

**MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOKKAL KAPCSOLATOS HALLGATÓI  
ÉS OKTATÓI KUTATÁSOK A BMGE VILLAMOS ENERGETIKA TANSZÉK-  
ÉNEK VILLAMOS MŰVEK ÉS KÖRNYEZET CSOPORTJÁBAN**  
*STUDENT AND INSTRUCTOR RESEARCH ACTIVITIES IN THE FIELD  
OF RENEWABLE ENERGY, OF THE POWER SYSTEMS AND ENVIRONMENT  
GROUP OF THE DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER ENGINEERING*

**Hartmann Bálint**

BMGE Villamos Energetika Tanszék, Villamos Művek és Környezet Csoport, 1111 Budapest, Egry József u. 18.,  
*hartmann.balint@vet.bme.hu*

**Összefoglalás:** A cikk célja a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszékének Villamos Művek és Környezet Csoportjában végzett, megújuló energiaforrásokhoz kapcsolódó kutatási munkák rövid ismertetése, néhány kiemelt projekt rövid bemutatásán keresztül.

**Abstract:** The aim of present paper is to provide a brief introduction on the research activities in the field of renewable energy, performed by the Power Systems and Environment Group of Department of Electric Power Engineering at Budapest University of Technology and Economics.

**VM Csoport bemutatása.** A Tanszékcsoportunk jogelődjének tekintett Villamosművek Tanszék az 1929/30-as tanévben kezdte meg a működését a M. Kir. József Nádor Műegyetemen. Az új tanszék létesítése egybeesett a gépészmérnöki képzés reformjával, melynek eredményeként az általános gépészmérnöki képzés („A” tagozat) mellett megindult a villamos („B”) és mezőgazdasági („C”) gépészmérnökök oktatása is. A tanszék első vezetője Verebély László egyetemi tanár volt, akinek jelentős szerepe volt a villamosítás országos fejlődésében is. 1937-ben a tanszék neve Villamos-művek és Vasutak Tanszékre változott, ezzel is követve az oktatás és kutatás területén zajló változásokat. Az egyetem Villamosmérnöki Karának 1949. évi megalakulásakor a tanszék is kart váltott, de tevékenységét változatlan néven folytatta 1961-ig. A már Geszti P. Ottó által vezetett tanszék ekkor 10 évre kettévált; a Villamos-művek Tanszék és a Nagyfeszültségű Technika és Készülékek Tanszék csak 1971-ben került újra egy szervezeti egységbe az Erősáramú Intézet keretei között. Ezen időszakban az oktatott tárgyak spektruma folyamatosan bővült, a villamos energia termelésével és szállításával kapcsolatos tantárgyak mellett a rendszer megbízhatóságával és gazdaságos üzemeltetésével foglalkozó diszciplínák is meghonosodtak. A vasúti energiaellátás és a vasúti EMC kérdései ezen időszak alatt is a tanszék kutatási profiljának meghatározó részét képezték. Szintén az 1970-es években zajlottak a világon akkor még ritkaságnak számító 750 kV-os feszültségű bevezetését előkészítő és támogató kutatások, Bán Gábor vezetésével. 1991 és 2001 között a Villamos Művek Tanszék ismét önállóan működött, majd a – máig létező – Villamos Energetika Tanszék létrehozásakor Villamos Művek és Környezet Csoportként tagozódott be abba. Ahogy tanszékcsoportunk neve is mutatja, hagyományos kutatási profilunk (a villamosenergia-átvitel és -elosztás kérdései és a kapcsolódó háttérterületek) mellett ekkorra már hangsúlyos szerepet kaptak a villamosenergia-rendszer környezeti hatásaihoz kapcsolódó tevékenységek.

Az azóta eltelt bő évtized során a tanszékcsoport folyamatosan figyelemmel követte a villamosenergia-ipart átformáló új irányzatokat, így mind oktatási, mind kutatási

munkánkban mára jelentős hányadot képviselnek a megújuló energiaforrások hasznosításával, rendszerbe integrálásával, valamint az időjárás hatásainak vizsgálatával foglalkozó, döntően interdiszciplináris megközelítést igénylő feladatok. Cikkünk célja, hogy egy rövid áttekintést adjon erről a szerteágazó munkáról néhány, az elmúlt években folytatott kutatás ismertetésén keresztül.

**Terhelésbecslő eljárások.** A rövidtávú terhelésbecslés (*short-term load forecasting* – STLF) egy adott fogyasztói kör villamosenergia-fogyasztásának becslésével foglalkozik 1–3 napra előre, negyedórás felbontással. Ezeket a határokat a szakirodalom rugalmasan használja, ide sorolhatjuk az 1 órától 1–2 hétig terjedő terhelésbecslést is. Míg az ennél hosszabb távra történő előrejelzések főképp a villamosenergia-hálózat stratégiai tervezésében vagy éppen szerződés-kötésekkel lényegesek, addig ez a terület az energiahálózat közvetlen működtetésében játszik fontos szerepet. Mind a túlterhelés, mind a túltermelés veszteséget okoz a szolgáltatóknak, ezért ezek elkerülése egyaránt kulcsfontosságú. A téma az utóbbi évtizedekben az energiapiac liberalizációja és az itt is megjelenő verseny miatt egyre nagyobb fontosságra tesz szert.

