



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Farkas Csaba

Villamos autók töltésére szolgáló akkumulátortöltők egyes kérdései a villamosenergia-rendszerben

Tézisfüzet

TÉMAVEZETŐ

Dr. Dán András

BUDAPEST, 2016.

1 Bevezetés

A villamosenergia-rendszer fogyasztói és termelői átalakulási folyamatának egyik fontos állomása a villamos autók elterjedése a hálózaton: ezek a járművek intelligens fogyasztók, amelyek a jövőben akár elosztott energiatárolókként is megjelenhetnek a villamosenergia-hálózaton, a hálózatra gyakorolt hatásuk vizsgálatához így meg kell tudni becsülni a töltési igényeket, továbbá vizsgálni kell a töltők és a feszültségminőség kölcsönhatását. Nemzetközi szinten komoly kutatások folynak a töltési igény, s ezen belül is a töltőállomásokba szükséges töltőfejek számának meghatározására; ezen kutatások közé illeszkedik az értekezésem első része a töltőállomások kialakításának sztochasztikus modellezésére végzett szimulációs vizsgálataival. A kutatásnak további hangsúlyt ad, hogy jelenleg hazánkban, de a világ többi részén sem épült ki olyan infrastruktúra, amelyen tényleges méréseket lehetne végezni: ezért is fontos, hogy megfelelő szimulációk segítségével az érintett társaságok időben fel tudjanak készülni a villamos autózás elterjedésével járó kihívások megválaszolására.

A töltőberendezésekben és a hálózatra csatlakozó további fogyasztói berendezésekben megjelenő fejlett elektronikai eszközök ugyanakkor egyre érzékenyebbek lesznek a feszültségminőségre, míg a folyamatos működésükkel szemben elvárt megbízhatósági igény egyre növekszik.

Várhatóan a töltők egy jelentős része lesz gyors- vagy villámtöltő. Ezek a berendezések nagy teljesítményűek, bekapcsolási áramlökések jelenleg nincs szabvány által korlátozva, ezért a gyártóktól függő mértékű. A nagy bekapcsolási áram rövid idejű feszültségletörést okoz, ami zavarhatja akár a töltő saját elektronikáját is, vagy egyéb, a hálózatra csatlakozó berendezéseknél okozhat működési zavart. Belátható, hogy a megfelelő feszültségminőséget biztosító infrastruktúra kialakításához szükség van olyan mutatószámokra, amelyek segítségével a hálózatot üzemeltető társaságok egyszerűen, ugyanakkor pontosan és megbízhatóan tudják jellemezni a szolgáltatott feszültség minőségét. Disszertációm második részében a feszültségletörések vonatkozásában ezekkel a kívánalmakkal összhangban mutatok be egy új kiértékelési módszert.

2 Villamos autók töltöttségének sztochasztikus modellezése

Dolgozatom 2. fejezetében a villamos autók töltöttségének sztochasztikus modellezésével kapcsolatos kutatásaimat mutattam be. A fejezet elején áttekintettem a szakirodalomban a villamos autók számára létesítendő töltőállomások méretezésére bemutatott modellezési eljárásokat, a szakirodalmak közül kiemelten foglalkozva a saját kutatásaimhoz leginkább kötődőekkel, amelyek sztochasztikus modellezéssel, a sorbanállás-elmélet matematikai eszköztárával vizsgálják a villamos autók töltését.

A töltőállomások méretezésére megalkotott sztochasztikus modellem minden járműre három lehetséges állapotot definiál: a jármű mozog, parkol és nem tölt, vagy parkol és tölt. Ezen három állapot közötti állapotváltások valószínűségét minden autóra és minden időlépésre egy átmenetvalószínűség-mátrix adja meg (1):

$$\underline{A}_{i,j}^l[k] = \begin{bmatrix} a_{11}[k] & a_{12}[k] & a_{13}[k] \\ a_{21}[k] & a_{22}[k] & a_{23}[k] \\ a_{31}[k] & a_{32}[k] & a_{33}[k] \end{bmatrix} \quad (1)$$

ahol i és j a mátrix sor- illetve oszlopindexe, l a jármű indexe, k pedig a diszkrét időt jelzi, a szimulációban 5 perces lépésközzel. Az egyik időintervallumbeli állapotból a következő intervallumbeli állapot az átmenetvalószínűség-mátrixszal való szorzással határozható meg (az algoritmus igazából az átmenet-valószínűségeknek megfelelően véletlenszerűen választ egy állapotot, s az adott autó a következő intervallumban abban az állapotban lesz). Alapesetben a mátrix szerkezete a fenti általános esethez képest egyszerűbb: feltételezzük, hogy parkol és tölt állapotba nem kerülnek úgymond "maguktól" a járművek (vagyis a harmadik oszlop a_{13} és a_{23} eleme 0 értékű, míg a_{33} értéke 1, hogy a mátrix sztochasztikus maradjon), hanem különböző

kényszerek felülírják a mátrixokat. Matematikailag ez a folyamat a következőképpen írható le: jelölje

$$cs^l[k] = \begin{cases} 1, & \text{ha az autó mozog} \\ 2, & \text{ha az autó parkol és nem tölt} \\ 3, & \text{ha az autó parkol és tölt} \end{cases} \quad (2)$$

az l -edik autó állapotát (mozog, parkol és tölt, parkol és nem tölt) a k -edik időlépésben, s legyen $SOC^l[k]$ ugyanezen autó akkumulátorának ugyanebben a pillanatban adott töltöttsége. Ha az autó mozog, akkor a számára előírt utazási időmennyiség (pontosabban a megteendő útnak megfelelő idő), amelyet $dist^l[k]$ -val jelölünk, (3) szerint csökken:

$$dist^l[k+1] = dist^l[k] - cons^l[k] \quad (3)$$

ahol $cons^l[k]$ a jármű adott időlépésre érvényes fogyasztása, amit (4) szerint határozhatunk meg:

$$cons^l[k] = 1 - \frac{cap^l - c^l[k] \cdot t_{step}}{cap^l} = \frac{c^l[k] \cdot t_{step}}{cap^l} \quad (4)$$

ahol $c^l[k]$ az adott jármű fogyasztása kWh/100km-ben a vonatkozó időközre, cap^l az adott jármű akkumulátorának kapacitása kWh-ban, t_{step} pedig a diszkrét időlépés nagysága (esetünkben 5 perc).

