



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

Pintér László

Villamos autók hálózatra vett hatásainak modellezése

Tudományos Diákköri Konferencia

KONZULENS

Farkas Csaba

BME VET

BUDAPEST, 2015.

Absztrakt

Míg a belső égésű járművek száma stagnál, és várhatóan csökkenni fog az elkövetkezendő évtizedekben, az elektromos járművek esetében növekedés prognosztizálható. Az elektromos autók többségét városi használatra tervezik, így a közeljövőben akár néhány tíz százalék is lehet az elektromos meghajtású járművek aránya a nagyvárosokban. Az akkumulátorral felszerelt járműveket szükségszerűen tölteni kell, az autók napközbeni használatából fakadóan esténként vagy éjszaka csatlakoznak a villamos hálózatra. A töltési folyamat valószínűsíthetően hatással lesz az elosztóhálózatra, elsősorban a KIF hálózatra, és befolyásolhatja a hálózati feszültségprofilokat és az egyes hálózati elemek terhelődését.

Dolgozatomban Budapest egyes kiefeszültségű elosztóhálózat-részein végeztem szimulációs vizsgálatokat, a villamos autók töltéséből származó hatások vizsgálatára. Ha az autók húsz százaléka elektromos hajtású, akkor minden ötödik háztartásban szükség lenne töltőberendezésre. DigSILENT Power Factory szoftverben megépítve a fent említett hálózatrészeket a töltőkkel együtt, terheléseloszlást vizsgáltam „load-flow” futtatásokkal. A szimulációt több hálózatrészen elvégezve a kapott eredmények statisztikai elemzésével képet kaphatunk a hálózatot érő, a villamos autók töltéséből származó hatásokról.

Tartalomjegyzék

Absztrakt.....	i
Tartalomjegyzék	ii
Bevezetés	4
1 A villamos autókról.....	5
1.1 Az elektromos járművek elterjedése.....	5
1.2 Az elektromos autók működése.....	6
1.3 Töltési fajták.....	8
1.4 Lassú töltés.....	9
2 Közlekedési szokások.....	10
2.1 Országos és regionális jellemzők.....	10
2.2 Személygépjármű állomány	10
2.3 Napi utazási távolság.....	11
2.4 Utazás átlagos időtartama.....	12
2.5 Indulás és érkezés megoszlása	13
3 A vizsgált hálózat	16
3.1 A budapesti villamos hálózat tulajdonságai	16
3.2 Fogyasztók teljesítménytényezője	18
3.3 A használt szoftver	18
3.4 Fogyasztók elhelyezkedése és fáziskiosztása	18
3.5 Hálózati paraméterek.....	18
3.6 Transzformátorkörzet modellje a szoftverben.....	20
3.7 Az elektromos autók hálózatra csatlakozásának modellezése	23
3.8 Töltőbeállítások	24
4 A szimulációk eredményei.....	25
4.1 Hálózat elektromos autók nélkül	25
4.2 A kiindulási állapot villamosenergia-minősége	26

4.3	Az elektromos autók számának hatása a transzformátorterhelésre	30
4.4	Hálózat 20%-os villamos autó aránnyal.....	31
4.5	Feszültségkülönbség a föld és a nullavezető között.....	32
4.6	Feszültségesés a vezetékek mentén.....	33
4.7	Aszimmetria a hálózaton.....	34
4.8	Feszültségesés változása	36
4.9	Aszimmetria függése a villamos autók számától.....	37
5	Összegzés.....	39
6	Irodalomjegyzék	40
7	Ábra- és táblázatjegyzék.....	41
	Függelék	42
F1	Jelölések és rövidítések	42

Bevezetés

Az elektromos autók mennyisége növekszik mind világszerte, mind Magyarországon [1]. Nemcsak a töltők összefogyasztása nőtt, hanem a háztartások villamosenergia-fogyasztása is. A magyar háztartások 9,2 TWh energiát fogyasztottak 1990-ben, míg ez a szám 10,6 TWh-ra nőtt 2013-ra [2]. A meglévő hálózatokat néhány évtizede tervezték, ezért helyénvaló a felvetés, hogy vajon képesek lesznek-e kiszolgálni a hálózatot a megnövekedett terheléssel, vagy hálózatfejlesztés lesz majd szükséges hozzá [3].

A dolgozatom során az elektromos autók töltésének a magyar kifizetésű (KIF) elosztóhálózatra vett lehetséges hatásait néztem meg, különösképpen Budapesten. A jelenlegi technológiai szinten az elektromos autók elsősorban városi közlekedésre lettek tervezve, így várhatóan először a nagyvárosokban fognak elterjedni. Az a célom, hogy azonosítsam és elemezzem a lehetségesen előforduló változásokat a villamoshálózat minőségi jellemzőiben, melyeket az elektromos autók okoznak.

Budapestnek összesen hét transzformátorkörzetét építettem meg és modelleztem annak érdekében, hogy jobb áttekintést kapjak a lehetséges problémákról. A körzeteket véletlenszerűen választottam ki, bel- és külvárosi területek egyaránt szerepelnek a modellben. A fogyasztókat csoportosítva leképeztem, és profilokat rendeltem hozzájuk, a vezetékek mentén elosztva elhelyeztem őket a különböző fázisokban.

A növekvő számú villamos autók töltési infrastruktúrájának kiszolgálására több koncepció létezik. A dolgozatom során kizárólag azt a lehetőséget vizsgálom meg, amikor a töltést a villamos autó-tulajdonosok otthon végzik, nagyrészt a délutáni, esti órákban. Mivel napközben az autók nagy része úton van, vagy irodaház parkolójában áll, ezért kizárólag az esti, valamint éjszakai töltéssel foglalkozom. A helyzet érdekessége, hogy a munkából történő hazaérkezés, és így a töltés kezdete egybeesik a délutáni fogyasztási csúccsal – ismert tény, hogy egy nap folyamán két csúcs van a villamoshálózat terhelésében, egy reggeli és egy késő délutáni.

Továbbá a helyzet aktualitását indokolja a globális felmelegedést megállítani célzó intézkedések sora, többek között a CO₂ kibocsátást csökkentőek. Bár a villamos autók által elfogyasztott energia is termelhető a konvencionális erőművekben, hosszútávon az elektromos járművek segíthetik mérsékelni az üvegházhatású gázok kibocsátását.

A dolgozatom célja, hogy a budapesti KIF elosztóhálózaton minél pontosabban szimuláljam az esetlegesen jelentkező igényt a villamos autók töltésére, és egy lehetséges megoldás hatásait analizáljam.

1 A villamos autókról

1.1 Az elektromos járművek elterjedése

Az elektromos járművek nem napjaink találmányai közé tartoznak, ugyanis több mint 100 éve szelik az utakat. Az 1800-as évek végén Franciaországban és Angliában kezdődtek meg az első fejlesztések, majd a századfordulóra az Amerikai Egyesült Államok is csatlakozott – 1897-ben már egy külön elektromos autókból álló flottája volt a new york-i taxiknak. Az előnyök egyértelműek voltak, az elektromos járművek nem jártak annyi vibrációval, szag- és hanghatással, mint a robbanómotoros társaik. Mindeközben váltóra se volt szükség a működtetésükhöz, és bár ez elmondható volt a gőzhajtású járművekről is, az utóbbiak indítása hideg időben akár háromnegyed óráig is eltarthatott. [4]

Hosszú ideig az 1912-es évben számolhatta a Föld a legtöbb elektromos járművet, ez egyszerű használatuknak és olcsóságuknak volt köszönhető. A '20-as évekre azonban több körülmény is megváltozott. A világ – köztük a meghatározó Amerikai Egyesült Államok – útviszonyai javultak, valamint időközben feltalálták az elektromos önindítót. A robbanómotoros vetélytársak árát csökkentette továbbá az új olajmezők felfedezése, illetve Henry Ford vezetésével megindult a benzines járművek sorozatgyártása is. [4]

Az elektromos autók teljesen feledésbe merültek a 20. század második feléig, amikor felismerték a globális felmelegedés tényét, illetve egyre nagyobb hangsúlyt fektettek a károsanyag-, és így a CO₂-kibocsátás mérséklésére.

Az elektromos közlekedés terjedése aktuális trend, amely az egész világon egyaránt megfigyelhető. A jelenleg futó nemzetközi pilotprojektek azt jelzik, hogy az elektromos gépjárművek a közeljövőben egyre nagyobb számban jelenhetnek meg az utakon. A gyors elterjedés legfőbb ösztönzője az elektromos közlekedésben előjáró országokban már használt támogatási rendszer terjedése lehetne, ilyen például az autóvásárlási kedvezmény vagy a buszsáv használata. Az előrejelzések alapján elmondható, hogy az elektromos hálózatra csatlakoztatható gépjárművek számában 2020 környékén lehet jelentősebb ugrás. Nemzetközi szinten három, az elektromobilitásban meghatározó országról, régióról beszélhetünk: Amerikai Egyesült Államok, Kína és Európa. Az USA-ban Kalifornia jár élen a nyilvános töltőpontok telepítésében, itt a támogatási rendszer a kínálati és keresleti oldalt egyaránt támogatja az emissziómentes közlekedés gyors elterjedésének érdekében. Az autóipari szakértők szerint viszont hosszútávon nem az Amerikai Egyesült Államoknak, hanem Kínának lesz meghatározó szerepe az alternatív hajtású gépjárművek elterjedésében, a gyártás és értékesítés területén egyaránt. Ám ezek a várakozások egyelőre még nem igazolódtak be, ugyanis a kínai elektromobilitás még egyes képet mutat. A piac harmadik vezető szereplője az Európai

Unió, stratégiai céljának tekinti az elektromos közlekedés elterjesztését (Európa 2020, Tiszta Energia a Közlekedésért), amelyet szabályozóként több forrással és programmal is ösztönöz (pl. Horizon 2020). [1]

Két forgatókönyv készült a hazai elektromos hálózatról tölthető gépjárművek számának előrejelzésére: a realista forgatókönyv szerint 2023-ra több mint 52 ezer lehet a számuk, ami az előrejelzett 3,9 milliós teljes gépjárműállomány 1,35%-át jelentené. Az optimista forgatókönyv szerint viszont több mint 2,5-ször több elektromos hálózatra csatlakoztatható gépjármű is futhat a hazai utakon 2023-ban. Ehhez azonban mindenképpen szükséges lenne, hogy a jelenlegi helyzethez képest egy megfelelő ösztönzési rendszer jöjjön létre mind az elektromos gépjárművek vásárlására, mind az elektromos töltőállomások telepítésével kapcsolatban. Az elektromos hálózatra csatlakoztatható gépjárművek közel 88%-át a plug-in hibrid személygépjárművek teszik majd ki 2023-ban, a tisztán elektromos gépjárművek aránya pedig közel 12% lesz. Az elektromos hálózatra csatlakoztatható gépjárművek által éves szinten megtett kilométerek száma 2023-ra eléri a hagyományos hajtásúak jelenleg futott teljesítményét. Mindez a következő 10 év technikai fejlődésének, illetve a fokozatosan kiépülő töltőhálózatnak lesz köszönhető. A számítások szerint átlagosan ötévente kb. 5%-os hatékonyságjavulással lehet számolni a futott kilométert tekintve. [1]

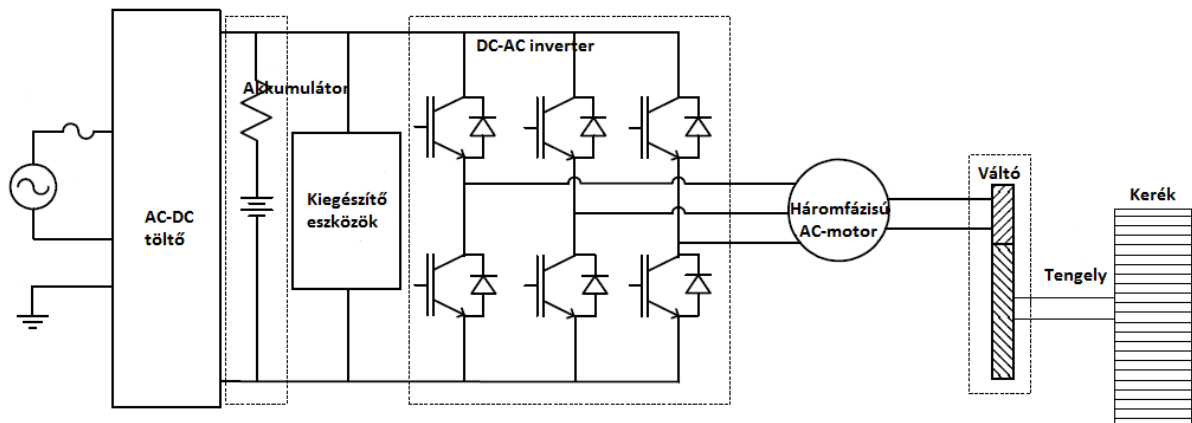
A villamos autók elterjedését alapvetően négy tényező mozdítja elő, ezek közül az első a kőolajár növekedése, mely az alternatív közlekedési formák iránti megnövekvő érdeklődéshez vezet. A második befolyásoló tényező a műszaki megvalósíthatóság. A szektor gyors fejlődése hozzájárul ahhoz, hogy a mai akkumulátorokkal egyre többet lehessen utazni, ezt alapvetően az akkumulátorok energiasűrűsége és a járművek hatásfoka határozza meg. A harmadik tényező a költségelőnyökből fakad, a jelenlegi villamosenergia és kőolajárak mellett az utazás villamos autóval körülbelül harmadannyiba kerül, mint robbanómotoros meghajtású személygépjárművel. Nem elhanyagolhatóak a politikai keretfeltételek, illetve a CO₂ kibocsátás sem, a villamos autók elterjedésétől ugyanis a CO₂ kibocsátás mérséklődését is várják. Fontos látni ezzel kapcsolatban, hogy ez nem egy lineárisan összefüggő folyamat, ugyanis a töltéshez szükséges villamos energiát sok esetben csak konvencionális erőművekből lehet biztosítani, azonban a városi levegő minőségét mindenképpen javítaná az elektromos autók térhódítása. Ösztönzőként hatnak az EU 2020-as direktívái, valamint a kitűzött elektromos járműflotta-célok is. [5]

1.2 Az elektromos autók működése

Az elektromos személygépjárművek közé több termékcsalád is tartozik, a hibrid villamos autók, a hálózatra csatlakoztatható hibrid villamos autók, és a tisztán villamos autók. Dolgozatom során az utóbbiakkal foglalkozom, így a továbbiakban elektromos autókra a tisztán villamos meghajtású autókat értem.