Egy háztartás fogyasztásának pontos előrejelzése nem lehetséges a számtalan befolyásoló tényező miatt, azonban egy város vagy egy megye összes fogyasztójának energiaigénye már jól becsülhető. A becslés során számításba kell venni a terhelés jellemző napi és heti periodicitását (éjszaka, illetve hétvégén kisebb a terhelés), valamint az időjárás (leginkább a hőmérséklet, de kisebb mértékben a szélsőségek, megvilágítás is), az ünnepek (vagy egyéb speciális napok) és esetleg más nem említett tényezők (például energiaár változásai, nagy érdeklődésre számot tartó események) hatását. Ráadásul a fogyasztók eltérő összetétele és szokásai is külön megfontolást igényelnek.

A fent említett paraméterek és a fogyasztás közötti összefüggések nem lineárisak és sztochasztikusak. A becslési feladat megoldására ennek megfelelően nagyon sokféle módszer létezik, például:

- regressziós módszerek
- idősor-analízis
- neurális hálózatok alkalmazása

- fuzzy logika alkalmazása
- support vector machines (SVM) alkalmazása
- wavelet-analízis

A tanszékcsoporton 2009-ben készült szakdolgozatban, illetve ipari munkáink során ezek közül többnek a megvalósítására és tesztelésére sor került. A minimum likelihood módszerrel identifikált auto-regresszív – mozgó átlag (ARMA) idősorok és a radiális bázisfüggvényeket (RBF) alkalmazó neurális hálózatok adták a legkisebb átlagos hibákat. A terhelésbecslő eljárások megvalósításához jellemzően több évnnyi minta adatsorra van szükség, melyek közül az időjárásal kapcsolatos paraméterek összegyűjtése több esetben is nehézségeket okozott. Ennek javítása mellett a kutatás tapasztalatai alapján további lehetőségek rejlenek a terhelésbecsléshez felhasznált meteorológiai előrejelzések pontosságának figyelembe vételével.

**Fogyasztói vezérlés megújuló kiegészítésére.** A nap- és szélenergiát hasznosító erőművek nagyleptékű integrálása a villamosenergia-rendszerbe elsősorban azok időjárásfüggése miatt nehézkes: az így nyert villamos energia mennyisége ugyanis a környezeti elemek állapotának függvénye és nem illeszkedik a villamos energia igényekhez, ami problémákat okozhat a rendszerben a hatásos teljesítmény-frekvencia szabályozás során. Amennyiben a villamosenergia-felhasználás nagy hányadát kívánjuk megújuló forrásokból fedezni, a könnyen és gyorsan szabályozható erőművek (például nyílt ciklusú gázturbinák) építése mellett az energiátárolók alkalmazása, valamint a fogyasztói befolyásolás a két leggyakrabban alkalmazott eszköz.

Fogyasztói befolyásolásról akkor beszélünk, ha a fogyasztók egy csoportja által felvett teljesítményt valamilyen ösztönző felhasználásával irányítottan megváltoztatjuk. Ennek során adott időszakokra vonatkozó energiafogyasztás nem, vagy csak kis mértékben változik; a hangsúly a terhelési görbe – vagyis a fogyasztás időfüggvényének – megváltoztatásán van. Ösztönző eszköz lehet többek között a tarifális ösztönzés, a közvetlen fogyasztói vezérlés, a tájékoztatás (smart metering), az előre fizetéses rendszer alkalmazása, vagy az automatikus terheléskorlátozás használata.

Hagyományos, tarifális ösztönzésre épülő rendszerekben (flat-rate) a fogyasztás gyakorlatilag rugalmatlan, hiszen a fogyasztó semmilyen formában nincs ösztönözve fogyasztási szokásai megváltoztatására. A passzív tarifális rendszereknél a fogyasztó előre meghatározott tarifarendszer szerint (*time of use*) szerződik a szolgáltatóval; ahhoz, hogy ennek előnyeit kihasználhassa, érdemes szokásain változtatnia. Aktív tarifális befolyásolásról akkor beszélünk, ha a fogyasztó a villamos energia valós idejű árazásának (real-time pricing) hatására változtat saját szokásain – ehhez természetesen elengedhetetlen, hogy elegendő és megfelelő információ álljon rendelkezésére.

A fogyasztók közvetlen vezérlése alatt azt a mechanizmust értjük, amikor egyes fogyasztói berendezések (tipikusan hőtárolós eszközök, például bojlerok vagy hőtárolós kályhák) be- vagy kikapcsolásának engedélyezését az áramszolgáltató végzi, egy speciális távvezérlő eszközrendszer segítségével. Hazánkban ún. hangfrekvenciás vagy rádiófrekvenciás központi vezérlés (HKV és RKV) üzemel, ezek segítségével válik lehetővé a köznyelvben „éjszakai áramnak” nevezett vezérelt villamos energia vételezése.

A fogyasztók közvetlen, szolgáltató általi vezérlésének számos előnye van, többek között:

- lehetővé válik a napi rendszerterhelési görbe simítása, így jobban kihasználhatók az olcsóbb alaperőművek és kevesebb drága csúcserőművi kapacitásra van szükség, illetve a hálózati veszteségek is csökkenthetők.
- a szolgáltatónak lehetősége nyílik az aktuális fogyasztását a menetrendben megadott fogyasztáshoz igazítani, csökkentve ezáltal a kiegyenlítésért fizetendő költségeit.

