



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Farkas Csaba

MSc II. évfolyam (4. félév)

**VILLAMOS AUTÓK TÖLTÉSÉNEK
VÁRHATÓ HATÁSA A
KISFESZÜLTSGŰ
ELOSZTÓHÁLÓZATON,
KÜLÖNÖSKÉPPEN LESZABÁLYOZÁSI
TARTALÉK BIZTOSÍTÁSÁBAN VALÓ
RÉSZVÉTELKOR**

KONZULENS

Prikler László

tanársegéd

BME VET

Orlay Imre

műszaki szakértő

ÉMÁSZ Hálózati Kft.

BUDAPEST, 2011

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	2
Bevezetés	3
1. Villamos autók tulajdonságai	5
1.1. Általános jellemzés	5
1.2. Az akkumulátorok töltése	8
1.2.1. Akkumulátorok töltöttségi állapotának meghatározása:.....	11
1.3. Az akkumulátorok töltésének hálózati hatásai.....	13
1.3.1. Töltési módok	13
1.3.1.1. Szabályozatlan töltés.....	14
1.3.1.2. Időben késleltetett töltés	14
1.3.1.3. Intelligens töltés	14
1.3.2. Hatás a transzformátorokra	16
1.3.3. Hatás az elosztóhálózati vezetékekre és kábelekre.....	16
2. Leszabályozási igény a magyar villamosenergia-hálózaton.....	17
3. Villamos autók töltésének hatása a kiefeszültségű elosztóhálózatra	29
3.1. A hálózat paramétereinek megadása.....	29
3.2. Fogyasztói paraméterek megadása	33
3.2.1. Koncentrált fogyasztók	33
3.2.2. Háztartási fogyasztók.....	34
3.2.3. Villamos autók.....	39
3.3. Szimuláció és a kapott eredmények.....	50
3.4. A kapott eredmények értékelése	64
3.5. További feladatok a villamos autók kiefeszültségű elosztóhálózatra gyakorolt hatásának vizsgálatában	65
Irodalomjegyzék.....	67

Bevezetés

A közlekedést ma a belsőégésű motorok dominanciája jellemzi. Ez a hegemonia azonban megtörni látszik, mert az egyre fogyó olajkészletek következtében mindinkább felmerül az igény másfajta hajtások és üzemanyagok alkalmazására. Ilyen régi-új „üzemanyag” lehet a villamos energia. A nagy múltra visszatekintő, de aztán évtizedekig mellőzött technológia ma újra előtérbe került, s a villamos autózás – vagy másik nevén e-mobility – komoly esélyesnek látszik arra, hogy a jövő közlekedésének meghatározó módjává váljék.

A villamos autók várható elterjedése miatt természetesen a megfelelő kiszolgáló infrastruktúráról is gondoskodni kell. Ez a töltő-infrastruktúra pedig alapvetően a már meglévő kiefeszültségű elosztóhálózat, amely áramszolgáltatói tulajdonban van. A hálózatra csatlakozó fogyasztók ma jól ismert terhelést jelentenek, ezt a terhelést azonban módosíthatja a villamos autók töltése miatt fellépő többlet igény, az áramszolgáltatóknak ezért fontos információt jelent annak ismerete, hogy az újfajta terhelés milyen mértékben terheli a hálózatot. Túlterheli-e a megnövekedett fogyasztás az elosztóhálózati transzformátorokat, okoz-e a megengedettnél nagyobb mértékű feszültségesést a fogyasztóknál? Mindezek vizsgálata szimulációval történhet, mely szimulációs technika és a kapott eredmények bemutatása ezen TDK dolgozat célja.

Ugyanakkor a villamos autók a hálózat üzemeltetői és a fogyasztók felé sok lehetőséget is tartogatnak. Ha nagy számú villamos autó áll rendelkezésre a hálózaton, akkor az összesített akkumulátor-kapacitásuk tárolási és így szabályozási célokra felhasználható. Egy reálisan megvalósítható koncepció lehet a villamos autók töltési igényének az éjszakai völgyidőszak feltöltésével való összeegyeztetése, s ezáltal a rendszerirányító felé leszabályozási tartalék biztosítása.

A TDK dolgozatban a villamos autók általános bemutatása után egy konkrét budapesti lakóközvet modellezése történik meg a DIgSILENT Power Factory szimulációs program segítségével. A modell 30-féle háztartási fogyasztói profilt tartalmaz, valamint időben eltolt villamos autó töltési karakterisztikákat. Később ezt a vizsgálatot kiegészítjük és megismételjük átlagos háztartási fogyasztói profil feltételezésével is. A vizsgálatok tartalmazzák emellett alapesetként a villamos autók

jelenléte nélküli terhelés szimulációját, valamint az időbeli késleltetés nélküli, úgynevezett „dumb” töltést is, a hálózatra csatlakozás időbeli eloszlásának figyelembe vételével. A leszabályozási teljesítmény-igények valós forrásból, a MAVIR által publikált adatokból származnak, s kiterjedt statisztikai elemzés után választottuk ki, hogy mely időszak a legalkalmasabb az időben eltoltság modellezésére.

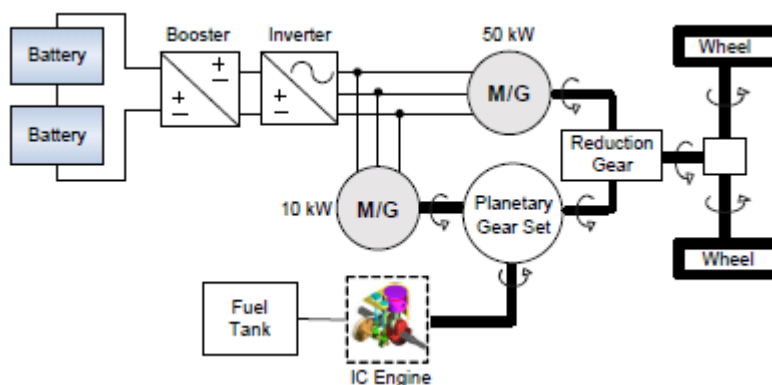
1. Villamos autók tulajdonságai

1.1. Általános jellemzés

A villamos és hibrid autók fő jellemzője, hogy szabad pályán, munkavezeték nélkül üzemelnek, a működésükhöz szükséges villamos energiaforrást, tápegységet magukkal viszik. [1] A villamos autók (EV) kategóriába ma már többféle típus is beletartozik:

- **Hibrid villamos autók (HEV)**

Ezek az autók szénhidrogén tüzelésű motorral rendelkeznek és az üzemanyag jobb kihasználása érdekében akkumulátorokkal is ellátják őket. Az akkumulátorokat nem a hálózatról töltik, hanem a belsőégésű motor segítségével. Az ilyen típusú autókkal a továbbiakban nem foglalkozunk, mert a villamos hálózatra semmilyen hatásuk nincs.



1. ábra: Toyota Prius hibrid villamos autó felépítése [2]

- **Tisztán villamos autók (EV)**

A villamos autókat villanymotor hajtja, melyet akkumulátorok táplálnak. Az akkumulátorokat a hálózatra csatlakoztatva lehet feltölteni.

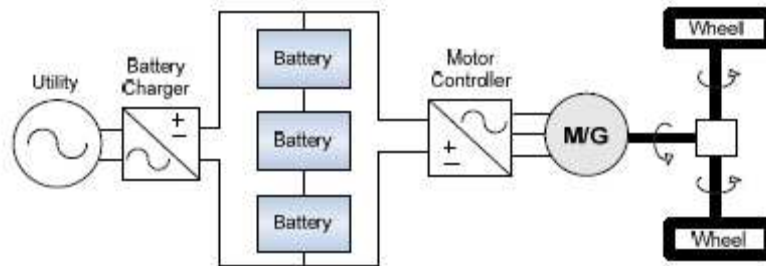
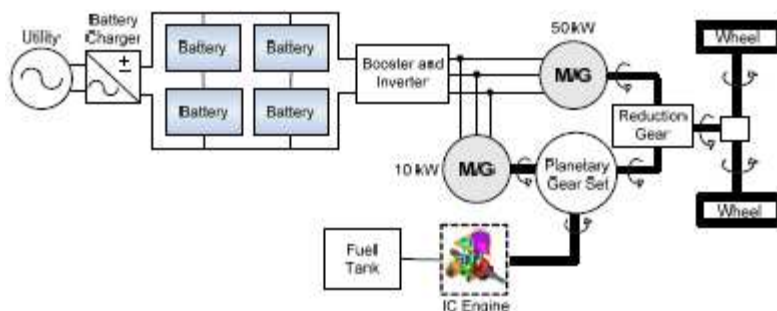


Fig. 1. Typical EV configuration

2. ábra: Tisztán villamos autó főbb alkotóelemei [2]

- **Hálózatra csatlakoztatható hibrid villamos autók (PHEV)**

A PHEV-eket a hálózatról kell tölteni, ugyanakkor belsőégésű motorral is rendelkeznek. Az ilyen kombináció megnöveli az autó hatótávolságát, jelentősen csökkenti a felhasznált üzemanyag mennyiségét és a kibocsátott károsanyag-tartalmat. Két típusa van: az ún. párhuzamos hibrid autók, melyekben a villanymotor és a belsőégésű motor is tengelykapcsolatban van a kerekekkel, illetve a soros hibrid autók, melyeknél csak a villanymotor van tengelykapcsolatban a kerekekkel és a belsőégésű motort csak az akkumulátorok töltésére használják fel. [3] A PHEV-rendszerű autók nagyon ígéretes koncepciónak tűnnek, mert rövid távú utazásra teljesen elektromos üzemmódban használhatók, a hálózatról tölthetők, viszont a belsőégésű motor üzemeltetéséhez könnyen és gyorsan lehet őket üzemanyaggal feltölteni. [4]



3. ábra: Hibrid Toyota Prius PHEV üzemmódra átalakítva [2]

A továbbiakban az egyes autótípusok rövidítésére az angol betűszavakat használjuk.

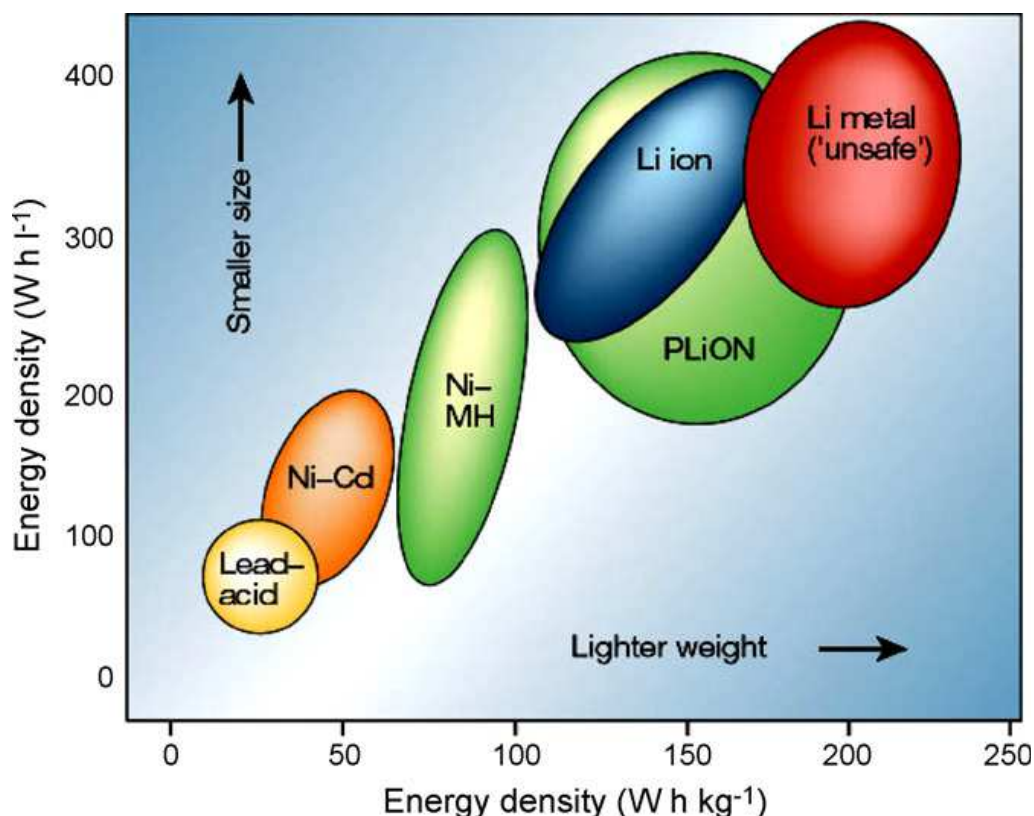
A városi közlekedésben a hirtelen gyorsítások/fékezések sok energia disszipálódását jelentik. Emiatt a belsőégésű motorok jelentősen túl vannak méretezve, s így rossz a hatásfokuk. [5] A villamos autók energiaátalakítási hatásfoka jobb, viszont óriási hátránya a jelenleg forgalomban lévő (és várhatóan még több generáción át a forgalomba kerülő) autóknak, hogy az akkumulátoruk tárolókapacitása miatt hatótávolságuk igen korlátozott. Ezért a villamos autók energiatakarékos üzemére, a veszteségek leszorítására minden szempontból figyelmet fordítanak:

- A jármű vontatási ellenállásának csökkentésével
- A beépített vontatási és segédüzemi teljesítmény minimalizálásával
- Egyszerű, jó hatásfokú hajtóművel
- A hajtás menetüzemi, indítási és fékezési hatásfokának javításával
- Energia visszatápláló fékezéssel
- Megfelelő villamos energiaforrás kiválasztásával

A villamos autók mechanikai felépítése, hajtóműve a belsőégésű motoros járművekhez képest egyszerűbb. Tengelykapcsolóra nincs szükség, ha a kerék áll, a motor is áll, alapjáráshoz hasonló üzem nincs. Sebességváltót általában nem használnak. Az egymotoros hajtású villamos autóban megmarad a hagyományos differenciálmű, de kerékagyba épített motorok esetén a kiegyenlítőmű szerepét villamos szabályozás veszi át. A hibrid autók mechanikai felépítése sokkal bonyolultabb. [1]

A PHEV motorjaként többféle motor is számításba jöhet, a legkedvezőbb tulajdonságokkal viszont az állandómágneses szinkronmotorok rendelkeznek, amiknek jó a hatásfokuk és egyszerűbb őket hűteni, mert a forgórészben nincs rézvesztés. Ma emellett a kapcsolt reluktanciamotorok is megfelelőek a PHEV-ek számára. [1]

1.2. Az akkumulátorok töltése



4. ábra: Akkumulátortípusok és „jóságuk” [6]

Az akkumulátoros villamos autók üzemeltetéséhez szükséges energiát a főüzemi akkumulátor tárolja. Rendszeres töltéséről gondoskodni kell. Az akkumulátorok töltése lehet lassú, pl. 8 órás éjjeli vagy munkahelyi töltés háztartási hálózatról, vagy lehet gyorsított a benzinkutakhoz hasonló állomásokon. A töltési módokról a későbbiekben részletesen szó lesz. A villamos autók alkalmazásának feltétele az akkumulátortöltő hálózat kiépítése. Az árszintbeli különbséget leszámítva a villamos autók a belsőégésű motoros autókkal csak akkor lehetnek versenyképesek, ha az alkalmazásukhoz szükséges infrastruktúra is kiépül.

Az akkumulátorok lassú töltése a hagyományos, régről ismert eljárás. Az egyszerűbb akkumulátortöltők alárendelt áramszabályozással, vagy áramkorlátozással ellátott feszültség szabályozók és a töltési folyamat állandó ellenőrzésével ellátják az akkumulátor védelmét is. Az intelligens, mikroprocesszoros akkumulátortöltők a környezeti feltételek és az akkumulátor állapotát meghatározó jellemzők mérése alapján, a memóriába beégetett jelleggörbék segítségével előállítják az akkumulátor pillanatnyilag legmegfelelőbb töltőáramát. A sorba kapcsolt akkumulátorok feszültsége

egymáshoz képest általában nem egyforma. Ez a különbség lassú töltésnél nem okoz akkora problémát, mint gyors töltésnél, a töltés végére a cellafeszültségek megközelítőleg kiegyenlítődnek. [1]

Lassú töltéshez a háztartási 230V-os vagy 400V-os feszültségű országos villamosenergia-hálózat áll rendelkezésre 16-30A-es terhelhetőséggel. Ez a hálózat nagyságrendileg megfelel a villamos autók akkumulátortöltési igényeinek. A személygépkocsiban elhelyezhető méretű és súlyú akkumulátor energiatároló képessége kb. 30kWh. Az ekkora mennyiségű energia betöltéséhez szükséges teljesítmény 8 órás egyenletes áramú töltést feltételezve $30/8=3,75\text{kW}$ -ra adódik ki. Ha kb. 85%-os töltési hatásfokot veszünk figyelembe, akkor a töltéshez közel 4kW szükséges. Ha a töltés nem egyenletes, akkor a töltés elején ennél több, a töltés vége felé pedig kevesebb teljesítmény szükséges. Ennek ellenére ez a teljesítményigény a háztartási hálózatokkal teljesíthető. A lassú töltésre szolgáló akkumulátortöltők konstrukciója általában kétféle lehet [1]:

- Külső töltőberendezés, közvetlenül az akkumulátorra csatlakozó nagyáramú hozzávezetéssel. A csatlakozón a töltéskor egyenáram folyik. Ilyenkor jobb lehetőségek adódnak a gyors töltésre. [7]
- Járműbe épített töltőberendezés olyan csatlakozóval, amivel a töltőberendezés hálózati feszültségre kapcsolható. A csatlakozón ilyen megoldásnál hálózati frekvenciájú váltakozó áram folyik. Ilyenkor méretbeli, teljesítménybeli és árbeli megfontolásokat is kell tenni.

Autókban az akkumulátoros táplálás egyik sarka (általában a negatív) testelt, azaz a karosszériával azonos potenciálú. Csak olyan akkumulátortöltő használható, amelyik potenciálfüggetlen a hálózattól. Újabban vannak olyan járművek is, ahol a főüzemi akkumulátor a járműhajtás minden elemével együtt szigetelt, földfüggetlen és a szigetelés jószágát állandóan ellenőrzik.

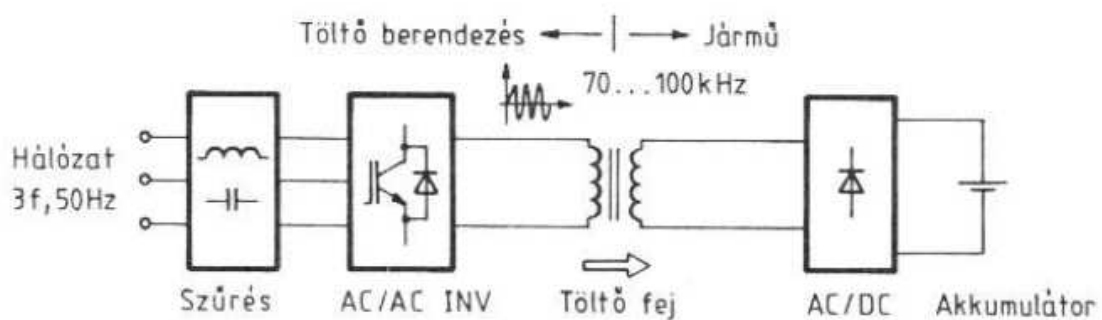
Akkumulátorok gyors töltési lehetőségére városi forgalomban közlekedő villamos autónál feltétlenül szükség van. De ehhez olyan akkumulátorok is kellenek, amelyek a gyors töltést elviselik. Az előbbi példát rövididejű töltésre átszámolva a következő eredmény adódik: Ha gyors töltésként elfogadjuk a negyedórás töltést, akkor az előbbi 85%-os hatásfokú töltéshez $30/0.85/0.25=141\text{kW}$ teljesítmény szükséges. Ez a teljesítmény rövid ideig szükséges, viszont azt is figyelembe kell venni, hogy egyszerre

több autót is kell esetleg tölteni az állomáson. Ekkora teljesítmény a háztartásban általában nem hozzáférhető. A gyorsöltési teljesítmény csökkentésének lehetőségei:

- A töltési idő növelése elfogadható mértékűre, pl. 1 órás töltésre.
- Részleges gyorsöltés az akkumulátor 100%-os, teljes feltöltése helyett csak a tárolókapacitás 30-40%-ára.

