

A HETEROGENITÁSOK HATÁSAI VILLAMOS HÁLÓZATI MODELLEKEN

Ódor Géza, Hartmann Bálint
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Előzmények

A villamos hálózatok nagy, komplex és heterogén rendszerek, amelyek energiatermelő és -fogyasztó csomópontokból épülnek fel. A villamos áramot változóáramú vezetékrendszerrel osztják szét. Váratlan változások deszinkronizációs eseményeket okozhatnak, amelyek lavinaszerűen terjednek szét és külön-

böző méretű áramkimaradásokat okoznak. Legrosszabb esetben a teljes rendszer hosszú idejű deszinkronizációja is bekövetkezhet. Ilyenek elkerülése végett a villamos hálózatokat úgy kell tervezni, hogy ellenállóak legyenek a helyi instabilitásoknak és hibáknak. Tanulmányok igazolták, hogy az elméleti modellek, amelyek jól reprodukálják a villamos hálózatok topológiai és elektromos kölcsönhatásait, jó



Ódor Géza 1984-ben villamosmérnöki diplomát szerzett a BME-n. Azóta a KFKI területén levő, különböző nevűre átkeresztelt MTA kutatóintézetek kutatója. Fizikusi MSc-t 1993-ban Chicagóban, PhD-t 1996-ban az ELTE-n kapott. 2004 óta az MTA doktora. Kétszer egy évig CERN kutatói ösztöndíjas volt. Jelenleg az MTA-EK MFA tudományos tanácsadója, több nemzetközi projekt tagja. Fő kutatási területe a nemegyensúlyi rendszerek statisztikus fizikája a rendezetlen és univerzális viselkedések vizsgálata.



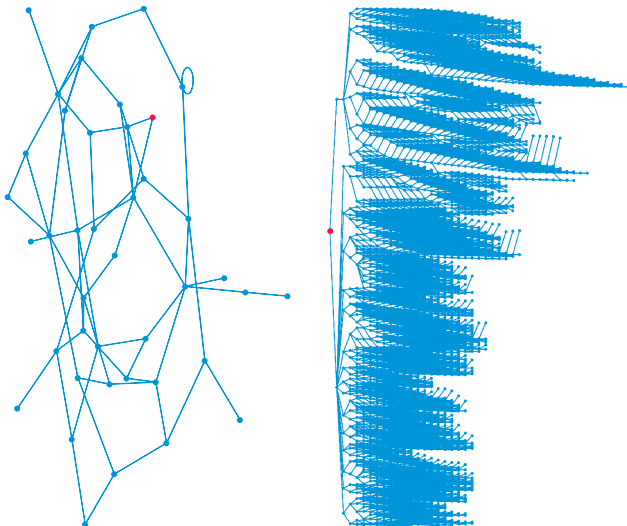
Hartmann Bálint villamosmérnöki diplomáját és PhD-fokozatát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen szerezte 2008-ban és 2013-ban. A Villamos Energetika Tanszék docense. Az MTA Energiatudományi Kutatóközpontjának tudományos munkatársa. Kutatási területei az energiatárolás villamosenergia-rendszerben betöltött szerepe, az elosztó hálózatok számítógépes modellezése és szimulációja, illetve az időjárásfüggő megújuló energiaforrások rendszerintegrációja.

betekintést nyújthatnak az energiarendszer dinamikus viselkedésébe is.

A villamos hálózatok szinkronizációjának leírására az úgynevezett másodrendű Kuramoto-modellt vették be [1]. Ez a más szinkronizációs jelenségeket leíró Kuramoto-egyenlethez képest egy tehetetlenségi tagot is tartalmaz, amelynek következtében a globálisan csatolt, magas dimenziós rendszerek átlagtérmegoldása, szinkronizációs fázisátalakulása másodrendűből elsőrendűvé válik. Azonban alacsonyabb topologikus dimenziókban, ahol a fluktuációk hatása erősebb, ezt az átmenetet korábban nem vizsgálták. Ezen felül más statisztikus fizikai rendszereknél ismert tény, hogy a hálózati heterogenitások elkenik az ugrásszerű fázisátmeneteket és úgynevezett *Griffiths-fázisokat* okozhatnak. Ez utóbbiak az olyan ritka, de nagyon lassan változó régiókkal kapcsolatosak, amelyek hosszú időközön keresztül tartanak fenn a globális fázissal ellenkező állapotot, hatványfüggvény-alakú időfüggéseket okozva a rendparaméterben. Az ilyen fázisok a kritikus pont környezetében egy kiterjedt kontrollparaméter-regióban jelentkeznek és az önszerveződő kritikussággal (SOC) versengő magyarázatot adnak a hatványfüggvények gyakori megfigyelésére [2, 3].