Hazai és nemzetközi, a fogyasztói vezérléssel kapcsolatos felmérések tapasztalatait az alábbiak szerint összegezzük:

- csupán tarifális ösztönzéssel mérsékelt hatás érhető el a terhelési görbe befolyásolására.
- a vezérlés egyértelműen hatékonyabb, mint a tarifális befolyásolás; célszerű a kombinált megoldások alkalmazása.
- a vezérlés vonzóbb lehet a fogyasztók számára, ha lehetőséget kapnak a szolgáltatói vezérlés felülbírálására.
- a vezérlésből olyan megoldások származnak, melyek egyaránt hasznosak az áramszolgáltató és a fogyasztók számára.
- több helyen vizsgálják a dinamikus vezérlés lehetőségeit, amelynek során nem egy előre rögzített napi ki/be vezérlési program szerint kapja a fogyasztó a villamos energiát, hanem a ki/be vezérlő jelek napról napra változhatnak, a rendszer aktuális igényei szerint.
- vezérelt eszközként a bojlerok mellett (helyett) hőszivattyúk és villamos autók is alkalmazhatók.

Ha Magyarország a jelenleginél nagyobb arányban szeretne megújuló energiaforrásokra támaszkodni az ország villamos energia igényeinek kielégítéséhez, az előzőekben bemutatott okok miatt a fogyasztói befolyásolás különböző válfajai (elsősorban a valós idejű árazás és a közvetlen fogyasztói vezérlés) hatékonyan támogathatják ezt a folyamatot.

**Elosztott energiatermelés modellezése.** Ahogy azt az előző kutatási téma kapcsán már említettük, a villamosenergia-rendszert ért hatások közül a legfontosabbak között kell említenünk az elosztott, jellemzően megújuló energiaforrásokat hasznosító erőművek térnyerését. Ahhoz, hogy ezek rendszerre gyakorolt hatását megfelelően vizsgálhassuk, pontos, valóság-hű modellek kialakítására van szükség, mely különösen nehéz lehet az időjárásfüggő termelők esetén.

A kialakított modellben a szélsébség környezeti változója historikus adatsorok alapján, sztochasztikus jelleggel változik. A szélsébség értékek generálása során a modell időfelbontása, valamint a szélturbinák forgási sebessége és a szélsébség közötti kapcsolat bonyolultsága nehezíti a feladatot. A problémát megkerülve a szélsébség értékek előállítására nem historikus széladatok, hanem szélereőművek energiatermelési adatai alapján történt. Ezzel az egyes szélturbinák átlagos rendelkezésre állását, a turbinák farmokon belüli egymásra hatását, valamint a különböző földrajzi helyeken esetleg eltérő szélviszonyokat is figyelembe vehetjük.

A modell kidolgozásának lépéseit egy szélerőmű példáján keresztül mutatjuk be, melyhez elérhető 3 év termelési adatai:

1. A negyedórás teljesítmény adataiból a vonatkozó szélsebesség-teljesítmény karakterisztikája alapján minden negyedórás teljesítményhez meghatározható egy átlagos negyedórás szélsebesség-érték. Mivel a karakterisztika nem kölcsönösen egyértelmű, ezért a zérus, valamint névleges teljesítményekhez (jellemzően 0–3, illetve 12–25 m/s szélsebesség-tartományban) nem kapunk egyértelmű szélsebességértéket. Ezeket a szélsebesség intervallumokat OOI (*out of observed interval*) tartományoknak nevezzük. A mérések körülbelül 25%-a, illetve 5%-a esik ebbe a (0–3 m/s), illetve (12–25 m/s) tartományba.
2. A kapott fiktív szélsebesség gyakoriságokra Weibull-eloszlást illesztünk, figyelembe véve, hogy az OOI tartományokba eső szélsebességek előfordulási aránya megegyezzen az 1. pontban kapott aránnyal.
3. Az illesztett eloszlásnak megfelelően az OOI tartományokba véletlen számokat generálunk, majd a Box-Cox módszerrel a Weibull-eloszlással jellemzett idősort normális eloszlásúra transzformáljuk.
4. Speciális mozgóablakos módszerrel minden napra és órára szélsebesség-átlagokat és -szórásokat határozzunk meg, majd a kapott értékekkel az idősort standardizáljuk. A lépés hatására a havi és napi szezonális eloszlásokat elmozdítjuk az adataiból.
5. Box-Jenkins módszerrel a kapott standard normális eloszlású idősortra (az OOI tartományok figyelembevétele nélkül) autoregresszív (AR) modellt illesztünk. A kapott AR paraméterek alapján az OOI tartományba új értékeket generálunk, majd újra elvégezzük az AR azonosítást. Az iteráció ismétlésével az AR paraméterek értéke konvergál.
6. Az AR modell paraméterei, az évszakos és napi szezonális eloszlások, valamint a Box-Cox módszer során kapott tényezők jellemzik egy adott szélerőműhöz tartozó szélsebesség-szimulátort. A lépéseket visszafelé végrehajtva megfelelő szezonális eloszlással és korrelációval rendelkező fiktív szélsebesség-idősort kapunk.