Két-három részleges gyorsöltés után mindig be kell iktatni kiegyenlítő szerepű lassú töltést. A nagyáramú gyorsöltés nagy igénybevételt jelent az akkumulátorra nézve és a sorba kapcsolt akkumulátor-cellák azonos állapotba hozása nehezebben teljesül, mint lassú töltésnél.

Az akkumulátor gyorsöltők több kW teljesítményű, élet- és vagyonvédelmi szempontból körültekintően tervezett villamos berendezések. A gyorsöltőktől megkívánják, hogy a benzintöltéshez hasonlóan lehessen kezelni. Újszerű megoldás a töltőberendezéshez villamos kábellel csatlakozó, mozgatható töltőfej, amit a járműbe épített ellendarabba kell bedugni. Az ilyen gyorsöltő berendezések nagyfrekvenciás, induktív csatolású teljesítmény-átvitellel készülnek. A gyorsöltéshez tartozó berendezések:



5. ábra: A gyorsöltőhöz tartozó berendezések [1]

A gyorsöltő berendezés hálózati szűrőből, AC/AC szabályozott inverterből és töltőfejből áll. Az inverter egyfázisú, szabályozott nagyságú, 70-100kHz frekvenciájú váltakozófeszültséget állít elő és töltőáram-szabályozást valósít meg. A járműbe épített ferritmagos szerkezet és a töltőfej nagyfrekvenciás csatolású transzformátort képez és a töltéshez szükséges feszültséget potenciálleválasztással a járműbe átindukálja. Az átindukált feszültségről a járműbe épített egyenirányítón keresztül töltik az

akkumulátort. A töltőfej és a jó hatásfokú nagyfrekvenciás induktív csatolás megvalósítására több megoldás is van.

Akkumulátorok feszültségkiegyenlítése (equalizálása) mind a gyorsöltés alatt, mind a gyorsöltést követő állapotra nézve nagymértékben javíthatja a töltés hatásfokát és az akkumulátorok élettartamát. Az üzemszerűen sorosan kapcsolt akkumulátorok töltését is sorbakapcsolt állapotban végzik, egy töltőberendezésről kapocsfeszültség- és töltőáram-szabályozással. Az akkumulátorokon, különösen gyorsöltésnél, nem egyenletesen oszlik meg a feszültség. Lesznek olyan akkumulátorelemek, amelyeknek a kapocsfeszültsége az átlagértéknél kisebb vagy nagyobb. Ezek a különbségek az egész rendszer kihasználhatóságát rontják. Különösen gyorsöltésnél jelentenek nagy problémát, mert egyes akkumulátor-egységek veszélyesen túltöltődhetnek, míg néhány elem alultöltött marad. Az alultöltött akkumulátorok miatt csökken az egész rendszer kapacitása, a túltöltés miatt az élettartama. Az akkumulátorok feszültségkiegyenlítéses töltésére külön szabályozó-berendezések készülnek. [1]

1.2.1. Akkumulátorok töltöttségi állapotának meghatározása:

Villamos autóknál az akkumulátorok töltöttségi állapotának meghatározása épp olyan fontos, mint a benzinüzemű autónál a benzinszintmérő. Állandó információval kell rendelkezni arról, hogy mekkora az akkumulátorban pillanatnyilag tárolt „maradék” energia, mekkora távolságot lehet még megtenni a járművel töltés nélkül. A töltöttségi állapot meghatározására több módszer van:

- A töltés-felhasználás folyamatos mérése és összevetése az akkumulátor-jelleggörbékkel, meghatározott, illetve becsült kapacitással.
- Az energiatartalom folyamatos mérése és összevetése az akkumulátor-jelleggörbékkel meghatározott, becsült energiatartalékkal.
- Feszültségmérésre visszavezetett kapacitás-meghatározás.
- Impedanciámérésre visszavezetett kapacitás-meghatározás, szuperponált váltakozófeszültségű zavarójelre adott válaszfüggvények értékelése alapján.

Mindegyik módszernél szükséges a fő jellemzőkön kívül az akkumulátor hőmérsékletének és öregedettségi állapotának ismerete is. [3]

Az akkumulátorok töltöttségével szorosan összefügg a PHEV szabályozása. A PHEV-ek esetében ráadásul minél hosszabb a megtett út, annál jobban csökken a

hatásfok. A teljesen villamosan megtehető útra viszont nyilvánvalóan ugyanolyan hatásfoka van, mint a teljesen elektromos járműveknek.

A PHEV-eket kétféleképpen lehet szabályozni: elektromos járműként és vegyes szabályozással. Elektromos autóként szabályozva a jármű az akkumulátoráról megy addig, amíg az akkumulátor töltöttsége egy adott szint fölött van. Ha ez alá az alsó határ alá csökken a töltöttség, akkor tovább ezt nem engedi csökkenni. A töltöttségi mutatónak (SOC=state of charge) emellett van egy értéke, ami fölött könnyebben adnak le energiát az akkumulátorok, egy toleranciasávban ezen érték körül az egész akkumulátor teljesítőképessége jobb. Ennek oka ma még ismeretlen. [8]

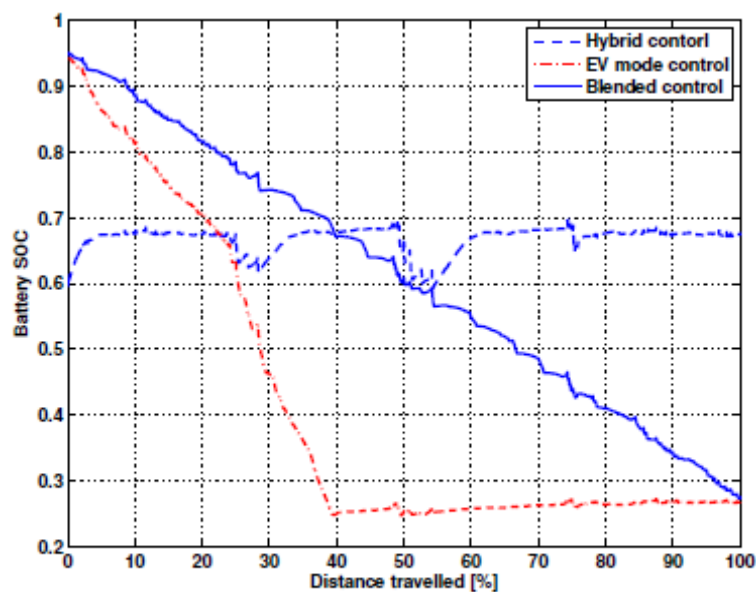


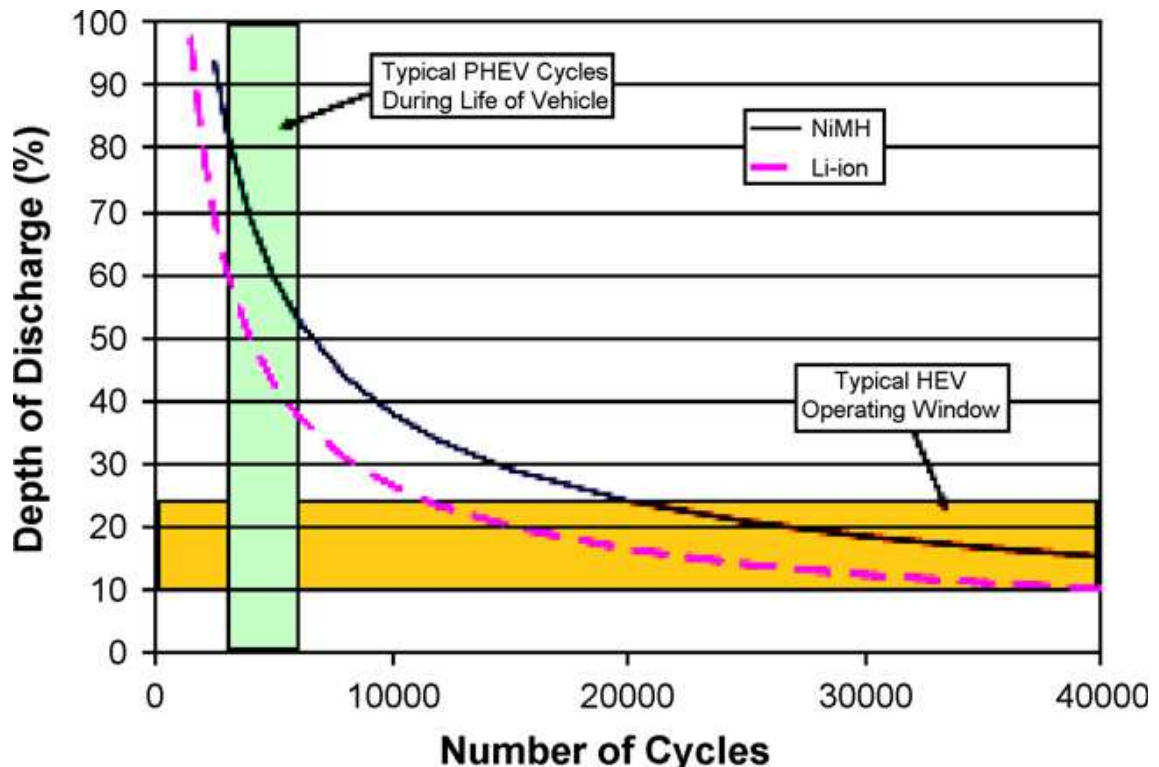
Fig. 2. Comparison of battery SOC profile for different control strategy.

6. ábra: Az akkumulátor töltöttsége különböző szabályozások esetén [8]

Vegyes szabályozással a villanymotort folyamatosan használja a jármű. A villanymotor és a belsőégésű motor közötti teljesítmény-megosztás úgy van optimalva, hogy a töltöttségi szint végig az előírt érték fölött maradjon és csak az út végére érje el ezt a minimális szintet.

A vegyes szabályozás a priori ismereteket tételez fel az utazás körülményeiről, így meglehetősen kifinomult szabályozási algoritmusok szükségesek hozzá (szabályalapú algoritmusok, dinamikus programozás, GPS információk és a korábbi utakról eltárolt információk). [9]

A PHEV-ek akkumulátorai az autó 10-15 éves élettartama során kb. 4000 teljes kisütést kell, hogy elszenvedjenek. A következő ábra a várható élettartam szerint hasonlítja össze a kétfajta, ma jellemzően használt akkumulátortípust:



7. ábra: Akkumulátortípusok összehasonlítása a kisütés mértéke alapján [6]

Minél jobban kisütjük az akkumulátort, annál jobban csökken az élettartama. Az ábrán az látszik, hogy a NiMH akkumulátorokat 70%-ig ki lehet sütni a 4000 ciklus mellett, míg a lítiumos akkumulátort csak 50%-ig. [6], [10]

A PHEV akkumulátorával szemben támasztott követelmények mind teljesítményben, mind a töltési ciklusok elviselésében nagyobbak, mint a tisztán elektromos autó esetében. [6]

1.3. Az akkumulátorok töltésének hálózati hatásai

1.3.1. Töltési módok

A töltésnek többféle helyszíne lehet: (otthon, munkahely, harmadik fél). Jelen dolgozatban, a kisfeszültségű elosztóhálózatra gyakorolt hatások vizsgálatánál csak az otthoni töltés problematikájával foglalkozunk, ezzel behatárolva a lehetőségeket és egyszerűsítve a vizsgálatokat.

A következőkben röviden áttekintjük, hogy az akkumulátorok töltésére milyen módok vannak.

1.3.1.1. Szabályozatlan töltés

A szabályozatlan töltés esetén előálló helyzet viszonylag könnyen értelmezhető: az autótulajdonosok hazaérnek és autójukat a hálózatra csatlakoztatják az akkumulátorokat feltölteni. A töltés a hálózatra csatlakoztatás után azonnal megindul és akkor fejeződik be, ha az akkumulátor teljesen feltöltődött, vagy ha a töltés egyéb külső ok miatt megszakad (ez lehet áramszünet, de a fogyasztó is megszakíthatja a töltést önkényesen).

Egyszerű próbálgatással meg lehet határozni például egy mintahálózat esetén, hogy az mennyi villamos autó egyidejű töltését bírja el: addig növeljük a terhelést jelentő autók számát, amíg valamelyik hálózati elem túl nem terhelődik, vagy valamelyik feszültségminőségi jellemző a szabványosnál rosszabbá nem válik. [11], [12] Konkrét szimulációs eredményeket láthatunk a 3. fejezetben.

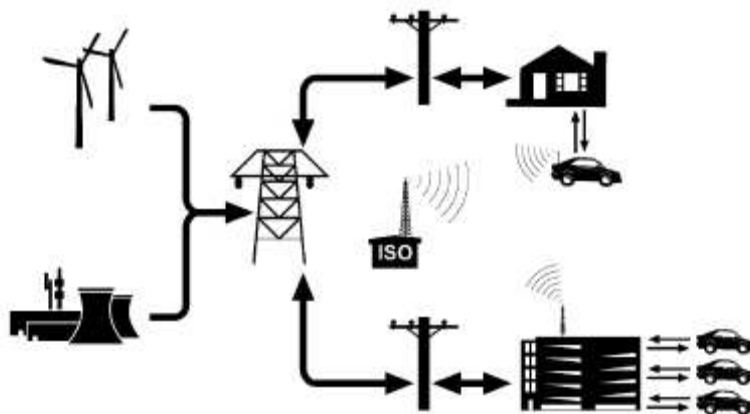
A szabályozatlan töltés esetén is megvalósítható egy többtarifás modell: ebben az autótulajdonosok akkor töltik járműveiket, amikor csak akarják, viszont a nap folyamán a tarifák változnak. [12] Ilyen modellt a továbbiakban nem vizsgálunk.

1.3.1.2. Időben késleltetett töltés

Ma még az intelligens mérők (smart metering) nem terjedtek el, így infrastruktúrát sem lehet rájuk építeni. Ezért átmeneti megoldásként foglalkozni kell az időben eltolt késleltetéssel, ami már egy – igaz meglehetősen egyszerű és ezért nem sok lehetőséget tartogató –, de valamilyen szinten szabályozott töltési módot jelent. Látni fogjuk, hogy a szimulációs vizsgálat során fontos szerepet kap az időbeli eltolás, ugyanis a leszabályozási tartalék biztosításakor a töltési idő kezdetét a leszabályozási időszak idejére kell tolni.

1.3.1.3. Intelligens töltés

Mielőtt az intelligens töltés jellemzőit ismertetnénk, meg kell jegyeznünk, hogy ilyen rendszer jelenleg nincs működtetve, tehát az itt következő leírás pusztán a kísérleti és kutatási eredmények összefoglalása. Éppen ezen ok miatt nem vizsgáljuk a szimuláció során sem az intelligens töltést és annak hatását.



8. ábra: Az intelligens töltés elvi sémája [13]

A smart metering bevezetésével lehetővé válik az optimális töltés, s így minimálni lehet a veszteségeket. Ha ilyen optimálást vezetünk be, akkor a PHEV-tulajdonosoknak nem lesz arra lehetősége, hogy a töltési profilt befolyásolják, esetleg csak azt mondhatják meg, hogy mikorra legyen teljesen feltöltve az akkumulátor. A töltőteltjesítmény ilyenkor már nem állandó, hanem 0 és a maximum között változik. A teljesítmény-veszteségek viszont ezáltal minimálhatók. [14] A töltési profilokat tehát hangolni lehet, amit két módszer alkalmazásával lehet elérni [15]:

- A villamos energia árával történő befolyásolás: A szabályozatlan villamosenergia-piacon a villamos energia ára mutatja a rendszerterhelést és útmutatást ad arra vonatkozólag, hogy a végfelhasználóknak hogyan kellene ütemezniük a villamosenergia-fogyasztást. Az emberek szokásainak ezáltal illeszkednie kellene a díjszabási rendszerhez. Ezt nehéz megvalósítani, mert a díjszabási rendszer nem lehet bonyolult, viszont az emberi viselkedés meglehetősen összetett.
- A töltőbe épített szabályozóval történő befolyásolás: A szabályozó tudja ütemezni a töltést a felhasználói igények, a villamos energia ára, a rendszer frekvenciája és a feszültsége alapján.

Az intelligens töltők alkalmazásával a PHEV-töltések miatt jelentkező többletterhelések hatása minimálható.

Emellett intelligens, megfelelően szabályozott töltés esetén várhatóan nem kell új erőművi egységeket építeni, mert el lehet osztani a jelentkező terheléseket és igényeket úgy, hogy az a meglévő kapacitással kiszolgálható legyen. Szabályozatlan

töltés esetén nagyobb valószínűséggel lenne új erőművekre szükség a többlet kielégítésére. [16]

1.3.2. Hatás a transzformátorokra

A PHEV-ek miatti terhelésnövekedés hatására a transzformátorok melegednek, ami a szigetelésük tönkremeneteléhez vezet, ez pedig a transzformátorolajban megnöveli a disszociált gázok mennyiségét. Emiatt lecsökken az olaj átütési szilárdsága és a tekercselések között átütések következhetnek be. Az elsődleges hatás azonban a transzformátor melegedése.