Az áramkimaradások méretének eloszlásairól több ország historikus villamos adatait analizálva megállapították [4], hogy a tiszta véletlen, gaussi helyett vastagfarkú, hatványfüggvény-eloszlással rendelkeznek. A teljesítmény kereslet-kínálat versengés alapján SOC (de nem szinkronizációs) modellekkel próbálják ezt modellezni. Kutatási célunk az volt, hogy a szinkronizációs viselkedést egy olyan helyzetben határozzuk meg, amikor a hálózatban már bekövetkezett a globális csatolás drasztikus leesése [5]. Egy fontos kérdés ezzel kapcsolatban, hogy a rendszer stabilitását miként befolyásolja az elosztott (jellemzően megújuló) energiaforrások bekapcsolása az alaperművek mellé.

1. ábra. A szintetikus hálózatok jellemző struktúrája. Bal oldalon hurkolt NAF-hálózat, jobb oldalon a NAF-hálózat pirossal jelzett csomópontjához kapcsolódó sugaras KÖF/KIF-hálózat, 68 850 csomóponttal.



Villamos hálózatok

A villamosenergia-rendszer topológiájának vizsgálatához minden esetben valamilyen kiinduló hálózati modellre van szükségünk, azonban ezek kiválasztását döntően az elvégezni kívánt vizsgálatok köre határozza meg. Az elterjedt gyakorlat szerint néhány jól felépített mintahálózat megfelelő kiindulási alap lehet, ugyanakkor ezek általában a teljes villamosenergia-rendszer csak egy feszültség szintjét (nagy-, közép- és kiefeszültség; NAF, KÖF, KIF) tartalmazzák (1. ábra), vegyes hálózatok alkalmazására ritkán találunk példát. Ennek oka elsősorban abban keresendő, hogy míg a NAF átviteli hálózatok számossága viszonylag kicsi és a kapcsolódó adatok sok esetben állami vállalatokon és nemzetközi szervezeteken keresztül hozzáférhetők, addig a KÖF és KIF elosztó hálózatok esetén ez már közel sincs így. Az adathiány problémája kiküszöbölhető úgynevezett referenciahálózati modellek (reference network model; RNM) konstruálásával. Ezek a modellek az esetek döntő többségében valós hálózatok egy-egy csoportjának közelítő leképezését végzik, így topológia szempontjából kellően pontosak. Alkalmazásuk hátránya kis számukban keresendő, nem teremtik meg a ténylegesen hálózatfüggetlen vizsgálatokhoz szükséges feltételeket.

Az arany középutat a szintetikus úton generált hálózatok jelentik, amelyek valamilyen előzetesen definiált szabályrendszer (például növekedés folyamata, csomópontok és kapcsolatok számának viszonya, feszítőfa struktúrája) szerint kerülnek kialakításra. A szintetikus hálózatok népszerűségét növeli az is, hogy azok topológiai tulajdonságai bizonyos mérőszámok mentén könnyen összehasonlíthatóvá teszi őket nevezetes gráfokkal. Saját vizsgálataink szempontjából ugyanakkor jelentős hátrányt jelentett, hogy az elterjedten használt algoritmusokkal egyrészt viszonylag alacsony (legfeljebb néhány ezres) csomópontszámú hálózatokat hoznak létre, másrészt számos olyan közelítést tartalmaznak, mely a villamosenergia-hálózatok fontos topológiai tulajdonságait nem vagy rosszul képezi le. Az előző két okból munkánk során saját szintetikus hálózat-generáló algoritmus kidolgozását határoztuk el, amelyet MATLAB környezetben végeztünk el. Az algoritmus jobb megértése érdekében – annak bemutatása előtt – röviden kitérnénk a magyarországi villamosenergia-rendszerre.

