

Hálózatmegerősítési módszerek kvantitatív összehasonlítása

Cikkünk a villamosenergia-hálózat megerősítési stratégiáinak kvantitatív összehasonlítását mutatja be. Három megközelítést értékelünk: (1) az átviteli kapcsolatok (hidak) megduplázása a különböző közösségek között, (2) kerülőutak hozzáadása a gyengén szinkronizált csomópontok körül, és (3) a legnagyobb kaszkádhibákat kiváltó élek megerősítése. Az összehasonlításhoz a magyar nagyfeszültségű hálózat két különböző modelljét használjuk. Ezenkívül megvizsgáljuk a Braess-paradoxon előfordulását, ahol a megnövelt átviteli kapacitás váratlanul csökkenti az általános stabilitást. Az élek eltávolításával végzett szimulációk jellemző eredményei vastagfarkú lecsengésű kaszkád idő esemény eloszlásokat mutatnak közepes csatolási erősség esetén, míg exponenciális viselkedés jelentkezik kis és nagy csatolási erősség esetén.

Our paper presents a quantitative comparison of power grid reinforcement strategies. We evaluate three approaches: (1) doubling transmission links (bridges) between different communities, (2) adding bypasses around weakly synchronized nodes, and (3) reinforcing edges that trigger the largest cascade failures. We use two different models of the Hungarian high-voltage network. Additionally, we examine the occurrence of Braess' paradox, where added transmission capacity unexpectedly reduces overall stability. Characteristic results of line-cut simulations reveal cascade event time distributions with fat-tailed decays for medium coupling strengths, while exponential behavior emerges for small and large couplings.

1. BEVEZETÉS

Növekvő összetettségük és összekapcsoltságuk miatt a modern villamosenergia-rendszerek sebezhetőbbé váltak a különféle zavarokkal szemben, beleértve a berendezések meghibásodását, a kiberfizikai támadásokat és a szélsőséges időjárási eseményeket, hogy csak néhányat említsünk. A villamosenergia-rendszerek rezilienciájának biztosítása szisztematikus megközelítést igényel a topológiájuk megerősítése és a kaszkádszerű hibák kockázatának csökkentése érdekében. A különböző hálózatmegerősítési módszertanok azonban általában eltérő célokat szolgálnak; némelyik inkább elméleti, mások inkább gyakorlati jellegűek.

A hagyományos megerősítési módszerek, mint például a hosszú távú infrastruktúratervezésben alkalmazottak (pl. az ENTSO-E tízéves hálózatfejlesztési terve), a kontingenciaelemzésre és a költség-haszon elemzésekre támaszkodnak. Ezek a hagyományos megközelítések nehézségekbe ütközhetnek a dinamikus stabilitás tekintetében, és ritkán veszik figyelembe a felmerülő külső fenyegetéseket [1] [2]. Ezzel szemben a szinkronizációelméleten alapuló alternatív módszertanok, mint például a Kuramoto-modell és az oszcillátoralapú technikák, új ismereteket nyújtanak a háló-

zati stabilitásról a fáziskoherenza elemzése révén. Az ezen a területen használt hálózati modellek azonban általában egyszerűsítéseken alapulnak és homogének [3][4]. A módszerek harmadik csoportja gráfelméleti elveken alapul, közösségetektálást és áthidaló vezetékek elhelyezését használva a hálózat modularitásának optimalizálására és a reziliencia növelésére [5][6]. Munkánk elsődleges célja a hagyományos, a Kuramoto-alapú és a közösségi alapú módszertanok összehasonlító elemzésének bemutatása, kiemelve azok előnyeit és korlátait. Tudomásunk szerint ez az első kísérlet ezen módszerek kvantitatív összehasonlítására egy nagy pontosságú hálózati modell segítségével.

2. EGY TOPOLOGIA, KÉT PARAMÉTEREZÉS

A szerzők korábbi publikációjukban [7] a magyar nagyfeszültségű hálózat 12 különböző mélységű modelljén vizsgálták, hogy a paraméterezés hogyan befolyásolja a szinkronizációs folyamatot. Jelen munkában a két legheterogénebb modellre szűkítjük a vizsgálatot; a 8. forgatókönyvre, amelyben a csatolási erősséget a távvezeték tényleges termikus korlátja alapján számítjuk ki, és a 12. forgatókönyvre, ahol a csatolási erősséget az admittancia határozza meg. A bemenő adatok a hazai infrastruktúra 2021-es állapotát tükrözik.

