagyobb mértékben szoftver és vezérlési algoritmus határozza meg. Egy hálózatfejlesztési döntést pedig már nemcsak műszaki szükségessége alapján kell megítélni, hanem annak fényében is, hogy rendelkezésre áll-e hozzá a szükséges berendezés, beszállítói kapacitás, engedély, terület és kivitelezési erőforrás. A rendszerirányító tehát egyre kevésbé tekinthet kizárólag a saját hálózatára – az egész rendszert kell látnia. Ez azonban felvet egy alapvető kérdést: Mit jelent majd rendszerirányítónak lenni 2050-ben?

Továbbra is természetesen működtetni kell az átviteli hálózatot. Kezelní kell a szűkleteket, fenn kell tartani a rendszerbiztonságot és a koordinációt a piaci szereplőkkel. De mindez egy olyan környezetben történhet a jövőben, ahol a szükséges képességek jelentős része nem feltétlenül a TSO tulajdonában van, nem közvetlenül az átviteli hálózathoz kapcsolódik és esetenként nem is kizárólag a villamosenergia-rendszer céljait szolgálja. A jövő rendszerirányítója ezért egyre kevésbé lehet pusztán hálózatüzemeltető. Egyre inkább rendszerintegrátorrá kell válnia. Olyan szereplővé, amely képes összekapcsolni a fizikai hálózatot, a decentralizált flexibilitást, az elosztói rendszereket, a digitális információs réteget, a piaci folyamatokat és a regionális együttműködést.

Mindez nem azt jelenti, hogy mindent a TSO-nak kell irányítania. A valódi rendszerintegrátori szerep lényege nem a feladatok centralizálása, hanem annak biztosítása, hogy a különböző szereplők döntései együttesen is fizikailag megvalósítható és rendszerbiztonsági szempontból elfogadható eredményhez vezessenek. A 2050 felé vezető kérdés ezért már nem egyszerűen az, hogy milyen átviteli hálózatot kell megépítenünk. Hanem az is, hogy milyen rendszerirányítóra lesz szükség ahhoz, hogy egy erősen decentralizált, digitálisabb, és kölcsönösen függőbb energiarendszert biztonságosan működtetni lehessen. A TSO-nak alapvetően két feladata lesz: rendszerintegrátor és hálózatüzemeltető.

5.1. A TSO mint a hálózat üzemeltetője

A TSO klasszikus szerepe viszonylag egyszerűen leírható. Hálózati infrastruktúrát tervez, fejleszt és üzemeltet. Fenntartja a rendszer teljesítményegyensúlyát, biztosítja az átviteli hálózat működőképességét, megszervezi a szükséges rendszerszintű szolgáltatásokat, és együttműködik a szomszédos rendszerirányítókkal, valamint a piaccal. Ezek a feladatok 2050-ben sem tűnnek el.

Éppen ezért a rendszer átalakulásával a jelentőségük inkább növekszik. A változás nem elsősorban abban áll, hogy teljesen új feladatok jelennek meg, hanem abban, hogy a meglévő feladatok végrehajtásához szükséges képességek egyre kevésbé találhatók meg egyetlen szervezet, feszültségszint vagy eszközcsoporthatárain belül. A jövőben ugyanazt az ellátásbiztonsági célt kell biztosítani egy olyan rendszerben, ahol a termelés jelentős része időjárásfüggő, a flexibilitás egyre nagyobb hányada az elosztóhálózaton található, a rendszer dinamikai tulajdonságait szoftveresen vezérelt inverterek is befolyásolják, a termelés-fogyasztás egyensúlyához szükséges import- és exportlehetőségek regionális folyamatoktól függenek, miközben a villamosenergia-rendszer egyre szorosabban kapcsolódik a közlekedéshez, a hőellátáshoz, az ipari folyamatokhoz és adott esetben a hidrogénrendszerhez.

Mit jelent ez a rendszerirányító számára? A fizikai rendszer irányítása egyre kevésbé pusztán az átviteli hálózat irányítását jelenti. Ebben az értelemben találó a rendszerirányítóra alkalmazott karmesterhasonlat. A karmester nem játszik minden hangszeren. Nem helyettesíti a zenekar tagjait, és nem ő dönti el minden egyes hang létrejöttét. A feladata az, hogy a különböző szerepű, eltérő képességű és eltérő időben megszólaló részekből működő egészet hozzon létre. A jövő TSO-jának sem kell minden elektromos autót, háztartási akkumulátort, ipari fogyasztót vagy elosztott invertert közvetlenül vezérelnie. Sőt, egy ilyen centralizált rendszer valószínűleg sem műszakilag, sem intézményileg nem lenne kívánatos. A rendszerirányítónak azonban tudnia kell, hogy ezekből az eszközökből milyen rendszer szabályozási képesség áll idősorosan rendelkezésre.

▼ Hol található?

▼ Milyen gyorsan aktiválható?

- ▼ Mennyi ideig képes szolgáltatni?
- ▼ Milyen bizonyossággal áll rendelkezésre?
- ▼ Milyen hálózati következménye van annak, ha igénybe vesszük?
- ▼ Mik a rendszerszabályozási képességek azon költségei, amit az igénybevétel során optimálni kell?

Vagyis ismét nem feltétlenül magukat az eszközöket kell irányítani. A 3. fejezetben bemutatott jövőképekben ezért a TSO különböző szerepei egymásra épülnek. Az átviteli hálózati engedélyes megmarad a fizikai hálózati infrastruktúra üzemeltetőjének, de ezzel párhuzamosan rendszerirányító és rendszerintegrátor, koordinátor, adat- és digitális platformgazda, valamint a piacműködés és a szabályozási keretek kialakítását szakmailag támogató szereplő is. Fontos hangsúlyozni: ez nem feltétlenül jelenti azt, hogy minden területen új, kizárólagos jogkört kell a TSO-hoz rendelni.

Fizikai infrastruktúra ▼ A rendszerintegrátori szerep első pillére továbbra is a fizikai infrastruktúra. A digitalizáció, a flexibilitás vagy a piac ugyanis nem szünteti meg azt az alapvető fizikai ténytet, hogy a villamos energiát vezetékeken, transzformátorokon és alállomásokon keresztül kell továbbítani. A TSO-nak ezért továbbra is képesnek kell lennie különbséget tenni két nagyon eltérő helyzet között. Az egyikben egy hálózati probléma átmenetileg kezelhető intelligens üzemvitellel, flexibilitással, dinamikus terhelhetőséggel vagy pontosabb előrejelzéssel. A másikban valódi fizikai kapacitáshiány alakul ki. Ez a különbség alapvető. Ha ugyanis egy új ipari fogyasztó, naperőmű, akkumulátoros tároló vagy adatközpont lényegesen rövidebb idő alatt jelenik meg, mint amennyi idő alatt egy új távvezeték vagy alállomás megépíthető, akkor a rendszerirányítónak nemcsak a mai szűkületeket kell kezelnie.

A jövőbeli mozgásteret is meg kell teremtenie. Ezáltal a hálózatfejlesztés egyre kevésbé egyszerűen a várható terhelés kiszolgálását jelenti. A nyomvonalak, az alállomási helyek, a bővíthető struktúrák és a későbbi fejlesztési lehetőségek megőrzése ugyanolyan stratégiai feladattá válhat, mint maga a beruházás.

Továbbá, hogy ki lesz azért a felelős, milyen jogokkal ruházzák fel és milyen eszközökkel rendelkezik ennek végrehajtására? A klímaváltozás miatt egyre kevésbé elegendő kizárólag a múltbeli időjárási statisztikákból kiindulni. Ugyanakkor nyilvánvalóan nem lehet minden hálózati elemet minden elképzelhető extrém eseményre méretezni. A kérdés az, hogy hol érdemes a fizikai rezilienciát növelni, hol tudjuk a kockázatot jobb megfigyelési képességekkel csökkenteni, és hol kell inkább a gyors helyreállítás képességet fejleszteni. A statikus biztonsági filozófiát ezért egyre inkább kockázatalapú és állapotfüggő megközelítéssel kell kiegészíteni. Ide tartozik a kritikus hálózati folyosók fizikai megerősítése is.

Digitális integráció ▼ A digitális integráció természetesen nem azt jelenti, hogy a TSO-nak klasszikus értelemben informatikai vállalatná kell válnia. A fizikai rendszerállapot azonban megfelelő adat-, kommunikációs és modellezési infrastruktúra nélkül ma már nem látható és a jövőben még kevésbé lesz irányítható ezek hiányában. A modern rendszerirányítás jelentős része már ma is informatikai jellegű. A következő lépés pedig valószínűleg a szenzorok, a hálózati modellek, a szabványok, az adatplatformok és a döntéstámogató rendszerek egyre szorosabb funkcionális összekapcsolása lesz. De itt ismét fontos kiemelni, hogy a cél az, hogy a megfelelő adat a megfelelő időben, megfelelő minőségben és megfelelő rendszerértelmezéssel álljon rendelkezésre ahhoz, hogy optimális döntéseket lehessen hozni akár haváriahelyzetekben is.

Ha a TSO számára releváns erőforrások jelentős része az elosztóhálózaton található, akkor önmagában a saját hálózati modell már nem feltétlenül elegendő. Tudni kell, hogy egy aggregált flexibilitási ajánlat fizikailag valóban elérhető-e, az aktiválása nem okoz-e lokális szűkületet, és a mögötte álló erőforrások ténylegesen ugyanazt a szolgáltatást képesek-e nyújtani, amelyet a rendszerirányító feltételez. A digitális integráció tehát nem informatikai kényelmi funkció, hanem rendszerbiztonsági feltétel.

Piaci és intézményi integráció ▼ A TSO egyre inkább olyan rendszerben működik, amelyben a fizikai állapot nagyszámú szereplő gazdasági döntéseinek eredőjeként alakul ki. Az átviteli hálózati engedélyes nem avatkozhat be közvetlenül minden egyes termelőegység vagy fogyasztó napi szintű működésébe. A lehetőségeinek határáig biztosítani kell, hogy a piaci műveletek fizikailag végrehajthatóak legyenek. Ez pedig nem minden esetben történik automatikusan, és nem minden körülmények között végrehajtható. Figyelembe kell venni több, különböző dimenziójú célfüggvényt:

- ▼ a társadalmi-gazdasági optimum;
- ▼ a lokális hálózati optimum;
- ▼ és az országos rendszerbiztonsági optimum.

Ennek a három területnek a célfüggvényei nem feltétlenül mutatnak egy irányba, sőt. Egy aggregátor számára gazdaságilag optimális üzleti döntés okozhat szűkületet a hálózaton. Egy olyan hálózati konfiguráció, amely a DSO számára optimális, csökkentheti a TSO számára rendelkezésre álló szabályozási tartalékot. Egy piaci szempontból kedvező importenergia-vásárlás a saját és/vagy a szomszédos országok hálózatán a biztonsági korlátokat meghaladó terheléseket okozhat. A jövő TSO-jának ezért egyre pontosabban kell meghatározni, hogy hol és mikor tud a piac zavartalanul működni, és hol szükséges közvetlen koordináció a TSO és a piac között. Az is kérdés, hogy mely helyzetekben kell a piaci tevékenységet korlátozni egy rendszerbiztonsági korlát miatt. Ez nem a piac és a rendszerirányítás közötti választás, hanem a két terület koordináción alapuló működtetése.

TSO mint stratégiai tudásközpont ▼ A közpolitikai döntés a megfelelő politikai és társadalmi szereplők feladata. A TSO feladata az, hogy felhívja a figyelmet a tervezett döntések műszaki következményeire, lehetséges előnyeire és hátrányaira. Mi történik, ha egy adott termelési technológia gyorsabban épül ki a vártnál? Milyen hálózati következménye van egy új iparági fogyasztó megjelenésének? Milyen nagyságú, időütemezésű tartalékkapacitás szükséges különböző energiasztratégiai forgatókönyvek esetén? Milyen új függőséget teremt egy új technológiai választás? Mely beruházások válnak egy későbbi időpontban hasznottevővé, leállíthatóvá? A TSO ebben a szerepben nem a kívánatos jövőt választja ki, hanem a különböző megoldások fizikai következményeire hívja fel a figyelmet.

Magyarország esetében ennek különös jelentősége van. A 2050-ig meghozandó infrastruktúradöntések jelentős részének következményei átnyúlnak a szabályozási, üzleti vagy politikai ciklusokon. Ezért a TSO-nak a rövid távú döntések hatását a hosszabb távokra is vizsgálnia kell. Ez a rendszerintegrátori szerep egyik legfontosabb eleme. A TSO rendszerintegrátorrá válása tehát nem az irányítás centralizálását jelenti. Sőt, bizonyos értelemben éppen az ellenkezőjét. A rendszerben a decentralizáció egyre mélyebbé, elterjedtebbé válik. Egyre több szereplő hoz önálló döntést. Egyre több rendszerképesség található az átviteli hálózaton kívül. És egyre több technológia működése függ olyan szabályozástól, amelyet nem közvetlenül a TSO határoz meg. Mindeközben azonban valakinek továbbra is felelnie kell azért, hogy az egész rendszer együtt működjön.

5.2. TSO–DSO–aggregátor–európai koordináció

A rendszerintegrátori szerep egyik legfontosabb gyakorlati következménye a TSO és a DSO közötti kapcsolat átalakulása. A klasszikus villamosenergia-rendszerben ez a viszony viszonylag egyszerűen volt leírható. Az energia jellemzően nagyobb feszültség szintek felől haladt az kisebb feszültség szintek irányába. Az elosztóhálózat pedig az átviteli rendszer felől nézve sok esetben egy aggregált fogyasztási pontként jelenet meg. A rendszerszintű szabályozás legfontosabb erőforrásai többnyire az átviteli hálózathoz kapcsolódtak. Ez a kép azonban fokozatosan elveszíti az érvényességét és átalakul.

Az elosztóhálózat ma már egyszerre tartalmaz fogyasztást, termelést, energiatárolást és aktívan szabályozható eszközöket. Egy alállomás kikapcsolása ezért már nem csak fogyasztást választ le, hanem jelentős termelői kapacitást is kivon a rendszerből. Egy elosztóhálózatra kapcsolódó akkumulátor pedig egyidejűleg nyújthat lokális szolgáltatást a DSO-nak és rendszerszintű szolgáltatást a TSO-nak. Vagyis a korábbi, viszonylag egyértelmű határfelület helyén egyre összetettebb kölcsönhatások és kapcsolatok alakulnak ki. Ezért a szakértői interjúk egyik visszatérő tanulsága az, hogy a DSO-hálózat állapotának információit és szabályozási képességét a jövőben a TSO-nak mélyebben kell ismernie. Ez annak ellenére így van, hogy a DSO eszközeinek és berendezéseinek irányítása továbbra sem a TSO-ból fog történni.

Ezzel szemben a decentralizált rendszer csak akkor maradhat kezelhető, ha a felelősségi határok világosak. A DSO alapvető feladata a lokális hálózat felügyelete és irányítása. A DSO részletesen ismeri a helyi feszültségviszonyokat, a közép- és kiefeszültségű hálózat szűkületeit, az elosztott termelés tényleges csatlakozási környezetét, paramétereit, valamint a fogyasztói ellátás lokális problémáit. A TSO ezzel szemben az országos villamosenergia-rendszer egyensúlyát, az átviteli szűkületeket, a nagy rendszerszintű zavarokat, a frekvenciát és a határkeresztező kölcsönhatásokat kezeli. A két szerep tehát nem egymás alternatívája. Egy decentralizált rendszerben akár egyszerre nőhet mindkét irányító szervezet jelentősége.

A TSO–DSO kapcsolat ezért a jövőben nem egyszerűen alá-fölérendeltségi viszony. Sokkal inkább kooperatív, de egyértelmű felelősségekre épülő rendszerre van szükség. Ez a kialakuló új rendszerben jelentős eltérés az eddigi viszonyrendszerhez képest. A TSO-k hagyományosan erős és merev rendszerszintű koordinációs kultúrával rendelkeznek. Ezzel szemben a DSO-k bizonyos lokális és digitális innovációkat gyorsabban képesek alkalmazni, mint a TSO-k. A kérdés most tehát az, hogyan lehet a kétféle képességet összekapcsolni. Ehhez közös fogalmakra, adatbázisokra, időszinkronizálásra és operatív eljárásokra van szükség. A jelen kötetben ugyanezt a logikát hangsúlyozzuk: a helyi innováció csak akkor válik tartósan értékkel, ha együttműködve, közösen értelmezett szabványokra épül, és ezáltal más DSO-k, valamint a TSO rendszereivel is összekapcsolható.

A harmadik fontos szereplő az aggregátor. Az aggregátor egészen más logika szerint működik. Nem hálózatot üzemeltet. Nem rendszerbiztonsági döntést hoz. Feladata az, hogy sok kis erőforrást olyan portfólióvá szervezzen, amely már mérhető, elszámolható, és biztonságosan igénybevehető szolgáltatást képes nyújtani. A jövő rendszerirányítása számára ez kulcsfontosságú lehet. Nem reális ugyanis, hogy a TSO MAVIR több százezer elektromos autóval, hőszivattyúval, háztartási akkumulátorral vagy kiserőművel külön-külön tartson fenn operatív kapcsolatot. Az aggregátor ezt a komplexitást csökkenti le kezelhető számú portfólióra. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a mögöttes fizikai hálózat megszűnik. Egy 100 MW-os aggregált portfólió nem ugyanazt jelenti akkor, ha az erőforrások egyetlen hálózati térségben koncentrálnak, mint akkor, ha földrajzilag szétszórva helyezkednek el. A névleges teljesítmény tehát itt sem elegendő információ. További kérdéseket is meg kell válaszolni ahhoz, hogy a rendszert működtetni lehessen.

- ▼ Hol található a képesség?
- ▼ Milyen gyorsan aktiválható?
- ▼ Mennyi ideig tartható fenn?
- ▼ Mekkora a gép helyreállítási ideje?
- ▼ Milyen valószínűséggel teljesíti a vállalt szolgáltatást?
- ▼ Mennyire átkonfigurálható forrásátelhelyezéssel?
- ▼ Milyen lokális hálózati következménye lehet az aktiválásnak?

A rendszerirányító számára ezek legalább olyan fontos kérdések, mint maga a felajánlott aggregált szolgáltatás. A jelen kötet ezért az aggregátort lényegében komplexitáscsökkentő közvetítőként kezeli. Segítségével a kisebb eszközök bevonhatók a rendszerszintű működésbe anélkül, hogy minden egyes eszköz külön operatív kapcsolódást igényelne.

Mindazonáltal nem minden szolgáltatás esetében ugyanaz a helyzet. Van, ahol az aggregált teljesítmény önmagában is jól használható. Más esetben viszont a szolgáltatás lokációja, a dinamikai tulajdonságai vagy a hálózati hozzáférhetősége válik meghatározóvá. Itt jelenik meg a TSO–DSO–aggregátor kapcsolat egyik legfontosabb koordinációs problémája. Egy TSO számára kedvező helyen lévő szolgáltatás igénybevétele helyi szűkületet vagy feszültségproblémát idézhet elő a DSO hálózatán. Fordítva, egy DSO által aktivált szabályozási eszköz akkor válhat elérhetetlenné a TSO számára, amikor rendszerszintű kiegyenlítési vagy tartalékcélból szükség lenne rá. Mit lehet ilyenkor tenni? Az egyik szélsőséges megoldás az lenne, hogy mindig a TSO élvez elsőbbséget. A másik, hogy minden esetben az elsőbbség a DSO-nál van. Valószínűleg egyik sem helyes. A prioritásnak az aktuális rendszerállapottól és a konkrét beavatkozás következményeitől kell függenie. Ezáltal a jövő koordinációs rendszerében normál üzemi helyzetként kell kezelni azokat az eseteket, amelyekben egy szabályozási szolgáltatás nem egyértelműen engedélyezhető és nem is egyértelműen tiltandó.

Ha a jelzőlámpamodellhez hasonlítjuk ezt a helyzetet, akkor a fentiek a sárga állapotok. A zöld eset egyszerű: az aktiválás indítható. A piros is viszonylag egyértelmű: az aktiválás nem megengedhető. A sárga azonban koordinációt igényel, amely a következőkben ölthet testet:

- ▼ további hálózati ellenőrzés;
- ▼ korlátozott aktiválás;
- ▼ ismételt optimáló vizsgálat;
- ▼ feltételes engedélyezés;
- ▼ TSO–DSO egyeztetés.

Az bizonyos, hogy a működés során lesznek konfliktusok. A valódi kérdés az, hogy a konfliktus felismerésre és feloldására van-e előre rögzített, kellően gyors és utólag is auditálható eljárás. Ehhez az információáramlást sem lehet egyetlen általános adatcsere-folyamatként kezelni. Éves és többéves időtávon a fő feladat a hálózatfejlesztési tervek, a csatlakozási igények, a várható termelési és fogyasztási szerkezet, valamint a szükséges flexibilitási képességek összehangolása. Itt nem feltétlenül arra van szükség, hogy a TSO és valamennyi DSO pontosan ugyanazt a hálózati modellt használja. Arra viszont igen, hogy a határfeleleteken konzisztens adatokkal dolgozzanak.

Egy átviteli hálózati fejlesztés értékét ugyanis nem lehet teljes egészében megítélni a kapcsolódó elosztói változások ismerete nélkül. Ugyanez fordítva is igaz. Egy jelentős DSO-szintű szabályozási képesség értéke sem határozható meg az átviteli hálózat korlátainak figyelembevétele nélkül. A napos és órás időtáv már egészen más információkat igényel. Itt a várható üzemállapot, a termelési és terhelési előrejelzések, a tervezett hálózati kikapcsolásokat, az elérhető tartalékok és a szabályozási képesség ajánlatai kerülnek előtérbe. Ebben az időtartományban rendszerirányítói szempontból még jelentős döntési szabadság áll rendelkezésre. Ha a problémát időben felismerhető akkor, újra lehet optimalizálni a működést:

- ▼ módosítható egy piaci aktiválás;
- ▼ megváltoztatható a kapcsolási állapot;
- ▼ átütemezhető egy tervezett üzemviteli karbantartás.

A probléma tehát ilyen időtávon még megelőzhető. A valós időhöz közeledve azonban a mozgástér gyorsan csökken. Perces időskálán már nagyon gyors koordinációra és részben automatizált ellenőrzésekre van szükség. Másodperces időskálán pedig nincs idő egyeztetésre vagy beavatkozásra. Az ezeknek az eseményeknek az elhárítására alkalmazott eljárásokat és intézkedéseket előzetesen kell meghatározni. A beavatkozást helyi szabályozók, védelmek és automatikák hajtják végre.

Ez egy alapvető szervezési következtetéshez vezet. Nem minden koordinációt igénylő problémát ugyanazon szervezeti szinten és ugyanazon eljárással kell megoldani. Ami évekkal korábban közös tervezési kérdés, az órákkal az esemény előtt optimalizálási feladat lehet, másodpercekkel előtte pedig már kizárólag automatizált helyi beavatkozásra van lehetőség. Tehát a hatáskörök meghatározásában az időskálát is figyelembe kell venni.

Az európai rendszer szintjén ugyanezt a logikát kell alkalmazni, egy lényegesen nagyobb hálózaton. Magyarország nem önálló villamosenergia-rendszer. A határkeresztező kereskedelem, az időjárásfüggő termelés földrajzi sajátosságai, a tartalékok megosztása és a nagy rendszerzavarok terjedése miatt a magyar TSO döntései csak regionális összefüggésben értelmezhetők. A szakértői interjúk alapján ezért a regionális együttműködés, valamint az RCC-k (Regionális Koordinációs Központok) szerepének további erősödése reális fejlődési irány.

Itt ismét ugyanaz történik, mint a TSO–DSO kapcsolat esetében. Bizonyos döntéseket lokálisan vagy nemzeti szinten kell meghozni, mások viszont fizikailag nem állnak meg az országhatáron. A határkeresztező szűkületek kezelése, a tartalékok elosztása, a rendszerbiztonsági elemzések vagy egy nagyobb regionális zavar kezelése szükségszerűen együttműködést igényel a TSO-k, és szükség esetén a TSO-k és DSO-k között. A jövő villamosenergia-rendszere ezért két, első látásra ellentétes irányba változik egyidejűleg. Lokálisabb lesz. És közben európaibb is.

A DSO-nak egyre részletesebben kell látnia és kezelnie a saját területén működő sok ezer vagy sok százezer eszközt. A TSO-nak pedig egyre szorosabban kell kapcsolódnia ehhez a lokális világhoz, miközben ugyanilyen szorosan kell illeszkednie a regionális és európai rendszerirányítási struktúrákhoz is. A TSO MAVIR helye a két rendszer között van. Nem kell átvennie a DSO lokális feladatait. És természetesen nem válik európai szintű rendszerirányítóvá sem. A feladata sokkal inkább az, hogy a rendszer között a rendszerek számára értéket közvetítsen:

- ▼ a lokális flexibilitásból országosan használható képességet;
- ▼ a DSO-k részletes hálózati információiból rendszerszintű döntéstámogatást;
- ▼ az aggregátorok portfólióiból (fizikailag hitelesített) szolgáltatást;
- ▼ a regionális együttműködésből pedig magyar ellátásbiztonsági értéket.

Ez a rendszerintegrátori szerep egyik legfontosabb eleme. A jövő TSO-ja tehát nem egyszerűen a hierarchia tetején áll. Különböző térbeli és időbeli szintek találkozási pontjában működik. Egyre inkább az lesz a feladata, hogy biztosítsa azt, hogy a lokális folyamatok és döntések, az országos rendszerigények, valamint az európai koordináció ne egymás ellen, hanem ugyanannak a fizikai rendszernek a működőképességét szolgálva működjenek együtt.

