



## Közreműködők

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| Decsi Gábor          | Laza Sándor           |
| Germán András        | Orlay Imre            |
| Dr. Hartmann Bálint  | Péter Gábor Mihály    |
| Hatala Miklós        | Steierlein István     |
| Hollandi Gábor       | Veisz Imre            |
| Juhász Kristóf Péter | Dr. Vokony István     |
| Dr. Katona Zsolt     | Zerényi József Oszkár |
| Kiss József          |                       |

Szakmai lektor: Dr. Tombor Antal

Nyelvi lektor: Dr. Wenszky Nóra

© Magyar Elektrotechnikai Egyesület, 2025

Magyar Elektrotechnikai Egyesület

1075 Budapest, Madách Imre út 5.

A kiadásért felel a Magyar Elektrotechnikai Egyesület elnöke

Felelős szerkesztő: Wenszky Nóra

A kötetet és a borítót tervezte: Kis György

Tördelő: Balázs Ildikó – brildi Kiadványok

ISBN 978-963-9299-55-9

# **A rendszer, amely nem tudta, hogy meg kell újulnia**

Kérdések és kételyek  
a villamosenergia-rendszerekről

Szerkesztette  
Vokony István – Hartmann Bálint

Magyar Elektrotechnikai Egyesület  
Budapest, 2025



# Tartalom

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Előszó                                                                                            | 7  |
| Szerkesztői előszó                                                                                | 9  |
| Bevezetés                                                                                         | 13 |
| 1. A hálózatfejlesztés története és jelenlegi helyzete Magyarországon                             | 15 |
| 1.1 Történeti áttekintés                                                                          | 15 |
| 1.2. A jelenlegi hálózat állapota és struktúrája                                                  | 16 |
| 2. Új trendek a hálózatfejlesztésben: elosztott termelés, energiatárolás és intelligens hálózatok | 23 |
| 2.1. Az elosztott energiatermelés térnyerése                                                      | 23 |
| 2.2. Energiatárolás és a fogyasztói szerep változása                                              | 27 |
| 2.3. Intelligens hálózatok és digitalizáció                                                       | 29 |
| 3. Infrastruktúra-fejlesztési és -tervezési kihívások – fókuszban az előrejelzés nehézségei       | 35 |
| 3.1. Tervezési időtáv és gördülő tervezés                                                         | 35 |
| 3.2. Az igények előrejelzésének nehézségei                                                        | 37 |
| 4. A hálózattervezés műszaki és gazdasági aspektusai                                              | 41 |
| 4.1. Ellátásbiztonság kontra költséghatékonyság – az n-1 dilemma                                  | 41 |
| 4.2. Költségek, megtérülés és finanszírozás                                                       | 43 |
| 4.3. Szabályozási és piaci hatások                                                                | 45 |
| 5. Hálózati feszültség szintek kialakítása és jövőbeli szerepük                                   | 47 |
| 5.1. Átviteli szint(ek) – 220 kV vs. 400 kV, és a 132 kV sajátos esete                            | 47 |
| 5.2. Középfeszültség – sugaras vagy hurkolt? Új technológiák a KÖF szinten                        | 48 |
| 5.3. A kisfeszültség jövője a prosumer-világban                                                   | 49 |
| 6. Európai és nemzetközi trendek, jó gyakorlatok                                                  | 51 |
| 6.1. Megújulóintegráció és hálózatfejlesztés Európában                                            | 51 |
| 6.2. Intelligens hálózatok és digitalizáció nemzetközi példái                                     | 52 |
| 6.3. Sikeres megoldások a hálózati szűk keresztmetszetekre                                        | 53 |
| 6.4. Szabályozási és piaci innovációk                                                             | 54 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7. A legfrissebb technológiai fejlesztések és alkalmazásuk<br>a hálózatfejlesztésben | 57 |
| 7.1. Új hálózati eszközök és anyagok                                                 | 57 |
| 7.2. Adat és modellezés – a szoftveres forradalom                                    | 59 |
| 7.3. A technológiai fejlődés hatása a munkaerőre és szervezetre                      | 60 |
| 8. Összegzés és következtetések                                                      | 63 |
| Köszönetnyilvánítás                                                                  | 65 |
| Felhasznált és ajánlott irodalom                                                     | 67 |

# Előszó

A villamosenergia-rendszerekben dinamikusan nő az időjárásfüggő termelők (nap- és szélerőművek) száma és termelésük részaránya, miközben a hagyományos szinkrongenerátorokkal működő erőművek egyre inkább kiszorulnak a termelői piacról. Ezek az időjárásfüggő erőművek inverterek segítségével csatlakoznak a villamosenergia-rendszerhez. Ennek az új technológiának az alkalmazása átalakítja a rendszer eddig megszokott fizikai működését. Megváltozik a termelés-fogyasztás egyensúlyának és a meddőtéljesítmény-igények kielégítésének dinamikája, nehézséget okoz a feszültség előírt határokon belüli tartása, valamint újfajta lengések lépnek fel a hálózaton. Megváltozik a zárlati áramok nagysága és időbeli lefolyása, továbbá gyakori stabilitási problémák veszélyeztetik a rendszer megbízható működését. Ez az új helyzet kihívások elé állítja mind a tervező, mind az üzemeltető műszaki társadalmat. Ezért időszerű áttekinteni a magyarországi villamosenergia-rendszer kialakulásának történetét és a fejlődés állomásait. Emellett fontos az új technológiai irányokat, valamint az átalakuló rendszer kihívásaira adható válaszokat áttekinteni, hogy a születőben lévő új rendszer minden szereplőnek a megelégedésére szolgáljon.

A jelen kötet átfogó képet nyújt a magyar villamosenergia-hálózat múltjáról, jelenéről és jövőbeni fejlődési irányairól. Elsősorban a szakma széles körben értelmezett képviselőinek szól, ugyanakkor a műszaki érdeklődésű nagyközönség számára is értékes olvasmány lehet.

Dr. Tombor Antal

a MAVIR Zrt. nyugalmazott vezérigazgatója

**Dr. Tombor Antal** diplomáját és doktori fokozatát a BME Villamosmérnöki Karán szerezte. 1963-tól kezdve a Magyar Villamos Művek Trösztnél (később MVM) dolgozott számos beosztásban, 1994–1997 pedig a cég vezérigazgatója volt. Miniszteri biztosként 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).





## Szerkesztői előszó

Tamás az irodája félhomályában ült, kezében egy megsárgult lapú szabvány. Az asztalon szétszórjt jegyzetek, rajzok és képletek kavargtak egyetlen szám körül: 2%. Miért éppen 2%? – visszhangzott benne újra és újra. Ez a parányi érték nem hagyta nyugodni; a megengedett feszültségesés rejtélyes határértéke mintha a neonlámpa halk zúgásában is ott bujkált volna a csendben. Hónapokon át kutatott a könyvtárak mélyén. Poros szabványkiadványokat lapozott végig, tanulmányokat és régi jegyzeteket böngészett – de egyik forrás sem adott egyértelmű választ. A szám mindenhol megkérdőjelezhetetlen axiómaként szerepelt, de hogy miért pont ennyi, azt homály fedte.

Végül a szakma öregjeihez fordult: egykori professzorokhoz, tervezőmérnökökhöz, akik ott voltak a szabványok kialakításánál. Ám a kérdésére csak vállvonogatást vagy ködös anekdotákat kapott. Egyikük szerint talán a biztonsági tartalék miatt lett annyi, egy másik legyintett:

– Fiam, így szoktuk.

Tamás érezte, hogy a válaszok mögött bizonytalanság bujkál. Senki sem tudta vagy merte megmondani, honnan ered ez a különös határérték. Ez a felismerés egyszerre töltötte el csalódottsággal és még elszántabb kíváncsisággal.

Eleinte kollégái érdeklődéssel figyelték Tamás kutakodását. A tanszéki könyvtárban kávézás közben a többiek találgattak: volt, aki a hálózati veszteségek minimalizálására gyanakodott, más tréfásan megjegyezte, hogy bizonyára így akarták „elegánsan” 230 V-ra emelni a feszültséget. A műhelyben papírlapokon modellezték a hálózatot, számolgattak, hátha kijön a 2% logikája. Tamás úgy érezte, sikerült felébresztenie bennük a szakmai kíváncsiság szikráját. De ahogy teltek a hetek, és ő újra meg újra visszatért a kérdéshez, a lelkesedés alábbhagyott. Kollégái lassan elhúzódtak mellőle. A kezdeti kíváncsi összenézések helyét gyanakvó pillantások vették át. A 2% többé nem került szóba a laborban, és ha Tamás mégis felhozta, kínos csend telepedett a társaságra. Mintha attól tartottak volna, hogy a megszállottsága ragályos. Egyre gyakrabban maradt magára a gondolataival. Mégsem adta fel.

Ekkor lépett mellé Barna, egy régi barát és kolléga – az egyetlen, aki nem tartotta őt őrültnek. Sőt, halvány mosollyal felidézte egy fiatalkori lázadásukat:

– Emlékszel, amikor megkérdeztük, miért 50 Hz a frekvencia? Bolondnak hittek minket, aztán mégsem volt válasz...

Az emlék nyomán Tamás belátta, hogy nem ő az első, aki kételkedik a bevett normákban. Barna biztatására Tamás elhatározta, hogy a lehető legmagasabb szinten néz szembe a rejtéllyel. Összehívták a „Nagytanácsot”. A Nagytanács – tizenkét méltán elismert szakember, a villamosipar meghatározó szakértői – egy késő nyárvégi napon összegyűlt az Egyesület díszes tanácsstermében. Ezek a tekintélyes mérnökök némelyike maga is ott volt a szabványok születésénél. Eleinte gyanakvó csend fogadta Tamás és Barna meghívását. Tamás szíve a torkában dobogott, amikor felállt, hogy beszéljen. Először nehezen jöttek a szavak; érezte a tekintetek súlyát. Végül rekedtes hangon feltette a kérdést, amely hónapok óta kísértette:

– Miért éppen 2% a megengedett feszültségesés a csatlakozóvezeték és a fővezeték együttesére?

A teremben néma csönd lett úrrá. A szakértők komoran néztek össze; egy pillanatra megütköztek a kérdés merészségén. Mintha szentségtörést hallottak volna: egy kimondatlan törvény kétségbevonását.

– Tudod, Tamás – szólalt meg végül halkán a legidősebb, egy őszes hajú professzor –, mi magunk sem vagyunk teljesen biztosak benne.

A jelenlevők arcán meglepetés futott át.

– Emlékszem, vita is folyt róla... talán a hálózati stabilitás miatt lett 2%. Vagy mert így könnyebb volt garantálni a fogyasztók feszültségigényét – törte meg a csendet az egyik tanácstag.

– Az is lehet, hogy egyszerű kompromisszum volt a gazdaságosság és a feszültségminőség között – vágott közbe egy másik.

Ahogy sorra megszólaltak, a gyanakvás helyét lassan átvette a kíváncsiság és a régi szenvedély. A tanácsstagok egymás szavába vágva idézték fel a múltat. Felmerült, hogy egy régi konferencián talán 3%-ot is fontolgattak, de valami megfoghatatlan okból végül mégis a 2% mellett döntöttek. Megértették, hogy a fiatal kolléga kérdése nem támadás, hanem hívás vissza a gyökerekhez – hogy újra feltegyék azokat az alapvető kérdéseket, amelyeket talán régóta nem tettek fel. Azon az estén a tanács terem falai közt a múlt és a jövő összeért.

Tamás a tizenkét „szaki” között ült, és most először nem érezte magát egyedül a kérdésével. A válasz körvonalai homályban maradtak, de valami megmozdult. A csendes belenyugvás helyét izgatott eszmecsere váltotta fel. A 2% – ez az apró szám – többé nem pusztán előírás volt, hanem egy közösen fejtegetett rejtvény, egy szimbólum. Tamás ekkor döbbsen rá, hogy talán nem is létezik egyetlen, végleges válasz. Lehet, hogy a 2% csupán egy megkövült szabály,

amely az idők során elvesztette az emlékezetét. Ugyanakkor felismerte azt is, hogy maga a keresés, a miértek kutatása felbecsülhetetlen értékű. Hiszen épp a kétely és a kíváncsiság az, ami továbbviszi a világot – és ami a szakma valódi mozgatórugója. Néha a legfontosabb válasz abban rejlik, hogy újra és újra merjük feltenni ezeket a kérdéseket.



A villamosenergia-hálózatok az évtizedek során az egyik legnagyobb és legfontosabb ember alkotta infrastruktúrává fejlődtek. Ezt az evolúciót mindig az együttműködés igénye motiválta; a kooperáció növeli a rendszer hatékonyságát, javítja az ellátásbiztonságot és csökkenti a szolgáltatás fajlagos költségeit. Az együttműködés volt a mozgatórugója a szigetszerű ellátási területek közötti első távvezetékek építésének, és a kontinenseken átnyúló, fogyasztók millióit ellátó hálózatok létrejöttének. Ezen hálózatok hossza körülbelül 90%-kal fog növekedni 2050-ig, miközben a világ energiarendszerei átalakulnak. A hálózat-tervezés és -üzemeltetés terén használt módszerek és eszközök elérték korlátaikat. A BME FASTER Kutatócsoport célja, hogy új irányt mutasson a II. világháború után létrejött magyar villamosenergia-hálózat újraépítésében, innovatív tudományos módszertanokat és eljárásokat kidolgozva, amelyek nemcsak elméleti, hanem alkalmazástámogatási szempontból is hasznos segédletet nyújtanak a szakma és az iparág számára.

Könyvünk alapjául azok a hosszú beszélgetések és közös gondolkodás szolgáltak, amelyeket a villamosenergia-ipar különféle területein aktív szakemberek folytattak. Bár a beszélgetések kiindulópontja egyszerűnek tűnt (hogyan változott a villamosenergia-rendszer az elmúlt évtizedekben és merre tartunk), hamar kiderült, hogy a válaszok nem lehetnek ennyire egyszerűek – és néha egyértelműek sem. Arra hívjuk az olvasót, hogy merjen kérdezni, merjen új szemmel tekinteni a megszokott válaszokra, és merjen kételkedni mindabban, ami biztos pontnak tűnik. Ne hagyományos szakkönyvként, pláne ne tankönyvként tekintsen erre a kötetre; sokkal inkább egyfajta helyzetelemzésként, amely visszatekint az elmúlt mintegy hetvenöt évre, és előre is tekint a jövő bizonytalanságai és lehetőségei felé. Bízunk benne, hogy könyvünk nem lezárja, hanem inspirálja azokat a gondolatokat és vitákat, amelyek szakmánkat mozgatják. Mert ha a jövő nem magától értetődő, akkor nekünk kell tartalommal megtöltenünk.

Dr. Vokony István  
Dr. Hartmann Bálint



## Bevezetés

A villamosenergia-hálózat fejlesztése stratégiai jelentőségű feladat, amely a nemzetgazdaság és az energiaellátás biztonságának alapja. Az elektromos hálózatok kialakulása hosszú történeti folyamat eredménye, amely során a technológiai fejlődés és a társadalmi-gazdasági igények szüntelenül formálták a hálózatok struktúráját. Napjainkban a villamosenergia-rendszer jelentős átalakuláson megy keresztül. Az elosztott energiatermelés térnyerése, az energiatárolás új lehetőségei és az „okos” hálózati megoldások (*smart grid*) megjelenése mind új követelményeket támasztanak a hálózatfejlesztéssel szemben. Ugyanakkor a régi infrastruktúra felújítása és fenntartása is sürgető, hiszen az 1950–60-as években épült hálózati elemek élettartamuk végéhez közelednek.

Könyvünk átfogó képet nyújt a magyar villamosenergia-hálózat fejlesztésének történeti háttéréről és aktuális állapotáról, valamint részletesen tárgyalja a legújabb trendeket és kihívásokat. Bemutatja az infrastruktúra tervezésének nehézségeit – különös tekintettel a jövőbeli igények előrejelzésére. Emellett elemzi a hálózattervezés műszaki és gazdasági aspektusait és áttekinti a különböző hálózati feszültségszintek szerepét és jövőjét. Ismerteti az európai és nemzetközi jó gyakorlatokat, végül kitér a legfrissebb technológiai fejlesztésekre és azok gyakorlati alkalmazására.



# 1. A hálózatfejlesztés története és jelenlegi helyzete Magyarországon

A fogyasztókat villamos energiával ellátó hálózatok az egyre növekvő és változó fogyasztói igények kiszolgálása érdekében, valamint a technológiai innovációknak köszönhetően folyamatosan fejlődnek. Az alábbiakban a jelenlegi magyar hálózat kialakulásának főbb állomásait tekintjük át, majd részletesen bemutatjuk a hálózat lényeges jellemzőit.

## 1.1 Történeti áttekintés

Magyarország villamosenergia-hálózatának kialakulása a 20. század első felében kezdődött, kezdetben elszigetelt helyi hálózatok formájában. 1884-ben Temesváron indult meg Európában először a villamosított közvilágítás, majd 1888-ban Mátészalkán is üzembe helyezték az első, elektromossággal működő utcai lámpákat. Ezeket a lokális hálózatokat az idő előrehaladtával összekapcsolták a gazdaságosabb üzemvitel érdekében: a létrejövő nagyobb hálózatokon például csökkenteni lehetett a szükséges tartalékkapacitásokat és ki lehetett egyenlíteni a terheléseket. A második világháborút követően és különösen az 1950-es évektől kezdve nagyszabású hálózatbővítési programok indultak, és ezek jóvoltából kiépült az országos átviteli hálózat gerince. Ekkor létesültek a 120 kV-os (a mai 132 kV-os) főelosztó hálózat első elemei, hiszen a világháború nagy pusztítást végzett az elektromos hálózaton is. Ezt követően épültek ki a 220 kV-os, majd 400 kV-os és végül 750 kV-os nagyfeszültségű (átviteli) hálózat szakaszai is. Az 1950-es és 1960-as években lefektetett infrastruktúra alapozta meg a mai hálózati topológiát. A rendszerváltás idejére a magyar villamosenergia-rendszer egy integrált, szinkron üzemű hálózatot alkotott a környező országokkal, amely azóta is a kontinentális európai hálózat szerves része. Ám e hálózati elemek jelentős része mára előregedett – különös tekintettel a KÖF (középfeszültségű) és KIF (kisfeszültségű) eszközökre –, és a folyamatos állagmegóvás ellenére is megújításra szorul.

A hálózati szintek hagyományos elnevezése – *alaphálózat* (a 2004-es UCTE-csatlakozás óta átviteli hálózat), *főelosztó hálózat*, *elosztó hálózat* – a múltban a funkciók szerint vált szét. Kezdetben csak elosztás létezett, majd az iparosodással megjelent az egyre nagyobb távolságú energiaátvitel igénye. A magyar terminológiában az *átvitel* tipikusan a nagy feszültség szinteken (220 kV, 400 kV, 750 kV) történő, országos vagy regionális szintű energiaátvitelt jelenti, míg az elosztó hálózat kisebb feszültségű szinteken (jellemzően 120 kV alatt) a fogyasztókhoz való eljuttatást szolgálja. Fontos megjegyezni, hogy az elosztó

és átviteli szerepkörök nem tisztán a feszültségshinthez kötöttek. Történetileg ugyan a feszültség növelése együtt járt az átviteli funkcióval, de a mai technológiai környezetben az elosztó hálózatok is elláthatnak részben átviteli jellegű feladatokat, például az elosztott termelés visszatáplálása révén.

A magyar hálózatfejlesztés sajátossága a 120 kV-os hálózati szint megjelenése. Nemzetközi viszonylatban a 110 kV a bevett szabványos feszültségshint az átmeneti (szubtranszmissziós) hálózatoknál, azonban Magyarországon a rendszer átviteli képességének növelése érdekében a 20. század második felében 120 kV-os szintre tértek át. Az az 1990-es években zajló privatizáció során dönt el, hogy ez a hálózati szint a regionális elosztói engedélyesekhez (DSO-khoz) kerüljön, míg a 220 kV, a 400 kV és a 750 kV maradt a nemzeti átviteli hálózati engedélyes (TSO: MAVIR Zrt.) kezelésében. Így a 120 kV jogilag elosztó hálózatnak számít Magyarországon, bár kialakítása (jelenleg hurkolt topológia) miatt funkcionálisan sokszor átviteli szerepet tölt be. Fontos megemlíteni, hogy a legtöbb európai országtól eltérően Magyarországon hatásosan földelt csillagponttal üzemel ez a feszültségshint. A 120 kV-os névleges feszültségshintet idővel – megtartva a 120 kV-os üzemviteli határokat – 132 kV-osra nevezték át. A gyakorlatban ez nem okoz problémát, mert az ebben a feszültségshinthez alkalmazott berendezések szabványos névleges feszültsége 145 kV.