A bemutatotthoz hasonló modellezési folyamatok segítségével természetesen más időjárásfüggő megújuló energiaforrások is leképezhetők további vizsgálatok érdekében, erre azonban a kutatás kapcsán nem kerül sor, az ugyanis a kapcsolt erőművek optimális működtetését helyezte középpontba, a szélerőművek pedig csak a megvalósított struktúra egy szeletét jelentették.

**Odooproject.** A Solar Decathlon egy nemzetközi, egyetemeken közötti innovációs verseny, ami 2002 óta kerül megrendezésre az USA Energetikai Minisztériuma és a spanyol kormányzat szervezésében. Célja a napenergia felhasználásával összefüggő építészeti megoldások népszerűsítése, illetve a zöldtechnológiák társadalmi, piaci támogatottságának megteremtése. A verseny során minden résztvevő csapatnak piaci szereplőkkel együttműködve egy kizárólag napenergiát hasznosító, energiahatékony, környezettudatos, könnyűszerkezetes lakóépületet kell megterveznie és felépítenie.

Régióinkból elsőként a BME diákjaiból álló csapat (60 tagot tömörítő projektszervezet) nyújtott be sikeres, a 2012-es madridi Solar Decathlon nemzetközi versenyen való indulás feltételeit teljesítő pályázatát. A terv megvalósításában az építésmérnök hallgatók mellett természetesen más karok tanulói is részt vettek, így a ház villamosenergia-ellátásának kialakításán több, a Villamos Művek és Környezet Csoportban szakdolgozó vagy diplomázó hallgató is dolgozott, a tanszékcsoport oktatóinak szakmai támogatása mellett. A ház geometriáját úgy alakították ki, hogy az aktív és passzív napenergia-hasznosítás a legkedvezőbb legyen. A nyári fal kialakításával a kedvező déli felületek megkétszereződtek, míg a teljesen üvegezett déli homlokzattal szervezett passzív hőnyereség a ház fűtésére fordítható a téli időszakban. A napelemekkel burkolt tető által termelt energiát is figyelembe véve a kialakított rendszer a ház számára szükséges energia háromszorosát képes előállítani.

A 2012. évi versenyen az Odooproject az előkelő hatodik helyen végzett, több kategóriában („Mérnöki és szerkezeti megoldások”, „Kényelmes kondíciók”, „Energiahatékonyság”) is dobogós helyezést elérve a nemzetközi megmérettetésen.

**Szélerőművek integrálása a villamosenergia-rendszerbe.** Az időjárásfüggő megújuló energiaforrást hasznosító erőművi technológiák közül Magyarországon a szélerőműveket tekinthetjük a legjelentősebbnek. Ezek mondhatják magukénak a legnagyobb beépített teljesítményt, illetve a legnagyobb mennyiségű üzemeltetési tapasztalat is ezekhez kapcsolódik. Mindezek fényében aligha lehet meglepő, hogy a szélerőművek villamosenergia-rendszerbe történő integrálása hosszabb ideje központi helyet foglal el a tanszékcsoport kutatási témái között – 2013-ban egy doktori disszertáció tárgyát is képezte a téma. A dolgozatban a szélerőművek termelési gradiensével, valamint a szélerőművek által szolgáltatott menetrend és a tényleges termelés közti eltérés kezelésével kapcsolatos kutatások kerültek bemutatásra, melyek során az energiatárolási technológiák használata is fontos szerepet kapott.

A magyarországi szélerőművek termelési gradiensének változásai perces felbontással kerültek megvizsgálásra, a beépített kapacitás különböző értékekre történő átskálázása mellett. Az így kapott szabályozási igények nagyságát ugyanezen időszakban a magyar villamosenergia-rendszer tényleges gradiens képességével összehasonlítva az eredmények egyértelműen azt mutatják, hogy jelentős szélerőművi kapacitásbővülés esetén szükség van a jelenlegi meghaladó szabályozási lehetőségek rendszerbe állítására. A kutatás során két különböző módszer is felhasználásra került: a statisztikai kiértékelés során ignoráljuk a felhasznált bemeneti adatok időbeliségét, míg ezzel ellentétben a saját készítésű számítógépes szimuláció használata során ez elsődleges fontosságú marad. Mindkét módszerhez a szélerőművek termelési adatai, valamint a vizsgált rendszer le- és felirányú gradiens képességei jelentik a bemeneti adatokat, azonban ezek csak egy több lépésből álló feldolgozás után alkalmasak a vizsgálatokra. Ezen feldolgozás során szélerőművei gradiensüket képzünk, átskálázzuk a termelési adatokat, valamint kiszámoljuk a ren-