Létrehozhatjuk az $m[k]$ paramétert (5) szerint:

$$m[k] = \begin{cases} 0, & \text{ha } cs^l[k-1] = 2 \\ 1, & \text{ha } cs^l[k-1] = 1 \text{ \& } dist^l[k] > 0 \\ 2, & \text{ha } cs^l[k-1] = 1 \text{ \& } dist^l[k] = 0 \text{ \& } SOC^l[k] > 0,3. \text{ Ekkor } m[k+1] = 0 \\ 1, & \text{ha } SOC^l[k] \leq 0,3. \text{ Ekkor } m[k+1] = 3 \\ 3, & \text{ha } cs^l[k-1] = 3 \text{ \& } SOC^l[k] < 1 \\ 2, & \text{ha } SOC^l[k] < 0,3 \text{ \& } \text{nincs szabad töltő. } [k+1] \text{ - ben újra próbálkozik} \\ 1, & \text{ha } cs^l[k-1] = 3 \text{ \& } [SOC^l[k]] = 1. \text{ Ekkor } m[k+1] = 0 \end{cases} \quad (5)$$

ahol $[SOC^l[k]]$ az $SOC^l[k]$ alsó egész részét jelöli, továbbá

$$\underline{\underline{S}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

egy összegző mátrix és

$$\underline{\underline{P}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

egy permutációs mátrix. Jelölje továbbá

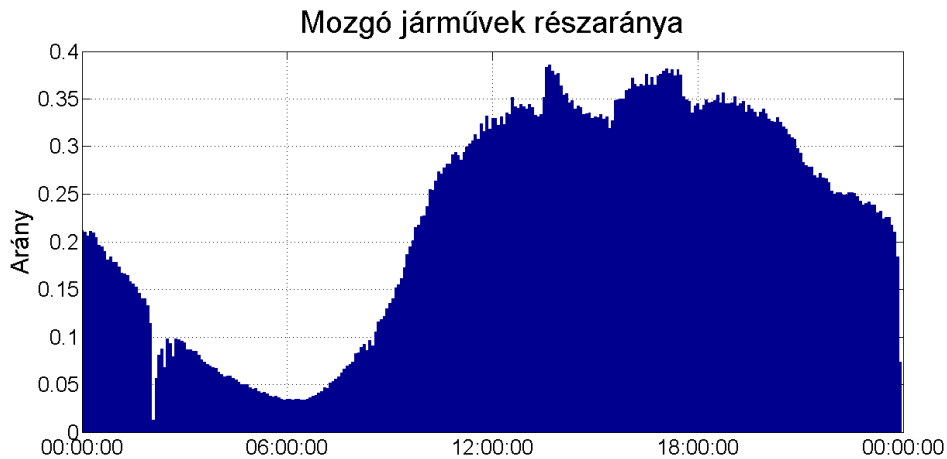
$$\delta_{m[k]0} = \begin{cases} 0, & \text{ha } m[k] \neq 0 \\ 1, & \text{ha } m[k] = 0 \end{cases} \quad (8)$$

a Kronecker-szimbólumot. Mindezekkel a jelölésekkel az $\underline{\underline{A}}_{i,j}^l[k]$ átmenetvalószínűség-mátrix időbeli változása a szimuláció során (9) szerint adható meg:

$$\underline{\underline{A}}_{i,j}^l[k] = \underline{\underline{A}}_{i,j}^l[k-1] \cdot \underline{\underline{S}}^{(1-\delta_{m[k]0})} \cdot \underline{\underline{P}}^{m[k]} \quad (9)$$

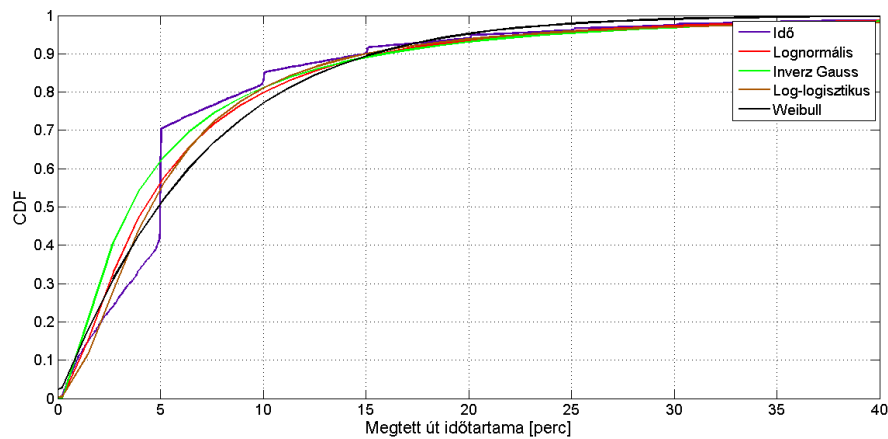
Az algoritmus működésének demonstrálására egy 100 darab villamos autóból álló taxi flottára végeztem szimulációkat. A járművek mozgásának leképezésére a szakirodalomból nyers GPS adat állt rendelkezésemre, így statisztikai elemzést végezve meg tudtam határozni, hogy a járművek

hogyan (2-1. ábra) és mennyi ideig mozognak, s az algoritmus számára szükséges átmenet-valószínűségeket (2-3. ábra) is ki tudtam számítani.

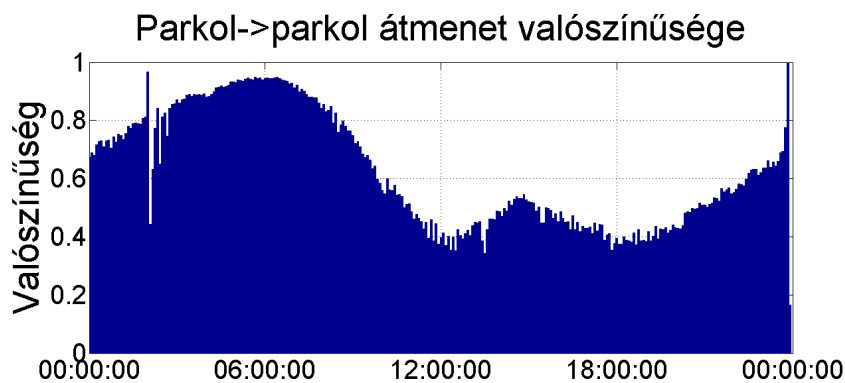


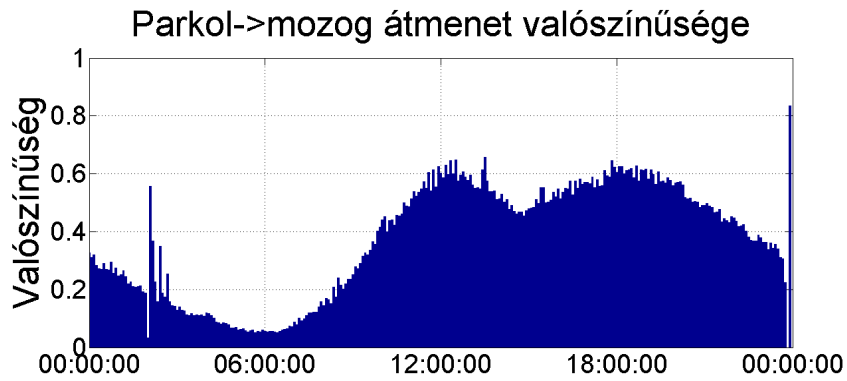
2-1. ábra: A nap során mozgó járművek részaránya, 10357 taxi

Az egyes járműforgalmi paramétereket, úgymint a megtett út, az utazás időtartama, a járművek fogyasztása, Monte Carlo szimulációval határoztam meg a szimuláció során. Ehhez mindegyik paraméterre eloszlásfüggvényt illesztettem, ahogyan azt a 2-2. ábra is mutatja. A választott eloszlásfüggvényeket a konkrét adatok mellett részletes szakirodalmi kutatással is alátámasztottam.