1.3.3. Hatás az elosztóhálózati vezetékekre és kábelekre

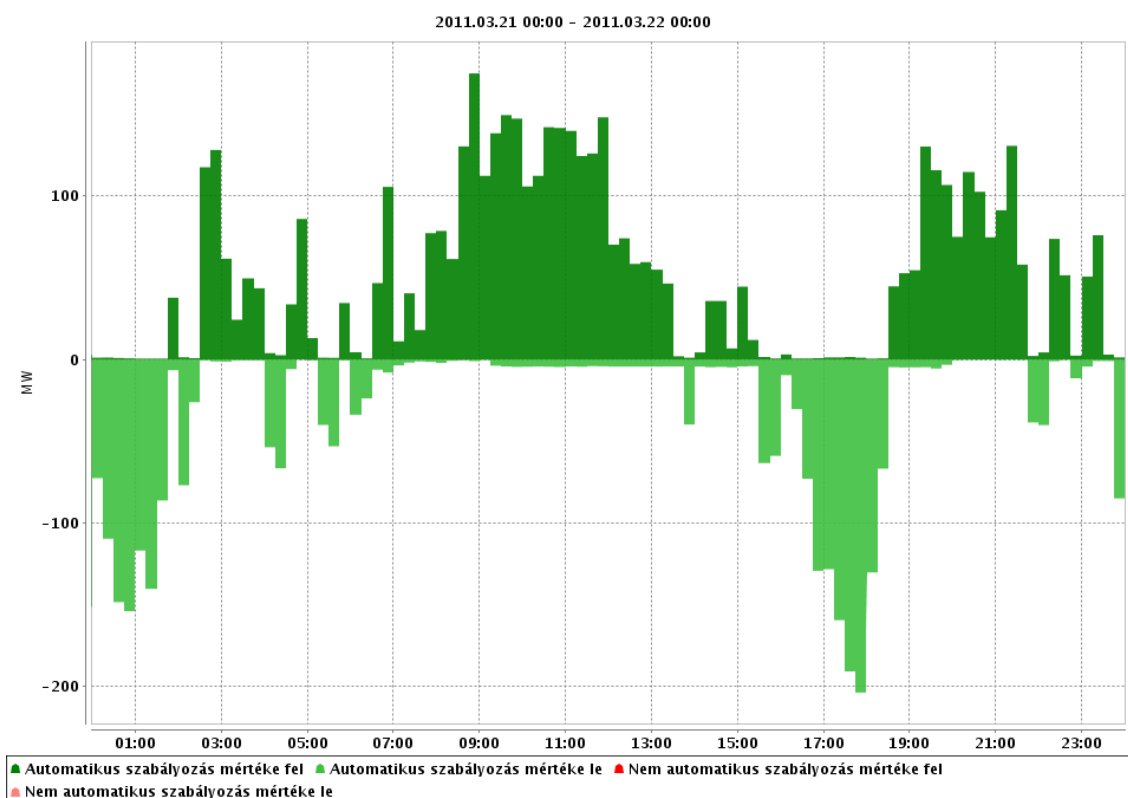
Az elosztóhálózati vezetékeken sokféle hatás léphet fel:

- A terhelés miatt a sugaras rendszerű elosztóhálózaton a betápláláshoz közeli pontokon túlterhelődés, a betáplálástól távol eső pontokon pedig feszültségesés jön létre.
- Kialakulhat aszimmetria, mivel a villamos autók töltése jelentős egyfázisú terhelést jelent. [11] Olyan mértékű is lehet a terhelés növekedése, hogy az meghaladja a meglévő elosztóhálózat terhelhetőségét. Ilyenkor lehet megoldás az, hogy kicserélik a berendezéseket nagyobb kapacitásúra (transzformátorokat, kábeleket, stb.) [5], ez azonban meglehetősen drága és sokszor nehezen kivitelezhető. Lehet az adott eszközt a megengedettnél nagyobb terhelésen is üzemeltetni, ez azonban biztosan élettartam-csökkenést fog eredményezni. [5]

A terhelődés vizsgálatában a transzformátorok mellett a végponti feszültségeket és a vezetékek terhelődését is bemutatjuk, különböző részarányú villamos autó jelenlét mellett.

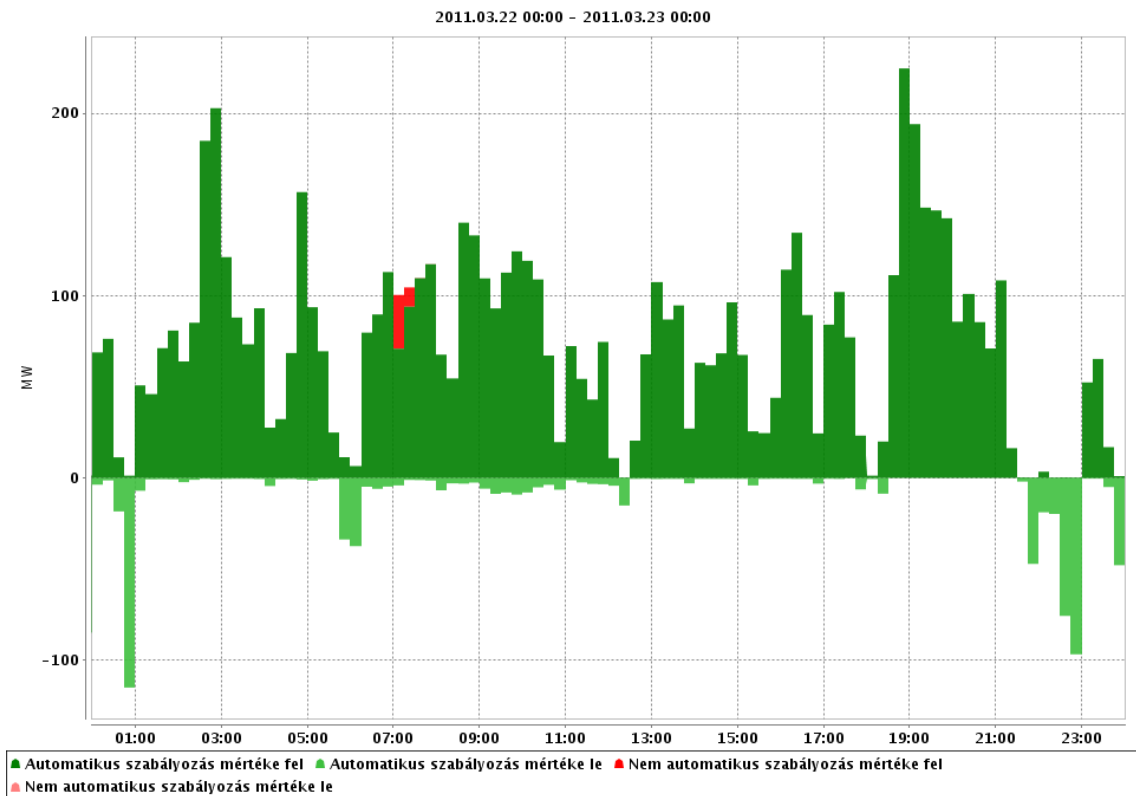
2. Leszabályozási igény a magyar villamosenergia-hálózaton

Az előző fejezetben említettük, hogy a hálózatra csatlakoztatott villamos autókat fel lehet használni a villamosenergia-rendszerben különféle szabályozási feladatok végrehajtásánál. Nézzük meg, hogy milyen szabályozási igény lép fel a magyar villamosenergia-rendszerben (az ábrák forrása a <http://www.mavir.hu/web/mavir/igenybevehető-tartalek-es-rendszer-adatok> oldal):



9. ábra: Szabályozási igény a magyar villamosenergia-rendszerben

Az ábrán nagyon jól látható, hogy jelentős leszabályozási igény lép fel a hajnali órákban, valamint délután, napközben pedig a felszabályozási igény jelentős. Nem lehet azonban ennyi adatból általánosítani. Hasonlítsuk össze az előbbi ábrát a következővel:



10. ábra: Szabályozási igény a magyar villamosenergia-rendszerben, egy nappal a 9. ábrán vizsgált nap után

Látható, hogy a vizsgált napot követő napon már teljesen más a szabályozási igény. Sokkal jelentősebb felszabályozási igény lépett fel, mint a megelőző napon, a leszabályozási igény pedig kisebb volt. Mi pedig szeretnénk a hajnalban fellépő leszabályozási igényt minél jobban kihasználni a villamos autók töltésére. Ennek érdekében statisztikai vizsgálatokat kell végezni arra vonatkozólag, hogy az év mely időszakaiban lehet várhatóan a leszabályozási igényt villamos autók töltésével kielégíteni.

A vizsgálatokhoz szükséges adatokat az előbbieken már hivatkozott helyről, a MAVIR honlapjáról vettük. A statisztikai vizsgálhatóság érdekében két év, 2009 és 2010 adatait dolgoztuk fel.

A völgyidőszak időintervalluma, ahol a leszabályozást a villamos autókkal elsősorban végezni szeretnénk, függ attól, hogy az év melyik szakában vagyunk, valamint attól is, hogy hétköznapi van-e, vagy sem. Az egyes zónaidők időtartama munkanapokon:

	Téli	Nyáron
Hétköznap	22-06 óra	23-07 óra
Hétvége	Teljesen völgyidőszak	

Az időszámítástól való függést pedig a konkrét évekre lehet megnézni: 2009-ben március 29-én hajnalban, valamint október 25-én kellett az órát állítani, 2010-ben pedig március 28-án, illetve október 31-én, vagyis a nyári, illetve téli időszámítás ezen időpontokban kezdődött. Ennek megfelelően kell az egyes napokon a völgyidőszak és a leszabályozási igény egybeesését megvizsgálni.

A vizsgálatok során az autók töltésére 6 órás időintervallumot tételezhetünk fel. A 8 órás időablakban, amíg leszabályozási időszak van, ezáltal lehetőség nyílik a töltési idővel való „játékra”. Vizsgálataink során első közelítésben három eltolási csoportot vizsgáltunk meg, órás bontásban:

- 23:00-05:00
- 24:00-06:00
- 01:00-07:00

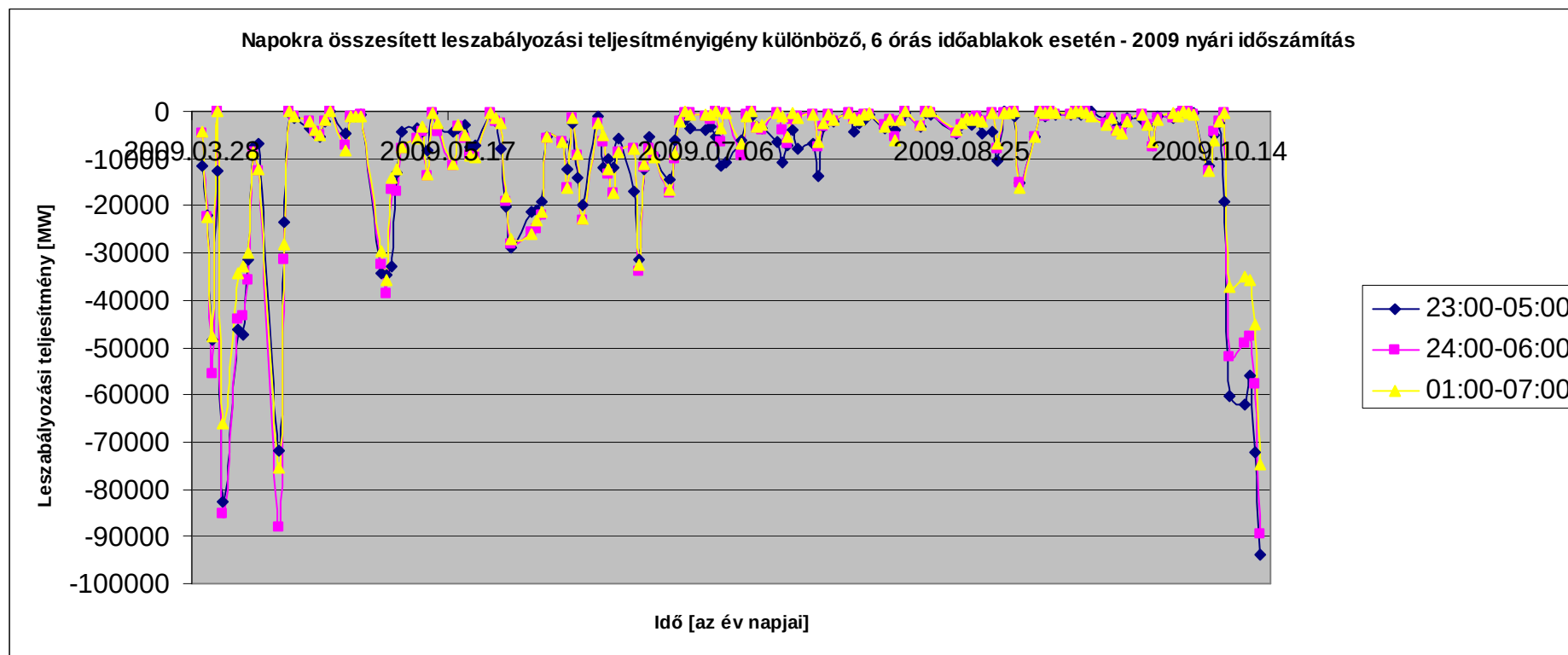
a nyári időszámításban és

- 22:00-04:00
- 23:00-05:00
- 24:00-06:00

a téli időszámításban.

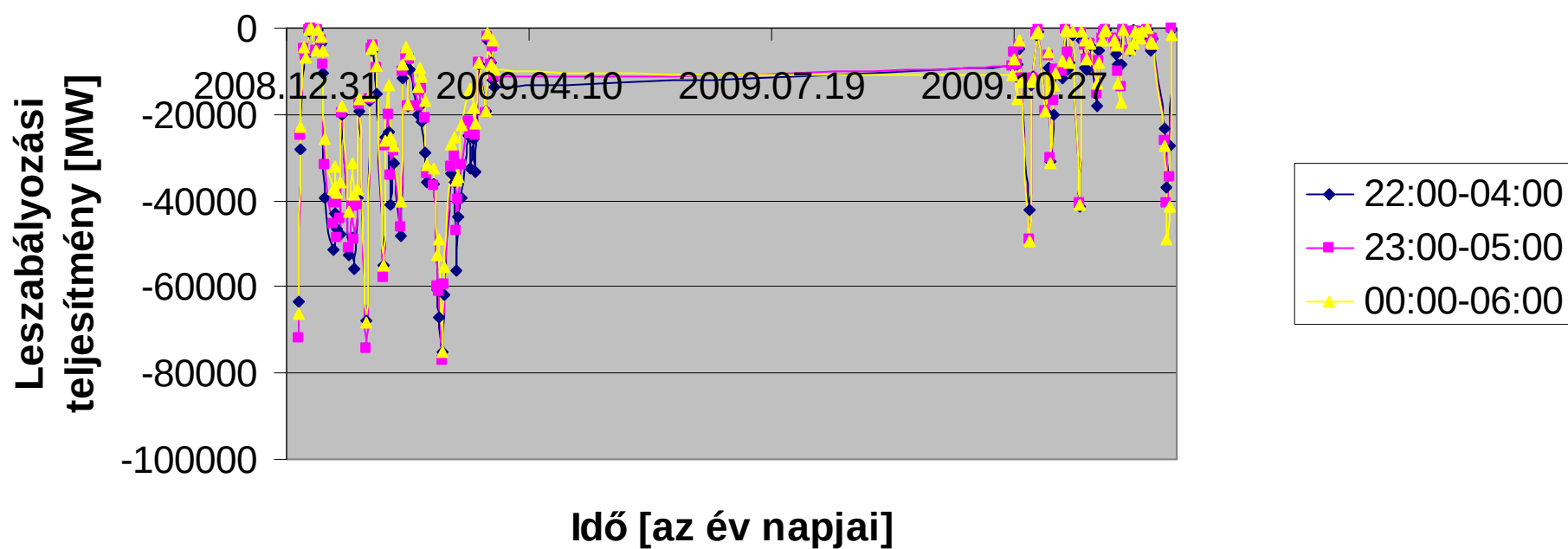
A hétvégék és az ünnepnapok esetén órás bontásban nem teszünk különbséget.

A vizsgálatok azt mutatják, hogy a nyári időszámítás során a legnagyobb leszabályozási igény a rendszerben a vizsgált időintervallumok közül a 23:00-05:00 ablakban lép fel. Mindezt diagramokkal is alá lehet támasztani (meg kell jegyeznünk azonban a diagramok értelmezésénél a következőt: az ábrázolt leszabályozási teljesítményértékeket úgy kaptuk meg, hogy az adott időablakban a perces bontásban felmerült igényeket összeadtuk. Nyilvánvaló, hogy ennek az összegzésnek nincs fizikai tartalma, hiszen az egymás utáni percekben fellépő szabályozási igények körülbelüli egyezősége csak annyit mutat meg, hogy a szabályozási igény folyamatosan fennáll. Mégis összeadtuk ezeket a mennyiségeket, mert ebből lehet következtetni – akár egyszerű átlagszámítással – arra, hogy arányaiban mikor volt nagyobb szabályozási igény.):



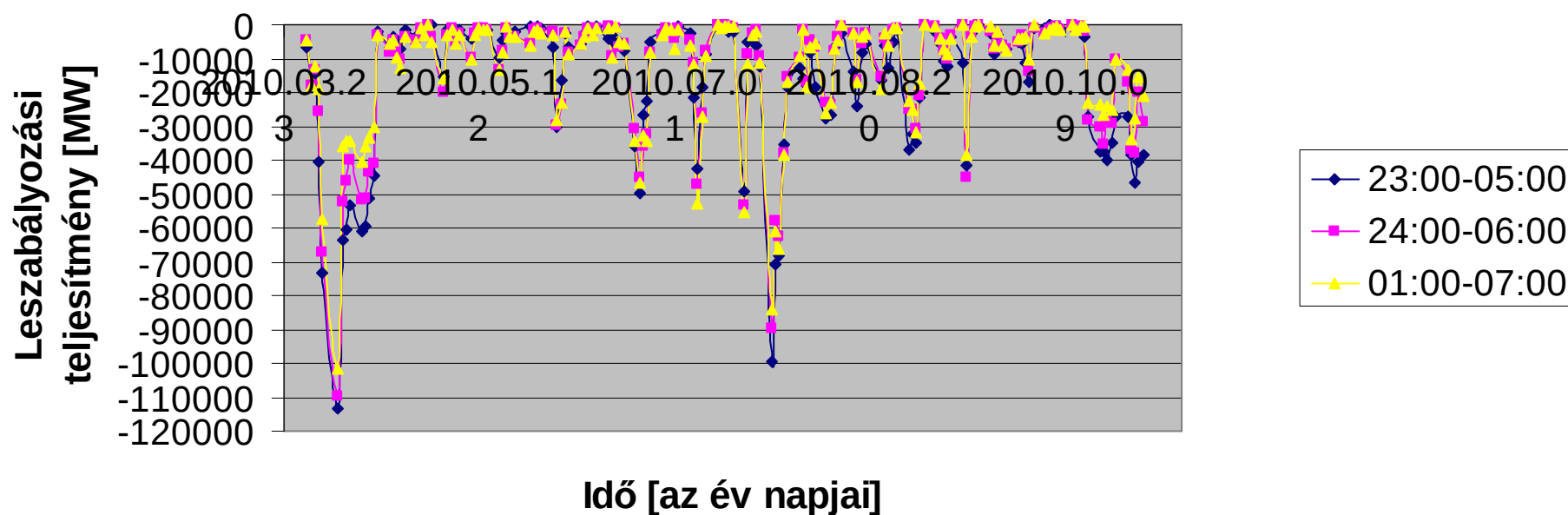
11. ábra: A 2009 nyári időszámítás során a három töltési időintervallumban fellépő leszabályozási igény

Napokra összesített leszabályozási teljesítményigény különböző, 6 órás időablakok esetén - 2009 téli időszámítás



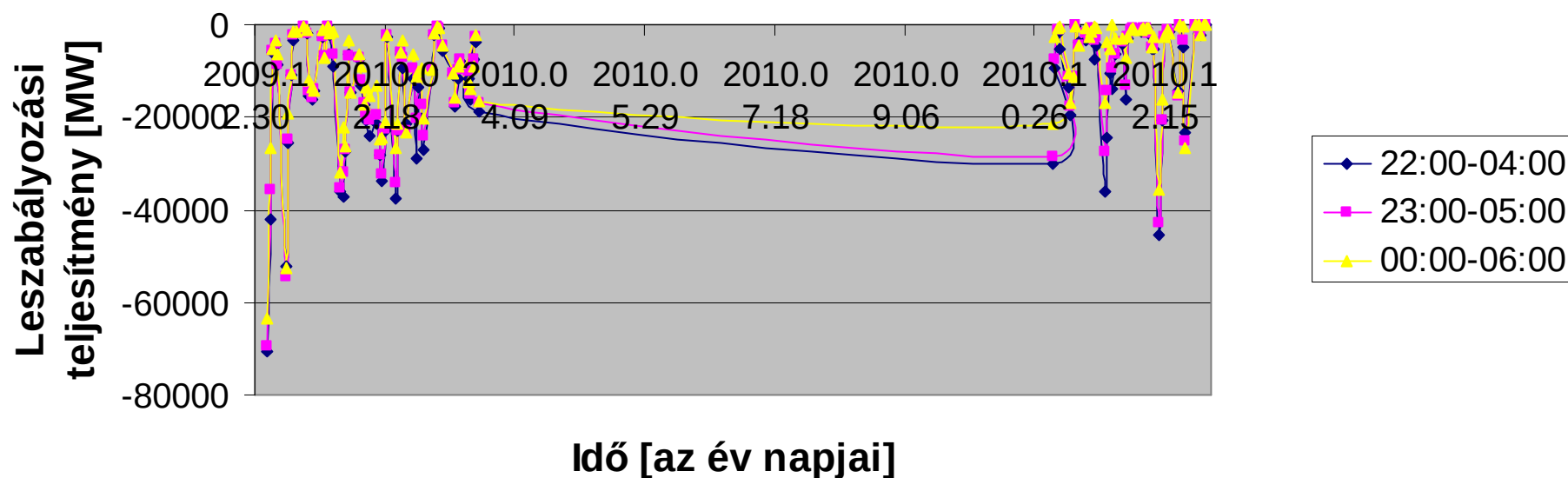
12. ábra: A 2009 téli időszámítás során a három töltési időintervallumban fellépő leszabályozási igény