5.3. A jövő rendszerszintű képességei és szolgáltatásai

A jövő rendszerszintű szolgáltatásairól könnyű úgy gondolkodni, mintha a ma ismert tartalékpiacokat kellene egyszerűen kibővíteni. Valószínűleg azonban ennél lényegesen mélyebb változás előtt állunk. A klasszikus, szinkrongenerátorokra épülő villamosenergia-rendszerben számos fontos rendszerfizikai tulajdonság lényegében „csomagban” érkezett az energiatermeléssel együtt. Egy nagy forgógép nemcsak hatásos és meddő teljesítményt termelt. Természetes inerciát biztosított, zárlati teljesítményt adott, részt vett a feszültségszabályozásban, és számos olyan dinamikai tulajdonsággal rendelkezett, amelyet a rendszerüzemeltetés magától értetődőnek tekinthetett. A termelési szerkezet átalakulásával ez a csomag fokozatosan csökkenni fog. Ez az egyik legfontosabb változás.

2025-ös kiadványunk már rámutatott arra, hogy a természetes inercia csökkenésével a virtuális vagy szintetikus inercia, a hálózatformáló, azaz *grid-forming* működés, az energiatárolók vagy a szinkronkompenzátorok szerepe is növekedhet. Hasonló folyamat figyelhető meg a feszültségszabályozás és a meddőteljesítmény biztosítása esetében is. Ahogy a hagyományos erőművek részaránya csökken, az inverteres és elosztott eszközöknek egyre több olyan rendszerfunkcióban kell részt venniük, amelyet korábban döntően a szinkrongépek biztosítottak.

A 3. fejezetben bemutatott jövőképekben ugyanez a fejlődési irány jelenik meg. A klasszikus kiegyenlítési szolgáltatások mellett egyre fontosabbá válik a feszültség- és meddőteljesítmény-szabályozás, az inercia, a hálózatformáló képesség és általában az inverteralapú erőforrások rendszerszintű bevonása. Ebből azonban egy fontos következtetés adódik. A TSO-nak 2050 felé egyre kevésbé technológiákat, és egyre inkább rendszerképességeket kell menedzselnie. Nem az a legfontosabb kérdés, hogy hány megawatt akkumulátor, naperőmű vagy szélerőmű van a rendszerben. Hanem az, hogy egy kritikus üzemállapotban rendelkezésre áll-e elegendő gyorsan igénybevehető hatásos teljesítmény. A következő kérdések merülhetnek fel.

- ▼ Van-e megfelelő feszültségszabályozási képesség?
- ▼ Van-e elég inercia vagy annak funkcionális megfelelője?
- ▼ Rendelkezésre áll-e hálózatformáló, szigetüzem képző képesség?
- ▼ Megfelelő-e a zárlati teljesítmény és a lengéscsillapítás?
- ▼ Van-e aktiválható fogyasztói rugalmasság?
- ▼ Szükség esetén milyen gyorsan állítható helyre a rendszer topológiája és műszaki paraméterei?

Egy 100 MW-os akkumulátor nem feltétlenül ugyanazt jelenti egy hálózatkövető, azaz *grid-following* és egy hálózatformáló, azaz *grid-forming* szabályozás esetén. 1 Mvar meddőteljesítmény nem ugyanannyit ér az ország minden pontján. Egy gyors aktív teljesítményválasz értéke pedig attól is függhet, hogy hol található a zavarhoz, a gyenge hálózati pontokhoz vagy egy aktuális szűkülethez képest. A rendszerszintű szolgáltatások ezért egyre inkább hely-, állapot- és időfüggő rendszerképességekké válnak. Ez alapvetően más gondolkodásmódot igényel.



8. ábra. A rendszer irányítása (Forrás: Wikimedia Commons, Dpysh w)

A klasszikus teljesítményáramlási térkép mellé fokozatosan egyfajta dinamikai kapacitástérképnek is társulnia kell. A rendszerirányítónak természetesen továbbra is látnia kell a hálózat elmeinek a terhelését és az esetleges szűkületeket. Továbbá az is elengedhetetlen, hogy tudja, mely térségekben mennyi dinamikus feszültségszabályozási képesség áll rendelkezésre.

A rendszerbiztonsági tartalék tehát egyre kevésbé írható le néhány országos aggregált mutatóval. Ez a fizikai rendszer átalakulásának egyik legfontosabb következménye. Közben a rendszerszintű szolgáltatások forrása is sokszínűbbé válik. A hagyományos nagyerművek mellett akkumulátorok, inverterrel kapcsolódó megújuló alapú termelők, ipari fogyasztók és aggregált elosztott termelők is részt vehetnek a rendszer stabilitásának biztosításában.

Ez első látásra azt sugallhatná, hogy minden szolgáltatás egyre inkább decentralizálható. De ez sem ilyen egyszerű. Bizonyos rugalmassági szolgáltatásoknál az aggregált eszközök bevonása kifejezetten értékes lehet. Ha például gyors hatásosteljesítmény-változtatásra van szükség, több kisebb termelői erőforrás megfelelő aggregáció mellett már érdemi rendszerhatást tud elérni. Egy lokális feszültségi vagy stabilitási problémánál azonban már nem feltétlenül elegendő az országos összesített kapacitás. Ott az igénybevétel helye is fontos szerepet játszik. Ezért hibás az az egyszerű feltételezés is, hogy minden rendszerszintű szolgáltatási képességből egységes országos piacot kell kialakítani (A feszültség – meddő-teljesítmény piac tulajdonságából adódóan nem lehet országos, hiszen a szolgáltatás helyfüggő, lokációhoz kötött). A fizikai biztonsági minimum és a versenypiacon beszerezhető rendszerszintű szolgáltatási képesség ugyanis nem feltétlenül egyenértékű. Bizonyos képességeket már a csatlakozási feltételekben vagy a hálózati előírásokban elő kell írni és ellenőrizni kell. Más képességek piaci szolgáltatásként is beszerezhetők. Hol húzódik a kettő között a határ? Erre nincs minden szolgáltatásra érvényes általános válasz. Attól függ, milyen gyors reakcióra, beavatkozásra van szükség. Milyen következménnyel jár a szolgáltatás hiánya? Mennyire helyettesíthetők egymással a szolgáltatók? És mennyi idő marad egy hibás döntés korrigálására?

Egy milliszekundumos vagy másodperces időskálán kritikus rendszerfizikai képességet nehéz úgy figyelembe venni és kezelni, mint egy több perces vagy órás terméket. Az időskála tehát itt is meghatározza a megfelelő képesség igénybevételét. Ugyanez vonatkozik a hosszú távú képességek biztosításában is. Ha csak több év múlva várható egy stabilitás probléma, akkor még időben többféle lehetőség áll rendelkezésre ennek elhárítására:

- ▼ épülhet új szinkronkompenzátor;
- ▼ telepíthető hálózatképző energiatároló;
- ▼ megerősíthető a hálózat;
- ▼ módosíthatók a csatlakozási követelmények;
- ▼ a piaci szereplők mozgásteret módosítható.

Egy évvel előre a lehetőségek már szűkebbek. Ekkor inkább a meglévő képességek lekötése és megfelelő földrajzi eloszlása kerül előtérbe. Másnapi vagy valós idejű térben már abból kell gazdálkodni, ami fizikailag rendelkezésre áll. A TSO rendszerszintű szolgáltatási stratégiájának ezért nem egyetlen piaci termékről kell szólnia. Sokkal inkább a különböző időtávokon biztosított rendszerképességek portfóliójáról.

- ▼ Van, amit beruházással kell megteremteni.
- ▼ Van, amit hálózati előírással.
- ▼ Van, amit hosszabb távú szerződéssel.
- ▼ Van, amit napi piacon.
- ▼ És van, amit a rendszernek egyszerűen fizikailag magában kell hordoznia.

Külön kategóriát jelent a helyreállítási képesség. A reziliencia ugyanis nem jelentheti azt, hogy minden zavart megpróbálunk megakadályozni. Ez sem műszakilag, sem gazdaságilag nem reális. Egy megfelelően tervezett villamosenergia-rendszerben is maradnak olyan események, amelyek meghaladják a normál tervezési tartományt. A rendszerirányító teljesítményét ezért nemcsak az alapján kell értékelni, hogy milyen ritkán következik be nagyobb zavar. Hanem az alapján is, hogy mi történik utána.

- ▼ Milyen gyorsan ismeri fel az eseményt?
- ▼ Képes-e izolálni a problémát?
- ▼ Mennyire sikerül megakadályozni a hibák, ellátási zavarok kiterjedését?
- ▼ És milyen gyorsan képes helyreállítani a kiesett szolgáltatásokat?

A black start, a rendszer-visszaépítés, a tartalék kommunikáció, a kritikus berendezések pótlása és a kihegyezett gyakorlatok, szimulátorok alkalmazása ugyanúgy rendszerszintű képességek. Csak éppen nem normál üzemi körülmények esetén használjuk őket. Itt kapcsolódik össze nagyon közvetlen módon a fizikai és az értéklánc-reziliencia. Nem elegendő ugyanis tudni, hogy egy transzformátor meghibásodása után milyen új berendezésre van szükség.

- ▼ Annak a berendezésnek ténylegesen elérhetőnek kell lennie.
- ▼ Le kell tudni gyártani.
- ▼ El kell tudni szállítani.
- ▼ Telepíteni kell.
- ▼ Megfelelő időn belül üzembe is kell helyezni.

Ugyanez igaz a teljesítményelektronikai eszközökre, kábelekre, vezérlési rendszerekre vagy más kritikusan fontos komponensekre is. Ezekre is gondolni és tervezni kell a rendszerirányítónak. Nem kizárólag a villamos teljesítmény- és energiatartalékokat kell biztosítani, hanem a

- ▼ a kritikus fontosságú alkatrészeket;
- ▼ a beszállítói függőségeket;

- ▼ a helyettesíthetőséget;
- ▼ a javítási és szállítási időket;
- ▼ és adott esetben a stratégiai tartalékkészleteket is.

Az ellátási lánc természetesen nem válik a rendszerfizika részévé. De meghatározza, hogy milyen gyorsan állítható helyre az átviteli hálózat normál üzeme. Ezáltal az ellátási láncnak közvetlen rendszerbiztonsági jelentősége lesz. Ennek biztosításához az alábbi alapvető kérdések megválaszolása szükséges.

- ▼ Milyen fizikai képességre van szükségünk?
- ▼ Hol?
- ▼ Milyen időtávon?
- ▼ Mekkora mennyiségben?
- ▼ Milyen reakciósebességgel és időtartamra?
- ▼ Milyen bizonyossággal kell rendelkezésre állnia?

Ha ezekre a kérdésekre megfelelő választ tudunk adni, akkor a technológia már másodlagos kérdéssé válhat. Lehet szinkrongép, akkumulátor, inverter, aggregált fogyasztói szabályozó képesség, hálózati eszköz vagy ezek valamilyen kombinációja. A rendszerirányítás szempontjából nem az a fontos, hogy mi a technológia. Az a kérdés, hogy az adott technológia biztosítja-e a szükséges rendszerképességet akkor, ott és olyan megbízhatósággal, amikor arra szükség van. Ez adja meg a technológiaselemleges rendszerirányítás valódi létjogosultságát? Nem, először a szükséges fizikai funkciót definiáljuk, és csak ezt követően választjuk ki az annak biztosítására legalkalmasabb technológiát.

5.4. Adat, ember és szervezet

A digitális rezilienciáról szóló részben már részletesen foglalkoztunk a mesterséges intelligencia, a prediktív elemzés és a digitális ikrek technológiai lehetőségeivel. A TSO szempontjából azonban talán nem is ez a legfontosabb kérdés. Hanem az, hogy milyen szervezet képes ezeket a technológiákat megbízhatóan használni.

A megbízható alkalmazás első feltétele az, hogy az adatot ne egyszerűen informatikai melléktermékként kezeljük. A jövő rendszerirányításában az adat működési erőforrássá válik. Ugyanúgy alapfeltétel lesz, mint maga a fizikai infrastruktúra. Hibás topológiai adatból hibás hálózati számítás készül. Rosszul paraméterezett invertermodellből téves stabilitási következtetés születhet. Nem megfelelően időbélyegzett mérési adatokból pedig akár olyan eseménysorrendet is rekonstruálhatunk, amely fizikailag soha nem történt meg. Ezért az adatgazdálkodás nem redukálható arra, hogy minél több adatot gyűjtsünk össze. A kérdés sokkal inkább az, hogy milyen minőségű adat áll rendelkezésre, mennyire megbízható, hogyan kapcsolható össze más információkkal, és felhasználható-e tényleges operatív vagy tervezési döntéshez.

A jelen kötet ebből a szempontból helyesen helyezi a hangsúlyt az adatminőségre, a validált mérésekre, az egységes formátumokra, az együttműködési szabványokra és a biztonságos adatplatformokra. A rendszerintegrátor számára ugyanis önmagában az adat mennyisége nem érték. Az értéket az adja, hogy használható-e. Ez egyben arra is utal, hogy a jövő adatarchitektúrája nem feltétlenül egyetlen, mindent magába olvasztó központi adatbázis lesz. A TSO-nak nincs szüksége minden DSO, aggregátor vagy fogyasztó valamennyi nyers adatára. Arra van szüksége, hogy a saját rendszerbiztonsági feladatához releváns információ megfelelő időben, megfelelő minőségben és megfelelő jogosultsági rend mellett rendelkezésre álljon.

Ezáltal a jövő adatarchitektúrája részben egyesített lehet. Az egyes szereplők megőrzik saját adat- és rendszerfelelősségüket, miközben szabványos interfészeken keresztül biztosítják a közös működéshez szükséges információt. Ez nemcsak adatbiztonsági szempontból előnyös, hanem az értéklánc-rezilienciát illetően is. A nyílt, széles körben elfogadott adatmodellek és interfészek ugyanis csökkentik annak a kockázatát, hogy egy kritikus folyamat egyetlen gyártóhoz, szoftverhez vagy technológiai platformhoz kötődjön. A szabványosítás tehát nem informatikai kényelmi kérdés, hanem digitális szuverenitási kérdés, és egyben a hosszú távú helyettesíthetőség egyik feltétele.

A másik nagy kérdés az ember szerepe. A rendszer növekvő komplexitása szükségszerűen több automatizálást kíván. Bizonyos folyamatokat emberi beavatkozás nélkül kell végrehajtani, mert a szükséges reakcióidő egyszerűen nem tesz lehetővé emberi döntést. Más folyamatok azért automatizálhatók, mert rutinszerűek, nagy gyakorisággal ismétlődnek, és jól leírható döntési tartományban működnek. Ebből azonban semmiképpen nem következik az, hogy a jövő rendszerirányító központjából eltűnik az ember.

A szakértői interjúk ebből a szempontból meglehetősen következetes képet mutatnak. Az mesterséges intelligencia és az automatizáció szerepe várhatóan jelentősen növekedni fog, de a kritikus döntésekért felelős emberi operátori funkció megmarad. Az ilyen algoritmusok képesek nagy mennyiségű adatot feldolgozni. Képesek anomáliát keresni, kockázatot rangsorolni és alternatívákat javasolni. De attól még megmarad a kérdés: melyik kockázat vállalható, és melyik nem? Ha két műszakilag lehetséges beavatkozás eltérő rendszerbiztonsági, gazdasági vagy társadalmi következményekkel jár, a felelős választás nem pusztán optimalizálási feladat.

Különösen fontos ez a ritka, nagy hatású események esetében. A normál működés könnyen automatizálható részei éppen azok lehetnek, amelyekben az ember idővel egyre kevesebb közvetlen tapasztalatot szerez. A rendszer egyre több megszokott eltérést kezel önállóan. Az operátornak pedig egyre inkább akkor kell beavatkoznia, amikor valami olyan történik, amire az automatizmus nincs felkészítve. Ez egy érdekes paradoxon. Kevesebb rutinbeavatkozás mellett magasabb szintű emberi döntési képességre lesz szükség.

Ez a várható változás közvetlenül átvezet a képzés kérdéséhez. A klasszikus rendszerfizikai tudás nem válik feleslegessé. Ha az operátor egy algoritmus által felkínált három beavatkozási lehetőség közül választ, akkor értenie kell, hogy az egyes opcióknak milyen fizikai és rendszerbiztonsági következményei vannak. Tehát továbbra is a fizika az alap. De önmagában ez már nem elegendő. A jövő rendszerirányításában dolgozó szakembereknek érteniük kell az adatok bizonytalanságát, a modellek érvényességi tartományát, az automatizált rendszerek működését, a kiberbiztonság alapelveit, a piac és a szabályozás logikáját, valamint a TSO–DSO és a regionális koordináció intézményi összefüggéseit is.

A szakértői interjúkban ezért nem véletlenül jelenik meg a kreativitás és a döntési képesség felértékelődése. Az információ feldolgozásának jelentős részét az algoritmus átveheti, de a felelős értelmezést nem feltétlenül. A jövő TSO-jának ezért valószínűleg nem egyszerűen több informatikusra vagy több klasszikus villamosmérnökre lesz szüksége, hanem vegyes kompetenciájú csapatokra. Olyanokra, amelyek ugyanazt a problémát fizikai, informatikai, piaci és kockázati oldalról is képesek értelmezni. Ez pedig már szervezeti következményekkel jár.

A tervezés, az üzemelőképzés, a valós idejű üzemirányítás, az eszközgazdálkodás, az adatmenedzsment és a piacfejlesztés közötti határok részben elmosódnak. Ezek a funkciók nem szűnnek meg, de egyre szorosabban kell visszacsatolniuk egymáshoz. Ha például az üzemirányítás rendszeresen ugyanabban a térségben,

ugyanazon feltételek mellett tapasztal feszültségi vagy stabilitási hiányt, akkor ez nem maradhat kizárólag operatív tapasztalat. Az információnak vissza kell jutnia a hálózattervezésbe. Ha egy aggregált flexibilitási portfólió rendszeresen elmarad a vállalt teljesítéstől, annak meg kell jelennie a következő beszerzésben, és hosszabb távon pedig a hálózati tervezésben is. Ha egy berendezés állapotmegfigyelése azt mutatja, hogy annak tényleges terhelhetősége tartósan nagyobb a konzervatív névleges feltételezésnél, akkor ez az információ sem maradhat egy eszközgazdálkodási adatbázisban. Üzemviteli értéké kell válnia, vagy legalábbis felül kell vizsgálni a határértékeket. Vagyis a szervezetnek tanulnia kell a saját működéséből.

A jövő működési modellje ezért egyre inkább tanuló rendszerirányító szervezet lehet. A logika alapvetően egyszerű. Terveztünk valamit. Működtettünk vagy aktiváltunk egy megoldást. Kiértékeljük az eredményt. Összehasonlítottuk azzal, amit előzetesen vártunk. Majd az új tudást visszavezettük a következő döntésbe. A digitalizáció talán egyik legfontosabb értéke éppen az, hogy ezt a visszacsatolási hurkot sokkal gyorsabban és lényegesen több információ alapján képes szabályozni.

Ehhez azonban a modellek és algoritmusok felügyeletének is szervezeti rutinná kell válniuk. Nagyjából ugyanúgy, ahogyan ma a berendezések karbantartását természetes feladatnak tekintjük. Egy hálózati vagy stabilitási modell ugyanis nem egyszer készül el. A mögötte lévő hálózat változik. A paraméterek változnak. Az inverterek alapszoftvere módosulhat. Új eszközök jelennek meg. A fogyasztói viselkedés átalakul. Vagyis egy korábban jó modell idővel rossz modellé válhat úgy is, hogy magát a modellt senki nem változtatta meg. Ezért a modellt validálni kell és rendszeresen újra kell kalibrálni. Új verziókat kell létrehozni, és szükség esetén vissza is kell tudni vonni őket. Ugyanez igaz az MI-alapú megoldásokra. Az algoritmusnak nemcsak kódja van, hanem felelőse, érvényességi tartománya és életciklusa is.

Fontos ugyanakkor, hogy mindez ne vezessen szükségtelen centralizációhoz. A szervezeti modellben a decentralizált szakmai felelősséget is meg kell őrizni. Kötetünk 3.2. *Digitális reziliencia* című fejezete ebből a szempontból jól használható szabályozott hibrid megközelítést javasol. Ezzel párhuzamosan azonban az egyes alkalmazási területeknek saját kockázatukhoz és működési sajátosságaikhoz illeszkedő megoldásokat kell tudniuk kialakítani.

Ugyanez a logika a TSO szervezetén belül is értelmezhető. Nem minden innovációt kell egyetlen központi szervezeti egységben létrehozni. Sőt, ez valószínűleg lassítaná is a fejlődést. De közös architektúra, minimális biztonsági követelmények és egyértelmű felelősségi rendszer nélkül a lokális innovációk könnyen egymással inkompatibilis technológiai szigetekké válhatnak. A szervezeti integráció tehát ugyanazt a problémát oldja meg, mint a műszaki együttműködő képesség? Lehetővé teszi a sokféleséget úgy, hogy közben az egész rendszer együtt működőképes marad.

Végül magának az emberi tudásnak a megőrzése is ellenállósági kérdéssé válik. Ez talán kevésbé látványos, mint egy új digitális platform vagy egy MI-alapú alkalmazás. Hosszú távon azonban legalább ilyen fontos, hogy a villamosenergia-rendszer infrastruktúrájának életciklusa több évtizedes. Olyan berendezések és rendszerek működhetnek még 2040-ben vagy 2050-ben is, amelyeket húsz-harminc évvel korábban terveztek és telepítettek. Mi történik akkor, ha addigra már senki nem érti pontosan, miért úgy épült fel az adott rendszer, ahogyan? Mi történik, ha a kritikus tudás teljes egészében egy beszállítóhoz kerül? Vagy a tudás egy szakértői generáció távozásával egyszerűen eltűnik a szervezetből? Ez ugyanolyan függőséget hozhat létre, mint egy technológiai szállítói függőség. A TSO-nak ezért bizonyos kritikus területeken akkor is meg kell őriznie a megrendelői, validációs és rendszerintegrációs tudást, ha a konkrét fejlesztést, üzemeltetési részfeladatot vagy karbantartást külső szereplő végzi. Nem szükséges mindent saját maga

megvalósítania. De értenie kell ahhoz, amit mások megvalósítanak számára. 2050 felől nézve ezért nem az a legfontosabb kérdés, hogy hány döntést hoz majd algoritmus, és hányat ember. A valódi kérdések sokkal alapvetőbbek.

- ▼ Ki érti a teljes rendszert?
- ▼ Ki viseli a döntés felelősségét?
- ▼ Ki képes felismerni, ha a modell vagy az automatizmus téved?

És hogyan biztosítható, hogy a szervezet akkor is képes legyen döntést hozni, amikor a megszokott adat, kommunikáció, modell vagy automatizált döntéstámogatás éppen nem áll rendelkezésre? A három reziliencia-szempontról ebből a nézőpontból ugyanahhoz a szervezeti következtetéshez vezet. A fizikai reziliencia olyan TSO-t igényel, amely nemcsak hálózatot épít és üzemeltet, hanem kockázatot és helyreállítási képességet is menedzsel. A digitális reziliencia olyan TSO-t kíván, amely az adatokat, modelleket és automatizációt nem különálló informatikai eszközöknek, hanem rendszerbiztonsági infrastruktúrának tekinti. Az értéklánc-reziliencia pedig olyan szervezetet követel, amely a technológiai döntéseknél a teljes életciklust, a helyettesíthetőséget, a beszállítói függőséget és a kritikus kompetenciák megtartását is figyelembe veszi.

A magyar rendszerirányító 2050-re ezért várhatóan nem egyszerűen a mai MAVIR nagyobb és digitalizáltabb változata lesz. A lényegi átalakulás funkcionális. A hálózati infrastruktúra üzemeltetőjéből a villamosenergia-rendszer integrátorává, a rendszerképességek menedzserévé és a döntési rendszer gazdájává kell válnia. Nem azért, hogy minden szereplő fölött átvegye az irányítást. Azért, hogy egy sokkal több szereplőből, technológiából, hálózati szintből és döntési pontból álló rendszer továbbra is egyetlen villamosenergia-rendszerként legyen képes működni.

3. táblázat. Intézményi modellek összehasonlítása

Modell	Előnyei	Alkalmazhatósága
A centralizált modellben az ágazati vagy állami központi szereplő alakítja ki a módszertani kereteket, az adatstruktúrákat és a minimális védelmi követelményeket, és bizonyos esetekben maga fejleszti az előrelépő platformokat is.	Egységesebb rendszert teremt, lehetővé teszi az összehasonlítható teljesítménymérést, támogatja a közös referenciaadatbázisok kialakítását, és javítja a felügyeleti átláthatóságot.	Ez a megközelítés különösen akkor indokolt, ha a rendszer egészének megbízhatósága elsődleges, az adatok töredezettségűek, és a szereplők eltérő fejlettsége miatt közös minimumszint kialakítására van szükség.
A decentralizált modell abból indul ki, hogy a szolgáltatók ismerik legjobban saját infrastruktúrájukat, ezért a prediktív rendszerek fejlesztése és működtetése elsősorban náluk, illetve technológiai partnereiknél történik.	Gyorsabb kísérletezést tesz lehetővé, jobban alkalmazkodik a helyi viszonyokhoz, és közvetlenebbül érvényesíti a szolgáltatói felelősséget.	A teljesen decentralizált megoldás különösen ott lehet kockázatos, ahol az ágazati szereplők mérete, erőforrásai és digitális felkészültsége jelentősen eltér egymástól.
A hibrid modell a központi koordinációt és a helyi alkalmazkodást kapcsolja össze: a központi oldal meghatározza a minimális adat-, biztonsági, dokumentációs és validációs követelményeket, miközben a szolgáltatók saját kockázati profiljukhoz illeszkedő megoldásokat alkalmazhatnak.	Egyszerre biztosít közös kereteket és helyi rugalmasságot, támogatja az információmegosztást, az együttműködő képességet és a több szereplő közötti koordinációt.	Ez a megközelítés felel meg leginkább a villamosenergia-rendszer jelenlegi és jövőbeli összetettségének, mert a határkeresztező működés, a megújuló energiaforrások, az adatközpontok és más új nagyterhelések egyaránt több szereplő összehangolt együttműködését teszik szükségessé.