A 35 kV-os hálózat történetileg a főelosztó szerepet töltötte be a múlt század első harmadában, ám az idők során ezt a szintet fokozatosan kiváltotta a 120 kV. A 35 kV-os hálózatok leépülőben vannak; az új beruházásoknál már nem alkalmazzák, helyette 120 kV-os alállomások és távvezetékek épültek, amelyek nagyobb távolságok áthidalását és nagyobb terhelések gazdaságos továbbítását teszik lehetővé. A feszültségshintek folyamatos növelése a hálózati szűk keresztmetszetek oldását szolgálta – például Németországban 110 kV, hazánkban 120 kV, majd újabban 132 kV névleges feszültség is üzemben van. Fontos megjegyezni, hogy adott névleges feszültségshint nem feltétlenül jelenti azt, hogy ugyanazon értékű üzemi feszültség van jelen. Összefoglalva: a magyar villamos hálózat feszültségshintjei és szerepkörei történetileg alakultak ki, részben a nemzetközi trendektől eltérő módon, a helyi szükségletek és iparági döntések alapján.

## 1.2. A jelenlegi hálózat állapota és struktúrája

Napjainkban Magyarország villamosenergia-hálózata többszintű struktúrát alkot, amelyet az alábbi fő feszültségshintek jellemeznek.

**750 kV ▼** Az országos átviteli hálózat gerince, nemzetközi összeköttetésekhez, a legnagyobb távolságú és kapacitású energiaátvitelre szolgál.

**400 kV ▼** Az országos átviteli hálózat gerince, a legnagyobb távolságú és kapacitású energiaátvitelre szolgál.

**220 kV ▼** Regionális átviteli hálózati szint, a 400 kV kiegészítője, történelmileg az első országos átviteli szint.

**132 kV ▼** Főelosztó hálózat, amely Magyarországon párhuzamosan DSO és TSO szerepű, és az elosztói engedélyesek üzemeltetik. A 400 kV-os és a 220 kV-os hálózattal hurkolt konfigurációja miatt jelenleg részben átviteli feladatokat is ellát.

**35 kV ▼** Korábbi főelosztó szint, amely mára háttérbe szorult.

**11 kV / 22 kV ▼** Középfeszültségű elosztó hálózat, ez juttatja el a villamos energiát a településekre, ipari parkokba. Magyarországon a 22 kV-os hálózat jellemzően szabadvezetékes, kisebb részben kábeles rendszer. Ezzel szemben a 11 kV-os hálózatok gyakorlatilag kizárólag kábeles hálózatok, és többnyire épített, városi környezetben működnek. Ezen hálózathoz történik az elosztott, decentralizált termelés jelentős részének csatlakoztatása.

**0,4 kV ▼** Kisfeszültségű hálózat, az utolsó szakasz az ügyfelek (háztartások, kisebb üzleti fogyasztók) ellátására. Ezen hálózathoz csatlakoznak a háztartási méretű kiserőművek (HMKE).



1. ábra. Nagyfeszültségű távvezetékek az átviteli hálózatban. Forrás: Adobe Stock 440725469.

Az egyes feszültség szintekhez tartozó üzemeltetők és szerepkörök összefoglalását az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat. Magyarországi hálózati feszültség szintek és szerepkörök

| Névleges feszültség | Hálózati szint (funkció)           | Üzemeltető                  | Megjegyzés (sajátosság)                                                           |
|---------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 750 kV              | Átviteli hálózat (országos gerinc) | MAVIR Zrt. (TSO)            | Nemzetközi összeköttetések, szabványos.                                           |
| 400 kV              | Átviteli hálózat (országos gerinc) | MAVIR Zrt. (TSO)            | Nemzetközi összeköttetések, szabványos.                                           |
| 220 kV              | Átviteli hálózat (regionális)      | MAVIR Zrt. (TSO)            | Nemzetközi összeköttetés, kisegítő átviteli szint hazai viszonylatban.            |
| 132 kV              | Főelosztó hálózat (hurkolt)        | Regionális elosztók (DSO-k) | A 120 kV nem szabványos feszültség szint helyett. Jelenleg átviteli jellegű üzem. |
| 35 kV               | (Korábbi) főelosztó hálózat        | Regionális elosztók (DSO-k) | Kivezetés alatt, a 22 kV és 132 kV veszi át a szerepét.                           |
| 11–22 kV            | Középfeszültségű elosztó hálózat   | Regionális elosztók (DSO-k) | Sugaras vagy íves-gyűrűs elosztó struktúra, városi és vidéki hálózatok gerince.   |
| 0,4 kV              | Kisfeszültségű elosztó hálózat     | Regionális elosztók (DSO-k) | Végelosztó hálózat a fogyasztókig, túlnyomórészt sugaras.                         |

Az 1. táblázatból kiolvasható, hogy a magyar rendszerben a 132 kV sajátos helyet foglal el. Egyrészt átviteli funkciót is ellát, hurkoltan kapcsolódik a 400/220 kV-os hálózathoz, másrészt elosztási funkciót is ellát. Ebben nincs ellentmondás, hiszen az átviteli- és az elosztó hálózat üzemeltetési szempontból ezen a feszültség szinten találkozik. A *hurkolt* 132 kV azt jelenti, hogy a 400 kV-os alállomásokat 132 kV-os vonalak is összekötik, teljes aláhurkolást képezve. Ennek előnye a korábbi időkben a nagyobb üzembiztonság volt, viszont mára problémát is jelent: MAVIR üzemviteli tapasztalatai szerint kontingenciahelyzetek (n-1 kiesési helyzetek) sokszor nem a 400 kV-on, hanem a 132 kV-os hálózaton keletkeznek a hurkoltság miatt.

Felmerült ezért a *körzetesítés* gondolata, amely lényegében a 132 kV hurkoltságának megszüntetését, és e hálózatok regionális körzetekre bontott üzemeltetését jelentené. Ilyen esetben a 132 kV minden egyes körzeten belül hurkolt maradna a DSO szemszögéből. Ám a körzetek között csak a 400 kV-os hálózaton keresztül lenne kapcsolat, tehermentesítve a 132 kV-ot az országos energiaátviteli felada-

tok alól. A MAVIR hosszú távon műszaki szempontból ezt a megoldást támogathatja, azonban gazdasági és üzemeltetési megfontolások (pl. a beruházások költsége, a DSO–TSO határvonal újradefiniálása) miatt ez további vizsgálatokat igényel. A MAVIR és a DSO-k közötti egyeztetés eredményeként az a döntés született, hogy a MAVIR 132 kV-os alállomási gyűjtősínein osztott diszpozíciót hoznak létre, ezzel kialakítva a 132 kV-os hálózat sugaras topológiáját.

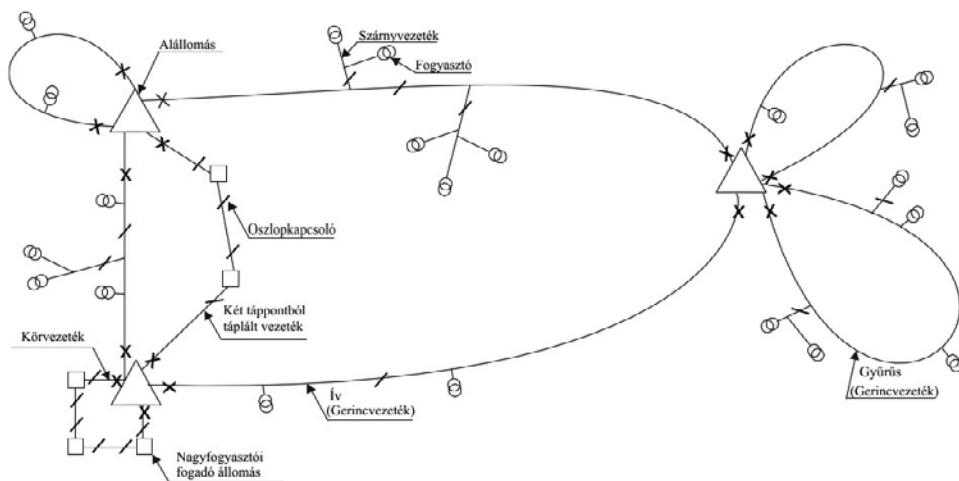
A jelenlegi hálózatfejlesztési feladatok egyik fontos eleme a régi eszközök cseréje és a hálózat rekonstrukciója. Az átviteli hálózat alállomásainak felújítása gyakorlatilag megtörtént (2. ábra). A távvezetékek átépítése kockázatelemzés után folyamatban van, beleértve az új, magas hőmérsékletű sodronyok szükség szerinti alkalmazását is. Az alacsonyabb feszültségű, 50-60 évvel ezelőtt telepített vezetékek, transzformátorok, alállomások elöregedtek. Bár a korabeli tervezési szemlélet 50 éves élettartammal számolt, ma úgy tűnik, ez túl optimista volt bizonyos hálózati elemeknél.

Az elmúlt években megkezdődött a hálózat felújítása, de továbbra is számos berendezés közelíti meg vagy haladja meg a névleges élettartamát. Különösen igaz ez a KÖF és KIF hálózatokra – ezek jövőbeli alakulása bizonytalan, miközben a fogyasztói szokások drasztikusan átalakultak. A másik probléma a 132 kV-os hálózatok kapacitásának bővítési igénye. A korábban 40 °C-ra vagy 60 °C-ra méretezett és kiosztott távvezetékek kapacitása a változó klíma miatt ma már korlátot jelent az új igények kezelésében.

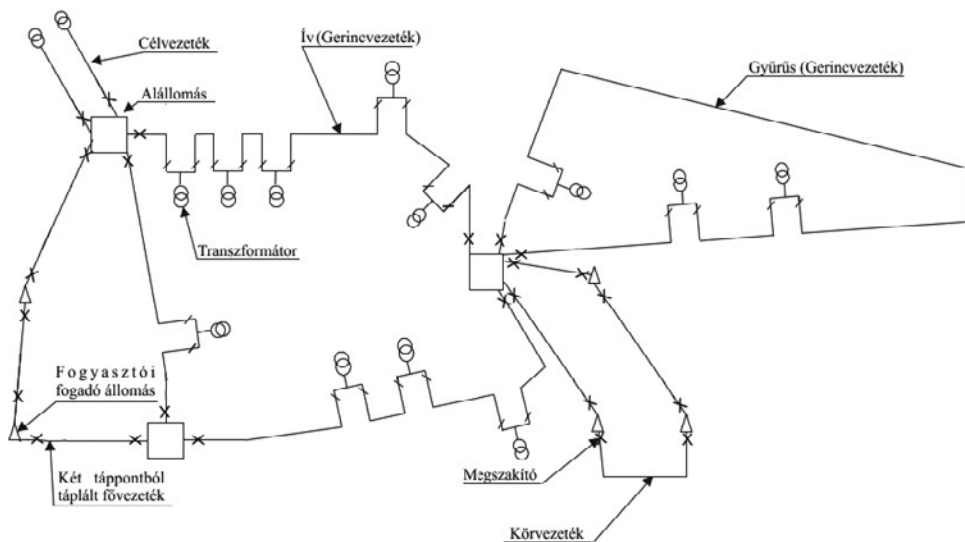


2. ábra. Villamosenergia-rendszer átviteli hálózati alállomása. Forrás: Adobe Stock 523500924

A felújítások során új kihívásként jelentkeznek a kábeltechnológia térnyerése: egyre több légvezetékes szakaszt cserélnek földkábelre a megbízhatóság és esztétikai okok miatt. Ezt sok esetben jogszabályok is támogatják. A tervezés azonban sokszor még a hagyományos légvezetékes logikát követi, és az utólagos kábelesítés bonyodalmakhoz vezethet (pl. feszültségtartás, kapacitív meddő teljesítmény kezelése, ívoltási igények). Ennek megfelelően a jövőben a tervezési gyakorlatban is jobban figyelembe kell venni a kábelek eltérő viselke-



a) Szabadvezetékes hálózat



b) Kábelhálózat

3. ábra. Példa középfeszültségű hálózat kialakítására szabadvezetékes (a) és kábelhálózatok (b) esetén. Forrás: Dán et al. (2012: 3).

dését és a kompenzálás igényét. Emellett mérlegelni kell a kábelezés lehetőségét akár a nyomvonal-optimalizálás eszközeként is, hiszen kábel esetén könnyebb lehet új nyomvonalon vinni az energiát, mint szabadvezetékes hálózat esetén (3. ábra).

Összességében Magyarország villamosenergia-hálózata jelenleg kettős kihívással néz szembe: egyrészt adaptálódnia kell a gyorsan változó energiaszükségleti és termelési mintázatokhoz, másrészt biztosítani kell a túlkoros infrastruktúra további megbízható és biztonságos üzemben tartását a fejlesztési lehetőségek által meghatározott felújítások megkezdéséig. A következő fejezetekben részletesen tárgyaljuk a legfontosabb új trendeket és az ezekből fakadó kihívásokat.

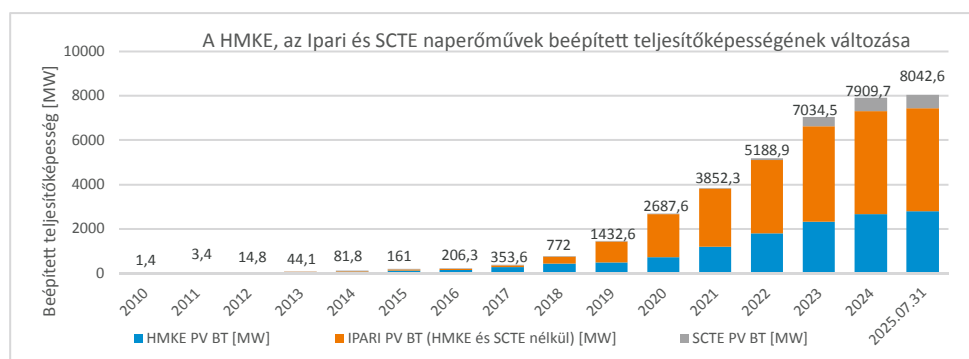


## 2. Új trendek a hálózatfejlesztésben: elosztott termelés, energiatárolás és intelligens hálózatok

Az elmúlt évtizedben a villamosenergia-rendszerben alapvető paradigmaváltás tapasztalható. A korábbi, központosított termelésre és homogén terhelési profilokra építő modellt egy egyre decentralizáltabb, dinamikusabban változó termelési és üzemeltetési struktúra váltja fel. Ebben a fejezetben áttekintjük a legfontosabb új trendeket: az elosztott energiatermelés robbanásszerű növekedését, az energiatárolási technológiák térnyerését, valamint az intelligens hálózati megoldások (*smart grid*) megjelenését és hatásait.

### 2.1. Az elosztott energiatermelés térnyerése

Még néhány évvel ezelőtt is kevesen gondolták volna, hogy a megújuló alapú elosztott termelés – különösen a napenergia – ilyen gyors és széleskörű térnyerést produkál a kisfeszültségű és közép feszültségű hálózatokon. Jelen van a szélenergia, a biomassza és egyéb megújuló alapú energiatermelési módok, de a leghangsúlyosabbá a napenergia vált az elmúlt évtizedben. A napelemes kiserőművek (háztartási méretű kiserőművek, HMKE-k) száma és beépített kapacitása Magyarországon exponenciálisan nőtt. A villamosenergia-rendszerbe integrált napelemes (fotovoltaikus – PV) kapacitás 2010-ben még gyakorlatilag elhanyagolható volt (néhány MW). 2020-ra azonban meghaladta a 2 GW-ot, 2023 végére pedig megközelítette a 6 GW-ot. Ez azt jelenti, hogy 2023-ban a napelemek már az országos villamosenergia-termelés közel egyötödét adták (4. ábra).



4. ábra. A háztartási méretű, az engedélyköteles és a nem engedélyköteles fotovoltaiikus kiserőművek beépített teljesítőképességének változása Magyarországon 2014–2025  
Forrás: MAVIR (2025b: 1)

A 2024-es év további ugrást hozott: a csúcstermelési időszakokban a hazai napenergia-termelés már az ország fogyasztásának több mint 80%-át fedezte bizonyos időszakokban, éves szinten pedig ~25%-os részarányt ért el az áramtermelésben. Ennek a növekménynek a jelentős része már közvetlenül a nagyfeszültségű (NAF) hálózatra érkezik, nem pedig elosztottan jelentkezik (5. ábra).



5. ábra. Egyre növekvő kapacitású napelemparkok egy példája. Forrás: Adobe Stock 88177999

A 2. táblázat szemlélteti a napenergia-kapacitás és -termelés arányának változását az elmúlt években. Jól látható, hogy a megújuló energia – elsősorban a napenergia – térnyerése mennyire felgyorsult. Magyarország 2030-ra tervezett 6000 MW-nyi napelemeskapacitás-célját már 2024-ben túlszárnyalta a beépített teljesítmény.

2. táblázat. A napelemes kapacitás és termelés arányának növekedése Magyarországon.

| Év   | Teljes beépített PV kapacitás (MW) | Napenergia részaránya az éves fogyasztásban |
|------|------------------------------------|---------------------------------------------|
| 2010 | ~2                                 | < 0,1%                                      |
| 2020 | 2 131                              | 5,5%                                        |
| 2023 | 5 835                              | 14,2%                                       |
| 2024 | ~7 555 (2025)                      | 18,6%                                       |

Megjegyzés:

A 2024-es adatok előzetes becslésen alapulnak. 2025 elejére elérte a PV kapacitás a 7,55 GW-ot.

Ez a trend komoly kihívások elé állítja a hálózatfejlesztést. A hagyományos tervezési módszerek korábban azzal számoltak, hogy a kis- és középfeszültségű hálózatokon a termelés minimális, a terhelés pedig előrejelezhető. Most azonban az elosztó hálózatok kétirányú energiaszállítási feladatot látnak el: nemcsak a fogyasztók felé kell továbbítani az energiát, hanem a termelési csúcsok idején (pl. napos nyári délelőttökön) a többletként termelődő fotovoltaikus energiát felfelé, a nagyobb feszültségű szintek felé kell elvezetni. Ez lényegében átviteli jellegű funkciókkal ruházza fel az elosztó hálózatot, ami a hálózati struktúra, a tervezési elvek és üzemvitel újragondolását teszi szükségessé.

Az elosztott termelés növekedése miatt felértékelődött a hálózat rugalmassága, különös tekintettel az energiatárolási megoldásokra. Korábban a tervezés során egyetlen csúcsterhelési pillanatra méreteztek (pl. téli esti csúcs), ma viszont több kritikus állapotot is figyelembe kell venni: a nyári nappali termelési csúcsot (amikor a fogyasztás alacsony, de a PV-termelés jelentős), a téli esti fogyasztási csúcsot (amikor a PV-termelés zérus, de a terhelés nagy), illetve akár egyidejű termelési és fogyasztási szélsőértékek regionálisan eltérő kombinációit. A korábbi feltételezés, miszerint országos szinten a PV-termelők teljesítménye egyszerre van maximumon (egyidejűségi tényező  $\sim 1$ ), mára megdőlt. A gyakorlatban egy nagyobb területen a felhőzet egyenlőtlen eloszlása (inhomogenitása) miatt a PV-k egyidejűsége 1 alá csökkent. Ez azt jelenti, hogy bár Magyarország nem nagy kiterjedésű, de nem ugyanakkor termel Győrben és Nyíregyházán egy napelem, mert az időjárás és a felhőzet kellően változékony. A tervezésnél ezt már hálózati szempontból figyelembe veszik. Sőt az egyidejűségi tényező további csökkentése is felmerült a beépített kapacitás további növekedésével. Ugyanakkor a másik véglet is sokszor kialakul, hogy mindenhol egyenletes a napsugárzás, és ebből adódóan a termelés is így oszlik el.