Napokra összesített leszabályozási teljesítményigény különböző, 6 órás időablakok esetén - 2010 nyári időszámítás



13. ábra: A 2010 nyári időszámítás során a három töltési időintervallumban fellépő leszabályozási igény

Napokra összesített leszabályozási teljesítményigény különböző, 6 órás időablakok esetén - 2010 téli időszámítás

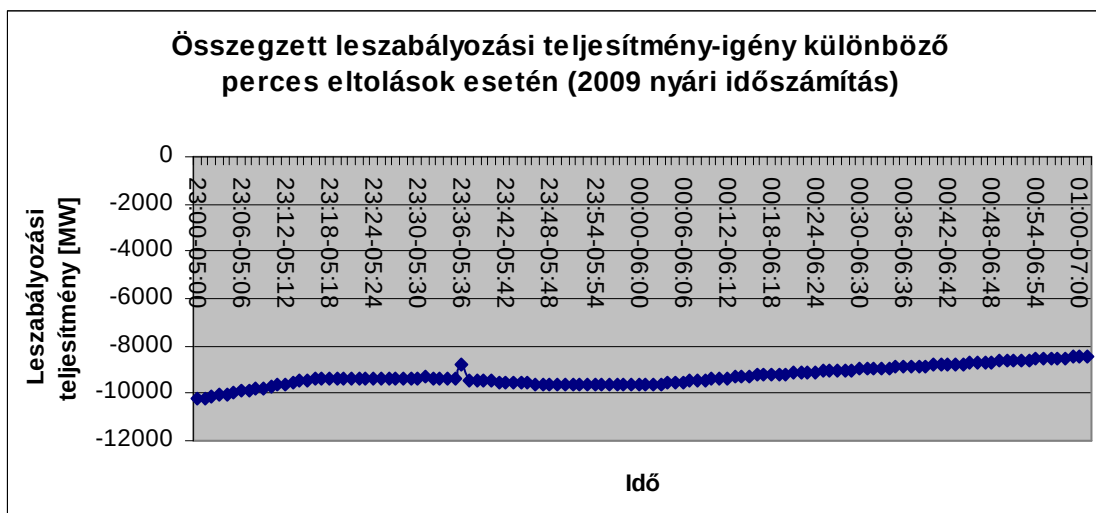


14. ábra: A 2010 téli időszámítás során a három töltési időintervallumban fellépő leszabályozási igény

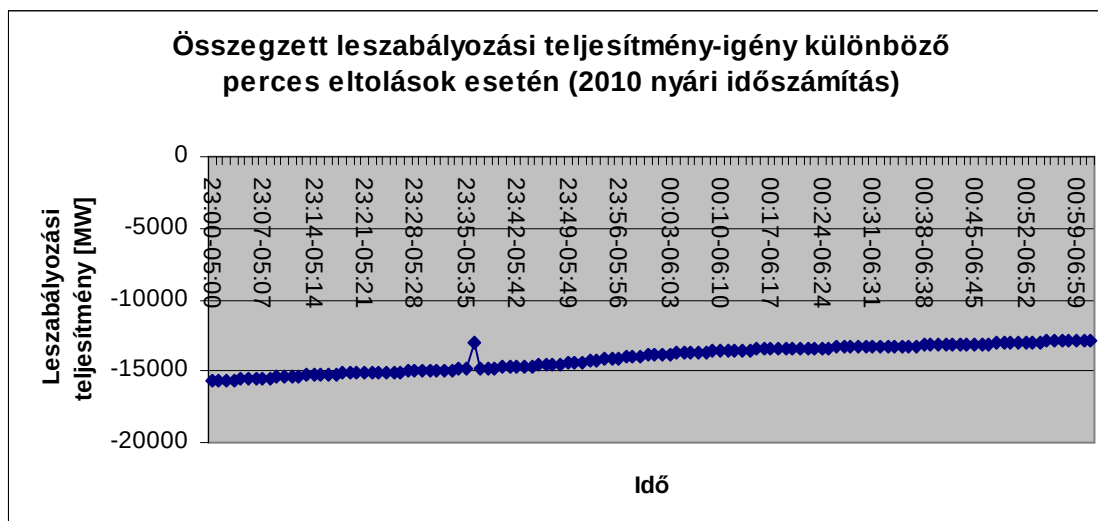
A fenti diagramokból az olvasható ki, hogy az óras bontás alapján a minél korábbi kezdés esetén (vagyis a 23:00-05:00 időszakban a nyári időszak idején és 22:00-04:00 között a téli időszakban) nagyobb leszabályozási igény lépett fel, így ekkor érdemesebb az autót tölteni.

Ezek után vizsgálatainkat tovább finomíthatjuk úgy, hogy óras bontás helyett percenkénti bontásban vesszük a szummázott szabályozási teljesítmény-értékeket. Az óránkénti bontás meglehetősen pontatlan képet ad arról, hogy mikor érdemes tölteni. Ugyanakkor a perces időeltolás vizsgálatának sincs teljes létjogosultsága, hiszen a vizsgálat egy fix adatsoron történik, így a kapott eredmény nem mondható általánosnak. A determinisztikusság kiküszöbölésére vizsgáltunk két évet (minél több adat álljon rendelkezésre), s próbáltunk meg egy konkrét időintervallum helyett egy időintervallum-intervallumot megadni, amelyben a leszabályozási igény a legnagyobb. Az időintervallum-intervallum megadása azért is célravezetőbb, mert ha a töltést központi vezérléssel oldjuk meg, akkor a vezérlőjelet nem egyidőben adjuk ki minden autónak, hanem időben eltolva. Az intervallumba sorolással ezt az elvet lehet megvalósítani.

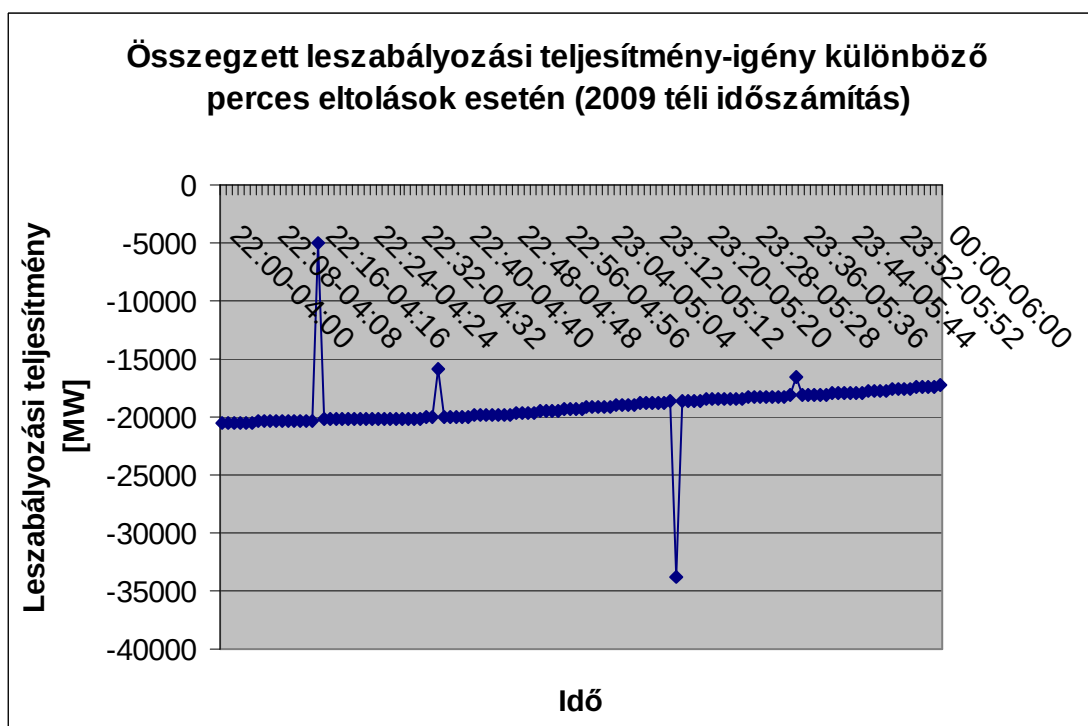
A következőkben tehát elvégezzük a téli és a nyári időszakokra egyaránt a megfelelő töltési időintervallum kiválasztását. A módszer átlagoláson alapszik: minden év minden időszakra (téli, nyári) megnézzük, hogy összesen mekkora leszabályozási teljesítmény-igény lépett fel, majd ezt visszaosztjuk a napok számával, így egy napra átlagosan megkapjuk a leszabályozási igényt. A vizsgálat eredménye a következő:



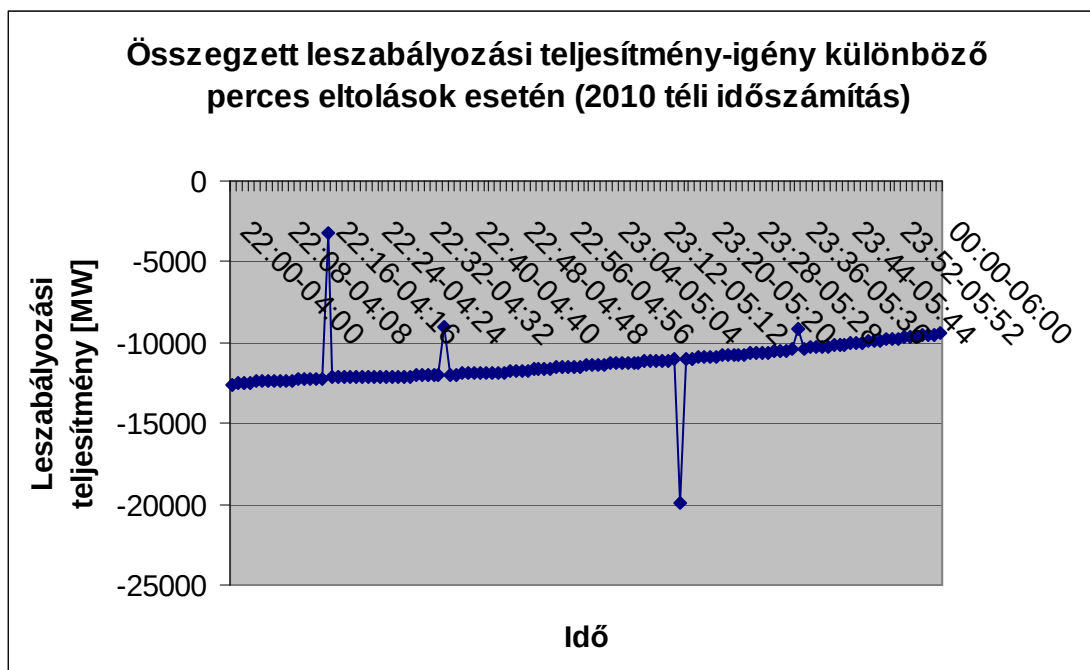
15. ábra: Leszabályozási igény a 2009 nyári időszakban



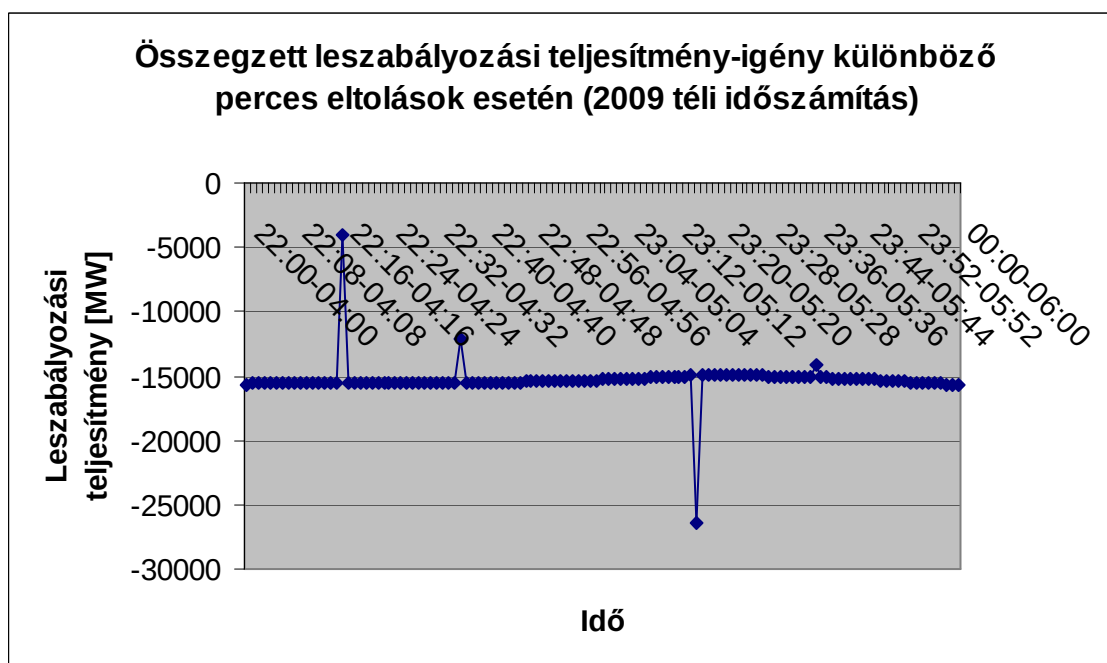
16. ábra: Leszállási igény a 2010 nyári időszakban



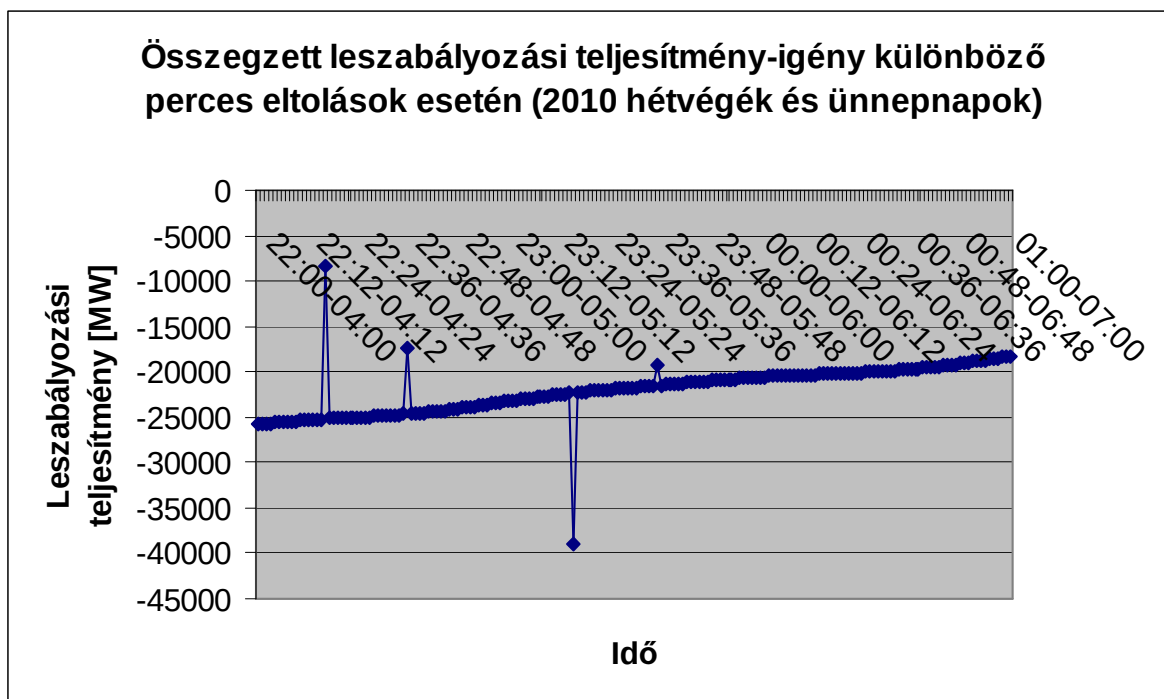
17. ábra: Leszállási igény a 2009 téli időszakban



18. ábra: Leszabályozási igény a 2010 téli időszakban



19. ábra: Leszabályozási igény a 2009-es év hétvégéin és hétköznapijain



20. ábra: Leszabályozási igény a 2010-es év hétvégéin és hétköznapjain

A kapott adatsorok értékeléseként megállapíthatjuk, hogy melyik az az időintervallum, ahol a töltést érdemes elkezdni: mind a nyári, mind a téli időszakra és a hétvégéken is egyértelműen a völgyidőszak legeleje az, amikor a legnagyobb leszabályozási igény lép fel, s onnantól az idő előrehaladtával a leszabályozási teljesítményigény monoton csökken. Vagyis a . fejezetben már említett jelenséget néztük meg most egy kicsit más megközelítésben: a villamos autók töltését időben eltoltuk. Az eltolásra a központi vezérlés jellegéből adódóan szükség van. Ugyanakkor az eltolás most nem önkényesen történt meg, hanem a cél az volt, hogy az éjszakai völgyidőszakban fellépő leszabályozási igényt a villamos autók töltésével elégítsük ki. Ez a megvalósítási mód előnyös a rendszerirányítónak, hiszen a leszabályozási tartalék biztosítására nem kell forgó tartalékot igénybe venni, hanem egy egyébként is fellépő szükséglet kiszolgálásával teljesíteni tudja a vonatkozó igényeket. Előnyös ugyanakkor az így létrejövő szimbiózis az aggregátornak és így közvetve az autótulajdonosoknak is, mert a leszabályozási tartalék biztosítása miatt valamekkora pénzösszegre, de legalábbis kedvezményekre lesznek jogosultak.

Ha nem csupán egy konkrét intervallumot, hanem a korábban említett időintervallum-intervallumot akarunk megadni, akkor a kapott eredmények ebben is

segítségünkre vannak: a leszabályozási időszak legelején kell ezen intervallumokat kiválasztani.