A villamosenergia-hálózat feladata az erőművek közötti kooperáció megvalósítása, a nemzetközi összeköttetések biztosítása, valamint a megtermelt energia szállítása és elosztása. Ahhoz, hogy e célok a lehető legalacsonyabb gazdasági és környezeti költségek mellett legyenek teljesíthetők, az átviteli és az elosztó hálózatok kialakítása nagymértékben eltér egymástól. Az átviteli hálózatnak (Magyarországon 750, 400 és 220 kV-os feszültség szint) kell a legnagyobb egység teljesítményeket kezelnie, ide csatlakoznak a legnagyobb erőművek, illetve egyes ipari nagyfogyasztók. Ahhoz, hogy a hálózat üzemeltetésének műszaki és gazdasági optimumát megközelít-

sük, lehetőségünk van az energiaáramlás irányának és nagyságának befolyásolására. Ehhez olyan hurkolt topológiára van szükség, amely nemcsak több irányú ellátás kialakítását teszi lehetővé, hanem az ellátásbiztonságot is növeli. (A villamosenergia-rendszer üzemeltetése kapcsán N–1 elvnek nevezzük, amikor a rendszer tolerálja az egyszeres hibák bekövetkezését.) Bár nagyon hasonló felépítésű, a szakmai zsargon megkülönböztetve kezeli a 120 kV-os fő elosztóhálózatokat, amelyek szintén kiemelten magas üzembiztonságot tesznek lehetővé, azonban kialakításukban már hurkolt és sugaras jellemzők egyaránt megtalálhatók, illetve az energiaáramlásnak általában kijelölt iránya van. Lényegesen nagyobbak a különbségek azonban, ha az összehasonlítást a KÖF és KIF elosztó hálózatokkal végezzük. A magyarországi elosztó hálózat táppontjait a 120 kV-os alállomások adják, a topológia pedig döntően sugaras kialakítású, ezáltal az egyes csomópontok fajlagosan kevesebb csatlakozással bírnak. A KÖF elosztói szintre csatlakoznak az elosztott energiatermelés nagyobb egységei, ipari és kereskedelmi fogyasztók, illetve innét kapja táplálását a KIF elosztó hálózat is. Az utóbbi feszültség szintje 0,4 kV, fő funkciója pedig a lakossági fogyasztók ellátása, illetve újabban a háztartási méretű kiserőművek (például napelemek) termelésének befogadása.

Az átviteli és elosztó hálózatok funkciójának és topológiai jellemzőinek eltéréséből adódóan azok csomópontszáma között is nagyságrendi eltérések adódnak. Saját vizsgálataink szempontjából ez jelenti a legfontosabb előnyt, hiszen olyan méretű, a valós hálózatokat jól leképező modelleket alkothatunk, amelyek már megfelelnek a szinkronizációs átmenetek szimulációjához. Nehézséget jelent ugyanakkor, amint azt a korábbiakban is említettük, hogy az ilyen hálózatok létrehozásának adatigénye nehezen kielégíthető, ezért is fordulunk a szintetikus hálózatok generálásához. A nemzetközi téren használt szintetikus eljárásokhoz képest az elosztóhálózati topológia bevonása – a csomópontszám tekintetében – jelentős előnyt jelent; villamosenergia-rendszerek esetén a NAF-, KÖF- és KIF-hálózatok csomópontjainak aránya durván 1 : 100 : 10 000. (A kutatásaink során létrehozott mintahálózatok néhány millió csomópontból álltak, lásd az 1. táblázatot.) További lényeges eltérést jelent, hogy a hálózatok leképezéséhez súlyozott gráfokat használunk, amely – ellentétben a legtöbb ismert eljárással – figyelembe veszi a rendszerelemek admittanciáját, közvetve pedig a különböző energetikai jelenségek dinamikáját.