A hálózat dinamikai viselkedését ún. másodrendű Kuramoto-egyenlettel írjuk le:

$$\dot{\omega}_i = -\frac{D_i \omega_i}{M_i \omega_s} + \frac{L_i}{M_i \omega_s} + \lambda \sum_{j=1}^N \frac{Y_{ij} V_i V_j}{M_i \omega_s} \sin(\theta_j - \theta_i) \quad (1)$$

ahol

$D_i \left[Ws = \frac{kg m^2}{s^2} \right]$ a szinkrongép forgórész állapotok csillapító hatása,

$L_i \left[W = \frac{kg m^2}{s^3} \right]$ a csomóponti teljesítmény,

λ a csatolás erőssége,

$Y_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} \left[\frac{1}{\Omega} \right]$ a szuszceptancia,

$V_i, V_j [V]$ a csomóponti feszültségek,

$M_i [Ws^3 = kg m^2]$ a tehetetlenségi nyomaték,

$\theta_i [^\circ]$ a fáziszög,

$\omega_i = \dot{\theta}_i \left[\frac{1}{s} \right]$ a frekvencia,

$\omega_s \left[\frac{1}{s} \right]$ pedig az 50 Hz-es rendszerfrekvencia.

Az időfelbontás 0,25 s volt. A numerikus integrálás adaptív Runge-Kutta-Fehlberg-algoritmussal, adaptív lépésközzel történt, és minden gépre 5%-os, stacionárius Gauss-eloszlású, rögzített kezdeti fluktuációt adtunk, hogy imitáljuk a teljesítményingadozásokat.

A szinkronizáció erősségének mérésére a fázisok ún. rendparaméterét

$$z(t_k) = r(t_k) e^{i\theta(t_k)} = \frac{1}{N} \sum_j e^{i\theta(t_k)} \quad (2)$$

és a frekvenciák szórását használtuk

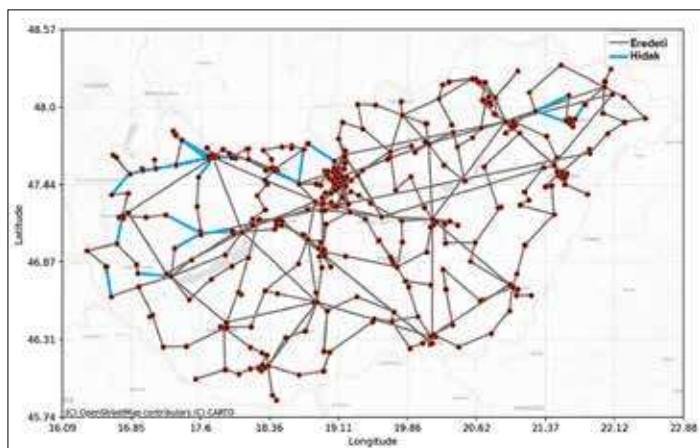
$$\Omega(t_k) = \frac{1}{N} \left\langle \sum_{j=1}^N \left(\bar{\omega}(t_k) - \omega_j(t_k) \right)^2 \right\rangle \quad (3)$$

ahol $\bar{\omega}(t_k)$ a k -adik mintavétel időpontjában számolt átlagos frekvencia ($t_k = 1 + 1.08^k$).

3. HÁROMFÉLE MEGERŐSÍTÉSI STRATÉGIA

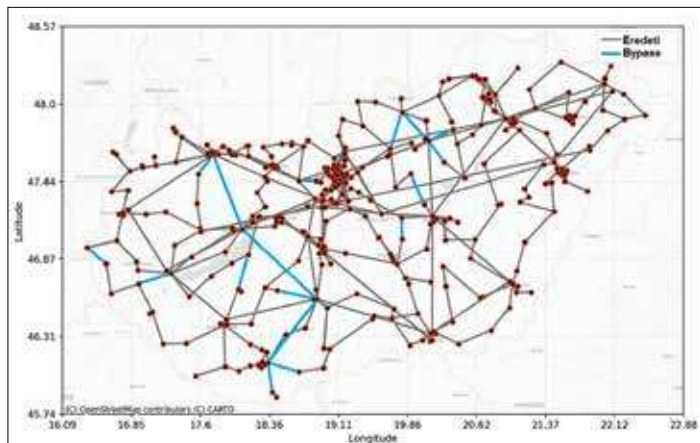
Munkánk során három különböző eljárás segítségével is megerősítettük a két hálózati modellt. Az eredmények közül a 12. forgatókönyv szerinti ábrákat mutatjuk be a terjedelmi korlátok miatt.