delkezésre álló szabályozási gradiens adatokat. A villamosenergia-rendszer üzemeltetése szempontjából a legkedvezőbb eset az lenne, ha a szélerőművek termelése – hasonlóan a hagyományos erőművi blokkokhoz – időben gyakorlatilag állandó lenne. A valóságban ez természetesen nem így van, az esetek egy részében például két vizsgált időpillanat között a szélerőművi termelés megnő, így leszabályozási igény keletkezik (feltételezve, hogy a rendszerterhelés nagysága nem változott). Ezt a rendszer három módon tudja kezelni. Amennyiben a rendelkezésre álló *le* irányú szabályozási gradiens nagysága nagyobb, mint a szélerőmű által támasztott igény, az energiatároló beavatkozására nincsen szükség. Ha a rendszer gradiens képességeit meghaladja az igény, akkor az energiatárolónak a különbséggel egyező nagyságban kell kiegészítenie a rendszert, azaz az energiatároló szemszögéből nézve a szélerőművek termelési gradiense kisebb lesz, mint a tényleges érték. Amennyiben viszont a vizsgált időpillanatban egyáltalán nem áll rendelkezésre *le* irányú szabályozási tartalék, a teljes változást az energiatárolónak kell kiszabályoznia – feltéve hogy teljesítménye és kapacitása ezt lehetővé teszi. A két módszer működésének demonstrálására a magyar villamosenergia-rendszer 2009 és 2011 közötti, 3 évet felölelő adatait használtuk fel. A szélerőművek termelési adatait a beépített kapacitás függvényében átskáláztuk 400 és 1 000 MW között, 100 MW-os lépcsőkben, míg a villamosenergia-rendszer gradiens képességeit változatlanul, azok historikus értékén kezeltük. Az eredmények alapján a következő fő megállapítások tehetők:

- a szélerőművi kapacitás nagyságának növelésével nő a villamosenergia-rendszerben fellépő gradiens kiegészítések száma, illetve azok összesített hossza is. Eltérő azonban a növekedés mértéke a két szabályozási irány esetén; a vizsgált szcenáriók esetén a *le* irányú kiegészítések összesített hossza körülbelül kétszeresére nő, míg *fel* irány esetén háromszoros növekedés figyelhető meg.
- a gradiens kiegészítések számának növekedésével csökken ezen kiegészítések átlagos időtartama. Ennek elsődleges oka, hogy a szélerőművi kapacitás növekedésével jellemzően a rövidebb (1–2 perces) gradiens képesség túllépések száma növekszik, a hosszabb periódusok aránya így csökken.
- a *le* irányú gradiens kiegészítések nagysága a szélerőművi kapacitás növekedésével együtt nő, *fel* irányban azonban ez a növekedés a 600–700 MW-os tartományban megáll, majd csökkenés-be megy át. A jelenség oka ezúttal is a rövidebb kiegészítések arányának növekedésében keresendő.
- a magyar villamosenergia-rendszer gradiens képességeinek kiegészítésére a vizsgálatok alapján legalább egy 25 MW-os névleges teljesítményű, maximális teljesítménnyel 4 perc folyamatos üzemeltetési képes (kb. 1,66 MWh kapacitású) energiatároló egységre van szükség, feltételezve, hogy a szabályozásba bevont erőművi blokkok száma és teljesítménye nem növekszik.

Hasonló módszertan szerint kerültek feldolgozásra a szélerőművek által szolgáltatott menetrendi és termelési adatok is. A rendelkezésre álló termelési és menetrendi adatok különbségét képezve megkapjuk az adott időegy-

séget jellemző eltérést, a menetrend hibáját, melyet át kell skáláznunk a vizsgálni kívánt jövőbeni beépítettség értékének felhasználásával. Az energiatároló használata kapcsán ebben az esetben az ideális az lenne, ha a szélerőművek termelése nem térne el az általuk leadott menetrendtől, hiszen ekkor nem lenne szükség szabályozásra. A valóságban négy különböző eset lehetséges. Az első, hogy a vizsgált időpillanatban a szélerőművek nem termelnek többet a menetrendként leadott értéknél, így nem keletkezik leszabályozási igény. Amennyiben keletkezik leszabályozási igény, a rendelkezésre álló leszabályozási tartalék nagysága fogja eldönteni a következő lépést. Ha a rendelkezésre álló tartalék nagysága meghaladja a leszabályozási igényt, a rendszer önállóan, az energiatároló nélkül képes elvégezni a szabályozást, így az energiatároló szempontjából úgy kezelhető a rendszer, mintha a szélerőművek termelése megegyezett volna a menetrendben leadott értékkel. Ha a rendelkezésre álló tartalék nagysága nem elegendő a leszabályozási igény kielégítésére, akkor a két érték különbségét az energiatárolónak kell kezelnie. Az eszköz szemszögéből ekkor úgy tűnik, mintha a menetrendi hiba a tényleges menetrendi hiba és a rendszer által végrehajtott szabályozás különbsége lenne. Amennyiben a vizsgált időpillanatban a villamosenergia-rendszerben nem áll rendelkezésre leszabályozási tartalék, a teljes eltérést az energiatárolónak kell kiszabályoznia – feltéve hogy teljesítménye és kapacitása ezt lehetővé teszi.