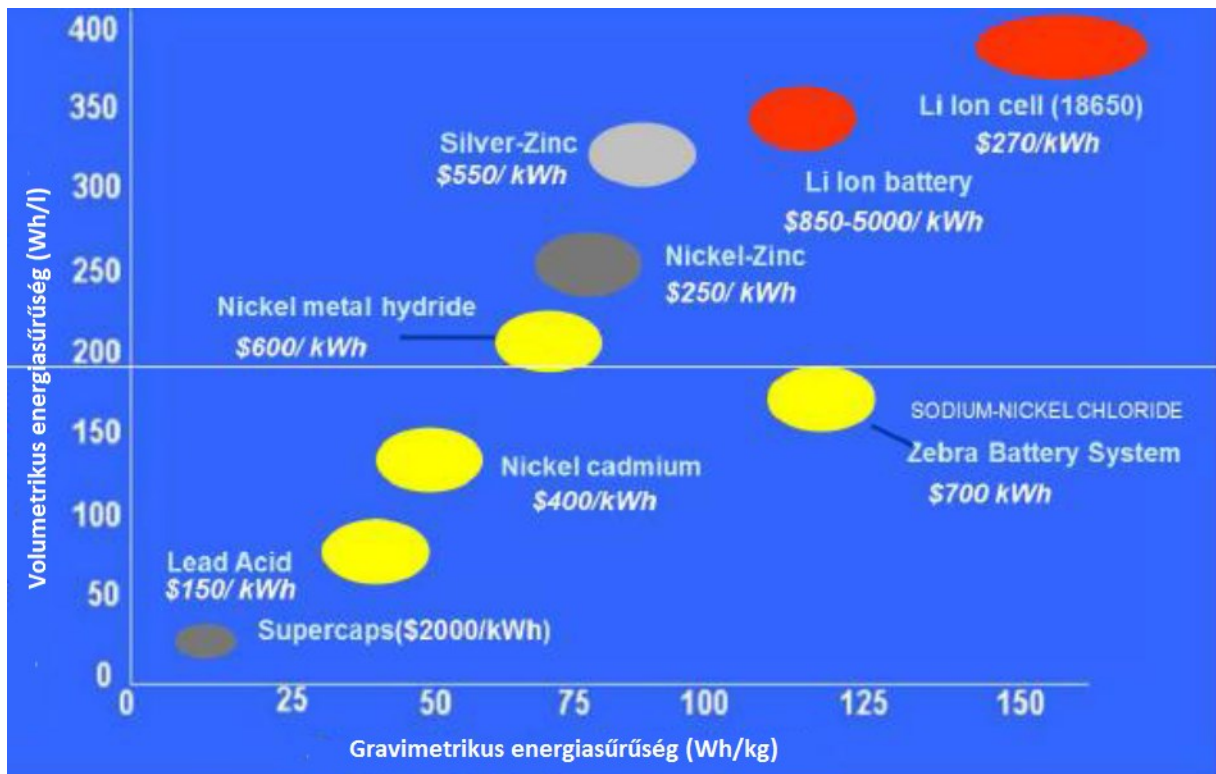
A számítások és a modell egyszerűsítése céljából a több vezető gyártó közül a Nissan Leaf elektromos autóját választottam ki – egyrészt ehhez tanszéki mérések is rendelkezésre állnak, másrészt az elmúlt években folyamatosan ott volt a piacvezető típusok között. [1]

Ahogy már száz évvel ezelőtt is megfigyelhető volt, a villamos autók felépítése manapság is egyszerűbb a robbanómotoros társaiknál. A működés blokkvázlata [14] az 1. ábrán látható.



1. ábra: Villamos autó felépítésének blokkvázlata

A villamos autók egyik fontos része az akkumulátor, így a dolgozatom során ezzel, illetve ennek töltésével fogok foglalkozni. A 2. ábrán látható, hogy rengetegféle akkumulátor van jelenleg a piacon. A különböző típusoknak más előnyei és hátrányai vannak, jelenleg a Li-Ion cellák tűnnek az egyik optimális megoldásnak, így ezek terjedtek el. Bár energiasűrűségben messze kiemelkednek a többi típus közül, még így is jóval kevesebb egy villamos autó hatótávolsága, mint benzines társaiké. Az elektronikán túl a mechanika nagyrészt azonos a robbanómotoros autókénál tapasztalhatóval, ezért hatótáv tekintetében a legnagyobb előrelépést az energiatárolás fejlődésétől várják. Fontos továbbá megemlíteni, hogy a Li-Ion cellák tűz- és robbanásveszélyesek, ezért hosszútávon nem ez a technológia tűnik a tökéletes megoldásnak.



2. ábra: Akkumulátor-típusok és energiasűrűségük

A különböző típusoknak más előnyei és hátrányai vannak, jelenleg a Li-Ion cellák tűnnek az egyik optimális megoldásnak, így ezek terjedtek el. Bár energiasűrűségben messze kiemelkednek a többi típus közül, még így is jóval kevesebb egy villamos autó hatótávolsága. Az elektronikán túl a mechanika nagyrészt azonos a robbanómotoros autóknál tapasztalhatóval, ezért a legnagyobb előrelépést az energiatárolás fejlődésétől várják. Fontos továbbá megemlíteni, hogy a Li-Ion cellák tűz- és robbanásveszélyesek, ezért hosszútávon nem ez tűnik a tökéletes választásnak.

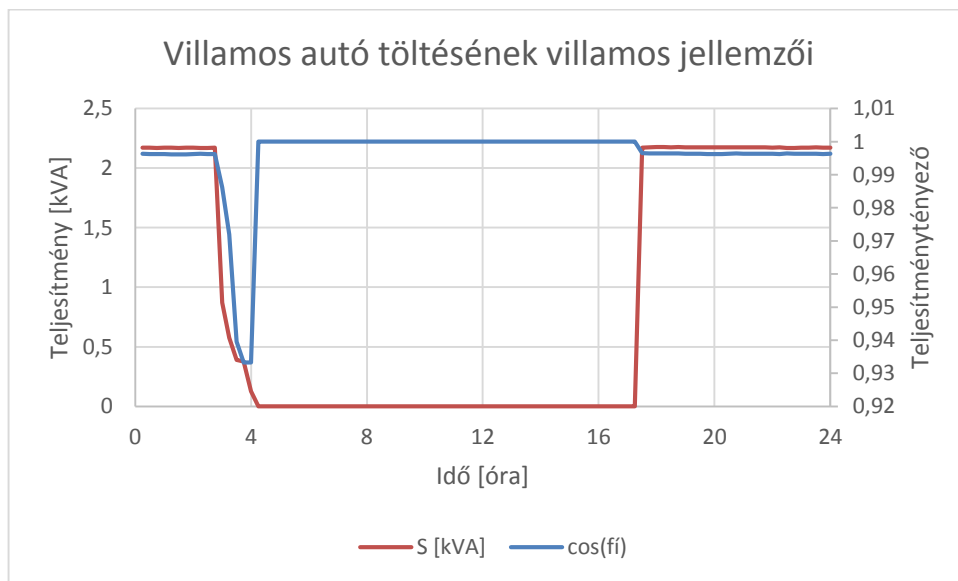
1.3 Töltési fajták

Az elektromos autók csatlakozó-típusait 3 kategóriába sorolhatjuk. A Budapesten telepített töltőoszlopok lehetővé teszik az egyfázisú, 16 A-es és a háromfázisú, 63 A-es töltést egyaránt. A járműveken található csatlakozó típusa attól függ, hogy a jármű milyen áramerősséggel és hány fázison tölthető. Ez a váltakozó áramú, úgynevezett AC töltés. Ha az autó egyenáramú, vagyis DC töltésre is képes, akkor CHAdeMO vagy CCS csatlakozóval csatlakoztatható a hálózatra. [6]

A töltéseket két csoportba lehet osztani attól függően, hogy gyors vagy lassú a töltés, avagy nagy, vagy kisteljesítményű. A dolgozatomban a lakossági, otthoni töltést vizsgálom, ezért kizárólag a kisteljesítményű, lassú töltéssel foglalkozom.

1.4 Lassú töltés

A lassú töltés egyik fajtája az otthoni töltés. Gyakorlatilag a villamos autó a közcélú KIF hálózatra csatlakoztatva bárhol feltölthető, és valószínűsíthető, hogy a tulajdonosok nagy hányada ezzel a lehetőséggel otthon is élni fog. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszékén egy ilyen töltési folyamat mérését végezték el Nissan Leaf típusú gépkocsi esetében. A töltés során számos paramétert mértek. Ezek közül számomra a hatásos és a meddő teljesítmény, valamint a teljesítménytényező volt érdekes, melyeket felhasználtam a hálózat-szimuláció során. A töltésre jellemző görbék a 3. ábrán láthatóak.



3. ábra: A Nissan Leaf töltésének egy mérése

Látható, hogy a töltés ideje alatt a töltési teljesítmény nagyrészt konstans, valamint a teljesítménytényező szintén konstans, 1 körüli értéket vesz fel. Ez alól kivétel a töltés vége. Bár közelíthettem volna a szimuláció során konstans értékekkel a töltést, mégis a mérés által kapott karakterisztikát használtam. Megjegyzendő, hogy e karakterisztikát nagymértékben befolyásolja az akkumulátor töltöttsége, továbbá kismértékben a hálózat aktuális állapota.

2 Közlekedési szokások

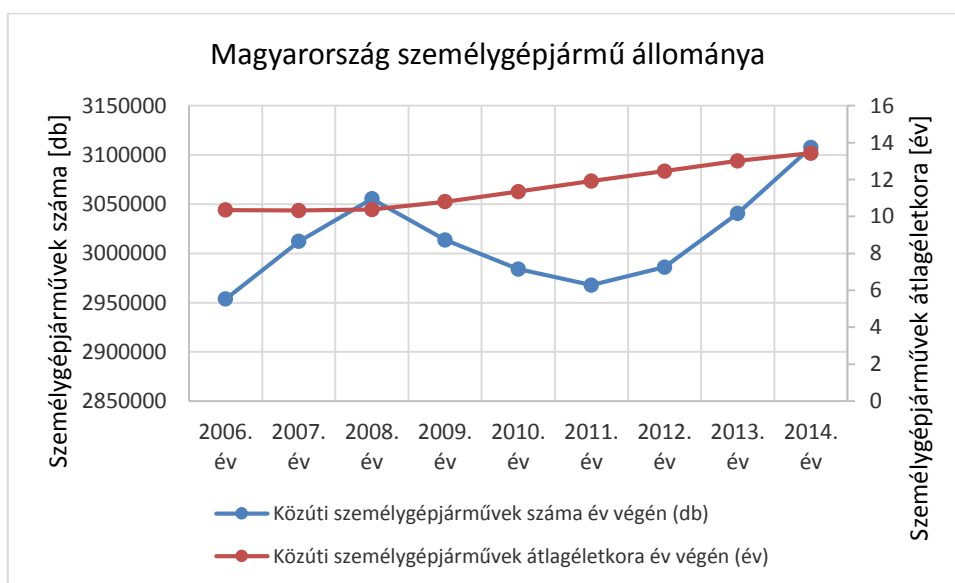
2.1 Országos és regionális jellemzők

Budapesten 565 563 személygépjármű volt 2012-ben, mellyel 2012-ben összesen körülbelül 277 milliószor utaztak a fővárosban a 366 nap alatt, ez átlagosan 757 ezer utazás naponta. Ezen nagy számok tükrében érdemes közelebbről megvizsgálni Magyarország fővárosának helyzetét. Értelemszerűen kiemelkedően magas az 1 km²-re jutó személygépjárművek száma, ezzel arányosan pedig a város levegőjének CO₂-, és egyéb emberi egészségre káros gáztartalma. A közegészség javítására, és az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére egy jó megoldás, ha robbanómotoros autók helyett elektromosokat használunk. [7]

A statisztikák szerint Budapesten 2012-ben egy személygépjárművel megtett utazás átlagos távolsága 17 km, átlagos ideje 27 perc, míg 2009-ben ez 13 km és 26 perc volt. Az előbbi statisztikát nem készíti el évről évre a Központi Statisztikai Hivatal, azonban tekintve, hogy a társadalmi viselkedési szokások nem változnak olyan gyorsan, a 2012-es adatok jó közelítéssel ma is helytállóak. A dolgozatom során fontosnak tartottam, hogy minél naprakészebb adatok segítségével végezzem a számításaim.

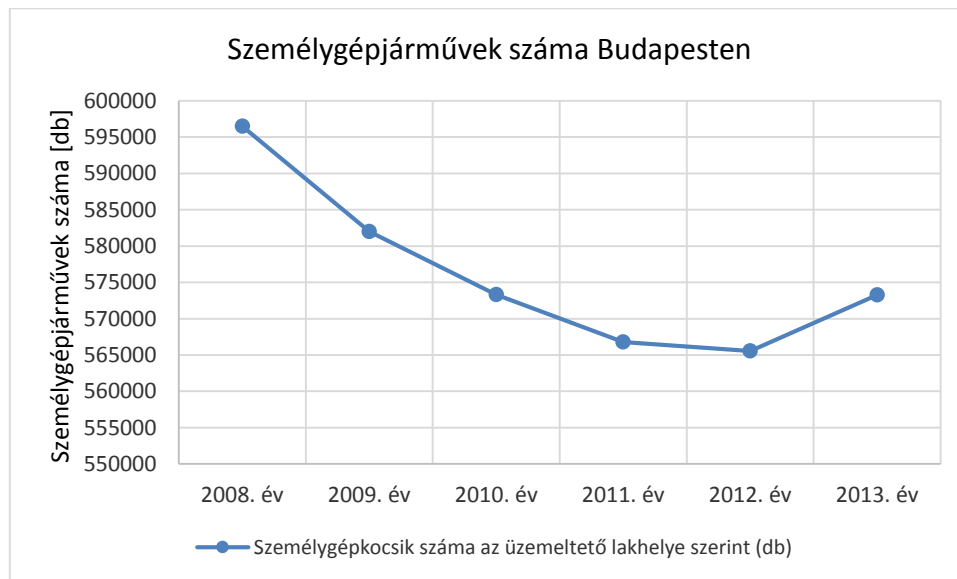
2.2 Személygépjármű állomány

Az alábbiakban néhány sajátosságra szeretnék rámutatni a budapesti közlekedést illetően. A 4. ábrán a Magyarországra vonatkozó statisztika látható a forgalomban lévő személygépjárművek számáról és azok életkoráról. 2006 és 2014 között Magyarországon évente átlagosan 20 000 új autót helyeztek forgalomba. Mindeközben a járműpark átlagéletkora összesen több mint 3 évet öregedett. [7]



4. ábra: Magyarország személygépjármű-állománya az elmúlt években

A legfrissebb adatok szerint 2015-ben Magyarországon több mint 3 000 000 autó szeli az utakat. Az 5. ábrán láthatóak a budapesti adatok. [7]

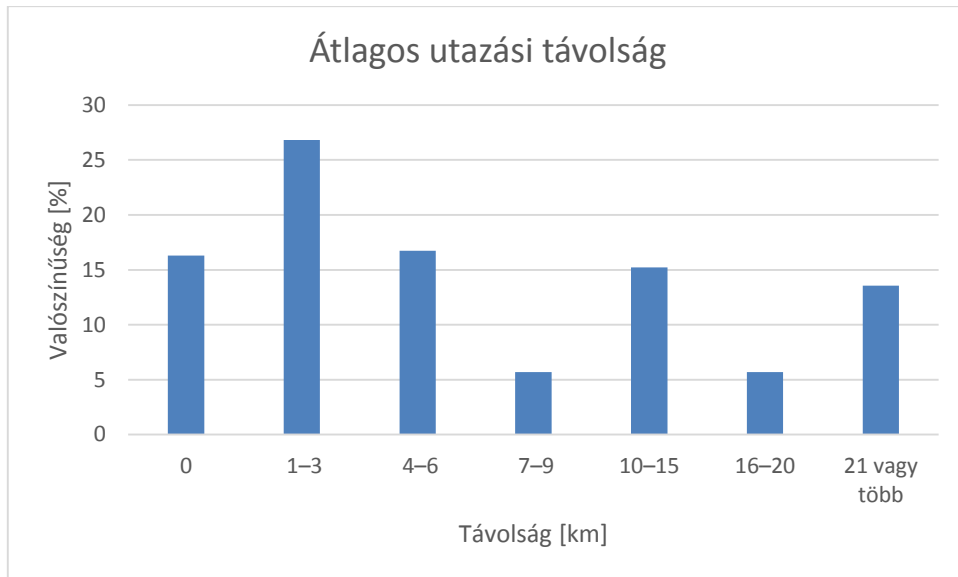


5. ábra: Személygépjárművek száma Budapesten az elmúlt években

Fontos megjegyezni, hogy az autóipar meglehetősen érzékeny a gazdasági válságokra, így a 2009-es jelentősebb visszaesésen érezhető a 2008-09-es gazdasági világválság hatása. Csak 2014 év végére érte el és haladta meg a válság előtti darabszámot a személygépjárművek száma. Az ilyen válságok ugyanúgy érzékenyen érinthetik az elektromos autók piacát is.