4. táblázat. Intézményi működési modell (magyarországi kontextus)

Funkció	Felelős szereplő	Rövid leírás
Adatgazda	Hálózatüzemeltető (TSO/DSO)	Mindenki által elérhető üzemi, mérési, esemény- és eszközzadatok előállítása, minőségének biztosítása és rendelkezésre bocsátása
Modellgazda	Technológiai partner / hálózatüzemeltető (vegyes)	Előrejelző modellek fejlesztése, karbantartása, verziókezelése és teljesítményének nyomon követése
Validáció	Független szakmai egység (pl. TSO/DSO belső validáció vagy külső partner)	A modellek pontosságának, robusztusságának és üzemi alkalmasságának ellenőrzése
Döntéshozatal	Operatív és vezetői felelősök (TSO/DSO)	A modell eredményei alapján annak eldöntése, hogy szükséges-e beavatkozás és milyen intézkedés indokolt
Felügyelet	Szabályozó hatóság (pl. MEKH, kiberbiztonsági hatóság)	A megfelelési követelmények, adatkezelési és működési szabályok betartásának ellenőrzése
Audit	Független auditor (pl. akkreditált szervezet)	Rendszeres, dokumentált felülvizsgálat a kiberbiztonsági, működési és modellhasználati megfeleléség igazolására

6. A jövőt nem választhatjuk, de kezelhetjük

2025-ös kiadványunk végén arra a következtetésre jutottunk, hogy Magyarországnak olyan átfogó, lehetőség szerint konszenzusos hálózatstratégiai koncepcióra van szüksége, amely legalább 2040–2050-ig tekint a jövőbe.. Miért van szükség ilyen hosszú időtávra, ha közben azt is tudjuk, hogy 2050-et nem lehet pontosan előre jelezni? Éppen ezért. A hálózati beruházások megvalósítási ideje hosszú, műszaki élettartamuk pedig több évtized. Vagyis olyan döntéseket kell ma meghoznunk, amelyek következményei akkor is velünk lesznek, amikor a fogyasztás, a termelési szerkezet, az alkalmazott technológiák és a szabályozási környezet jelentős része már lényegesen eltérhet a maitól. A bizonytalanság tehát nem teszi feleslegessé a hosszú távú tervezést. Ellenkezőleg: éppen a hosszú távú döntések miatt válik elkerülhetetlenné. A 2025-ös kiadvány ezért hangsúlyozta a gördülő, folyamatosan felülvizsgált tervezés szükségességét. A hálózatfejlesztést nem lehet egyszeri tervkészítésként értelmezni. Sokkal inkább olyan folyamatként, amelyben az új információk, technológiai változások és rendszerigények alapján időről időre korrigálni kell a korábbi döntéseket.

A jelen kötet ezt a gondolatot viszi tovább. A hosszú távú stratégia feladata nem az, hogy kiválassza azt az egyetlen jövőt, amelyre a rendszert optimalizálni kell. Valószínűleg ilyen egyetlen jövő egyébként sem létezik. A fontosabb kérdés az, hogy mely döntéseket kell már most meghoznunk, mert több lehetséges jövőben is értéket teremtenek; mely kérdésekben kell tudatosan megőriznünk a későbbi választás lehetőségét; és milyen jeleket kell figyelniünk ahhoz, hogy időben felismerjük, ha a ma választott stratégia korrekciót igényel

Ebből a szempontból a 3. fejezetben vizsgált három jövőkép sem három egymással versengő tervváltozat. Sokkal inkább három eltérő stresszhelyzet. Mindegyik más oldalról terheli meg a villamosenergia-rendszert, és éppen ezért együtt mutatják meg, hogy milyen képességekre lesz szükség akkor is, ha nem tudjuk pontosan, melyik jövő valósul meg. Az egyik világban a fizikai alkalmazkodóképesség kerülhet előtérbe (3.1.). Egy másikban a digitális működésbe vetett bizalom és az irányítási képesség válhat kritikussá (3.2.). A harmadikban az ellátási láncok, a nyersanyagok és a rendelkezésre álló fejlesztési erőforrások korlátozottsága válik meghatározóvá (3.3.).

A tanulság azonban közös. Nincs egyetlen olyan technológia, beruházás vagy szabályozási eszköz, amely önmagában képes lenne „megoldani” a jövő bizonytalanságát. Fizikai infrastruktúrára szükség van. Flexibilitásra is. Adatra, mérésre és irányítási képességekre és bizonyos esetekben redundanciára is. Ezek nem egymás helyettesítői, hanem egymást kiegészítő rendszerképességek. A robusztus stratégia azt jelenti, hogy olyan kombinációt kell kialakítani, amely több, egymástól lényegesen eltérő jövőben is működőképes marad, miközben kellő mozgásteret hagy a későbbi alkalmazkodásra. Vagyis nem az a cél, hogy megszüntessük a bizonytalanságot. Hanem az, hogy a rendszer akkor is működjön, amikor a bizonytalanság valósággá válik.

6.1. Három jövő, három különböző próba

Mint a 3.1. alfejezetben felvázoltuk, a **fizikai alkalmazkodási rés** jövőképében az európai együttműködés funkcionál, az energiaátmenet előrehalad, Magyarország villamosenergia-igénye az elektrifikáció hatására növekszik, miközben a digitális technológiák, az aggregált fogyasztói flexibilitás, az energiatárolás és az intelligensebb rendszerüzemeltetés magas fejlettségi szintet érnek el. Hol van akkor a probléma? A fizikai infrastruktúra nem képes ugyanezzel a sebességgel változni. Egy új fogyasztó vagy termelő néhány év alatt

megjelenhet a rendszerben. Egy új távvezeték, alállomás, határkeresztező kapacitás vagy nagy szabályozható erőmű megvalósítása ezzel szemben jóval hosszabb időt igényelhet. Ezáltal egyre nagyobb rés nyílhat aközött, amit a rendszernek ki kellene szolgálnia, és amit a rendelkezésre álló fizikai infrastruktúra ténylegesen képes kezelni.

Ebben a világban ezért az egyik legfontosabb rendszerkockázattá az idő válik. Ha egy új vezeték megépítéséhez sok év szükséges, akkor a rugalmasság, a dinamikus terhelhetőség, a valós állapothoz igazított üzemeltetés, a pontosabb előrejelzés vagy a célzott átertelés bizonyos esetekben időt tud vásárolni. Lehetővé teheti, hogy a meglévő infrastruktúrát néhány évig hatékonyabban használjuk, és ezzel áthidaljuk a beruházás megvalósításáig tartó időszakot. De meddig? Ez a jövőkép egyik legfontosabb kérdése.

A digitalizáció és a flexibilitás képes a meglévő hálózatot jobban kihasználni. Egy rosszul becsült biztonsági tartalék csökkenthető, egy időben korlátozott szűkület kezelhető, egy kedvezőtlen teljesítményáramlás átrendezhető. A flexibilitás tehát bizonyos esetekben lehet egy hálózati beruházás időbeli helyettesítője, de nem válhat korlátlan vezetékhelyettesítővé. A flexibilitásnak földrajzi, időbeli, teljesítmény- és energia tartalmi korlátai vannak. A rendszerirányító számára ebből egy nagyon fontos feladat következik: különbséget kell tenni azok között a szűkületek között, amelyek intelligensebb üzemvitellel valóban kezelhetők, és azok között, amelyek mögött már tényleges fizikai kapacitáshiány áll. Ez a különbség könnyen elmosódhat.

Minél jobbra válik a hálózat megfigyelhetősége és irányíthatósága, annál tovább lehet kitolni bizonyos fizikai fejlesztéseket. Ez rövid távon gazdaságos lehet. Hosszabb távon azonban kockázatosá válhat, ha a flexibilitást nem átmeneti alkalmazkodási eszközként, hanem tartós fizikai kapacitásként kezdjük kezelni. Ez a jövőkép ráadásul különösen érzékeny a klímaváltozásból eredő fizikai stresszekre. Egy már eleve nagy kihasználtságú hálózatban egy térben kiterjedt meteorológiai esemény (pl. jég, szél vagy extrém hőmérséklet) következményei súlyosabbak lehetnek, mert a hálózat nagy terheltsége miatt kevesebb szabad átertelési lehetőség marad. A meteorológiai előrejelzés, a jobb megfigyelhetőség és a rugalmasabb üzemvitel ebben a helyzetben nagyon sokat segít.

De éppen ilyenkor válik láthatóvá ezeknek a beruházáspótló megoldásoknak a határa is. Ha nincs hová átertelni az áramlásokat, mert nincs elegendő fizikai átviteli kapacitás, vagy egyszerre több kritikus hálózati elem kerül veszélybe, akkor az intelligens algoritmus sem tud új vezetéket létrehozni. Tehát hálózatfejlesztésre és digitalizációra is szükség van. Viszont azt el kell dönteni, hogy mely kritikus hálózati folyosók fizikai megerősítését nem szabad tovább halasztani, és hol indokolt előbb intelligens üzemviteli beavatkozásokkal, az állapotfüggő terhelhetőség növeléssel, tudatosan vállalt kockázattal megoldani a szűkületek jelzését.

A 3.2. *alfejezetben* bemutatott **digitális bizalomra épülő energiarendszer** más problémát mutat meg. Ebben a világban a fizikai infrastruktúra képes lépést tartani az átalakulással. A hálózat bővül, rendelkezésre állnak az ellátásbiztonsághoz szükséges erőforrások, az európai együttműködés továbbra is erős. Eközben a rendszer működése egyre nagyobb mértékben épül adatokra, automatizált megoldások alkalmazására, elosztott erőforrásokra és aggregált szabályozási képességre. Első látásra ez a három közül a legsikeresebb jövő. Éppen ezért vet fel egy egészen más kérdést. Hogyan akadályozzuk meg, hogy a rendszer saját technológiai fejlettségének foglyává váljon?

A rendszerirányítás ebben a világban már messze nem néhány nagy termelő és jól körül határolható hálózati csomópont felügyeletét jelenti. Elosztóhálózatok, aggregátorok, tárolók, ipari fogyasztók, elektromos-

jármű-flották, energiaközösségek, és más energiahordozók infrastruktúrái lépnek egymással folyamatos kölcsönhatásba. Ráadásul a szabályozási képesség jelentős része nem közvetlenül az átviteli hálózathoz csatlakozik. Ezáltal az átviteli rendszerirányító számára elérhetőnek tűnő erőforrás valójában egy másik hálózati szinten helyezkedhet el, ahol saját fizikai korlátok, feszültségviszonyok és üzemviteli igények érvényesülnek. A flexibilitás tehát csak akkor válik valódi rendszerszintű erőforrássá, ha megfelelő a TSO–DSO koordináció, egységes az adatértelmezés és az erőforrás tényleges rendelkezésre állásának folyamatos ellenőrzése és validálása.

Ebben az értelemben az operatív digitalizáció, az országos szabályozási kapacitás, és a TSO–DSO adatkapcsolat nem három különálló fejlesztés. Egyetlen funkcionális rendszert alkotnak. Hasonló változás történik a digitális ikrek és a mesterséges intelligencia szerepében is. Ebben a jövőben ezek már nem különálló innovációs projektek. A hálózat topológiája, aktuális terhelése, berendezésállapota, környezeti kitettsége és a flexibilis erőforrások várható viselkedése egyre inkább ugyanabban a döntéstámogatási térben jelenhet meg. Ez jelentős előrelépés. A rendszer nemcsak azt látja majd pontosabban, hogy mi történik éppen, hanem azt is, hogy mi történhet a következő percekben, órákban vagy napokban. Mindazonáltal minél fontosabbá válik ez a digitális réteg, annál fontosabbá válik egy kellemetlen kérdés is: Mi történik, ha nem (jól) működik?

Mi történik akkor, ha kiesik egy kritikus adatforrás? Ha átmenetileg nem áll rendelkezésre a kommunikációs platform? Ha hibás adat kerül a rendszerbe? Vagy ha az intelligens döntéstámogató szolgáltatás egyszerűen nem elérhető? A válasz nem lehet az, hogy a fizikai villamosenergia-rendszer működése ellehetetlenül. Ezért a hosszú távú digitális architektúra célja nem feltétlenül egyetlen, mindent magába foglaló „szuperplatform”. Sokkal inkább szabványos interfészeken keresztül együttműködő, moduláris, cserélhető és szükség esetén egymástól leválasztható rendszerek ökoszisztémájára van szükség. A digitális reziliencia valódi mércéje ugyanis nem az, hogy normál üzemből mennyire fejlett az automatizáció, hanem az, hogy egy csökkentett képességű digitális környezetben mennyire marad működőképes maga a villamosenergia-rendszer.

A harmadik, a 3.3. *alfejezetben* ismertetett jövőkép, az **értékláncszorítás egy széttagolt Európában**, ismét más oldalról terheli meg a rendszert. Az elektrifikáció ebben a világban sem áll meg. A villamosenergia-rendszer gazdasági és társadalmi jelentősége tehát tovább növekszik. A környezet azonban kevésbé együttműködő. Az energiabiztonság, a stratégiai autonómia és a beszállítói kitettség nagyobb szerepet kap. A közös európai beruházások, az importlehetőségek, valamint bizonyos kritikus berendezések és technológiák hozzáférhetősége kevésbé kiszámítható lesz. Ezzel párhuzamosan a fizikai infrastruktúrában is fennmaradhatnak szűk keresztmetszetek, miközben a szabályozási képesség integrációja sem éri el azt a szintet, amelyet a digitális bizalomra épülő világban feltételeztünk. Ez a jövőkép egy fontos összefüggésre hívja fel a figyelmet. Ugyanaz a technológia egyszerre lehet a reziliencia eszköze, és egy új függőség forrása.

Az akkumulátoros energiatárolás szabályozási képességet biztosít, csökkentheti a rendszer működésének rövid távú merevségét és kibővíti az új szabályozási lehetőségeket. Ugyanakkor nyersanyagokat, cellagyártási kapacitást, teljesítményelektronikát és működő akkumulátor-értékláncot igényel. Egy új határkeresztező összeköttetés diverzifikálhatja az energiaforgalmat és növelheti az ellátásbiztonságot. Ugyanakkor speciális kábelekhez (HVDC), transzformátorokhoz vagy teljesítményelektronikai berendezésekhez kötheti a rendszert. A mesterséges intelligencia alkalmazása javíthatja a hálózat kihasználását és az üzemviteli döntéseket. Eközben félvezető-, kommunikációs, felhő- és szoftverfüggőségeket építhet be egy olyan infrastruktúrába, amelynek éppen a folyamatos rendelkezésre állás a legfontosabb követelménye.

A kérdés tehát már nem egyszerűen az, hogy egy technológia műszakilag mennyire jó, hanem az is, hogy mi történik akkor, ha nem tudjuk beszerezni, javítani, kipótolni vagy helyettesíteni? Ebben a jövőben ezért a műszaki teljesítmény mellett felértékelődik a helyettesíthetőség, a tipizálás, a javíthatóság, a beszállítók diverzifikációja, és bizonyos kritikus elemek stratégiai készletezése is. Ez első látásra kevésbé „modern” megközelítésnek tűnhet, pedig valójában a reziliencia egyik klasszikus alapelve jelenik meg: ne legyen olyan kritikus elemünk, amelynek kiesése után nincs másik lehetőségünk.

A három jövőkép közös tanulsága nem egy preferált végállapot kijelölése. Mindhárom más veszélyre hívja fel a figyelmet. A fizikai alkalmazkodási rés azt mutatja meg, hogy egy intelligens és flexibilis rendszer sem képes korlátlan ideig kompenzálni a fizikailag lemaradó infrastruktúrát. A digitális bizalomra épülő energiarendszer arra figyelmeztet, hogy a sikeres digitalizáció és automatizáció maga is új sérülékenységeket teremthet. Az értékláncszorítás egy széttagolt Európában pedig azt mutatja meg, hogy a rezilienciát növelő beruházásaink mögött új technológiai, nyersanyag- és geopolitikai függőségek jelenhetnek meg. Vagyis minden megoldás új kérdést is létrehozhat. A fizikai hálózatfejlesztés kapacitást ad, de a létesítéséhez hosszú időre és erőforrásokra van szükség. A szabályozási képesség időt és mozgásteret teremt, de nem vehető igénybe korlátlanul. A digitalizáció az átviteli hálózat felügyeletét és irányíthatóságát javítja, de új függőségeket épít be a rendszerbe. A diverzifikáció csökkenti egy adott forrástól való függést, miközben új értékláncokhoz kapcsolhat bennünket.

Ebből következik a 2050-ig előrettekintő stratégia egyik legfontosabb követelménye. Nem egyetlen problémára kell optimális választ adnunk. Olyan rendszert kell kialakítanunk, amely egyszerre képes elviselni a fizikai infrastruktúra korlátait, a digitális rendszer sérülékenységeit és az energetikai értékláncok bizonytalanságát. A robusztus stratégia tehát nem azt jelenti, hogy kiválasztjuk a három jövő közül azt, amelyiket a legvalószínűbbnek tartjuk, hanem azt, hogy mindháromban legyen működőképes válaszuk.

6.2. Amit minden jövőben érdemes megtenni

A három scenárió összevetéséből viszonylag egyértelműen kirajzolódik azoknak az intézkedéseknek a köre, amelyek értéke nem attól függ, hogy végül melyik jövőképhez kerülünk közelebb. Mitől lesz egy lépés robusztus? Nem attól robusztus, hogy minden jövőben pontosan ugyanabban a formában és ugyanakkora léptékben kell a hálózatfejlesztéseket megvalósítani. Sokkal inkább attól, hogy több eltérő világban is növeli a későbbi döntési szabadságot, és csökkenti annak kockázatát, hogy a rendszer idő előtt egyetlen fejlődési pályának legyen kiszolgáltatva. Ebből a szempontból nincs egyetlen „legjobb” beavatkozás. Fizikai infrastruktúrára, szabályozási képességekre, valamint adat- és irányítási képességekre, továbbá redundanciára egyszerre van szükség. A stratégiai feladat ezek megfelelő arányú portfólióba rendezése.

Előrelátó és robusztus hálózatfejlesztés ▼ A legfontosabb feladat azoknak a gerinchálózati fejlesztéseknek, alállomási helyeknek, nyomvonalaknak és későbbi bővítési lehetőségeknek az azonosítása, amelyek több, egymástól lényegesen eltérő fogyasztási és termelési pálya mellett is magas értéket képviselnek. Itt ismét megjelenik az idő kérdése. Egy beruházás megvalósítása bizonyos esetekben elhalasztható. A megvalósítás lehetőségének elvesztése viszont sokszor már nem, vagy csak nagyon nagy költséggel fordítható vissza. Egy nyomvonal biztosítása, egy alállomási terület fenntartása, az engedélyezés előkészítése vagy egy új létesítmény későbbi bővíthetőségének kialakítása önmagában is stratégiai értéket jelenthet. Nem feltétlenül azért kell tehát ma megépíteni valamit, mert biztosan szükség lesz rá. Bizonyos esetekben először azt kell biztosítani, hogy akkor is legyen lehetőségünk megépíteni, amikor már valóban szükségessé válik. Ez közvetlenül következik a 2025-ös kiadvány gondolatmenetéből is.

A hálózat hosszú megvalósítási ideje és a jövő bizonytalansága csak gördülő, folyamatosan korrigálható tervezéssel egyeztethető össze.

Szabályozási képesség rendszerszintű infrastruktúráként való kezelése ▼ Nem elegendő feltételezni, hogy a jövőben lesznek akkumulátorok, rugalmas ipari fogyasztók, elektromosjármű-töltők vagy másféle flexibilis erőforrások, amelyeket majd szükség esetén igénybe lehet venni. Pontosan tudni kell, hogy hol vannak. Mekkora teljesítményt képesek biztosítani. Mennyi ideig. Milyen gyorsan. És milyen megbízhatósággal. Ehhez azonban elkerülhetetlen a TSO–DSO koordináció és az adatcsere fejlesztése. Minél több releváns erőforrás csatlakozik az elosztóhálózathoz, annál kevésbé tartható fenn az a hagyományos szemlélet, amelyben az elosztóhálózat a rendszerirányító számára lényegében egyetlen nettó terhelési pontként jelenik meg. A flexibilitás ugyanis csak akkor használható rendszerszinten, ha közben lokálisan is fizikailag megvalósítható.

Csatlakozási folyamat továbbfejlesztése ▼ Az új termelők és különösen a nagy ipari fogyasztók elhelyezkedése, a fogyasztás időbeli profilja és esetleges szabályozási képessége jelentősen befolyásolhatja, hogy milyen hálózatfejlesztésre lesz szükség. Ezáltal a csatlakozás feltételei maguk is hálózatfejlesztési eszközzé válhatnak. A hálózat számára kedvező elhelyezkedés, a rugalmas csatlakozás, a teljesítmény időszakos korlátozhatósága, az energiatárolás, a keresletoldali rugalmasság vagy a projektek tényleges előrehaladásához kötött kapacitáslekötés mind olyan megoldások, amelyek több lehetséges jövőben is csökkenthetik a felesleges beruházások és a mesterséges kapacitásszűkösség kialakulásának kockázatát. A jövőben ezért egy új fogyasztó csatlakozása egyre kevésbé jelentheti egyszerűen azt, hogy a hálózat egy adott teljesítményt feltétel nélkül rendelkezésre bocsát, hanem a hálózat, és a csatlakozó közötti működési megállapodássá válhat. Ez természetesen új szabályozási és piaci kérdéseket is felvet. De ha a rendszer egyre dinamikusabbá válik, akkor a csatlakozás feltételei sem maradhatnak teljesen statikusak.

Technológiasemleges ellátásbiztonsági és kapacitásmegfelelőségi keret ▼ A jövő megbízható kapacitásai nem feltétlenül ugyanazokból az eszközökből fognak állni, mint ma. Atomerőmű, gázerőmű, hosszú időtartamú energiatárolás, validált keresletoldali teljesítményreakció vagy import egyaránt hozzájárulhat az ellátásbiztonsághoz. De ezek nem automatikusan egyenértékűek. Egy akkumulátor névleges teljesítménye önmagában nem mondja meg, hogy meddig képes energiát szolgáltatni. A keresletoldali flexibilitás elméleti potenciálja nem azonos a garantált rendelkezésre állással. Az import pedig nem tekinthető ugyanúgy biztos erőforrásnak normál és regionális stresszhelyzetben. A kérdés tehát nem az, hogy melyik technológiát választjuk ki ma „győztesként” 2050-re, hanem sokkal inkább az, hogyan tesszük összehasonlíthatóvá azokat az eltérő technológiákat, amelyek ugyanazt a rendszerbiztonsági funkciót különböző módon képesek ellátni. Ehhez nem pusztán MW-okat vagy Mvar-okat kell összehasonlítani. Figyelembe kell venni az energiatartalmat, az aktiválási sebességet, a rendelkezésre állást, az időjárási és regionális korrelációt, a tüzelőanyag- vagy értéklánckitettséget és a tartós stresszhelyzetekbeni viselkedését is.

Moduláris operatív digitalizáció ▼ A sűrűbb mérés, a jobb állapotbecslés, a prediktív karbantartás, a dinamikus terhelhetőség, a gyorsabb biztonsági számítások vagy a digitális ikrek mind növelik a meglévő infrastruktúra kihasználhatóságát és a rendszer alkalmazkodóképességét. De itt ismét fontos egy feltétel. A digitalizációt szorosan együtt kell fejleszteni a kiberbiztonsággal, az adatminőség biztosításával és a degradált állapotban történő működés képességével is. A jó digitális architektúra nem feltétlenül az, amely minden funkciót egyetlen nagy rendszerbe integrál. Sokkal inkább az, amely képes az új komponensek befogadására, egyes elemek cseréjére, szabványos interfészeken keresztüli együttműködésre, és szükség esetén bizonyos kritikus funkciók lokális fenntartására. Ez két különböző jövőben is értéket teremt. Magas

digitalizáció mellett közvetlen rendszerbiztonsági jelentősége van. Széttagolt értékláncok esetén pedig csökkenti annak kockázatát, hogy egyetlen beszállítóhoz, technológiához vagy szoftverarchitektúrának kiszolgáltatva legyünk. A modularitás tehát nem pusztán informatikai tervezési elv, hanem reziliencia-eszköz.

Konverterdomináns villamosenergia-rendszer ▼ A fizikai, és digitális reziliencia mellett már most meg kell kezdeni a konverterdomináns villamosenergia-rendszer műszaki feltételeinek kialakítását is. A nagy arányú inverteres termelés, az akkumulátorok és más teljesítményelektronikai eszközök elterjedésével szükségszerűen megváltozik a feszültség- és frekvenciartartás, a zárlati viselkedés, a védelmek működése és a dinamikus stabilitás biztosításának módja. Ez egyik vizsgált jövőben sem válik feleslegessé. Legfeljebb a változás sebessége lesz eltérő. A hagyományos villamosenergia-rendszerben számos alapvető rendszertulajdonság a forgógépek fizikai viselkedéséből természetes módon következett. Egy konverterdomináns rendszerben ezek egy részét létre kell hozni és működtetni. Ez első látásra nehezebb feladat, ugyanakkor lehetőség is.