Első módszerünkben hidakat alkalmaztunk, melyek a hálózat közösségeinek detektálásával jelölhetők ki. A hálózat-elemzésben a híd egy olyan élre utal, amely a hálózat különböző közösségeiből származó csomópontokat köti össze. A hidak kulcsfontosságúak, mivel kapcsolatokat hoznak létre a hálózat egyébként elkülönülő részei között, elősegítve az információáramlást vagy a befolyást a különböző közösségek között. A hidak eltávolítása a hálózat elszigetelt összetevőkre való feldarabolódásához vezethet. A közösségetekeltálást a Louvain-módszerrel végeztük annak gyorsasága és jó skálázhatósága miatt. (A Louvain-algoritmus szinte lineáris időben fut ritka gráfokon, ezért praktikus megnövelt méretű generált teszhálózatokon.) 6 közösség kialakítására törekedtünk, összesen 200 realizációt vizsgálva. A hálózat megerősítéséhez hidak egyszerű duplikációját alkalmaztuk.



1. ábra A szimuláció által javasolt hidak elhelyezkedése

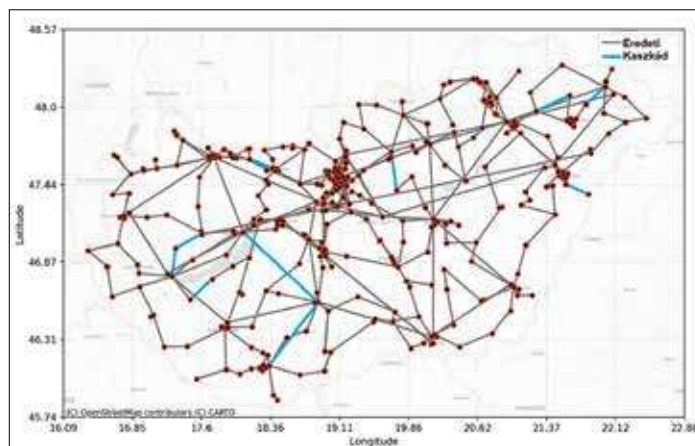
Második módszerünk alapja a kerülőutak („bypass”) építése, mely a gyenge szinkronizációt mutató csomópontokat célozza. Ehhez először kiszámítottuk minden csomópont lokális Kuramoto rendparaméterét, csak az első szomszédokat figyelembe véve. Ezt követően a szinkronizáció erősségétől függően 6 csoportot alakítottunk ki. A legrosszabbul teljesítő csoport esetében újra ellenőriztük a szomszédságot. Ha volt egy másik gyengén szinkronizált csomópont a legközelebbi szomszédok között, akkor megkettőztük a közöttük lévő élt.



3. ábra A szimuláció által javasolt kerülőutak elhelyezkedése

Ha csak más csoporthoz tartozó csomópontok voltak, akkor a legkisebb geodéziai távolságra eső két csomópontot választottuk ki, és összekapcsoltuk őket. Ez a logika csak új kapcsolatokat hoz létre, és megőrzi a csomópontok számát (2. ábra).

A harmadik módszer a kaszkádhibák során leginkább érintett élekből indul ki. Ehhez minden szimulációs futtatásban perturbációt hoztunk létre egyetlen él eltávolításával, rögzítve a kialakuló kaszkád eseménysor első 1000 másodpercét. Ezeket a futtatásokat számos független kezdeti zajrealizáció esetén megismételtük. A legsebezhetőbb kapcsolatok azonosításához az összes realizációból meghatároztuk a kaszkádok méretét, majd ezeket csökkenő sorrendbe rendeztük. A lista elejére kerülő élek megerősítése adja a módszer kimenetét.



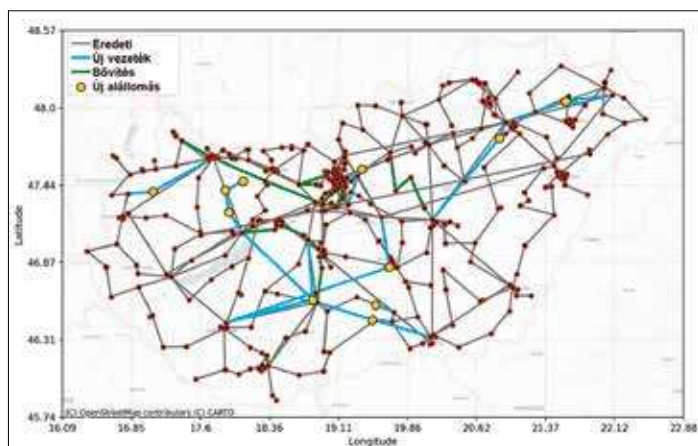
3. ábra A kaszkád szimuláció szerint megerősítendő élek elhelyezkedése