2.3 Napi utazási távolság

2012-ben az átlagos utazási távolság 13 km volt Magyarországon. Ennek eloszlása a 6. ábrán látható. Elektromos autók esetében az utazási távolság közvetlenül befolyásolja az akkumulátor töltöttségét, azonban ha figyelembe szeretném venni ezt a tényezőt, akkor még több másik jelentős faktort is bele kellene venni a modellbe a teljesség kedvéért. Ilyen például, hogy hányszor utaznak egy nap az emberek, és ennek eloszlása, azonban erről a dolgot megírásakor nem rendelkeztem adatokkal, így a modellezésből kihagytam őket. [7]

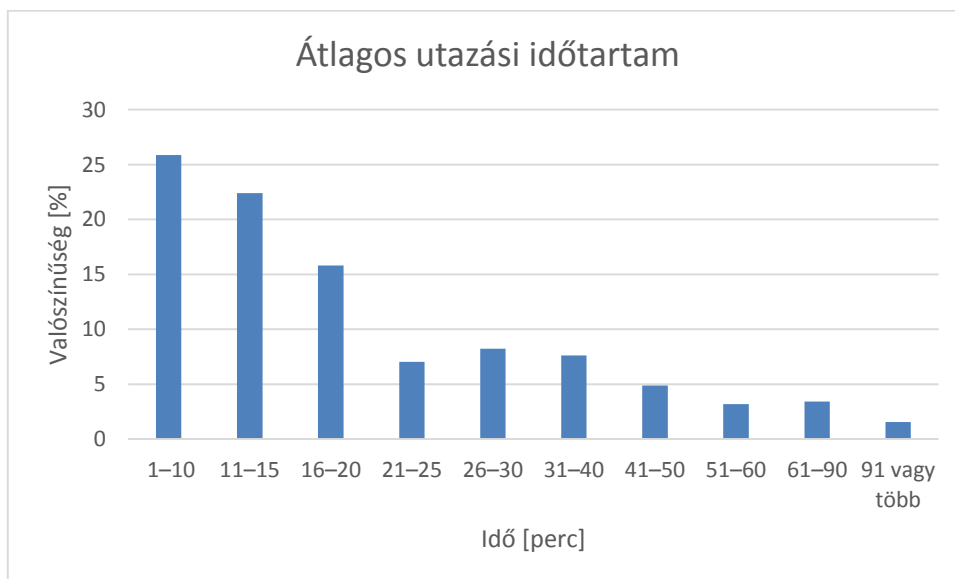


6. ábra: Átlagosan megtett utazási távolság személygépjárművel 2012-ben

Az utazási távolság elhanyagolását indokolja továbbá, hogy Budapesten ettől eltérnek az utazási szokások. Itt egy átlagos utazás távolsága a korábbiak szerint 17 km, így a továbbiakban ezzel számolok.

2.4 Utazás átlagos időtartama

Egy utazás átlagos időtartama 22 perc volt Magyarországon 2012-ben. Budapesten ez a szám valamelyest magasabb, átlagosan 27 perc. Fontos megjegyezni, hogy bár az utazások időtartamának eloszlását – mint a 7. ábrán látható – elhanyagoltam, azonban az időtartam szorosan korrelál a megtett távolsággal, éppen ezért az ott felsorolt indokok az elhanyagolásra vonatkozóan itt is helytállóak. [7]

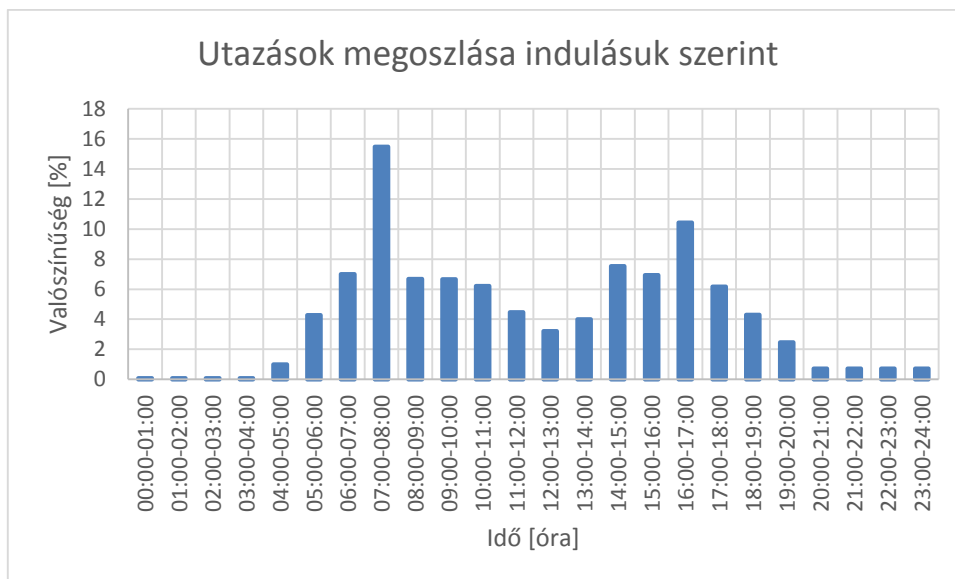


7. ábra: Átlagos utazási időtartam személygépjárművel 2012-ben

A fenti adatsorokból mindenesetre azt az információt felhasználtam, hogy ha tudjuk, hogy egy utazás időpontja átlagosan fél óra, akkor az indulás és érkezés között átlagosan fél óra telik el.

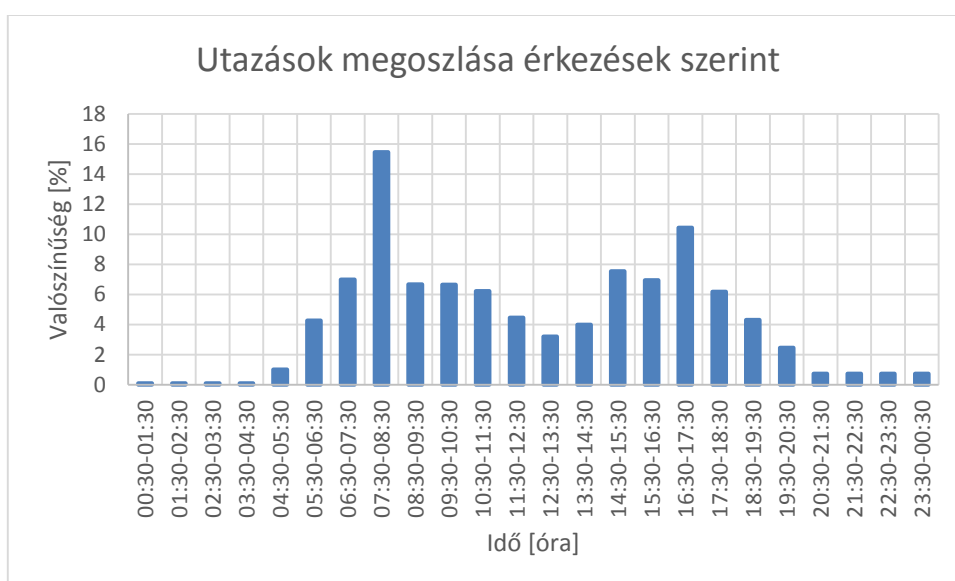
2.5 Indulás és érkezés megoszlása

A kiinduló adatom egy 2012-es órás felbontású statisztika, mely megmutatja, hogy adott időszámban hány autó indult el. Az indulások megoszlása a 8. ábrán látható. A hajnali és a késő esti órákról csak négy órára összegzett adatok álltak a rendelkezésemre, erre még a későbbiekben kitérek.



8. ábra: Utazások megoszlása indulóidőpontjuk szerint 2012-ben

Ha feltételezzük, hogy átlagosan az utazások hossza körülbelül 30 perc, akkor fél órával eltolva az indulásokat megbecsülhető az érkezések eloszlása. A kapott eredmény a 9. ábrán látható.

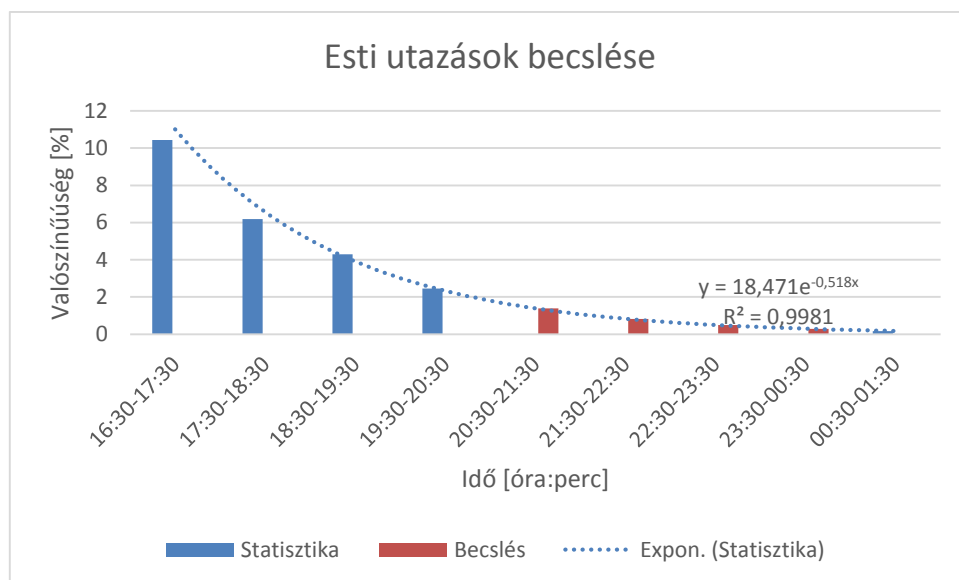


9. ábra: Személygépjárművek beérkezésének becslése 2012-ben

Az eredmény egyszerű, azonban mögöttes tartalma jól használható a szimulációm során. Mivel nem állnak rendelkezésre olyan viselkedési adatok, hogy az autót használó kliens hazaérkezés után mikor kezdi el feltölteni az elektromos autóját, ezért feltételeztem, hogy a lehető leghamarabb. A feltételezés azért is helytálló, mert általános emberi igény, hogy minél hamarabb rendelkezésre álljon az újra feltöltött járművünk.

Még egy érdekes mintázat kivehető, mely alapján jól elkülöníthető a munkába érkezés és a hazaérkezés. Az előbbi a délelőtti, az utóbbi pedig a délutáni órákra jellemző. Pontos számértékek erről nem álltak rendelkezésre, ezért természetesen fenntartásokkal kell kezelni a modellt, csak közelítésként használható. Jelen dolgozatomban a munkából hazaérkezés időintervallumával foglalkozom, tehát a 13:30 előtti érkezések nem relevánsak a későbbi számításokhoz.

A statisztikák alapján a 20:30 és 4:30 közötti beérkezésnek nincs meg az óras felbontási eloszlása, ezért ezt statisztikai eszközökkel megbecsültem. A 10. ábrán látható a becslés eredménye.



10. ábra: Személygépjárművek éjszakai megérkezése

A délutáni beérkezések exponenciális lecsengést mutatnak, ezért erre görbét illesztettem. Fontos, hogy az éjszakai beérkezések bár minimális, de nem nulla értékűek, így közelítésként a 00:30 és 01:30 közötti időintervallumra a hajnali beérkezések felét vettem fel. Ezzel a későbbi beérkezéseket kvázi korábbra tettem fel. Ez azért engedhető meg, mert így egy – ugyan csak kevéssel, de – nagyobb terhelésű modellt kapunk, mellyel jobban szimulálható a hálózaton előforduló legrosszabb eset.

A felvett trendvonal egyenletének segítségével meghatározhatóak a hiányzó százalékok. Az 1. táblázatban látszódik a délutáni hazaérkezések megoszlása. Összesen 12 órasávot kaptam, melyek 12 időben eltolt profilt eredményeztek a korábban ismertetett karakterisztika alapján.

Órasáv	Érkező autók száma
13:30-14:30	398
14:30-15:30	753
15:30-16:30	693
16:30-17:30	1042
17:30-18:30	618
18:30-19:30	429
19:30-20:30	246
20:30-21:30	174
21:30-22:30	113
22:30-23:30	73
23:30-00:30	47
00:30-01:30	16

1. táblázat: A délután beérkező autók száma

A táblázatban 10 000 autóra vetítve néztem a beérkezések megoszlását. Látható, hogy összesen kevesebb, mint 5000 beérkezéssel számolok, azonban feltételezésem szerint az utazások másik fele nem hazaérkezési céllal történik, tehát például bevásárlási vagy munkaügyi céllal, melyeket nem követ töltés. További hasznos tény, hogy 10 000 autós mintából véletlenszerűen kiválasztva néhány száz darabot – melyet a későbbi szimulációk során meg is teszek – pontosan a fenti megoszláshoz fog közelíteni, azonban sztochasztikus jelleget fog mutatni. [8]

3 A vizsgált hálózat

3.1 A budapesti villamos hálózat tulajdonságai

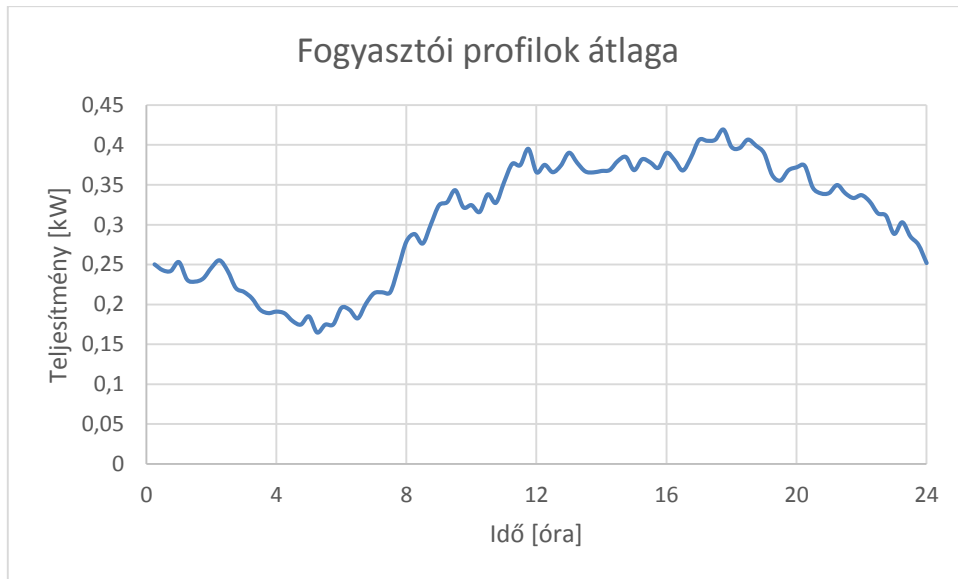
Budapesten 2012-ben 978 515 fogyasztó volt. A 2011-es népszámlálás szerint 759 110 háztartás van Budapesten, – mivel népszámlálás csak tízévente van Magyarországon, ezért ez volt az elérhető legpontosabb adat – így egy háztartásra átlagosan 1,289 fogyasztói bekötés jut, azaz sok az olyan háztartás, amelynek ellátását legalább két csatlakozási ponttal oldják meg.