A teljesítményelektronikai eszközök gyorsan, és széles tartományban szabályozhatók. A kérdés tehát nem az, hogy képesek-e hozzájárulni a rendszerstabilitáshoz, hanem az, hogy milyen követelmények, vezérlési elvek és koordináció mellett tesszük ezt megbízható rendszerfunkcióvá. 2050-re ezeknek a berendezéseknek a rendszert befolyásoló üzemelése már nem különleges üzemállapot lesz, a rendszer alapvető architektúrájának részévé válnak. Ezért születnek az előírások már ma is, üzemi szabályzat szinten.

Regionális kapcsolatok és együttműködések fenntartása ▼ Az együttműködő Európában ez mélyebb piaci és rendszerek kötötti integrációt, közös tervezést, és szorosabb határkeresztező együttműködést jelenthet. Egy széttagoltabb környezetben viszont éppen a többirányú és regionális kapcsolatok diverzifikációjának növekedhet meg az értéke. A robusztus stratégia ebből a szempontból elkerül két szélsőséges feltételezést is. Nem indulhatunk ki abból, hogy az import minden körülmények között és korlátlanul rendelkezésre áll majd, vagy hogy Magyarországnak önálló villamosenergia-szigetté kell válnia. A lényeg ismét a mozgástér. A cél nem minden külső kapcsolat megszüntetése, hanem annak az elkerülése, hogy egyetlen kapcsolattól, útvonaltól, technológiától vagy partnertől váljunk kritikusan függővé.

A három scenárió közös robusztus lépései tehát nagyon különböző természetűek. Van közöttük klaszikus hálózatfejlesztés, piaci és szabályozási reform, digitalizáció, flexibilitás, műszaki szabványalkotás és regionális együttműködés. Mégis ugyanabba az irányba mutatnak. Több választási lehetőséget kell teremteni, nem kevesebbet. A robusztus stratégia nem azt jelenti, hogy minden elképzelhető jövőre külön infrastruktúrát építünk, hanem azt, hogy mai lépéseinkkel nem szűkítjük be a jövőbeli lehetőségeinket. Ez a következőket foglalhatja magában:

- ▼ ahol lehet, megőrizzük a bővíthetőséget;
- ▼ ahol szükséges, időben megépítjük a fizikai infrastruktúrát;
- ▼ ahol van rá lehetőség, flexibilitással teremtünk mozgástérrel;
- ▼ a technológiák között pedig nem egyetlen megoldás mellett kötelezzük el magunkat, hanem a szükséges rendszerfunkciót keressük.

A robusztusság végső soron nem egy konkrét technológia tulajdonsága. A robusztusság a rendszer képessége arra, hogy több lehetséges jövő között is maradjon választási lehetősége.

6.3. Amit ma még nem kell végleg eldönteni

A hosszú távú stratégia nemcsak arról szól, hogy mit kell ma eldöntenünk. Legalább ilyen fontos kérdés, hogy mit nem szabad túl korán eldöntenünk. A bizonytalanság megfelelő kezelése nem döntésképtelenséget jelent. Éppen ellenkezőleg. Tudatosan kell létrehozni azokat az előfeltételeket, amelyek lehetővé teszik, hogy egy későbbi időpontban, több információ birtokában jobb döntést hozzunk. Ezáltal maga a döntési szabadság és a nyitva hagyott lehetőségek köre is stratégiai értéké válik.

Munkamegosztás a fizikai hálózat és az operatív rugalmasság között ▼ Ez az egyik legfontosabb nyitva tartandó kérdés. Ma még nem tudjuk pontosan megmondani, hogy egy 2040-ben vagy 2050-ben jelentkező hálózati szűkületet új vezetékkel, hálózaterősítéssel, energiatárolással, fogyasztói flexibilitással, dinamikus terhelhetőséggel vagy ezek valamilyen kombinációjával lesz-e célszerű kezelni. Ebből azonban nem az következik, hogy ma nincs teendők. Meg kell őrizni a hálózatbővítés fizikai lehetőségét. Biztosítani kell a szükséges területeket és nyomvonalakat. Ki kell építeni a rugalmasság mérésének, validálásának és piaci hozzáférésének feltételeit. Fejleszteni kell azokat az üzemviteli eszközöket, amelyek segítségével a meglévő infrastruktúra biztonságosan jobban kihasználható. Azt viszont nem feltétlenül kell ma eldönteni, hogy húsz év múlva pontosan milyen arányban támaszkodunk a hálózatfejlesztésre és flexibilitásra. Ezt a kérdést akkor célszerű rögzíteni, amikor már jobban látható a fogyasztás és a termelés tényleges térbeli elhelyezkedése, az új technológiák költsége és a szabályozási erőforrások valós rendelkezésre állása.

A fizikai alkalmazkodási rés jövőképeinek egyik alapvető dilemmája éppen ez: hol húzódik majd az a határ, ameddig a digitalizáció és a szabályozási képesség valóban helyettesítheti vagy időben kitolhatja a fizikai hálózatfejlesztést? A válasz ma még nem ismert, azonban a válaszadás lehetőségét már ma meg kell teremteni.

Szabályozható kapacitások ▼ Hasonló a helyzet a hosszú távú szabályozható kapacitások technológiai összetételével. Azt tudjuk, hogy elegendő mennyiségű, megbízhatóan igénybevehető kapacitásra lesz szükség. Egy nagy megújuló részarányú rendszerben nem elegendő pusztán MW-ban gondolkodni. Értéket képvisel az energia, az aktiválás sebessége, a rendelkezésre állás és az, hogy egy adott erőforrás mennyire képes megbízhatóan hosszabb stresszhelyzetekben működni. Azt azonban ma még nem tudhatjuk biztosan, hogy ezeknek a rendszerfunkcióknak mi lesz az optimális kombinációja: milyen arány lesz majd a nukleáris termelés, a gáztüzelésű vagy később a dekarbonizált gázerőmű, a hosszú időtartamú energiatárolás, a hidrogénből történő termelés, a keresletoldali rugalmasság vagy a regionális import. Nem is feltétlenül ezt kell a jelen időben eldöntenünk. A jó stratégia először azt rögzíti, hogy milyen, és milyen mértékű rendszerfunkcióra van szükségünk.

Egy elektrolizáló lehet jelentős nagyfogyasztó, de közben értékes szabályozási képességi erőforrása is. A hidrogén hosszabb időtávú energiatárolási lehetőséget teremthet, és a hidrogénre alapozott termeléssel csökkenteni lehet az ellátásbiztonság kockázatait. Ugyanakkor új infrastruktúrára, berendezésekre, importforrásokra, és értéklánckokra is szüksége lesz. Ismét ugyanazzal a problémával találkozunk: egy adott megoldás az egyik függőséget csökkenti, miközben létrehozhat egy másikat.

Választási lehetőség ▼ A szétaggolt európai jövőképben azonban az energiahordozók összekapcsolásának legfontosabb értéke nem feltétlenül a maximális integráció, hanem az, hogy megmaradjon a lehetőségek közötti választás lehetősége. A digitalizáció esetén ugyanez a gondolkodásmód szükséges. Nem az a kérdés, hogy használunk-e mesterséges intelligenciát. Szinte biztosan használni fogunk. A kérdés az, hogy mire? Milyen funkciókban támaszkodunk rá döntéstámogató eszközként? Hol engedünk automatizált beavatko-

zást? Mely döntéseknél marad kötelező az emberi jóváhagyás? És milyen üzemállapotban kell a rendszernek MI nélkül is biztonságosan működnie?

A digitalizáció technológia fejlődésének sebessége miatt különösen kockázatos lenne a 2050-es rendszert egy ma ismert algoritmushoz, gyártóhoz vagy szoftverarchitektúrához kötni. Sokkal fontosabbak a technológiától független értékek: a szabványos interfészek, a jó minőségű és hozzáférhető adatok, a visszakövethető döntések, az emberi felülbíráhatóság, a kiberbiztonság és a degradált működés lehetősége. Ezek rendelkezésre állása esetén a konkrét technológiai döntéseket későbbi időpontra lehet halasztani. Mindezt anélkül, hogy közben lemaradnánk a fejlődésben.

Igaz ez azoknál a döntéseknél is, amelyek során a beszállítók és a hálózati eszközök kiválasztására kerül sor. A következő két-három évtizedben változhatnak az akkumulátortechnológiák, a teljesítményelektronikai eszközök, a kommunikációs technológiák, az irányítástechnikai platformok és a hálózatüzemeltetést támogató szoftverek. Ezért nem érdemes ma megmondani, hogy pontosan melyik technológiát fogjuk 2050-ben használni. A stratégia ott legyen specifikus, ahol a rendszerfunkció egyértelműen meghatározott. És ott maradjon nyitott, ahol jelentős technológiai fejlődés várható. Ehhez azonban meg kell teremteni a feltételeket. A tipizáció, a moduláris kialakítás, a több beszállítóval való kompatibilitás és a javíthatóság mind azt szolgálják, hogy egy későbbi technológiaváltás ne igényelje a teljes rendszer újraépítését.

Az opció értéket teremt. A döntés nyitva tartása tehát nem azonos a döntés elhalasztásával, sőt gyakran jelen időben igényel konkrét cselekvést. Adat- és kommunikációs infrastruktúrát kell létrehozni úgy, hogy nem választjuk ki előre az összes jövőbeni alkalmazást. A rendszerbiztonsági követelményeket meg kell határozni anélkül, hogy harminc évre rögzítenénk a technológiát. Interfészeket és szabványokat kell kialakítani anélkül, hogy egyetlen beszállítói megoldás mellett köteleződnénk el. Ez első látásra ellentmondásnak tűnhet. Valójában azonban ez a bizonytalanság mellett a hosszú távú tervezés egyik legfontosabb alapelve.

Nem minden döntést kell minél korábban meghozni. Azt kell korán eldönteni, amit később már nem lehet, vagy csak nagyon drágán lehet megváltoztatni. És nyitva kell hagyni azt, amiről később lényegesen jobb információ alapján dönthetünk. A hosszú távú stratégia minőségének egyik legfontosabb mércéje ezért nemcsak az lesz, hogy hány beruházást határoz meg. Hanem az is, hogy mennyi értékes döntési lehetőséget őriz meg a következő évtizedek számára.

6.4. Korai jelzések: mikor kell módosítani a fejlesztés irányát?

Mivel a jövő bizonytalan, a stratégia nem érhet véget a most hozott döntésekkel. A hosszú távú tervezési részévé kell tenni azoknak a korai jelzéseknek az észlelését, amelyekből időben felismerhető, ha a valóság valamelyik feltételezésünktől tartósan eltér. Ez tulajdonképpen a 2025-ös kiadvány gördülő tervezési logikájának hosszabb időtávra történő kiterjesztése. Nem elegendő tehát rendszeresen újraszámolni ugyanazt a tervet. Időről időre fel kell tenni azt a kérdést, hogy még mindig ugyanazokat a kérdések relevánsak?

A villamosenergia-igény tényleges fejlődése ▼ Ez az első jelentős halmaz, ahol láthatjuk a jeleket. Azonban nem csak önmagában az éves villamosenergia-fogyasztás változása a meghatározó. Legalább ennyire fontos a villamosenergia-igény szerkezete, időbelisége és földrajzi elhelyezkedése. Figyelni kell a nagy ipari csatlakozási projektek tényleges előrehaladását, a szerződött és ténylegesen megvalósuló igények eltérését, az elektromobilitás és a hőszivattyúk terjedését, a terhelési csúcsok átalakulását. Ezek figyelembevételével kell a hosszú távú terveket aktualizálni.

Miért fontos ez? Mert ugyanaz az éves energiamennyiség teljesen eltérő hálózati igényt eredményezhet attól függően, hogy hol és mikor jelenik meg. Amennyiben a bejelentett csatlakozási igények jelentős része

késik, illetve várhatóan nem valósul meg, vagy egy adott térségben a fogyasztás a vártnál nagyobb lesz, akkor indokolt bizonyos hálózati beruházások átütemezése, lassítása vagy gyorsítása.

A hálózatfejlesztési célok tényleges megvalósíthatósága ▼ Nem elegendő azt tudni, hogy egy fejlesztés műszakilag szükséges, hanem azt is figyelni kell, hogy a valójában mennyi idő alatt és milyen költséggel valósul meg. Az engedélyezési eljárások, a társadalmi elfogadással kapcsolatos problémák, a beruházási költségek változása, a projektek ismétlődő átütemezése, valamint a transzformátorok, kábelek, kapcsolóberendezések és teljesítményelektronikai eszközök szállítása együtt mutatja meg azt az időt, amennyivel megváltozik a fizikai alkalmazkodási rés. Amennyiben a hálózati fejlesztések lassabban valósulnak meg, mint ahogyan a termelői és fogyasztói oldal átalakulása igényli, akkor már késő újabb projektet indítani a hálózati tervben. Átmeneti megoldásokra is szükség lesz. Nagyobb szerepet kaphat a flexibilitás, a dinamikus terhelhetőség, az állapotfüggő üzemeltetés vagy más, időt vásárló eszköz. Ha pedig mindehhez a beszállítói koncentráció növekedése is társul, akkor a probléma már nem pusztán beruházási. Érték-lánc-rezilienciai kérdéssé válik.

Ellátásbiztonság és ténylegesen rendelkezésre álló rugalmasság ▼ Különösen erős korai figyelmeztető jel lenne, ha egyszerre romlana a hazai szabályozható kapacitások megvalósulási pályája és a regionális import megbízhatósága. Ez ugyanis már nem egyetlen tartalékforrás gyengülését jelentené. Két egymást részben helyettesítő lehetőség egyszerre válna bizonytalanabbá.

Regionális és geopolitikai környezet ▼ Ezt sem lehet egyszerű háttérfeltételként kezelni. Figyelni kell, hogy mélyül vagy gyengül az európai rendszerirányítói koordináció, hogyan fejlődnek a határkeresztező kapacitások, nő-e a koordinált tartalék- és szűkületkezelés szerepe, illetve megjelennek-e tartós politikai vagy kereskedelmi korlátok az energia- és technológiaáramlásban. A töredezettség ugyanis valószínűleg nem egyik napról a másikra következik be. Először kisebb jelek jelenhetnek meg. Közös projektek ismétlődő késése. A nemzeti megoldások előtérbe kerülése. Bizonyos stratégiai berendezések exportkorlátozása. A beszállítói láncok politikai alapon történő átrendeződése. Egyetlen ilyen esemény természetesen még nem jelent rendszerszintű változást. Ha azonban ezek tartós trenddé állnak össze, akkor a stratégiának is reagálnia kell. Nő a többirányú regionális kapcsolatok értéke. Nő a diverzifikáció értéke. És bizonyos esetekben nő a hazai tartalék képességek értéke is.

Digitális rendszer ▼ Ennek a rendszernek az állapotát sem érdemes azzal mérni, hogy hány mesterséges-intelligencia-alkalmazás működik benne. Ez önmagában keveset mond. Sokkal fontosabb az adatok minősége, a TSO és a DSO-k közötti adatcsere teljessége és késleltetése, a prediktív modellek tényleges teljesítménye, a kiberbiztonsági incidensek száma és súlyossága, valamint az, hogy kiesés esetén valóban működnek-e a tartalék eljárások. Ebből a szempontból egy nagyon fontos arányt kell figyelni: gyorsabban nő-e a digitális komplexitás, mint a rendszer ellenőrizhetősége és tartalék működési képessége? Ha igen, akkor az már korai figyelmeztetés. Ha az automatizáció egyre mélyebben épül be a rendszerbe, miközben az auditálhatóság, a humán felülbírállhatóság vagy a degradált üzem képessége nem fejlődik ugyanilyen ütemben, akkor a digitalizáció architektúráját felül kell vizsgálni. Ez természetesen nem a technológia visszafogását jelenti. A cél éppen az, hogy egy új képesség ne váljon együttal új, kritikus meghibásodási ponttá.

Klímaváltozás és a fizikai infrastruktúra kitettsége ▼ Ez a tényező is közvetlen stratégiai visszacsatolást igényel. Figyelni kell az extrém szél-, jég- és hőmérsékleti események gyakoriságát és intenzitását, az időjárási eredetű üzemzavarok földrajzi koncentrációját, a vezetékek termikus korlátainak gyakoribb

elérését és a helyreállítási idők alakulását. Nemcsak azt kell tehát kérdezni, hogy romlik-e az időjárás. Azt kell vizsgálni, hogy a változás mikor kezd érdemben megjelenni a hálózat működésében. Ha bizonyos folyókon ismétlődően jelennek meg időjárási eredetű problémák, ha nő a helyreállítási idő, vagy ha a hagyományos műszaki tartalékok egyre gyakrabban bizonyulnak elégtelennek, akkor ez már stratégiai jelzés. A válasz nem feltétlenül országos szabványváltás. Lehet

- ▼ célzott hálózati megerősítés;
- ▼ monitoring;
- ▼ más technológiai kialakítás;
- ▼ stratégiai tartalékkészlet.

A lényeg az, hogy a változó klíma ne csak utólag, káresemények sorozatán keresztül kerüljön be a hálózat-fejlesztési gondolkodásba.

A szektorkapcsolás tényleges fejlődése ▼ Ez a tényező is külön figyelmet érdemel. A hidrogéntermelési projektek megvalósulása, az elektrolizálók mérete és kihasználtsága, az ipari hidrogénkereslet, a gáztüzelésű kapacitások jövőbeni működése és az alternatív energiahordozók importstruktúrája jelentősen módosíthatja a villamosenergia-rendszer terhelését és flexibilitási lehetőségeit. Itt ismét az időzítés a fontos. Amíg ezek a folyamatok nem öltenek egyértelmű formát, addig nem célszerű nagy, visszafordíthatatlan beruházások mellett elköteleződni. Viszont már most szükség van az integrált energiarendszeri modellezés képességére és az infrastruktúra későbbi bővíthetőségének megőrzésére. Ha pedig valamelyik technológiai pálya tartósan dominánssá válik, akkor a stratégia átléphet az opciómegőrzésből a célzott beruházások szakaszába.

A korai jelzések rendszerének tehát nem egy újabb statikus prognózist kell előállítania. Stratégiai irányítópultra (*strategic dashboard*) van szükség. Olyanra, amely azt mutatja meg, mikor kezd érdemben eltérni egymástól a feltételezett és a tényleges világ. Természetesen nem minden éves ingadozás indokol stratégiaaváltást. Egyetlen projekt csúszása, egy hidegebb tél vagy egy kiberbiztonsági incidens önmagában még nem feltétlenül változtatja meg a hosszú távú pályát. A tendenciaszerű eltérés azonban már más. Ide tartoznak a következők.

- ▼ Az ismétlődő projektsúszások.
- ▼ A tartósan eltérő keresleti pálya.
- ▼ A regionális importbiztonság romlása.
- ▼ Az ellátási láncok koncentrációja.
- ▼ A flexibilitás tényleges rendelkezésre állásának tartós elmaradása a feltételezettől.
- ▼ A digitális függőség növekedése.
- ▼ A fizikai klímakockázatok folyamatos erősödése.

Ezek már olyan jelek, amelyekre a hosszú távú tervezésnek válaszolnia kell. A 2025-ös kiadvány azzal a következtetéssel zárult, hogy a magyar villamosenergia-hálózat jövőjéről 2040–2050-ig előretekintő, lehetőség szerint konszenzusos koncepciót kell kialakítani. A jelen kötet ehhez egy további állítást tesz hozzá.

Ennek a koncepciónak nem egyetlen jövőt kell kijelölnie. Egy olyan döntési rendszert kell létrehoznia, amely több jövőben is működőképes.

Vannak lépések, amelyeket nem lehet tovább halogatni. Meg kell őrizni a hálózatfejlesztési opciókat. Ki kell építeni a flexibilitás és az adatkapcsolatok feltételeit. Fejlesztteni kell az ellátásbiztonsági képességeket. Erősíteni kell a fizikai és kiberrezilienciát. Fel kell készülni a konverterdomináns villamosenergia-rendszer működésére. Más kérdésekben viszont éppen a túl korai elköteleződés jelentené a nagyobb kockázatot. Ezért a jó hosszú távú stratégia egyszerre cselekszik és figyel.

- ▼ Megteszi azt, amit később már túl késő lenne elkezdni.
- ▼ Nyitva hagyja azt, amit ma még nem szükséges véglegesen eldönteni.
- ▼ És folyamatosan figyeli azokat a jeleket, amelyek megmutatják, mikor kell az egyik kategóriából a másikba átlépni.

A jó 2050-es stratégia tehát nem attól lesz jó, hogy 2026-ban pontosan megmondja, milyen lesz a magyar villamosenergia-rendszer huszonnégy év múlva. Hanem attól, hogy 2030-ban, 2040-ben és 2050-ben is marad elegendő információnk, képességünk és mozgásterünk a következő helyes döntés meghozatalához.

6.5. Ki fizeti meg a robusztusságot?

A robusztusság jól hangzik mindaddig, amíg fel nem tesszük a legegyszerűbb kérdést: ki fizeti meg? Egy tartalék vezetékek, egy alacsony kihasználtságú transzformátor, egy stratégiai alkatrészkészlet vagy egy csak ritkán aktivált flexibilitási kapacitás normál üzemben könnyen tűnhet kihasználatlan erőforrásnak. Hiszen ott van. Költséget okoz. És jó esetben hosszú ideig nincs rá szükség. A valódi értéke éppen akkor válik láthatóvá, amikor valami más már nem működik. Ez a reziliencia gazdasági problémájának egyik alapvető sajátossága. Olyan képességeket kell finanszírozni, amelyeknek részben éppen az a céljuk, hogy lehetőleg minél ritkábban kelljen használni őket.

Ez természetesen nem új dilemma. A villamosenergia-rendszer történetében az ellátásbiztonság mindig együtt járt bizonyos mennyiségű tartalékkal és redundanciával. A jövőben azonban a kérdés várhatóan élesebbé válik. A hálózatfejlesztési döntéseket egyre nagyobb bizonytalanság mellett kell meghozni, miközben a létrehozott fizikai infrastruktúra élettartama továbbra is évtizedekben mérhető.

Ha túl korán építünk, annak ára van. A fogyasztók akkor is viselik egy vezetékek, alállomás vagy más hálózati eszköz költségét, ha annak kapacitására később csak részben lesz szükség. De ha túl későn építünk, annak is ára van. Elmaradhatnak csatlakozások. Nőhet a termeléskorlátozás mértéke. Drágábbá válhat az üzemvitel. Csökkenhet egy térség beruházási vonzereje. Végso esetben pedig maga az ellátásbiztonság romolhat.

A kérdés tehát nem egyszerűen az, hogy a korai vagy a késői beruházás drágább-e. Az a kérdés, melyik kockázat költségét vállaljuk, és ki viseli ezt a költséget. Ebből a szempontból a robusztus hálózat sem feltétlenül a lehető legnagyobb hálózat. A több infrastruktúra önmagában nem jelent automatikusan nagyobb rezilienciát. Lehet olyan kapcsolat, amely csak egy nagyon szűk jövőképpen teremt jelentős értéket. És lehet olyan nyomvonal, alállomási hely vagy tartalék kapacitás, amely több egymástól lényegesen eltérő rendszerállapotban is használható. Az utóbbi értéke nagyobb lehet akkor is, ha normál üzemben nem használjuk folyamatosan.

A hagyományos beruházási költség mellett ezért egyre inkább figyelembe kell venni az opcióértéket is. Mit tesz lehetővé később? Bővíthető-e? Átalakítható-e? Más üzemállapotban is használható marad-e? És mindenekelőtt: mennyi további döntési lehetőséget őriz meg?

Ez a logika különösen érdekessé válik a hálózatfejlesztés és a flexibilitás viszonyában. Egy új vezeték költsége jellemzően szabályozott hálózati beruházásként jelenik meg. Egy akkumulátor, ipari fogyasztói flexibilitás vagy aggregált keresletoldali szolgáltatás viszont piaci szereplő tulajdonában lehet. Mégis ugyanazt a rendszerproblémát kezelhetik. Ha például egy flexibilitási szolgáltatás öt évvel elhalaszt egy hálózatfejlesztést, akkor annak értéke nem csupán a szolgáltatásként kifizetett energiamennyiségben vagy rendelkezésre állási díjban jelenik meg. Értéket teremt azzal is, hogy időt vásárol. A hálózati beruházás későbbre tololható. Új információ válhat elérhetővé. A bizonytalanság egy része feloldódhat.

Mindazonáltal ennek is van határa. Ha ugyanazt a szűkületet éveken vagy évtizedeken keresztül folyamatosan flexibilitással kell kezelni, akkor az átmeneti megoldás könnyen drága kerülőúttá válhat. Vagyis ismét ugyanaz a kérdés merül fel: meddig vásárolunk időt, és mikor olcsóbb már megépíteni a fizikai infrastruktúrát?

A költségmegosztásnak ezért egyre kevésbé szabad kizárólag azt követnie, hogy ki birtokolja az adott eszköz. Láthatóvá kell tenni azt is, hogy ki hozta létre a rendszerigényt. Ki részesül a beruházás vagy szolgáltatás hasznából. Ki viseli a megvalósítás elmaradásának kockázatát. És ki fizet azért, ha egy szükséges képességre csak ritkán van szükség, de akkor nagyon nagy értéket teremt.

A tartalékok finanszírozása ebből a szempontból különösen nehéz. A piac általában azt árazza könnyen, amit rendszeresen használunk. A reziliencia jelentős része azonban rendelkezésre állás. Egy tartalék transzformátor. Egy alternatív ellátási útvonal. Egy gyors reagálású helyreállítási (black start) kapacitás. Egy ritkán aktivált, de kritikus tartalék.

Ezek normál üzemben akár évekig „nem csinálnak semmit”. Ez természetesen csak látszólag igaz. Valójában folyamatosan biztosítják azt, hogy bizonyos események következményei kezelhetőek maradjanak. Ha kizárólag kihasználtsági mutatók alapján értékeljük őket, akkor szinte biztosan túl kevés tartalékot fogunk fenntartani. Ha viszont minden elképzelhető esemény ellen teljes fizikai redundanciát építünk, annak társadalmi költsége elfogadhatatlanná válhat.