A megújulóalapú, elsősorban napelemes energiatermelés folyamatos térnyerése sokrétű kihívást, legalábbis feladatot generál hálózat üzemeltetési szempontból. Ez nem magyar sajátosság, több nemzetközi szervezet is készített elemzést ezekről a hatásokról, kockázatokról. Ilyen a *System Stability Roadmap*, amely szerint az alábbi kihívásokkal kell szembenézni.

### **Frekvenciaingadozás** (Rate of Change of Frequency – RoCoF) ▼ nincs puffer

A hálózat stabilitásának fenntartása érdekében folyamatosan egyensúlyban kell tartani a villamos energia termelését és fogyasztását. A frekvencia a legfontosabb indikátor, amely közvetlenül reagál a termelés és a fogyasztás közötti eltérésre. A hagyományos erőművekben üzemelő szinkrongenerátorok nagy forgó tömegének tehetetlensége (inercia) eddig természetes csillapítást jelentett, amely csillapította a frekvencia hirtelen változásait. Mára a rendszerben tapasztalható lengések megváltoztak, nagyobbak lettek. Ahogy a jövőben az

elosztott és teljesítményelektronikán keresztül (inverter, konverter) a hálózathoz csatlakozó termelők részaránya nagymértékben megnő és a hagyományos erőműveket kivezetik, illetve leállítják, a forgó tömegből származó természetes tehetetlenség lecsökken, végső esetben megszűnik. A frekvencia stabilitásának megőrzése érdekében mesterséges, virtuális inerciaszolgáltatás szükséges. Az inverteralapú rendszerek szabályozásának módosításával, kiegészítésével szoftveres úton lehet ezt megoldani (ún. *grid-forming* inverterek). A megfelelő szabályozási képesség mellett szükségessé válik villamosenergia-tároló kapacitások, esetleg szinkronkompenzátorok alkalmazása is a villamosenergia-rendszerben (VER) a szükséges tehetetlenség (inercia) eléréséhez.

### **Feszültségingadozás ▼** nincs helyi meddő teljesítmény

A feszültség stabilitásához szükséges, hogy a villamosenergia-hálózatban mindig a megengedett feszültségtartományon belül (általában  $\pm 10\%$ , de feszültség-szintenként eltérő) maradjon a feszültség nagysága. Korábban ezt a helyi meddő teljesítményt biztosító hagyományos erőművek, továbbá az egyéb meddőforrások és nyelők garantálták. Ezek kivonásával a meddő teljesítmény szabályozása áttevődik az inverteralapú megújuló energiaforrásokra, valamint elosztottan üzemelő tárolókra. Ezeknek az invertereknek dinamikusan kell szabályozniuk a meddő teljesítményt, hogy helyben stabilizálják a feszültséget. Emiatt különösen fontossá válik a hálózat különböző szintjei (TSO–DSO) közötti fokozott koordináció és az aktív eszközök megjelenése.

### **Rezonanciajelenségek ▼** inverterek közötti nem kívánt kölcsönhatások

A hálózat egyes elemei között (pl. inverterek, induktivitások és kapacitások között) rezgőkörök alakulhatnak ki, amelyek nem kívánt rezonanciákhoz vezethetnek. Ha egy ilyen rezonancia keletkezik, az a rendszerben jelentős feszültség- és áramerősödést okozhat, ami akár károsodáshoz is vezethet. Az inverteren keresztül csatlakozó termelők számának növekedésével megnő a nem kívánt kölcsönhatások és rezonanciajelenségek kockázata. Ezt a jelenséget külön szabályozási mechanizmusokkal, rezgéscsillapító intézkedésekkel és robusztus inverterbeállításokkal lehet ellenőrzés alatt tartani.

### **Gyenge zárlati teljesítmény ▼** hibadetektálás, védelem működése veszélyben

A zárlati áram eddig a konvencionális erőművek szinkrongenerátoraiból származott, és a hálózati védelmi rendszerek működésének alapját képezte. Ezek kivezetésével a zárlati áram szintje jelentősen csökken, ami nehezíti a hibadetektálást és veszélyezteti a védelem működését. Az inverteren keresztül csatlakozó termelők korlátozott zárlati áramot képesek szolgáltatni. Így alternatív megoldások, például speciális transzformátorok vagy kifejezetten erre terve-

zett *grid-forming* inverterek alkalmazása válik szükségessé, hogy biztosítható legyen a védelmi rendszerek megfelelő működése. Kihívás jelent a zárlati áramok lehetséges növelése. Másrészt az eddigi sugaras elosztóhálózatokon alkalmazott, egyszerű túláramvédelmek helyett vagy távolsági védelmeket vagy szakaszvédelmeket kell használni a csatlakozó távvezetékek védelmére. Emellett a védelmi elveket is újra kell értelmezni ezekre a körülményekre.

### **Szinkronitás elvesztése ▼ a szögstabilitás megszűnik**

*Szögstabilitás* alatt azt értjük, hogy a szinkrongépek képesek-e tartani a hálózattal való szinkronüzemet normál és rendkívüli üzemállapotok esetén is. A hagyományos erőművek szinkrongenerátorai közvetlen villamos kapcsolatban vannak a hálózattal, amely természetes stabilitást biztosított. Az inverteren keresztül csatlakozó termelők nem rendelkeznek mechanikus kapcsolattal, így speciális szabályozással kell megakadályozni a szögstabilitás elvesztését. Ez különösen fontos az ún. *grid-forming* inverterek alkalmazásakor, amelyek képesek stabil feszültséget tartani, ugyanakkor a szögstabilitás fenntartására alkalmas szabályozási képességekkel is rendelkeznek.

## **2.2. Energiatárolás és a fogyasztói szerep változása**

Az energiátárolás technológiáinak fejlődése szorosan összefügg az elosztott termelés terjedésével. Az időjárásfüggő megújulók elterjedésével az energiátárolók jelenthetik a megoldást a termelés és fogyasztás időbeli eltolódásának kiegyenlítésére. Jelenleg azonban a kereskedési céllal létesült akkumulátoros tárolók még korlátozott szerepet játszanak a villamosenergia-rendszerben, főként magas beruházási költségük és a technológiai korlátok miatt. A mai műszaki megoldásokkal különösen a hosszú távú (például szezonális) energiátárolás Magyarország földrajzi adottságai miatt gazdaságosan nem megoldható. Azonban a fejlődés üteme gyors: 5–10 éves távlatban jelentős innovációk várhatók, amelyek új alkalmazások előtt nyithatnak utat.

A hálózatfejlesztési tervekben egyelőre óvatosan kezelik a tárolókat, tekintve a bizonytalanságot. Mindazonáltal az ENTSO-E terveiben (TYNDP) is megjelenik a technológia, és a MAVIR hálózatfejlesztési terveiben megemlítik egy szivattyús tározó esetleges hazai szerepét. Pillanatnyilag nem építhetünk arra biztosan, hogy például 10 év múlva a lakossági tárolók általánosak lesznek, vagy hogy megfizethető szezonális tárolás lesz elérhető. Ugyanakkor a hálózat üzemeltetésében és terhelésében a tárolók már középtávon is szerepet kaphatnak, amint az árak csökkennek és az üzleti modellek kikristályosodnak. Felértékelődik a központosított energiátárolás kérdése és a tározós erőművek létesítése. Vagy akár olyan nem szokványos megoldások is szóba jöhetnek, mint a bértárolás.

A villamosenergia-fogyasztók szerepe is változóban van. A hagyományos modellben a felhasználó passzív fogyasztó volt, ma viszont egyre inkább aktív szereplővé válik, az úgynevezett *prosumer* (termelő-fogyasztó) jelenség révén. A háztartási méretű napelemes rendszerek tulajdonosai a hálózatra visszatáplálják a megtermelt többletenergiát. Akik még a korábbi szaldóelszámolási szabályok értelmében működnek, a hálózatot gyakorlatilag egyfajta „virtuális akkumulátorként” használják. Ez azonban új kérdéseket vet fel a méltányos költségmegosztásról, hiszen a hálózat fenntartási költségei így is jelentkeznek, csak nem közvetlenül annál, aki a kétirányú szolgáltatást igénybe veszi. Felmerült az igény egy olyan tarifarendszerre, amelyben „aki a költséget okozza, az viseli” – összhangban az EU „Téli csomag” (*Clean Energy Package* vagy *Winter Package*) elveivel. Ez az Európai Unió jogalkotási csomagja, amely lefekteti az EU villamosenergia-piacának új szabályait, a fogyasztói jogokat és a 2030-ig tartó klíma- és energiacélok végrehajtási kereteit.

Várható, hogy a jövőben a tarifák átalakulnak, mert az energiaalapú díjak helyett nagyobb hangsúly kerül a rendelkezésre állási (kapacitásjellegű) díjakra, amelyek nagyban segítik a termelés és fogyasztás egyensúlyban tartását. Hosszú távon ugyanis fenntarthatatlan lehet, hogy a részben önellátó (szigetüzemre képes) fogyasztók a hálózatot *biztosítékként*, *védőhálónak* használják, miközben a fennmaradó, hálózatra szoruló fogyasztók viselik a teljes fenntartási költséget.

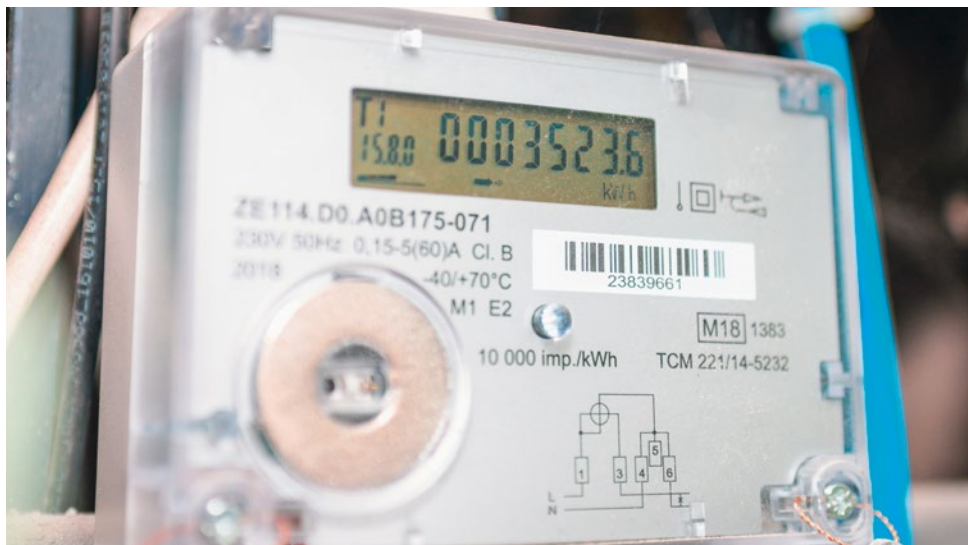
Egy másik izgalmas jövőkép a fogyasztói szigetesedés, a szándékolt szigetüzem és az energiaközösségek megjelenése. Ezek olyan helyi közösségek (lakóközösségek, települések, ipari parkok) lehetnek, amelyek saját termelőkapacitásokkal és esetleg tárolókkal rendelkeznek, és bár fizikailag csatlakoznak az országos hálózatra, normál üzemben minimálisra szorítják az onnan való vételezést. Lényegében virtuális szigetüzemben működhetnek, és csak vészhelyzetben (például belső hiba esetén) támaszkodnak a külső hálózatra. Az ilyen energiaközösségek kapcsán felmerül, hogy a hálózatfejlesztésnek milyen mértékben kell kiszolgálni őket. Ha ezek a jövőben elterjednek, a hálózat bizonyos részeinek csak biztonsági, tartalékszerepe (*backup*) lesz a számukra.

A jelenlegi ellátási szabályok szerint az elosztók kötelesek a fogyasztókat megfelelő minőségben ellátni. Ehhez figyelembe kell venni az n-1 kritériumokat (ld. 4.1. fejezet) és a szolgáltatásminőségi mutatókat, például a SAIDI mutatót (*System Average Interruption Duration Index*), azaz az átlagos kiesési időt. Azonban, ha a fogyasztók egy része deklaráltnak csak backup-ként tekint a hálózatra, lehetőség nyílhat differenciált szolgáltatási szintekre, szerződéses alapon. Már ma is vannak példák arra, hogy bizonyos felhasználók eltérő (magasabb) ellátásbiztonsági szintet szerződnek az elosztóval külön díj ellenében. Hosszabb távon akár kialakulhatnak olyan konstrukciók is, ahol egy energiaközösség olcsóbban, de alacsonyabb szolgáltatási szinttel, elvárásokkal veszi igénybe

a hálózatot (pl. csak n-0 kritériummal, tehát tartalék nélkül), szemben a teljes mértékben ráutalt fogyasztókkal, akiknek továbbra is garantálják az n-1-es szintet. Ezek a folyamatok nagyon hosszúak, és a bevezetésükhöz szükség van a társadalmi szemléletmód formálására is.

### 2.3. Intelligens hálózatok és digitalizáció

Az intelligens hálózatok (*smart grid*) koncepciója az utóbbi két évtizedben került a figyelem középpontjába. A *smart grid* lényege, hogy a 20. századi elektromos hálózatot a 21. század informatikai eszközeivel fejlesztik tovább: kétirányú kommunikáció, valós idejű megfigyelhetőség (*monitoring*), automatizált vezérlés, decentralizált döntéshozatal jellemzi. Érdemes megemlíteni, hogy ez a fogalomkör újdonságként az elosztó hálózatra igaz. Az átviteli hálózat évtizedek óta „smart”, hiszen körbemért, távvezérelhető, kapcsolható, és automatikus beavatkozásra alkalmas. Számos résztechnológia tartozik ide, amelyek közül a fontosabbakat az alábbiakban röviden mutatjuk be.



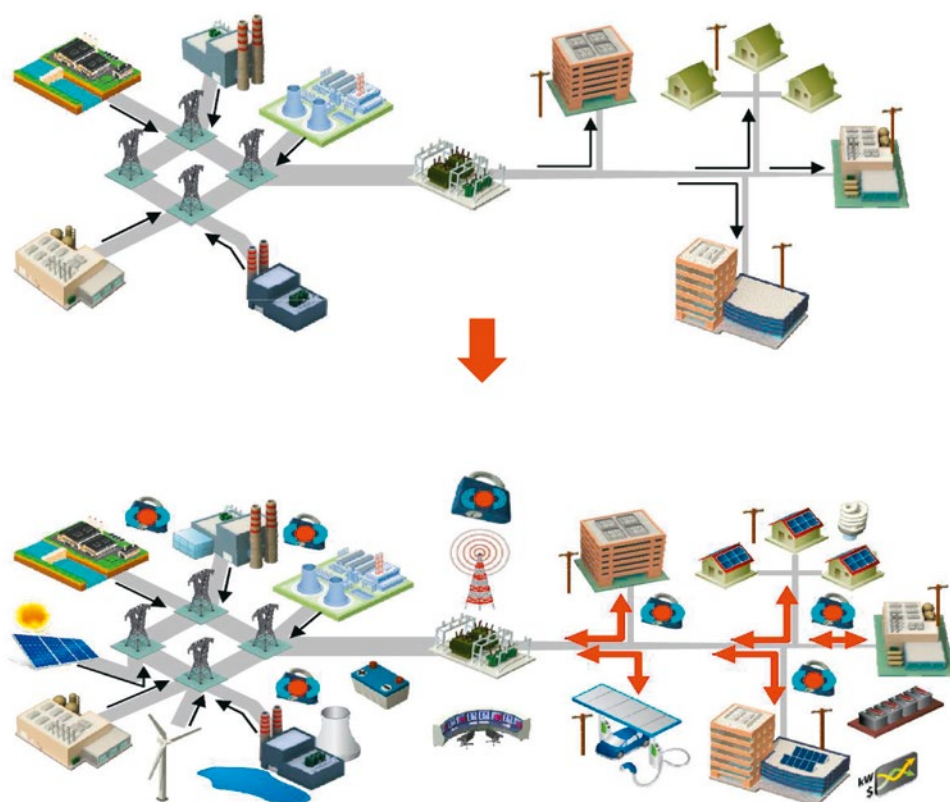
6. ábra. Okosmérő a villamos hálózaton. Forrás: Adobe Stock 521393723

**Fejlett méréstechnika** (okosmérők, AMI – *Advanced Metering Infrastructure*)

▼ A hálózat valós idejű állapotának nyomon követése érdekében sűrű mérőhálózatot kell kiépíteni (6. ábra). A cél, hogy minél részletesebben (akár a háztartások szintjén) ismerjük a fogyasztást és termelést valós időben. Jelenleg Magyarországon kompromisszumos megoldások figyelhetők meg: például cél, hogy minden közép/kisfeszültségű transzformátor mérhető legyen, de nem

követelmény az összes végpont mérése. A gyűjtött adatokat megfelelően kell feldolgozni – önmagában a nagy mennyiségű adat (*big data*) nem jelent értéket, ha nincs kinyerhető információ.

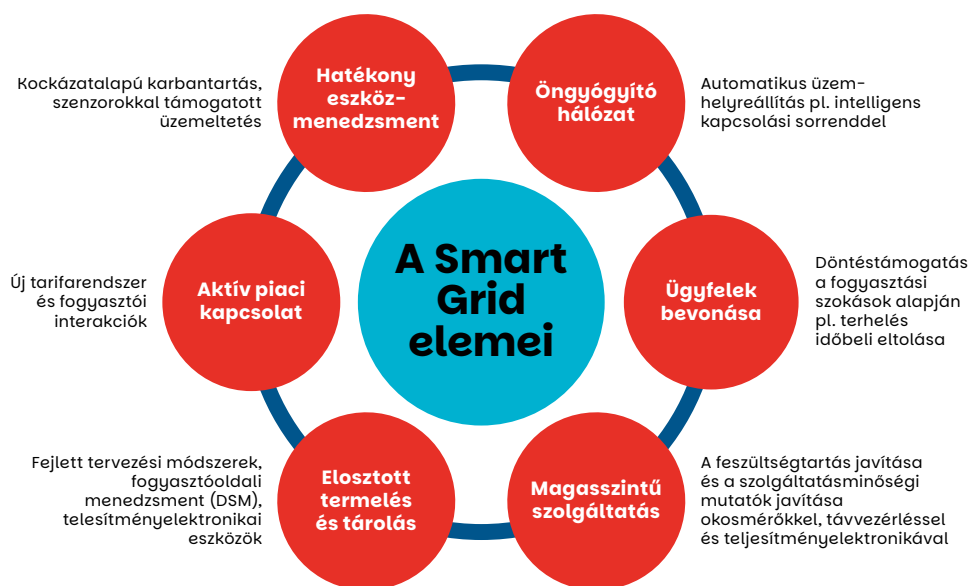
**Szenzorok és automatikus állapotfigyelés ▼** Átviteli szinten már elterjedtek a vezetékszenzorok és az időjárás-érzékelők, amelyek például a dinamikus terhelhetőséghez (*Dynamic Line Rating, DLR*) szolgáltatnak adatot. Kérdés, hogy ezek a technológiák mennyire vihetők az ügyfelekhez közelebb a hálózati hierarchiában. Alsóbb szinteken a hatalmas adatmennyiség és költség gátolhatja a teljes körű kiterjesztést. A TSO és a DSO-k megoldásai ugyanakkor közeledhetnek: például az átviteli hálózathoz bevált állapotbecslési algoritmusok a jövőben akár elosztói oldalon is alkalmazhatók, ha rendelkezésre áll elegendő mérés.