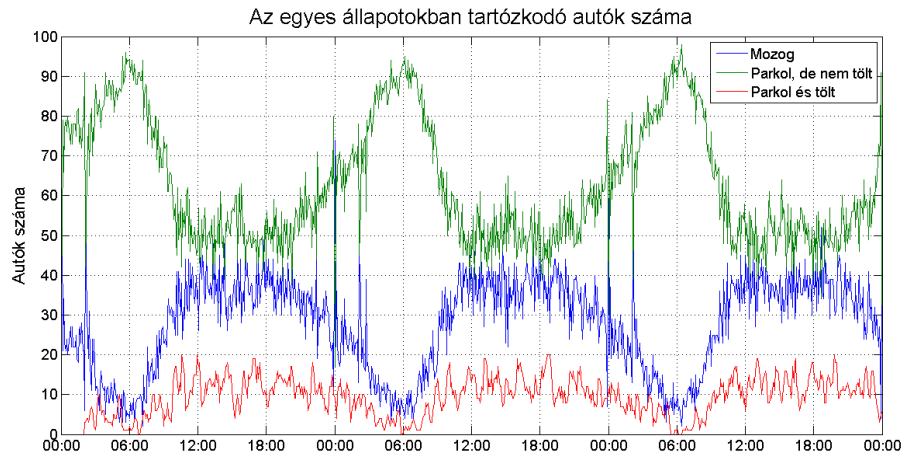
2-2. ábra: A négyféle vizsgált eloszlás (Weibull, lognormális, log-logisztikus, inverz Gauss) illeszkedése a mozgás időtartamát mutató histogramra, kumulatív eloszlásfüggvény (CDF)



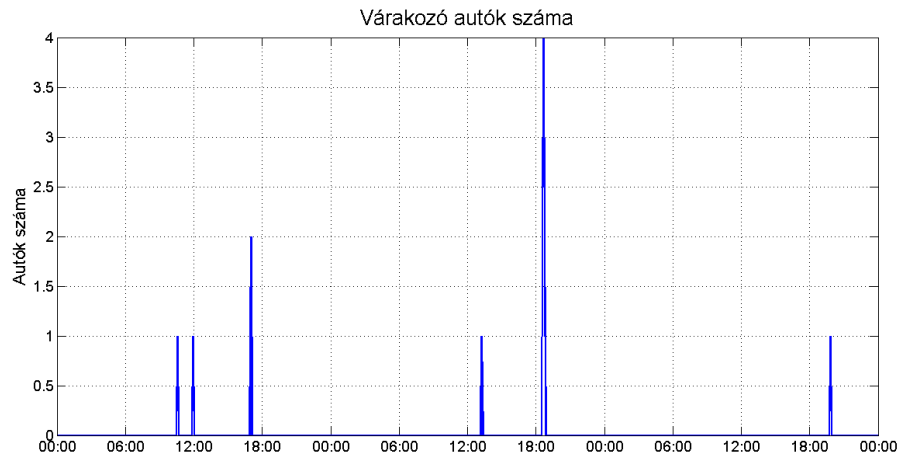


2-3. ábra: Az átmenet-valószínűségek grafikus megjelenítése

A modell segítségével meg lehet határozni, hogy egy villamos autó töltőállomásban adott számú lassú, illetve gyors töltő esetén (mindkét típust a saját csoportjában homogénnek feltételezve) várhatóan hány autó fog várakozásra kényszerülni: a cél természetesen az, hogy ne, vagy csak egy előre meghatározott küszöbszámnál kevesebb várakozó autónak kelljen várakoznia a töltőállomáson. A 100 járműből álló, homogén taxi flottára vonatkozó szimulációs eredményeket mutat a 2-4. ábra és a 2-5. ábra.



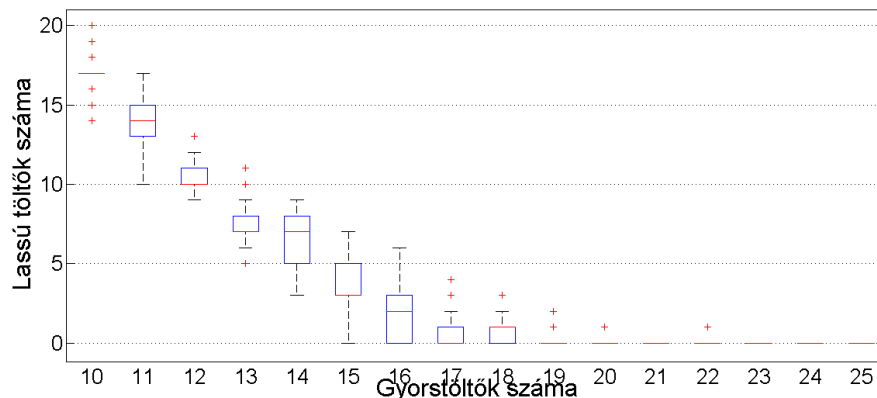
2-4. ábra: Az egyes állapotokban tartózkodó járművek száma (példa)



2-5. ábra: A várakozni kényszerülő autók száma (példa)

A töltőállomás modellezésére végzett vizsgálatok meg is fordíthatóak, s a disszertációban ezt a megközelítésmódot is megvizsgáltam: ha kijelölünk egy küszöbértéket, amelynél több járművet nem szeretnénk, hogy várakozzon a töltőállomáson, akkor meg lehet határozni az ezen igény kiszolgálásához szükséges lassú-gyors töltő mixet, ahogyan azt a 2-6. ábra is mutatja, bár a szimuláció sztochasztikus természete miatt csak több futtatás átlagát érdemes képezni. Ez a modul nem végez a klasszikus értelemben vett optimalizálást, tehát nem valamilyen célfüggvényt minimalizál kényszerfeltételek mellett. Erre nem volt lehetőség, mert a problémát annak sztochasztikus természete miatt ilyen keretek között nem lehetett megfogalmazni.

A megoldás határozatlansága: a lassú töltők száma a gyorsöltők számának függvényében



2-6. ábra: A megoldások bizonytalansága

A kutatás eredményei alapján a következő tézist fogalmaztam meg:

1. tézis: Kidolgoztam egy, a villamos autók töltését statisztikai adatok és valószínűségi becslések alapján leképező sztochasztikus modellt, amely lehetővé teszi a belsőégésű motorokkal ellátott, hagyományos járművek forgalmstatisztikai adatait alapul véve a villamos autók számára létesítendő töltőállomásokba telepítendő lassú és gyorsöltők szükséges számának meghatározását.

A 2. fejezetben bemutatott kutatásokhoz kapcsolódó saját publikációk: [S12]-[S15].

A fejezetben bemutatott kutatás igazi eredménye maga a modell, amely segítségével tetszőleges más, de hasonló felépítésű adatbázis adatbázis (buszok, magánhasználatú autók forgalmi adatai) rendelkezésre állásának esetén lehetőség van az egy töltőállomásba szükséges töltőfejek számának meghatározására.

3 Villamos autók számára létesítendő töltőállomásokba szükséges töltőfejek számának sorbanállás-elméleti vizsgálata

Míg a disszertáció 2. fejezetében alkalmazott modellt a töltőállomások méretezéséhez a járművek mozgását is leképezte, a 3. fejezetben egy olyan modellt ismerttettem, amely csak a beérkezési forgalmstatisztikát, valamint a kiszolgáláshoz szükséges időtartamot, vagyis explicit módon a járművek beérkezésekor mérhető akkumulátor töltöttségi állapotot (SOC) használja a töltőállomásba szükséges töltők számának meghatározásához.