A robusztusság tehát nem jelenthet maximális biztonságot. Ilyen valószínűleg nincs. A valódi feladat annak eldöntése, hogy mely kockázatok ellen érdemes előre fizetni, és melyeket fogadjuk el maradék kockázatként. Ez már nem kizárólag műszaki kérdés.

Ehhez társul a társadalmi elfogadás problémája is. Egy új távvezeték vagy alállomás előnye rendszerint nagy földrajzi területen oszlik meg. A fizikai jelenlétéből fakadó terhek viszont jellemzően helyben koncentrálódnak. A rendszer egésze nyerhet egy új hálózati kapcsolattal, miközben egy adott település vagy ingatlantulajdonos viseli annak közvetlen terheit. Ebből következően a rendszer szempontjából optimális nyomvonal társadalmi szempontból egyáltalán nem feltétlenül optimális. Ezért az engedélyezést, a finanszírozást és a társadalmi elfogadást nem célszerű olyan külső akadályként kezelni, amely egy műszakilag már eldöntött beruházás végrehajtását nehezíti. Ezek maguk is a hálózatstratégia részei.

A társadalmi párbeszédben ráadásul nemcsak azt kell láthatóvá tenni, hogy egy beruházás mennyibe kerül és milyen helyi hatással jár. Azt is, hogy mi az ára annak, ha nem valósul meg. Ez sok esetben jóval kevésbé látható. Egy elmaradó hálózatfejlesztés költsége nem feltétlenül jelenik meg egyetlen számlán. Megjelenhet később elmaradt csatlakozásként, magasabb rendszerirányítási költségként, nagyobb termeléskorlátozásként vagy csökkenő ellátásbiztonsági tartalékként. Ezek azonban ugyanúgy valós költségek.

A probléma még nehezebbé válik akkor, amikor a rendszer már nem képes mindenkit egyszerre megvédeni. Egy súlyos rendszerzavarban előfordulhat, hogy fogyasztást kell korlátozni. A helyreállítás során pedig dönteni kell arról, hogy mely fogyasztók és mely térségek kerüljenek előbbre. Ez korábban is létező probléma volt. Az elektrifikáció előrehaladásával azonban egyre nagyobb jelentőséget kap. A villamosenergia-ellátástól függ az infokommunikáció, a vízellátás, az egészségügy, a közlekedés, az ipari termelés és egyre több lakossági alapfunkció is. Vagyis egy villamosenergia-kiesés ma már nagyon gyorsan tovaterjedhet más kritikus infrastruktúrákra.

A prioritási sorrend ezért nem egyszerűen hálózati kapcsolási kérdés. És különösen nem olyan döntés, amelyet célszerű egy válsághelyzet közepén először végig gondolni. Előre tisztázni kell, milyen társadalmi funkciók fenntartása élvez elsőbbséget. Hogyan viszonyul egymáshoz az élet- és vagyonvédelem, a kritikus infrastruktúrák működőképessége, a gazdasági károk csökkentése és a lakossági alapellátás? És ki jogosult dönteni akkor, amikor ezek a célok egymással konfliktusba kerülnek? A mérnök meg tudja mondani, melyik terhelés leválasztása stabilizálja a rendszert. Ez műszaki kérdés. Azt azonban, hogy két egyaránt műszakilag lehetséges beavatkozás közül melyik társadalmilag elfogadhatóbb, már nem döntheti el önmagában egy hálózati számítás.

Itt válik teljessé a robusztusság fogalma. Nem elég azt meghatározni, mennyi hálózatot kell építeni, hogy mennyi tartalék szükséges, hogy mennyi flexibilitást kell biztosítani. Azt is el kell dönteni, hogyan osztjuk el mindennek a költségét, a hasznát és a megmaradó kockázatát. Ki fizet a tartalékért, amelyre talán húszt évig nincs szükség? Ki viseli annak kockázatát, ha a rövidebb távon olcsóbb megoldás hosszabb távon elégtelennek bizonyul? És ki dönt arról, mely szolgáltatást kell először helyreállítani akkor, amikor már nem lehet mindent egyszerre?

Ezekre nincs tisztán műszaki válasz. Ezért a hálózatstratégia valóban nem egyszerű mérnöki optimalizáció. A fizika megmondja, mi lehetséges. A gazdasági elemzés segít megérteni, mennyibe kerül. A társadalmi döntésnek pedig azt kell meghatároznia, hogy milyen ellátásbiztonságért mennyit vagyunk hajlandók közösen fizetni, hogyan osztjuk el ennek terheit, és milyen maradék kockázatot vagyunk hajlandók elfogadni. Talán ez a robusztusság legkényelmetlenebb része.

Nem az a kérdés, hogy szeretnénk-e reziliens villamosenergia-rendszert. Természetesen szeretnénk. A valódi kérdés az, hogy mennyit vagyunk hajlandók fizetni érte akkor, amikor még minden működik – azért, hogy legyen választási lehetőségünk akkor is, amikor már nem minden működik.

7. A BME FASTER Kutatócsoport kapcsolódó kutatásai

A jelen fejezet célja az, hogy visszakapcsoljon a korábban felépített három jövőképhez és három reziliencia-dimenzióhoz. A kapcsolat persze nem teljesen merev: a következőkben bemutatandó három kutatási kérdés valamennyi jövőképben releváns, csak más-más helyzetben válik különösen kritikussá.

A 7.1. *alfejezet* fizikai infrastruktúrára irányuló kutatása legerősebben a fizikai alkalmazkodási rés jövőképéhez és a fizikai rezilienciához kapcsolódik: azt keresi, meddig lehet rugalmassággal és intelligensebb üzemvitellel időt nyerni, és hol válik elkerülhetetlenné a hálózat tényleges megerősítése. A 7.2. *alfejezet* rendszerüzemeltetési irány a digitális bizalomra épülő energiarendszer és a digitális reziliencia és kérdéseit viszi tovább: azt vizsgálja, hogyan őrizhető meg a fizikai rendszer megfigyelhetősége és stabilitása akkor, amikor működése egyre nagyobb mértékben konverterekre, adatokra, modellekre és automatizációra épül. A 7.3. *alfejezet* piac- és rugalmasságkutatása pedig különösen a töredezett európai értéklán-cok világában kap stratégiai jelentőséget: azt kutatja, hogyan mozgósíthatók a rendelkezésre álló, egyre inkább lokális erőforrások akkor is, ha a regionális együttműködés, az importlehetőségek vagy bizonyos technológiai képességek kevésbé magától értetődők.

A három irány közös kérdése így ugyanaz: milyen fizikai, dinamikai és koordinációs képességeket kell létrehozunk ahhoz, hogy a rendszer ne csak egy kedvező jövőben, hanem mindhárom stresszhelyzetben működőképes maradjon?

7.1. Hol van a fizikai infrastruktúra helyettesíthetőségének határa?

A villamosenergia-hálózat fejlesztésének klasszikus mérnöki logikája első közelítésben egyszerű. Megbecsüljük, hogy hol és mennyivel változik a termelés vagy a fogyasztás, megvizsgáljuk, hogy a meglévő hálózat ezt milyen korlátok mellett képes kiszolgálni, majd ott építünk új vezetéket, állomást vagy transzformátorkapacitást, ahol erre szükség van. Ez a gondolkodás évtizedeken keresztül jól szolgált a villamosenergia-rendszereket. Napjainkban azonban egyre gyakrabban találkozunk ugyanazzal az ellentmondással: miközben a fizikai infrastruktúráról több évtizedre előre kell döntenünk, az a környezet, amelyre ezt az infrastruktúrát tervezzük, ennél lényegesen gyorsabban változik. Egy távvezeték vagy nagytranszformátor nem néhány éves időtávra épül. Az erőátviteli transzformátorok tipikus tervezési élettartama 30–40 év, a földkábeleké 40–50 év, egy légvezetéké pedig akár 50–60 év is lehet. Ehhez képest egy napelemes rendszer, akkumulátoros tároló, adatközpont vagy új ipari fogyasztó néhány év alatt megjelenhet, és hasonlóan rövid idő alatt alapvetően változtathatja meg egy térség hálózathasználatát.

A különböző időállandók önmagukban is megnehezítik a tervezést, a probléma azonban ennél mélyebb. Nem egyszerűen arról van szó, hogy a hálózat lassabban épül, mint a hozzá csatlakozó termelés vagy fogyasztás. A hálózat fizikai szerkezete a múlt döntéseit is magában hordozza. A ma rendelkezésünkre álló rendszer nem egy üres térképre optimálisan megrajzolt hálózat, hanem több évtized egymásra épülő beruházásainak eredménye. A hosszú távú tervezés kérdése így némileg másképp fogalmazható meg. Nem pusztán azt kell megkérdeznünk, milyen hálózatot szeretnénk 2050-ben, de legalább ilyen fontos az is, hogy a ma meglévő struktúra milyen fejlődési utakhoz köt bennünket.

A több évtizedes hálózatfejlődési adatok alapján jól látható, hogy az eltérő országok és történeti körülmények ellenére számos közös fejlődési mintázat ismétlődik. A rendszerek kezdetben gyorsan terjeszkednek: kialakulnak a nagy távolságú gerinchálózati kapcsolatok, majd a későbbi fejlődés egyre inkább a hálózat sűrűsödését, új csomópontok bekapcsolását és a lokális redundancia növekedését jelenti.

Ezzel párhuzamosan a topológiai hatékonyság kezdeti gyors változása idővel mérséklődik, és a hálózati struktúrában hosszabb távon egyfajta egyensúly alakul ki a hatékony és a robusztus kialakítás között. Ez azért lényeges, mert arra utal, hogy egy hálózat fejlődése korántsem alakítható korlátlanul. Egy létrejött topológiai konfiguráció jellemzően hosszú időn keresztül fennmarad; az átviteli hálózatok esetében akár két-három évtizeden keresztül is meghatározhatja a további fejlődés kereteit. A korai fejlesztési döntések ezért bizonyos strukturális tulajdonságokat hosszú időre rögzíthetnek, a korai, sokszor nagy távolságokat áthidaló vagy részben sugaras kapcsolatok egy része évtizedek múlva is felismerhető marad. Az elosztó-hálózatokon ugyanez a jelenség talán még látványosabban jelenik meg. Egy térség hálózatának mérete akár többszörösére növekedhet úgy, hogy több alapvető strukturális tulajdonsága alig változik. A települések villamosítása során kialakult sugaras, hierarchikus szerkezetek már a fejlődés korai szakaszában létrehozhatják azokat a mintázatokat, amelyek évtizedekkel később is meghatározóak maradnak.

Ebből fontos következtetés adódik a jövő hálózattervezése számára: a több infrastruktúra nem automatikusan jelent arányosan nagyobb rezilienciát. Legalább ennyire fontos, hogy hol és milyen topológiai szerepű elemet építünk. Egy új összeköttetés létrehozhat alternatív energiaáramlási útvonalat, megszüntethet egy kritikus hálózati szűkületet vagy csökkentheti valamely kiemelt csomópont túlzott jelentőségét. Egy másik beruházás ezzel szemben lényegében csak tovább növelheti a meglévő struktúrát anélkül, hogy annak sérülékenységi érdemben megváltoztatná. A topológiai hatékonyság és a sérülésekkel szembeni ellenálló képesség ráadásul nem feltétlenül azonos irányba mutató követelmények.

A rendszer rezilienciáját ezért aligha lehet kizárólag az infrastruktúra teljes mennyiségével vagy néhány országos aggregált mutatóval jellemezni. A lokális topológia, a hálózati elemek funkciója és a kiesés módja egyaránt számít. Ugyanez a hálózat eltérően viselkedhet véletlenszerű és célzott kiesések esetén: egy nagy fokszerű csomópont vagy nagy közvetítő szerepű kapcsolat elvesztése aránytalanul nagyobb következménnyel járhat, mint egy átlagos elemé. Kutatási eredmények alapján már a csomópontok viszonylag kis hányadának célzott kiesése is lényegesen súlyosabb rendszerhatást eredményezhet, mint ugyanekkora véletlenszerű zavar. Ebből nem az következik, hogy valamennyi kritikus elemet korlátlan redundanciával kell felruházni, hiszen a villamosenergia-hálózat tervezése mindig műszaki-gazdasági kompromisszum. Vizsgálni érdemes azonban, hogy a rendelkezésre álló, sokszor korlátozott beruházási forrásból mely beavatkozásokkal növelhető leginkább a reziliencia, és mely fejlesztések őrzik meg értéküket több, egymástól eltérő jövőben is.

Itt jelenik meg a 2050 felé tekintő hálózattervezés egyik első határa. Nem minden jövőbeni hálózati igényre kell már ma új vezetékkel válaszolni, de nem is minden fizikai igény halasztható későbbre. A kettő közötti különbség felismeréséhez először azt kell megértenünk, hogy a meglévő hálózat mely részei strukturálisan kötöttek, mely elemek teremtenek valódi útvonal-redundanciát, hol találhatók nehezen helyettesíthető csomópontok, és mely új kapcsolatok képesek a rendszer szerkezetét ténylegesen megváltoztatni. A problémát tovább nehezíti, hogy nemcsak a hálózat használata változik, hanem az a fizikai környezet is, amelyre az infrastruktúrát eredetileg méreteztük, ahogy azt a 4.1. alfejezetben bemutatunk.

Ebből ismét nem az következik, hogy minden meglévő vezetéket azonnal újra kell méretezni. Éppen ellenkezőleg: a klímaadaptáció is differenciált döntést igényel. Új infrastruktúra esetén indokolt lehet a várható jövőbeni éghajlati feltételek beépítése a tervezési határértékekbe, különösen ott, ahol több modell is konzisztensen növekvő kitettséget jelez. A meglévő infrastruktúra esetén a beavatkozási lehetőségeink egy része továbbra is fizikai jellegű. Speciális mechanikai megoldások korlátozhatják a szélsőséges jég- vagy szélterhelésből az oszlopokra átadódó erőket, a súlyosan sérült szerkezetek gyors helyettesítésére pedig előre telepített vagy megfelelően elhelyezett ideiglenes oszloprendszerek szolgálhatnak. Más eszközök nem magát az infrastruktúrát erősítik meg, hanem az információ értékét növelik. Nagy térbeli és időbeli felbontású meteorológiai előrejelzés alapján egy veszélyeztetett korridor előzetesen tehermentesíthető, a helyreállító kapacitások még a vihar előtt a térségbe csoportosíthatók, a vezetéken elhelyezett szenzorok pedig nemcsak az aktuális terhelhetőségről, hanem a jegesedéshez vezető folyamatokról is információt adhatnak.

Ebből is látható, hogy a hálózat „okosítása” és a hálózat fizikai bővítése nem két egymást kizáró stratégia. A dinamikus távvezeték-terhelhetőség, a topológia rugalmas kezelése, a korszerű feszültségszabályozás, a fogyasztói rugalmasság vagy a rugalmas csatlakozási szerződések mind képesek növelni a meglévő infrastruktúra tényleges értékét. Az azonban, hogy időt nyerünk, nem azonos azzal, hogy a fizikai beruházás szükségessége megszűnik. Ezek az eszközök nem az infrastruktúra általános helyettesítői, hanem a jobb kihasználást és a beruházási döntések időbeli mozgásterének növelését szolgáló lehetőségek.

A mozgástérre pedig szükség van, hiszen a hosszú távú hálózattervezés egyik kevésbé látható bizonytalansága maga a megvalósítás. Kutatásaink során (Hartmann és mtsai, megjelenés alatt) a magyar nagyfeszültségű hálózatfejlesztési tervek másfél évtizedet átfogó vizsgálatán és több száz projekt életútján keresztül mutattuk be, hogy az ütemezés távolról sem determinisztikus. A beruházások jellemzően több évvel a tervezett üzembe helyezésük előtt jelennek meg a fejlesztési tervekben, az átviteli projektek esetében pedig ez az előretekingési idő még hosszabb. A ténylegesen befejezett projektek már első megjelenésükkor jellemzően közelebb állnak a megvalósításhoz, míg a később törölt beruházások hosszabb kezdeti tervezési horizonttal rendelkeznek. Talán még fontosabb, hogy minél távolabbra tekintünk előre, annál kisebb bizonyossággal beszélhetünk egy konkrét projekt tényleges megvalósításáról. Négyéves kezdeti tervezési horizont esetén például a vizsgált projektportfólióban már a beruházások több mint fele nem jutott el az eredetileg feltételezett megvalósulásig. Ez azt mutatja, hogy maga a rendszer változik a tervezés ideje alatt: módosulhat a fogyasztói igény, a termelői portfólió, a szabályozási környezet, a finanszírozás, a nyomvonal megvalósíthatósága vagy akár maga a hálózati probléma is.

Ezen a ponton jelenik meg az intézményi tehetetlenség kérdése. A hálózattervezés formális szabályai és folyamatai jellemzően lassabban változnak, mint az a környezet, amelyben alkalmazzuk őket. Egy korábbi, inkrementális fejlesztési világra kialakított eljárás formálisan továbbra is megfelelően működhet, miközben ugyanazokkal a szabályokkal már más eredményhez vezet. A tervező így kettős bizonytalansággal találkozhat. Nemcsak azt nem tudja pontosan, hogy milyen hálózatra lesz szükség tíz vagy húsz év múlva, hanem azt sem, hogy a ma elindított beruházások közül melyek, mikor és milyen formában valósulnak majd meg ténylegesen.

Ezzel maga a klasszikus hálózattervezési probléma is átalakul. Ha egy tíz vagy tizenöt évvel későbbi rendszerállapot modellezésekor valamely tervezett távvezeték biztosan rendelkezésre állónak tekintünk, miközben a tényleges projektportfóliók jelentős ütemezési bizonytalanságot mutatnak, akkor a modell könnyen hamis biztonságérzetet kelthet. A jövő hálózattervezésében ezért a beruházások megvalósulását

is bizonytalansági tényezőként érdemes kezelni. Ez pedig a rugalmasságnak is új jelentést ad. Egy akkumulátor, egy rugalmas csatlakozási szerződés vagy egy topológiaátkapcsolás nemcsak azért értékes, mert véglegesen kivált egy hálózati beruházást. Értékét az is adhatja, hogy áthidalja azt a néhány évet, amellyel a vezeték megvalósítása késik, vagy lehetővé teszi, hogy a fizikai beruházásról később döntsünk, amikor már több információval rendelkezünk a jövő tényleges alakulásáról. Ezt a bizonytalanságot a legjobban úgy tudjuk megfogalmazni, ha feltesszük a kérdést: mit kell ma visszafordíthatatlanul eldöntenünk, és mely döntéseket tudjuk elfogadható költséggel későbbre halasztani?

Egy új távvezetési nyomvonal biztosítása, egy alállomás helyének lefoglalása vagy egy későbbi bővítés műszaki feltételeinek megteremtése ma még viszonylag kis költségű döntés lehet ahhoz képest, hogy húsz év múlva ugyanezen lehetőség létrehozása fizikailag vagy társadalmilag már lehetetlen. A bővítést azonban nem kell azonnal elvégeznünk; a stratégiai érték ilyenkor a jövőbeni döntés lehetőségének megőrzése is (*anticipatory investment*). A hosszú távú hálózatfejlődési adatok ezt a gondolatot más oldalról is alátámasztják. A több ország több évtizedes fejlődésében egyszer kialakult szerkezeti mintázatok hosszú ideig fennmaradnak. Egy rosszul megválasztott mai döntés ezért évtizedekre beépülhet a hálózatba. De ugyanez igaz egy jól elhelyezett stratégiai kapcsolatra is: annak haszna szintén hosszú időn keresztül fennmaradhat. A 2050-es jövő egyik legfontosabb feladata ezért azoknak a döntéseknek az azonosítása, amelyek nagy opcióértéket hordoznak.

Ebben a gondolkodásban a hálózattudomány és a klasszikus villamos energetikai tervezés természetes módon egészítheti ki egymást. A topológiai elemzés képes azonosítani a kritikus hidakat, központi csomópontokat, hálózati modulok közötti kapcsolatokat és a redundancia szerkezeti hiányait. Önmagában azonban nem mondja meg, milyen teljesítményáramlási vagy feszültségi probléma jelenik meg egy konkrét üzemi állapotban. A villamos energetikai modellek ezt már képesek vizsgálni, de gyakran egyetlen feltételezett jövőre. A következő lépés ezért olyan többszempontú tervezési módszerek kialakítása lehet, amelyek a teljesítményáramlást, a topológiai sérülékenységet, az időjárási kitettséget és a projekt megvalósítási kockázatát együttesen kezelik, ehhez pedig az idő dimenzióját is explicit módon be kell emelni. A hálózatfejlesztés így egyre kevésbé statikus célhálózat-keresési, és egyre inkább szekvenciális döntési problémává válik.

A jövő tervezési módszertanának a beruházási költség és a névleges kapacitás mellett azt is értékelnie kell, hogy egy adott kapcsolat mekkora új működési szabadságot hoz létre. A célzott hálózatmegerősítéssel kapcsolatos kutatásaink ebből a szempontból különösen tanulságosak. Nem minden új összeköttetés javítja azonos mértékben a rendszer rezilienciáját. Sőt bizonyos üzemállapotokban egy új kapcsolat kedvezőtlen teljesítményáramlás-átrendeződést is előidézhethet. A hagyományos költség-haszon elemzés mellé ezért olyan szempontok is bekerülhetnek, mint a topológiai opcióérték, a későbbi bővíthetőség vagy a több eltérő rendszerállapotban megőrzött használhatóság.

A vázolt kutatási irány így végül jóval túlmutat azon, hogyan kell egy új távvezeték optimálisan elhelyezni. A cél egy adaptív infrastruktúratervezési keret létrehozása. Olyan megközelítésé, amely több lehetséges fejlődési pályát vizsgál, nem feltételezi automatikusan, hogy minden tervezett beruházás időben megvalósul, a klímát nem változtatlan háttérfeltételként kezeli, különbséget tesz a visszafordíthatatlan és a későbbre halasztható döntések között, a rugalmasságot pedig nem pusztán infrastruktúra-helyettesítőként, hanem időnyerő és döntési szabadságot növelő erőforrásként is értékeli. Itt húzódik kutatásaink jelenlegi határa is: meddig tudjuk a bizonytalanságot jobb információval, rugalmassággal, topológiai beavatkozással és intelligensebb üzemvitellel kezelni, és honnantól nincs más valódi megoldás, mint új fizikai kapacitást létrehozni?

7.2. Hol van a klasszikus rendszerüzemeltetési paradigma érvényességének határa?

Az energiaátmenetről hajlamosak vagyunk technológiák cseréjeként gondolkodni. A széntüzelésű blokk helyére naperőmű kerül, a hagyományos szabályozó erőmű mellé akkumulátor, a szinkrongép helyére teljesítményelektronikai interfész. Ettől azonban a villamosenergia-rendszer nem válik függetlenné a nyersanyagoktól.

Az inverterben ugyanúgy van réz, vas, félvezető, szigetelőanyag és hőelvezetési korlát. A kábelnek továbbra is ellenállása, induktivitása és kapacitása van. A transzformátor fluxusa, impedanciája és telítése pedig nem oldható fel szoftverrel. A digitális vezérlés alapvetően megváltoztathatja, hogy ezek az eszközök mikor és hogyan reagálnak, de egy dolgot nem változtat meg: a fizikai törvényeket.

5. táblázat. A réz szerepe és a rendszerképesség az egyes eszközökben

Eszköz	A réz és a fő anyagok szerepe	A rendszer számára nyújtott fizikai képesség	A helyesebb összehasonlítási alap
Szinkron-generátor	Áramvezető tekercsek; a mágneses tér és az elektromágneses nyomaték létrehozása. A forgó energia döntően a rotor és a turbína tömegében tárolódik.	Azonnali fizikai inercia, belső feszültségforrás-jelleg, zárlati áram, meddőteljesítmény és feszültségtámasz.	Tárolt kinetikus energia [MWs], H, szubtranzien reakancia, P-Q tartomány, csillapítás, lokáció.
Transzformátor	Primer és szekunder tekercsek, valamint vasmag; a teljesítmény feszültségszintek közötti átadása.	Feszültségszintek csatolása, rövidzárlati impedancia, feszültségesés, termikus terhelhetőség; önmagában nincs mechanikai inercia.	MVA, drop, veszteségek, hőmérsékleti tartalék, kapcsolási csoport, csapolás, telítési és földelési viselkedés.
Távvezeték / kábel	A vezető keresztmetszete határozza meg az ohmos veszteség és a hőterhelés fontos részét; a geometria az induktivitást és kapacitást is.	Térbeli teljesítményátvitel, hálózati impedancia, terhelhetőség, hullámterjedés és reflexió; a topológiai összekapcsoltság része.	A, MVA és km; R-X-C paraméterek, hőmérgleg, mechanikai korlát, hullámimpedancia, kritikus nyomvonal.
Inverter + BESS / DC-forrás	Réz a szűrőkben, sínrendszerben és esetleges transzformátorban; félvezetők alakítják a csatolást.	Gyors, programozható aktív- és meddőteljesítmény-válasz, grid-forming feszültségképzés; a zárlati áram és energia időben korlátozott.	Csúcsteljesítmény, energia, válaszdő, tartási idő, áramkorlát, DC-tartalék, grid-forming/grid-following mód, helyreállási energia.
Szinkron-kompenzátor	Szinkrongép hajtógép nélkül; tekercsek, vasmag és forgó tömeg.	Feszültség- és meddőteljesítmény-támasz, valós zárlati áram és fizikai inercia; hatásos energia-termelés nélkül.	Mvar, szubtranzien reakancia, rövidzárlati hozzájárulás, H és esetleges lendkerék, lokáció.