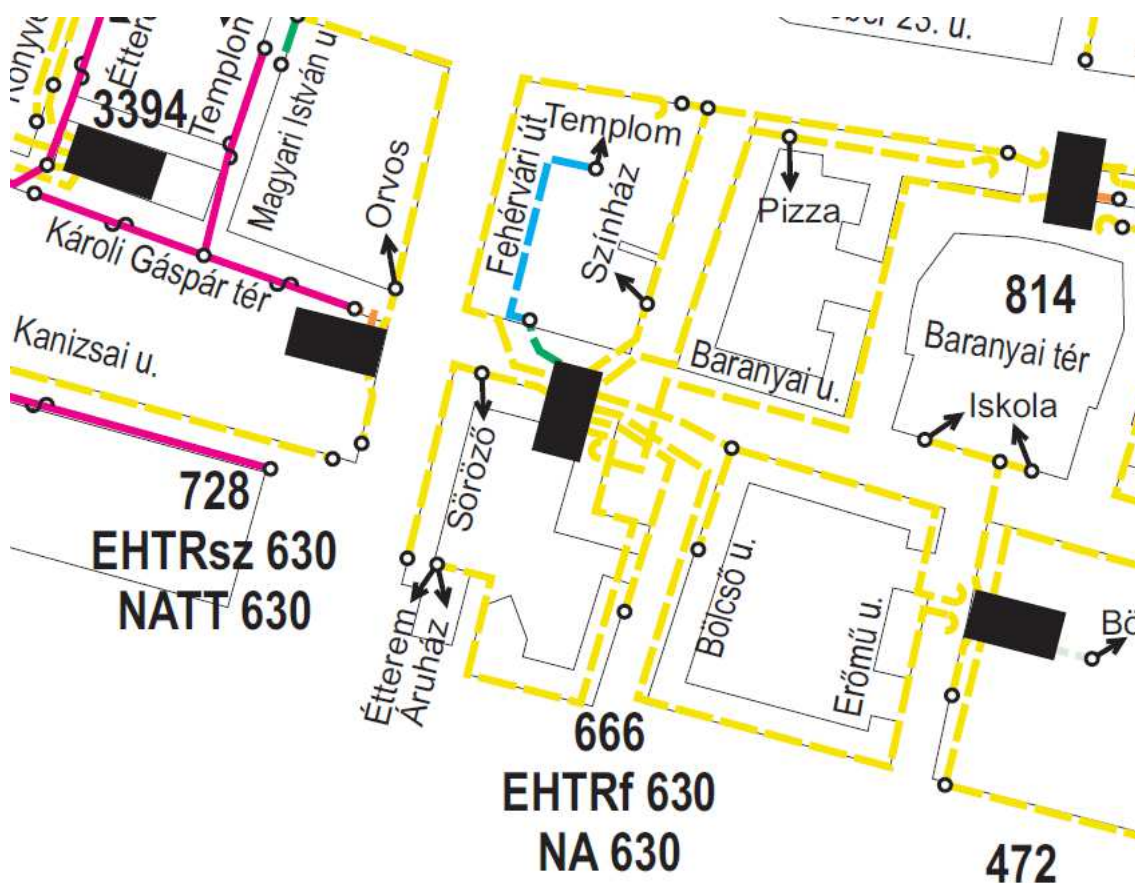
A szimulációs vizsgálatokban tehát két esetet kell megvizsgálnunk:

- Az egyik egy eltolás nélküli eset, amikor a villamos autók semmilyen szabályozásban nem vesznek részt, hanem akkor kapcsolódnak a hálózatra tölteni, amikor hazaérnek. Ezen töltési mód hatásának vizsgálatakor figyelembe kell venni, hogy milyen eloszlás szerint érkeznek haza az autók, egy autó töltése milyen teljesítményigényt jelent, valamint figyelembe kell venni a háztartási fogyasztók terhelésének időbeli változását is. Az eltolás nélküli esetben egyaránt megvizsgáljuk a hálózatra gyakorolt hatást 8 órás akkumulátortöltés esetén, valamint egy rövidebb idejű, de ezért nagyobb teljesítmény-igényű töltés esetén is. Az autók töltési idejét ekkor 6 órára állíthatjuk, s így egy járműre 30kW-os akkumulátorokat feltételezve $30/6=5\text{kW}$ töltőteljesítmény szükséges.
- A másik vizsgálat a leszabályozási tartalékképzésben való részvétel során fellépő hálózati hatásokat vizsgálja. Ilyenkor a töltést időben eltoljuk, minden más azonban változatlan. 6 órás töltési időt tételezünk itt fel, hiszen a leszabályozási igény vizsgálatánál megállapítottuk, hogy melyik időintervallumba való eltolással lesz a legkedvezőbb az autók töltése leszabályozási szempontból.

3. Villamos autók töltésének hatása a kisfeszültségű elosztóhálózatra

3.1. A hálózat paramétereinek megadása

Az 1. fejezetben áttekintettük, hogy milyen hatások léphetnek fel a kisfeszültségű elosztóhálózaton a villamos autók töltésének hatására. A hálózatra gyakorolt konkrét hatásokat – a mérések és szabványban adott számítási eljárások mellett – szimulációkkal lehet vizsgálni. A szimuláció céljára használt szoftver a DiGSILENT Power Factory. A szimulációra kiválasztott hálózatrész a következő:



21. ábra: A szimulált hálózatrész: a 666 EHTRf körzete [17]

Az ábrán látható színjelölés a következőket jelenti:

Kábelek	
	4 x 50 mm ²
	4 x 70 mm ²
	4 x 95 mm ²
	4 x 120 mm ²
	4 x 150 mm ²
	4 x 185 mm ²
	4 x 240 mm ²

1. táblázat: Színjelölés a kábelek keresztmetszetének beazonosításához [17]

Azért erre a hálózatrészre esett a választás, mert a PD-TEAM Mérnöki Iroda Kft. által készített hálózatszámítás szerint a Gellérthegy-Lágymányos régióban ez a transzformátor terhelődött a leginkább. Így a villamos autók töltése miatti többlet terhelés hatását itt lehet legjobban megfigyelni (bár a vizsgált körzet túlnyomórészt lakótelepi övezet, vagyis nincs meg az a szakirodalomban sűrűn fellelhető feltételezés, hogy a fogyasztók autóikat otthon, garázsaikban töltik. Ennek ellenére a szimulációt úgy végeztük, hogy ezzel a feltételezéssel élünk, mert egy worst case esetet szeretnénk meghatározni).

A szimulációhoz szükség van a kábelek és a vizsgált transzformátor részletes adatainak megadására. A következőkben felsoroljuk az egyes kábelek és a transzformátor villamos jellemzőit, valamint a csatlakozó fogyasztók számát:

Cspt	Azonosító	Állomás típus	Beépített telj.	Tr gép típus	Névleges telj. [kVA]	Telj. [kVA]	Kihaszn.	Közvill [kVA]	Vasveszt. [kW]	Tekercsveszt. [kW]
780	666	EHTRf	630	NA	630	798,4	127%	0	1,4	14,1

2. táblázat: A transzformátor adatai [17]

	Áruház	Étterem	Pizza	Söröző	Színház	Templom
Teljesítmény [kVA]	10	10	10	5	20	5

3. táblázat: A vizsgált hálózaton található koncentrált fogyasztók paraméterei [17]

Vezeték sorszám	Cspt1	Bont. Jel	Cspt2	Hossz [m]	Vezeték típusa: fázis			Vezeték típusa: nulla			Fogy. Szám	Konc. Fogy [kVA]	Tr. Körzet szám	Áramkör szám	Terhelőáram [A]	Fesz. Esés [V]	Bmin [A]	Érintésvédelem Bmax [A]	Érintésvédelem Bmin [A]	Csatl. Vez.	
582	780	-----	810	90	240	Al	kábel	240	Al	kábel	94	0	76	264	104.5	0,8	160	600	600	25	ML
583	780	-----	2191	284	240	Al	kábel	240	Al	kábel	107	20	76	265	147.8	4,1	200	400	400	35	ML
584	780	-----	2192	122	240	Al	kábel	240	Al	kábel	109	1	76	266	122.3	1,2	160	400	400	25	ML
585	780	-----	2195	69	240	Al	kábel	240	Al	kábel	0	0	76	267	212.3	2,4	315	0	0	BIZT	
586	2195	-----	2201	49	240	Al	kábel	240	Al	kábel	47	1	76	267	53,3	2,6	80	350	350	16	ML
587	2195	-----	810	165	240	Al	kábel	240	Al	kábel	143	0	76	267	158.9	4,5	225	400	400	35	ML
588	780	-----	2205	256	240	Al	kábel	240	Al	kábel	92	0	76	268	102.2	2,1	160	400	400	25	ML
589	780	-----	3720	71	240	Al	kábel	240	Al	kábel	0	20	76	269	85,5	1	125	600	250	25	ML
590	2204	-----	2205	12	240	Al	kábel	240	Al	kábel	0	21	76	269	30.0	1,7	40	250	250	16	ML
591	2204	-----	3684	139	240	Al	kábel	240	Al	kábel	0	0	76	269	0.0	1,6	5	250	250	16	ML
592	3684	-----	610	24	240	Al	kábel	240	Al	kábel	0	0	76	269	0.0	1,6	5	250	250	16	ML
593	3720	-----	2204	94	240	Al	kábel	240	Al	kábel	24	0	76	269	56,7	1,6	80	350	250	16	ML
594	780	-----	2212	48	95	Al	kábel	95	Al	kábel	0	0	76	270	7,2	0,1	10	315	250	16	ML
595	2212	-----	2213	105	120	Al	kábel	120	Al	kábel	0	5	76	270	7,2	0,4	10	250	250	16	ML
596	780	-----	3721	189	240	Al	kábel	240	Al	kábel	149	10	76	271	241.2	4,9	315	0	0	BIZT	
597	3721	-----	3684	102	240	Al	kábel	240	Al	kábel	55	0	76	271	61,1	5,4	80	315	315	16	ML
598	780	-----	3722	38	240	Al	kábel	240	Al	kábel	47	5	76	272	129.5	0,6	200	600	350	35	ML
599	3722	-----	2194	105	240	Al	kábel	240	Al	kábel	62	1	76	272	70.0	1,2	100	350	350	16	M

4. táblázat: Az egyes kábelek adatai [17]

A szimuláció során bemenő adatként ennyi információ kevés, ezért a DIgSILENT Power Factory beépített modelljeivel dolgoztunk tovább. A beépített modellek használatánál cél volt az olyan berendezések kiválasztása, melyek paramétereiben jól közelítik a valós hálózati paramétereket. A DIgSILENT szimulációs szoftverben kiválasztott berendezések paraméterei a következők voltak:

Keresztmetszet	95mm ²	120mm ²	240mm ²
Típus	NAYY 4x95SE 0,6/1kV	NAYY 4x120SE 0,6/1kV	NAYY 4x240SE 0,6/1kV
Névleges feszültség	1kV	1kV	1kV
Névleges terhelőáram földben	0,211kA	0,24kA	0,357kA
Névleges terhelőáram légkábeltként	0,181kA	0,21kA	0,326kA
Fázisok száma	3	3	3
Pozitív és negatív sorrendű ellenállás	0,32Ω/km	0,253Ω/km	0,125Ω/km
Pozitív és negatív sorrendű reaktancia	0,08199557Ω/km	0,08042478Ω/km	0,07979646Ω/km
Pozitív és negatív sorrendű szuszceptancia	241,9026μS/km	263,8938μS/km	273,3186μS/km
Zérus sorrendű ellenállás	1,28Ω/km	1,012Ω/km	0,5Ω/km
Zérus sorrendű reaktancia	0,3279823Ω/km	0,3216991Ω/km	0,3191859Ω/km
Zérus sorrendű szuszceptancia	109,7044μS/km	121,2341μS/km	132,7951μS/km
Max. megengedett hőmérséklet	160°C	160°C	160°C
1s pillanatáram	7,22kA	9,12kA	18,2kA

5. táblázat: A DIgSILENT Power Factory-ben alkalmazott

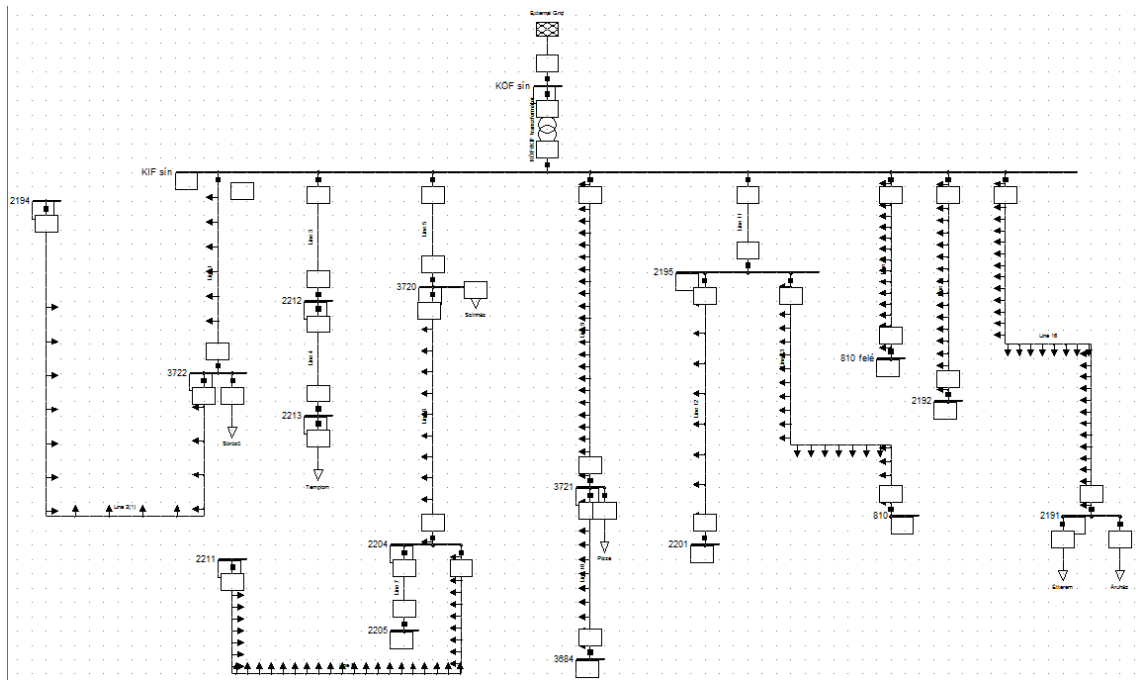
beépített kábelek paraméterei

Típus	0,63MVA 10/0,4kV Dyn 6 ASEA
KÖF oldal	10kV
KIF oldal	0,4kV
Kapcsolási csoport	D/YN
Óraszám	11
Pozitív sorrendű rövidzárási feszültség	6,00%
Pozitív sorrendű rézvesztés	6,6kW
Zérus sorrendű rövidzárási feszültség	6,00%
Zérus sorrendű rezisztív komponens	1,05%
Fokozatszabályozó	KÖF oldalon
Egy fokozat feszültsége	2,50%
dU pozíció	0°
Maximum pozíció	2
Minimum pozíció	-2
Mágnesező impedancia árama	0,22%
Mágnesező impedancia vesztesége	0,14kW

6. táblázat: A DIgSILENT Power Factory-ben alkalmazott

beépített KÖF/KIF transzformátor paraméterei

A vizsgált hálózat szimulációs képe látható a következő ábrán:



22. ábra: A vizsgált hálózat a DIgSILENT Power Factory-ben

3.2. Fogyasztói paraméterek megadása

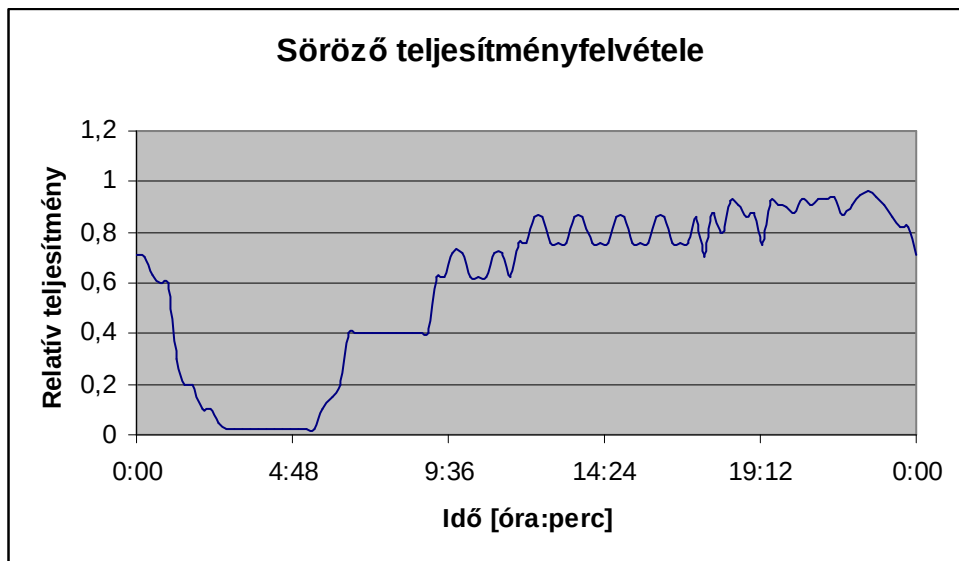
A hálózatkép megadása után szükség van a vizsgált fogyasztók paramétereinek megadására. A hálózaton háromféle fogyasztót definiálhatunk:

- Háztartási fogyasztók
- Koncentrált fogyasztók
- Villamos autók

Mindegyik fogyasztói típushoz külön töltési profil rendelhető, mely 15 perces bontásban tartalmazza az adott fogyasztó teljesítményfelvételét.