7. ábra. Hagyományos és decentralizált energiaforrásokat is tartalmazó hálózatok.  
Forrás: Molero-Mesa et al. (2015: 255)

**Kétirányú kommunikáció és vezérlés ▼** A *smart grid* kulcsa, hogy nem csak mérünk, de be is tudunk avatkozni. Az elosztott energiatermelők szabályozhatósága ennek egyik eleme. Ma Magyarországon EU-s jogszabály írja elő, hogy

a 400 kW-nál nagyobb teljesítményű inverteres termelők (pl. naperőművek) távvezérelhetőek legyenek. Ez a küszöbérték csökkenni fog, és a jövőben egyre kisebb egységeket is be kell vonni a rendszerirányításba. Nem feltétlenül drasztikus beavatkozásokra kell gondolni (pl. lekapcsolás), lehetségesek finomabb vezérlési megoldások is. Ilyen például az inverterek teljesítménytényezőjének szabályozása a feszültségtartás érdekében, vagy termelésük korlátozása szűk sávban a hálózati paraméterek stabilizálására. Ezek a lokális automatikák és távvezérelt beavatkozások összehangoltan növelhetik a hálózat rugalmasságát, de új üzemirányítási elvek kidolgozását is megkövetelik. Bevezetésük komoly informatikai/humán erőforrás ráfordítást igényel.



8. ábra. A Smart Grid elemei. Forrás: NETL (2007, 2009, 2010) alapján saját szerkesztés

**Öngyógyító hálózatok** (*self-healing grids*) ▼ A smart grid-rendszer egyik lehetséges haszna a hibák automatikus izolálása és a szolgáltatás gyors visszaállítása alternatív útvonalakon. Ehhez a közép- és magasfeszültségű hálózatban távvezérelhető kapcsolók (TMOK-k – távműködtetésű oszlopkapcsolók), automatizált védelmi- és újrapcsolási rendszerek (RECLOSER-ek) szükségesek. Magyarországon is történtek lépések ezen a téren, de a teljes öngyógyító képesség még nem általános.

**Ügyfelek bevonása** (*demand side response*) ▼ A kommunikációs- és méréstechnika lehetővé teszi a fogyasztók terhelésének befolyásolását is, például dinamikus tarifákkal vagy közvetlen terhelésvezérléssel. Ez a gyakorlatban jelentheti azt, hogy csúcsidőben bizonyos nem kritikus berendezések (pl. bojler, elektromos fűtés) lekapcsolhatók, vagy a fogyasztó anyagilag motivált a fogyasztás csökken-

**Smart Grid definíció – ERGEG (2010)**

Noha az intelligens elemek a meglévő hálózatok sok részén már léteznek, a mai hálózat és a jövő intelligens hálózata közötti különbség elsősorban a hálózat azon képességét jelenti, hogy hatékonyabban és eredményesebben tudja kezelni a megnövekedett komplexitást. Ez a megnövekedett bonyolultság többek között az alábbiak miatt alakul ki.

- Az elosztott termelés tömeges megjelenése KIF és KÖF szinten, ideértve az engedélykérelmek hatékony kezelésének szükségességét.
- A terhelési központoktól messze fekvő megújulóparkok megjelenése.
- Az ügyfelek viselkedésének változásai (például a fogyasztók aktív befollyásolása, vezérlése – DSM).
- A veszteségek csökkentése (például megfelelő elosztott termeléssel, amely a nagy fogyasztású területek közelében található).
- Az öngyógyító technológiák fokozott használata.

**Smart Grid definíció – E.ON (válasz az ERGEG-re, E.ON (2014) T & I Center belső dokumentuma alapján)**

Olyan (elosztó) hálózat, amelyet továbbfejlesztettek kiegészítő kommunikációs és információs technológiával, hogy kontrollálni tudja az egyre bonyolultabb termelési és fogyasztási mintázatokat; hogy megfelelően rugalmas terhelésmenedzsmentet tudjon szolgáltatni annak érdekében, hogy minden ügyfél és elosztott termelés a hálózathoz tudjon kapcsolódni, és piacképes legyen.

**A modern hálózat rendszerszempon-tú megközelítése (NETL, 2007)**

A modern hálózat rendszerszempon-tú megközelítése az alábbi elemeket (funkciócsoportokat) tartalmazza (8. ábra).

- Öngyógyító hálózat
- Ügyfelek bevonása
- Magasszintű szolgáltatás
- Elosztott termelés és tárolás
- Aktív piaci kapcsolat
- Hatékony eszközmenedzsment

**EPRI (2011)**

Az „intelligens hálózat” kifejezés az elektromosenergia-rendszer korszerűsítésére utal, amely monitorozza, méri és automatikusan optimalizálja az egymással összekapcsolt elemeket és részrendszereket: a központi és elosztott termelőket a nagyfeszültségű átviteli hálózaton és az elosztó rendszeren keresztül, az ipari felhasználókat és az épületautomatizálási rendszereiket, az energiatároló berendezéseket, valamint a végfelhasználó fogyasztókat (például termosztátjaikat), elektromos járművek töltését, készülékeket és egyéb háztartási eszközöket.

tésére. A fogyasztói befolyásolás eszközei üzemeltetési szintű megoldásként már ma is léteznek (pl. vezérelt tarifa, HFKV – hangfrekvenciás központi vezérlés, RKV – rádiófrekvenciás központi vezérlés), azonban a jövőben a fejlesztési tervekben is számolni kell azzal, hogy a fogyasztói viselkedés nem állandó, hanem tarifarugalmassággal bír. Fontos azonban, hogy a hálózat üzembiztonságát ne bízzuk kizárólag az ilyen puha intézkedésekre, mert a tarifa befolyásolása gazdasági és politikai érdekektől is függ, nem garantált műszaki intézkedés. Erre jó példa volt a hatóságilag támogatott lakossági gázár körüli változás: amikor a támogatott ár feltételeként meghatározott fogyasztási mennyiség felső küszöbe változott, akkor jelentős, 20%-ot meghaladó megtakarítást eszközölt a lakosság a közvetett, árjellegű ösztönzőknek köszönhetően.

Az intelligens hálózatok elterjedése számos új lehetőséget és egyben kérdést vet fel. Az egyik fontos felismerés, hogy a *smart grid*-komponensek élettartama gyakran rövidebb, mint a hagyományos hálózati elemeké. Például egy telepített beton-oszlop vagy egy kábel várhatóan 40–50 évig is funkcionálhat, ezzel szemben egy elektronikus eszköz (érzékelő, kommunikációs modul stb.) néhány éven vagy legfeljebb évtizeden belül elavulhat vagy meghibásodhat. Ez azt jelenti, hogy a hálózatfejlesztés során a hagyományos hosszú életciklusú infrastruktúra és a gyorsan avuló okoseszközök kombinációját kell menedzselni. A digitalizáció bevezetésekor ezért figyelembe kell venni a későbbi karbantartási és csereigényeket.

Jó példa erre a digitális alállomások esete. Míg régen a mechanikus védelmi relék évtizedekig működtek meghibásodás nélkül, addig egy modern, teljesen digitális védelemmel ellátott alállomásnál sokkal gyakoribb frissítésre és karbantartásra kell számítani az elektronikus alkatrészek (tápegységek, kondenzátorok stb.) öregedése miatt. Ezek hibája pedig kihatással lehet a primer (alapvetően hosszú élettartamú) berendezések rendelkezésre állására is. Összefoglalva, a csúcstechnológia bevezetése nem csökkenti, sőt bizonyos szempontból növeli a hálózat karbantartási igényét, még ha az üzemeltetési rugalmasságot növeli is.

Összességében az intelligens hálózati megoldások a jövő hálózatfejlesztésének megkerülhetetlen elemei. Alkalmazásukkor kulcsfontosságú a költség-haszon elemzés: a hálózat mely szintjén milyen mértékű digitalizáció térül meg? Például érdemes-e teljes körű szenzorhálózatot építeni kisméretű feszültségen, vagy elegendő a transzformátorállomások szintjén mérni? Mikor indokolt a középfeszültségű hálózatok automatizálása, és milyen mértékben? Ezekre a kérdésekre a választ az adott hálózat sajátosságai (fogyasztói sűrűség, meglévő infrastruktúra, üzemi zavar-statisztikák) és a technológia költségeinek alakulása fogja megadni. A következő fejezetben a hálózatfejlesztés tervezésének kihívásait tekintjük át. Ott már az említett trendek hatásai is tükröződnek.



### 3. Infrastruktúra-fejlesztési és -tervezési kihívások – fókuszban az előrejelzés nehézségei

A hálózatfejlesztés talán legkritikusabb kérdése, hogy hogyan tekintsünk előre a jövőbe egy olyan környezetben, amely folyamatosan és egyre gyorsuló ütemben változik. A villamosenergia-rendszer bővítése és átalakítása nem megy egyik napról a másikra: egy új távvezeték megtervezése, engedélyeztetése és megépítése akár 5–10 év is lehet, egy alállomás bővítése vagy új alállomás létesítése is több év. Ugyanakkor a fogyasztói és termelői igények néhány év alatt gyökeresen megváltozhatnak, például az elosztott termelés vagy az elektromos közlekedés terjedése esetében. E „tehetetlenség” miatt a hálózatfejlesztésben mindig előre kell gondolkodni – de mennyire előre, és milyen bizonyossággal?

#### 3.1. Tervezési időtáv és gördülő tervezés

Hagyományosan a nagyfeszültségű hálózat fejlesztési terveit 10 éves távlatban, gördülő jelleggel, évente frissítve szokták elkészíteni Magyarországon. Ez nem azt jelenti, hogy egyszerre 10 évre előre pontosan meghatározzák, hogy mit kell építeni. A fejlesztési terv sokkal inkább prognózis vagy stratégiai kitekintés, ami felvázolja, hogy másfél évtized múlva milyen igénybevétel várható a hálózaton, és ennek fényében milyen fejlesztési irányokat kell követni. A gyakorlatban a hálózatfejlesztés gördülő tervezés formájában zajlik. Évente felülvizsgálják és frissítik a hosszú távú terveket, beépítve az időközben meghozott beruházási döntéseket és a változó előrejelzéseket. Például, ha egy adott évben döntés születik egy új alállomás megépítéséről, azt onnantól kezdve adottságként veszik figyelembe a további tervezésben. Így a 10 éves terv nem egy 10 évente kiadott statikus dokumentum, hanem egy folyamatosan változó, mindig körülbelül 10 évre előretekintő forgatókönyv, amelyet évente aktualizálnak.

Felmerülhet a kérdés, miért ragaszkodunk a 10 éves horizonthoz, ha egyszer úgyis évente frissítjük. Ennek két fő oka van: egyrészt a nagyfeszültségű beruházások hosszú átfutási ideje és magas költségei indokolják a hosszú távú gondolkodást. Amit ma megépítünk egy 400 kV-os hálózaton, attól elvárjuk, hogy évtizedekig szolgálja az igényeket. Ha egy 400 kV-os vezetékre szükség lenne 5 év múlva, de ezt nem látjuk előre, és csak akkor kezdjük tervezni, akkor lehet, hogy 10 év csúszással készül el, komoly ellátási gondokat okozva időközben. Másrészt a tervezési időtáv meghatározása segít az erőforrásokkal való

gazdálkodásban: a rendelkezésre álló anyagi forrásokat és kapacitásokat úgy kell beosztani, hogy a hosszú távú igényeket is fedezzék. Ha túl rövid távra tervezünk, fennáll a veszély, hogy olyan beruházásokat spórolunk meg a jelenben, amelyek a jövőben sokkal drágábban lesznek pótolhatók. Ugyanakkor a túl merev, messze előreszaladó tervezés is veszélyes, mert a valóság könnyen felülírhatja az előfeltevéseket.

Az elmúlt néhány év tanulságos ezen a téren. A tervezési ciklus és a világ változásainak üteme között korábban viszonylagos egyensúly volt, de ez mára felborult. Évtizedekkel ezelőtt a villamosenergia-fogyasztás és termelés trendjei lassabban, kiszámíthatóbban mozogtak. Ma viszont néhány éven belül új erőművek tömege jelenhet meg (ld. a naperőművek számának felfutását), vagy óriási új fogyasztók léphetnek fel (pl. elektromos autók töltőhálózata, akkumulátorgyárak, új ipari parkok). A terhelési görbe alakja is összetettebb: már nem csak egy téli esti és egy nyári nappali csúcs létezik, hanem több különböző szélsőséges állapotot is megkülönböztethetünk (nyári PV csúcs alacsony terheléssel, téli esti csúcs PV nélkül, nyári éjszakai völgy nagy erőművi export mellett stb.). Ennek eredményeként a nagyfeszültségű hálózatfejlesztési eljárást is felül kellett vizsgálni és korszerűsíteni. Az új módszertan rugalmasabb, szcenárióalapú megközelítést alkalmaz a determinisztikus „egycsúcsos” tervezés helyett.

Középfeszültségen (11–22 kV) a tervezési időtáv rövidebb lehet – jellemzően 5–10 éves előretekintés elegendő, mert a projektek is kisebb léptékűek, gyorsabban megvalósíthatók. Kisfeszültségen ennél is rövidebb horizont indokolható (2–5 év), azonban érdekes módon a kisfeszültségű hálózatokban is növekszik a „tehetetlenség”. Egyrészt a hálózatok öregedése miatt ott is évtizedes távlatokban gondolkodnak a rekonstrukciónál, másrészt a bizonytalanság – hogy 20 év múlva egy adott utca fogyasztói le akarnak-e időlegesen kapcsolódni a hálózatról (off-grid akarnak-e lenni) vagy sem – indokoltá teszi, hogy ne tekintsük a KIF szintet sem teljesen rövid távúnak vagy statikusnak. Ma már valós igény lehet, hogy legalább egy 8–10 éves előrejelzés készüljön kisfeszültségen is a várható terhelésekre és a termelésre vonatkozóan.

Mára tehát a gördülő, rugalmas tervezés vált általánossá. Ez azt jelenti, hogy a hálózatfejlesztési koncepciót folyamatosan frissítik az új információk alapján. Így a tervezés ma már inkább iteratív folyamatnak tekinthető, aminek során rendszeres időközönként felülvizsgálják és az aktuális helyzethez igazítják a terveket, semmint egy egyszeri projektnek. A gyakorlatban Magyarországon ezt a feladatot a MAVIR és az elosztói engedélyesek együttműködése biztosítja. Létrejött egy prognózis munkabizottság, amelyben DSO (elosztói hálózati engedélyes) és TSO (átviteli hálózati engedélyes) szakértők közösen állítják össze a hosszú távú előrejelzéseket és tervezési feltételeket. Ez része a hálózatfejlesztési

engedélyezési folyamatnak a szabályozó hatóság (MEKH) felé. Az előrejelzéseket rendszeresen felülvizsgálják, és ha a valóság eltér a prognózistól, akkor módosítják a terveket. Jó példa erre a napenergia felhasználása: néhány éve a hivatalos előrejelzések jóval lassabb PV-felfutást vártak, amit a valóság meghaladott – így a terveket is felül kellett vizsgálni, gördülő módon igazítva az új trendhez.

### 3.2. Az igények előrejelzésének nehézségei

A tervezés alapja az igények (fogyasztói terhelés és termelői kapacitások) előrejelzése. Ez az a pont, ahol a legtöbb bizonytalanság rejlik, hiszen egyre több új eszköz jelenik meg a hálózaton, például elektromosautó-töltő, akkumulátor, hőszivattyú stb. Az alábbiakban néhány olyan területet mutatunk be, ahol különösen nehéz a prognózis.

**Új, nagy energiaigényű beruházások ▼** Az utóbbi években Magyarországon is megjelentek olyan ipari beruházások (pl. akkumulátorgyárak, autógyárak), amelyek egyenként is több tíz vagy akár száz megawatt új terhelést jelentenek egy adott térségben. Ezek gyakran politikai és gazdasági döntésektől függenek, sokszor hirtelen merülnek fel, a hálózatfejlesztési koncepciók pedig érthető okokból nem készülhettek el. Ha egy régióban bejelentenek egy óriási üzemet, a meglévő hálózat sokszor nem képes ellátni az új beruházást. Így gyorsított ütemű hálózathibabővítés szükséges, ami ad hoc módon, nagy költséggel jár. Ez sokszor nem csak az adott térség hálózatának fejlesztését igényli. Ilyen volt például Nyíregyházán és Debrecenben az ipari park fejlesztése miatt Detk–Eger 132 kV-os hálózat kapacitásának bővítése.

**Megújuló energiára építő erőműprojektek ▼** A MAVIR hivatalosan a bejelentett (engedélykérelmezett) erőművi kapacitásokkal tervez. Ugyanakkor ezek megvalósulása bizonytalan, főleg a nap- és szélerőművek esetében, ahol a beruházási hajlandóság a támogatásoktól és a piaci környezettől függ. Sok projektet jelentenek be, de nem mindegyik valósul meg a terveknek megfelelően. A tervezésben tehát valamilyen valószínűségi szemléletet is alkalmazni kell: nem triviális eldönteni, melyik projektet tekinthetjük biztosan megvalósulónak és melyik beruházás marad csak a tervezőasztalon. További nehézség a termelési profil: hiába ismert egy PV erőmű névleges kapacitása, azt is tudni kell, hogy például télen minimális termelése lesz, nyáron a déli csúcsideőben pedig meg is közelítheti a névleges termelést. Ezeket a termelési profilokat már modellezni kell a hálózat szempontjából.

**Demográfiai és gazdasági trendek ▼** Hosszú távon a népesség és a gazdaság szerkezete is hat az igényekre. Például az előregedő vagy csökkenő népességű térségekben stagnálhat vagy akár csökkenhet is a villamosenergia-fogyasztás,

míg a fejlődő városi agglomerációkban nő. A hálózatfejlesztésnek elvben reagálnia kellene ezekre is. Például ahol várhatóan visszaesik az igény, nem biztos, hogy érdemes csúcsra bővíteni a hálózatot. Egyúttal a nagyvárosokban lévő hálózatoknál a 10 kV-os kábeles ellátás már vagy kevés vagy jelentős táppontsűrítésre van szükség. Felvetődik a 120 kV-os kábeles ellátás elterjedtebb alkalmazása, ami szintén sok feladatot vonna maga után. A gyakorlatban a tervezésben a demográfiai hatásokat közvetetten szokták figyelembe venni, például a KSH előrejelzései alapján korrigált terhelésnövekedési ütemekkel.

**Elektromos közlekedés ▼** Az elektromos járművek (EV-k) terjedése Magyarországon is megindult, bár jelenleg még a teljes energiafelhasználáshoz képest elenyésző ennek változásnak a hatása. Viszont a jövőben exponenciálisan nőhet a járműtöltők száma és teljesítményigénye. A nagy teljesítményű villámtöltők akár 150–300 kW-osak is lehetnek egyenként. Így, ha egy térségben tömegesen elterjed az e-mobilitás, az elosztó hálózati igényugrást okozhat és jelentős hatással lehet az alállomási fejlesztésekre is (pl. M3-as autópálya melletti töltők fejlesztése és Mezőkövesd alállomás bővítése). Ráadásul a töltési igény időben koncentrálódhat (pl. délutáni órákban, munka után mindenki tölteni fogja az autót). Az előrejelzés itt attól függ, mennyire gyorsan csökken az elektromos járművek ára, milyen ösztönzők lesznek, illetve hogyan alakul a töltési infrastruktúra. Ez egy nagy bizonytalanságú terület, de a tervezés nem hagyhatja figyelmen kívül, mert 5–10 év múlva jelentős többletterhelést hozhat.

**Fogyasztóimagatartás ▼** A jövő hálózatát az is befolyásolja, hogyan viselkednek a fogyasztók. Ha például a jövőben elfogadottá válik, hogy az áramellátás nem 99,99%-ban folytonos, hanem néha szünetelhet (mert a fogyasztók rendelkeznek otthoni tárolóval vagy szünetmentes tápellátással, pl. számítógépek esetén már ma is tolerálható egy pár másodperces kiesés), akkor az ellátásbiztonságra vonatkozó igény mérséklődhet. Természetesen itt rövid idejű kiesésekre kell gondolni, órás vagy napos ellátáskimaradást nem hivatott áthidalni az otthoni akkumulátor sem. Ezt nehéz számszerűsíteni, de gondoljunk bele: ha a háztartások fele mondjuk telepít egy 5 kWh-s akkumulátort vésztartaléknak, akkor akár azt is mondhatnánk, hogy a KIF hálózaton engedhető néha egy-egy rövidebb kimaradás anélkül, hogy a felhasználói élmény sérülne.