Ez első látásra magától értetődő kijelentésnek tűnik. Mégis messzire vezet. A klasszikus rendszerüzemeltetési paradigma ugyanis egy olyan technológiai környezetben alakult ki, ahol a rendszer számos fontos fizikai tulajdonsága magukból a berendezésekből következett. A nagy szinkrongenerátorok forgó tömege természetes tehetetlenséget biztosított. Belső feszültségforrásként viselkedtek, jelentős zárlati áramot szolgáltattak, és aktív szerepet játszottak a feszültség szabályozásában.

A rendszer ebben a világban sem volt egyszerű. Mindazonáltal kialakulhatott egy olyan mérnöki absztrakció, amelyben viszonylag kevés aggregált mennyiséggel eredményesen lehetett gondolkodni. Volt értelme a rendszer frekvenciájáról, a rendszer inerciájáról vagy a rendelkezésre álló szabályozási tartalékról beszélni.

Az energiaátmenet nem teszi érvénytelenné ezeket a fogalmakat. Sokkal inkább fokozatosan lebontja azokat a feltételezéseket, amelyek miatt korábban önmagukban elegendőek voltak. A teljesítményelektronikán keresztül csatlakozó termelők tényerésével csökken a természetes forgó tehetetlenség. A feszültségtartás egyre kevésbé néhány nagyermű helyi meddőteljesítmény-szolgáltatására támaszkodik. Olyan gyors szabályozási kölcsönhatások jelennek meg, amelyek korábban kisebb jelentőséggel bírtak. A stabilitást biztosító fizikai képességek tehát nem feltétlenül tűnnek el. A forrásuk változik meg. Ez nagyon fontos különbség.

A jövőben ugyanis egy technológia névleges teljesítménye egyre kevésbé mondja meg, hogy milyen rendszerképességet kapunk vele. Anyagellátási szempontból természetesen összevethető, mennyi rezet igényel egy generátor, transzformátor vagy kábel. Rendszerfizikai szempontból azonban ugyanaz az anyag egészen eltérő funkciót tölthet be.

Egy szinkrongenerátor értékéhez nemcsak a névleges MW tartozik hozzá. Ott van a forgó energia, a belső feszültségforrás-jelleg, a zárlati hozzájárulás és a meddőteljesítmény-képesség is. Egy inverteres akkumulátor rendkívül gyors aktív- és meddőteljesítmény-válaszra képes, de szolgáltatását korlátozza az áramkorlát, a DC-oldali energiatartalék és az, hogy mennyi ideig képes a kívánt teljesítményt fenntartani. Egy szinkronkompenzátor pedig aktívenergia-termelés nélkül képes fizikai inerciát, zárlati áramot és feszültséget merevséget biztosítani. Vagyis önmagában az eszköz neve kevés.

A jövő rendszerirányításának egyre inkább képességleltárakban érdemes gondolkodnia. A névleges MW mellett tudni kell, mennyi ténylegesen elérhető energia tartozik az eszközhöz, milyen késleltetéssel indul a válasz, mekkora csúcsteljesítményt képes biztosítani, mennyi ideig tarthatja ezt fenn, milyen az áramkorlátja, mekkora meddőteljesítmény-tartománnyal rendelkezik, képes-e feszültséget képezni, és nem utolsósorban: hol található mindez a hálózatban. A rendszerbiztonságot ugyanis nem a technológiák neve vagy névleges teljesítménye határozza meg. Hanem az energia, az áram- és feszültségtartalék, a dinamikus válasz, az időtartam és a lokáció együttese.

Jól látható ez az inercia példáján. A szinkrongenerátor tehetetlensége a forgó tömegek kinetikus energiájából származik. Ha hirtelen eltérés keletkezik a villamos teljesítményigény és a mechanikai betáplálás között, a rotor fordulatszámának parányi változása azonnal pufferelem az energiahiány egy részét. Ehhez nincs szükség frekvenciamérésre. Nincs szükség kommunikációra. És nincs szükség külön vezérlési parancsra sem. A válasz magából a fizikai kapcsolatból következik.

Egy megújuló technológiánál ezért a „van-e inercia?” kérdésre már nem feltétlenül adható egyszerű igen-nem válasz. Egy szélturbina forgórészében például jelentős kinetikus energia lehet, teljes konverteres csatlakozás esetén azonban ezt a hálózat nem „érzi” automatikusan. Akkor válik rendszerképességgé, ha a szabályozás felismeri a frekvenciaváltozást, teljesítményt kér a rotor vagy a DC-oldal felől, majd ezt az inverter fizikai korlátain belül a hálózatba juttatja. A napelemes rendszer hasonlóan csak akkor képes gyors aktív teljesítménytöbbletre, ha rendelkezésre áll visszatartott termelés vagy kapcsolódó energiatároló. A szin-
tetikus inercia tehát nem egyszerűen „virtuális tömeg”. Vezérelt teljesítményválasz. És mint ilyen, késleltetéssel, maximális teljesítménnyel, kinyerhető energiamennyiséggel, tartási idővel, áramkorláttal és visszaállási folyamattal rendelkezik.

6. táblázat. Jelenség, időskála és javasolt modellezési szint

Jellemző idő	Elsődleges jelenség	Amit meg kell őrizni	Tipikus módszer
$\mu\text{s}-\text{ms}$	Villám, kapcsolási hullám, kábel- és vezetékhullám, reflexió	Pillanatérték, hullámforma, elosztott paraméter, aszimmetria	EMT, frekvenciafüggő vezetékek-/kábelmodell
$0,1\text{ ms}-0,5\text{ s}$	Inverteráram-szabályozás, <i>Phase Locked Loop</i> (PLL) és <i>grid-forming</i> , áramkorlát, telítés, vezérlési kölcsönhatás	Gyors belső állapotok, limiter, fázisugrás, negatív sorrend, harmonikus/rezonanciahatás	Részletes vagy átlagolt EMT; impedancia- és frekvenciatartományi elemzés
$0,02-30\text{ s}$	Frekvencia-, szög- és feszültségstabilitás, elektromechanikai hullámok és módusok	Generátor- és szabályozóállapotok, hálózati csatolás, dinamikus terhelések	RMS pozitív sorrendű időtartomány; kritikus esetek EMT-benchmarkja
$0,5-500\text{ s}$	Primer/szekunder szabályozás, védelem, terhelés-visszaépülés, szigetképződés, kaszkád	Folytonos dinamika + diszkrét események és topológia-váltások	RMS-hibrid esemény-szimuláció, esetenként ko-szimuláció
perc-óra	Redispatch, tartalék, helyreállítás, adequacy, beruházási döntés	Energia- és kapacitáskorlátok, bizonytalanság, működési logika	Kvázi-stacioner számítás, optimalizáció, Monte Carlo / szcenárió

Éppen ezért talán célszerűbb tágabb gyors stabilitási képességsomagról beszélni. Egy szinkronkompenzátor és egy *grid-forming* akkumulátor például nem egyszerű helyettesítője egymásnak. Más képességek tartott kínálnak. Értékük attól függ, hogy milyen fizikai hiányt, milyen helyen és milyen időtávon szeretnénk kezelni.

Ebből már közvetlenül következik egy másik fontos felismerés: az inerciát és a többi stabilitási képességet egyre kevésbé lehet kizárólag országos vagy teljes szinkronterületre összegzett mennyiségként kezelni. Lehet ugyanis összességében megfelelő kinetikus energiatartalék a rendszerben, miközben annak térbeli eloszlása rendkívül egyenetlen. Lehet elegendő meddőteljesítmény országos összesítésben, de nem azon a csomóponton, ahol egy gyors feszültségi esemény során szükség lenne rá. Lehet több ezer megawatt akkumulátoros teljesítményünk, miközben annak jelentős része ugyanabban a földrajzi térségben koncentrálódik. A rendszerképesség tehát nem választható el attól a hálózati közegetől, amelyben működnie kell.

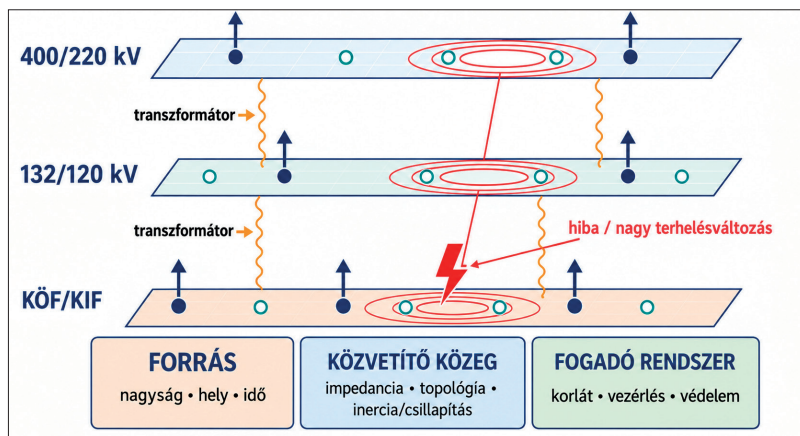
Ennek érzékeltetésére jól használható a rugalmas gumiasztal analógiája. Képzeljünk el egy feszültség-szintet egy rugalmas felületként. A hálózat erős pontjai lehorgonyozzák, feszesebbé teszik ezt a felületet. Egy termelés kiesés, zárlat vagy jelentős terhelésváltozás deformációt hoz létre rajta. Ez a deformáció nem marad a keletkezési pontban, hanem a hálózati kapcsolatok mentén tovább terjed, csillapodik, más dinamikai módusokat gerjeszt, bizonyos határokon pedig új jelenségeket válthat ki.

De mit jelent ebben az analógiában az, hogy egy pont „erős”? Nem egyszerűen azt, hogy nagy erőmű van a közelben. Erős lehet az a csomópont, ahol kicsi a Thevenin-impedancia, nagy a rövidzárlati teljesítmény, rendelkezésre áll dinamikus meddőteljesítmény és feszültségtámasz, több párhuzamos hálózati út vezet el, és a közeli eszközök vezérlése megfelelően összehangolt. Vagyis a rendszererősség sem pusztán egyetlen eszköz tulajdonsága. Ugyanaz a berendezés két különböző csatlakozási ponton teljesen eltérő rendszerhatást fejthet ki.

Egy *grid-forming* eszköz például elvileg képes feszültségképzésre. Tényleges rendszerhatása azonban függ a környezet impedanciájától, a szomszédos vezérlésektől és attól is, hogy az áramkorlát mikor és milyen mó-

don válik aktívvá. A rendszererősséget ezért egyre kevésbé célszerű kizárólag egyetlen rövidzárlati mutatóval jellemezni. Hely- és állapotfüggő tulajdonsággá válik, amelyben a fizikai hálózat és a vezérlés együtt jelenik meg.

Ez a szemlélet az inercia térbeli értelmezésére is kiterjed. A szinkrongépes villamosenergia-rendszerben a kinetikus energia földrajzi eloszlása történetileg együtt alakult a nagy erőművi központokkal és a gerinchálózattal. A jövő gyors frekvenciatámogatási forrásai ezzel szemben egészen más helyeken jelenhetnek meg. Egy nagy akkumulátor, egy szélerőműpark, egy ipari fogyasztó vagy akár több ezer aggregált inverter. Mind képes lehet dinamikai választ adni, de nem azonos időállandóval, nem azonos energiatartalommal és nem azonos villamos távolságból.



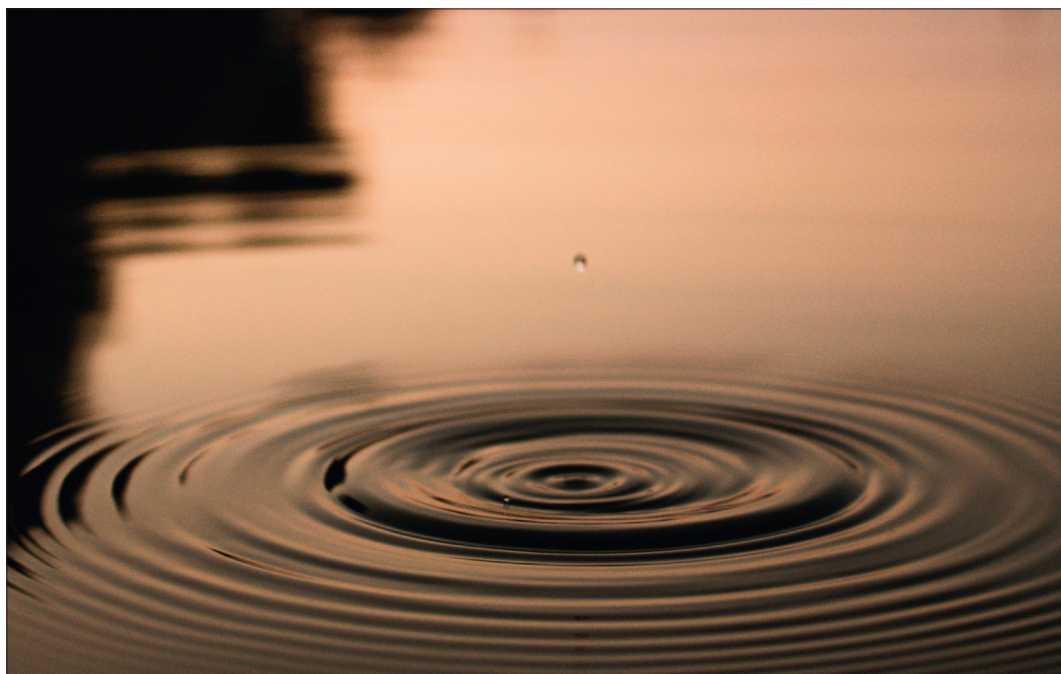
9. ábra.

A villamosenergia-rendszer mint egymáshoz csatolt rugalmas rétegek; az esemény megfigyelt hatását a forrás, a hálózati közeg és a fogadó rendszer együtt határozza meg (Forrás: saját szerkesztés)

A rendszerirányító számára ezért egy országos inerciaérték mellett egyre fontosabbá válik az a kérdés is, hogy egy adott nagy zavarhoz képest hol található a ténylegesen elérhető gyors energiatartalék. A különböző feszültségszinteket eközben egymás fölötti rugalmas rétegekként is elképzelhetjük, amelyek között a transzformátorok teremtik meg a kapcsolatot. És ez a kapcsolat kétirányú.

Egy átviteli hálózati feszültségletörés eljut az elosztóhálózatba. Ott motorok lassulhatnak, inverterek kerülhetnek áramkorlátra, védelmek léphetnek működésbe. Fordítva ugyanez igaz: elosztott erőforrások tömeges, azonos irányú reakciója vagy egyidejű leválása már átviteli szintű teljesítmény- és feszültségváltozást eredményezhet. A TSO–DSO kapcsolat ezért nem pusztán adatkapcsolat. Fizikailag csatolt dinamikai interfész. A jövőben az elosztóhálózat egyre kevésbé írható le egyetlen passzív nettó fogyasztási pontként.

Természetesen a gumiasztal-analógia sem tökéletes. A villamosenergia-rendszerben nem egyetlen „fügőleges” deformáció történik. Egyszerre változik a feszültség, a szög, a frekvencia, az áram, számos szabályozói állapot és adott esetben diszkrét védelmi módok is. Mégis jól érzékelteti, miért lehet félrevezető egyetlen országos rendszererősségről vagy inerciaszintről beszélni.



10. ábra. Kavics a tóban (Forrás: Viktoria Emilia)

Ugyanerre világít rá a kavics a tóban analógia is. Ugyanaz a kavics különböző közegekben más és más hullámképet hoz létre. A villamosenergia-rendszerben ugyanígy nemcsak a zavar nagysága fontos. Legalább ennyire számít a hálózati impedancia, az inercia és a csillapítás térbeli eloszlása, a topológia, az áramkorlátok, a gyors szabályozók és a védelmi határok. Ugyanaz a termelés kiesés más frekvenciaválaszt eredményez nagy és kis inerciájú rendszerben. Ugyanaz a zárlat más feszültségletörést okoz erős és gyenge csatlakozási ponton. Ugyanaz az invertervezérlés stabil lehet merev hálózati környezetben, és oszcillációt kelthet egy gyenge csatlakozásnál.

Ebből új megfigyelési követelmények is következnek. A nagy időfelbontású, szinkronizált mérések lehetővé teszik, hogy ne csak azt lássuk, mekkora volt egy zavar, hanem azt is, hogyan érkezett meg a rendszer különböző pontjaira.

Ez bizonyos szempontból valóban hasonlít a földrengések megfigyelésére. Az eltérő időpontban és amplitúdóval érzékelt frekvencia- és terhelési szög változásaiból következtetni lehet az esemény helyére, a térségek közötti csatolásra, a lengési módokra, sőt bizonyos esetekben az inercia térbeli eloszlásának változására is. A fázisszögmérő egység (PMU)-alapú széles területű monitoring tehát nem egyszerűen gyorsabb mérés. Új rendszerfigyelési réteg.

Ez különösen fontossá válik a kaszkád jellegű eseményeknél. Egy nagy rendszerzavar ugyanis nem egyetlen hullám. Folytonos dinamikák és diszkrét események egymásra épülő láncolata. A kezdeti hiba elektromágneses és elektromechanikai perturbációkat indít el. Ezek túlterhelést, védelmi működést vagy szabályozási reakciót válthatnak ki. Egy újabb elem lekapcsolása pedig maga is új eseményforrássá válik. Ráadásul közben megváltozik a topológia. Vagyis a következő zavar már nem ugyanabban a rendszerben terjed tovább, mint az első.

A rendszerirányításnak ezért nemcsak az egyes tipikus hibák kezelésére kell felkészülnie. Arra is képesnek kell lennie, hogy felismerje, mikor kezd egy lokális esemény tovaterjedő folyamattá válni. Ehhez azonban az időskálákat is szét kell választani. A vezetéken terjedő elektromágneses hullámfront mikro- vagy milliszekundumos folyamat. Az inverter belső áramszabályozása és a grid-forming működés szintén gyors, de más fizikai mechanizmust jelent. A frekvencia- és szögváltozások elektromechanikai terjedése már másodperces tartományban jelenik meg. A védelmek és szabályozási módváltások diszkrét eseményekkel szakítják meg ezt a folytonos dinamikát. A redispatch és a helyreállítás pedig percek vagy órák időskáláján történik.

Ezért az a kérdés, hogy „mekkora az amplitúdó a hiba után?”, önmagában kevés. Melyik mennyiségről beszélünk? Hol mérjük? Milyen időpillanatban? És melyik fizikai folyamatot szeretnénk ebből megérteni?

A modellezéssel szembeni elvárások is ennek megfelelően változnak. Az RMS-alapú időtartományi szimuláció továbbra is nélkülözhetetlen a frekvencia-, szög- és számos feszültségstabilitási kérdés vizsgálatában. Ugyanakkor egyre több olyan helyzet fordulhat elő, amikor a döntés szempontjából lényeges fizika éppen abban a részletben található, amelyet az RMS-modell átlagol. Ezért az RMS és az EMT közötti választást sem célszerű úgy felfogni, mintha az egyik „egyszerű”, a másik pedig „pontos” lenne. A fontosabb kérdés az, hogy milyen fizikai tulajdonságokat, jellemzőket kell megőriznünk a modellezés során ahhoz, hogy helyes döntést hozzunk?

Egy RMS-modell megfelelő lehet akkor, ha a vizsgált jelenség időskálája jól elkülönül a gyors belső dinamikától, és az eszközök átlagolt modellje kellően validált. Részletesebb EMT-vizsgálatra lehet szükség akkor, ha a zavar felfutása összemérhető a vezetéki vagy szabályozási késleltetésekkel; ha hosszú kábelek, HVDC-kapcsolatok, gyenge hálózati csatlakozások vagy sok konverter kölcsönhatása válik fontossá. Akkor is ez a megoldás, ha áramkorlát, vezérlési módváltás, telítés vagy rezonancia határozza meg a választ.

A hatékony vizsgálati folyamat ezért valószínűleg többlépcsős. Széles scenáriótérben gyorsabb modellek szűrik ki a kritikus eseteket. A kiválasztott eseteket részletesebb módszerekkel vizsgáljuk tovább. A modell állításait pedig végül mérésekkel kell szembesíteni.

A legjobb modell tehát nem feltétlenül a legrészletesebb. A legjobb modell a legegyszerűbb olyan modell, amely a döntéshez szükséges fizikát még megőrzi. Ez a logika túlmutat magán a modellválasztáson. Már a számítás előtt pontosan meg kell fogalmazni a problémát. Melyik üzemi pontot vizsgáljuk? Milyen eseménnyel szemben? Milyen időtávon? Milyen elfogadhatósági kritériummal?

Az analitikus, RMS-, EMT- és valószínűségi módszerek ebben az értelemben nem egymással versengő eljárások, hanem egy bizonyítási lánc elemei. A végén pedig mindig ott kell állnia a visszamérésnek: milyen valós mérési eredmény cáfolhatná meg a modell állítását, és mit tanulunk akkor, ha a tényleges rendszer másképpen viselkedik?

A két szélsőséget ezért egyaránt érdemes elkerülni. Az egyik szerint a korábban bevált RMS-modellek változtatás nélkül elegendők minden jövőbeli rendszerállapothoz. A másik szerint a konverterdomináns villamosenergia-rendszer minden problémáját teljes EMT-részletességgel kell vizsgálni. Valószínűleg egyik sem helyes. A két világ között hidat kell építeni.

A kritikus esetek kiválasztását nagy rendszeren gyorsabb modellek végezhetik, míg a lokális konverter-interakciók részletesebb reprezentációt igényelhetnek. A ko-szimuláció és a modellredukció ezért nem pusztán számítástechnikai kényelmi megoldás. Lehetővé teszi, hogy a kontinensléptékű összefüggések és a lokális gyors fizika ugyanabban a vizsgálati láncban jelenjenek meg.

Az egyszerűbb modelleknek ebben különösen fontos szerepük marad. Ha egy részletes szimuláció instabilitást mutat, abból önmagában még nem biztos, hogy értjük, mi történt. A mérnöki döntéshez azt is tudni kell, mi volt a domináns mechanizmus. Energiahiány? Gyenge feszültségi csatolás? Elégtelen csillapítás? Áramkorlát? Vezérlési módváltás? Vagy ezek valamilyen kombinációja?

Egy egyszerű hálózati ekvivalens, energiamérleg vagy érzékenységi vizsgálat sokszor éppen azt teszi láthatóvá, amit a részletes modell nagy információtömege elfed. A részletes modell ezt követően ellenőrizheti, hogy a felismert mechanizmus a teljes rendszerben is érvényes marad-e. A jövő stabilitási elemzése ezért nem egyetlen szimulációs eszközre épül, hanem bizonyítási láncra.

Innen vezet tovább a rendszermerevség gondolata. A rendszerüzemeltető számára önmagában az, hogy egy adott üzemállapot „stabil”, egyre kevésbé elegendő információ. Sokkal fontosabb kérdés, hogy milyen messze van attól a határtól, ahol már nem lesz stabil. A rendszermerevség ebben az értelmezésben nem új stabilitási kategória. Sokkal inkább annak a dinamikus tartaléknak a leírása, amellyel a rendszer egy adott zavar ellen rendelkezik.

Egy adott üzemi pont és eseménytípus mellett megkereshető az a határ, ameddig a rendszer állapotpályája még a megengedett tartományban marad és elfogadható működéshez tér vissza. Ezt fejezheti ki például a *Rigidity Response Threshold* (RRT), azaz a merevségi válaszküszöb gondolata. Fontos azonban hangsúlyozni: az RRT nem lehet egyetlen univerzális szám. Más stresszirányt jelent egy termeléskiesés, egy zárlat hátrítási idejének növekedése, egy feszültségletörés vagy egy vezérlési paraméter változása. Ezért célszerűbb merevségi profilban vagy határfelületben gondolkodni.

A frekvenciamélypont, a frekvenciaváltozás sebessége (RoCoF), a csillapítás, a rövidzárlati arány, a feszültség-stabilitási tartalék és az impedanciaalapú mutatók különböző oldalról mutatják ugyanazt a biztonsági teret.

Az operátornak azonban végső soron néhány nagyon konkrét kérdésre van szüksége.

- ▼ Mennyi tartalék maradt?
- ▼ Mi lehet a következő kritikus esemény?
- ▼ Melyik fizikai korlátot érjük el először?
- ▼ Melyik beavatkozás tolja a biztonságos működés határát a leghatékonyabban kijebbb?

Ráadásul ez a tartalék szintén helyfüggő. Országos szinten megfelelő rendszerállapot mellett is kialakulhatnak dinamikailag gyenge térségek. A jövő rendszerirányítójának ezért a hagyományos teljesítmény-áramlási térkép mellett egyfajta dinamikai képességtérképre is szüksége lehet.

- ▼ Hol van inercia?
- ▼ Hol található gyors aktív teljesítmény?
- ▼ Hol érhető el dinamikus meddőtámasz és zárlati teljesítmény?
- ▼ Mely régiók közelítenek valamely stabilitási határhoz?

A szinkronizált mérési infrastruktúra itt kulcsszerepet kaphat. A PMU-adatok nemcsak azt mutatják meg, mekkora volt egy frekvenciaeltérés. Láthatóvá tehetik azt is, milyen sorrendben jelent meg a frekvenciaeltérés a rendszer különböző pontjain, mely térségek mozognak együtt, hogyan változik a csillapítás, és hogyan tolódik a rendszer dinamikai súlypontja.