3.2.1. Koncentrált fogyasztók

A koncentrált fogyasztók esetében az [17] szerinti terhelést vettük figyelembe, az időbeli eloszlást az adott fogyasztóra tipizálva. Figyelembe vettük azt, hogy a valós hálózaton mekkora terhelést jelentett egy-egy ilyen fogyasztó. A következő ábrán egy példa látható az ilyen módon felvett fogyasztói profilra (relatív teljesítmény van megadva, tehát a maximális teljesítmény 1 egység és a 15 perces időintervallumok teljesítménye ehhez képest van relatív egységekben meghatározva):

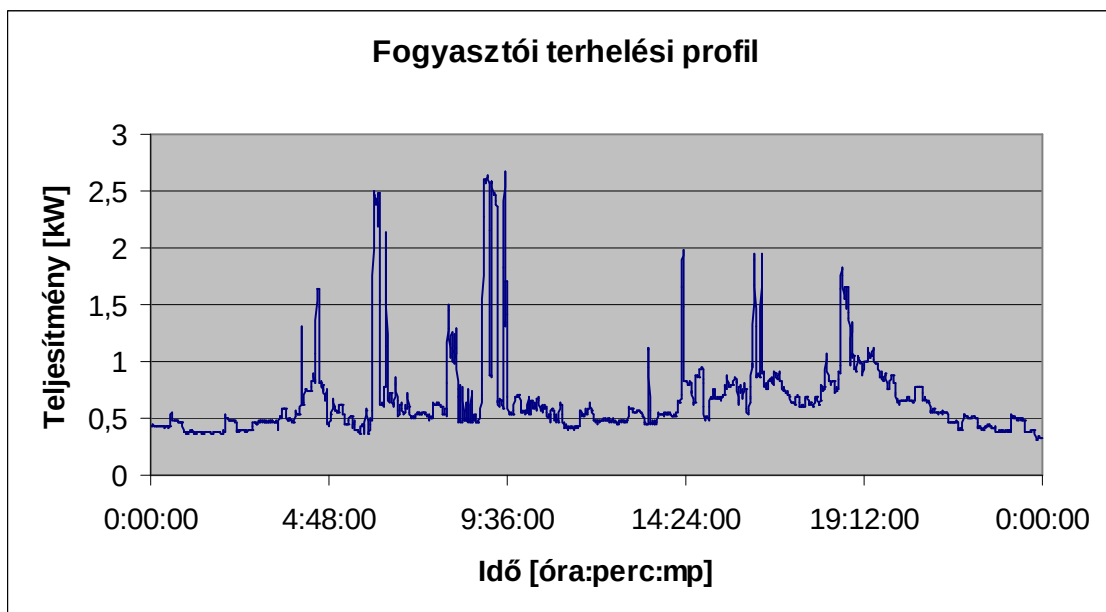


23. ábra: Példa koncentrált fogyasztói profilra (sörözőnél 5kVA-re)

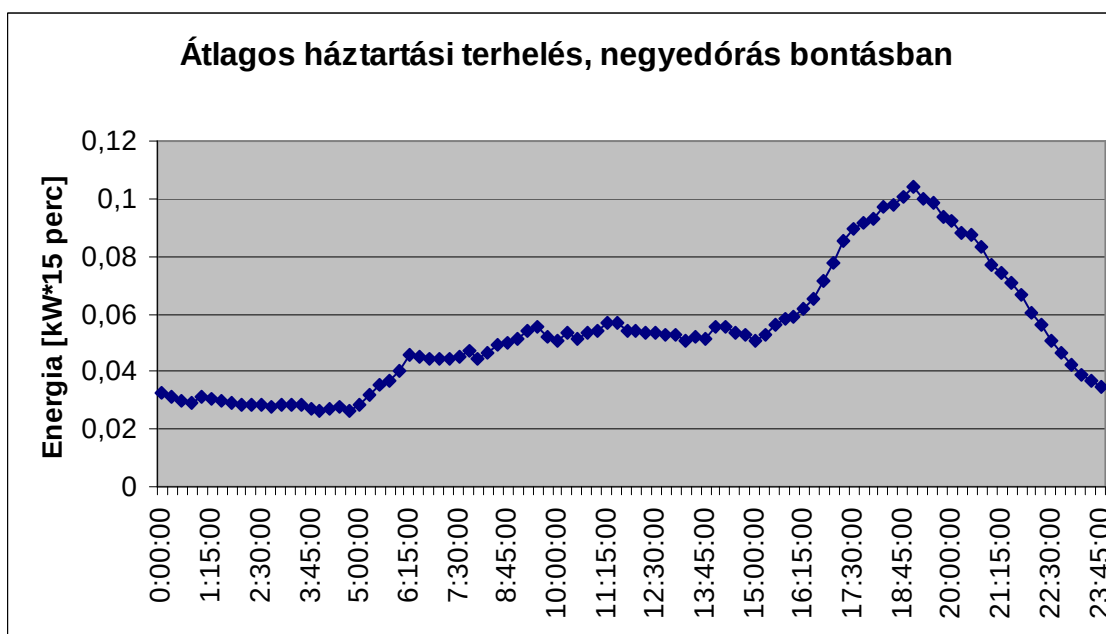
3.2.2. Háztartási fogyasztók

Háztartási fogyasztók esetén a [18]-höz köthető mérési adatokat használtuk fel, valamint a [19] forrásból származó adatsort is felhasználtuk a szimulációban. A [18]-ben használt mérések más helyszínen történtek, mint a szimulációra kiválasztott hálózatrész, viszont a háztartási összfogyasztás viszonylag egységes volta miatt jelen esetben is felhasználhatók. Ezzel eltérünk ugyan a valós hálózati körülményektől, de a végső cél nem az adott, önkényesen kiválasztott terület modellezése volt, hanem egy általános érvényű szimulációs hálózati modell elkészítése, így ez az eltérés megengedhető. A mérési adatokból fogyasztói profil-csoportokat hoztunk létre, s ezek kerültek felhasználásra a szimuláció során. Összesen 30, egymástól különböző háztartási profilt definiáltunk, s ezeket véletlenszerűen állítottuk be a szimuláció során. A háztartási profilra példa látható a 24. ábrán.

A másik, [19]-ből származó adatsor átlagos háztartási profilokat ír le. Az átlagos háztartási profilokra mutat példát a 25. ábra.



24. ábra: Példa háztartási fogyasztó profiljára, egyedi fogyasztási profil [18]



25. ábra: Példa háztartási fogyasztó profiljára, átlagos fogyasztási profil [19]

A szimuláció során kétféle vizsgálati lehetőséget lehet elképzelni:

- A fogyasztók terhelésbeli beállítását a rendelkezésre álló hálózathoz igazítjuk, tehát a valós terheltségi viszonyokat vesszük alapul, s a fogyasztói profilokat ennek megfelelően állítjuk be. Mivel a fogyasztói profilok más mérési helyszínről származnak, mint a vizsgált hálózat, ezért pontatlanságot eredményezhet az, ha megfelelő átskálázás nélkül alkalmazzuk a mérési adatokat a hálózatra. Ennek vizsgálatától most eltekintünk,

a szimuláció egyszerűsítése érdekében egyforma csúcsteljesítményű háztartásokat tételeztünk fel.

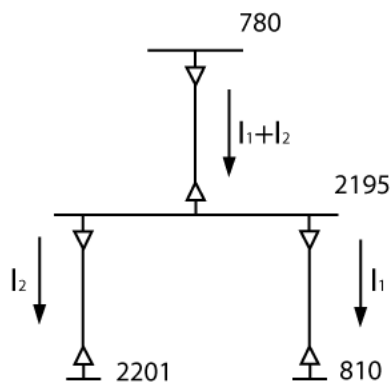
- Nem foglalkozunk a vizsgált hálózat kábeleinek terheltségével, hanem egységesen 60% terheltséget veszünk fel minden kábelre. Ez a megoldás az uniformizálás egyszerűségét hordozza magában. A későbbiekben belátjuk, hogy ez a módszer nem alkalmazható.

A fogyasztói profilok beállításánál érdemes figyelembe venni azt, hogy egyes kábelszakaszokon eltérő az egy fogyasztóra jutó átlagos áramfelvétel. Ezt az adatot az egyes kábelszakaszok terheltségéből és az adott szakaszon lévő kábelek számából lehet meghatározni:

Cspt1	Bont . Jel	Cspt2	Hossz [m]	Vezeték típusa: fázis		Fogy. Szám	Konc. Fogy [kVA]	Terhelőáram [A]	Fesz. Esés [V]	Kábel terhelhetősége [A]	Terheltség [%]	Terhelőáram/ fogyasztó
780	-----	810	90	240	Al kábel	94	0	104,5	0,8	357	29,27	1,11
780	-----	2191	284	240	Al kábel	107	20	147,8	4,1	357	41,40	1,38
780	-----	2192	122	240	Al kábel	109	1	122,3	1,2	357	34,26	1,12
780	-----	2195	69	240	Al kábel	0	0	212,3	2,4	357	59,47	#####
2195	-----	2201	49	240	Al kábel	47	1	53,3	2,6	357	14,93	1,13
2195	-----	810	165	240	Al kábel	143	0	158,9	4,5	357	44,51	1,11
780	-----	2205	256	240	Al kábel	92	0	102,2	2,1	357	28,63	1,11
780	-----	3720	71	240	Al kábel	0	20	85,5	1	357	23,95	#####
2204	-----	2205	12	240	Al kábel	0	21	30	1,7	357	8,40	#####
2204	-----	3684	139	240	Al kábel	0	0	0	1,6	357	0,00	#####
3684	-----	610	24	240	Al kábel	0	0	0	1,6	357	0,00	#####
3720	-----	2204	94	240	Al kábel	24	0	56,7	1,6	357	15,88	2,36
780	-----	2212	48	95	Al kábel	0	0	7,2	0,1	211	3,41	#####
2212	-----	2213	105	120	Al kábel	0	5	7,2	0,4	240	3,00	#####
780	-----	3721	189	240	Al kábel	149	10	241,2	4,9	357	67,56	1,62
3721	-----	3684	102	240	Al kábel	55	0	61,1	5,4	357	17,11	1,11
780	-----	3722	38	240	Al kábel	47	5	129,5	0,6	357	36,27	2,76
3722	-----	2194	105	240	Al kábel	62	1	70	1,2	357	19,61	1,13

7. táblázat: A vizsgált hálózaton lévő kábelek terheltsége

A terhelőáram nagysága a fogyasztók számával van összefüggésben: több fogyasztó nagyobb terhelőáramot fog eredményezni. Vannak emellett olyan kábelek, mint például a vizsgált hálózaton a 780-2195 kábelszakasz, amiből leágazik két másik kábel a következő módon:



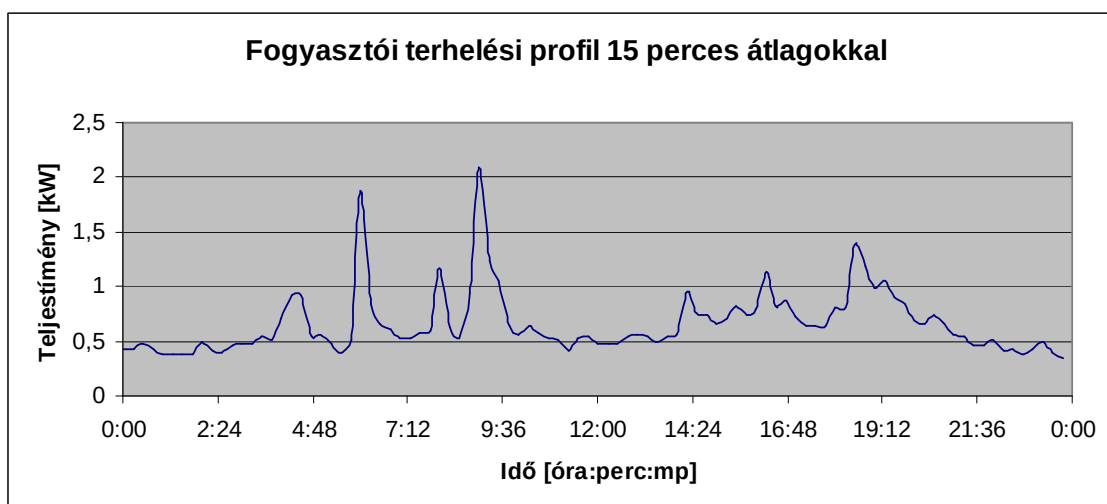
26. ábra: Leágazó kábelek

Ez azt jelenti, hogy a 780-2195 kábelszakaszon folyó áram a másik két kábel terhelőáramának összege. Jelen esetben ezen a kábelszakaszon nincs más terhelés, de ha lenne rajta, akkor az áramfelvétel még nagyobb lenne, viszont már így is 67%-os terheltségű ez a kábelszakasz. Tehát a kábeleket nem vizsgálhatjuk úgy, hogy egységesen 60%-osan vannak terhelve, hiszen akkor például a 780-2195 szakaszon 120% túlterhelés lépne fel, ami nem megengedett.

Vagyis a szimuláció során a mérési adatokat használjuk fel úgy, hogy a valós hálózat terhelési viszonyainak megfelelően állítjuk be a szimulációban az egyes kábelek terheltségét. Ennek módját a későbbiekben ismertetjük.

A 24. ábrán láthattuk, hogy hogyan változik egy háztartási fogyasztó terhelése a nap során. Tudjuk, hogy egy háztartási fogyasztó csúcsfogyasztása 2,75kW körüli érték, így ezeket a mérési adatokat használhatjuk a hálózaton. Az egyszerűbb szimulálhatóság kedvéért egységesen csak hatásos teljesítmény-felvételt feltételezünk és ekkor $\cos \varphi = 0,91$ -et feltételezve $P = 2,504\text{kW}$ -ot állíthatunk be.

A szimulációs programban 15 perces bontásban kell az adatokat megadni, emiatt az 1 perces bontású adatsort átlagolni kell. Az átlagolás után kapott terhelési görbét mutatja a 27. ábra:



27. ábra: A 24. ábrán látható terhelési profil 15 perces bontású átszámítása

A szimuláció során 30 háztartási profilt hoztunk létre, így biztosítottuk a megfelelő mértékű sztochasztikusságot. Az egyes kábelszakaszokon található fogyasztókra azonban a szimulációs hálózat jellege miatt nem lehetséges egyesével megadni a terhelési adatokat, mert az nagyon sok (jelen hálózaton 1064db) beállítási pontot jelentene, valamint a grafikus megjelenítést is erősen korlátozná. Ezért – ahogyan azt korábban már említettük – a szimuláció során minden szakaszon több háztartást „összefogva” képeztünk KIF terhelési modelleket. Például a 3722-2194 szakaszon, amely 105m hosszú, 62 háztartási fogyasztó található. Ide összesen 15 darab KIF terhelési modellt helyeztünk el, így egy KIF terhelési modell 4 háztartás együttes terhelését jelenti. Az egyes terhelési modellekhez a definiált 30 háztartási profil akármelyikét hozzárendelhetjük, egy terhelési modellen belül viszont a benne lévő háztartásokra ezáltal egyforma fogyasztási profilt definiáltunk. A probléma ilyen mértékű diszkretizálására azonban szükség volt, a fentebb említett okok miatt.

A szimuláció második felében átlagos háztartási terhelési profilokat használtunk. Ebben az esetben az adatok már 15 perces bontásban állnak rendelkezésre, így további átlagolást nem kell végezni. A hálózat többi beállítása maradt az, amit az egyedi háztartási fogyasztóknál beállítottunk, így az egy háztartásra beállított teljesítményfelvétel értéke is.

Az egyes KIF terhelési modelleket a kábelszakaszok mentén egyenletesen elosztva helyeztük el, ami a valóság nem pontos modellezése. A kérdéskörben felmerülő problémákat a villamos autók töltésével foglalkozó részben mutatjuk be.

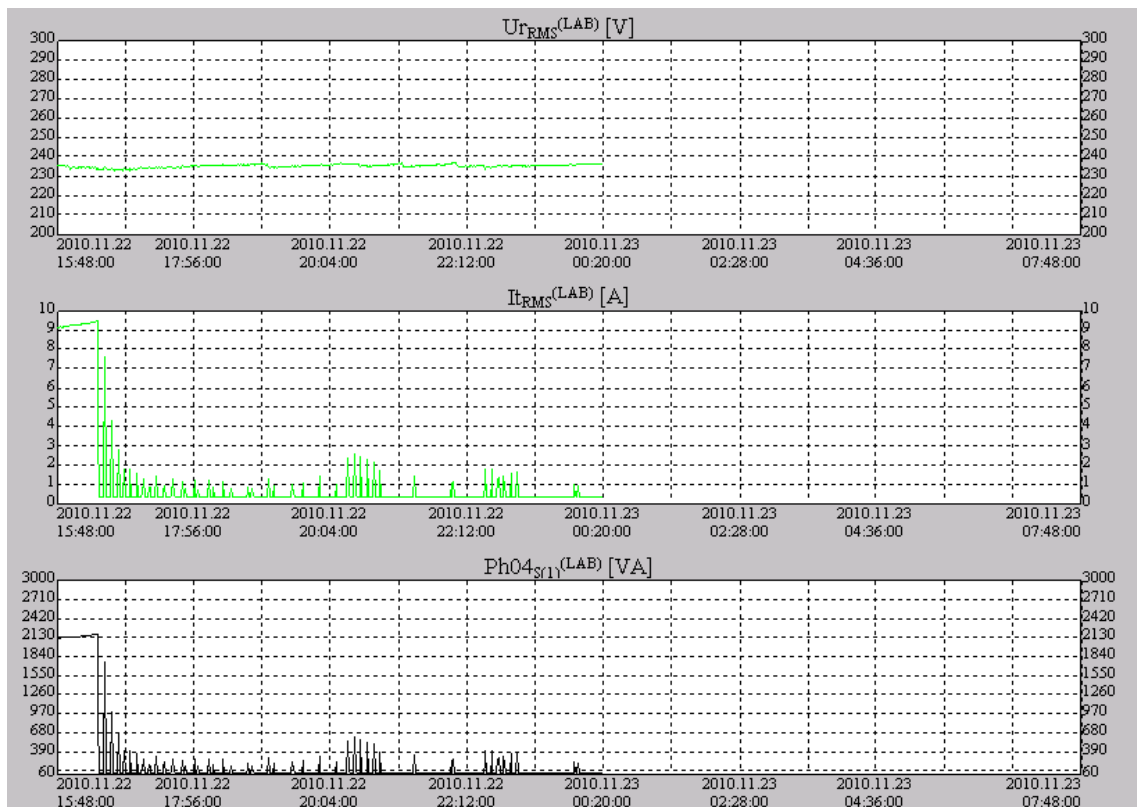
3.2.3. Villamos autók

Villamos autók esetében a [20]-hoz köthető mérési adatokat használtuk fel. A töltési profil mérési adatokból történő felvétele biztosítja, hogy valós, verifikált adatokkal tudunk dolgozni.

A mérést a *TRANSANAL-16 Harmonikus, spektrum, flicker és tranziens analízátorral* készítették, a mérési adatokat a műszerhez tartozó *HARMANAL for Windows* szoftverrel lehetett kinyerni. A mérés során egyfázisú és háromfázisú töltést egyaránt megvizsgáltak, a dolgozatban azonban csak az egyfázisú töltéssel foglalkozunk, mert a szakirodalom is erre alapoz (a mérés tanulsága szerint a háromfázisú töltés egyébként is szabványtalan hálózati visszahatást okoz).

A vizsgált autó az ELMŰ Hálózati Kft. által vásárolt átalakított Fiat 500 típusú gépjármű. A helyszíni mérésekre az ELMŰ Hálózati Kft Váci úti teremgarázsában lévő, erre a célra kialakított csatlakozó helyen került sor, melynek névleges csatlakozási értéke 3x32A. A Fiat 500-as autónál mérés során folyamatosan mérték a három fázisfeszültséget, és a töltő áramának fázisában (T fázis) az áramot. A mért jelek 1 perces átlagait tárolták.

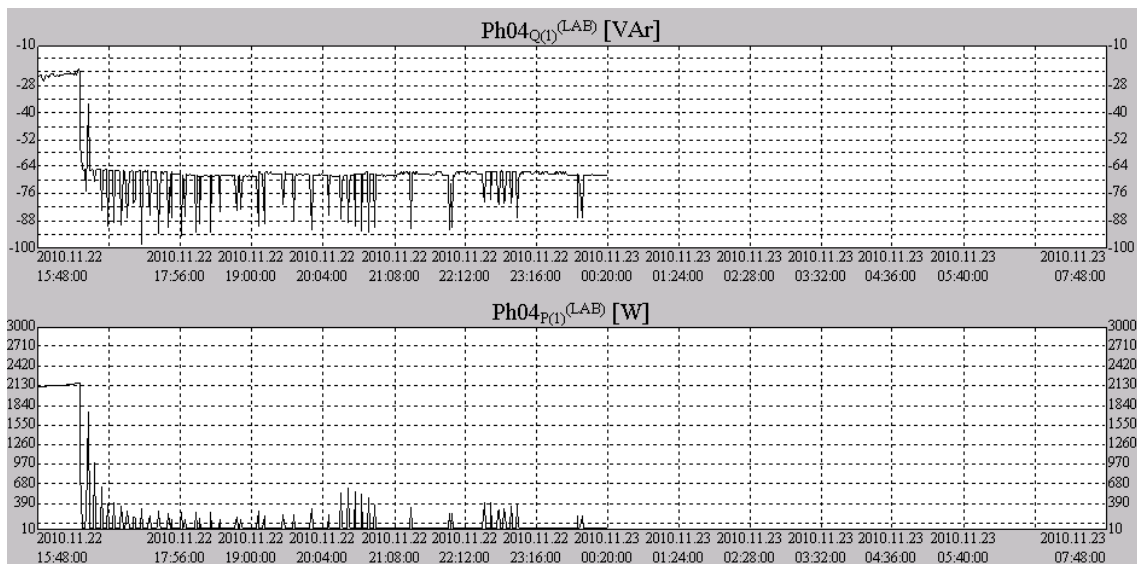
Bár az autók töltése nem a vizsgált hálózaton történt, a kapott mérési adatokat mégis elfogadhatjuk, mert feltételezhetjük, hogy az egyes autók töltési karakterisztikái nem térnek el egymástól.