A hálózatgeneráló algoritmusban a 120 kV-os feszültség szintet jelöltük meg a véletlen hálózatok kiindulásaként; minden ennél nagyobb feszültségű hálózatrészt determinisztikus módon alakítottunk ki. Egyetlen 120 kV-os alállomás szempontjából nézve a folyamatot, az első lépés az alállomás kijelölése. Ezt követően egy véletlen számot generálva meghatározzuk az alállomásból induló hálózat jellegét (szabadvezeték vagy -kábel). E lépésnek nem csupán az eltérő

hálózat	csomópontok száma	élek száma
1 M	1 098 583	1 098 601
1,5 M	1 455 343	1 455 367
2,5 M	2 356 331	2 356 360
23 M	23 551 140	23 551 254

rő feszültség szintek miatt van jelentősége, hanem a két hálózattípus eltérő kialakítása (vezeték hosszak, transzformátor-teljesítmények, leágazások száma) miatt is. A 120 kV-ot a KÖF szinttel összekötő transzformátor névleges teljesítményét (és ezáltal admittanciáját) a valós hálózat empirikus adatai alapján választjuk ki. A soron következő lépés a transzformátorból induló leágazások kialakítását végzi; a gerincvezeték hossza, az oldalágak elhelyezkedése és hossza, illetve a kapcsolódó KÖF/KIF transzformátorok elhelyezkedése – figyelembe véve a modellezni kívánt hálózat paramétereit – véletlen módon kerül kiválasztásra. Azonos módszerrel alakítjuk ki a KIF-hálózatrészeket is, csatlakoztatva a hálózat végpontjait jelentő egyedi fogyasztókat is.

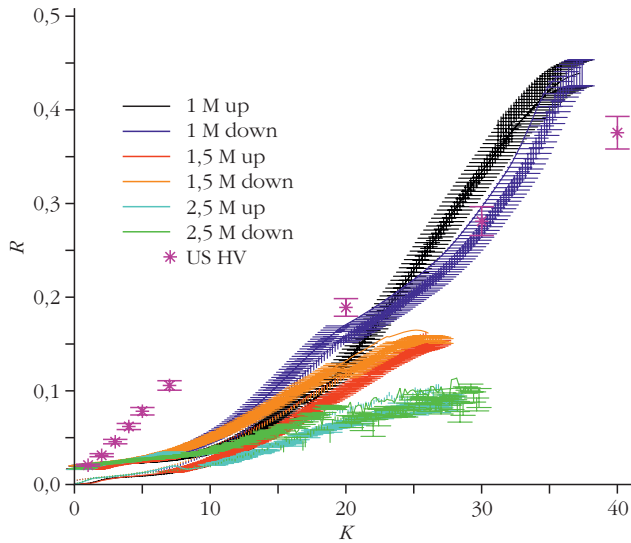
Ahogy az 1. táblázatban is látható, a kutatás jelen fázisában létrehozott legnagyobb hálózat körülbelül 23 millió csomóponttal bír, ez már jó közelítést jelent egy Magyarországhoz hasonló lakosságszámú és fejlettségű ország villamosenergia-hálózatának. A hálózatelemzések, illetve a szinkronizációs futtatások magas számítási igénye miatt azonos felépítésű, de kisebb hálózatokat is kialakítottunk. Szintetikus hálózatainkat más, a nemzetközi szakirodalomban bemutatott hálózatokkal is összehasonlítottuk, elsősorban a kialakított topológia, a figyelembe vett feszültség szintek, a foksámeloszlás és a klaszterezési együttható mentén. Elmondható, hogy más hálózatok szinte kizárólag az átviteli hálózat topológiája és működési elvei mentén épülnek fel, az egyes csomópontok átlagos fokszáma 2,4–2,8 között mozog. Ezzel szemben az elosztó hálózat figyelembe vétele, annak nagy elemszáma és sugaras kialakítása azt eredményezi, hogy az általunk létrehozott hálózatok átlagos fokszáma 2 körüli, és az eloszlás jellege is eltérő.