Korábban ismertettem, hogy Budapesten összesen 565 563 személygépjármű volt 2012-ben, így egy háztartásra átlagosan 0,74 autó jut, ami csatlakozási pontonként átlagosan 0,5779 személygépjárművet jelent. Tehát egy 100 fogyasztóval rendelkező transzformátorkörzetnél átlagosan 58 személygépjármű van. A későbbiek során látható lesz, miért fontos ez az adat – a használt szoftverben az egyes terhelésekkel háztartások helyett csatlakozási pontokat, így adott esetben egynél több háztartást tudunk leképezni.

A hálózati topológiát a helyi elosztó hálózati engedélyes szolgáltatotta, mely adatbázis tartalmazza a kábelek hosszát, típusát és keresztmetszetét, valamint a fogyasztók számát.

A dolgozatom során Budapest kífeszültségű elosztói hálózatából összesen hét transzformátorkörzetet modelleztem. Adottak a 2012-es év statisztikái – melyeket már korábban ismertettem –, ehhez vettem hozzá az ELMŰ 2011. július 1. és 2012. június 30. közötti méréseit. Összesen 452 fogyasztói mérés van erről az időszakról, melyek negyed órás felbontással rendelkeznek. Hogy egy legrosszabb esetet vegyek, 2012. február 3-át választottam ki, ekkor volt a legnagyobb a napi villamosenergia-fogyasztás. Megvizsgálva ezeket a profilokat, néhányat elhagytam közülük, mert 16 A-nél nagyobb volt a negyed órára átlagolt áramfelvételük, s ilyen kismegszakító meglétét feltételeztem, további erről szóló információ és statisztika hiányában.

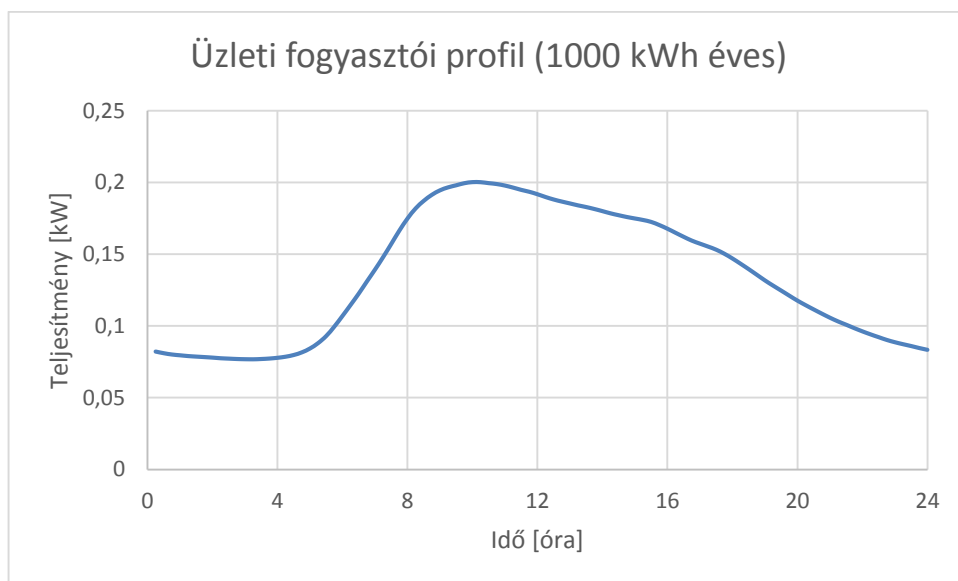
Végül 416 fogyasztói profil maradt, melyek átlagolt profilja a 11. ábrán látható. Ezen jól kivehető, hogy nappal nagyobb, éjszaka kisebb a hálózathoz felvett teljesítmény, és így az elfogyasztott energia. Érdeemes megemlíteni, hogy egy-egy fogyasztói profil ettől jelentősen eltérhet, éppen ezért egy-egy transzformátor körzet fogyasztása is.



11. ábra: A modellben használt 416 fogyasztói profil átlaga

A fogyasztói profilok terhelésekhez rendelését véletlenszerűen végeztem el, azonban az egyszerűsítés végett nem minden csatlakozási pontot képeztem le önállóan, a sokszor több száz fogyasztót tartalmazó hálózaton tömbösítettem a fogyasztókat, így előfordult, hogy kettő-öt fogyasztót aggregálva vettem fel, és így egyféle profilt állítottam be hozzájuk.

A kiefeszültségű elosztóhálózatra nemcsak egyfázisú lakossági fogyasztók csatlakoznak, hanem háromfázisú üzletek, irodák és középületek is. Ennek reprezentációjára az ELMŰ által meghatározott budapesti üzleti profilt vettem 2012. február 3-áról, melynek napi terhelési görbéje a 12. ábrán látható.



12. ábra: Üzleti fogyasztói profil 1000 kWh éves fogyasztásra normalva

A 12. ábrán látható görbe egy statisztikai elemzéssel készült normalizált (1000 kWh éves fogyasztásra vonatkoztatott) éves fogyasztói villamosteljesítmény-igény görbe. [9] Mivel a koncentrált fogyasztókról csak teljesítményadataim vannak, ezért az átlagteljesítménnyel számoltam ki a tényleges szorzótényezőket. Egy 1 kVA-es fogyasztóra a fenti görbe 7,7-szerese lesz érvényes.

3.2 Fogyasztók teljesítménytényezője

Mivel a pontos fogyasztási adat ismeretlen, ezért a teljesítménytényező konstans 0,95-nek lett választva az összes vizsgált hálózaton. Ahogy néhány fogyasztó be- vagy kikapcsol, az összesített teljesítménytényező az idővel változik, azonban ezt a szimuláció során elhanyagoltam.

3.3 A használt szoftver

A DigSILENT PowerFactory szoftvercsomagot használtam a szimulációkhoz (www.digsilent.de). A szoftver segítségével egy adott hálózaton több különböző szimuláció végezhető, például zárlatvizsgálat, aszimmetrikus teljesítményáramlási vizsgálat, harmonikus vizsgálat, stb. Jelen dolgozatomban egy speciális, beépített szkriptet használtam a teljesítményáramlás szimulációjára, mely 15 percenként „load-flow” szimulációkat futtatott a hálózaton [10]. Egy teljes nap (24 óra) lett lefedve a futásokkal, mely összesen 96 adatpontot takar. A szoftver segítségével a megépített hálózatokon bármelyik elem bármelyik paramétere vizsgálható, azonban a modell hiányosságai miatt nem minden paramétert érdemes vizsgálni, például a harmonikus viszonyok elemzésére a megépített modell nem alkalmas.

3.4 Fogyasztók elhelyezkedése és fáziskiosztása

Minden transzformátorkörzetben adott az egyes vezetékek hossza, valamint az arra csatlakozó fogyasztók száma. További adatok hiányában a fogyasztókat a vezetékek mentén egyenletesen osztottam el. Mint a profilok kiosztásánál említettem, a fogyasztók túlnyomó része kettes-ötös csoportokban lett elhelyezve, mert egyrészt a grafikus eszközök nem engedtek nagyobb felbontást, másrészt a további közelítéssel egy időben részletesebb hálózati paraméterek is szükségesek lettek volna.

A legtöbb háztartási fogyasztó egyfázisú, így névleges feszültségük 230 V. Ahogy a terhelések különböző fázisokra csatlakoznak, bizonyos mértékű feszültség-aszimmetria lép fel a hálózatban. Megfelelő hálózattervezéssel ez az aszimmetria egy elfogadható érték alá csökkenthető. Pontos adatok hiányában a bekötött profilokat egyenletesen osztottam el az a-b-c fázisok között. A koncentrált fogyasztókat ezzel szemben háromfázisú terheléseként képzeltem le a vezetékek végén.

3.5 Hálózati paraméterek

A kábelhossz és -keresztmetszet ismert volt, a többi paraméter (mint például a kábel ellenállása, reaktanciája) azonban ismeretlen. Az információhiány miatt a szimulációs szoftver nagyszámú beépített

típusa közül használtam a ténylegeshez hasonló paraméterekkel rendelkező kábeleket és transzformátorokat a modellezéshez.

A transzformátoroknál csak a névleges teljesítmény volt ismert. Mind a nyolc transzformátorra Dyn5-ös kapcsolási csoportot feltételeztem, mely gyakorinak számít a magyar KIF elosztóhálózatban. A 2. táblázatban láthatóak a számításokhoz megadott hálózati paraméterek.

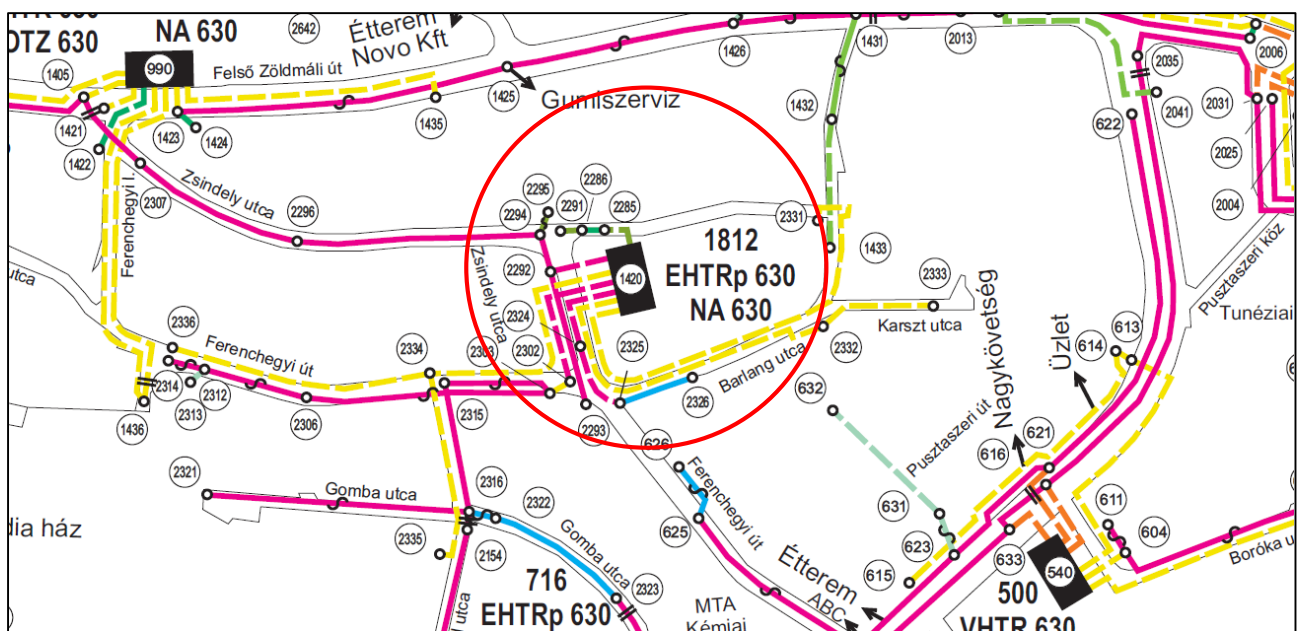
Transzformátor- körzet sorszáma	Áramkör sorszáma	Csomópont 1.	Csomópont 2.	Hossza [m]	Fázisvezető	Nullavezető	Fogyasztók száma [db]	Koncentrált terhelések [kVA]
1812	1	1420	2285	26	3x70 Al kábel	70 Al kábel	9	0
1812	1	2285	2286	14	3x95 Al kábel	95 Al kábel	28	0
1812	1	2286	2291	14	3x70 Al kábel	70 Al kábel	0	0
1812	2	1420	2292	40	3x185 Al kábel	185 Al kábel	1	0
1812	2	2292	2293	86	3x95 Al	95 Al	3	0
1812	2	2292	2294	24	3x95 Al	95 Al	15	0
1812	2	2294	2295	15	3x25 ML	25 ML	0	0
1812	2	2294	2296	152	3x95 Al	95 Al	58	0
1812	2	2296	2307	111	3x95 Al	95 Al	22	0
1812	2	2307	1405	55	3x95 Al	95 Al	11	0
1812	3	1420	2302	100	3x185 Al kábel	185 Al kábel	0	0
1812	3	2302	2303	15	3x240 Al kábel	240 Al kábel	0	0
1812	3	2303	2306	153	3x95 ML	95 ML	8	0
1812	3	2303	2315	69	3x95 ML	95 ML	17	0
1812	3	2306	2312	66	3x95 ML	95 ML	18	0
1812	3	2312	2313	12	3x25 Al kábel	25 Al kábel	3	0
1812	3	2312	2314	24	3x95 ML	95 ML	1	0
1812	3	2315	2316	82	3x95 Al	95 Al	4	0
1812	3	2316	2321	165	3x95 ML	95 ML	24	0
1812	3	2316	2322	17	3x50 ML	50 ML	0	0
1812	3	2316	2154	11	3x95 ML	95 ML	0	0
1812	3	2322	2323	92	3x50 Al	50 Al	8	0
1812	4	1420	2324	62	3x185 Al kábel	185 Al kábel	0	0

1812	4	2324	2325	47	3x185 Al kábel	185 Al kábel	6	0
1812	4	2325	2326	48	3x50 Al	50 Al	6	0
1812	5	1420	2331	298	3x240 Al kábel	240 Al kábel	16	0
1812	6	1420	2332	227	3x240 Al kábel	240 Al kábel	37	0
1812	6	2332	2333	74	3x240 Al kábel	240 Al kábel	60	0
1812	7	1420	2334	176	3x240 Al kábel	240 Al kábel	3	0
1812	7	2334	2335	123	3x240 Al kábel	240 Al kábel	8	0
1812	7	2334	2336	165	3x240 Al kábel	240 Al kábel	24	0

2. táblázat: Megadott hálózati paraméterek az 1812-es transzformátorkörzetre

3.6 Transzformátorkörzet modellje a szoftverben



A budapesti kiefeszültségű elosztóhálózat sugaras felépítésű, vagyis egy-egy fogyasztót egy oldalról látnak el. A hálózatok több ponton megszakíthatók és szakaszolhatók, a modellezés során egy adott, normál állapotból indultam ki. Így egy transzformátorkörzethez meghatározott számú fogyasztó és vezeték tartozik. Egy konkrét transzformátorkörzetet kiválasztva mutatom be a modellezés és a szimuláció lépéseit: a Budapest II. kerületében található 1812-es transzformátorkörzeten. A hálózati kép a 13. ábrán látható.



13. ábra: Hálózati topológia

A példában egy 630 kVA névleges teljesítményű transzformátor szerepel, melyhez a beépített DOTEK 630/10 SGB típusú transzformátort használtam. A kábelek hossza és a keresztmetszete ismert volt, a pontos típust azonban nem ismerve egy szoftverbe beépített típust választottam. Az alább ismertetendő módszert alkalmaztam a többi transzformátorkörzetre is.