28. ábra: Villamos autó töltésekor mért feszültség és áram időfüggvénye és a belőlük számított látszólagos teljesítmény [20]

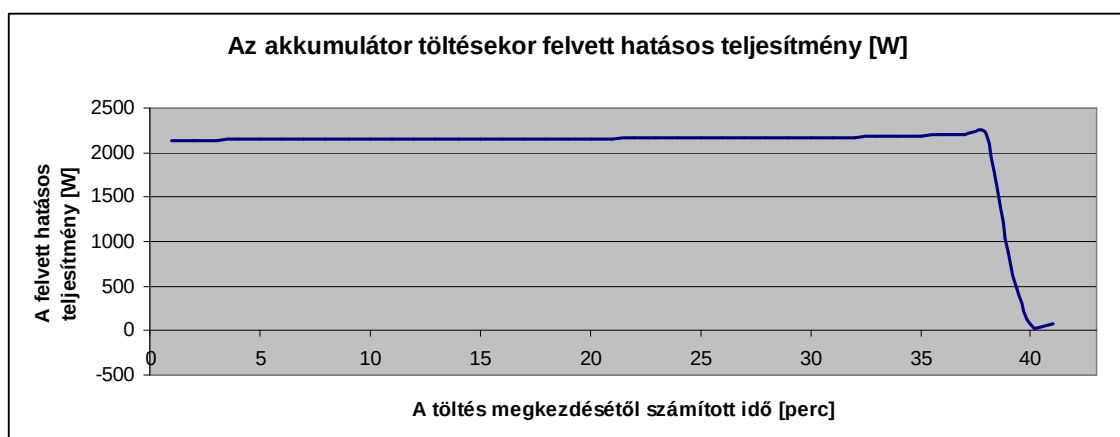
A töltési profilt a fentebb látható 28. ábra alapján a következőképpen lehet értelmezni: Az akkumulátor nem volt sokat használva, így nem kellett sokat tölteni (mindösszesen 37 percig tartott a tényleges töltés). Jól látható, hogy eközben a töltő áramfelvétele állandó, a feszültség kis mértékben változik, vagyis a töltőteliesség nagyon jó közelítéssel állandónak tekinthető. Az akkumulátor feltöltése után csepptöltésre váltott át a töltő: ez a 10 percenkénti, rövid „tüskékben” látható (vizsgálataink szempontjából ez lényegtelen).

A mérési eredmények alapján megerősíthető továbbá az, a szakirodalomban is leírt tény, hogy a villamos autók töltésekor meddőteljesítmény-felvétel gyakorlatilag nincs, a felvett teljesítmény a hatásos teljesítménnyel egyezik meg:



29. ábra: A villamos autó töltésekor felvett meddő- és hatásos teljesítmény. Érdekes a skálázást megfigyelni! [20]

A továbbiakban tehát a hatásos teljesítménnyel dolgozhatunk. Ez a szimuláció szempontjából egy jelentős egyszerűsítésre ad lehetőséget: a $\cos \varphi$ értékeket mindenhol 1-re lehet állítani, viszont ha a későbbiekben szeretnénk nem állandó töltőteliessítményt szimulálni, akkor elegendő a $\cos \varphi$ értéket változtatni. Ugyanis mivel $S \approx P$, ezért P nagyságát egyszerűen a $\cos \varphi$ nagyságának változtatásával lehet módosítani. Elektrotechnikailag ez a szemlélet nem helyes, de a szimuláció céljaira használható.

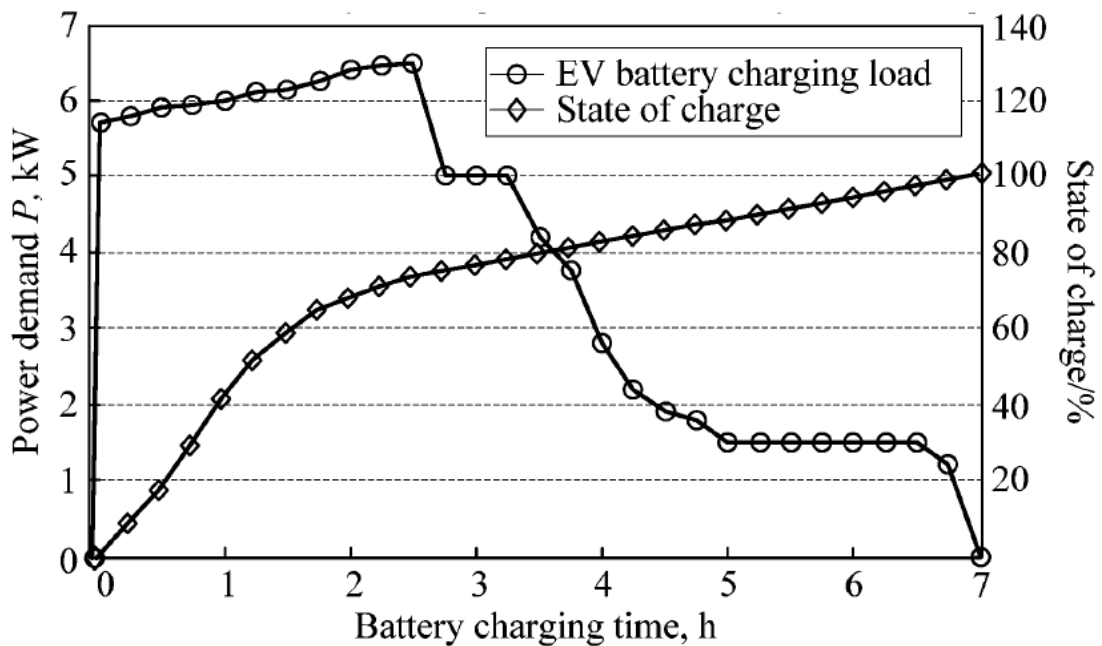


30. ábra: A töltéskor állandó töltőteliessítménnyel számolhatunk

Az előzőekben megállapítottuk tehát, hogy a szimuláció során használhatunk állandó töltőteliessítményt a villamos autó töltési profiljának beállításakor. A dolgozatban eltekintünk annak vizsgálatától, hogy a töltést szabályozzuk, ugyanis bár a

töltőáram szabályozásával nem teljesül az állandó terhelési profil megléte, viszont a szabályozás főleg tarifális és rendszerszintű hatások következtében szükséges ezek az igények és beavatkozási módszerek azonban jelenleg nincsenek kidolgozva. Ha szabályozásra van szükség, akkor a fent említett módszerrel ($\cos \varphi$ állítása) az megoldható.

Érdemes azonban a fellelhető szakirodalom alapján megemlíteni, hogy milyen más töltési karakterisztikák képzelhetők el. A most vizsgált Fiat 500-as akkumulátora lítium-ionos, viszont a mai akkumulátorok között vannak savas akkumulátorok, melyek töltési karakterisztikája a következő:

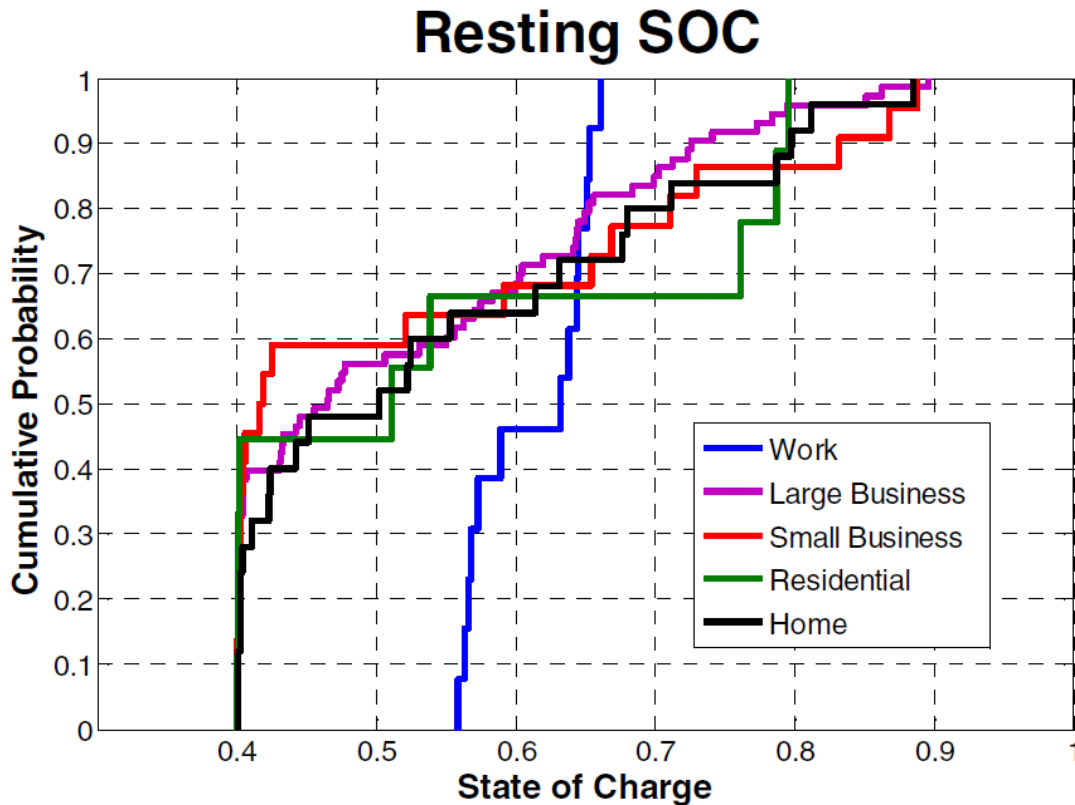


31. ábra: Savas akkumulátor töltési karakterisztikája [21]

Savas akkumulátorokkal rendelkező autók töltésekor így más beállítási paraméterekkel kellene élnünk, nem lehet állandó töltőáramot feltételezni. A továbbiakban nem foglalkozunk a savas akkumulátorok töltésével és feltesszük, hogy a szimulált hálózaton csak lítium-ionos akkumulátorokkal ellátott autók vannak.

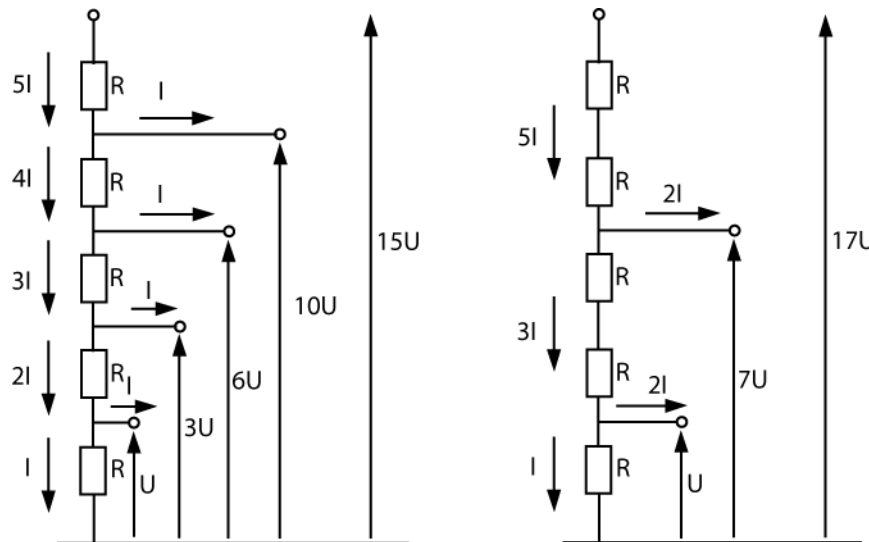
A mérési adatok ugyanakkor nem adnak elég információt az akkumulátorok töltéséről, mert arról nem adnak számot, hogy kisütött akkumulátor töltése esetén milyen az áramfelvétel a töltés kezdetén. A következő ábrán egy valós adatgyűjtés [22] eredménye látható, mely rávilágít arra a tényre, hogy az autók hazaérkezésekor az akkumulátoraik nincsenek még teljesen lemerülve. Ez az előbbi mellett azt is jelenti,

hogy az akkumulátorok töltési ideje lerövidül, így a hálózatra gyakorolt hatás is kisebb lesz. Ezt a tényt most figyelmen kívül hagytuk, hogy a worst case esetet tudjuk szimulálni, de érdemes a végső következtetések levonásánál figyelembe venni, hogy az előbb említett tény miatt *a valós hatás a szimuláltnál kisebb lesz.*



32. ábra: Az autók akkumulátorának töltöttsége egyes lehetséges töltési helyszínekre való érkezésükkor [22]

A villamos autók töltésének szimulációjakor beállítási paraméter az is, hogy az egyes töltőfejeket milyen távolságban helyezzük el egymástól az adott kábelszakaszon. Más lesz ugyanis a feszültségesés a kábelen eltérő térbeli elhelyezés esetén. A hatás ugyan kicsi, mert egy villamos autó töltése a rendszer egésze szempontjából kis hatással jár, de érdemes megemlíteni. A jelenség a következő ábrával magyarázható:



33. ábra: *Annak szemléltetése, hogy a villamos autók térbeli eloszlása miatt befolyásolja az ellátó kábelben fellépő feszültségesést*

A kábeleket modellezhetjük ellenállásukkal és tegyük fel, hogy a kábel 1m-es darabjai R ellenállásúak. A korábbiakból azt tudjuk, hogy az autók áramfelvétele egyforma, jelölje ezt I . A 33. ábrán a baloldalon egy olyan eset látható, amikor az adott kábelszakaszon 1 méterenként helyezünk el autókat. A jobb oldali ábrán pedig az az eset látható, amikor 2 méterenként helyezzük el az autókat, de itt egy csomópontba két autót, vagyis az áramfelvétel is kétszeres. Kiszámolhatjuk a feszültségeséseket a kétféle elrendezés esetén, s azt tapasztaljuk, hogy nem egyformák.

Mindezek ellenére a szimuláció során egyenletes eloszlást tételeztünk fel, mert ez könnyebben áttekinthető szimulációs hálózatot jelent, valamint a töltőfejek elhelyezésekor reális közelítésként fogható fel és a többszöri, módosított, a fenti hatást is figyelembe vevő (ugyanakkor csak részleges) szimulációk alapján elmondhatjuk, hogy nem okoz ez a megközelítés nagy eltérést a valós körülményektől.

Az autók töltésénél fontos beállítási paraméter a töltés kezdetének időpontja és a töltési idő. Az előbbi mérési adatokból láthattuk, hogy a töltési idő nagymértékben függ az akkumulátor töltöttségi állapotától. Említettük, hogy a szimulációban első közelítésben ezt nem vesszük figyelembe. A töltöttségi állapot figyelembe vétele a szimuláció szintjén csak sztochasztikus vizsgálattal lenne megvalósítható, mely magában foglalja a járműtulajdonosok vezetési szokásait, valamint a napi megtett útvonalak hosszát.

Ehelyett azt tételezzük fel, hogy az autók 8, illetve 6 órán keresztül konstans áramfelvétellel töltenek.

A töltési idő kezdeteként a járművek töltőre csatlakozásának időpontját adhatjuk meg, vagyis a korábban ismertetett szabályozatlan töltést tételezzük fel. Időben eltolt töltés esetén ezt a módszert nem kell használni, így sokkal egyszerűbb beállítási feltételeknek kell eleget tenni. Nagyszámú minta esetén élhetünk statisztikai módszerekkel, így a számolási egyszerűség kedvéért az autók beérkezését Poisson-folyamatként modellezhetjük. Az ilyen típusú modellezés azért előnyös, mert az elméleti alapokhoz nem kell különválasztani azt a két esetet, hogy az autó hazaérkezése után egyből felcsatlakozik tölteni és egyből ki is szolgálják, illetve hogy nem szolgálják ki egyből, hanem egy adott időpont után (pl. 21 óra után) kezdődik meg a töltés. Ugyanis ha az utóbbi, eltolt töltés van, akkor sem lehet az autókat egyszerre a hálózatra csatlakoztatni, hanem szükséges bizonyos időbeli különbség a kiszolgálások között. Ezt a folyamatot ugyanúgy lehet Poisson-folyamatként kezelni, mint az autók érkezését, a különbség a két eset között csak a Poisson-folyamat λ paraméterében van. A feladat tehát: a töltés megindulásának időpontjait kell meghatározni az egyes autók esetében. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy egy szakaszt (ami pl. 4 órányi időintervallumot jelent) osszunk fel a töltendő járművek számának megfelelő darabra úgy, hogy a töltési időpillanatok Poisson-eloszlást kövessenek a szakaszon (természetesen követhetnének normális eloszlást is, mindezt valós mérési adatokból lehetne meghatározni. Ilyen mérési adatok azonban az irodalomban is csak korlátozottan állnak rendelkezésre). Ehhez a legjobb az lenne, ha megadnánk egy adatsort, ami azt jellemzi, hogy az autók milyen időpontban érkeznek haza tölteni, vagy hogy időben késleltetett töltés esetén mikor kap töltési engedélyt az autó. Vagyis mindkét esetben a vizsgálat célja az, hogy Poisson-eloszlású legyen a töltések kezdeti időpontjai eloszlása.

Szükség van tehát az autók töltési időpontjainak meghatározására, amely egy adatsort jelent. A töltési időket a szimuláció során a terhelési profiloknál beállított 15 perces időintervallumok miatt érdemes itt is 15 percre megválasztani, hiszen a beállítás miatt ennél finomabb osztásnak nincs értelme, nem lehet ugyanis kezelni őket. Ez pedig azt jelenti, hogy ha feltesszük, hogy az autók 95%-a egy 4 órás intervallumban hazaérkezik, akkor $240/15=16$ csoportot alakíthatunk ki, vagyis ennyi késleltetési csoportot definiálhatunk.

Az egyes csoportok értelmét egy példán keresztül világítjuk meg. Tekintsük például a 6. csoportot, mely megadja, hogy az általunk kiválasztott időponttól (pl. 21 óra, amikortól engedélyezzük a töltést) számított $5 \cdot 15 = 75$ és $6 \cdot 15 = 90$ perces intervallumban, tehát 22:15 és 22:30 között kezdődik a töltés. Mivel további finomítást nem végzünk, ezért csak azt tudjuk megmondani, hogy ebben az intervallumban hány autónak adunk töltési engedélyt, gyakorlatilag 22:15-ös kezdéssel (a valóságban tehát nem kellene ezeknek az autóknak mind ugyanebben az időpillanatban elkezdniük a töltést, de mivel nem tudjuk a beosztást finomítani, ezért mi a 22:15-ös kezdést adjuk meg). Ehhez az intervallumhoz hozzárendelhetjük az akkor tölteni elkezdő autók számát. Hasonlóképpen mindegyik ilyen intervallumhoz hozzárendeljük az akkor tölteni kezdő autók számát, s így kapunk 16 csoportot, praktikusán 16 eltolási lehetőséget, tehát töltési profilt. Ezekre a csoportokra illeszkedésvizsgálattal meg lehet állapítani, hogy Poisson-eloszlást követnek-e (másfajta eloszlást is tesztelhetünk így). A következőkben tekintsük át az illeszkedésvizsgálat, mint hipotézisvizsgálat alapjait.

Az illeszkedésvizsgálat egy nemparaméteres statisztikai próba, melynél adott egy $\underline{\pi} = [\pi_1; \pi_2; \dots; \pi_r]$ eloszlás, amit mi nem ismerünk. Nevezzük ezt igazi eloszlásnak és vegyünk belőle egy független mintát: $X_1, X_2, \dots, X_n$ -t.