Szinkronizációs modellezés

Valós adatok alapján nagy, szintetikus hálózatokat generáltunk és vizsgáltuk a másodrendű Kuramoto-egyenlet numerikus megoldását, amely a j -edik oscillator θ_j szögváltozójának időfüggését írja le:

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i(t),$$

$$\dot{\omega}_i(t) = \omega_{i,0} - a \dot{\theta}_i(t) + \frac{K}{N_i} \sum_j A_{ij} \sin[\theta_j(t) - \theta_i(t)].$$



2. ábra. Állandósult állapotbeli Kuramoto-rendparaméter különböző hálózatok esetén a globális csatolás függvényében (fel/le adiabatikus lépésekkel). Szinkronizációs átmenet nagy K -ra, valamint gyenge hiszterézis látható.

Itt N_i az i -edik csomópontba befutó élek száma, K a globális csatolás, ami a csomópontok között maximálisan átvitt teljesítménnyel kapcsolatos, A_{ij} az admittanciákkal súlyozott szomszédsági mátrix és a a teljesítménydisszipációt leíró együttható. Heterogenitás, amely térbelileg rögzített, kétféleképp jelenik meg, a gaussi eloszlású véletlen $\omega_{i,0}$ oszcillátor-önfrekvenciákban és az A_{ij} mátrixelemekben. Negyedrendű Runge–Kutta-módszerrel oldottuk meg a fenti egyenletet úgy, hogy a kiindulás teljesen szinkronizált vagy deszinkronizált állapot volt. Az úgynevezett kvencseléses (rögzített K -hoz való fejlesztés), vagy adiabatikusan változó K -jú módon vizsgáltuk a kialakuló időfejlődést. A fázisszinkronizáció jellemzésére a Kuramoto-rendparamétert határoztuk meg:

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

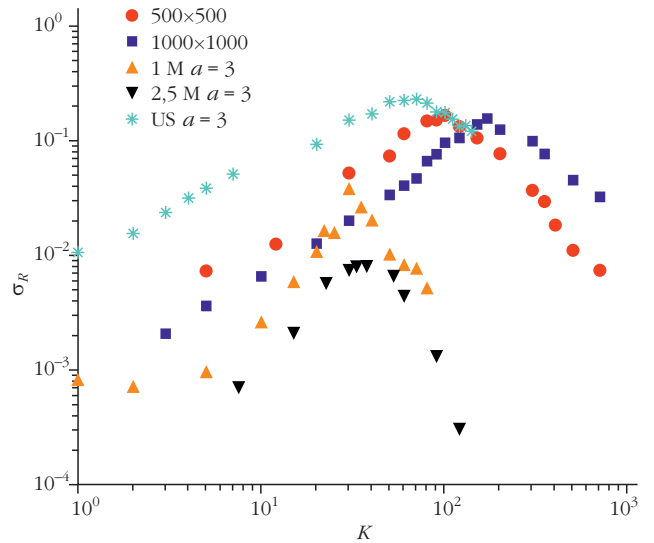
ahol $1/N$ a rendszer összes csomópontjára való átlagolást jelzi és 50 mintaátlagon képzett valós rész:

$$R(t_k) = \langle r(t_k) \rangle$$

időfüggését analizáltuk. Állandósult állapotban R fluktuációját (σ_R) is mértük, amely fázisátalakuláskor szinguláris viselkedést jelez.

Fázisátmenet-vizsgálat

Míg teljes gráfon igazoltuk az elsőrendű fázisátalakulást, kétdimenziós rácson és a szintetikus villamos hálózatokon (amelyek gráfdimenziója 1-2 körüli) a végesméret-analízis azt mutatja, hogy nincs igazi fázisátalakulás a végtelen limeszben, csak szinkronizációs átmenet, amelynél N -et növelve egyre kisebb rendparamétert és fluktuációkat találunk (lásd 2. és 3.



3. ábra. Az állandósult állapotbeli fluktuációk különböző hálózatok esetén a globális csatolás függvényében. A rendszermérettel csökken a fluktuációk nagysága, ami fázisátalakulás hiányára utal a végtelen limeszben.