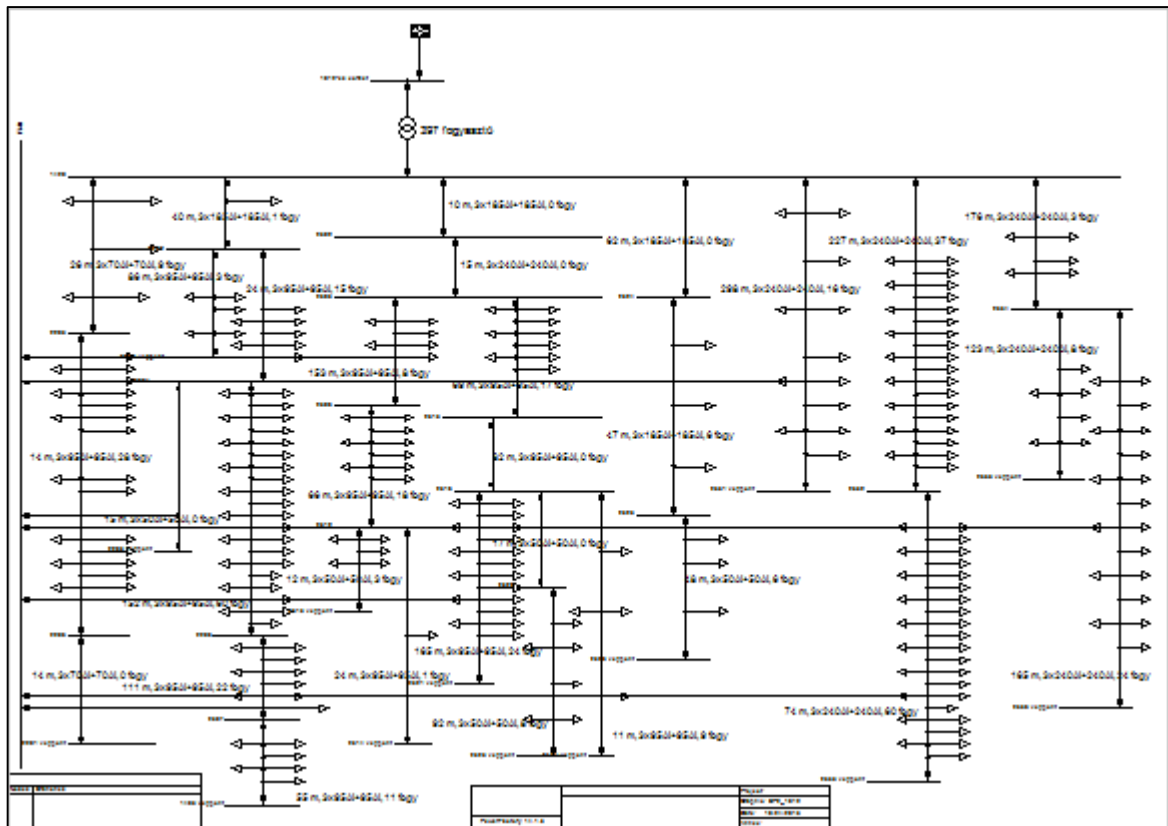
Egy külső, 150 MVA-es zárlati teljesítményű hálózat reprezentálja a középfeszültségű hálózatot, utóbbi nem képezi a vizsgálat tárgyát. A kiefeszültségű hálózatot a korábban említett transzformátor látja el. A 14. ábrán láthatóak a nagyfogyasztók, valamint a különböző típusú kábelek – a különböző színek különböző keresztmetszetet jelentenek [8].

Szab.vez.-ek	Kábelek
 4 x 25 mm ²	 4 x 50 mm ²
 4 x 35 mm ²	 4 x 70 mm ²
 4 x 50 mm ²	 4 x 95 mm ²
 4 x 70 mm ²	 4 x 120 mm ²
 4 x 95 mm ²	 4 x 150 mm ²
 4 x 120 mm ²	 4 x 185 mm ²
	 4 x 240 mm ²

14. ábra: Vezetéktípusok

A szoftverrel megvalósított modellt a 15. ábra mutatja. A KIF hálózat földelt csillagpontokkal üzemel, a hálózat néhány százméterenként van földelve, ezért ezt az ábrán látható módon meg is valósítottam, melynek implementálása elsősorban az autótöltők egyfázisú töltésekor okozott aszimmetriája miatt fontos.

Érdemes megemlíteni, hogy a 15. ábra nem méretarányosan szemlélteti a hálózatot, a valóságban a kábelek hossza a néhány tíz méterestől a néhány százméteresig terjed. A fogyasztók egyenletesen lettek elosztva a kábel mentén.



15. ábra: A szoftverbe implementált modell

Az 1812-es körzetben lévő 397 fogyasztót 166 darab kifeszültségű terheléssel képeztem le, tehát átlagosan 2,2-esével csoportosítottam a terheléseket. Az átláthatóság kedvéért a vezetékek jobb oldalán láthatóak a már meglévő fogyasztók, míg a bal oldalukon a majdani villamosautó-töltők kaptak helyet.

A 16. ábra szemlélteti az összes hálózatban előforduló elemet, melyekből a hálózatokat felépítettem. Ami nem látszik az ábrán, illetve nincs jelölve, azok a csatlakozási pontok (fekete körrel jelölve), ahol például a fáziskiosztás adható meg, továbbá nem mutatja az ábra a szimulációs eredményeket és a fogyasztói profilokat sem.

3.8 Töltőbeállítások

Az elektromos autók által megtett napi távolsága valószínűségi változóként is kezelhető. Feltételeztem, hogy az akkumulátorokat csak akkor töltik újra, amikor 30% alá csökken a töltöttségük.

A munkám során azt vizsgáltam, amikor az elektromos autókat otthon töltik. A legtöbb esetben az emberek délután vagy este érkeznek haza, miközben napközben úton vagy munkában vannak. Éppen ezért kizárólag a délután kezdődő töltéseket vettem figyelembe. Ebben a vonatkozásban két hatás valószínűsíthető: egyrészt az esti csúcs jobban kiemelkedik a fogyasztásban a reggelihez képest, másodlagos hatásként pedig kellő számú villamos autó esetén akár el is torzulhat az ábra, és este nagyobb lehet a fogyasztás.

4 A szimulációk eredményei

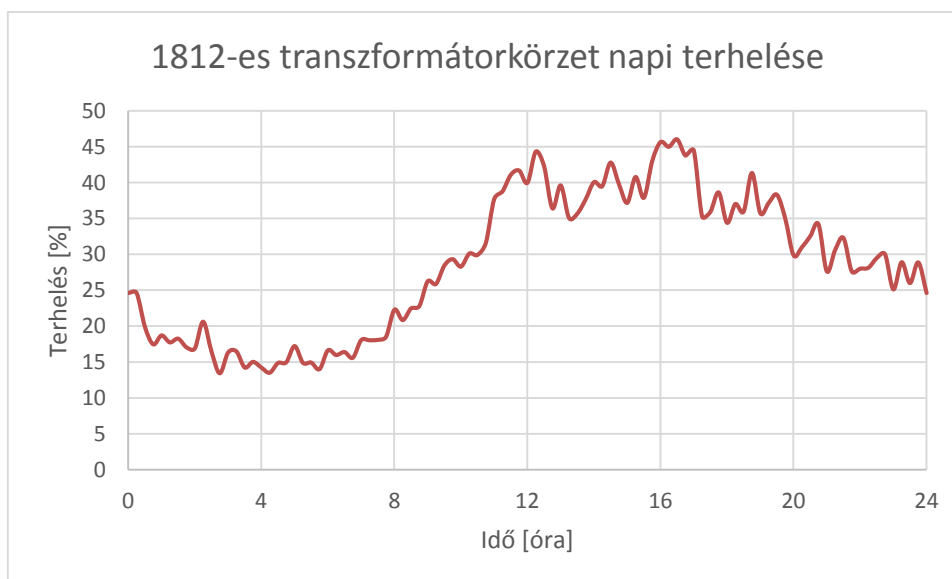
4.1 Hálózat elektromos autók nélkül

„Load flow” szimulációkat végeztem mind a hét hálózaton, melyek 24 órára számított háromfázisú, aszimmetrikus teljesítményáramlásokat takarnak. A kiinduló állapotban a hálózatokban nincs töltődő villamos autó, ez gyakorlatilag a hálózat jelenlegi helyzete. Az eredmények átlagolása után megkaptam az átlagos napi transzformátorterhelést, melyet a 3. táblázat mutat.

Transzformátor körzetszám	Névleges transzformátor- teljesítmény	Átlagos napi terhelés
662-es	400 kVA	43,96 %
714-es	630 kVA	48,91 %
925-ös	630 kVA	52,32 %
1502-es	630 kVA	32,29 %
1512-es	100 kVA	38,91 %
1738-as	630 kVA	5,57 %
1812-es	630 kVA	28,62 %

3. táblázat: Átlagos napi transzformátorterhelés elektromos autók nélkül

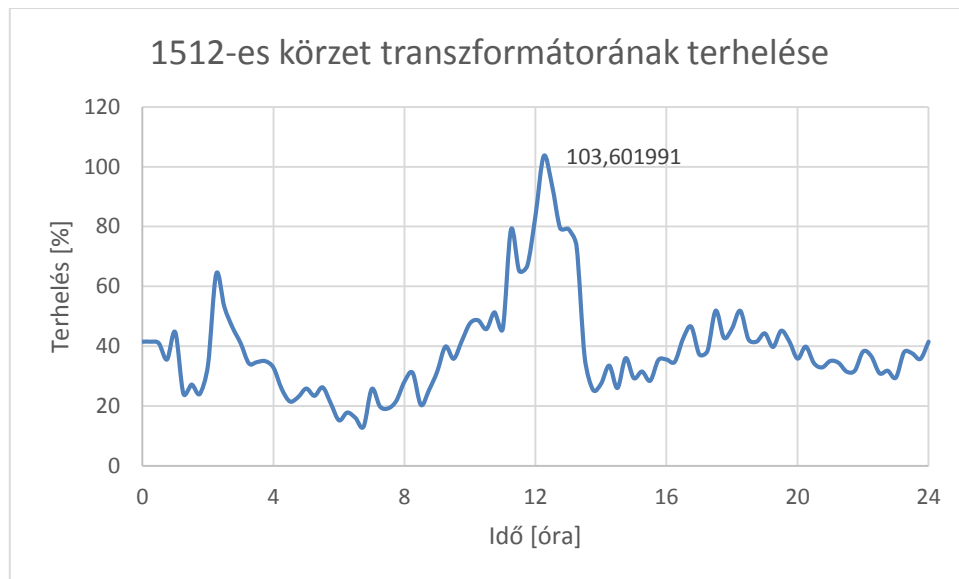
Az átlagos napi terhelések a munkám során 5% és 53% közötti értéket vettek fel, azonban fontos megemlíteni, hogy ez a vizsgált nap függvényében változhat. Minden negyedóra átlagolva a terhelést a 17. ábra szerinti görbét kapjuk, mely egy átlagos transzformátor működését mutatja a 24 óra alatt.



17. ábra: 1812-es transzformátorkörzet transzformátorának napi terhelése

Bár itt a napi csúcs nem éri el a névleges beépített teljesítmény 100%-át, az összes transzformátor tekintetében rövid ideig egy esetben előfordult. Ahogy a 18. ábrán látszik, negyed órára átlépi a

transzformátor a 100%-os terhelést, a mért érték szerint a beépített teljesítmény 103,6%-a áramlott át rajta ekkor. Mivel február 3-át kifejezetten nagyobb fogyasztású napként választottam ki, ezért ilyen rövid idejű túlterhelődés még megengedhető a szabvány szerint. [12]

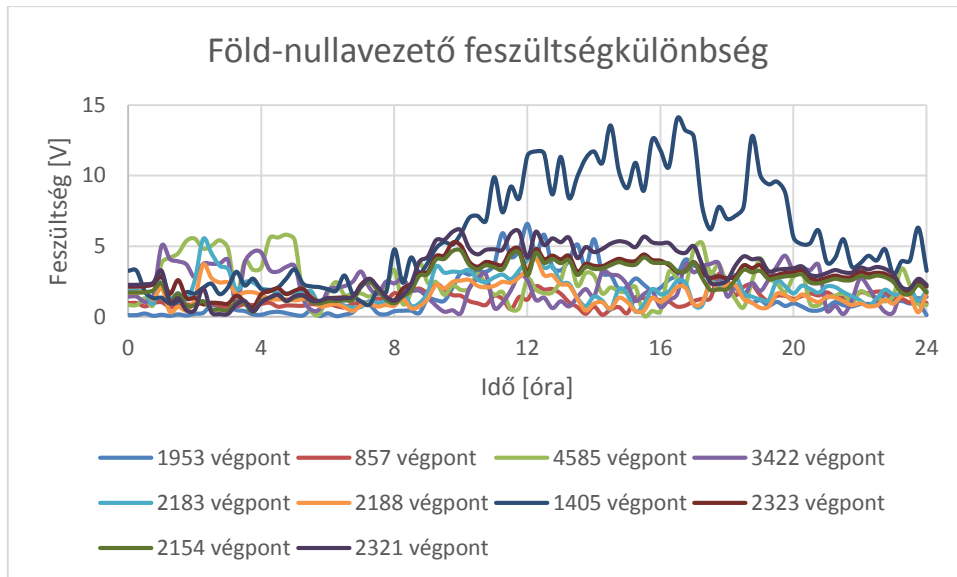


18. ábra: 1512-es körzet transzformátorának napi terhelési görbéje

A szimulációk során megkaptam a transzformátorok terhelését a kiinduló állapotban, amikor nincs elektromos autó a hálózatban. Néhány tipikus jellemvonás megfigyelhető a terhelési görbékben, mint például a reggeli vagy esti csúcsok, illetve az éjszakai völgyidőszak a terhelésben. Egy-egy transzformátornál – mint például az 1512-es körzetnél is – az ismert görbétől jelentősen eltérhet a napi terhelés, azonban ahogy az átlagolással kapott görbe is jól mutatja, minél több transzformátorkörzettel végzem a számítást, annál közelebb kerülünk az átlagos háztartási fogyasztó terhelési görbéjéhez.