Ez felveti az n-1 tervezési kritérium újragondolását is: eddig axióma volt, hogy a fontosabb hálózati elemeket úgy kell méretezni, hogy egy elem kiesése (n-1) esetén is folyamatos legyen az ellátás. De ha a fogyasztó rendelkezik alternatívával (pl. saját generátor vagy akkumulátor), akkor lehet, hogy bizonyos helyzetekben elfogadható az, hogy egy kiesés idején szűkített üzem vagy rövid szünet legyen. Természetesen ez nem egyszerű kérdés, hiszen a fogyasztók nem egységesek, és a döntést a szabályozási környezet is befolyásolja (pl. kártérítési kötelezettség áramszünetért stb.). Jelenleg inkább azon az állásponton vannak a szakemberek,

hogy az  $n-1$  lazítása helyett a szolgáltatási szint differenciálása lehet az út (ahogy a 2.2. fejezetben is említettük a külön szerződéses ellátást).

Mindezen bizonytalanságok miatt a hálózatfejlesztési tervezésre is igaz a mondás: „az egyetlen biztos pont a bizonytalanság”. A tervezők feladata, hogy rugalmas keretrendszert alkossanak. Az egyik módszer az alternatív forgatókönyvek felállítása (szcenárióelemzés). Például készülhet egy optimista forgatókönyv magas PV és EV penetrációval, és egy konzervatív forgatókönyv lassabb növekedéssel. A hálózatot pedig úgy kell megtervezni, hogy a két szélsőérték közötti tartományban megfelelően működjön, vagy legalábbis az extrém esetekhez legyen vészforgatókönyv.

Ehhez kapcsolódik az idősoros szimulációk alkalmazása is a tervezésben. Ahelyett, hogy csak egy-egy csúcállapotot néznénk, egyre inkább az év különböző időpontjait szimulálják (pl. tipikus téli nap, tipikus nyári nap, extrém hideg nap, extrém napos nap stb.). Nem kell feltétlenül 8760 órás szimulációra gondolni, de akár több száz jellemző időpontot is érdemes vizsgálni, hogy a hálózat viselkedése jobban érthető legyen. Itt persze kompromisszum kell: ha a bemenő adatok (pl. fogyasztói profilok) bizonytalanok, akkor a túl részletes szimuláció látszólagos pontossága félrevezető lehet. Sok esetben néhány jól megválasztott kritikus szcenárió többet ér, mint egy nagy mennyiségű bizonytalan adatból lefuttatott éves szimuláció.



9. ábra. A változó fogyasztói viselkedés alapján egyre komplexebb előrejelzésekre van szükség.  
Forrás: Adobe Stock 113146464

Összegzésképp, a tervezési kihívásokra adott válasz a proaktivitás és adaptivitás ötvözése. Proaktívnak kell lenni, azaz előre gondolkodni, tartalék nyomvonalakat biztosítani (pl. a rendezési tervekben fenntartani helyet jövőbeli vezetéknek), és bizonyos esetekben kicsit túlméretezni a hálózatot a jövő igényeire tekintettel. Ugyanakkor adaptívnak is kell lenni: ha a világ más irányt vesz, gyorsan korrigálni kell a terveket, gördülő módon frissíteni kell a koncepciót. A két megközelítés nem ellentétes, hanem kiegészíti egymást. Ahogy egy szakértő megfogalmazta: *„A fejlesztési koncepciót a jelen ismereteinknek megfelelően kell kidolgozni, és a jövőben folyamatosan érkező inputoknak megfelelően átgondolni és átdolgozni.”*

## 4. A hálózattervezés műszaki és gazdasági aspektusai

A villamos hálózat tervezése egyszerre műszaki optimalizálási feladat és gazdasági döntés. A műszaki szempontok (pl. feszültségesés, hálózati veszteségek, üzemzavari tartalékok) és a gazdasági megfontolások (beruházási költség, megtérülés, tarifahatások) egyaránt meghatározzák, milyen fejlesztési megoldásokat választunk. E fejezet áttekinti a legfontosabb műszaki-gazdasági dilemmákat, úgymint az ellátásbiztonság és a költséghatékonyság kérdéskörét, a költségek megoszlását és megtérülését, valamint a szabályozási környezet hatását a hálózatfejlesztési döntésekre.

### 4.1. Ellátásbiztonság kontra költséghatékonyság – az $n-1$ dilemma

A villamosenergia-hálózatok tervezésében hagyományos elv az  $n-1$  kritérium, ami azt jelenti, hogy a rendszernek egy tetszőleges egyedi komponens (generátor, transzformátor, vezeték) kiesése esetén is képesnek kell lennie a fogyasztók kiszolgálására jelentős zavarok nélkül. Ez az elv garantálja a magas ellátásbiztonságot, azonban viszonylag erős hálózathoz vezet, hiszen tartalékkapacitásokat kell beépíteni a rendszerbe. A megújuló energiatermelés növekvő aránya és az alacsony kihasználtságú hálózati szakaszok miatt felmerült a kérdés, hogy meddig ragaszkodjunk az  $n-1$  mindenáron való biztosításához.

Ha a jövő hálózataiban lesznek olyan részek, amelyek normál üzemben alig terheltek (például mert a lokális termelés ellátja a fogyasztást), de időnként mégis nagy csúcsok mennek rajtuk keresztül (pl. télen, amikor nincs PV termelés), akkor az  $n-1$  tartása azt jelentené, hogy ezeket a szakaszokat is kétpályássá kell tenni vagy hurokkal ellátni – ami óriási beruházási igényt támasztana a kevés üzemóra kedvéért. Emellett az átviteli hálózat vonatkozásában a piaci jellegű energiateranszfer, valamint az atomerőművek körüli hálózatok kritikus jellege miatt nem csak  $n-1$ , de adott esetben  $n-2$  is szükséges lehet. Gazdasági szempontból ez nem biztos, hogy ésszerű. Felmerülhet alternatívaként, hogy bizonyos ritka esetekben inkább a fogyasztás korlátozását vagy más operatív intézkedést (pl. átmeneti feszültségcsökkentést vagy terheléshelyezést) alkalmazzunk, mintsem minden eshetőségre „betonba öntsük a kapacitást”.

A másik oldalról viszont a felhasználók elvárása a szinte 100%-os rendelkezésre állás, és a szabályozó hatóság (MEKH) is ennek szellemében határozza meg az

elosztók kötelezettségeit. Gondoljunk a szolgáltatásminőségi (pl. SAIDI – átlagos kiesési idő) és hasonló mutatókra, amelyeknek a folyamatos javítását írják elő. Ma a digitális eszközök és a fogyasztók valamennyire toleránsabbá váltak a villamosenergia-ellátás minőségére: például egy laptopot vagy telefont nem zavar egy pár másodperces áramszünet, mert akkumulátor van benne. Ám egy asztali számítógép azonnal leáll. A háztartási méretű tárolók terjedése is oda vezethet, hogy a fogyasztók hajlandóak lehetnek némileg rosszabb ellátásbiztonságot elfogadni, ha cserébe más előnyt kapnak (pl. olcsóbb energia vagy nagyobb függetlenség érzése). Ezt a kérdést azonban körültekintően kell kezelni. A rendszerszintű kockázatokat és felelősséget nem lehet teljesen áthárítani a fogyasztóra pusztán tarifális eszközökkel.

Jelenleg az a konszenzus, hogy a műszaki minimumokat mindenképp teljesíteni kell a hálózatfejlesztésben. Ezek például: a megengedett feszültségeltérésen belül maradás minden fogyasztónál, a hálózati elemek termikus határainak betartása normál üzemben, a rövidzárlati szint megfelelő kezelése stb. Az n-1 is idetartozik a kritikus infrastruktúrák esetében (pl. országos átviteli hálózat). Azonban helyi elosztó hálózati szinten lehetnek olyan kompromisszumok, hogy bizonyos kisebb településeknél nem tartanak fenn kétoldali betáplálást, hanem ha kiesik a vezeték, akkor kiesik egy rövid időre a szolgáltatás. Ilyen ma is előfordul, jellemzően kisebb feszültségszinteken, ahol a gazdasági racionalitás nem enged meg mindenhova hurkot. A jövőben az ilyen megoldásokat tovább finomíthatjuk: például, ha egy faluban a házak felénél van akkumulátor, akkor egy 1-2 órás áramszünet akár észrevétlen is maradhat számukra. Természetesen a házak másik felénél nincs akkumulátor – azaz ösztársadalmi szinten még nem hagyatkozhatunk erre a megoldásra. A kiesésnek vagy korlátozásnak személyi felelőssége és egyéb, nem műszaki következményei is lehetnek. Az ellátásbiztonság árát meg kell fizetni.

A hálózatfejlesztési döntéseknél a költség-haszon elemzés fontos eszköz. Az n-1 biztosítása növeli a beruházási költségeket, de csökkenti a nem szolgáltatott energia kockázatát. A nem szolgáltatott energiának (illetve a megbízhatóság-elemzésekben ennek monetáris értékének) és a beruházás költségének összevetésével lehet optimális pontot találni. A tarifarendszer jelenleg nem minden esetben tükrözi ezeket a finom különbségeket, hiszen a költségek nagy része szétterül az összes fogyasztó között. Azonban, ahogy korábban említettük, a jövőben differenciáltabb megoldások jöhetnek. Például, ha egy ipari park extra biztonságot akar (n-2 szintű ellátást saját tartalékkal, ami azt jelenti, hogy 2 tetszőleges elem kiesése esetén is folyamatos az ellátás), azt extrán megfizetheti vele az elosztó. Ellenben, ha egy lakóközösség beéri az n-0 ellátással (azaz, ha egy elem kiesik, az ellátás megszakadhat), mert van saját belső áramellátásuk, azaz belső mikrohálózatuk, akkor olcsóbban kaphatják az áramot a piaci árhoz képest.

Ezek a felvetések ma még inkább elméletiek, de a technológia és a fogyasztói attitűdök változásával műszaki-gazdasági optimalizáció alakulhat ki az ellátásbiztonság terén. Nem elképzelhetetlen, hogy 20-30 év múlva a jelenlegi 99,9% helyett mondjuk 99% ellátásbiztonságra tervezünk bizonyos elosztó hálózati részeket, mert a fogyasztóknak addigra lesz tartalékellátásuk. Ez persze nem jöhet létre szabályozás és közmegegyezés nélkül. A jelenlegi gyakorlat egyelőre a hagyományos magas biztonságot preferálja, de a hálózatfejlesztésben már elindult a párbeszéd ennek újragondolásáról.

## 4.2. Költségek, megtérülés és finanszírozás

A villamos hálózat fejlesztése tőkeigényes: nagyberuházásokat igényel, amelyek megtérülési ideje gyakran évtizedes. Ráadásul a hálózatüzemeltetők bevételeit szabályozott tarifák határozzák meg, nem a szabadpiacon keletkeznek. Ez sajátos helyzetet teremt a beruházások gazdasági értékelésénél. A következő szempontok lényegesek.

**Beruházási döntések mozgatórugói ▼** Ideális esetben a hálózatfejlesztési beruházásokat a fogyasztói igények és a minimális költség elve határozza meg. A valóságban azonban a döntések mögött számos egyéb tényező is áll. Egyrészt, vannak műszaki minimumok, amiket akkor is teljesíteni kell, ha a beruházás gazdaságilag az adott pillanatban nem térülne meg. Például, ha egy transzformátor már 100%-os terheléssel üzemel, akkor telepíteni kell még egyet vagy nagyobb kapacitásút, különben nem tud bővílni a rendszer. Másrészt, a jövőbeni elvárások is befolyásolják a döntéseket. Lehet, hogy ma még elég lenne egy kisebb fejlesztés, de 5 év múlva már nem, ezért inkább most nagyobbat lépünk (ezt hívják *gold plating* problémának vagy indokolt esetben előrelátásnak). Megemlítendő az *Eurelectric Grids for Speed* jelentése, amely a hálózatfejlesztés egyik kulcsstratégiájaként nevesíti az ún. *anticipatory investment*-et, vagyis a hálózati kapacitás előrelátó, a várható igényekhez igazodó – akár célzott „túlméretezéssel” járó – kiépítést, hogy a villamosítás és a megújulók integrációja ne ütközzön szűk keresztmetszetekbe. E megközelítés sikeréhez megfelelő szabályozói felhatalmazás és finanszírozási keretek kellenek, mert így a hálózatüzemeltetők gyorsabban és összköltségben is hatékonyabban tudnak beruházni és csatlakoztatni. A harmadik tényező a szabályozói környezet: a MEKH mint megrendelő hatóság, bizonyos mutatókat (pl. megbízhatóság, veszteségi szint) elvár, és a hálózatüzemeltetők ezek teljesítésére is optimalizálnak. A negyedik tényező a céges stratégia: egy állami monopóliumban vagy egy magáncégben eltérnek a stratégiai célok, de mindenhol van üzleti terv és megtérülési (ROI – *Return of Investment*) elvárás.

**Költségmegtérülés és tarifa ▼** A hálózat üzemeltetési és tőkeköltségei a villamosenergia-tarifában térülnek meg, amelyet végső soron a fogyasztók fizetnek

meg. Jelenleg Magyarországon a hálózati költségeket nagyrészt az átvitt energiamennyiség arányában osztják szét (energiaalapú tarifa kWh-ra lebontva). Ez a modell akkor működik jól, ha mindenki körülbelül egyforma módon veszi igénybe a hálózatot. Ám, ahogy említettük, ha sokan csökkentik a vételezésüket saját termeléssel, a maradék fogyasztókra torlódhatnak a költségek. Ez tarifaemelkedéshez vezethet, ez pedig további hálózatról való leválásra ösztönöz – egyfajta negatív spirál.

Ezért vetődik fel hosszú távon a teljesítményalapú díjak bevezetése (ami a rendelkezésre álló kapacitást honorálja, nem a megvett energiát). Így, ha valaki fenntart egy  $3 \times 16$  A-os csatlakozást tartalékkellátásnak, akkor is fizetné a fix költségét, még akkor is, ha alig fogyaszt áramot az országos hálózathoz. Ez igazságosabbnak tűnik a jövőben, de a mai tarifastruktúra még nem teljesen ilyen.

Megjelentek új megközelítések is, mint például az ún. *utility death spiral*, amelynek lényege, hogy ha a hálózati (túlnyomórészt fix) költségeket kWh-alapú díjakból próbálják beszedni, a fogyasztás csökkenése (saját termelés pl. PV, energiahatékonyság növelése) díjemeléseket kényszerít ki. Ez további lecsatlakozásokat és újabb bevételkiesést generál – végső soron az engedélyes pénzügyi stabilitását veszélyeztetve. Ezzel szemben több ország jelentős mértékben teljesítményalapú hálózati díjakat alkalmaz: a felhasználók fizetnek a szerződött kW-kapacitásért és/vagy a havi csúcsterhelésük után, ami jobban fedezi a fix költségeket és mérsékli a spirált.

**Finanszírozási modellek ▼** Az átviteli hálózat fejlesztését a MAVIR végzi, a beruházásokat részben saját tőkéből, részben hitelből finanszírozza, de a végső pénzforrás a rendszerhasználati díj (2025-től átviteli díj). Az elosztóknál hasonló a helyzet: a MEKH által jóváhagyott hálózathasználati díj adja a keretet. Fontos, hogy a szabályozás ösztönzőket adjon a szükséges fejlesztésekre. Ha például a tarifát befagyasztják és a költségek nem térülnek meg, az elosztó cég érdekeltsége csökken a beruházásban (azaz nem akar veszteséget termelni). Ez a befektetői oldal és a hatóság közötti finom egyensúly kérdése. Jelenleg a magyar szabályozásban létezik úgynevezett portfóliómechanizmus és ösztönzés bizonyos beruházási mutatókra, de a részletek túlmutatnak e könyv keretein.

**Külső finanszírozás, EU-támogatások ▼** Nemzetközi szinten az EU is támogat bizonyos hálózatfejlesztési projekteket (főleg határkeresztező kapacitásokat, okoshálózati pilotprojekteket). Magyarország számára is elérhetőek például az intelligens hálózati fejlesztésekre vagy a megújulóknak integrációjára EU-források. E támogatások javíthatják a projektek megtérülését és gyorsíthatják a megvalósítást. Jó gyakorlat például a HORIZON2020 vagy utódprog-

ramjai keretében futó pilotok, a PCI (*Projects of Common Interest*) források, illetve a Kohéziós Alapból finanszírozott hálózatfejlesztések (pl. vidéki hálózatok korszerűsítése, okosmérők telepítése).

### 4.3. Szabályozási és piaci hatások

A hálózatfejlesztés nem légüres térben történik, hanem az energiapolitikai és piaci környezet hatásai között. Néhány fontosabb összetevő:

**EU-irányelvek és előírások ▼** Az Európai Unió egységes energiapiacot épít, amelynek része az, hogy a nemzetközi összeköttetések kapacitásának legalább 70%-át biztosítani kell a kereskedelmi piac számára (ez az ún. 70%-os szabály). Ez magyar szemszögből azt jelenti, hogy a határkeresztező 400 kV-os vezetékeket úgy kell üzemeltetni, hogy kapacitásuk döntő részét ne kössék le belső forgalmak (*loop flow*-k). Ha a belső hálózati szűk keresztmetszetek miatt ezt nem lehet garantálni, az problémát okoz az üzemirányításban. A diszpécsereknek kell esetleg forgalomkorlátozást bevezetni, vagy ahogy a gyakorlatban történik: ideiglenesen bizonyos túlterhelést engedélyeznek.

Ez a szabályozás nyomást gyakorol a hálózatfejlesztésre, azaz a kritikus szakaszoknál a hálózat bővítését és új technológiák alkalmazását vetíti előre (pl. DLR – dinamikus vezetékterhelhetőség, amely időjárásváltozásból adódóan enged plusz áramot a vezetékeken). A nemzetközi megállapodások – a *European Green Deal* és a *Clean Energy Package* – további előírásai is érintik a tervezést: ilyen például a *smart metering* rollout (okosmérők tömeges telepítése) vagy a hálózati szabályzatok (*Network Codes*), amelyek részletes műszaki követelményeket szabnak meg például a megújulócsatlakozásokra és a feszültség szabályozásra.

**Piaci trendek ▼** A villamosenergia-piac decentralizálódása (pl. helyi energia-közösségek, közvetítő nélküli kereskedelem – *peer-to-peer trading*) még gyerekcipőben jár, de a hálózatfejlesztésnek figyelembe kell vennie, hogy a jövőben az energiaáramlási útvonalak is megváltozhatnak. Ha például egy falusi közösség saját naperőműve túltermel, és az így keletkező többletet közvetlenül egy szomszéd faluban értékesíti, az is a hálózaton folyik át. Ám ez más jellegű igény, mint a hagyományos *top-down* ellátás. A flexibilitási piacok megjelenése is várható: a fogyasztók (vagy termelők) rugalmasságot (*demand response*) adhatnak el a hálózat üzemeltetőjének. Ez befolyásolja a fejlesztési igényt: ha olcsóbban lehet flexibilitást venni, mint vezetéket építeni, akkor az építkezést el lehet halasztani. További előny lehet, hogy a flexibilitás igénybevételével időt lehet nyerni a hálózat megépítéséhez. Ez azonban már az üzemeltetés és fejlesztés határterülete, mindenesetre gazdasági szempontból releváns.

**A „Megrendelő” definíciója ▼** Amikor a hálózatfejlesztést egyetlen állami vállalat végezte, világos volt, hogy az állam (illetve a központi tervezés) diktálja, hogy mi épüljön. Ma a helyzet összetettebb: a fejlesztéseket az elosztók és a MAVIR végzik, de a MEKH hagyja jóvá (esetleg kötelez rá), a finanszírozást a fogyasztók adják, és az egész a nemzeti energiapolitika keretében zajlik. Mondhatni, a *megrendelő* a MEKH, aki a fogyasztók érdekeit képviseli, de a *beruházó* a hálózati engedélyes cég, amelynek meg is kell térüljön a befektetés.