4. AZ EREDMÉNYEK KONTEXTUSA

A három szimulált hálózatmegerősítési eljárás nagyban eltérő eredményeket ad. Hidak alkalmazása esetén a 12. forgatókönyv szerinti modellben 23 új vezeték kerül elhelyezésre, összesen 32 csomópontot érintve. Ezek területi eloszlása viszonylag egyenlőtlen, az Észak-Dunántúlon koncentrálódik. A kerülőutak kialakításánál a 23 vezeték hozzáadását már kiindulási paraméterként vettük figyelembe, hogy azonos mértékű megerősítéseket hasonlíthassunk össze. Ennél a módszernél általános tapasztalatként elmondható, hogy az újonnan javasolt vezetékek többsége jelenlegi élek megkettőzését jelenti, és csak kisebb számban új vezetékek kiépítését. A vezetékek területi eloszlása heterogénebb, átlagos hosszuk 28,08 km. A kaszkád szimulációk eredményeként kapott vezetékek ennél minimálisan rövidebbek (26,82 km), és több esetben átfedést mutatnak a „bypass” módszer eredményeivel (pl. Litér–Paks, Paks–Pécs).

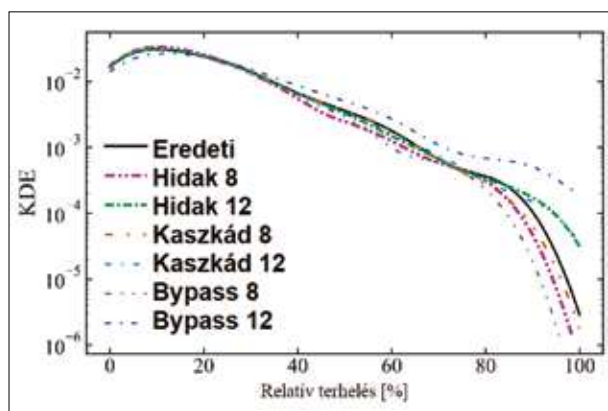
Hogy a fenti eredmények összevethetőek legyenek a hagyományos hálózatfejlesztési számításokkal, térképes formában ábrázoltuk a MAVIR 2021. évi hálózatfejlesztési tervében szereplő tégeket is. Ezek között 37 új vezeték létesítése (kék szín) és 52 meglévő vezeték kapacitásbővítése (zöld szín) szerepel. Jelöltük továbbá az új állomások létesítését is; ezek a beruházások módszertani különbségek miatt nem értelmezhetőek a három bemutatott eljárás esetén, de szükségesek a teljes képhez.

A Braess-paradoxon tesztjéhez a hálózatokat leképeztük DigSilent PowerFactory szoftverkörnyezetben, majd teljesítményáramlási szimulációkat végezve meghatároztuk az egyes vezetékek relatív terhelését. (A terhelhetőség maximumaként a termikus terhelhetőség statikus határát tekintettük.) Fontos különbség a szinkronizációs modellekkel összevetve, hogy a teljesítményáramlási szimulációk hatásos és meddőteljesítményt is kezelnek, míg a Kuramoto-moddelle



4. ábra A MAVIR által 2021-ben tervezett hálózátfejlesztési beruházások elhelyezkedése

épülő kutatások a meddőt elhanyagolják. Mivel az egyes modellek eltérő darabszámú vezetéket tartalmaznak, a relatív terhelés eloszlásának ábrázolására ún. magassűrűségbecslést (kernel density estimation) alkalmaztunk. Megfigyelhető, hogy az összehasonlított 6 esetből 3 is mutatja valamilyen mértékben a Braess-paradoxon jeleit. Különösen rosszul teljesít ebből a szempontból a kerülőutak alkalmazása a 12. forgatókönyv szerinti modellben.