4.2 A kiindulási állapot villamosenergia-minősége

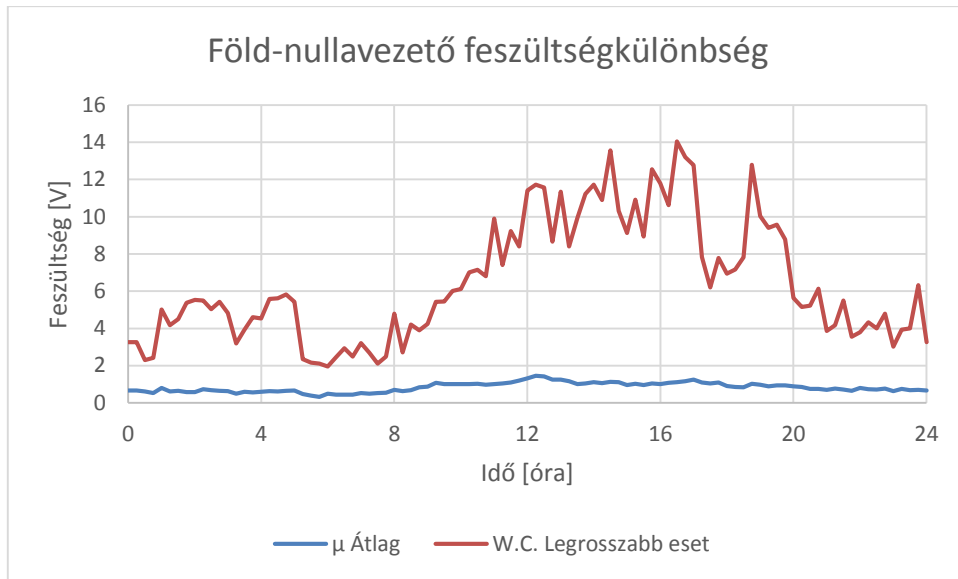
Különböző jellemzőket vizsgálok meg, hogy rögzítsem a hálózat kezdeti állapotát, és ehhez képest lássam a villamos autók és lakossági töltésük elterjedésének hatását. Egy ilyen jellemző a föld és a nullavezető feszültségkülönbsége, mely egyben a csillagpont eltolódása is. A mennyiség onnan származik, hogy a három fázisban nem egyenlő a terhelés, és így a nullavezetőn is kényszerűen feszültség esik a földelésig. A méréseket az összesen 54 végponton végeztem el. Természetesen ki lehetne számolni a hálózat minden egyes terhelésénél a csillagpont eltolódását, azonban ez jelen dolgozatomban nem cél. Az 54 végpont közül a tíz legrosszabb eset a 19. ábrán látható



19. ábra: Tíz föld-nullavezető feszültségkülönbség kiválasztva a legrosszabb eseteket

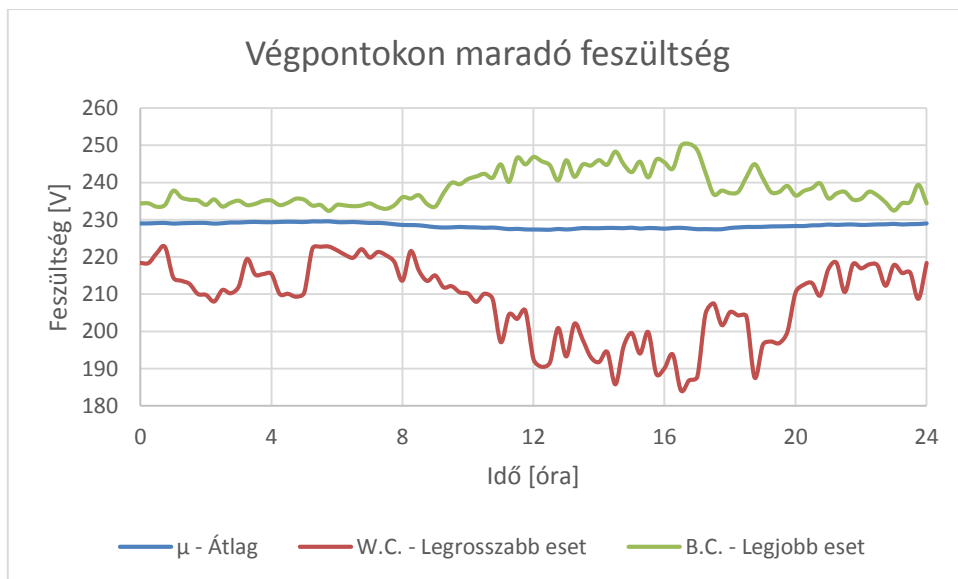
A legrosszabb eset jelentése, hogy átlagosan a legnagyobb a feszültségkülönbség. Jól látszik, hogy még így is csak egy szignifikáns kiemelkedés van, az 1405-ös végponté. Mivel a fogyasztókat véletlenszerűen osztottam ki, ezért ezen ok felderítésére részletesebb analízis nem lehetséges. Vélhetően más profil- és fáziskiosztásnál nem lenne ilyen nagy a föld és a nullavezető feszültségkülönbsége.

Az 54 végpont átlagát tekintve megkapható az átlagos csillagpont-eltolódás a végpontok mentén, mely a 20. ábrán látszik. A diagramon ezen kívül egy teoretikus legrosszabb eset is látszódik, melyet úgy kaptam, hogy a meglévő adatok közül minden időpillanatban a lehető legnagyobb értéket vettem. Mivel ez nem köthető a hálózat egy bizonyos pontjához, ezért a W.C. („Worst Case”) görbe csak elméletileg fordulhat elő.



20. ábra: A föld-nullavezető feszültségkülönbségek átlaga és teoretikus legrosszabb esete

További fontos minőségjellemző a feszültségesés a kábelek és szabadvezetékek mentén. Az összesen 54 végpont három fázisára ezt a 21. ábra mutatja, mely egyben a legkisebb előforduló feszültségérték is, mert feltételeztem, hogy csak induktív fogyasztók vannak a hálózatban.



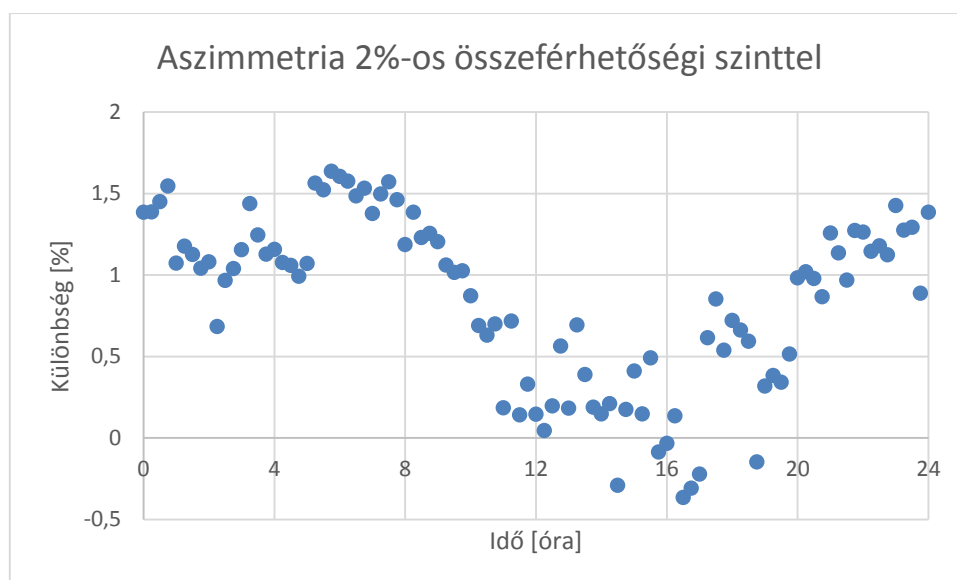
21. ábra: Átlagosan a végpontokon maradó feszültség a szimulált hálózaton

A hálózati elemek terhelése mellett a feszültségesés szintén egy fontos jellemző. A szabvány szerint legfeljebb 7,5%-os feszültségesés engedélyezett egy vezeték mentén [12]. A névleges fázisfeszültség a magyar kifizetésű hálózaton 230 V. A szabvány szerint a feszültségnek 212,75 V és 247,25 V között kell lennie.

A kapott görbéken kisebb rendellenesség figyelhető meg, miszerint akár 200 V alá is eshet bizonyos helyeken a feszültség. Az anomáliát megvizsgálva 212,75 V-nál kisebb feszültség összesen csak három vezeték 72 negyedórájára vonatkozik, és ott is csak egy fázisra érvényes. Megállapítható, hogy a fogyasztók véletlenszerű kiosztásából kialakulhat kis valószínűséggel ilyen terhelési gócpont. Az, hogy kialakult, csak azt igazolja, hogy a statisztikai sokaság megfelelő számú elemet tartalmazott.

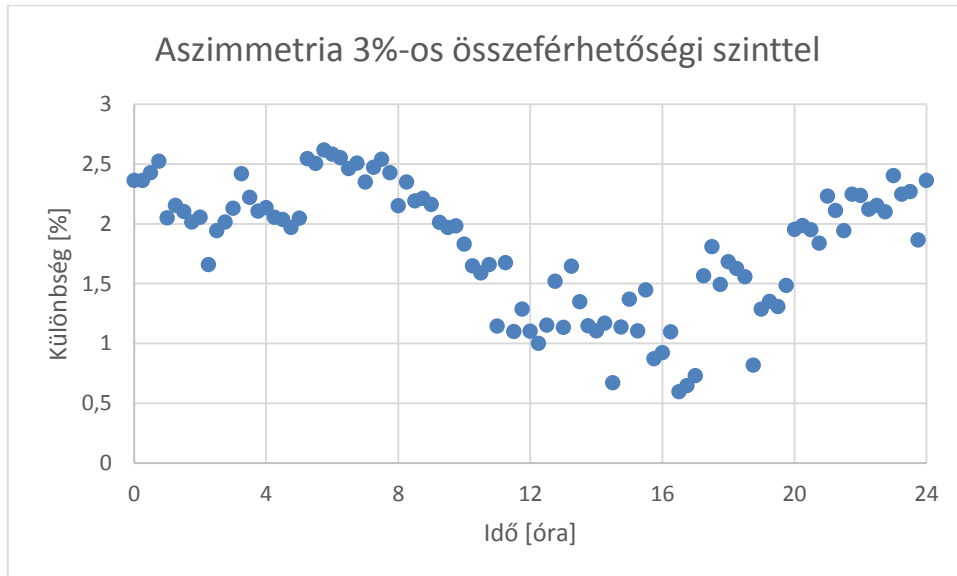
A negyedik megvizsgált paraméter az aszimmetria mértéke. Kisfeszültségű hálózatokon a negatív sorrendű tápfeszültség-aszimmetriát a zömében egyfázisú fogyasztók térben és időben nem szimmetrikus vételezése okozza. A negatív sorrendű feszültség-aszimmetriára megadott összeférhetőségi szint szerint a mérési időszak alatt a negatív sorrendű összetevő napi, 10 percre átlagolt értékeinek 95%-a nem lehet nagyobb a pozitív sorrendű összetevő 2%-ánál. Egyes területeken, ahol a fogyasztói villamos berendezések többségében egy- vagy kétfázisúak, az aszimmetria összeférhetőségi szintje 2% helyett 3%. [13]

Mivel az összeférhetőségi szintről nincs adatom a hálózati üzemeltetőtől, ezért mind a két feltételre megvizsgálom a végpontok feszültségét. Továbbá eltérés a megadott módszertől, hogy a 10 percre átlagolt értékek helyett 15 percre átlagolt értékek állnak a rendelkezésemre. Az összes lehetséges eset megvizsgálása meglehetősen sok időbe telne, ezért az alkalmazott módszerem a lehető legrosszabb esetet vizsgálja. Az 54 végpont legkisebb pozitív sorrendű feszültségének 2%-ából kivontam a legnagyobb negatív sorrendű feszültség 95%-át. Ha az eredmény nullánál nagyobb, akkor megfelelő érték alatt van az aszimmetria, ha kisebb, akkor a megengedettnél nagyobb aszimmetria tapasztalható a hálózatban. A 22. ábra mutatja az eredményt.



22. ábra: Aszimmetria villamos autó nélkül 2%-os összeférhetőségi szinttel

Láthatóan délután néhány esetben az aszimmetria a megengedettnél nagyobb. A következő, 23. ábra már 3%-os összeférhetőségi szintre vonatkozik.

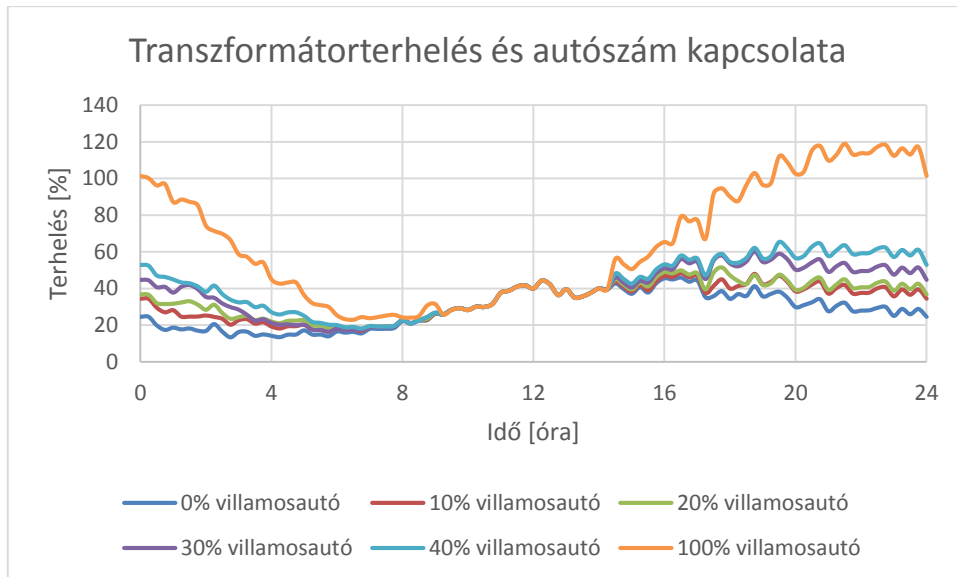


23. ábra: Aszimmetria villamos autó nélkül 3%-os összeférhetőségi szinttel

A 3%-os esetről már elmondható, hogy az előírt minőségi kritériumoknak megfelel. Mivel nem ismerjük a hálózat pontos felépítését, ezért a kiindulási görbék csupán a villamos autókat tartalmazó hálózatokkal értelmezhetőek megfelelően.

4.3 Az elektromos autók számának hatása a transzformátorterhelésre

Visszatérve a például szolgáló transzformátorkörzethez, – az 1812-es transzformátorkörzethez – bemutatom, hogy a transzformátor terhelése hogyan függ a villamos autók elterjedtségétől. Ahogy az elektromos autók száma nő a hálózatban, úgy a transzformátorok terhelése is nő, ahogy azt a 24. ábra is mutatja. A vizsgálat során inkább a kisebb részarányok érdekesek, hiszen ma még egy nagyságrenddel a 10%-os arány alatt vagyunk, éppen ezért a 100%-os arányt csak azért raktam bele, hogy kontrasztba helyezzem a hálózat mostani állapotával.



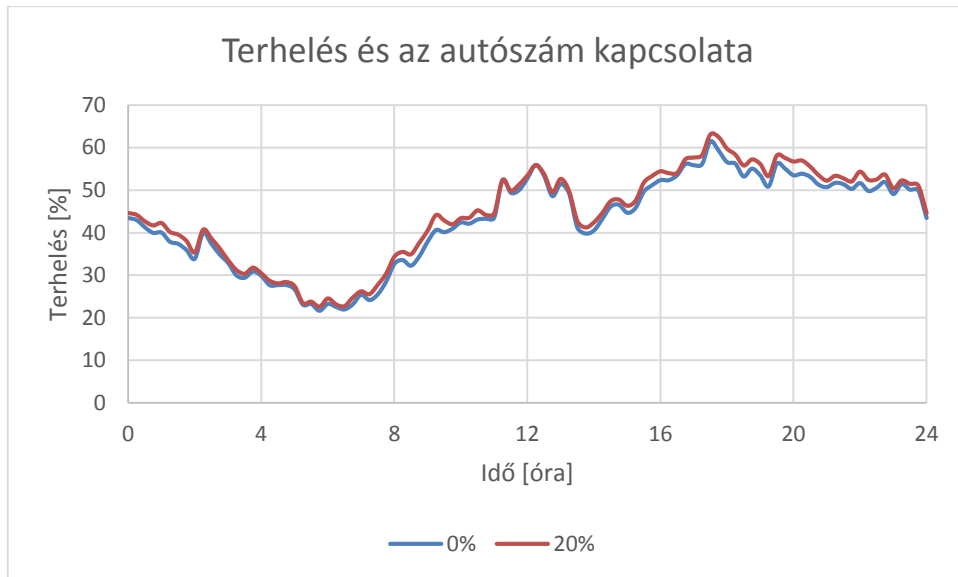
24. ábra: Egy transzformátor napi terhelése az elektromos autók számának függvényében

A töltők véletlenszerű kiosztásának köszönhetően a görbék nem konstans értékkel térnek el egymástól a délutáni és az esti órákban, például újabb kiosztásnál elképzelhetően nagyobb lenne a kora esti órákban a 10%-os és a 20%-os görbe távolsága.

Jól kivehető, hogy az elektromos autók számának növelésével a tipikus terhelési karakterisztikák is torzulnak. Amíg kis aránynál ez a torzulás nem jelentős, 40%-nál már nem vehető ki rendesen az esti völgyidőszak, 100%-os aránynál pedig nappal alacsonyabb lenne a fogyasztás, ha mindenki éjszaka szeretné feltölteni a járművét. Itt a transzformátor átmeneti túlterhelődése is megfigyelhető.