Az előzőekben említett bemeneti adatsorokat használó kutatás eredményei alapján a következő fő megállapítások tehetők:

- a szélerőművi kapacitás nagyságának növelésével nő azon periódusok száma és hossza, amikor a villamosenergia-rendszer nem képes a szabályozási igények kiszolgálására. Ezen növekedés mértéke közel megegyezik a *le*- illetve *fel* irányú szabályozások esetén.
- az egyes beavatkozások alkalmával kiszabályozandó teljesítmény igény nagysága szintén a szélerőművi kapacitás nagyságával arányosan nő, azonban itt már megfigyelhető az eltérés a két szabályozási irány között, a *fel* irányú szabályozási igények gyorsabban nőnek. Ezzel szemben az energiaigények vizsgálatok során tapasztalható érdemi eltérés a növekedés üteme kapcsán.
- minden vizsgálat tárgyát képező paraméter nagysága jó közelítéssel lineáris függést mutat a szélerőművi kapacitás nagyságától, így amennyiben utóbbit a villamosenergia-rendszerben teljes beépített teljesítőképességének arányában adjuk meg, az energiatároló paraméterei is meghatározhatóak. A legkisebb méretű energiatárolót eredményező statisztikai kiértékelés alapján a tároló névleges teljesítménye a beépített szélerőművi összteljesítmény kb. 25%-ában, kapacitása pedig a beépített szélerőművi összteljesítmény 25–45%-ában határozható meg.

**Beágyazott informatikai rendszer fejlesztése energiapozitív közvilágítás optimalizálására (E-grid).** A tanácskcsoport tagja annak a konzorciumnak, mely a jelenleg is futó E-grid projekttel kapcsolatos kutatásokat végzi. A projekt célja egy olyan közvilágítási rendszer kidolgozása, amely megújuló energiát, konkrétan napener-

giát használ a működéséhez. A rendszer fontosabb komponensei a LED-es lámpatestek, a beágyazott infokommunikációs- és szenzorrendszer, és a felhő alapú vezérlőrendszer, amely biztosítja, hogy a világítótestek akkor világítsanak, amikor erre a környezeti tényezők miatt szükség van. Például egy esős, ködös napon, rossz látási viszonyok között is szükség lehet mesterséges világításra, még abban az esetben is, ha egyébként nappal van. Közlekedésbiztonsági szempontból nagyon fontos kérdésről van szó. Működés közben a rendszer képes arra, hogy internetkapcsolat segítségével helyi információkat osszon meg egy központi szerverrel az időjárásról vagy a világítási célokra felhasználható akkumulátor-kapacitásról. A rendszer képes felügyelni továbbá azt is, hogy a hálózat energiamérlege – vagyis a hálózatba visszatáplált és onnan vételezett energia eredője – pozitív legyen. A kutatás másik célja, hogy olyan helyeken, ahol viszonylag ritka a mozgás, ne működjön folyamatosan a világítás. Bár a LED-es lámpatestek kevesebb energiát fogyasztanak, mint a hagyományos égők, egy ilyen intelligens, a mozgást is érzékelő közvilágítási rendszerrel 65%-os energiamegtakarítás érhető el. A rendszer további előnye többek között, hogy nemcsak megújuló energiát használ, hanem a többlet energiát szabályozott módon képes visszatáplálni a közcélú hálózatba, illetve a pluszenergiát képes eltárolni, amelyet későbbi időpontokban fel lehet használni.

A mintaprojekt a KFKI (Központi Fizikai Kutató Intézet) telephelyén valósul meg, ahol a gyalogos- és a gépkocsiforgalom igényei szerint működő lámpatesteket is bevonnak a kísérletbe. A projekt végén összesen 150 darab úttestet megvilágító és 60 darab gyalogos útvonalak mentén elhelyezett fényforrást vonnak be a kísérletbe. A projektet egy multinacionális óriáscég magyarországi tagja, a GE Hungary vezeti, amely piacorientált fejlesztésként tekint a munkára, és célja egy, a nemzetközi piacokon is versenyképes moduláris rendszer létrehozása, ennek az innovációnak azonban nem elsősorban Magyarország lesz a felvevőpiaca. Hazánkban több fejlesztési program is irányul a LED-es lámpatestek közvilágítási célú alkalmazására, azonban még nem dolgoztak ki átfogó koncepciót egy ilyen intelligens rendszerre. A helyzetet bonyolítja, hogy hazánkban akár településenként eltérhet az, hogy ki a felelős a közvilágítási rendszer üzemeltetéséért. Így a szolgáltatás egyik felhasználási területe a bevásárlóközpontok lehetnek, ahol bizonyos helyeken csak időszakosan kell megvilágítást biztosítani; ilyenek például a parkolók vagy a parkolóházak. A projektben való részvétel biztosítja a tanszékcsoport számára, hogy egy komplex, úttörő, a jövő generációt szolgáló kutatás részesei lehetünk, bővíthetjük ipari kapcsolatainkat, többletforrásokhoz juthatunk, és olyan eszközöket használhatunk, amelyek beszerzésére, a szűkös anyagi források miatt más módon nincs lehetőségünk.

**Elosztott energiatermelés és elektromos közlekedési infrastruktúra települési szintű integrációja.** A jelenleg is futó kutatás három, a tanszékcsoport által hosszabb ideje művelt területet fog össze; ezek a megújuló energiaforrások, az energiatárolási technológiák, valamint a villamosenergia-rendszer számítógépes modellezése. A kutatás célja egy számítógépes szimulációs modell létrehozása,

mely felhasználható azon energiatárolási technológiák komplex vizsgálatára, melyekkel az elosztott energiatermelőknek és az egyéni és közösségi közlekedés infrastruktúrájának a villamosenergia-rendszer közép- és kisméretű elosztóhálózatába történő integrációja támogatható. A kutatás célja az integráció szabta feltételeknek műszakilag megfelelő technológiák kiválasztása, települési szintű javaslat készítése azok telepítési és méretezési gyakorlatára, valamint az energiatárolók vezérlését végző algoritmusok kidolgozása és validálása a számítógépes szimulációs modell segítségével.