5. ábra A különböző hálózátmegegerősítési simulációk összehasonlítása a vezetékek relatív terhelése szempontjából

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A három hálózátmegegerősítési módszer kvantitatív összehasonlítása rámutatott, hogy azok hatékonysága nagyban függ a szinkronizáció erősségétől. A legnagyobb mértékű javulások a közbenső, $\lambda \cong 0,5$ tartományban, a szinkronizációs

átmenet közelében vannak. Ebben a tartományban is elsősorban a hidak és a kerülőutak beépítése hatékony; előbbi növeli a fáziskoherenciát és csökkenti a kaszkádméreteket, míg utóbbi a frekvenciaszórásra hat pozitívan.

Természetesen a vizsgálatok eredményeit nagyban befolyásolja a lehatárolt hálózat mérete, az országhatáron túli hurokok hatása. Jó példa erre a Paks–Sándorfalva-összeköttetés, ami regionális léptékű modellekben jellemzően megjelenik a kritikus vezetékek között [8][9], szimulációink során viszont csak egy esetben került közéjük. Szintén a szinkronizációs modellek sajátosságaiból adódóan valamelyest felülreprezentáltak a 132 kV-os „végpontok”, illetve a határkeresztvezetékek magyarországi alállomásai.

Összehasonlító elemzésünk legfontosabb tapasztalata, hogy a három hálózátmegegerősítési módszer hatékonysága erősen függ a kiinduló hálózat heterogenitásának mértékétől, térbeli jellegzetességeitől, illetve a csatolás erősségétől. „Merev” (kevésbé sérülékeny) hálózatokat elsősorban a közösségek közötti összeköttetések növelésével lehet erősebbé tenni, míg a „lazább” esetekben a kritikus, potenciálisan kaszkádokat elindító kapcsolatokra érdemes figyelni.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíjának (BO/131/23) a HUN-REN Kiemelt Kutatási Téma pályázatának (SA-44/2021) és az OTKA K146736 támogatásával készült. Köszönjük a KIFÜ HPC-nek a szuperszámítógéphasználatot, és Jeffrey Kellingnek a GPU szoftver fejlesztésében nyújtott támogatását.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Latorre, Cruz, Areiza, Villegas:** Classification of publications and models on transmission expansion planning, *IEEE Transactions on Power Systems* 18, 938 (2003)
- [2] **Hemmati, Hooshmand, Khodabakhshian:** Comprehensive review of generation and transmission expansion planning, *IET Generation, Transmission & Distribution* 7, 955–964 (2013)
- [3] **Lacerda, Dias, Freitas, Macau:** Vulnerability and stability of power grids modeled by second order kuramoto model: a mini review, *The European Physical Journal Special Topics* 230, 3509–3517 (2021)
- [4] **Ódor, Papp, Benedek, Hartmann:** Improving power-grid systems via topological changes or how self-organized criticality can help power grids, *Phys. Rev. Res.* 6, 013194 (2024)
- [5] **Wang, Xue, Lu, Jiang, Wu:** Functional community detection in power grids, in *Complex Networks and Their Applications VIII* (Springer International Publishing, 2019) p. 883–894.
- [6] **Nakarmi, Rahnamay-Naeini, Khamfroush:** Critical component analysis in cascading failures for power grids using community structures in interaction graphs, *IEEE Transactions on Network Science and Engineering* 7, 1079 (2020)
- [7] **Hartmann, Ódor, Benedek, Papp:** Studying power-grid synchronization with incremental refinement of model heterogeneity, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 35, 013138 (2025)
- [8] **Ódor, Deng, Hartmann, Kelling:** Synchronization dynamics on power grids in europe and the united states, *Phys. Rev. E* 106, 034311 (2022)
- [9] **Martínez-Barbeito, Gomila, Colet, Fritzsche, Jacquot:** Transmission grid stability with large interregional power flows, *Phys. Rev. Res.* 7, 013137 (2025)



Dr. Hartmann Bálint

Tudományos főmunkatárs
HUN-REN Energiatudományi
Kutatóközpont
MEE-tag
hartmann.balint@vik.bme.hu



Dr. Ódor Géza

Tudományos tanácsadó
HUN-REN Energiatudományi
Kutatóközpont
odor.geza@ek.hun-ren.hu



Benedek Kristóf

Tudományos segédmunkatárs
HUN-REN Energiatudományi
Kutatóközpont
benedek.kristof@ek.hun-ren.hu



Dr. Papp István

Tudományos munkatárs
HUN-REN Energiatudományi
Kutatóközpont
papp.istvan@ek.hun-ren.hu



Dr. Michelle T. Cirunay

Posztdoktor kutató
HUN-REN Energiatudományi
Kutatóközpont
michelle.cirunay@ek.hun-ren.hu