Ez az új megfigyelhetőség pedig megteremti a prediktív rendszerüzemeltetés lehetőségét. Ha egy oszcilláció csillapítása romlik, egy lokális frekvenciaválasz eltérése növekszik vagy egy merevségi határhoz folyamatosan közeledünk, akkor a rendszer már az abszolút riasztási küszöb elérése előtt jelezheti, hogy valami kedvezőtlen irányba változik. Ebben a mesterséges intelligencia alkalmazása valódi értéket teremthet. Nem azért, mert megváltoztatja a fizikát. Hanem azért, mert nagy mennyiségű mérési és modeladatból gyorsabban képes mintázatok felismerni, kockázatokat rangsorolni és lehetséges beavatkozásokat összevetni.

Az előrejelzéssel azonban újabb felelősség is megjelenik. Az adatmenedzsment és a modellkövetés rendszerbiztonsági kérdéssé válik. Egy hibás topológiai modell, elavult inverterparaméter vagy rosszul kalibrált algoritmus ugyanúgy félrevezethet, mint egy hibás mérőberendezés. Ez különösen fontos a teljesítményelektronikai eszközöknél, ahol ugyanaz a hardver egy vezérlési vagy alapszoftver-változtatás után más dinamikai viselkedést mutathat.

A modellnek tehát életciklusa van. Validálni kell. Monitorozni kell. És újra kell kalibrálni.

Az ember és az automatizáció közötti határ pedig szükségszerűen időskálafüggő. A nagyon gyors védelmi és szabályozási funkcióknak autonóm módon kell működniük. Az összetettebb operatív döntéseknél viszont az algoritmus legnagyobb értéke sok esetben nem a döntés átvétele, hanem több idő és jobb információ biztosítása a felelős döntéshozónak.

A rendszermerevség gondolata akkor válik igazán hasznossá, ha nem elmélet marad, hanem az üzemirányításban is alkalmazhatóvá válik. Ehhez a különböző stabilitási tartalékokat közös értelmezési keretbe kell rendezni. A lokális impedancia- vagy Nyquist-tartalék a konverter és a hálózat kisjelű kölcsönhatását mutathatja. Az elektromechanikai módusok csillapítása egy másik időskálán ad információt. A nagyjelű zavarokra értelmezett merevségi küszöb az áramkorlátokkal, védelmekkel és módváltásokkal együtt mutathatja meg a tényleges működési határt.

E fölött pedig megjelenik a rezilienciatalalék kérdése: ha a rendszer egy elemet elveszít vagy szigetüzembe kerül, képes-e a szolgáltatást fenntartani, és milyen gyorsan tud helyreállni? Egyetlen univerzális index valószínűleg nem képes mindezt kifejezni. Egyásra épülő tartalékkészletre van szükség.

A mérési oldalon ugyanez a változás figyelhető meg. A hagyományos állapotbecslés azt mutatja meg, milyen kvázi-stacioner állapotban van a rendszer. A dinamikai állapotbecslés ehhez azt teszi hozzá, hogy a gyorsan változó belső állapotok hogyan viselkednek, és milyen irányba fejlődik a zavar. A nagy időfelbontású mérések ezért nem pusztán eseményrekonstrukcióra használhatók. Folyamatosan becsülhető lehet belőlük az oszcillációk csillapítása, a lokális frekvenciaválasz és bizonyos esetekben a változó inerciaeloszlás is.

A kutatási cél itt nem feltétlenül egyetlen „igaz” inerciatérkép elkészítése. Sokkal hasznosabb lehet olyan mérhető indikátorokat kialakítani, amelyek időben jelzik, ha egy térség dinamikailag gyengül.

A prediktív rendszerüzemeltetés ennek természetes folytatása. A mai riasztások jelentős része abszolút küszöbértékekhez kötődik. Ha egy feszültség, áram vagy frekvencia eléri a meghatározott határt, beavatkozás szükséges. A jövőben ennél értékesebb lehet maga a tendencia. Ha a csillapítás folyamatosan romlik, a lokális RoCoF növekszik vagy egy kritikus interfész érzékenysége gyorsan változik, akkor a rendszer még minden hagyományos határértéken belül lehet, miközben a rendelkezésre álló biztonsági tartalék már jelentősen csökkent.

Az előrejelzés (predikció) célja tehát nem a jövő „kitalálása”, hanem a határhoz közeledés felismerése, és ezáltal a rendelkezésre álló reakcióidő növelése.

A rendszerirányítói feladat ebből következően egyre inkább képességmenedzsmentté válik. Nem elegendő tudni, hogy országosan mennyi energiátároló, megújuló termelő vagy szinkrongép üzemel. A kritikus állapotban azt kell tudni, hogy melyik képesség hol, milyen gyorsan, mennyi ideig és milyen fizikai korlát mellett érhető el. És azt is, hogy melyik beavatkozás tolja a legnagyobb mértékben kijebb az aktuális rendszerhatárt.

Ez a gondolkodás a beruházási és az operatív döntéseket is közelebb hozza egymáshoz. Ha ugyanabban a térségben újra és újra ugyanaz a dinamikai hiány jelentkezik, az egy idő után már nem egyszerűen üzemviteli probléma. Fejlesztési jelzés.

A kutatási program ebből viszonylag egyértelműen kirajzolódik. Részletesebben meg kell érteni a rendszer tér-idő dinamikáját. Fel kell tárnai a zavarok terjedési útvonalait és a dinamikailag összetartozó térségeket. Olyan többléptékű modellezési hierarchiára van szükség, amely a modell részletességét mindig a releváns fizikához igazítja. A rendszermerevséget pedig olyan operatív tartalékszempléletté kell továbbfejleszteni, amely a különböző stabilitási korlátokat a döntéshozó számára is értelmezhetővé teszi. Mindezt egyre inkább valós idejű méréseknek és prediktív elemzésnek kell támogatnia.

Hol húzódik tehát a klasszikus rendszerüzemeltetési paradigma határa? Nem egy konkrét inerciaértéknél. Nem a szinkrongenerátorok valamely meghatározott részarányánál. És nem ott, ahol először válik szükségessé az EMT-modellezés. A mélyebb változás abban áll, hogy a rendszer dinamikáját egyre kevésbé tekinthetjük térben homogén, időskáláiban tisztán szétválasztható és néhány aggregált jellemzővel maradéktalanul leírható folyamatnak. A határ ott jelenik meg, ahol az aggregálás már elrejtí az a lokális vagy gyors fizikai folyamatot, amely ténylegesen meghatározza a rendszer biztonságát.

A jövő rendszerirányításának ezért nem teljesen új fizikát kell megtanulnia. Ugyanazt a fizikát kell nagyobb térbeli és időbeli felbontásban látnia. A kérdés egyre kevésbé csak az lesz, hogy stabil-e a rendszer, elegendő-e az inercia vagy megfelelő-e a tartalék. Hozzá kell tenni:

- ▼ Hol stabil?
- ▼ Melyik zavar ellen elegendő a tartalék?
- ▼ Mennyi ideig?
- ▼ Milyen fizikai képesség biztosítja?
- ▼ Hogyan változik mindez, miközben a rendszer közeledik valamely működési határhoz?

Ebben az értelemben az a kijelentés, hogy „a fizika nem tűnik el”, egyáltalán nem technológiakonzervatív állítás. Nem a szinkrongépes világ változatlan megőrzéséről szól. Éppen ellenkezőleg. Arról szól, hogy

minden új technológiát az általa ténylegesen biztosított rendszerképességek alapján kell megértenünk. A *grid-forming* inverter, az akkumulátor, a szinkronkompenzátor, a digitális iker, a PMU vagy a mesterséges intelligencia egészen eltérő módon járulhat hozzá ugyanahhoz a célhoz. A technológiák változhatnak. A szabályozás egyre intelligensebbé válhat. De a fizikai következmények és a döntési felelősség nem tűnnek el.

A kutatás feladata ezért az, hogy láthatóvá tegye a fizikai tartalékokat és korlátokat, megértse a zavarok terjedését, kiválassza a döntéshez szükséges megfelelő modellt és mérési eszközt, és végül választ adjon arra a kérdésre, amely a rendszerirányító számára igazán fontos: milyen beavatkozással tolható kijebb a biztonságos működés határa?

7.3. Hol van a piac koordinációs képességének határa?

A villamosenergia-piac egyik legnagyobb eredménye, hogy egy rendkívül összetett fizikai rendszer működését viszonylag egyszerű gazdasági jelekkel képes koordinálni. A termelőnek nem kell ismernie a rendszer minden fogyasztóját, ahogy a fogyasztónak sem kell tudnia, mely erőmű állítja elő az általa felhasznált energiát. A kereslet, a kínálat, az árak és a kereskedési szabályok együtt olyan decentralizált koordinációs mechanizmust hoznak létre, amely normál körülmények között szereplők ezreinek döntését képes összehangolni.

Ez a mechanizmus azonban olyan villamosenergia-rendszerben alakult ki, ahol maga az a termék, amellyel kereskedtek, viszonylag egyszerűen volt értelmezhető. A klasszikus nagykereskedelmi piacon alapvetően azt kellett eldönteni, hogy ki, mikor és mennyi villamos energiát termeljen. A hálózati korlátok természetesen mindig jelen voltak, a piac mégis nagyrészt abból az absztrakcióból indulhatott ki, hogy egy megawattóra villamos energia gazdasági értelemben közel homogén termék.

Az energiaátmenet egyik kevésbé látványos következménye, hogy ez az egyszerűség fokozatosan eltűnik. A jövő rendszerében nem pusztán energiára lesz szükség, hanem különböző időskálájú és eltérő fizikai tartalmú rugalmassági képességekre: teljesítménynövelésre és -csökkentésre, gyors és lassabb tartalékokra, fogyasztásáthelyezésre, tárolásra, hálózati szűkületekezelésre, feszültség- és meddőteljesítmény-támogatásra. Ezek értéke már aligha írható le egyetlen MW- vagy MWh-adattal. Számít, hogy az erőforrás hol található, mikor áll rendelkezésre, milyen gyorsan aktiválható, mennyi ideig képes fenntartani választát, milyen más kötelezettségekkel rendelkezik, és végül az is, hogy aktiválása milyen következményekkel jár a hálózat fizikai állapotára.

A piac fejlődésének egyik első válasza erre az energia- és tartalékallokáció szorosabb összekapcsolása volt. Egy erőmű ugyanazt a fizikai kapacitást nem tudja korlátlanul egyszerre energiatermelésre és tartalékszolgáltatásra használni. Ha több energiát értékesít, kisebb felfelé irányuló szabályozási tartalékot tud fenntartani. Ha kapacitását tartalék számára köti le, más bevételi lehetőségről mond le. A két termék tehát fizikailag ugyanazon eszköz képességeiért versenyez. Közös allokációjuk ezért nem pusztán piac-szervezési finomítás, hanem közelebb vihet a rendszer egészének optimumához.

Az új erőforrások ezt a problémát tovább bonyolítják. Egy akkumulátornál nemcsak a teljesítmény, hanem az energiatartalom és a töltöttségi állapot is korlátot jelent. Egy rugalmas fogyasztónál pedig sokszor nem az az érdekes, hogy egy adott negyedórán csökkenthető-e a terhelés, hanem az is, hogy a kieső energia-

igény mikor és milyen formában jelenik meg később. A piac csak akkor tudja ezeket az eszközöket megfelelően koordinálni, ha ajánlati nyelve legalább a döntéshez szükséges fizikai képességeket képes kifejezni.

Itt azonban rögtön megjelenik egy új határ. Ha túl kevés fizikai korlátot veszünk figyelembe, gazdaságilag kedvező, de fizikailag végrehajthatatlan eredmény születhet. Ha viszont minden egyes berendezés minden állapotát egyetlen klíringben próbáljuk részletesen reprezentálni, maga a piac válhat kezelhetetlenné. A piacdizájn ezért ugyanúgy absztrakciós probléma, mint a modellezés: mi a legegyszerűbb leírás, amely még megőrzi a döntéshez szükséges fizikát?

Ez az ajánlati struktúrák szintjén válik igazán kézzelfoghatóvá. Egyetlen ár–mennyiség pár kevés információt hordoz az erőforrás minimumteljesítményéről, felfutási korlátjáról, energiartartalmáról vagy működési feltételeiről. Az összetettebb ajánlatok ezeket részben képesek megjeleníteni, de minden új korlát növeli a számítási és szabályozási komplexitást. A jó piacdizájn ezért nem a fizikai rendszer teljes másolatát próbálja beépíteni a klíring algoritmusába. Azokat a korlátokat kell kiválasztania, amelyek hiányában a gazdasági optimum rendszeresen félrevezetővé válna.

Ugyanez a probléma jelenik meg a határkeresztező kereskedelemben is. A tartalékot nem feltétlenül abban az országban kell beszerezni, ahol végül aktiválják. Az összekapcsolt európai rendszer pedig jelentős értéket teremt az erőforrások megosztásával. Ehhez azonban ugyanarra az átviteli kapacitásra van szükség, amelyet az energiakereskedelem is használ. Ha azt teljes egészében az energiapiac számára kötjük le, előfordulhat, hogy a távoli tartalék kritikus helyzetben már nem elérhető. Ha viszont túl sok kapacitást tartunk fenn előre tartalékaktiválás céljára, értékes kereskedelmi lehetőségről mondunk le.

Az elosztóhálózatokon mindez még látványosabban jelenik meg. A nagykereskedelmi piac térbeli felbontása nagyságrendekkel durvább, mint maga a fizikai hálózat. Ugyanez az energiaár érvényesülhet milliányi fogyasztási és termelési ponton, miközben egy lokális szűkület akár egyetlen transzformátorkörzetre vagy leágazásra korlátozódhat. Az országos árjelzés természeténél fogva alig képes kifejezni, hogy melyik inverter, akkumulátor vagy fogyasztó viselkedésének megváltoztatása teremtené éppen azon a helyen értéket. Innen vezet el a gondolat a lokális rugalmassághoz.

Egy DSO számára nem feltétlenül az az egyetlen lehetőség, hogy minden rövid ideig jelentkező szűkületre azonnal új infrastruktúrát építsen. Bizonyos esetekben szolgáltatást vásárolhat azoktól az erőforrásoktól, amelyek éppen a megfelelő hálózati helyen képesek módosítani termelésüket vagy fogyasztásukat. Ehhez ráadásul nem szükségesek feltétlenül új berendezések. Meglévő villanybojler, inverterek, akkumulátorok vagy más rugalmas fogyasztások is hálózati szolgáltatássá szervezhetők, ha megfelelő mérés, állapotbecslés, kommunikáció és vezérlés kapcsolja össze őket a fizikai problémával.

Szükség van termékdefinícióra, aktiválási szabályokra, mérésre, elszámolásra és gazdasági ösztönzőre is. Jól látható ez például a háztartási napelemes inverterek esetében. Sok telepített eszköz műszakilag képes hatásos- vagy meddőteljesítmény-szabályozásra, ettől azonban még nem válik automatikusan hálózati szolgáltatássá. Meg kell határozni, ki vezérelheti, milyen határok között, ki felel az aktiválás következményeiért, ki kompenzálja a tulajdonost, és hogyan igazolható utólag a teljesítés. A technológiai potenciál és a mobilizálható rendszerképesség között tehát egy teljes intézményi és piaci réteg helyezkedik el. A piac nem teremti meg a fizikai rugalmasságot, de mobilizálhatóvá teszi azt.

Az ár meghatározása sem magától értetődő. Mennyit ér, ha egy fogyasztó egy órával későbbre helyezi át energiaigényét? Ki fizesse meg azt a szolgáltatást, amely egy konkrét hálózati beruházást évekkel elhalaszt? A lokális rugalmassági piacok és a dinamikus hálózathasználati díjak arra tesznek kísérletet, hogy a gazdasági döntést közelebb vigyék ahhoz a viselkedéshez, amely fizikailag is kedvező a rendszer számára.

Minden új termék és lokációs árjelzés növeli a piac információtartalmát, egyben azonban növeli annak komplexitását is. Ha minden transzformátorkörzetre, időszakra, irányra és szolgáltatásra külön terméket hozunk létre, fizikailag egyre pontosabb, gazdaságilag azonban egyre töredezettebb piacokhoz jutunk. Csökkenhet a likviditás, nőhet a piaci erő jelentősége, és maga a részvétel is bonyolultabbá válhat. A rugalmassági piac ezért sajátos kompromisszumot hordoz: minél pontosabban próbáljuk meg leképezni a fizikai hálózatot, annál kisebb piacokra bontjuk azt. A kutatási kérdés így az, hogy milyen térbeli és időbeli felbontás mellett marad még működőképes a piaci koordináció.

Különösen érdekes ebből a szempontból a rugalmasság és a hálózatfejlesztés kapcsolata. Egy évente mindössze néhány órán keresztül fennálló vezetéki vagy transzformátor-szűkület esetében olcsóbb lehet rövid ideig rugalmasságot aktiválni, mint azonnal új infrastruktúrát építeni. Ha azonban az aktiválások gyakorisága, időtartama és költsége folyamatosan növekszik, elérkezhet az a pont, ahol a rugalmasság már nem ésszerűen halasztja a beruházást, hanem csupán elfedi annak tartós szükségességét. A piac ezért egyben információforrás is a hosszú távú hálózattervezés számára. Az ismétlődő, drága lokális aktiválások arra utalhatnak, hogy egy korábban átmenetinek gondolt fizikai korlát strukturálissá vált.

Ugyanez a kapcsolat jelenik meg a költségallokációban. Ha a rugalmasság egy konkrét hálózati beruházást helyettesít vagy halaszt, akkor értékének egy része az elkerült vagy későbbre tolt beruházási költségből származik. Ha valamely helyi tranzakció tehermentesíti a hálózatot, pozitív rendszerhatást hoz létre; ha viszont növeli a szűkületet, többletköltséget okozhat. A dinamikus hálózathasználati jelek és a lokális piacok ezért végső soron azt próbálják elérni, hogy a gazdasági ösztönző legalább részben tükrözze a fizikai rendszerben létrehozott hatást.

A helyi piacok fejlődésével egy új probléma is megjelenik: ugyanaz az eszköz egyszerre több rendszer számára lehet értékes. Egy elosztóhálózatra csatlakozó akkumulátor energiával kereskedhet, tartalékokat kínálhat a TSO-nak, lokális szűkületkezelést biztosíthat a DSO számára, és közben tulajdonosa saját fogyasztását vagy termelését is optimalizálhatja. Ez a value stacking egyik legnagyobb lehetősége, de egyben fontos fizikai korlátja is. A többféle szolgáltatás tehát csak akkor teremti valódi értékét, ha időben és fizikailag összeegyeztethető.

Ezzel elérkezik a kérdés egyik legfontosabb határterületéhez: mi történik akkor, amikor a piaci optimum és a fizikai rendszer különböző szintjeinek optima eltér egymástól? A piaci klíring ezért nem minden esetben tekinthető a döntési folyamat végének. A fizikai aktiválás előtt azt is ellenőrizni kell, hogy az eredmény az érintett hálózatokon valóban végrehajtható-e.

Ezt jól szemlélteti a közlekedési lámpa vagyis a Traffic Light Scheme logikája. Zöld állapotban az aktiválás piaci és hálózati szempontból egyaránt végrehajtható. Piros állapotban elfogadhatatlan hálózati helyzetet hozna létre, ezért blokkolni kell. A legérdekesebb azonban a kettő közötti tartomány. Sárga állapotban az aktiválás potenciálisan hasznos és talán fizikailag is megvalósítható, de már nem automatikusan. További hálózati validációra, korlátozásra, másik ajánlat kiválasztására, újraoptimalizálásra vagy TSO–DSO egyeztetésre lehet szükség. Az eljárás neve lehet előminősítés, *bid validation*, feltételes jóváhagyás vagy

közös klíring. A klíring és az aktiválás közé ezzel önálló koordinációs réteg ékelődik. A prioritás ráadásul nem mindig rögzíthető egyszer és mindenkorra. A TSO automatikus elsőbbsége helyi hálózati problémát okozhat, a DSO feltétlen prioritása viszont kritikus rendszerszintű erőforrást vonhat el. Sok esetben ezért állapotfüggő döntésre van szükség, ami lényegesen nagyobb adat- és koordinációs igénnyel jár.

Mindez egyben felelősségi kérdés is. Ki viseli a következményt, ha egy rendszerszinten indokolt aktiválás helyi problémát okoz? Ki dönt, ha ugyanarra az erőforrásra két rendszerüzemeltetőnek egyszerre van szüksége? Mekkora információt kell az aggregátornak megosztania ahhoz, hogy a hálózati hatás ellenőrizhető legyen anélkül, hogy üzletileg indokolatlanul részletes adatokat kellene átadnia? A sárga állapotok megmutatják: a jövő rugalmassági rendszerében a konfliktus nem hiba, hanem a normál üzem része. Ehhez előre meghatározott eljárás, közös fogalomrendszer, világos felelősség és utólag auditálható döntési logika szükséges.

Míndeközben a piac időben is egyre közelebb kerül a valós idejű üzemeltetéshez. A másnapi, napon belüli és kiegyenlítő piacok egyre közelebb viszik a kereskedelmi döntést a fizikai szállításhoz, miközben egyre kevesebb idő marad a hálózati állapot újraszámítására és az esetleges konfliktusok feloldására. Előrejelző algoritmusok azonosíthatják a várható szűkületeket, automatikus szűrés zárhatja ki a fizikailag nyilvánvalóan nem megfelelő ajánlatokat, a döntéstámogató rendszerek pedig több lehetséges beavatkozást értékelhetnek. A klasszikus piac és a fizikai hálózat közötti határt tovább oldja az is, hogy maga a rendelkezésre álló hálózati kapacitás sem feltétlenül állandó. Hagyományos klíring esetén a hálózati kapacitás többnyire adott bemenet. Állapotfüggő terhelhetőség mellett azonban a piac számára rendelkezésre álló fizikai tér az időjárással és a hálózat állapotával együtt változik.

Egy ilyen visszacsatolt rendszerben a piaci algoritmus és a hálózati modell kapcsolata önmagában is kutatási kérdéssé válik. Nem biztos, hogy minden egyes klíringhez teljes hálózati újraszámítás szükséges. Azt azonban tudnunk kell, hogy mikor elegendő egy egyszerűbb érzékenységi modell, mikor van szükség részletes biztonsági ellenőrzésre, és milyen gyakran kell a fizikai korlátokat frissíteni. A korábbi modellezési alapelv itt gazdasági formában tér vissza: a döntéshez szükséges fizikai részletességet kell megőrizni – nem többet, de nem is kevesebbet.

Ezzel gondolati értelemben is fontos ponthoz jutunk. A fizikai rendszer állapota közvetlenül módosítja a piac megoldásterét. A klíring viszont új energiaáramlásokat hoz létre, amelyek visszahatnak a következő hálózati állapotra. A jövő villamosenergia-piaca egyre inkább a rendszerirányítás egyik koordinációs rétegévé válik. Ez nem azt jelenti, hogy a piac átveszi a rendszerirányító feladatát. Sokkal inkább azt, hogy a fizikai rendszer működéséhez szükséges viselkedés egyre nagyobb részét árakon, termékeken és szerződéses kötelezettségeken keresztül próbáljuk létrehozni. A rendszerirányító nem egyenként kívánja vezérelni a háztartási akkumulátorokat, elektromos járműveket vagy invertereket. Olyan ösztönzőket és szolgáltatási kereteket hoz létre, amelyekre aggregátorok és más szereplők reagálnak. Megfelelő piaci és műszaki koordináció mellett ezek a decentralizált döntések a rendszerbiztonsági célokkal azonos irányba terelhetők.

Éppen itt jelenik meg azonban a piac koordinációs képességének határa is. Az ár rendkívül hatékony jel szűkös erőforrások allokációjára, de nem feltétlenül elég gyors egy milliszekundumos vagy másodperces beavatkozáshoz. A klíring figyelembe veheti az ismert hálózati korlátokat, de nem képes kezelni azt, amit a modell nem lát. A piac tehát nem a fizika fölött áll. A fizikai rendszer megengedett működési tartományán belül koordinál. Ez egyben feloldja a „piac vagy közvetlen irányítás” hamis ellentétét is. Nem kell minden hálózati problémát központi utasítással megoldani, ugyanakkor nem célszerű minden rendszer-

biztonsági funkcióból piacosítható terméket sem létrehozni. A fizikai biztonsági minimum és a gazdaságilag mozgósítható rugalmasság két külön réteget jelent. A jövő ezért valószínűleg nem egyetlen, mindent magába foglaló „szuperpiac” felé vezet. Inkább egymásra épülő koordinációs architektúra rajzolódik ki, amelyben energia-, tartalék- és lokális rugalmassági piacok, hálózati előminősítés, TSO–DSO együttműködés, automatikus fizikai korlátok és közvetlen rendszerirányítói beavatkozások működnek együtt, eltérő időskálákon.

A megfelelő koordinációs mechanizmus erősen időskálafüggő. Napos vagy órás horizonton az árjelzésnek még van ideje hatni, a szereplők újraoptimalizálhatnak, a rendszerirányító pedig korrigálhat. Perces tartományban egyre fontosabbá válik az automatizált előminősítés és a gyors aktiválás. Másodperces vagy annál rövidebb folyamatok esetén a piac legfeljebb előzetesen szerződhet a szükséges képességet; magát a választ már közvetlen szabályozásnak kell végrehajtania. A piac koordinációs határa tehát részben időskálahatár.

Hasonlóan fontos a megbízhatóság kérdése. A teljesítési adatokból idővel megbízhatósági profil épülhet. Mely erőforrástípusok milyen körülmények között teljesítenek? Milyen gyakran korlátozza őket a lokális hálózati állapot? Mennyi pótló kapacitást kell fenntartani a bizonytalan válasz miatt? Ezek az információk visszacsatolhatók nemcsak a piacdizájnba, hanem a hosszú távú hálózattervezésbe is.