A kutatás eredményeként létrejövő új struktúra és üzemeltetési gyakorlat települési szinten műszaki-pénzügyi (hálózati veszteségek, kiegyenlítő energia igények és hálózatfejlesztési költségek csökkentése) és társadalmi (megújuló részarányának és elfogadottságának növelése, elektromos közlekedési infrastruktúra térnyerése, közlekedési eredetű légszennyezettség csökkentése) előnyökkel jár. A kutatási módszer célzottan a magyarországi hálózati viszonyokra fókuszál, így figyelembe veszi speciális nemzeti adottságainkat. Az eredmények ismeretében a kutatás kiterjeszhető, más hazai települési infrastruktúrára is elvégezhető lesz.

A kutatás első szakaszában alapkutatás jellegű munka keretében a számítógépi szimulációs modell elkészítése, az egyes hálózati elemek megfelelő leképezése a cél. Az időjárásfüggő megújuló energiaforrások termelésének időbeli lefutásáról a hazai viszonyoknak megfelelő, nagy időfelbontású (perces – 15 perces) mérési adatokat kell összegyűjteni. Kidolgozandó azon eljárás, mellyel egymástól elkülöníthetők a jól definiált időjárási viszonyokra (például napos vagy felhős idő) jellemző görbék. A csoportosított görbék sztochasztikus modellezéssel már alkalmasak a kiválasztott települést jellemző klimatikus viszonyok esetén várható energiatermelési mintázatok leképezésére a szimulációs modellhez. Szintén nagy időfelbontású (perces – 15 perces) mérési adatokra alapozva végezhető el a fogyasztói viselkedés jellegzetes mintázatainak (például hétköznap vagy hétvége) csoportosítása. A csoportosított görbéknek a kiválasztott hálózat fogyasztói pontjai között történő véletlenszerű szétosztásával a terhelési viszonyok valósághű leképezése valósítható meg. A villamos hálózat szimulációs modellezéséhez a kiválasztott kis- és középfeszültségű körzetekben található elemek (vezetékek, transzformátorok, gyűjtősínek) villamos paramétereinek összegyűjtésére van szükség. Ezt követően vagy a kiválasztott célszoftverben rendelkezésre álló leképezések használatával, vagy új részmodellek kidolgozásával történik az elemek és a hálózati topológia leképezése. Az energiatárolási technológiák leképezésének első lépésében egy általános logikai modell létrehozása szükséges, mely szabadon definiált célfüggvény (például állandó hatásos teljesítmény leadása) teljesítéséhez figyelembe veszi a technológiai korlátokból (névleges teljesítmény, kapacitás, hatásfok, stb.) származtatható peremfeltételeket. Második lépésként ezt a logikai modellt kell implementálnunk a szimulációs modellben. A közlekedési eszközök modellezéséhez nagy időfelbontású (perces-15 perces) adatok felhasználásával kialakítottuk a járműtípusok napi használatára jellemző villamosenergia-fogyasztási görbéket, valamint a járműcso-

portok (például személygépkocsik) napon belüli használatának időbeli eloszlását. Ezekből sztochasztikus modellezéssel meghatároztuk az akkumulátorok töltéséhez szükséges villamosenergia-igény nagyságát és időbeliségét.

A kutatás második szakaszának központi feladata a kisfeszültségű elosztóhálózat szimulációs modelljének elkészítése és a viselkedés validálása. Ennek során a célszoftverben pontos topológiával leképezésre kerül a kiválasztott település minden kisfeszültségű leágazása (200–300 db, leágazásonként 10–20 fogyasztói ponttal). Az egyes leágazások tipikus viselkedésének vizsgálata sztochasztikus modellezéssel, az első részfeladat során létrehozott energiatermelési és -fogyasztási profilok (beleértve az elektromos személyi járműveket) véletlenszerű szétosztásával történik, 15 perces felbontásban, állandósult állapotok egymásutánosságával. A sztochasztikus vizsgálat eredményeként megállapíthatók az egyes leágazások topológiájára jellemző feszültségminőség paraméterek, és kiválaszthatók azok a kritikus üzemiállapotok, melyekben az energiátárolás alkalmazása szükséges lehet. A modellezés eredményeként minden kisfeszültségű leágazáshoz kiválasztásra kerül kisszámú, karakterisztikus viselkedés.

A kutatás harmadik szakasza során az előző szakaszban ismertetett módon történik meg a középvezetési hálózat szimulációs modelljének elkészítése és validálása. Vizsgálat tárgyát képezi az elektromos közlekedés települési szintű energiaigény nagyságának és időbeliségének meghatározása. A kutatás záró szakaszában elkészül az energiátárolókra vonatkozó telepítési és méretezési javaslat, kiválasztásra kerülnek a kitűzött kutatási célnak leginkább megfelelő vezérlési algoritmusok. Záró lépésként a teljes szimulációs modell validálására kerül sor.

A kutatás jelenleg első szakaszában tart, több tanszéki oktató és hallgató munkáját fogva össze.