4.4 Hálózat 20%-os villamos autó aránnyal

A legoptimistább jóslatok is csupán 10% és 20% közé teszik a villamos autók elterjedtségét tíz év múlva, éppen ezért a dolgozatom további részében alaposabban megvizsgálom a hálózatot 20%-os elektromos autó elterjedtséggel. Ha minden ötödik háztartásban lenne elektromos autó, akkor a napi terhelési görbék karakterisztikája a 25. ábrán látható módon változna.

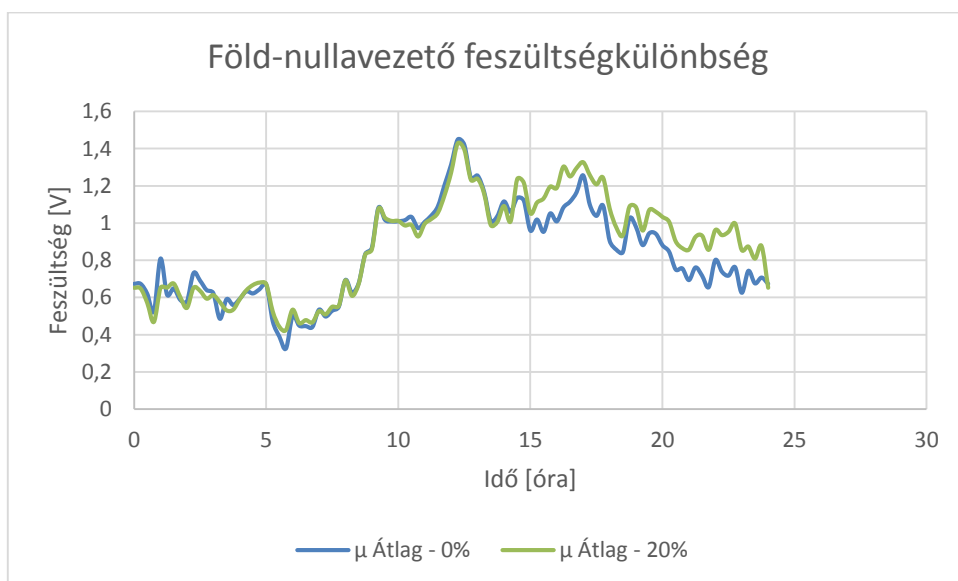


25. ábra: A hét transzformátor átlagolt napi terhelése 0% és 20%-os villamos autózszámnál

Látható, hogy az összfogyasztás mellett globálisan alig jelentkezett többletterhelés.

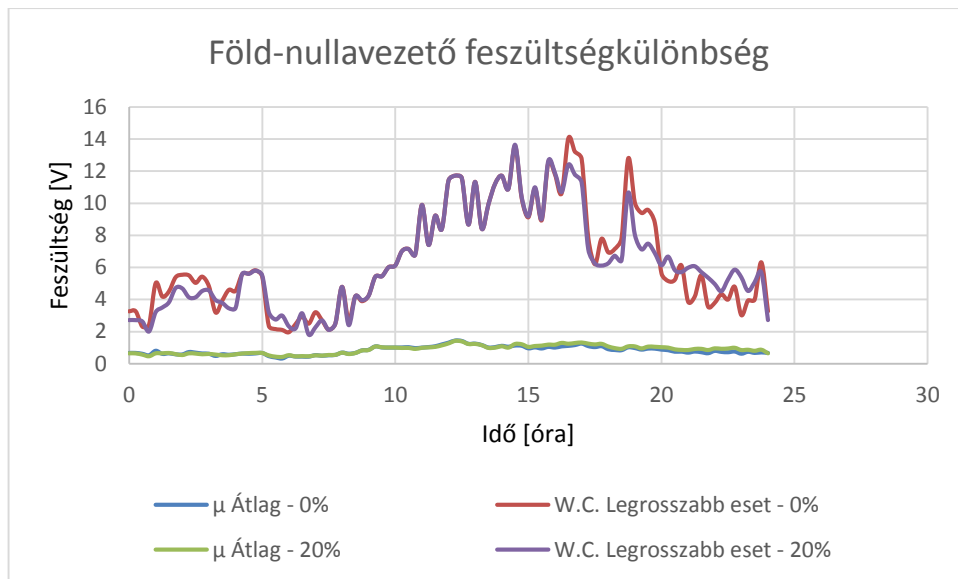
4.5 Feszültségkülönbség a föld és a nullavezető között

A továbbiakban 20%-os villamos autózszámmal kalkulálok. Mivel az elektromos autókat egyfázisú terhelésként modelleztem, ezért megvizsgáltam a hálózaton előforduló aszimmetria viszonyokat is. Ennek egyik módszere a föld és a nullavezető közötti feszültségkülönbség. A modellbe a meglévő háztartási fogyasztókat és a villamos autók töltőberendezéseit is egy fázisra kötöttem be, a fázisokat pedig véletlenszerűen osztottam ki. A 26. ábrán látszódik, hogy a kiinduló állapothoz képest a délutáni, esti órákban nagyobb a feszültségesés a nullavezetőn.



26. ábra: Átlagos feszültségkülönbség a föld és a nullavezető között 0%-os és 20%-os elektromos autó elterjedtséggel

A különbség nem jelentős, a 27. ábrán pedig jól kivehető, hogy nem lehet egyértelműen trendről beszélni. Továbbá egy-egy transzformátorkörzet szintjén nézve a föld-nullavezető feszültségkülönbség pozitív, és negatív irányba is változhat a különböző fázisonként bekapcsolt töltők függvényében.

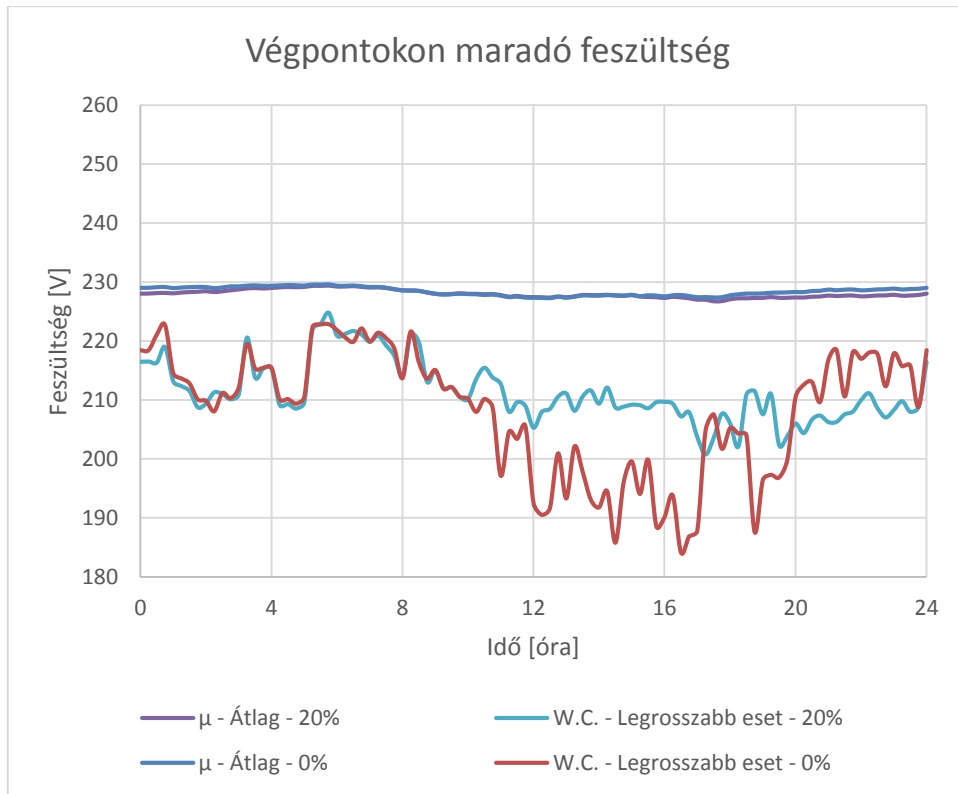


27. ábra: Feszültségkülönbség a föld és a nullavezető között 0%-os és 20%-os elektromos autó elterjedéssel

A W.C. („Worst case”) görbe egy hipotetikus gyűjtősínhez tartozik, amit úgy kaptam, hogy mindig a legmagasabb értéket választottam a negyedórás mérések során. Így fordulhatott elő, hogy 8:00-kor ez az érték a 2372-es gyűjtősínről, míg 8:15-kor a 1987-es gyűjtősínről származott. Az átlagot mutató görbe valójában a várható értékét mutatja a föld és a nullavezető közötti feszültségkülönbségnek. A kicsi feszültségkülönbség azt jelenti, hogy a hálózatban nem lép fel jelentős aszimmetria.

4.6 Feszültségesés a vezetékek mentén

A hálózati elemek terhelése mellett a feszültségesés szintén egy fontos jellemző. A szabvány szerint legfeljebb 7,5%-os feszültségesés engedélyezett egy vezeték mentén **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** A 28. ábra a legkisebb előforduló feszültségértéket mutatja minden kábelben, melyeket jelen esetben végpontokon számítottam, mivel feltételeztem, hogy csak induktív fogyasztók vannak a hálózatban.

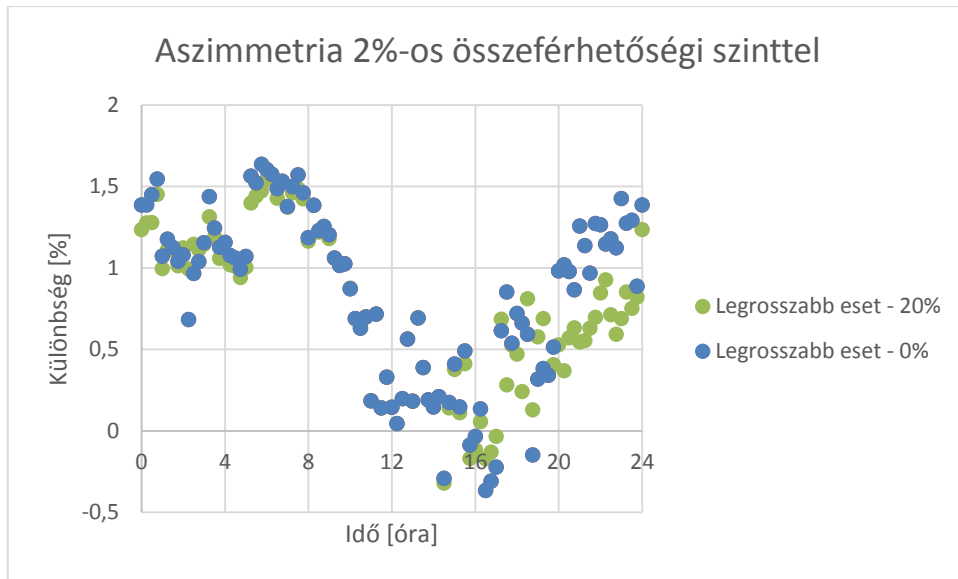


28. ábra: Végpontokon maradó feszültségésés 0%-os és 20%-os villamos autó arányánál

Ha nincs terhelés, nem lesz feszültségésés - valójában mindig lesz egy kicsi a távvezetékek ellenállása miatt, de ez most elhanyagolható. A 28. ábra nem a feszültségésést mutatja, hanem a távvezeték végén maradó feszültséget. A „Worst case” eset görbéje sem tartozik egy adott pontjához a hálózatnak, hanem mindig a lehető legkisebb érték lett kiválasztva.

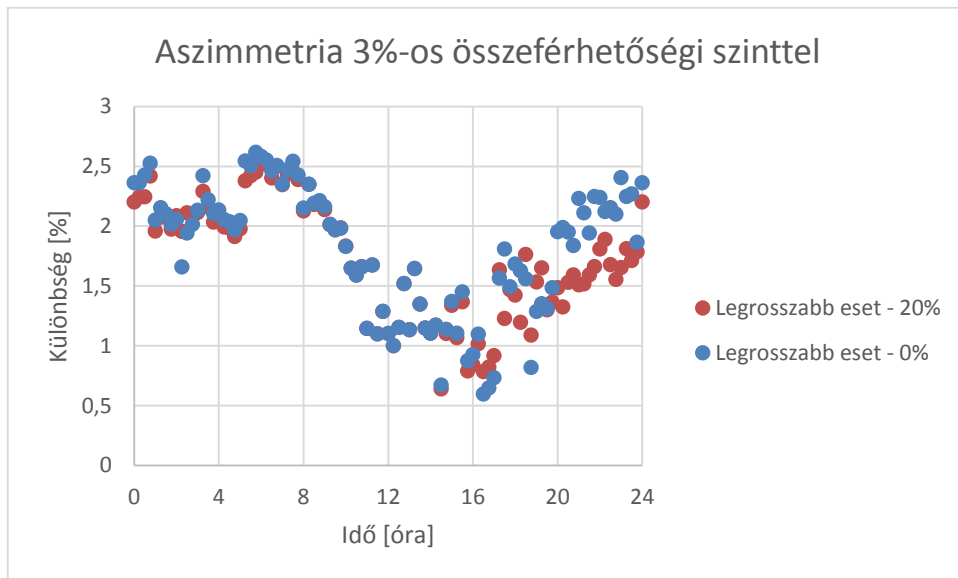
4.7 Aszimmetria a hálózaton

Végül az aszimmetriát is megvizsgáltam arra az esetre, ha a hálózaton található személygépjárművek ötöde elektromos meghajtású. A 29. ábrán látható 2%-os összeférhetőségi szinttel az aszimmetria összevetve a kiinduló állapottal.



29. ábra: Aszimmetria 0%-os és 20%-os villamos autóz számmal 2%-os összeférhetőségi szinttel

A 0%-os esethez hasonlóan most is előfordultak a megengedettnél nagyobb aszimmetriák, azonban ahogy a 30. ábrán látható, 3%-os összeférhetőségi szintnél már nem jelentkezett ilyen probléma. Összességében a pozitív sorrendű feszültség 3%-a és a negatív sorrendű feszültség 95%-a között csökkentek a különbségek, tehát villamos autókkal valamelyest nagyobb az aszimmetria a hálózaton – ahogy ez egyébként a föld-nullavezető feszültségkülönbségéből is adódott.



30. ábra: Aszimmetria 0%-os és 20%-os villamos autóz számmal 3%-os összeférhetőségi szinttel

4.8 Feszültségesés változása

A nagyobb számú körzeten elvégzett szimuláció egyik célja volt, hogy statisztikai módszerekkel elemezhessem az eredményeket. Az 54 mért végpont többsége különböző transzformátorkörzetben van, ezért jó közelítéssel használható a vizsgálatok során a normális eloszlás.

Az átlag kiszámolása mellett, mely jelen esetben nem más, mint a várható érték, kiszámoltam a szórást is (tapasztalati szórás). Mind a kettő változik napközben, ezért ezeket a paramétereket minden 15. percben ki kellett számolni az (1) és (2) segítségével.