A 3. fejezetben bemutatott sorbanállási modell a Markov érkezési folyamatot (MAP) használja, amely egy olyan egyszerű pontfolyamat, amelynek érkezéseit egy folytonos idejű Markov-folyamat befolyásolja. A 2. fejezetben elvégzett szakirodalmi áttekintés azt mutatja, hogy villamos autók beérkezését a szerzők szinte kivétel nélkül Poisson-folyamatként kezelték, amely azonban valós

mérési adatokkal nincs kellően alátámasztva. Az általam javasolt MAP modell azonban általánosabb, így akkor is alkalmazható, ha a beérkezést nem lehet Poisson-folyamatként leírni. A modellezés során másodrendű MAP-ot használtam, mert numerikusan könnyen szimulálható és létezik kanonikus alakja is (10). Összehasonlítási célból megvizsgáltam egy Poisson-folyamaton alapuló, a szakirodalomban alkalmazott M/M/c modellt is, s a modellel kapott eredményt összevettem a MAP modell előrejelzési képességével.

A MAP modell kanonikus alakját (10) mutatja, a disszertációban másodrendű alakot használtam.

$$D_0 = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & (1-a) \cdot \lambda_1 \\ 0 & -\lambda_2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

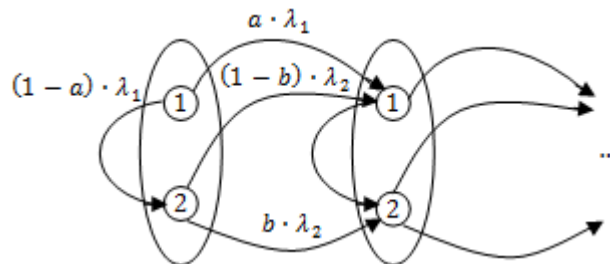
$$D_1 = \begin{bmatrix} a \cdot \lambda_1 & 0 \\ (1-b) \cdot \lambda_2 & b \cdot \lambda_2 \end{bmatrix}$$

A kanonikus alakban szereplő D_0 mátrix tartalmazza azokat az állapot-átmeneteket, ahol nem történik érkezés, míg D_1 mátrix adja meg a feltételes Poisson-folyamatok érkezési intenzitását, amikor is nem vált állapotot a fázisfolyamat, de érkezés történik. A töltőállomás méretezéséhez az adott forgalomstatisztikai adatokra meg kell határozni a kanonikus alakban szereplő négy paraméter értékét. Ezt a beérkezési folyamatra (a kiszolgálásra hasonlóképpen) az azt leíró hisztogram (3-2. ábra) alapján előállított, (11) szerinti z-transzformált polinom és a Markov érkezési folyamat (MAP) esetén a beérkező igények eloszlását leíró (12) polinom illesztésével határozhatjuk meg, figyelembe véve a beérkezési adatsor korrelációját, amelyet a MAP modellre számított korrelációs összefüggéssel kell egyenlővé tenni az illesztés során.

$$A(z) = \sum_i p_i \cdot z^i \quad (11)$$

$$p(\Delta, z) = \alpha \cdot e^{(D_0 + D_1 \cdot z) \cdot \Delta} \cdot \mathbf{1} \quad (12)$$

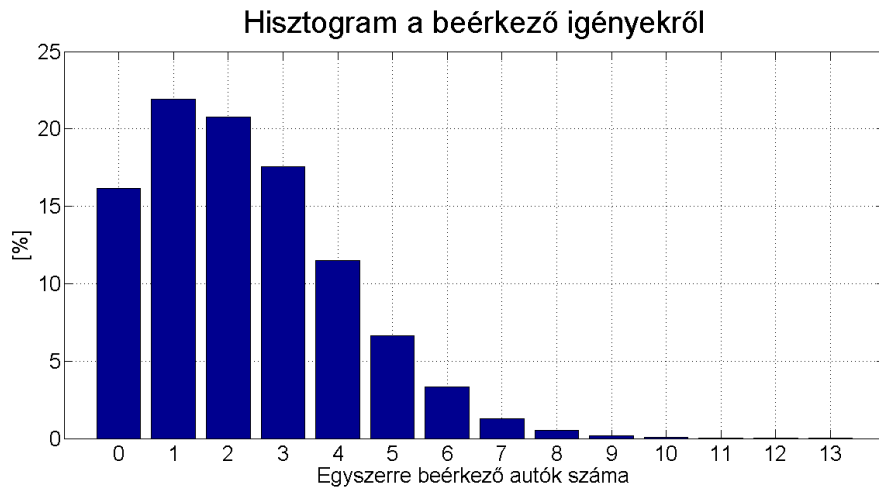
(11)-ben a p_i értékek valószínűségek; azt jelölik, hogy mi a valószínűsége, hogy egy időosztás alatt i darab jármű érkezik tölteni, (12)-ben pedig $\alpha = [\alpha_0 \ \alpha_1]$ a beágyazott stacionárius eloszlás vektora, $\mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ pedig egy összegző vektor. Δ -val az időosztás nagyságát jelöltem, a szimulációs példában ez 5 perc. Mivel a D_0 és a D_1 mátrixokban összesen 4 ismeretlen van ($a, b, \lambda_1, \lambda_2$), ezért az illesztéshez az első három faktoriális momentumot kell kiszámolni, mind a polinom, mind a MAP vonatkozásában $z = 1$ esetén, továbbá meg kell határozni a korrelációra vonatkozó összefüggést az adatsorra és a MAP folyamatra, és ezeket egyenlővé téve a kapott négy ismeretlenes egyenletrendszer megoldani, majd a paraméterek ismeretében a MAP folyamatot szimulálni a 3-1. ábra alapján.



3-1. ábra: Az alkalmazott MAP(2) folyamatábrája

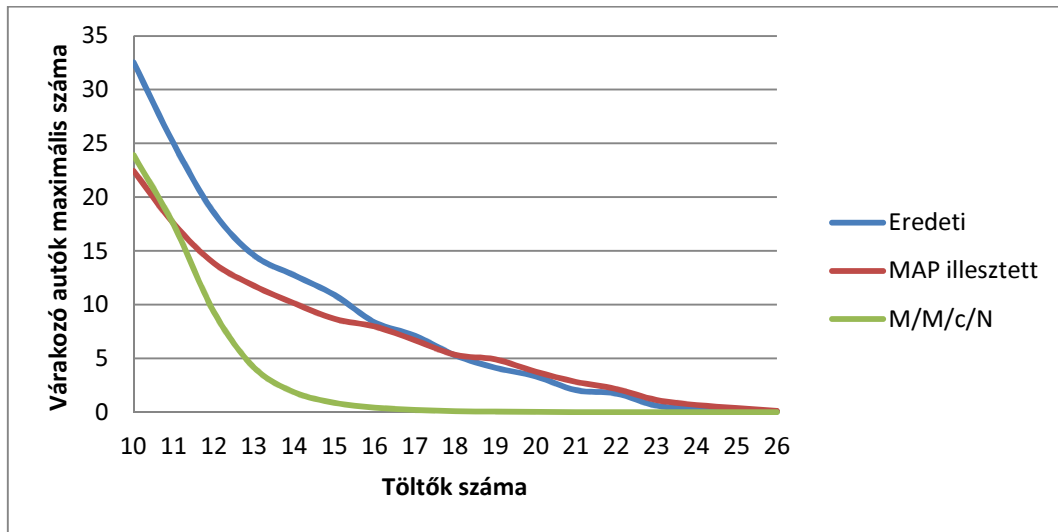
A 3-2. ábra látható hisztogramot, valamint a kiszolgálás időtartamára vonatkozóan is hasonlóképpen hisztogramot felvéve a disszertációban a MAP modell segítségével meghatároztam, hogy adott forgalmi viszonyok mellett a töltőállomásba hány (homogén) gyorstöltőt szükséges telepíteni ahhoz, hogy egy előírt számúnál több autónak ne kelljen várakoznia. Konkrét, villamos autókra vonatkozó forgalmi és töltőhasználati adatbázis hiányában a modell predikciós képességét a 2. fejezetben alkalmazott modellel hasonlítottam össze, amely modell segítségével határoztam

meg a 3-2. ábra hisztogramját is (itt fontos megjegyezni, hogy az így kapott adatsor szerint a beérkezés és a kiszolgálás sem írható le Poisson-folyamatként).