Hosszú távú koncepciók kidolgozásánál a konkrét megrendelői igény helyett inkább igényhalmazokról beszélünk – például bizonyos régióban ennyi teljesítményigény-növekedés várható stb. A döntéshozatal során a MEKH és az engedélyesek folyamatos egyeztetése biztosítja, hogy konszenzus legyen arról, mi szükséges és mi nem. E folyamat optimuma nagyban befolyásolja a fejlesztések ütemét és hatékonyságát.

**Jogi környezet, engedélyezés ▼** Gyakorlati gazdasági szempont, hogy az új hálózati nyomvonalak létesítésének engedélyezése Magyarországon (is) nagyon idő- és munkaigényes. A szükséges területek és a környezetvédelmi engedély megszerzése, valamint a lakossági ellenállás mind lassítja a folyamatot. Emiatt a beruházások költsége is nő (hosszabb előkészítés, esetleg kártalanítások). Ahol lehet, ezért igyekeznek már meglévő nyomvonalat használni (pl. régi 220 kV vezeték helyére 400 kV-ot építeni stb.). A jogi egyszerűsítések (pl. kiemelt beruházássá nyilvánítás) bizonyos esetekben segítenek, de nem általánosak. Ez a tényező is a hosszú távú gondolkodást erősíti. Ha tudjuk, hogy 10 év múlva kelleni fog egy vezeték, már most le kell foglalni a helyét a rendezési tervben, különben utána sokkal drágább lesz.

Összefoglalva, a hálózattervezés műszaki-gazdasági döntései komplex optimalizálást igényelnek, ahol a fő cél a megfelelő időben, megfelelő mértékben és helyen elvégzett fejlesztés, ami nincsen sem túl-, sem alul tervezve. Ehhez a tervezőknek egyre fejlettebb eszközökre van szükségük. A következő fejezetben bemutatjuk, hogy a különböző hálózati szinteken milyen jellegű döntéseket kell meghozni (pl. feszültség szint kiválasztása), és melyek a jövőbeli irányok ezen a téren.

## 5. Hálózati feszültség szintek kialakítása és jövőbeli szerepük

A villamos energia továbbításának és elosztásának hatékonysága nagymértékben függ a használt feszültség szintektől. A megfelelő feszültségi szintek kiválasztása a hálózat tervezése során egyensúlyt teremt a veszteségek minimalizálása, a műszaki megvalósíthatóság és a gazdaságosság között. Ebben a fejezetben áttekintjük a főbb hálózati szintek (átviteli és elosztó) szerepét, és megvizsgáljuk, milyen változások várhatók a feszültség szintek használatában a jövőben.

### 5.1. Átviteli szint(ek) – 220 kV vs. 400 kV, és a 132 kV sajátos esete

A magyar átviteli hálózat két fő feszültség szintre épül: 400 kV és 220 kV. A 400 kV-os hálózat alkotja az ország gerincét, nemzetközi kapcsolatokkal is rendelkezik, és alkalmas nagymennyiségű energia továbbítására nagy távolságokra, viszonylag kis veszteséggel. A 220 kV-os hálózat korábban (a 400 kV kiépülése előtt) alaphálózati szerepet vitt, ma inkább regionális átvitelnek tekinthető, illetve összekötő szerepe van a 132 kV-os alhálózatok között is. A 220 kV-os hálózat egy része elöregedett, és folyamatban van néhány szakasz 400 kV-ra való átépítése (pl. a kelet-magyarországi régióban).

Az a trend rajzolódik ki, hogy hosszú távon a 400 kV dominanciája nő, a 220 kV pedig vagy feltranszformálódik 400 kV-ra, vagy átvesz egyfajta nagyobb elosztói szerepet (például a 132 kV körzetesítése után a 220 kV lehetne a körzetközi kapcsolat). Ez egyelőre még elvi szinten létezik; a gyakorlatban a 220 kV-ot addig üzemeltetni kell, amíg a terhelések megkívánják. Jelentős beruházás lenne ugyanis mindenhová 400 kV-os rendszert kiépíteni.

A 132 kV Magyarországon az átmenet az átviteli és elosztói szint között. Mivel a 132 kV-os hálózat ma hurkoltan üzemel, lényegében integrálódik az átviteli hálózatba – sőt, alá is hurkolja azt. A korábbi fejezetekben részletezett körzetesítés épp ezt az aláhurkolást szüntetné meg. Megjegyzendő, hogy a körzetesítési megközelítés csak egy lehetséges opció, egy jövőbeni fejlesztési/üzemeltetési irányvonal, amely beleillik a hálózati koncepciók újragondolásába mint témába. Ám ez még nem eldöntött irány vagy megoldás, csak egy lehetséges út. Ha ez megtörténik, a 132 kV tisztább elosztói főgerinc szerepet kaphat.

Európai kitekintésben, a 110/120 kV-os szint hovatartozása vegyes képet mutat. Van, ahol a TSO üzemelteti (pl. Németországban a 110 kV-ot általában a regionális

áramszolgáltatók üzemeltetik, de vannak kivételek; Belgiumban 70 kV a határ; Franciaországban az átviteli hálózati engedélyes RTE kezeli a 63 kV felettit stb.), és van, ahol a DSO. Magyarország a DSO-kra bízta, ami miatt a TSO és DSO közötti határ a 400/132 kV-os és a 220/132 kV-os transzformátorok 132 kV-os átadási pontjainál húzódik. Ez a felállás bevált, de a jövőbeli szerepek tisztázásakor fel kell tenni a kérdést: lesz-e a 132 kV-nak átviteli funkciója a jövőben, vagy sem? Ha marad a vegyes funkció (pl. mert a körzetesítés nem valósul meg), akkor együtt kell élni az aláhurkolt rendszerrel és annak problémáival, illetve több MAVIR–DSO koordinációval. Ez ma is megvan: minden új igénynél egyeztetés zajlik, hogy TSO- vagy DSO-szinten szolgálják-e ki. Az igazi kérdés az, hogy van-e jelentős üzemviteli, üzemeltetési probléma a jelenlegi rendszerrel vagy nincs. Ha nincs, vajon érdemes-e minden áron változtatni a működésen?

## 5.2. Középfeszültség – sugaras vagy hurkolt? Új technológiák a KÖF szinten

A középfeszültségű (11–22 kV) hálózat hagyományosan sugaras struktúrában üzemel: a tápponttól (elosztó transzformátor alállomástól) kiinduló vezetékek végigfutnak több utcán vagy településen, és a végük felé elfogy a terhelés. Általában lehetőség van tartalékbetáplálásra szomszédos ágakról íves-gyűrűs formában, de normál üzemben a hurok nyitott (tehát sugaras üzemet tartanak). Ennek oka, hogy így egyszerűbb a védelmi koordináció, a feszültségesés-számítás és a hibabehatárolás.

Azonban felmerül a kérdés: a jövőben, amikor már a fogyasztók is termelők, és többirányú energiaáramlás van, nem lenne-e érdekesebb a középfeszültségű hálózatot is hurkoltan (zárt hurkokkal) üzemeltetni? Mit vonna ez magával üzemeltetési szempontból? Ezt nevezi a szakirodalom néha *mesh grid*-nek, szemben a *radial grid*-del. Egy hurkolt diszpozíció nagyobb rugalmasságot adhat, mivel egy adott pont többfelől kaphat táplálást, könnyebb lehet terhelést átcsoportosítani. Működik is ilyen a világ számos nagyvárosában (ahol a 11 kV vagy 22 kV hálózat gyűrűs rendszerű az ellátás folyamatossága miatt). Hátránya viszont a bonyolultabb védelem és a hálózati számítások nehezítettsége (pl. hibaáramok iránya). Az intelligens hálózati eszközök terjedésével ezek a hátrányok csökkenhetnek, mert a védelem adaptívabb, a hálózat vezérelhetőbb. Így hosszabb távon elképzelhető a középfeszültség szélesebb körű hurkolt üzeme.

Természetesen nem cél önmagáért hurkoltá tenni a rendszert: előbb érdemes pilotprojekteken megnézni, hogy a nyereség (kevesebb kiesés, jobban eloszló terhelés) megéri-e a plusz beruházást (távvezérelt kapcsolók, védelmi eszközök). A terhelés alatt szabályozható transzformátorok (OLTC) alkalmazása középfeszültségen szintén olyan újítás, ami segíthet a feszültségprofil tartásban hurkolt és PV-terhelt hálózatokon. Jelenleg a 11/0,4 kV-os és 22/0,4 kV-os transzformátorok nem

szabályoznak (fix áttételűek), de léteznek már olyan típusok, amik terhelés alatt is képesek fokozatot váltani, és így tartani tudják a 0,4 kV oldali feszültséget szűk határok között még változó betáplálás mellett is. Ha ezek széles körben elterjednek, a középfeszültségű hálózat terhelése is optimalizálható, mert kevésbé fogja a feszültségkorlát limitálni a továbbítható teljesítményt.

Egy másik trend középfeszültségen a már említett kábel vs. légvezeték kérdése. A földkábelek arányának növekedése egyértelmű (főleg városokban, de lassan vidéken is). A teljesen kábeleztetett középfeszültségű hálózat üzemi jellemzői mások: a kapacitív meddő táplálása megnő, ami könnyen túlfeszültséget okozhat kis terhelésnél. A jövő hálózatfejlesztésében ezért gondoskodni kell megfelelő meddőkompenzációról (pl. automatikus feszültség szabályozó berendezések, vagy akár a PV inverterek meddőszabályozásának kihasználása). Számolni kell azzal is, hogy a kábeles hálózatok üzemzavari struktúrája más – a kábelmeghibásodás ritkább, de ha bekövetkezik, nehezebb a hibát felderíteni és javítani. Ezt kompenzálendő, az automatizált szakaszolás és hibahely-meghatározás kerül előtérbe (*smart grid* elemek).

### 5.3. A kisfeszültség jövője a prosumer-világban

A kisfeszültségű (0,4 kV-os) hálózat kapcsolódik a legközvetlenebb módon a fogyasztókkal. Hagyományosan ez egy passzív hálózat volt, egyszerű topológiával (jellemzően fastruktúra, a transzformátortól kiinduló több, sugaras leágazás). A jövő kisfeszültségű hálózata azonban már egy aktív rendszer: sok háztartási méretű termelő (napelem), esetleg tároló, okos fogyasztók is bekapcsolódnak. Felmerül, hogy szükség van-e radikális átalakításra ezen a szinten, vagy elegendő a fokozatos alkalmazkodás. Az alábbiakban néhány várható fejleményt mutatunk be.

**Szigetesedés lehetősége ▼** Ahogy korábban említettük, technikailag egy utcányi háztartás akár le is válhat és alkothat egy mikrohálózatot (*microgrid*). Ehhez persze szabályozók és megfelelő védelem kellenek. A kisfeszültségű hálózat jövője szempontjából fontos, hogy a szabványok és előírások engednek-e ilyen megoldást. Jelenleg a háztartási PV rendszerek a hálózattal szigetüzemben nem működhetnek biztonsági okokból (az inverter leold, ha nincs hálózati feszültség, az úgynevezett *szigetüzem elleni védelem* miatt).

Ha azonban a jövőben megengedjük a rövid idejű szigetüzemet (pl. utcaközösségek szünetmentesként való üzemelését), ahhoz a KIF hálózatnak is idomulni kell. Ehhez például speciális kapcsolók kellenek, amik le tudják választani az utcaszakaszt automatikusan és vissza is kapcsolják. Ezek ma még ritkaságok, és sok kérdést felvetnek: ha szigetben üzemel egy fogyasztói kör, akkor elkülönített piaci résztvevők lesznek önálló menetrenddel, frekvencia- és feszültség-szabályozási igényrel? Továbbá a szereléstechnológiában is szemléletváltásra van szükség:

a FAM (feszültség alatti munkavégzés) technológia számtalan lehetőséget hordoz, de egyelőre korlátozott területen alkalmazzuk.

**Feszültség szint növelése ▼** Egy extrémebb gondolat: lehetséges-e, hogy a mai 0,4 kV-ot valamikor nagyobb szintre transzformáljuk (pl. 0,69 kV vagy 1 kV) vagy egyenáramú ellátásra, hibridre térjen át? Ennek a célja az lehetne, hogy a háztartási méretű erőművek nagyobb teljesítmény mellett se generáljanak túl nagy áramokat, illetve a veszteségek csökkenjenek. Nemzetközi szinten vannak erre kísérletek (pl. Németországban kísérleteztek 1 kV-os helyi hálózattal). Ha az elektromosautó-töltők és hőszivattyúk miatt egy átlagos háztartás csúcsterhelése mondjuk  $3 \times 25$  A-ról  $3 \times 80$  A-re nőne 20 év múlva, lehet, hogy indokolt lesz a feszültség szint növelése. Az átállás viszont rengeteg készülék cseréjével járna. Így ez a változás csak fokozatosan vezethető be, és főleg új építésű negyedekben képzelhető el.

**Okosfogyasztók és mérés ▼** Kisfeszültségen mindenképp várható az okosmérők elterjedése. Ha a fogyasztók valós idejű árral szembesülnek, az hat a fogyasztási szokásokra. Például, ha valaki olcsóbb éjszakai áramot kap okostarifával, akkor az autóját inkább akkor tölti. Ezzel a KIF hálózaton csökkenhet a nappali csúcs. Az okosmérők adatainak begyűjtése és felhasználása a hálózatfejlesztésben is kincs: végre pontos képet ad arról, mi történik a végpontokon. A jelenben a KIF tervezés sokszor profilokon alapul, nem valós adatokon. Az okosmérők ezt megváltoztatják, bár hosszú távú tervezéshez nem kell minden másodperc adata. Ott inkább trendek kellenek, de a valós mérések segítenek hitelesíteni a modelleket.

**Energiaminőség ▼** A rengeteg elektronikus eszköz (inverterek, kapcsolóüzemű fogyasztók) hat a feszültség minőségére (pl. harmonikusok, feszültség ingadozás). Lehet, hogy a jövőben a KIF hálózatfejlesztésben hangsúlyosabb lesz az energiaminőség fenntartása (pl. szűrők telepítése, hatásos-meddő energia (PQ) mérő rendszerek kiépítése). Ez is egy új szempont, ami a *prosumer*-világban merül fel.

Összességében a feszültség szintek jövőbeni szerepe vegyes képet mutat: nagyfeszültségen valószínű a konszolidáció (400 kV dominancia), középfeszültségen a rugalmasabb üzem (hurkolható, szabályozható hálózat), kisfeszültségen pedig az aktív hálózat kialakulása. Új feszültség szintek bevezetése (pl. 60 kV, 1 kV) kevésbé valószínű a közeli jövőben, de nem zárható ki regionális vagy pilotjelleggel, amennyiben speciális igény indokolja. Például, ha egy ipari területen a 22 kV már nem elég, de 132 kV-ra nincs lehetőség, felmerülhet-e 35 kV újraélesztése vagy 60 kV behozatala? Ehhez teljes szabványosítás kellene – a jelenlegi szabályozás nem ismeri a 60 kV-ot, így rengeteg engedélyezési lépcső lenne. Sokkal valószínűbb, hogy a meglévő szinteket kombinálva oldjuk meg a felmerülő igényeket, és technológiai fejlesztésekkel (pl. nagyobb kapacitású vezetékek, nagyobb teljesítményű transzformátorok, flexibilis hálózatüzem) toljuk ki azok teljesítőképességét.

## 6. Európai és nemzetközi trendek, jó gyakorlatok

A villamosenergia-hálózatok fejlesztése globális szinten is számos kihívással küzd, és a nemzetközi tapasztalatok fontos tanulságokkal szolgálhatnak Magyarország számára is. Ebben a fejezetben néhány európai és tengerentúli trendet tekintünk át, illetve bemutatunk számos jó gyakorlatot a hálózatfejlesztés hatékonyabbá tételére.

### 6.1. Megújulóintegráció és hálózatfejlesztés Európában

Európa-szerte közös trend, hogy a megújuló energiaforrásokra – főként a szél- és napenergiára – egyre jobban támaszkodnak az országok, ezek részarányának növekedés szinte robbanásszerű. Ez a változás mindenütt kihívások elé állítja a hálózatokat, különösen azokon a területeken, ahol koncentráltan jelenik meg az új termelés (pl. Észak-Németországban a tengeri szélerőművek, Dél-Németországban a napenergia, Spanyolországban mindkettő stb.). Az alábbiakban az ezen kihívások kezelésére alkalmazott jó gyakorlatokat mutatjuk be.

**Hálózat és termelés összehangolt tervezése ▼** Németországban 2011-ben törvényt hoztak a hálózatbővítés felgyorsításáról annak érdekében, hogy a megújulók termelése és a hálózati infrastruktúra párhuzamosan fejlődhessen. Itt kiemelt projektek (pl. észak–déli 380 kV-os összeköttetések) kapnak könnyített engedélyezést és EU-finanszírozást. Emellett a megújuló termelésre beruházóknak bizonyos esetekben részt kell vállalniuk a hálózatcsatlakozás költségeiből.

**Nemzetközi együttműködés ▼** Az ENTSO-E (Európai Átviteli Rendszerirányítók Hálózata) közös tízéves hálózatfejlesztési tervet (TYNDP) készít rendszeresen, amely a kontinens fő infrastrukturális igényeit térképezi fel. Magyarország is része ennek, például a magyar–szlovák és a magyar–román határkeresztesző kapacitások növelése szerepel benne. A nemzetközi trend az, hogy egyre jobban összekapcsolódnak az országok, mert így lehet kiegyensúlyozni a megújulók termelését (ha nálunk süt a nap, exportálunk; ha máshol fúj a szél, importálunk).

**Dánia és a szélerenergia ▼** Dánia villamosenergia-rendszere már 88% feletti megújuló aránynál jár, főleg szélből. Ezt úgy tudták hálózati oldalról kezelni, hogy erős összeköttetéseket építettek ki a szomszédokkal (Norvégia, Svédország, Németország felé), és kihasználják Norvégia vízerőműveit, mint „természetes

tárolót”, figyelembe véve a piaci szabályozás körülményeit. Ezenfelül Dánia sokat fektetett az okoshálózati megoldásokba: például virtuális erőművekbe, amelyek a sok kicsi lakossági fűtőpanelt vagy autót koordinálják. Ezzel a fogyasztást is igazítják a termeléshez, nem csak fordítva.

**Spanyolország és a napenergia ▼** Spanyolország hatalmas napenergia-potenciállal rendelkezik, amit ki is aknáznak. Azonban délben túltermelés van, ezért Spanyolország elkezdett a szomszédos országokba exportálni (Franciaország felé) egy új vezetéken és tárolókat telepít (szivattyús-tároló vízerőműveket és akkumulátorparkokat). Emellett bevezettek egy olyan piaci mechanizmust, ahol a naperőművek vállalhatnak termeléscsökkentést bizonyos díj ellenében, hogy csökkenteni lehessen az időszakos hálózati szűk keresztmetszeteket. Ez azt jelenti, hogy megfizetik őket, hogy ne termeljenek, ha a hálózat a terhelhetőségi határon üzemel. Ez természetesen átmeneti és nem ideális megoldás, de jelzi, hogy a problémát rugalmasan kezelik.

## 6.2. Intelligens hálózatok és digitalizáció nemzetközi példái

A *smart grid* bevezetése világszerte kísérleti fázisokból halad a kiforrott alkalmazások felé. Néhány példát adunk az alábbiakban ezekre a megoldásokra.

**Olaszország – okosmérők ▼** Olaszország volt az egyik első, aki országos szinten (Enel) bevezette az okosmérőket már a 2000-es években. Ennek eredményeként rengeteg adat gyűlt össze a fogyasztói szokásokról, és lehetővé vált a távoli leolvasás, kapcsolás. A hálózatfejlesztésben az Enel azóta profil helyett mérési adatokkal dolgozik a kis- és közép feszültségű hálózat tervezésénél, ami pontosabb igénybecslést tett lehetővé.