ábrák). A saját szintetikus hálózatok eredményeihez hasonlítottuk az irodalomban gyakran citált USA $N = 4941$ csomópontos irányítatlan és súlyozatlan NAF-hálózatokon generált eredményeket is.

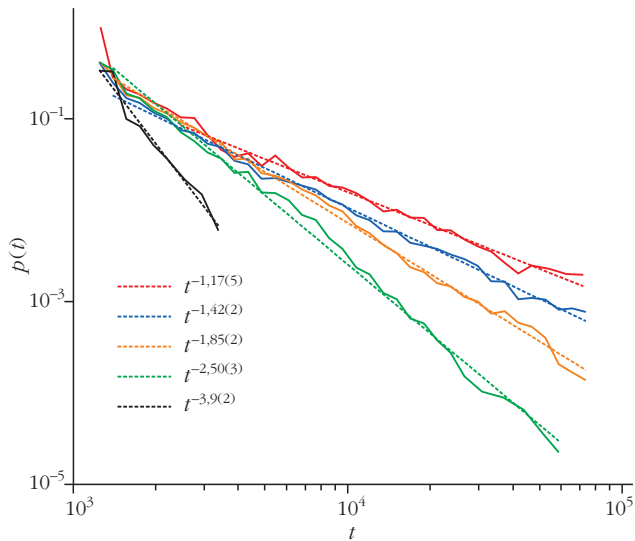
Emellett kétdimenzióban erős, a villamos hálózatokon gyenge hiszterézishurkokat is találtunk, amely az elsőrendű átmenetekre jellemző.

Deszinkronizációs lavina időeloszlása

Szinkronizált állapotból, indított rendszerek esetén vizsgáltuk azon idők valószínűségeloszlását, ameddig R_T az $1/N^{1/2}$ küszöbérték alá esik, mert ez teljesen deszinkronizált állapotot jelez. A kvencseléses protokollt alkalmaztuk alacsony K csatolási értékekkel. Nagyszámú futásra, amelyek különböző $\omega_{i,0}$ véletlen kezdeti értékekkel rendelkeztek, meghatároztuk ezen idők $p(t)$ eloszlását, amelyet az 1 M hálózat esetén a 4. ábra mutat. A log-log diagramon jól megfigyelhetők a K -függő hatványfüggvényfarkak, amelyek hasonlóak az empirikus áramkimaradás-eredményekhez, de valódi fázisátalakulás hiányában itt nem beszélhetünk valódi Griffiths-fázisról. Inkább a moduláris hálózatban megjelenő úgynevezett frusztrált szinkronizációról, amelyben erősebben csatolt domének különböző szinkronizált állapotokba ragadnak be.

Az elosztott energiatermelés előnye

Annak tisztázására, hogy a szinkronizációt miként befolyásolja az elosztott energiatermelők megjelenése hálózatunkban, összehasonlítottuk a hagyományos nagyfeszültségű körbeli erőműves modellt a véletlenül szétszórt energiaforrásos esettel. Korábban már kisebb és egyszerűbb szintetikus hálózatoknál



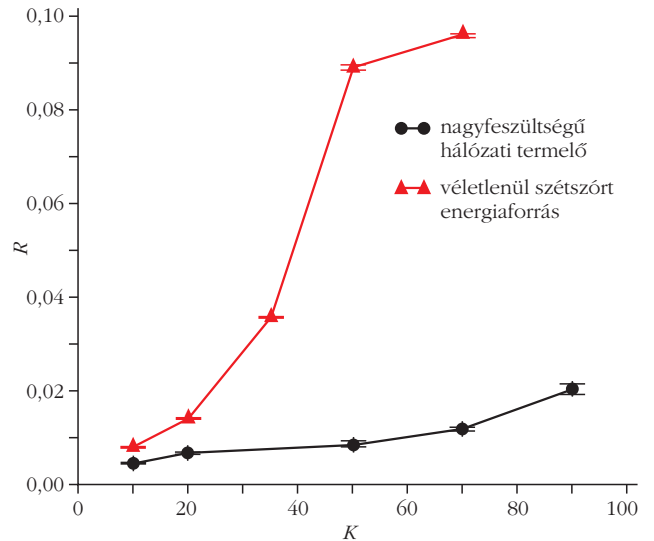
4. ábra. Deszinkronizációs lavinák hosszának időeloszlása az 1 M hálózaton különböző K -k esetén ($K = 0,7, 0,6, 0,5, 0,4, 0,2$ fentről lefelé haladva). A szaggatott vonalak hatványfüggvény-illesztéseket mutatnak.