3-2. ábra: A beérkező igényekre vonatkozó hisztogram

Az összehasonlításba bevontam még a szakirodalomban preferált, Poisson-folyamatokkal operáló M/M/c/N modellt is, s - ahogyan azt a 3-3. ábra mutatja - kimutattam, hogy az általam alkalmazott modell pontosabban adja meg a töltőállomások méretezéséhez szükséges töltők számát, mint a szakirodalomban használt M/M/c modellek.



3-3. ábra: A várakozó autók átlagos száma a töltőszám függvényében a kiindulási és az illesztésekkel kapott esetben, 100 futtatással

A 3. fejezetben végzett kutatás lényegét nem maguk a számszerű eredmények jelentik, hanem egy olyan általános modell, ami tetszőleges forgalomstatisztikai adatok esetén is alkalmazható, nincs szükség a beérkezési és a kiszolgálási folyamatot nagyon speciálisan Poisson-folyamatként kezelni. A kutatás eredményei alapján a következő tézist fogalmaztam meg:

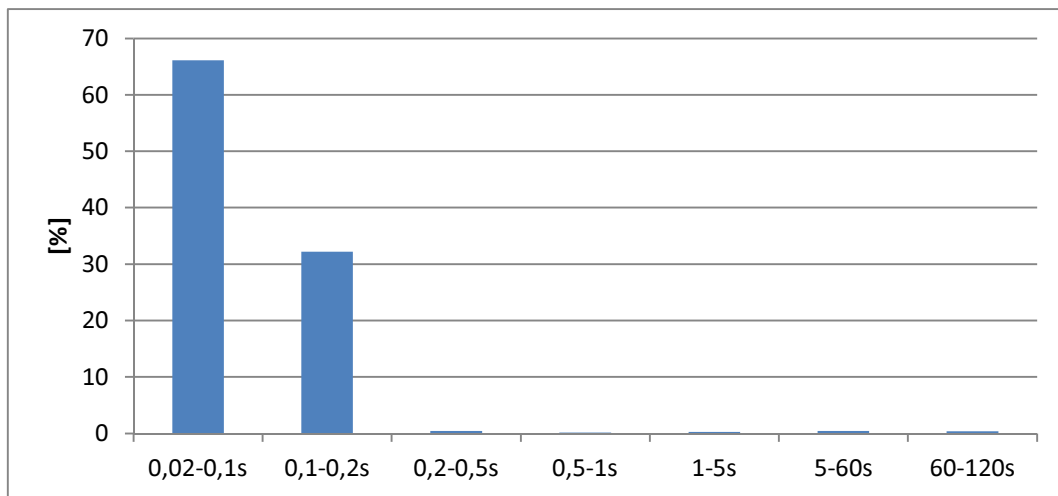
II. tézis: Forgalomstatisztikai adatokat figyelembe véve kidolgoztam egy sorbanállási modellt a Markov érkezési folyamatok matematikai modelljének segítségével a villamos autók töltésére szolgáló töltőállomások méretezésének vizsgálatára. A szakirodalomban töltőállomások forgalmi modellezésére használt M/M/c/N modellel szemben a javasolt MAP(2)/MAP(2)/c modell akkor is érvényes, ha az autók töltőállomásra beérkezése, valamint a kiszolgálás nem alkot Poisson-folyamatot, így általános érvényűnek tekinthető.

A fejezetben bemutatott kutatásokhoz kapcsolódó saját publikációk: [S14]-[S17].

4 Feszültségletörések kiértékelése

A töltőberendezésekben és a hálózatra csatlakozó további fogyasztói berendezésekben megjelenő, a smart grid által megkövetelt fejlett elektronikai eszközök egyre érzékenyebbek lesznek a szolgáltatott villamos energia minőségére, míg a folyamatos működésükkel szemben elvárt megbízhatósági igény növekszik. Mindez azt jelenti, hogy a szükséges infrastruktúra kialakításához szükség van olyan mutatószámokra is, amelyek segítségével a smart grid hálózatot üzemeltető társaságok egyszerűen, ugyanakkor pontosan és megbízhatóan tudják jellemezni a szolgáltatott feszültség minőségét. Disszertációm 4. fejezetében a feszültségletörések vonatkozásában ezekkel a kívánalmakkal összhangban mutattam be egy új kiértékelési módszert.

A feszültségletörések kiértékelésére ma leggyakrabban alkalmazott módszer az ITIC görbe szerinti kiértékelés, azonban - ahogyan azt a szakirodalom is megállapítja - ez a kiértékelő görbe a fogyasztói készülékek csak egy bizonyos, szűk csoportjára, s nem is az összes feszültségszintre van definiálva. Emiatt a görbe alkalmazhatósága sok esetben megkérdőjelezhető. A nemzetközi szakirodalom áttekintése alapján megállapíthatjuk, hogy a fogyasztói berendezések túlnyomó részének feszültségletörésekkel szembeni érzékenységi görbéje a feszültség-idő síkon valamilyen, az adott eszközre jellemző, de tipikusan egy, vagy két törésponttal leírható törött vonal. Ez a tény alátámasztja az ITIC görbéhez, mint töréspontos görbéhez hasonló kiértékelési módok alkalmazhatóságát, ugyanakkor a kiértékelés során szükséges figyelembe venni a mai, modern védelmi eszközök működési idejének hatását is. A disszertációmban valós mérési regisztrátumokat dolgoztam fel statisztikai módszerekkel, s kimutattam, hogy a kisméretű hálózaton a letörések időtartama gyakorlatilag nem haladja meg a 200ms-ot (4-1. ábra), a modern védelmi eszközök használata esetén pedig a 100ms-ot (ezt a 4-2. ábra mutatja egy autógyár esetén).