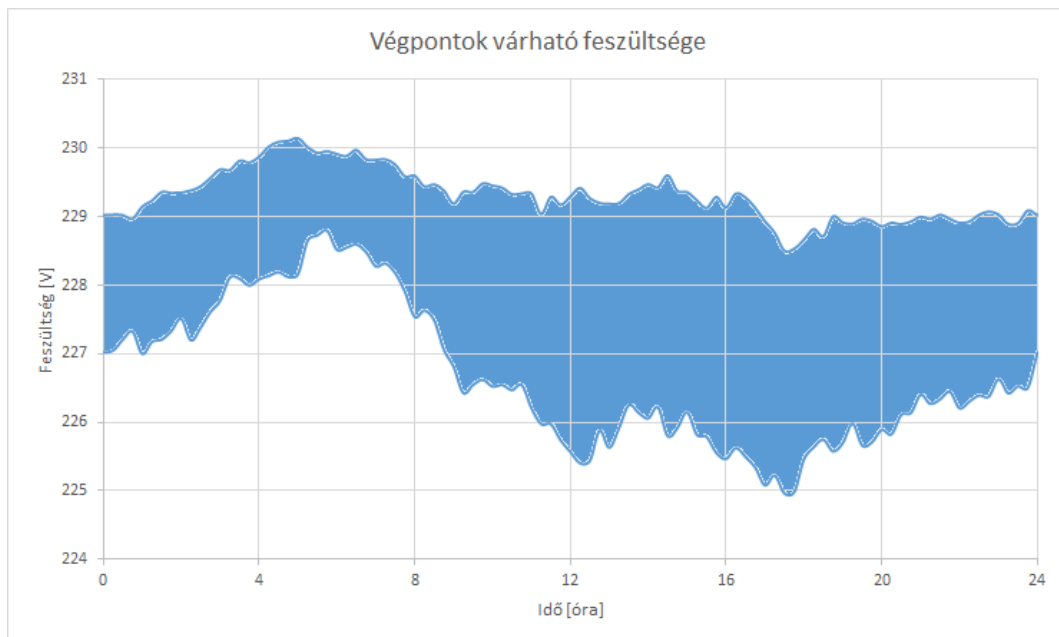
$$\mu = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

A számítások eredményei alapján a legkisebb és legnagyobb szórás 1,65 V és 5,72 V. Ha feltételezem, hogy a feszültségek összességében normális eloszlást követnek, akkor (3) alapján meg lehet határozni egy konfidencia intervallumot a végpontok feszültségére. A 99%-os konfidencia intervallumot a 8. ábra mutatja.

$$\mu - z * \frac{S}{\sqrt{N}} < P < \mu + z * \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

A nagyobb szórás miatt az intervallum sokkal szélesebb éjszaka, amikor töltenek a hálózatról. Összehasonlítva a 28. ábrával, az elméleti valószínűsége, hogy a lehető legkisebb feszültség előfordul, meglehetősen kicsi, azt lehet mondani, hogy a végpontok feszültsége 99%-os valószínűséggel 224 V és 231 V között vannak.

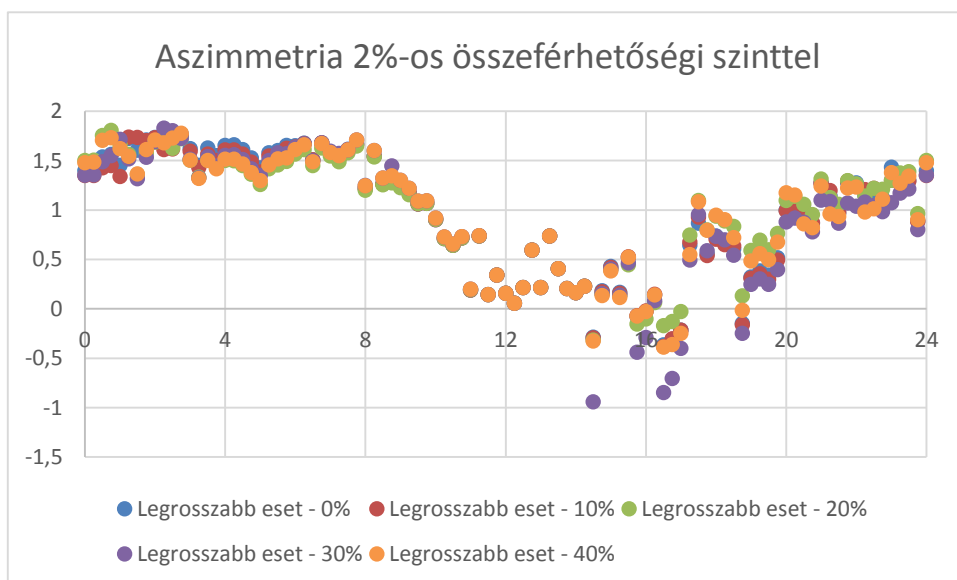
A 31. ábrán látható a kapott konfidencia-intervallumok ábrázolása egész napra, mely a hálózatmodellezéshez használt minták alapján megmutatja, hogy 99%-os valószínűséggel egy-egy végpont feszültsége milyen sávba esik be.



31. ábra: Végpontok feszültsége 99%-os konfidencia intervallummal

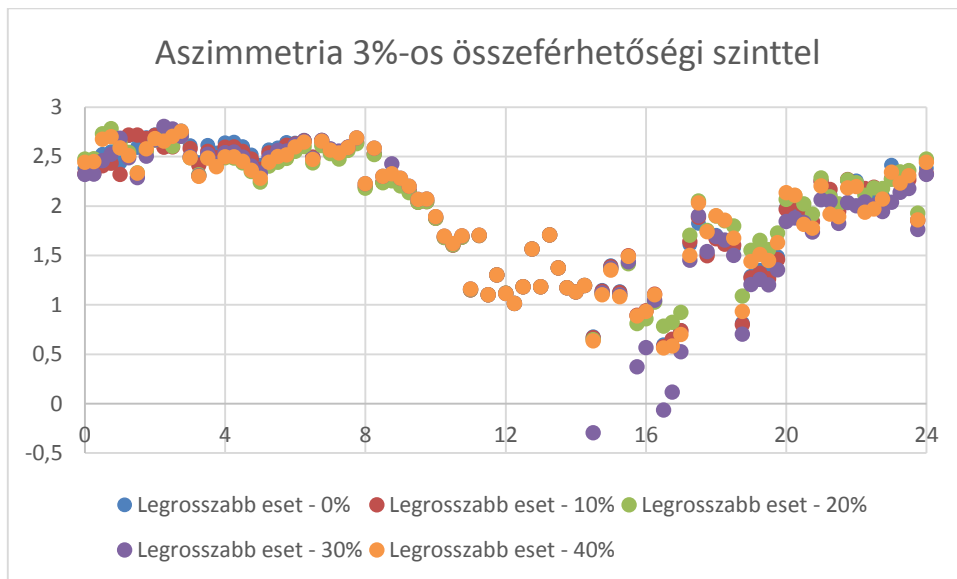
4.9 Aszimmetria függése a villamos autók számától

A továbbiakban a hálózat néhány sajátosságát vizsgálom meg. Egyik ilyen kérdés, hogy hogyan függ az aszimmetria mértéke az éppen töltődő elektromos autóktól. Először az 1812-es transzformátorkörzetet vettem ismét alapul, hogy lokális összefüggéseket keressek. Összesen 5 esetet, 0%-os, 10%-os, 20%-os, 30%-os és 40%-os villamos autó arányt vizsgáltam meg. 2%-os összeférhetőségi szint megengedésénél a 32. ábrán látható diagramot kaptam.



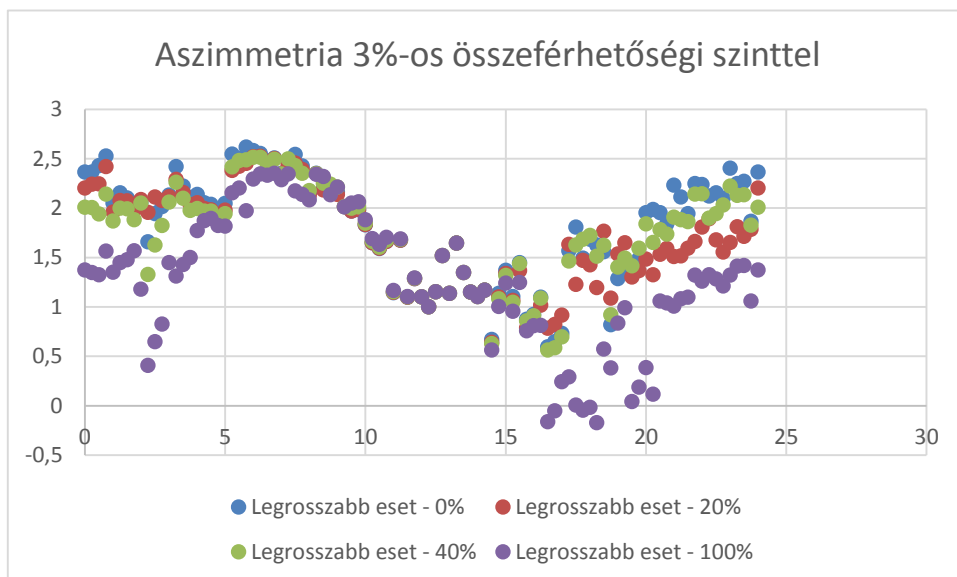
32. ábra: Aszimmetria az 1812-es transzformátorkörzetben 2%-os összeférhetőségi szinttel

Alapvetően nem állítható, hogy az autók számának növekedésével nő az aszimmetria a hálózaton, ez sokkal inkább függ az esetleges fáziskiosztástól. A tendencia a 33. ábrán is megfigyelhető.



33. ábra: Aszimmetria az 1812-es transzformátorkörzetben 3%-os összeférhetőségi szinttel

Az egy körzetre vonatkozó szimulációk után megnéztem a statisztikai sokaságra vonatkozó aszimmetriákat a hét transzformátorkörzet 54 végpontjára. A 34. ábrán látható, hogy az aszimmetria mértéke valóban függ a villamos autók számától, azonban még a legextrémebb, 100%-os esetben is csak pár százalék az eltérés a 0%-os, kiinduló állapothoz képest.



34. ábra: Aszimmetria a transzformátorkörzetek összességében 3%-os összeférhetőségi szinttel

5 Összegzés

Láttuk a szimulációk során, hogyha minden ötödik budapesti háztartásban villamos autóval rendelkeznének, akkor se jelentene túlterhelődést vagy túl nagy feszültségesést azoknak a jelenléte. A villamos autók számának növelésével azonban elérhető egy határ, amelyen túl már nem képes újabb töltési igényeket ellátni a rendszer. Fontos megjegyezni, hogy erre a legoptimistább becslések szerint is csak néhány évtized múlva kerülhet sor.

Az aszimmetria értéke szintén elfogadható, továbbá nincsen erős korrelációban a villamos autók számával. A dolgozatom eredményeképp kijelenthető, hogy a transzformátorkörzetek jelentős részében nem fog problémát okozni a villamos autók töltésének az elterjedése.

További szimulációk végzése abban az esetben lenne megfontolandó, ha pontosabb hálózati topológia állna a rendelkezésre. Látható egyrészt, hogy nagyon érzékeny a modell az aktuális fogyasztókra, másrészt látszik az is, hogy melyik fázison vannak.

6 Irodalomjegyzék

- [1] PricewaterhouseCoopers (PwC), „Merre tart az elektromos autók piaca?”. Elérhető: https://www.pwc.com/hu/hu/kiadvanyok/assets/pdf/merre_tart_az_elektromos_autok_piaca.pdf
- [2] Központi Statisztikai Hivatal, „Villamosenergia-ellátás”. Elérhető: https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_zrk004.html
- [3] M. S. Whittingham, “History, Evolution, and Future Status of Energy Storage”, Proceedings of the IEEE Volume: 100, Issue: Special Centennial Issue, 2012 , Page(s): 1518 – 1534.
- [4] Idaho National Laboratory – The History of Electric Cars. Elérhető: <http://avt.inel.gov/pdf/fsev/history.pdf>
- [5] Jászai Tamás, "Az elektromos autózás lehetőségei és korlátai Magyarországon" – Előadás
- [6] ELMŰ – Az elektromos meghajtású járművek töltése
- [7] Központi Statisztikai Hivatal – A lakossági közösségi és egyéni közlekedési jellemzői, 2012, (Megjelent: Statisztikai tükör – VII. évfolyam, 47. szám)
- [8] Vetier András – Valószínűségi számítás, Műegyetemi kiadó, 2008
- [9] 92/2004. (VII. 9.) GKM rendelet a statisztikai elemzéssel készült fogyasztói villamosenergia-igénygörbe alapján mért fogyasztók köréről
- [10] „Universal load flow script” a DigSILENT PowerFactory szoftverhez. Elérhető: <http://www.digsilent.de/>
- [11] Közüzemi Villamos Energia Szolgáltatói Üzletszabályzat M.12.1. számú melléklete, A villamosenergia-szolgáltatás műszaki minőségi jellemzői
- [12] MSZ EN 50160 – A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői
- [13] E.ON/DÉMÁSZ – A villamosenergia-szolgáltatás műszaki minőségi jellemzői
- [14] Simplified Electric Vehicle Powertrain Model for Range and Energy Consumption based on EPA Coast-down Parameters and Test Validation by Argonne National Lab Data on the Nissan Leaf, John G. Hayes, Kevin Davis

7 Ábra- és táblázatjegyzék

1. ábra:	Villamosautó felépítésének blokkvázlata	7
2. ábra:	Akkumulátor-típusok és energiasűrűségük.....	8
3. ábra:	A Nissan Leaf töltésének egy mérése	9
4. ábra:	Magyarország személygépjármű állománya az elmúlt években.....	10
5. ábra:	Személygépjárművek száma Budapesten az elmúlt években	11
6. ábra:	Átlagosan megtett utazási távolság személygépjárművel 2012-ben	12
7. ábra:	Átlagos utazási időtartam személygépjárművel 2012-ben	12
8. ábra:	Utazások megoszlása indulóidőpontjuk szerint 2012-ben.....	13
9. ábra:	Személygépjárművek beérkezésének becslése 2012-ben	13
10. ábra:	Személygépjárművek éjszakai megérkezése	14
1. táblázat:	A délután beérkező autók száma	15
12. ábra:	Üzleti fogyasztói profil 1000 kWh éves fogyasztásra normálva	17
2. táblázat:	Megadott hálózati paraméterek az 1812-es transzformátorkörzetre	20
13. ábra:	Hálózati topológia.....	20
14. ábra:	Vezetéktípusok	21
15. ábra:	A szoftverbe implementált modell.....	22
16. ábra:	A hálózatok megépítéséhez használt elemek	23
3. táblázat:	Átlagos napi transzformátorterhelés elektromos autók nélkül	25
17. ábra:	1812-es transzformátorkörzet transzformátorának napi terhelése	25
18. ábra:	1512-es körzet transzformátorának napi terhelési görbéje.....	26
19. ábra:	Tíz föld-nullavezető feszültségkülönbség kiválasztva a legrosszabb eseteket.....	27
20. ábra:	A föld-nullavezető feszültségkülönbségek átlaga és teoretikus legrosszabb esete.....	28
21. ábra:	Átlagosan a végpontokon maradó feszültség a szimulált hálózaton	28
22. ábra:	Aszimmetria villamos autó nélkül 2%-os összeférhetőségi szinttel	29
23. ábra:	Aszimmetria villamos autó nélkül 3%-os összeférhetőségi szinttel	30
24. ábra:	Egy transzformátor napi terhelése az elektromos autók számának függvényében	31
25. ábra:	Napi terhelése a nyolc transzformátornak 20%-os villamos autó arány mellett, a különböző görbék a különböző transzformátorok terhelődését mutatják.....	32
26. ábra:	ábra: Feszültségkülönbség a föld és a nullavezető között	32
27. ábra:	ábra: Végpontok feszültségei	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
28. ábra:	ábra: Végpontok feszültsége 99%-os konfidencia intervallummal	37

Függelék

F1 Jelölések és rövidítések

μ – Várható érték

s – Tapasztalati szórás

z – Normális eloszlás paramétere

N – Mérések száma

P – Valószínűség

$\cos \varphi$ – Teljesítménytényező

v.e. – Viszonylagos egység