A kutatási program ebből több, egymással szorosan összefüggő feladatot jelöl ki. Olyan minimális termék- és ajánlati struktúrákra van szükség, amelyek a lokációt, a reakcióidőt, az energiatartalmat, a tartási időt és a megbízhatóságot kellően jól reprezentálják, miközben még működő és likvid piacot tesznek lehetővé. Kezelní kell, hogy ugyanaz az eszköz egyszerre több piacon nyújthat szolgáltatást, miközben fizikai képességei természetesen nem sokszorozhatók meg. Meg kell határozni, milyen térbeli felbontásig érdemes piaci árjelzést létrehozni, és hol hatékonyabb a közvetlen hálózati szabály vagy rendszerüzemeltetői koordináció. A TSO–DSO konfliktuskezelést pedig rendkívüli helyzet helyett normál üzemi folyamattá kell tenni, világos döntési jogosultságokkal és auditálható információs háttérrel. Végül a dinamikus hálózati kapacitást és a valós idejű állapotbecslést is egyre közvetlenebbül össze kell kapcsolni a piaci allokációval.

A kutatási határ ezért talán így fogalmazható meg: meddig képes az ár és a piaci optimalizáció koordinálni a villamosenergia-rendszer működését, és honnantól van szükség közvetlen technikai korlátra, rendszerirányítói koordinációra vagy vétóra?

Erre nincs jó általános válasz. Függ az időskálától, a lokációtól, a fizikai kockázattól, a piac likviditásától, a rendelkezésre álló információ minőségétől és attól is, mennyire visszafordítható egy hibás döntés. Egy másnapi kereskedelmi pozíciónál még jelentős tér marad a korrekcióra. Egy valós idejű védelmi működésnél már nincs. A kettő között azonban egyre szélesebb tartományt foglal el a piac, az automatizálás és az operátori koordináció közös világa.

A villamosenergia-piaci termék végső soron nem más, mint ígéret egy jövőbeni fizikai viselkedésre. A piac feladata ennek az ígéretnek az értékelése és allokálása, a műszaki rendszeré annak eldöntése, hogy az adott helyen és időben valóban teljesíthető-e, a szabályozásé pedig annak biztosítása, hogy a teljesítés és a hozzá kapcsolódó felelősség ellenőrizhető maradjon. A jövő piacdizájnjának egyik legfontosabb feladata éppen e három világ összekapcsolása lesz: úgy kell kialakítani a gazdasági ösztönzőket, hogy azok a fizikailag szükséges viselkedést hozzák létre – a megfelelő helyen, a megfelelő időben és a szükséges időtartamra.

7.4. Három határ, egy közös kutatási program

Az előző három alfejezet látszólag három különböző határt vizsgált, valójában azonban ugyanannak a problémának három eltérő idő- és döntési léptékét írta le. A közös kérdés így fogalmazható meg: milyen rendszerképességre van szükségünk, hol kell annak rendelkezésre állnia, mikor kell hozzáférnünk, mennyi ideig kell fennmaradnia, és végül milyen bizonyossággal számíthatunk rá?

A hálózattervezés ezt évtizedes időtávon kérdezi. A rendszerüzemeltetés másodpercek, percek és órák világában vizsgálja, hogy a tervezés során feltételezett képességek az adott pillanatban fizikailag valóban rendelkezésre állnak-e. A piac pedig arra tesz kísérletet, hogy a meglévő képességeket megfelelő gazdasági ösztönzőkkel a szükséges helyen és időben mozgósíthatóvá tegye. A három terület tehát ugyanazt a rendszert írja le, csak más nyelven: az egyik infrastruktúrában, a másik dinamikai és üzemi tartalékban, a harmadik eladható szolgáltatásban gondolkodik.

A három nézőpont közötti kapcsolat egyfajta képességláncként is értelmezhető. A hosszú távú tervezés feltételezi, hogy valamely jövőbeni képesség rendelkezésre áll majd. Az üzemeltetésnek igazolnia kell, hogy ez a képesség az adott pillanatban fizikailag ténylegesen elérhető. A piacnak vagy más koordinációs mechanizmusnak pedig biztosítania kell, hogy szükség esetén valóban mozgósítható legyen. Ha a lánc bármelyik eleme hiányzik, a névlegesen létező erőforrás még nem tekinthető teljes értékű rendszerképességnek.

Egy akkumulátor például műszakilag alkalmas lehet valamely szolgáltatás nyújtására. Ha azonban nincs olyan szerződéses vagy piaci kapcsolat, amelyen keresztül a rendszerirányító hozzáférhet, vagy a helyi elosztóhálózat aktuális állapota nem teszi lehetővé az aktiválását, akkor rendszertervezési szempontból nem kezelhető ugyanúgy, mint egy garantáltan rendelkezésre álló erőforrás. A műszaki potenciál és a tényleges rendszerképesség között tehát jelentős különbség lehet.

Ez a megközelítés a helyettesíthetőség kérdését is pontosabban teszi fel. A fizikai infrastruktúra, az intelligensebb üzemeltetés és a piaci rugalmasság csak addig képes egymást helyettesíteni, amíg ugyanazt a szükséges rendszerfunkciót hasonló rendelkezésre állással biztosítják. Ha a rugalmasság túl bizonytalan, túl rövid ideig tartható fenn, vagy egyszerűen nem a megfelelő hálózati helyen található, akkor nem valódi helyettesítője a fizikai infrastruktúrának. Ha viszont egy új vezeték öt évig nem valósítható meg, egy átmeneti rugalmassági megoldás értéke éppen abban lehet, hogy ezt az időszakot képes áthidalni.

A három optimumot aligha érdemes külön-külön keresni. Egy piaci döntés megváltoztathatja a teljesítményáramlásokat és a rendszer dinamikai állapotát. Egy új hálózati kapcsolat módosítja a későbbi piaci lehetőségeket és a stabilitási szolgáltatások értékét. Egy új üzemeltetési korlát pedig hálózatfejlesztési vagy rugalmassági igényt teremthet. A rendszer tehát visszacsatolt. Kutatásaink feladata ezért nem egyetlen, mindent átfogó modell létrehozása, hanem annak meghatározása, hogy mely információkat kell az egyes időskálák között átadni. Mit kell a hosszú távú tervezés eredményeiből az operatív modellekbe vinni? Mit kell a mérésekből és üzemzavari tapasztalatokból visszaadni a tervezésnek? És mely fizikai korlátokat kell a piaci döntésekben explicit módon megjeleníteni?

A következő közös probléma ebből szinte magától adódik: a bizonytalanság kezelése. A tervezett vezeték nem biztos, hogy a tervezett évben megépül. A névlegesen rendelkezésre álló rugalmasság nem biztos, hogy éppen a kritikus pillanatban érhető el. A stabilitási modell nem feltétlenül reprezentál minden aktuális invertervezérlést megfelelő pontossággal. A piacon elfogadott ajánlat pedig nem biztos, hogy minden háló-

zati állapotban fizikailag teljesíthető. A jövő döntési rendszereiben ezért a költség mellett annak is explicit értéket kell kapnia, hogy milyen bizonyossággal támaszkodhatunk az adott képességre.

A közös kutatási cél ennek megfelelően egy tanuló döntési architektúra kialakítása. Egy olyan rendszeré, amely folyamatosan összeveti saját feltételezéseit a valósággal. A projektmegvalósításokból tanul a beruházási idők bizonytalanságáról, a mérésekből a rendszer tényleges dinamikai viselkedéséről, a rugalmassági aktiválásokból annak valós rendelkezésre állásáról, az üzemzavarokból pedig arról, hogy mely pontokon bizonyult a rendszer sérülékenyebbnek annál, mint amit a modellek alapján gondoltunk. A folyamat egyszerűen leírható: terveztünk – megvalósítottunk vagy aktiváltunk – megmértük – tanultunk – újraterveztünk. A lényeg azonban éppen az, hogy az utolsó lépés után ne ugyanoda térjünk vissza.

A 2050-re készülő villamosenergia-rendszer akkor lesz valóban reziliens, ha nemcsak valamely ma elképzelt jövőben képes jól működni, hanem felismeri a változást, tanul belőle, és a tanulás után még marad elegendő mozgástere ahhoz, hogy jól reagáljon a változásokra.

8. Epilógus

A vihar elvonult. Az éjszaka folyamán a rendszer több ponton is megközelítette működési határait, de nem lépte át egyiket sem.

Évekkel korábban megerősítettek egy hálózati kapcsolatot, amely normál üzemben csak ritkán bizonyult igazán szükségesnek. Egy veszélyeztetett térség közelében tartalék oszlopszerkezeteket helyeztek el. Amikor az egyik meteorológiai adatforrás elérhetetlenné vált, a dinamikus terhelhetőségi rendszer automatikusan konzervatívabb üzemállapotra váltott.

E döntések egyike sem oldotta meg önmagában az éjszaka problémáját. Nem is ez volt a feladatuk. Mozgásteret hagytak.

Maradt egy vezetékek, amelyre át lehetett terhelni. Maradt egy tartalék, amelyhez hozzá lehetett nyúlni. Maradt egy biztonságosabb üzemállapot, amikor a pontos információ már nem állt rendelkezésre.

Vagyis maradt valami, amiből választani lehetett.



Egy másik hajnalon a központi adatplatform egy része még mindig nem működött. A rendszer kevesebbet látott saját magából. De nem vált teljesen vakká.

A kritikus mérések helyben továbbra is rendelkezésre álltak. A helyi automatikák központi kapcsolat nélkül is működni tudtak. Az átviteli és elosztói irányítás csökkentett adattartalommal, egyszerűbb modellekkel, de tovább folytatta az együttműködést.

A rendszer néhány órára kevésbé lett hatékony. Nagyobb tartalékokkal működött. Óvatosabban. Kevesebb automatizált optimalizálással.

Cserébe ismét pontosan tudni lehetett, mi az, ami biztosan működik.

Ez első látásra visszalépésnek tűnhet. Valójában azonban éppen ez a digitális reziliencia egyik legfontosabb próbája. Nem az, hogy normál üzemben mennyire intelligens a rendszer. Hanem az, hogy mi marad belőle akkor, amikor az intelligencia egy része átmenetileg eltűnik.

Amikor később a digitális rendszer helyreállt, senki nem beszélt arról, hogy az ember vagy a gép győzött. Nem is ez volt a kérdés. Azt vizsgálták, mely funkciók maradtak működőképesek, amikor más funkciók kiestek. És mit kell megváltoztatni ahhoz, hogy legközelebb még több maradjon.



A harmadik világunkban a hibás transzformátort kilenc nap elteltével sikerült kicserélni. A tartalékberendezés tizenegy éve állt a raktárban. Normál üzemben semmire nem használták. Évről évre felmerült, hogy fölösleges. Drága volt tárolni. Helyet foglalt. A könyvelésben sem mutatott különösebb értéket. Mégsem adták el.

A csere így sem volt egyszerű. Módosítani kellett a csatlakozásokat, át kellett paraméterezni a védelmeket, és egy vezérlőmodult végül olyan beszállítótól szereztek be, akivel korábban soha nem dolgoztak. Nem volt tökéletes megoldás. De volt megoldás. A rendszer helyreállt. Nem azért, mert minden lehetséges meghibásodásra külön tartalékberendezés állt rendelkezésre. Hanem azért, mert nem csak egyetlen technológia, egyetlen beszállító és egyetlen helyreállítási út létezett.

Ez fontos különbség. A reziliencia ugyanis nem feltétlenül azt jelenti, hogy mindenből kettő van. Sokkal inkább azt, hogy egyetlen kiesés után nem fogy el az összes lehetőségünk.



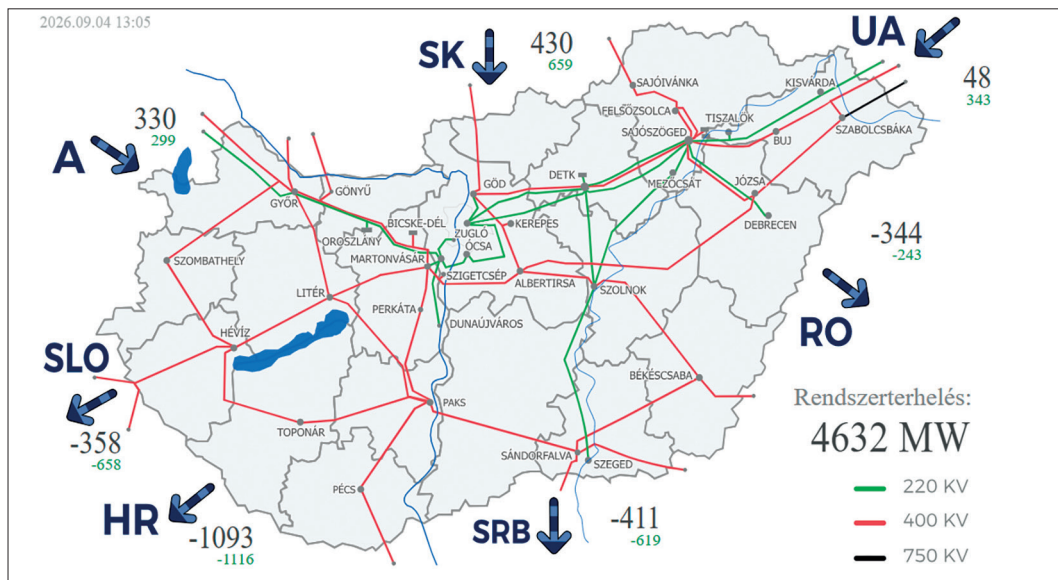
A reggeli műszak átvette a vezénylőtermet. Az éjszakai szolgálat röviden felsorolta a nyitott kérdéseket. Egy bizonytalan mérés. Egy átvizsgálandó berendezés. Egy utólag ellenőrizendő flexibilitási aktiválás. Néhány modell, amelyet újra kellett futtatni. Semmi különös.

A falon Magyarország hálózata ismét nagyrészt zölden világított. Valahol elindultak az első villamosok. Bekapcsoltak a gyárak. A hőszivattyúk. A kávéfőzők. A legtöbb ember semmit nem tudott arról, mi történt az éjszaka folyamán.

Talán éppen ez volt a rendszer feladata. Nem az, hogy minden hibát megakadályozzon. Nem az, hogy minden lehetséges jövőt előre pontosan ismerjen. És nem is az, hogy minden lehetséges kockázatra egyetlen tökéletes választ találjon. Hanem az, hogy amikor a bizonytalanság egyszer valódi eseménnyé válik, ne csak egyetlen válasz maradjon.

Legyen fizikai tartalék. Legyen információ. Legyen egyszerűbb üzem mód. Legyen másik beszállító. Legyen ember, aki érti, mi történik. És mindenekelőtt maradjon döntési lehetőség.

Mert végül talán ez a reziliencia legegyszerűbb értelmezése. Nem az, hogy semmi nem romlik el. Hanem az, hogy amikor valami elromlik, még mindig van mit tenni.



11. ábra. A magyar hálózat (Forrás: MAVIR)

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönettel tartoznak a **Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak** a **Nemzeti Kutatási Kiválósági Program** (ADVANCED 150405) keretében nyújtott támogatásért.

Vokony István köszöni a **Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíjának** (BO/50/24) támogatását.

Hartmann Bálint köszöni a **Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíjának** (BO/131/23) támogatását.

Köszönetünket fejezzük ki a **MAVIR Zrt.**-nek és munkatársainak az évek során kialakult szakmai együttműködésért, a közös gondolkodásért és az inspiráló szakmai párbeszéddekért. A közösen végzett munka és a villamosenergia-rendszer jelenéről és jövőjéről folytatott eszmecserék jelentősen hozzájárultak e könyv gondolatvilágának formálódásához.

Hálásak vagyunk az **Energiastratégia Intézetnek** (ESI) és munkatársainak a közös gondolkodásért, az értékes szakmai párbeszéddekért és az új nézőpontokért. Az energetika jövőjéről, kihívásairól és lehetséges fejlődési irányairól folytatott eszmecserék fontos inspirációt adtak e könyv megszületéséhez.

Felhasznált és ajánlott irodalom

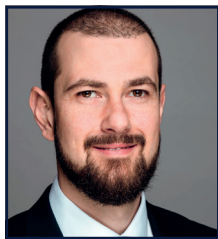
Európai Parlament és a Tanács (EU) 2024/1252 rendelete (2024. április 11.) a kritikus fontosságú nyersanyagokkal való biztonságos és fenntartható ellátást biztosító keret létrehozásáról és a 168/2013/EU, az (EU) 2018/858, az (EU) 2018/1724 és az (EU) 2019/1020 rendelet módosításáról URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX:32024R1252>

Hartmann, B., Turóczy, B. Á., Sörös, P., Vokony, I. (megjelenés alatt) Institutional drift in power system planning. Implementing Successful Innovation in distribution Networks. CIRED 2026 Workshop. 1551.

Vokony István – Hartmann Bálint (szerk.) (2025) A rendszer, amely nem tudta, hogy meg kell újulnia. Magyar Elektrotechnikai Egyesület, Budapest.

Rövidítésjegyzék

Rövidítés	Magyar	Angol
ACCC	kompozitmagos alumíniumsodrony	Aluminium Conductor Composite Core
BESS	akkumulátoros energiatároló rendszer	Battery Energy Storage System
DC	egyenáram	direct current
DLR	dinamikus távvezeték-terhelhetőség	Dynamic Line Rating
DSO	elosztói engedélyes	Distribution System Operator
EMT	elektromágneses tranziens	Electromagnetic Transient
ENTSO-E	Európai Átviteli Rendszerirányítók Hálózata	European Network of Transmission System Operators for Electricity
FACT	rugalmas váltakozó áramú átvitel	Flexible Alternating Current Transmission
HVDC	nagyfeszültségű egyenáramú átvitel	High-Voltage Direct Current
LFP	lítium-vas-foszfát [akkumulátor]	Lithium-Iron-Phosphate [battery]
MEKH	Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal	Hungarian Energy and Public Utility Regulatory Authority
MI	mesterséges intelligencia	Artificial Intelligence (AI)
NMC	lítium-nikkel-mangán-kobalt-oxid [akkumulátor]	lithium-Nickel-Manganese-Cobalt-oxide [battery]
PLL	fáziszárt hurok	Phase Locked Loop
PMU	fázisszögmérő egység	Phasor Measurement Unit
RCC	Regionális Koordinációs Központ	Regional Cooperation Council
RMS	effektív érték	Root Mean Square
RRT	rendszer merevségi küszöb	Rigidity Response Threshold
RoCoF	frekvenciaváltozás sebessége	Rate of Change of Frequency
SNG	szintetikus metán	Synthetic Natural Gas
TSO	átviteli hálózati engedélyes	Transmission System Operator



Batta Gergő okleveles gépészmérnök és energiatermelési szakmérnök diplomáit a BME-n szerezte. 2008-ban a villamosenergia-piac teljes liberalizációjának befejezésekor csatlakozott a MAVIR ZRt.-hez gyakornokként, ahol később munkatárs majd főmunkatárs lett. Részt vett több nemzetközi projektben és munkacsoportban, és tagja volt annak az ENTSO-E munkacsoportnak, amely a villamos energia kiegyenlítő szabályozására vonatkozó iránymutatást (*Electricity Balancing Guideline*) készítette. 2015-ben csatlakozott az Energiabörze Kft.-hez kereskedelmi vezetőként, majd 2016-tól cégvezetőként irányította a vállalatot. Ugyanebben az évben a Magyar Energiakereskedők Szövetsége (MEKSZ) Villamos Energia Bizottságának elnökévé választották, 2019-től pedig a MEKSZ elnökségének tagja lett. 2020 végén visszatért a MAVIR ZRt.-hez, ahol a rendszerirányítási- és piacműködtetési igazgatói pozíciót töltötte be. Itt 2021. szeptemberétől a vállalat operatív vezérigazgató-helyettesévé nevezték ki. 2024. június 28-tól megbízott vezérigazgatóként vezette a MAVIR ZRt.-t, 2025. január 1-jéig. Munkája elismeréseként Magyar Érdemrend Lovagkereszt kitüntetésben részesült.



Decsi Gábor a MAVIR Zrt. Országos Diszpécser Szolgálat képzési üzemvezetője, korábban üzemirányítási üzemvezetője volt. Aktívan részt vett a magyar átviteli hálózat egyközpontú távkezelésének megvalósításában, illetve az EMS/SCADA rendszer megvalósításában. Rendszeresen tartott szakmai előadásokat hálózatbiztonsági és rendszerirányítási témákban. Nyugdíjba vonulásáig a MAVIR képviselője volt az ENTSO-E Kontinentális-Európa Koordinált Üzemviteli Alcsoportjában. 2022-ben kiemelkedő szakmai munkájáért Miniszteri Elismerő Oklevélben részesült.



Hartmann Bálint 2008-ban végzett okleveles villamosmérnökként a BME-n. 2013-ban szerzett tudományos fokozatot, 2022-ben habilitált. Jelenleg a Villamos Energetika Tanszék tudományos főmunkatársa, a BME FASTER Kutatócsoport társalapítója. Témavezetőként 45 BSc szakdolgozat és 30 MSc diplomaterv konzulense, négy doktorandusza szerzett tudományos fokozatot. Kutatási eredményeit több mint 200 közleményben publikálta. Elnyerte az MTA Lendület (2019) és Bolyai János (2023) ösztöndíját. Munkáját az MTA Akadémiai Ifjúsági Díjjal (2019), a MEE Déri- és Bláthy díjjal (2019, 2026), a Pro Progressio Alapítvány TDK Oktatói Díjjal (2022) ismerte el.



Juhász Kristóf Péter a BME-n szerzett energetikai mérnök BSc és villamosmérnök MSc diplomát. Jelenleg a Villamos Energetika Tanszék PhD hallgatója. A F4STER – Future 4 Zrt.-nél mérnök-tanácsadóként dolgozik. Számos publikáció szerzője a villamosenergia-rendszerek stabilitása és a rendszerinercia vizsgálata területén.



Péter Gábor Mihály a BME-n villamosmérnökként végzett 1993-ban, kiegészítve minőségirányítási és MBA diplomákkal. Több mint 30 éves tapasztalattal bír az elosztóhálózatok területén. Jelenleg az E.ON Észak-Dunántúli Áramhálózati Zrt.-nél dolgozik, ahol hálózati rugalmassági és innovációs projektek vezetéséért felel. Részt vett a Flex.on rugalmassági platform fejlesztésében és nemzetközi publikációk szerzője.



Sörös Milán Attila 2019-ben végzett okleveles villamosmérnökként a BME-n. Doktori fokozatot is itt szerzett 2024-ben, értekezésének témája az akkumulátorok öregedésének vizsgálata. Két évet töltött az aacheni RWTH egyetemen az ISEA-CARL Intézetben posztdoktor kutatóként, ahol szintén az akkumulátoros energiatárolók témakörében kutatott. Jelenleg az BME Villamos Energetika Tanszéken dolgozik egyetemi adjunktusként. Számos tudományos közlemény szerzője, szakterülete a lítiumion- és nátrium-kén akkumulátorok.



Sörös Péter Márk a BME-n szerzett villamosmérnöki MSc oklevelet 2013-ben. 2017 óta az MVM Energetika Zrt.-ben dolgozik, stratégiai, üzleti elemzési és árszabályozási szakterületeken. Diplomája megszerzése óta folyamatosan oktat a BME-n. Jelenleg rész munkaidős oktató a BME Villamos Energetika Tanszékén. Szakterülete a villamosenergia-piacok, kapcsolódó struktúrák, algoritmusok, alkalmazások fejlesztése, valamint az energiapiaci reguláció. Részt vesz nemzetközi K+F+I projektekben mint a szakmai munka koordinátora és üzleti megoldások fejlesztője.



Táczai István 2016-ban végzett okleveles villamosmérnökként a BME-n. 2023-ban szerzett tudományos fokozatot a Kooperatív Doktori Program keretében. Jelenleg a Villamos Energetika Tanszék adjunktusa és az E.ON hálózati innovációs szakterületének vezetője. Kutatási területei a megújuló energiaforrások rendszerintegrációja, a stabilitásszámítás és az elosztóhálózati innovatív megoldások. Több, mint 80 tudományos közleményben publikálta eredményeit. Munkáját többek között Junior Prima Díjjal (2025) és Pro Scientia Aranyéremmel (2017) jutalmazták.



Tombor Antal diplomáját és doktori fokozatát a BME Villamosmérnöki Karán szerezte. 1963-tól kezdve a Magyar Villamos Művek Trösztnél (később MVM) dolgozott számos beosztásban, 1994 és 1997 között pedig a cég vezérigazgatója volt. Miniszteri biztосként részt vett a MAVIR Zrt. megalakításában, aminek 2002–2006 vezérigazgatója, később vezérigazgatói tanácsadója volt. Munkáját több díjjal is kitüntették, köztük az Eötvös-díjjal (1997), a Magyar Köztársaság Arany Érdemkeresztjével (2003) és az Elektrotechnikai Nagydíjjal (2008).



Vokony István okleveles villamosmérnök, mérnök-közgazdász, a BME-n doktorált 2013-ban summa cum laude eredménnyel. A BME Villamos Energetika Tanszékének tanszékvezető egyetemi docense, az E.ON Digital Technology Hungary Stratégia és Architektúra Osztály korábbi vezetője. A MEE Szakmai Tudományos Bizottság elnöke 2019 és 2025 között. 2017-ben Pro Scientia Aranyérmes. Egyesületi munkáját 2019-ben Kandó-díjjal, 2026-ban Verebélly-díjjal ismerték el. 2023-tól CELSA-ösztöndíjas, 2024-től Bolyai-ösztöndíjas. Fő kutatási területe a megújuló energiaforrások rendszerintegrációs kérdései, a dinamikus stabilitásvizsgálat és az inerciahiányos rendszerek viselkedése.