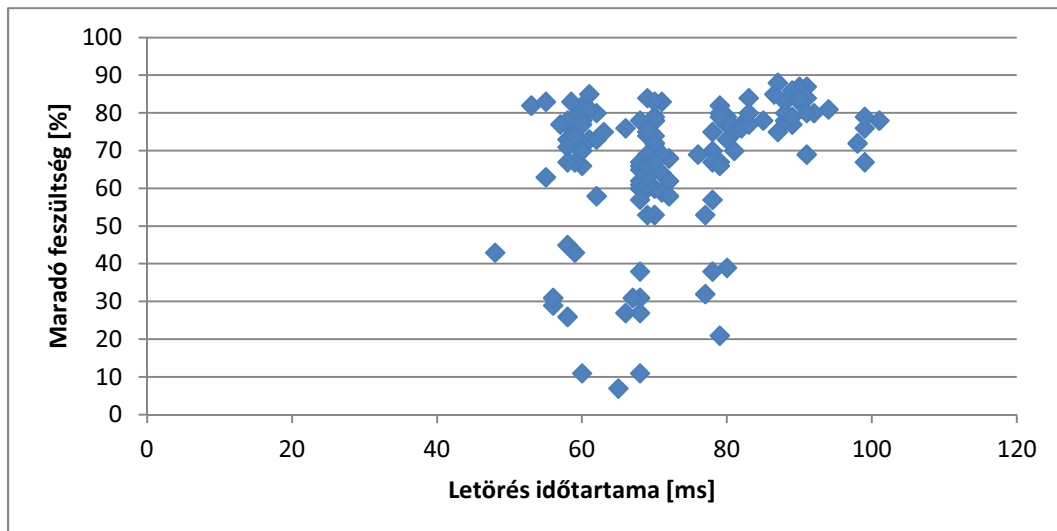
4-1. ábra: A 2009. és 2010. évi, veszélyesnek minősülő feszültségletörések időtartam szerint csoportosítva

A disszertációban a letörések veszélyességének kiértékelésére többféle módot is megvizsgáltam, amelyekről a (13)-(15), valamint a (16) egyenletek adnak számot.

$$E = \left(0,9 - \left(\frac{V_{pu}}{V_{névl}} \right)^2 \right) \cdot t \quad (13)$$

$$E = \left((0,9 - V_{pu})^2 \right) \cdot t \quad (14)$$

$$E = \left((0,9 - V_{pu})^{3,14} \right) \cdot t \quad (15)$$



4-2. ábra: Az autógyárban regisztrált letörések a feszültség-idő síkon

A (13)-(15), a letöréshez tartozó energiát számító, a szakirodalomban javasolt egyenletekhez alapvetően hasonló megközelítésmódot alkalmaztam a saját kiértékelési görbe esetében, de energia helyett a letöréshez tartozó feszültség-idő területet vettem alapul. A javasolt módszerre vonatkozó összefüggést (16) írja le.

$$T = (0,9 - V_{pu}) \cdot t \quad (16)$$

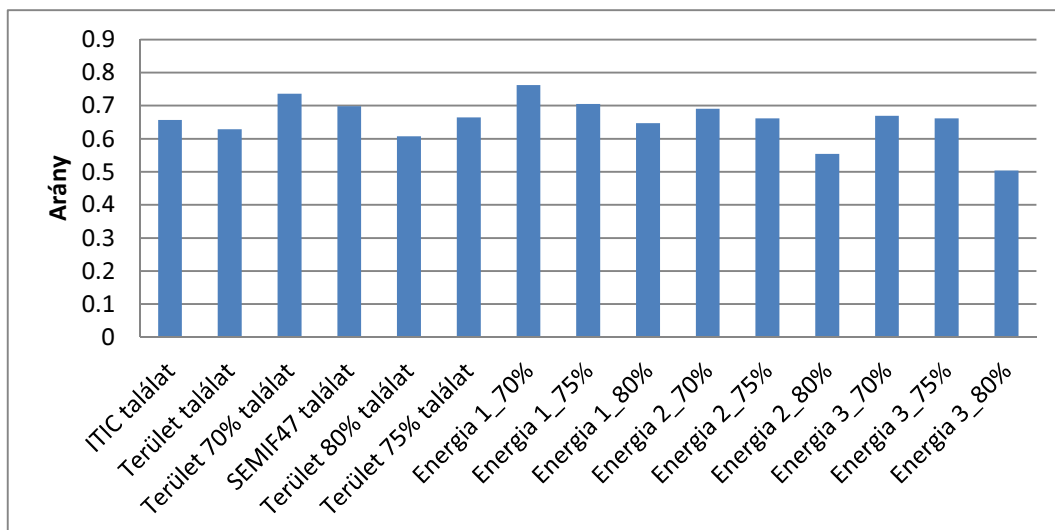
Mind az energiagörbéken, mind a területgörbén alapuló kiértékelés során ún. sarokpontokat vettem figyelembe, amelyek viszonyítási alapot jelentenek a feszültségletörési esemény veszélyességére nézve. A sarokpontokat az ITIC görbe, a szakirodalomban a berendezések érzékenységére kapott görbék, valamint a mérési regisztrátumok összevetésével határoztam meg, a következő módon:

- ha a letörés hossza 20ms-nál kisebb, akkor a letörés nem veszélyes, ilyen időtartamú letörést a szakirodalmi vizsgálatok szerint minden készüléknek el kell viselnie meghibásodás vagy kiesés nélkül;
- az első sarokpont $0,7V_{pu}$ maradó feszültséghez, s 100ms időtartamhoz tartozik;
- a második sarokpont $0,8V_{pu}$ maradó feszültséghez és 200ms időtartamhoz tartozik.

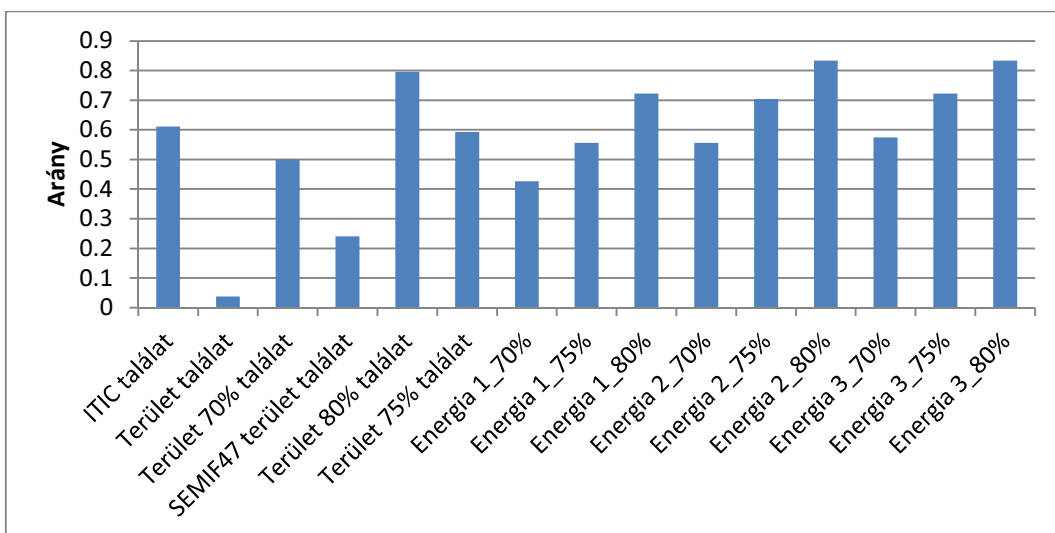
Mindezeknek megfelelően meghatározhatók azok az energia-, illetve feszültség-idő területek, amelyeknél kisebb értékek esetén a letörést nem tekintjük veszélyesnek, míg ettől nagyobb értékek esetén igen (például a feszültség-idő területek tekintetében a teljes, 20ms-nál nagyobb tartományban $20V_{pu} \cdot ms$ ez az érték).