**USA – öngyógyító hálózatok ▼** Az USA-ban több áramszolgáltató (pl. Florida Power & Light vagy a hawaii HELCO) öngyógyító elosztóhálózat-rendszereket vezetett be. Ezek lényege, hogy a közép feszültségű hálózaton intelligens kapcsolók és szenzorok figyelik a hibákat, és egy vezérlő algoritmus automatikusan átstrukturálja a hálózatot egy hiba után, hogy a lehető legkevesebb fogyasztó maradjon áram nélkül. Ezzel nagyságrendileg csökkenteni tudták a kiesések időtartamát (azaz a SAIDI mutató javult). Ez a gyakorlat Magyarországon is követendő lehet, bár az itteni hálózat topológiája, a villamos távolságok jelentősen eltérnek az amerikaiétól. Ezek a megoldások nem újkeletűek és megvan a hagyományuk Magyarországon is, csak a technológiai fejlődés adta lehetőségeket kell hatékonyan adaptálni.

**Japán – feszültségszabályozás és V2G ▼** Japánban, ahol a 2011-es fukusimai földrengés és cunami után komoly energiaválság volt, nagy hangsúlyt helyeztek

a mikrohálózatokra és a *Vehicle-to-Grid* (V2G) technológiákra. Ez utóbbi keretében több kísérleti városrészben integrálták az elektromos autók akkumulátorait a hálózatba, hogy vészhelyzetben vagy csúcsidőben visszatápláljanak. Ez technikailag megvalósult pilotszinten, de ezt a technológiát a mindennapokba átvinni még kihívás (főleg szabályozási és garanciális kérdések miatt). Ugyanakkor a japán példa mutatja, hogy a szigetüzem és energiatárolás kis közösségi szinten bevezethető, és ezek a megoldások tehermentesíthetik a hálózatot.

**Ausztrália – megfordított hálózat ▼** Ausztráliában egyes városokban az épületek 30-40%-án van már háztartási napelem. Ilyen körülmények között előfordul, hogy a kisfeszültségű hálózatból több energia áramlik vissza a nagyobb feszültség szint felé délben, mint amit fogyasztanak. Erre válaszul néhány hálózatüzemeltető bevezette a *kétirányú tarifát*: nem csak a vételezésért, de a visszatáplálásért is fizettetnek hálózathasználati díjat (hiszen ez is igénybe veszi a hálózatot). Ez ösztönzi a helyi tárolást vagy a saját fogyasztást, és csökkenti a hálózat terhelését. Emellett kiterjedt program indult az inverterek távvezérelhetőségére: szélsőséges esetben az átviteli hálózati engedélyes szabályozhatja a lakossági invertereket, ha a túltermelés veszélyezteti a rendszer stabilitását.

### 6.3. Sikeres megoldások a hálózati szűk keresztmetszetekre

Érdekes azt is megvizsgálni, milyen innovatív megoldásokat alkalmaztak más országokban sikerrel.

**Dinamikus távvezeték-terhelhetőség** (*Dynamic Line Rating – DLR*) ▼ A vezetékek pillanatnyi terhelhetősége függ az időjárástól (hőmérséklet, szél, napsugárzás). Több országban (Franciaország, USA bizonyos TSO-i) telepítettek vonali szenzorokat vagy időjárás-állomásokat a távvezetékek mellé, és valós időben számolják ki a megengedhető áramot, ami gyakran magasabb, mint a fix, statikus tervezési érték. Ezzel akár 15-20%-kal is biztonságosan növelhető egyes átviteli vonalak kapacitása, különösen szeles, hűvös időben. Magyarországon a MAVIR is pilotprojekt keretében több átviteli távvezetékre telepített DLR szenzorokat, ami jó gyakorlat. Emellett a hálózati engedélyesek is megkezdték a DLR alkalmazását, mert ezáltal tartalékkapacitásokat érhetnek el.

**Fázistoló transzformátor** (*Phase Shifting Transformer – PST*) ▼ A teljesítmény-áramlás befolyásolására alkalmas PST-eket általában a TSO-k a saját hálózatauk áramlási viszonyainak szabályozására alkalmazzák. Bizonyos esetekben azonban határkeresztesző távvezetékek terhelésének szabályozását is befolyásolják ezekkel az eszközökkel (pl. a Vierraden–Krajnik német–lengyel összeköttetésén, ahol a nagy német tengeri szélerőművek betáplált teljesítménye a lengyel hálózaton keresztül áramlik vissza a dél-német terhelési központba). Hasonló

eszközzel lehet befolyásolni a TSO–DSO-k közötti átadási pontokon a teljesítményáramlást, ezzel elkerülve a 132 kV-os hurokágak esetleges túlterhelődését. Fontos megjegyezni, hogy a PST csak hurkolt hálózatokban alkalmas a teljesítmények szabályozására, sugaras hálózatokon nem. Itthon ennek használata még nem jellemző.

**Megújuló termeléskorlátozása és a kapacitásfaktor növelése ▼** Olcsóbb több megújulót telepíteni és szükség esetén lekapcsolni a termelők egy részét, mint mindig annyit építeni, amennyit a hálózat elbír. Például Írországbán a szélfarmok időnkénti leszabályozását betervezik a rendszerbe (és kompenzálják a tulajdonosokat), mert így nem kell mindenhová kétrendszerű távvezeték kiépíteni. Ez egyfajta gazdaságilag optimális korlátozás (*economically optimal curtailment*). A fejlesztés tervezőinek is számolni kell azzal, hogy a 100% megújuló kihasználás és a 95% megújuló kihasználás és kisebb hálózatépítés között lehet a gazdasági optimum.

**Nagyfeszültségű egyenáramú átviteli (HVDC) összeköttetések belső hálózati tehermentesítésre ▼** Norvégiában és Kanadában, illetve Németország és Belgium között is van rá példa, hogy párhuzamos AC vezetékek helyett DC összeköttetést építettek két régió közé az országon belül. A HVDC előnye, hogy az áramlás teljesen szabályozható, és nem generál hurokáramokat. Hátránya, hogy a konverter ára igen magas. Magyarország méretében ez nem realitás, hiszen a távolságok kicsik, de regionálisan például egy Balkán–Ausztria metszék tehermentesítése HVDC-vel (ami elkerüli Magyarországot) elképzelhető.

## 6.4. Szabályozási és piaci innovációk

**Kapacitásmechanizmusok ▼** Egyes országok kapacitáspiacot vezettek be, ahol a hálózatfejlesztés alternatívájaként például tartalék generátorokat vagy fogyasztói befolyásolást (*Demand Side Response – DSR*) vesznek igénybe csúcsidőben. Ez nem hálózati, hanem termelési kapacitásmechanizmus, de hatással lehet a hálózatfejlesztésre. Például, ha csúcsidőben 500 MW-ot le lehet kapcsolni DSR-rel, akkor elképzelhető, hogy nem szükséges egy újabb 400 kV-os táppontot vagy vezetéket létesíteni.

**Decentralizált piacok ▼** A *blockchain*-alapú helyi energiapiacok kísérleti jelleggel futnak például Hollandiában (Powerpeers projekt) vagy Ausztráliában. Ha beválnak, akkor a helyi kiegyenlítés javulhat, ami csökkenti a hálózati energiabeszerezési igényt. Ezeknek a kísérleteknek az eredményességét még nem lehet megítélni.

Összességében a nemzetközi trendek afelé mutatnak, hogy a hálózatfejlesztés innovatív megközelítésekkel párosul: az egyszerű „drótépítés” mellett egyre nagyobb hangsúlyt kapnak az okosmegoldások, piaci eszközök és a különféle együttműködések. Magyarországnak érdemes ezeket figyelemmel kísérni és a helyi viszonyokra szabva kipróbálni az új irányokat. Sok esetben egy kisléptékű pilot (kísérleti projekt) segíthet a döntésben, hogy egy új módszer adaptálható-e. Például kísérletként létre lehetne hozni öngyógyító hálózatot egy kisebb városban vagy energiatárolós mikrohálózatot egy faluban. Az EU egyre több pénzt szán ilyen pilotokra (Horizon Europe, LIFE program stb.). Az ilyen kis léptékű beruházásokkal, majd a tapasztalatok értékelésével a kockázat is csökkenthető.



## 7. A legfrissebb technológiai fejlesztések és alkalmazásuk a hálózatfejlesztésben

A villamosenergia-hálózat is profitál a technológiai forradalomból: új anyagok, eszközök, algoritmusok jelennek meg, amelyek hatékonyabbá, okosabbá tehetik a hálózatot. Ebben a fejezetben röviden áttekintjük a legújabb technológiákat és azt, hogy hogyan alkalmazhatók a hálózatfejlesztés területén.

### 7.1. Új hálózati eszközök és anyagok

**Nagyhőmérséklet-tűrő sodrony ▼** Olyan távvezeték-sodronyok (*HTLS – High Temperature Low Sag*) jelentek meg a piacon, amelyek magasabb üzemi hőmérsékleten is biztonságosan üzemeltethetők, kevesebb belógással. Ilyen például az *ACCC (Aluminium Conductor Composite Core)* vagy *ACSS (Aluminium Conductor Steel Supported)* típus. Alkalmazásukkal a meglévő oszlopsoron a vezeték cseréjével 50–100% kapacitásnövelés is elérhető, mert 150–180 °C-ig melegedhetnek, nem csak 80 °C-ig, így csúcsterheléskor több áramot képesek szállítani. Ez kiváló megoldás lehet szűk keresztmetszetek feloldására anélkül, hogy új nyomvonalat kellene kiépíteni. A jövő szempontjából a HTLS sodronyok elterjedése fokozódni fog, összefüggésben azzal, hogy folyamatosan nő a környezeti hőmérséklet és ezzel a meglévő sodronyok terhelhetősége csökken.



10. ábra. A Dogger Bank tengeri szélfarm parti konverterállomása (Kelet-Yorkshire, UK), amely a szélturbinák által termelt villamos energiát HVDC-ről HVAC-ra alakítja át.

Forrás: Adobe Stock 641849773

**Nagyfeszültségű egyenáramú (HVDC) technológia ▼** A konverterek fejlődésével a HVDC alkalmazási lehetőségei bővülnek. Ilyen rendszereket már nem csak több száz kilométerre érdemes kiépíteni, hanem akár rövidebb szakaszokon is, ha ez hálózatszabályozási előnnyel jár. Például városi környezetben létesíthető földkábeles HVDC-kapcsolat két állomás között, hogy a köztes hálózat terhelése csökkenjen. Vagy offshore szélerőműparkokat is be lehet kötni egyenáramú rendszerrel (pl. az Északi-tengerben épülnek multiterminal HVDC-rendszerek). Bár Magyarországon belül nincs rá közvetlen igény, a határon átnyúló projekteknel felmerülhet a technológia alkalmazása (pl. egy Magyarországot elkerülő kelet–nyugati HVDC, vagy a Balkánra lemenő ág).

**Energiatárolók a hálózatban ▼** Az akkumulátortechnológia nagyot fejlődött az utóbbi években, az árak csökkentek. Megjelentek kifejezetten hálózati célú nagy akkumulátortelegek is (pl. Tesla Megapack, Fluence Gridstack). Feladatuk lehet csúcslevágás, frekvenciaszabályozás vagy akár a hálózatfejlesztés kiváltása (*Non-Wires Alternative*, NWA). Ez utóbbi alkalmazásra példa, ha egy nagyvárosban egy elosztói transzformátor túlterhelt lenne csúcsidőszakban, de új kiépítés helyett telepítenek mellé egy akkumulátort, ami tehermentesít napi két órát. Ha az akkumulátor olcsóbb, mint a transzformátor bővítése és kábelezése, akkor ez lehet rentábilis megoldás. Jelenleg Magyarországon még ehhez a megoldáshoz túl magasak az árak, de csökkenő tendenciát látunk. Kísérleti jelleggel viszont már megvalósult Szolnok állomáson ilyen célú akkumulátoros tároló.

A technológiai trend az új akkumulátortípusok megjelenése. A mára már elterjedt lítium-ion akkumulátorok után jönnek például a nátrium-ion és a redox-flow akkumulátorok, amelyek még olcsóbbak és tartósabbak lehetnek.

A szezonális tárolás terén is kutatások folynak (gázok, pl. hidrogén vagy ammónia mint energiatároló közeg, azaz P2G – *power-to-gas* technológia); hiszen a villamos energia nagy mennyiségben, hosszú időre nem tárolható, ezért kell más formára átalakítani. Ha ezek az újítások beérnek, az forradalmi hatású lehet, hiszen a nyári PV-energia eltárolható lenne télire.

**Fejlett védelmi és automatikai eszközök ▼** A 2.3. fejezetben már említettük a digitális állomás koncepciót. Ezen a területen is látunk említésre méltó új fejlesztéseket. Ide tartoznak például az IEC 61850 szabványú kommunikációra építő védelmek, a saját diagnosztikával rendelkező kapcsolókészülékek (amelyek önmaguk jelzik, ha kopnak vagy gáz szivárog stb.) és a nagysebességű diszkrét áramszabályozók (FACTS eszközök). Ezek olyan nagyfeszültségű villamos berendezések, amelyek elektronikus vezérléssel képesek javítani az átviteli hálózat stabilitását, teljesítőképességét és feszültség szabályozását. Ide tartoznak például a statikus meddőteljesítmény szabályozók, azaz a STATCOM-ok,

amelyek a meddő teljesítményt valós időben szabályozzák, segítve a feszültségprofil megtartását. Ezek mind növelik a hálózat stabilitását és kapacitását. A STATCOM-okat előszeretettel telepítik nagy PV- vagy szélenergia-csomópontoknál a feszültség szabályozására. Magyarországon is van már példa ilyen alkalmazásra (Nyírtass szélenergia-parknál).



11. ábra. Az első GFM-képességű STATCOM megvalósítása az Amprion Grid hálózatban 2023  
Forrás: ENTSO-E (2025)

**Nem hagyományos anyagok az erősáramú elektronikában ▼** Az olyan anyagok, mint a szilícium-karbid (SiC) vagy a gallium-nitrid (GaN), forradalmasították a teljesítményelektronikát. Ezek az anyagok kisebb veszteségű, gyorsabb kapcsolású, összességében hatékonyabb HVDC-konverterek és inverterek gyártását teszik lehetővé. Például egy SiC HVDC konverter kevesebb hőt termel, kevésbé komplex hűtést igényel, mint hagyományos társai. Ezek a rejtett fejlesztések a rendszer hatásfokát és megbízhatóságát javítják, mert kevesebb elem kell ugyanannak a feladatnak az ellátásához, mint a jelenlegi rendszerekben (pl. kevesebb párhuzamos modul lesz a konverterben).

## 7.2. Adat és modellezés – a szoftveres forradalom

Nem szabad elfeledkeznünk a szoftveroldali innovációkról sem. A hálózatfejlesztésben ma már megkerülhetetlenek a számítógépes modellező eszközök. A legújabb trendeket az alábbiakban mutatjuk be.

**Idősoros szimuláció és Big Data alkalmazás ▼** A tervezők elkezdtek idősorokat is futtatni, már nem csak statikus számításokra támaszkodnak. Ehhez nagy teljesítményű számítógépek és nagy adatállományok kellenek. A *big data* elemzés segíthet abban, hogy a sok szimulált eredményből kiszűrjük a fontos információt (pl. melyik időszakokban van a legnagyobb esély egy adott vezeték túlterhelésére). Vannak már kísérletek MI (mesterséges intelligencia) alkalmazására a hálózat tervezésben is, főleg optimalizációs feladatokra (pl. hálózat rekonfigurálás optimális helyen vagy beruházások rangsorolása gépi tanulással).

**Egységes adatplatformok ▼** Az egyik nagy kihívás, hogy a TSO–DSO és DSO–DSO más szoftvereket használ, az adatok nehezen átjárhatók. Erre több nemzetközi projekt is indult, hogy közös adatmodell (CGMES formátum az ENTSO-E-nél) és platform jöjjön létre. Ha mindenki egy nyelvet beszél adatszinten, a közös tervezés hatékonyabb. Magyarországon is van erre törekvés, de a meglévő szoftverek (pl. PSS/E vs. Neplan vs. DlgSILENT) közti átjárás továbbra sem zökkenőmentes. A GIS-adatbázis az alapja a modellezésnek – ha abban naprakészek az eszközadatok és a hálózati topológia, akkor bármilyen számító program felépítheti a modellt.

**Online tervező és csatlakozási segédletek ▼** Némely szolgáltató már kínál webes felületet az ügyfeleknek, ahol megnézhetik, hogy egy adott helyen körülbelül mekkora kapacitás érhető el. Skóciában például van egy térkép, amely színek segítségével mutatja, hogy hol telített már a hálózat és hol van még befogadóképesség. Ez javítja az átláthatóságot és csökkenti a beérkező „irreális igények” számát. Magyarország is halad ebbe az irányba (a kapacitáslekérdező rendszerek formájában a szolgáltatók honlapjain), és a jövőben akár interaktív tervezőmodulok is megjelenhetnek. Azonban figyelni kell, hogy ezek csak tájékoztató jellegűek legyenek, mert a pontos hálózatszámítás bonyolult, és a felelősség a szolgáltatóé marad.

**Szimulációs módszertanok közelítése ▼** A jövőben várható, hogy a különböző vizsgálati módszerek (determinisztikus vs. valószínűségi, profilalapú vs. idősoros) egy keretbe integrálódnak. Egy modern hálózattervező szoftver egyszerre tud majd például Monte Carlo-szimulációt csinálni a bizonytalanságokra és kiválasztani belőlük a kritikus pontokat determinisztikus ellenőrzésre. Ennek csírái már megvannak a legújabb szoftververziókban. A felhőalapú számítás is megjelenhet: nem a tervező gépén fut a nehéz szimuláció, hanem szerverfarmokon, és a tervező az adatok feltöltése után csak az eredményt kapja vissza. Ezzel szinte korlátlan erőforrás áll rendelkezésre, csak fizetni kell érte – ami, ha hatékonyabb tervezést eredményez, megtérülhet.

### 7.3. A technológiai fejlődés hatása a munkaerőre és szervezetre

Végezetül meg kell jegyezni, hogy az új technológiák alkalmazása új ismereteket kíván a mérnököktől és új szervezeti hozzáállást a cégektől. A hagyományos villamosmérnöki tudás mellé informatikai, távközlési ismeretekre is szükség van (pl. kommunikációs hálózat a *smart grid*hez). Emellett elengedhetetlen az adattudományi jártasság (*big data*-elemzés) és a komplex integrált projektek menedzseléséhez szükséges készségekre is szükség van. Ezért a hálózatfejlesztésben dolgozó szervezeteknek (TSO, DSO) képzési programokat kell indítaniuk, illetve akár új profilú mérnököket kell felvenniük (pl. *data scientist*, *business analyst*).

A technológia sok mindenben segít, de a döntéseket továbbra is emberek hozzák. A legjobb döntések pedig akkor születnek, ha a technológiai eszközök adta információ megfelelő szakmai ítélőképességgel párosul. Például hiába van nagyon jó szimulációs programunk, ha a bemenő adatok hibásak (*garbage in – garbage out* probléma). Ezt a vizsgált tanulmányok is hangsúlyozzák: *„a kritikus pont a bemenő adatok pontossága... amíg fogyasztói profilalapokból indulunk ki, értelmetlen teljes idősorokat futtatni”*. Tehát először biztosítani kell a megfelelő adatminőséget, aztán lehet csúcstechnológiát alkalmazni.



## 8. Összegzés és következtetések

A villamos hálózat fejlesztése a 21. században rendkívül összetett feladattá vált. Ez a folyamat a műszaki szaktudás mellett gazdasági, társadalmi és politikai dimenziókat is magában foglal. Magyarországon esetében a történelmi örökség (132 kV sajátosság, 50–60 éves infrastruktúra) együtt él a modern kihívásokkal (megújulóknak tömeges megjelenése, decentralizáció). Ebben a könyvben áttekintettük a hálózatfejlesztés szinte valamennyi releváns aspektusát.