igazolták [6], hogy a decentralizált energiatermelős modell stabilabb, mint a hagyományos. Mí a fentihez hasonlóan a hagyományos esetet olyan bináris $\omega_{i,0}$ eloszlással modelleztük, amelyben a nagyfeszültségű hálózat csomópontjaiba $\omega_{i,0} = 10 + p_G$, míg a többi, fogyasztónak feltételezett csomópontokba $\omega_{i,0} = -1 + p_G$ eloszlású sajátfrekvenciát tettünk, ahol p_G egységsszórású, normál eloszlású véletlen változót jelöl. A szétszórt energiaforrások modellezésére az energiatermelő csomópontokba $\omega_{i,0} = 2,5 + p_G$, más-hol $\omega_{i,0} = -1 + p_G$ értéket alkalmaztunk véletlenszerűen. Szinkronizált állapotból kvencselve határoztuk meg az állandósult állapotbeli értékeket, amit az 5. ábra mutat. Egyértelműen látszik, hogy az elosztott energiatermelős modell az egész vizsgált K tartományban nagyobb szinkronizációkat eredményez a hagyományosnál.

Összefoglalás

A heterogenitásának vizsgálata céljából összehasonlítottuk a másodrendű Kuramoto-modell fázisszinkronizációs átmenetét kétdimenziós és szintetikus villamos hálózatokra alkalmazva.

Az utóbbiak súlyozott hierarchikus hálózatok, amelyeket valós rendszerek alapján generáltunk.



5. ábra. Állandósult állapotbeli szinkronizáció az 1 M hálózaton, bináris eloszlású $\omega_{i,0}$ -k esetén hagyományos nagyfeszültségű hálózati termelő (pötty) és véletlenül szétszórt energiaforrások (háromszög) esetén.

A globális (K) csatolást változtatva megmutattuk, hogy az átmenetek ugyan elsőrendű jellegűek, a végtelenméret-limeszben nem lesz igazi fázisátalakulás. Azonos méretű szintetikus hálózatokon a szinkronizáció alacsonyabb csatolásoknál törik le, mint a reguláris griden. Egy hálózati összeomlást szimuláló alacsony K -ra való ugrásnál a deszinkronizációs lavinák időhossz-eloszlása – a tapasztalatokkal összhangban – hatványfüggvény-viselkedést mutat.

Megmutattuk, hogy az elosztottenergia-termelős rendszer szinkronizációs tulajdonságai jobbak, mint a hagyományos, centralizált erőműves modell alkalmazása esetén.

Irodalom

1. G. Filatrella, A. H. Nielsen, N. F. Pedersen: Analysis of a power grid using a Kuramoto-like model. *Eur. Phys. J. B* 61 (2008) 485.
2. Ódor Géza: Kritikus dinamika egy nagy emberi konnektomon. *Fizikai Szemle* 67/7 (2017) 227.
3. Ódor Géza: Univerzalitási osztályok és fázisátalakulások komplex, nemegyensúlyi rendszerekben. *Fizikai Szemle* 59/4 (2009) 136.
4. B. A. Carreras, D. E. Newman, I. Dobson, A. B. Poole: Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts. *IEEE Trans. Circuit Syst. I: Regular Papers* 51 (2004) 1733.
5. Géza Ódor, Bálint Hartmann: Heterogeneity effects in power grid network models. *Phys. Rev. E* 98 (2018) 022305.
6. M. Rohden, A. Sorge, D. Withaut, M. Timme: Impact of network topology on synchrony of oscillatory power grids, *Chaos* 24 (2014) 013123.