**Szélerőművek termelés-előrejelzési módszereinek pontosítása.** Zárásul egy, a tanszékcsoport és az Országos Meteorológiai Szolgálat közös gondozásában készült diplomamunka kutatásait szeretnénk bemutatni, mely amellel hogy több pályázaton díjazott lett, követendő példája az interdiszciplináris területeken folytatott, intézményeken átvívelő projekteknek. A kutatás motivációját a jelen cikk során már többször érintett időjárásfüggő termelők által a villamosenergia-rendszer üzemeltetésében okozott nehézségek adták. A megoldási javaslat azonban az előzőektől eltérően nem kizárólag energetikai szempontokat vett figyelembe, sőt, nagy hangsúlyt fektetett az időjárási adatok megfelelő értelmezésére és feldolgozására is.

A magyarországi rendszerirányító (MAVIR) távlati célként hosszú idő óta az 5%-os küszöböt határozza meg, mint az előrejelzések elfogadható legnagyobb hibáját. Az elmúlt évek adatainak elemzéséből egyértelműen kimutatható, hogy a szélerőművi termelők által leadott mennyetrendek ennek a célnak nem képesek megfelelni.

A kutatás ezt a hiányosságot célozta meg, összehozva több, egymástól látszólag távol álló tudományterületet: a villamos energetikát, a meteorológiát, valamint a jelfeldolgozást. Míg a meteorológiai előrejelzések légköri paramétereket (szélesség, légnyomás, hőmérséklet) szolgáltatnak, addig a rendszerirányító számára a leadott teljesítmény a legfontosabb adat. Első lépésként a szélesség-

teljesítmény jelleggörbék meghatározása volt a cél, ugyanis a gyártók által megadott, valamint a terepen mérhető görbék között több százalékos eltérés volt tapasztalható, mely már önmagában is gyakorlatilag lehetetlenné teszi az előbb említett 5%-os cél elérését. A jelleggörbék meghatározásához fuzzy modellezésen alapuló klaszterezési eljárás került alkalmazásra. Az illesztés során feltűnő volt, hogy a statikusnak gondolt jelleggörbe különböző hónapokban különböző értékeket vett fel. A munka egyik célja ennek kiküszöbölése volt.

Ismerve a szélből kinyerhető teljesítmény képletét, tudható, hogy a szél sebessége mellett a levegő sűrűsége is fontos paraméter. A kérdéssel az IEC 61500-12-1 szabvány is foglalkozik, mely aktív teljesítményszabályozással rendelkező szélturbinák esetén előírja a sebesség normalizálást is. Ennek a normalizálásnak az elvégzése a rendelkezésre álló adatakból a mintaként kiválasztott júniusi és februári adatokból alkotott görbék esetén ötödére csökkentette az átlagos négyzetes eltérést.

A kutatás másik jelentős eredményét a légköri folyamatok autoregresszív folyamatként való modellezése adta. Ezen statisztikai módszer alkalmazása során feltételeztük, hogy a légkör jelenlegi állapota függ a múltbeli állapotoktól. A múltbeli állapotok együtthatóit időben állandónak tekintve megalkothatunk egy végtelen impulzusválaszú szűrőt, mellyel az előrejelzés adatait szűrve csökkenthetjük a prognózis hibáját. A szűrő tervezésénél a rendszám meghatározása gondos körültekintést igényelt, mely mint a mérnöki gyakorlatban sokszor, jelen esetben is kompromisszumos megoldást eredményezett: túl magas rendszám esetén a régi adatok feleslegesen torzíthatják a kimenetet, míg nagyon alacsony együtthatószám esetén bizonyos meglévő összefüggések nem kerülnek figyelembevételre. A vizsgálatok eredménye azt mutatta, hogy egy napnyi adatsorra érdemes visszatekinteni az együtthatók meghatározásában. A szűrést különböző hónapokban mért adatokon végrehajtva a termelés előrejelzésben jelentős, 3–4%-os javulás volt tapasztalható. A kutatás során bemutatott számítások és az elért eredmények nem pusztán elméleti jelentőségűek voltak, ugyanis azokat az OMSZ is beépítette saját munkájába.

**Egyéb témák.** Tanszékünk az eddig említett témákon kívül aktívan foglalkozik több, közvetve vagy közvetlenül az időjárással kapcsolatos, villamos energia rendszert érintő témakörrel, amelyek részletezése helyett itt csupán a felsorolásukra szorítkozunk:

- szélerőművek villamos rendszereinek (szélgenerátoroknak) kialakítása,
  - villámvédelem,
  - légköri eredetű túlfeszültségek (azaz villám-csapások okozta hálózati problémák és azok kezelése),
  - villamos energiátárolók kialakítása és rendszerszintű alkalmazásai (lendítőkerekes vagy metanol alapú tárolás),
  - napelemek alkalmazásai és hálózati vissza-hatásaik.
- Büszkén állíthatjuk, hogy az elmúlt évtizedekben a hazai villamos energia ipar minden nagyobb szereplője számíthatott és számított csoportunk munkatársainak szakértelmére. Mindent megteszünk annak érdekében, hogy ez a – nagyrészt megújuló energiaforrásokkal kapcsolatos – kihívásokkal teli jövőben is így maradjon.