Az egyes módszerek kiértékelési képességeit egy autógyárból származó mérési adatbázis segítségével hasonlítottam össze (4-3. ábra, 4-4. ábra). Az eredmények azt mutatják, hogy a kiértékelés céljától függően többféle görbét is alkalmazhatunk a letörés veszélyességének meghatározására:

- ha azt szeretnénk elérni, hogy a helyes észlelések aránya legyen a legnagyobb, akkor a 70%-os maradó feszültséghez tartozó, módosított területgörbét, vagy az első energiagörbét használhatjuk;
- ha csak a valóban veszélyes letörésekre szeretnénk nagy találati arányt elérni, figyelmen kívül hagyva a nem veszélyes letörésekre adott jelzéseket, akkor a 80%-os maradó feszültséghez tartozó, módosított területgörbét használhatjuk;
- ha mindkét szempontot figyelembe szeretnénk venni, tehát a kiértékelés találati aránya legyen nagy a helyes észlelések és a ténylegesen veszélyes letörések esetén is, akkor viszont az ITIC görbét érdemes használni.



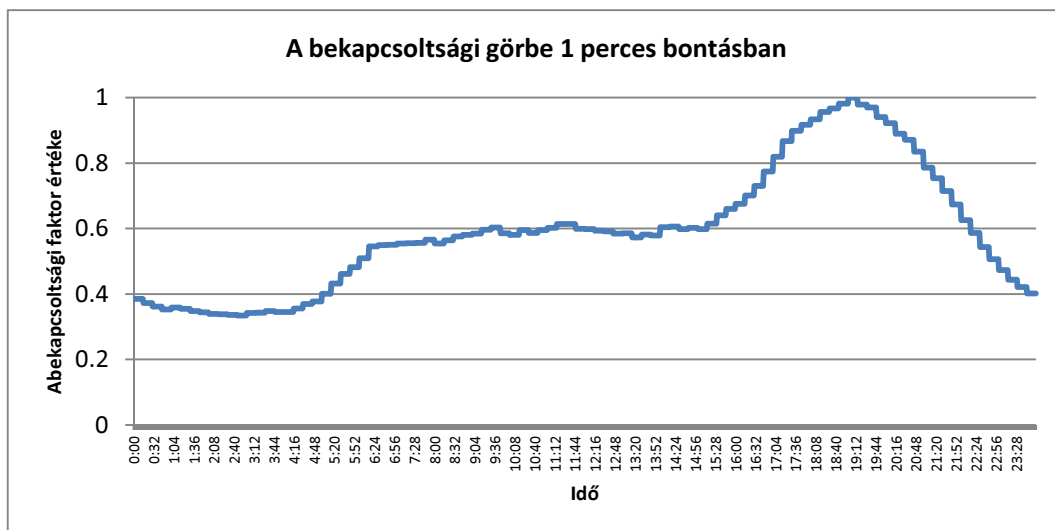
4-3. ábra: Az egyes kiértékelési módszerek találathi aránya



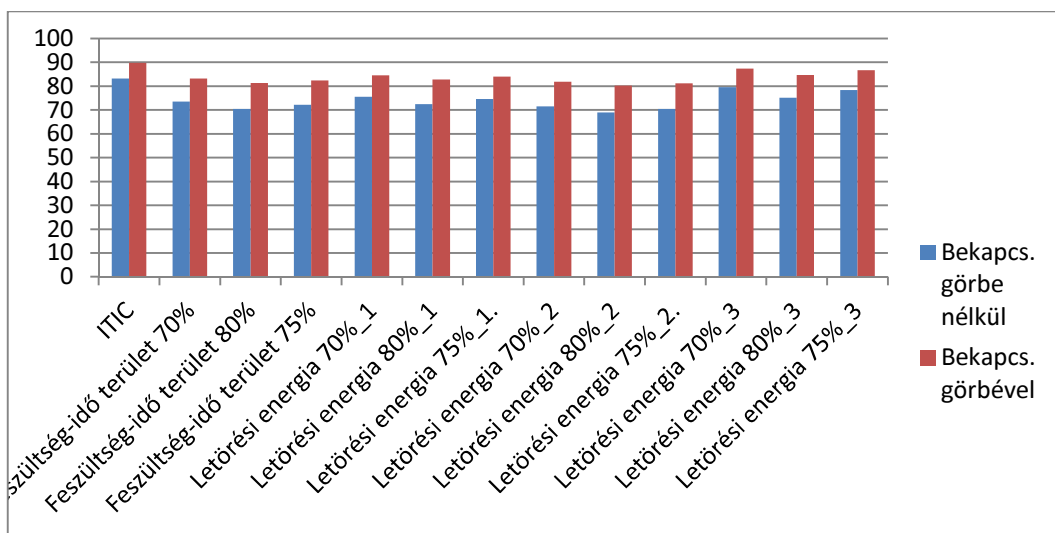
4-4. ábra: A valóban veszélyes letörésekre vonatkozó találathi arány

Valamennyi ismert, a feszültségletöréseket kiértékelő módszer hátránya azonban, hogy nem veszi figyelembe azt, hogy a letörési esemény során volt-e az érintett hálózaton fogyasztó bekapcsolva. Nyilvánvaló, hogy abban az esetben, ha az esemény bekövetkeztekor nincs, vagy csak kevés fogyasztó van bekapcsolva (például éjjel), akkor az adott letörési esemény a fogyasztókra nézve nem, vagy nem annyira számít veszélyesnek, mint abban az esetben, ha sok fogyasztó van bekapcsolva. Mindezt figyelembe veendő, disszertációmban definiáltam a bekapcsoltsági görbét (4-5. ábra), amely segítségével a letörések a veszélyességére kapott kiértékelési eredményt tovább közelíthetjük azok reális mértékéhez (ahogyan azt a 4-6. ábra is mutatja, amelyen a nem veszélyes letörések aránya került feltüntetésre az összes letöréshez viszonyítva).

Érdemes megjegyezni, hogy a bekapcsoltsági görbe figyelembe vételével nem csupán a feszültségletörések veszélyességét, hanem az összes (rövid és hosszabb távú) kiesési, megszakadási esemény súlyosságát is lehet értékelni (fogalmazhatunk úgy is, hogy átértékelni); az ilyen szemléletű kiértékelés ugyanis az esemény veszélyességét a reálhoz közelíti, s jellegéből fakadóan kihatással van az idehaza MEH1 és MEH2 mutatóknak, a nemzetközi szakirodalomban SAIDI-nek és SAIFI-nek nevezett mutatószámok értékére (a bekapcsoltsági görbe definíciójából fakadóan csökkenteni azok értékét).



4-5. ábra: A bekapcsoltsági görbe



4-6. ábra: Feszültségletörések veszélyességének mértéke bekapcsolási görbe figyelembe vételével, ill. anélkül. Az ábra a veszélytelen letörések arányát mutatja, 2009-es adatsor

A 4. fejezetben bemutatott eredményeket összefoglalva tehát azt mondhatjuk, hogy a javasolt kiértékelési módszerek pontosabban írják le a letörések veszélyességét, a bekapcsoltsági görbe figyelembe vételével pedig a veszélyességet tovább közelíthetjük annak reális értékéhez.