- ▼ A **történelmi háttér** rávilágít arra, hogy a jelenlegi hálózati struktúra kialakulása történelmi döntések (pl. privatizációkor a feszültségszintek megosztása) eredménye. Ezek a döntések máig éreztetik a hatásukat és jelentős mértékben meghatározzák a fejlesztési mozgásterünket.
- ▼ Az **új trendek** (elosztott termelés, tárolás, *smart grid*) alapjaiban változtatják meg a hálózat használatának módját. A fogyasztóból termelő is lett, így a hálózat kétirányú energiacsere-platfomává válik. Ezért a hálózat és a tartalék szerepének újragondolása elengedhetetlen. Az ezekre a trendekre való reagálás nem halogatható, hiszen a számok (pl. napelemekkapacitás) exponenciálisan nőnek.
- ▼ Az **infrastruktúra tervezési kihívásai** kapcsán láttuk, hogy a hosszú átutazási idők és a bizonytalan jövő csak gördülő tervezéssel és rugalmassággal egyeztethető össze. Kiemeltük az előrejelzések nehézségét, legyen szó elektromos autókról, ipari nagyfogyasztókról vagy éppen arról, hogy miként hat a klímaváltozás a terhelési görbékre. A tervezés kihívásaihoz meg kell említeni a szabványok gyors változását is.
- ▼ A **műszaki és gazdasági szempontok** elemzése rámutatott, hogy az optimális hálózatfejlesztés nem mindig a legjobb műszaki paraméterre való törekvést jelenti. Például nem biztos, hogy mindenhol n-1-et kell tartani, ha aránytalanul drága lenne és a fogyasztók is változnak. A költségek megterjedése és elosztása pedig igazságossági kérdéseket is felvet. Itt a szabályozásnak fontos szerepe van abban, hogy a rendszer jelentős átalakulása (pl. a *prosumerek* térnyerése) során se omoljon össze a finanszírozás.
- ▼ A **feszültségszintek jövőjéről** szóló rész azt hangsúlyozta, hogy mindegyik szintnek megvan a létjogosultsága, de lehet, hogy a funkciók eltolódnak. A 132 kV körüli vita jó példa erre: tisztáznunk kell, hogy átviteli vagy elosztó szerepet szánunk-e ennek a rendszernek hosszú távon, mert ennek megfelelően kell fejleszteni. Hasonlóan, a KÖF/KIF hálózathoz fel kell készülni az aktív hálózati elemek befogadására (pl. feszültségszabályozó transzformátorok).

- ▼ Az **európai és nemzetközi trendek** megmutatták, hogy nem vagyunk egyedül a problémákkal. Ugyanakkor számos bevált gyakorlat van, amelyek közül meríthetünk (DLR-alkalmazás, okoshálózat-pilotok, regionális együttműködés a megújulók kezelésére stb.), és érdemes nyitott szemmel figyelniük a világban zajló kísérleteket. A közös cél mindenütt az, hogy egy rugalmas, megbízható, fenntartható villamosenergia-hálózat alakuljon ki.
- ▼ A **legújabb technológiák** fejezete pedig rávilágított, hogy a technikai eszköztár folyamatosan bővül. Ami ma még újdonság (pl. nagy kapacitású akkumulátoros tárolók alkalmazása vagy a mesterséges intelligencia használata a tervezésben), az holnapra bevett gyakorlat lehet. Ezért a hálózatfejlesztésben dolgozóknak folyamatos továbbképzésre van szüksége, hogy e vívmányokat – akár innovatív megoldásokkal – időben be tudják építeni a gyakorlatba.

Zárásképpen kiemeljük, hogy a hálózatfejlesztés sikere kulcsfontosságú Magyarország energiaátmenetének sikeréhez. A dekarbonizációs célok (2050-re klímasemlegesség) eléréséhez elengedhetetlen egy olyan villamosenergia-hálózat, amely képes nagymennyiségű megújuló energiát kezelni, és képes ellátni egy villamosított társadalmat, ahol a közlekedés és a fűtés is nagyrészt villamos energiára épül. Ez hatalmas feladat, de a tervezéssel és proaktív fejlesztéssel időben felkészülhetünk rá. Szükség van egy átfogó, konszenzusos hálózatstratégiai koncepcióra, amely hosszú távra (legalább 2040–2050-ig) vázolja a hálózat jövőképét, és ütemtervet ad a megvalósításhoz. E koncepció kialakításában mind a műszaki szakemberek, mind a szabályozók, mind a fogyasztói képviselők szerepet kell kapjanak, hogy a végeredmény fenntartható, megfizethető és elfogadható legyen mindenki számára.

A hálózatfejlesztés tehát nem pusztán műszaki kérdés, hanem nemzetstratégiai ügy, társadalmi kérdés, amely meghatározza a magyar energiaellátás jövőbeli biztonságát és gazdaságosságát. A kihívások nagyok, de a rendelkezésre álló tudás és technológia is az. A jelen könyv reményeink szerint hozzájárul ahhoz, hogy ez a tudásanyag hasznosuljon, és közös gondolkodás induljon a lehetséges megoldásokról

## Köszönetnyilvánítás

**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.



# Felhasznált és ajánlott irodalom

## Jogszabályok

- Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2019/941 rendelete (2019. június 5.) a villamosenergia-ágazati kockázatokra való felkészülésről és a 2005/89/EK irányelv hatályon kívül helyezéséről (EGT-vonatkozású szöveg). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0941> (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- 4/2024. (VI. 14.) MEKH rendelet a villamos energia rendszerhasználati díjak, csatlakozási díjak és külön díjak meghatározásának a 2025. január 1. napjával induló árszabályozási ciklusra vonatkozó keretszabályairól. URL: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a2400004.mek> (Elérés: 2025. augusztus 15.)

## Egyéb források

- BMWK (2023) *System Stability Roadmap. Roadmap for achieving the secure and robust operation of the future power supply system with 100% renewable energy sources*. Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), Berlin. URL: [https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/system-stability-roadmap.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/system-stability-roadmap.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- Castaneda, M., Jimenez, M., Zapata, S., Franco, C. J., Dyner, I. (2017) Myths and facts of the utility death spiral. *Energy Policy*, 110, 105–116. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.07.063
- Dán, A., Hartmann, B., Kiss, P. (2012) Hálózati áramellátás és feszültségminőség. *BMEVIVEM178*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest. URL: [https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/13049/0048\\_VIVEM178.pdf](https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/13049/0048_VIVEM178.pdf) (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- ENTSO-E (2023) *Biennial Progress Report on Operational Probabilistic Coordinated Security Assessment and Risk Management*. URL: [https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/SOC%20documents/SOC%20Reports/entso-e\\_report\\_PRA\\_2023\\_231208\\_FINAL.pdf](https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/SOC%20documents/SOC%20Reports/entso-e_report_PRA_2023_231208_FINAL.pdf) (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- ENTSO-E (2025) Static Synchronous Compensator (STATCOM). entsoe.eu. ENTSO-E, Brussels. URL: <https://www.entsoe.eu/technopedia/techsheets/static-synchronous-compensator-statcom/> (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- ENTSO-E, ENTSG (2025) TYNDP // 2024. *Scenarios Report*. ENTSO-E – ENTSG, Brussels.

- EPRI (2011) *Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid. A Preliminary Estimate of the Investment Requirements and the Resultant Benefits of a Fully Functioning Smart Grid*. Technical report. EPRI, Palo Alto, CA. URL: <https://www.epri.com/research/products/1022519> (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- ERGEG (2010) *Position Paper on Smart Grids. An ERGEG Conclusions Paper*. Ref: E10-EQS-38-05. ERGEG. URL: [https://www.ceer.eu/wp-content/uploads/2024/04/E10-EQS-38-05\\_SmartGrids\\_Conclusions\\_10-Jun-2010\\_Corrigendum.pdf](https://www.ceer.eu/wp-content/uploads/2024/04/E10-EQS-38-05_SmartGrids_Conclusions_10-Jun-2010_Corrigendum.pdf) (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- Eurelectric Power Summit (2024). *Lights On*. URL: <https://powersummit2024.eurelectric.org/> (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- Európai Tanács (2025) Irány az 55%! *Consilium Europa*. Európai Tanács, Brüsszel. URL: <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/fit-for-55/> (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- European Commission (2019a) *Clean energy for all Europeans package*. European Commission, Brussels. URL: [https://wayback.archive-it.org/12090/20241209144917/https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package\\_en](https://wayback.archive-it.org/12090/20241209144917/https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en) (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- European Commission (2019b) *The European Green Deal*. European Commission, Brussels. URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- Eurostat (2024) *Electricity from renewable sources reaches 47% in 2024*. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250319-1> (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- MAVIR Zrt. (é. n.) Hálózatfejlesztési tervek 2021-től. *mavir.hu*. MAVIR Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt., Budapest. URL: <https://www.mavir.hu/web/mavir/halozatfejlesztesi-tervek-2021-tol> (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- MAVIR Zrt. (2025a) Erőművi beépített teljesítőképesség adatok. *Energia MIX – VER Erőművi Beépített teljesítőképesség és PV Statisztikai adatok*. URL: <https://www.mavir.hu/web/mavir/energia-mix-eromuvi-beepített-teljesitokepesseg-adatok> (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- MAVIR Zrt. (2025b) PV + Statisztika. *mavir.hu*. MAVIR Magyar Villamos-energia ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt., Budapest. URL: [https://mavir.hu/documents/10258/316400362/PV+STATISZTIKA\\_HU\\_20250801\\_ig\\_v1.pdf/092d723e-a3c7-8bee-0049-669c8149e03a?t=1755244954315](https://mavir.hu/documents/10258/316400362/PV+STATISZTIKA_HU_20250801_ig_v1.pdf/092d723e-a3c7-8bee-0049-669c8149e03a?t=1755244954315) (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- Molero-Mesa, E., Peña-García, A., Gómez-Lorente, D., Rabaza, O., Arán-Carrión, J., Espín-Estrella, A. (2015) Towards the generation of distributed electric power: self-consumption with net balance. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(3), 254–257. DOI: 10.1093/ijlct/ctt061

- NETL (2007) *A Systems View of the Modern Grid*. National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA. URL: [https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/ASystemsViewoftheModernGrid\\_Final\\_v2\\_0.pdf](https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/ASystemsViewoftheModernGrid_Final_v2_0.pdf) (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- NETL (2009) *A Vision for the Smart Grid*. National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA. URL: [https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/Whitepaper\\_The-Modern-Grid-Vision\\_APPROVED\\_2009\\_06\\_18.pdf](https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/Whitepaper_The-Modern-Grid-Vision_APPROVED_2009_06_18.pdf) (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- NETL (2010) *Understanding the Benefits of the Smart Grid. Smart Grid Implementation Strategy*. National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA. URL: [https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/06-18-2010\\_Understanding-Smart-Grid-Benefits.pdf](https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/06-18-2010_Understanding-Smart-Grid-Benefits.pdf) (Elérés: 2025. augusztus 15.)
- Sajtófigyelés (2025) Magyarország világelső a napenergia hasznosításában – Merre tovább? *mnsz.hu*. Magyar Napelem Napkollektor Szövetség, Budapest. URL: <https://www.mnsz.hu/magyarország-vilagelso-a-napenergia-hasznositasaban-merre-tovabb/> (Elérés: 2025. augusztus 15.)

## Összefoglalók belső megbeszélésekről

- Hálózattervezési koncepció munkacsoport – jegyzet (2023. 11. 17.)
- Hálózattervezési koncepció munkacsoport – összefoglaló (2024. 02. 01.)
- Hálózati szintek és feszültség szintek munkacsoport – jegyzet
- Elosztott termelés és fogyasztói trendek munkacsoport – jegyzet
- Előrejelzési és tervezési módszertan munkacsoport – jegyzet
- Tarifa és költségmegosztási kérdések munkacsoport – jegyzet
- Smart grid komponensek élettartama munkacsoport – jegyzet
- EU 70%-os szabály és DLR munkacsoport – jegyzet
- Prosumer-jelenség, energiaközösségek munkacsoport – jegyzet, 2023–2024



# Rövidítésjegyzék

| Rövidítés | Magyar                                                             | Angol                                                             |
|-----------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| AC        | váltakozó áram                                                     | Alternating Current                                               |
| ACCC      | kompozitmagos alumíniumvezető                                      | Aluminium Conductor Composite Core                                |
| ACSS      | alumíniumvezető acéltámasztással                                   | Aluminium Conductor Steel Supported                               |
| AMI       | okosmérő infrastruktúra                                            | Advanced Metering Infrastructure                                  |
| DC        | egyenáram                                                          | Direct Current                                                    |
| DLR       | dinamikus távvezeték-terhelhetőség                                 | Dynamic Line Rating                                               |
| DSR       | fogyasztó oldali befolyásolás                                      | Demand Side Response                                              |
| DSO       | elosztói engedélyes                                                | Distribution System Operator                                      |
| ENTSO-E   | Európai Átviteli Rendszerezányítók Hálózata                        | European Network of Transmission System Operators for Electricity |
| ERGEG     | Európai Villamosenergia- és Gázügyi Szabályozó Hatóságok Csoportja | European Regulators' Group for Electricity and Gas                |
| EV        | elektromos jármű                                                   | Electric Vehicle                                                  |
| FACTS     | rugalmas átviteli hálózat                                          | Flexible Alternating Current Transmission System                  |
| FAM       | feszültség alatti munkavégzés                                      | live-line maintenance                                             |
| GIS       | geoinformációs rendszer                                            | Geographic Information System                                     |
| HFKV      | hangfrekvenciás központi vezérlés                                  | ripple-control                                                    |
| HMKE      | háztartási méretű kiserőmű                                         | household-size small power plant                                  |
| HTLS      | nagyhőmérséklet-tűrő (vezeték)                                     | High Temperature Low Sag                                          |
| HVAC      | nagyfeszültségű váltakozó áramú átvitel                            | High-Voltage Alternating Current                                  |
| HVDC      | nagyfeszültségű egyenáramú átvitel                                 | High-Voltage Direct Current                                       |
| KIF       | kisfeszültségű                                                     | low voltage (LV)                                                  |
| KÖF       | középfeszültségű                                                   | medium voltage (MV)                                               |
| NAF       | nagyfeszültségű                                                    | high voltage (HV)                                                 |
| MEKH      | Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal                   | Hungarian Energy and Public Utility Regulatory Authority          |
| NWA       | vezeték nélküli alternatíva                                        | Non-Wires Alternative                                             |
| OLTC      | terhelés alatti szabályozású (transzformátor)                      | On-Load Tap Changer (transformer)                                 |
| PCI       | közös érdekű projektek                                             | Projects of Common Interest                                       |
| P2G       | villamos energiából gázba                                          | Power-to-Gas                                                      |
| PQ        | hatásos-meddő energia                                              | active-reactive power                                             |
| PST       | fázistoló transzformátor                                           | Phase Shifting Transformer                                        |
| PV        | fotovoltaikus                                                      | PhotoVtaic                                                        |

| Rövidítés | Magyar                                  | Angol                                      |
|-----------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
| RKV       | rádiófrekvenciás központi vezérlés      | radio ripple control                       |
| RoCoF     | frekvenciaváltozás sebessége            | Rate of Change of Frequency                |
| ROI       | beruházás megtérülése                   | Return of Investment                       |
| SAIDI     | átlagos kiesési idő index               | System Average Interruption Duration Index |
| STATCOM   | statikus meddőteljesítmény szabályozó   | STATic synchronous COMpensator             |
| TSO       | átviteli hálózati engedélyes            | Transmission System Operator               |
| TYNDP     | tízéves hálózatfejlesztési terv         | 10-Year Network Development Plan           |
| V2G       | elektromos autóból a villamos hálózatba | Vehicle-to-Grid                            |
| VER       | villamosenergia-rendszer                | power system                               |

## Közreműködők



**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 ENT-SO-E Kontinentális-Európa Koordinált Üzemviteli Alcsoportjában. 2022-ben kiemelkedő szakmai munkájáért Miniszteri Elismerő Oklevélben részesült.



**Germán András** a BME-n szerzett villamosmérnöki diplomát. Az egyetem mellett a Benkő Mérnöki Irodában kezdett el hálózatszámítással foglalkozni a 2000-es évek elején. 2012-től az E.ON cégcsoporton belül dolgozik, ahol fő szakterülete a kis-, közép- és nagyfeszültségű hálózatok modellezésének fejlesztése, pontosítása.



**Dr. 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 társ-alapítója. 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-díjjal (2019), a Pro Progressio Alapítvány TDK Oktatói Díjjal (2022) ismerte el.



**Hatala Miklós** jelenleg az alállomási és távvezetési szakterület vezetője az OPUS TITÁSZ Zrt.-nél. Korábban hálózatmodellezési-szakértőként dolgozott 2021–2024 között, előtte a műszaki fejlesztési munkatárs pozíciót töltötte be az E.ON Hungária Csoportnál. 2024-ben elnyerte az Ifjú Tehetség Díjat.



**Hollandi Gábor** az OPUS TITÁSZ Zrt. fejlesztési és tervezési vezetője, korábban az E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt. működéstámogató vezetője. Szakmai munkáját a villamosenergia-hálózatok fejlesztése és a kiserőművek hálózati integrációjának elősegítése jellemzi, rendszeres előadó iparági konferenciákon.



**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 mérnöktanácsadóként dolgozik. Számos publikáció szerzője a villamosenergia-rendszerek stabilitása és a rendszerinercia vizsgálata területén.



**Dr. Katona Zsolt** a nagyfeszültségű hálózatok szakértője, végzettségét a Miskolci Egyetemen szerezte. Az OPUS TITÁSZ Zrt.-nél dolgozik, ahol a közép- és nagyfeszültségű hálózatok üzemeltetésével, valamint a növekvő kiserőmű-kapacitások hálózati integrációjának kihívásaival foglalkozik.



**Kiss József** a BME VIK Villamos Energetika Tanszékén dolgozik, jelenleg tudományos segédmunkatársként a Villamos Művek és Energiaátalakítók munkacsoportban. Oktatási feladatai közé tartozik a *Villamos energetika* és a *Smart grid laboratórium* tantárgyak vezetése, és jelentős publikációs tevékenységet folytat.



**Laza Sándor** a LoadFlow Mérnöki Iroda ügyvezetője. A cég szakmai profilját innovatív energetikai és hálózati megoldások jellemzik. Emellett az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karán mestertanárként tevékenykedik.



**Orlay Imre** villamosmérnök, mérnökstanár, aki az ÉMÁSZ-nál töltött be vezető pozíciókat, Jelentős szerepe volt az ÉMÁSZ telemechanikai rendszerének létrehozásában. Később az ELMŰ-ÉMÁSZ stratégiai szakértője volt. A MEE-ben főtitkárként, majd oktatási bizottsági elnökként és mentoring program alapítójaként tevékenykedett. Számos szakmai publikáció, tananyag és verseny szervezése fűződik nevéhez. Munkáját több rangos díjjal ismerték el, köztük 2019-ben az Elektrotechnikai Nagydíjjal.



**Péter Gábor Mihály** a BME-n villamosmérnökként végzett (1993), 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.



**Steierlein István** a BME-n villamosmérnökként végzett (1984), majd menedzsment szakmérnöki oklevelet szerzett a veszprémi egyetemen (1996). Az EON Dél-dunántúli Áramhálózat Zrt.-nél közel negyven éves hálózatfejlesztési gyakorlattal rendelkezik. Az EON stratégiai szakterületén kiemelt szakértőként nyugállományba vonulásáig a hálózatok ellátásbiztonságával, innovációs projektekkal, illetve a költséghatékonyságra épülő beruházástervezéssel foglalkozott.



**Veisz Imre** a Magyar Elektrotechnikai Egyesület főtitkára, aki az elnökségi munka koordinálásáért felel. Rendszeresen levezető elnökként vesz részt a MEE szakmai fórumain, például a Védelmi és Irányítástechnikai Fórumon. Emellett a MEE hivatalos folyóiratának, az *Elektrotechnikának* a felelős kiadója.



**Dr. Vokony István** okleveles villamosmérnök, mérnök-közgazdász, a BME-n 2013-ban summa cum laude doktorált. 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 2019–2025 között. 2017-ben Pro Scientia aranyérmes, egyesületi munkáját pedig 2019-ben Kandó-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.



**Zerényi József Oszkár** több mint négy évtizedes villamosmérnöki pályafutással a MAVIR rendszerirányítás és relévédelem megkerülhetetlen alakja. Rendszerirányítási főmunkatársi minőségben aktív szakértőként dolgozik, részt vett az ENTSO-E és UCTE munkacsoportjaiban, valamint a hálózati állapotismerethez és a szabványosításhoz kapcsolódó fejlesztésekhez is hozzájárult.