A kutatás eredményei alapján a következő tézist fogalmaztam meg:

III. tézis: A feszültségletörések veszélyességének kiértékelésére elterjedten használt ITIC-görbét felhasználva, valós mérési adatok alapján, a szakirodalomban meglévő, a letörés energiáját figyelembe vevő kiértékelési módszerek mellé megalkottam egy, a letöréshez tartozó feszültség-idő területet figyelembe vevő kiértékelési módszert. Az új védelmi berendezések működési idejét figyelembe véve pontosítottam az egyes módszerek kiértékelési alapjául szolgáló ITIC görbe sarokpontokat, ami által a veszélyes letörések detektálása pontosabbá válik.

III. tézis altézise: A letörések veszélyességének pontosítására megalkottam a bekapcsoltsági görbe fogalmát, amely segítségével figyelembe lehet venni, hogy milyen valószínűséggel van háztartási berendezés bekapcsolva a letörés által érintett hálózaton, ezáltal realisabb képet alkothatunk az egyes letörések tényleges veszélyességéről.

A fejezetben bemutatott kutatásokhoz kapcsolódó saját publikációk: [S19]-[S24].

5 Publikációs lista

- [S1] Pintér László, Farkas Csaba, "Impacts of Electric Vehicle Chargers on the Power Grid", 2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE), Pisa, Olaszország, 2015.05.27-2015.05.30., pp. 10-16.
- [S2] Farkas Csaba, Dán András, Prikler László, "Villamos autók integrálása a villamosenergia-rendszerbe", Tavaszi Szél 2014 Konferenciakötet: VII., Debrecen, Magyarország, 2014.03.21-2014.03.23. Debrecen: Doktoranduszok Országos Szövetsége, 2014. pp. 321-339.
- [S3] Dán András, Farkas Csaba, Prikler László, "V2G effects on frequency regulation and under-frequency load shedding in a quasi-islanded grid", IEEE PowerTech 2013 Grenoble: Towards carbon free society through smarter grids, Grenoble, Franciaország, 2013.06.16-2013.06.20.pp. 1-6.
- [S4] Farkas Csaba, Prikler László, "Aggregált villamos autó teljesítmény felhasználási lehetőségei", VII. Klímaváltozás - Energiatudatosság - Energiahatékonyság (KLENEN) Konferencia, Mátraháza, Magyarország, 2012.03.08-2012.03.09.pp. 1-5.
- [S5] Farkas Csaba, Prikler László, "Impact of electric vehicle charging on cable and overhead line distribution systems", JOURNAL OF ELECTRICAL AND CONTROL ENGINEERING 2:(4) pp. 1-6. (2012)
- [S6] Farkas Csaba, Vereczki György, "E-mobility - A villamos autók hatása a villamos hálózatra III. rész: V2G - Villamos autók visszatáplálásos üzemmódja", ELEKTROTECHNIKA 105:(10) pp. 5-9. (2012)
- [S7] Farkas Csaba, "Az e-mobility villamos elosztóhálózatra gyakorolt hatásainak modellezése", II. Mechwart András Ifjúsági Találkozó (MAIT) Szakmai Konferencia 2012., Budapest, Magyarország, 2012.05.09 Budapest: BME,2012. pp. 1-2., (ISBN:978-963-9299-18-4)
- [S8] Farkas Csaba, "Az e-mobilitás várható hatása a villamosenergia-elosztó és -átviteli hálózaton", ELEKTROTECHNIKA 105:(11) pp. 10-11. (2012)
- [S9] Farkas Csaba, Szabó Kristóf, Prikler László, "Impact Assessment of Electric Vehicle Charging on a LV Distribution System", III. International Youth Conference on Energetics (IYCE2011), Leiria, Portugália, 2011.07.07-2011.07.09.pp. 1-8.
- [S10] Farkas Csaba, Szabó Kristóf, Prikler László, "E-mobility - A villamos autók hatása a villamos hálózatra 1. rész", ELEKTROTECHNIKA 104:(2011/04) pp. 9-13. (2011)
- [S11] Farkas Csaba, Prikler László, "A villamos autók hatása a villamos hálózatra II. rész", ELEKTROTECHNIKA 104:(12) pp. 11-16. (2011)
- [S12] Dán András, Farkas Csaba, "Villamos autók töltöttségének sztochasztikus modellezése", ELEKTROTECHNIKA 107:(12) pp. 15-19. (2014)
- [S13] Farkas Csaba, Dán András, "Villamos autók töltöttségének sztochasztikus modellezése - II. rész - Villamos autók számára létesítendő töltőállomások optimalizálása", ELEKTROTECHNIKA 108:(5) pp. 5-7. (2015)
- [S14] Farkas Csaba, Dán András, "Stochastic modeling of electric car charging station for a taxi fleet", PERIODICA POLYTECHNICA ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE 58:(4) pp. 175-181. (2014)
- [S15] Julian Rominger, Csaba Farkas, "Public charging infrastructure in Japan - a stochastic modeling analysis", International Journal of Electrical Power and Energy , Elsevier, under review (submitted 18. February 2016.)
- [S16] Farkas Csaba, Prikler László, "Stochastic modelling of EV charging at charging stations", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), Santiago de Compostela, Spanyolország, 2012.03.28-2012.03.30.pp. 1-6.
- [S17] Jayakrishnan Harikumar, Vereczki György, Pavol Bauer, Farkas Csaba, "Comparison of Quick Charge Technologies for Electric Vehicle Introduction in Netherlands", IECON 2012: 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, Canada, 2012.10.26-28.pp. 1-8.

- [S18] Csaba Farkas, Gergely Szűcs, László Prikler, "Grid impacts of twin EV fast charging stations placed alongside a motorway", 4th International Youth Conference on Energy (IYCE'13), Siófok, Magyarország, 2013.06.06-2013.06.08., pp. 1-6.
- [S19] Farkas Csaba, Dán András, "Evaluation of voltage dip severity based on lost voltage-time area", 16th International Conference on HARMONICS AND QUALITY OF POWER, Bucarest, Romania, 2014.05.25.-28.pp. 521-525.
- [S20] Dán András, Farkas Csaba, "Feszültségletörések veszélyességének vizsgálata az ITIC görbe alapján történő kiértékelés pontosításához II. rész: Kiértékelés a fogyasztói bekapcsoltság figyelembe vételével", ELEKTROTECHNIKA 106:(1) pp. 5-8. (2013)
- [S21] Dán András, Farkas Csaba, "Feszültségletörések veszélyességének vizsgálata az ITIC görbe alapján történő kiértékelés pontosításához III. rész: Kiértékelés a feszültség-idő terület fuzzyfikálása segítségével", ELEKTROTECHNIKA 106:(04) pp. 1-6. (2013)
- [S22] Dán András, Farkas Csaba, "Feszültségletörések új kiértékelési módszerei, MEE 60. Vándorgyűlés, Mátraháza, Magyarország, 2013.09.11-13., pp. 1-4.
- [S23] Dán András, Farkas Csaba, "Feszültségletörések veszélyességének vizsgálata I. rész: Kiértékelés a feszültség- idő területek és a letörési energia alapján", ELEKTROTECHNIKA 105:(12) pp. 1-5. (2012)
- [S24] Dán András, Czira Zsuzsa, Dobos Gábor, Farkas Csaba, "Evaluation of voltage dip severity (a proposal)", Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2010, Kuressaare, Estonia, 2010.06.16-18. pp. 49-52.