Ezután mi megadunk egy $p = [p_1; p_2; \dots; p_r]$ eloszlást. Azt szeretnénk tesztelni, hogy az igazi eloszlás megegyezik-e az általunk adottal. A hipotéziseink így:

$$\begin{aligned} H_0 : \underline{\pi} &= \underline{p} \\ H_1 : \underline{\pi} &\neq \underline{p} \end{aligned}$$

A döntésnél a cél: Ha H_0 -t elutasítjuk, akkor annak jó oka legyen. Következésképpen, annak van bizonyító ereje, ha H_0 -t elutasítjuk, és H_1 -et fogadjuk el.

Az illeszkedésvizsgálat a következő teszt statisztika szerint történik:

$$\chi^2_{r-1} = \sum_{i=1}^r \frac{(N_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i},$$

ahol

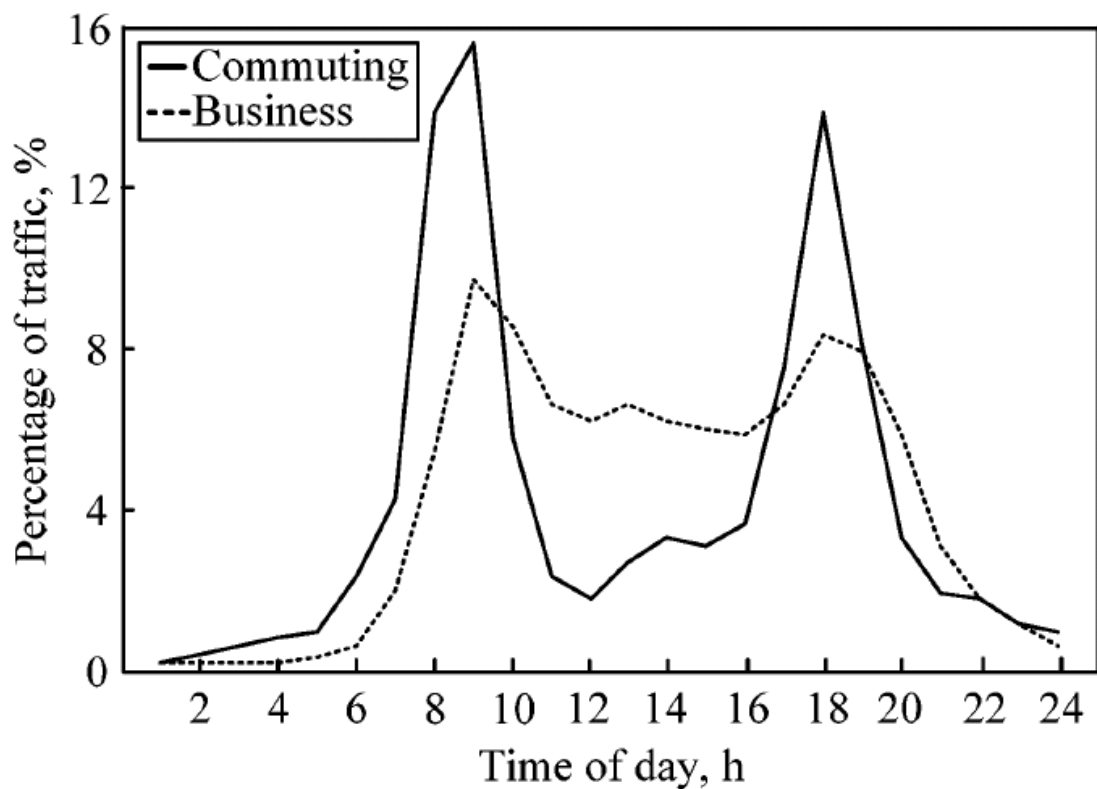
- N_i azt jelenti, hogy hányszor fordult elő az i érték az első n kísérletben (esetünkben azt, hogy az i -edik 15 perces intervallumban hány autó érkezett/kapott töltési parancsot)
- n a kísérletek száma (esetünkben az összes érkező/tölteni kívánó autó)

- r az eloszlás szabadságfoka (esetünkben, ha 4 órás össz-időintervallumot nézünk 15 perces intervallumokkal, akkor $r=240/15=16$)
- p_i az egyes események valószínűsége (esetünkben, mivel Poisson-eloszlást szeretnénk, ezért $p_i = \frac{\lambda^i}{i!} \cdot e^{-\lambda}$, ahol λ a Poisson-eloszlás paramétere, esetünkben a beérkezési gyakoriság) [23], [24]

A töltési profilok megadásánál – mint már említettük – valós adatok felhasználása lenne a legjobb. Nem áll rendelkezésre azonban olyan adatsor, amely azt tartalmazná, hogy az egyes járművek milyen időpontokban érkeznek haza. Ezért a szimuláció során azt az utat követtük, hogy mi adtunk meg lehetséges beérkezési számokat az egyes intervallumokra, majd azt ellenőriztük, hogy az így kapott mintasor Poisson-eloszlású-e.

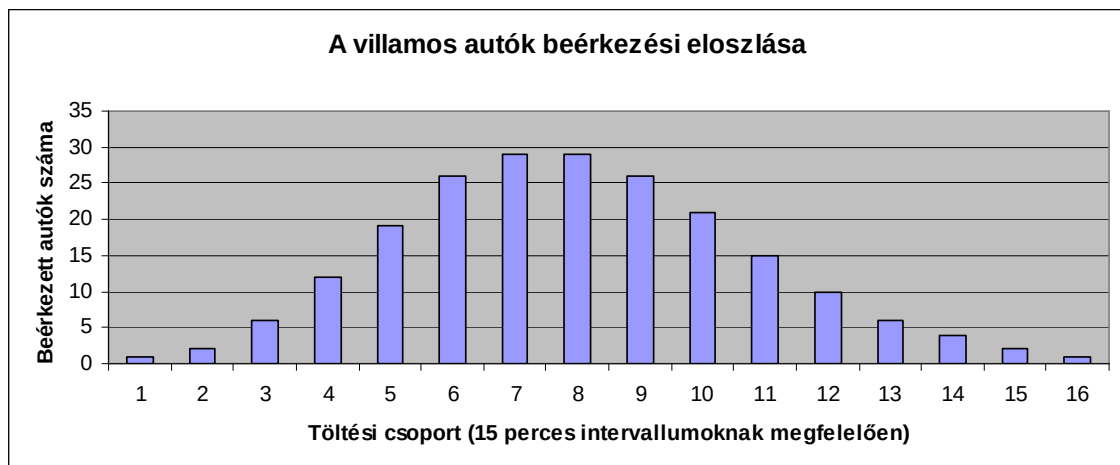
A vizsgált hálózatra 1064db fogyasztó csatlakozik. Már volt róla korábban szó, de a jobb áttekinthetőség kedvéért itt újra megismételjük, hogy a fogyasztók csoportosítását hogyan végeztük el. A szimulációs programban ábrázolt hálózat áttekinthetőségét és a kezelhetőséget megkönnyítendő a fogyasztókat csoportosítjuk, ami azt jelenti, hogy a hálózatot jelképező diagramon egy terhelést jelző szimbólum a valóságban több fogyasztót jelent. Például a KIF sín és a 3722-es pont közötti kábelben 48darab fogyasztó van, s 6 csoportot hoztunk létre, így egy ilyen terhelés valójában 8 fogyasztót jelent. Természetesen a szimulációs beállításoknál ezt figyelembe kell venni, mégpedig úgy, hogy a háztartási terhelést nem egyetlen háztartás, hanem nyolc háztartás együttes terhelése alapján kell megválasztanunk. Ezzel az eljárással 209 darab ilyen "összefogott" háztartási terhelést alakítottunk ki a hálózaton.

Tegyük fel, hogy minden, az előbb definiált terhelésre jut egy villamos autó, a vizsgált hálózaton tehát $n=209$ autót tételezünk fel, ami 20%-os villamos autó részarányt jelent az összes fogyasztóra vonatkoztatva ($209/1064 \cdot 100 \approx 20\%$), vagyis kb. minden ötödik háztartásban van villamos autó. Természetesen ennél nagyobb részarányt is fel lehet venni és fel is veszünk a szimulációs vizsgálat során. A villamos autók beérkezési eloszlását ez a megváltozott részarány nem fogja megváltoztatni, mert az egyes időintervallumokban érkező autók számát is arányosan növeljük.



34. ábra: Az autók használatának időbeli eloszlása a nap során [21]

Az autók beérkezésének eloszlását a 34. ábra alapján határoztuk meg. A 34. ábrán látható, hogy az autók használatának két nagy csúcsa van, mi a második, 16-20 óra közötti csúcst használtuk, mert ez vonatkozik a hazaérkezésre.



35. ábra: A villamos autók szimuláció során használt beérkezési eloszlása

Természetesen a felvett eloszlás nagyon „kitenyésztett”, hiszen eleve úgy lett felvéve az adatsor, hogy az Poisson-eloszlást mutasson. Az itt szereplő eljárás célja

annak bemutatása, hogy ha valós statisztikai adatok állnak rendelkezésre az autók beérkezéséről, akkor illeszkedésvizsgálattal lehetőség van arra, hogy ellenőrizzük, hogy milyen eloszlást követ a mintasor.

Az autók beérkezési intenzitása legyen $\lambda=8$ autó/negyedóra. Ekkor a Poisson-eloszlás szerint: $p_i = \frac{\lambda^i}{i!} \cdot e^{-\lambda}$, amely értékek a λ paraméter ismeretében számíthatók.

A teszt statisztika szerint tehát:

$$\begin{aligned} \chi^2_{r-1} = \sum_{i=1}^r \frac{(N_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i} = & \frac{(1 - 209 \cdot 0,002683701)^2}{209 \cdot 0,002683701} + \frac{(2 - 209 \cdot 0,010734804)^2}{209 \cdot 0,010734804} + \\ & + \frac{(6 - 209 \cdot 0,028626144)^2}{209 \cdot 0,028626144} + \frac{(12 - 209 \cdot 0,057252288)^2}{209 \cdot 0,057252288} + \frac{(19 - 209 \cdot 0,091603662)^2}{209 \cdot 0,091603662} + \\ & + \frac{(26 - 209 \cdot 0,122138215)^2}{209 \cdot 0,122138215} + \frac{(29 - 209 \cdot 0,139586532)^2}{209 \cdot 0,139586532} + \frac{(29 - 209 \cdot 0,139586532)^2}{209 \cdot 0,139586532} + \\ & + \frac{(26 - 209 \cdot 0,124076917)^2}{209 \cdot 0,124076917} + \frac{(21 - 209 \cdot 0,099261534)^2}{209 \cdot 0,099261534} + \frac{(15 - 209 \cdot 0,072190206)^2}{209 \cdot 0,072190206} + \\ & + \frac{(10 - 209 \cdot 0,048126804)^2}{209 \cdot 0,048126804} + \frac{(6 - 209 \cdot 0,029616495)^2}{209 \cdot 0,029616495} + \frac{(4 - 209 \cdot 0,016923711)^2}{209 \cdot 0,016923711} + \\ & + \frac{(2 - 209 \cdot 0,009025979)^2}{209 \cdot 0,009025979} + \frac{(1 - 209 \cdot 0,00451299)^2}{209 \cdot 0,00451299} = \underline{\underline{0,463107}} \end{aligned}$$

A teszt statisztika kiszámolása után meg kell határoznunk, hogy az r szabadságfokú χ^2 eloszláshoz és 0,95 (vagy egy általunk választott másik) szignifikancia szinthez tartozó kritikus érték (κ) mennyi. Fix n -re H_0 -t elfogadjuk akkor és csak akkor, ha $\chi^2_{r-1} < \kappa$.

A kritikus értéket a χ^2 eloszláshoz tartozó táblázatból tudjuk meghatározni. Mivel most $r=16$, ezért $\kappa = \chi^2_{r-1}(0,95) = \chi^2_7(0,95) = 14,067$.

És mivel $14,67 > 0,463107$, ezért végeredményben ezzel a hipotézisvizsgálattal igazoltuk, hogy a töltés időbeli eltolása során az általunk választott időpontok Poisson-eloszlást követnek.

3.3. Szimuláció és a kapott eredmények

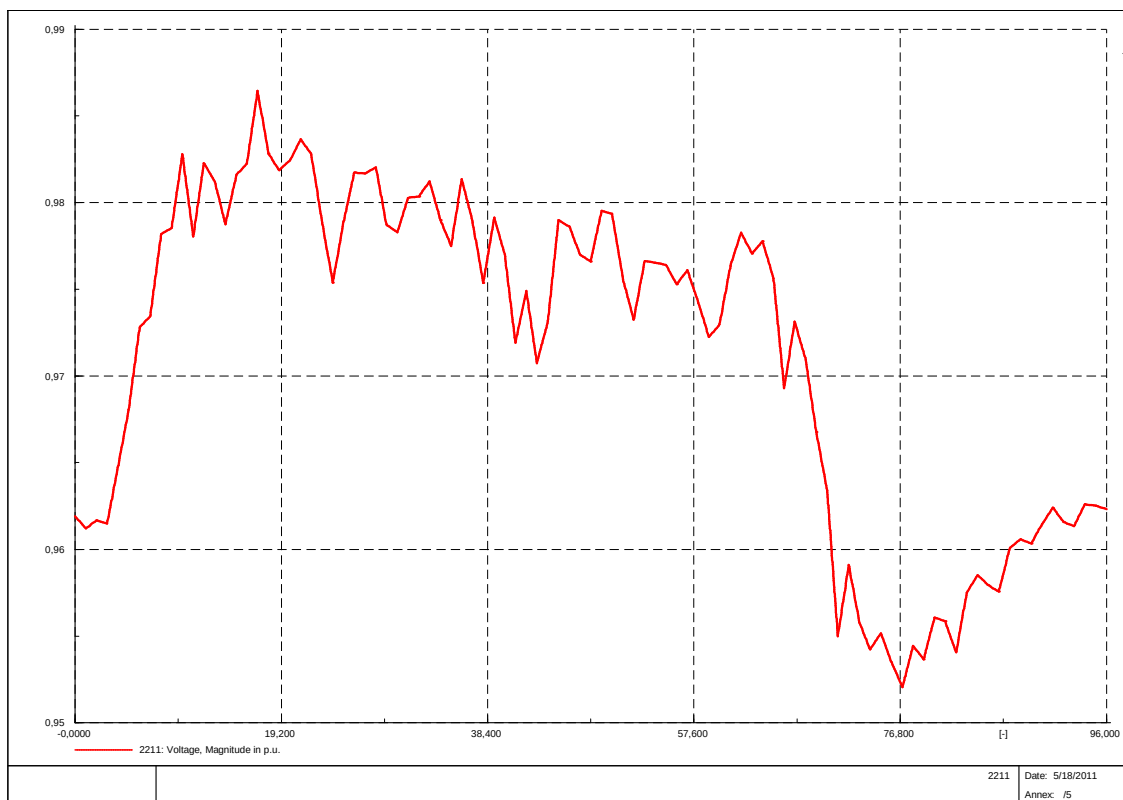
A szimulációt a DIgSILENT Power Factory szimulációs program (a továbbiakban DIgSILENT) segítségével végeztük. A szimulációs technika alkalmazásakor támaszkodtunk [25]-re.

Az előzőekben meghatároztuk az egyes fogyasztók terhelési beállításait, melyeket aztán a DIgSILENT-ben beállíthatunk. Mivel a terhelési profilokat egy napra, 15 perces bontásban adtuk meg, ezért a szimulációhoz módosított load-flow számító algoritmus szükséges. Ezt az algoritmust a DIgSILENT Support bocsátotta rendelkezésünkre.

A szimuláció segítségével az egyes hálózati elemek, elsősorban a transzformátor és az egyes kábelek terhelését, valamint a kábelek végpontjain (a villamosan legtávolabb lévő fogyasztónál) kialakuló feszültségeket és így a feszültségeséseket vizsgáltuk. A kábelek közül csak a leginkább terhelődő kábel terhelődését mutatjuk be. Hasonlóképpen a fogyasztói végpontoknál mért feszültségek közül is csak a legnagyobb feszültségesésű esetet mutatjuk be. A szimuláció során ennél több esetet is megvizsgáltunk, mi viszont csak a legnagyobb terhelődést szeretnénk megadni.

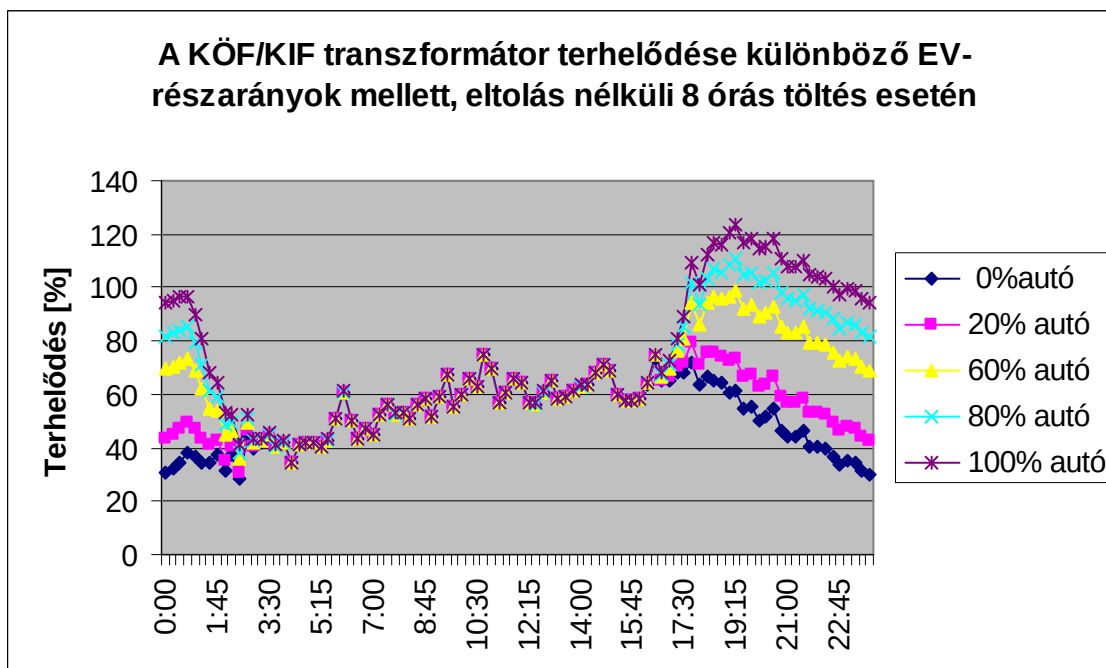
A terhelődéseket és a feszültségeséseket különböző EV-részarányok esetén adtuk meg. Ez azt jelenti, hogy az autók számát úgy változtatjuk, hogy például minden kábelszakaszon csökkentjük eggyel az egyes háztartási modellre felvett autósza^mot. A kapott adatok azonban nem lesznek egyenletesen elosztottak, mert vannak olyan kábelszakaszok, ahol az autók számának állításával az adott kábelszakaszon található autók száma felére csökken (ez abban az esetben történik meg, ha egy háztartási fogyasztói csoportot modellező KIF terhelés 2 autót tartalmazott), míg ahol ez a szám pl. 6 autó, ott a csökkenés kisebb mértékű (5/6-ára). Az autók számának változtatása tehát nem fogja az egyes kábelszakaszokon jelentkező terheléseket arányosan csökkenteni, így előfordulhat, hogy az egyes szakaszokon eltérő mértékű túlterhelődések jönnek létre. Ennek hatását nem vizsgáltuk.

A DIgSILENT Power Factory-val végzett szimulációk a 36. ábrán látható diagram szerinti eredményt adnak.

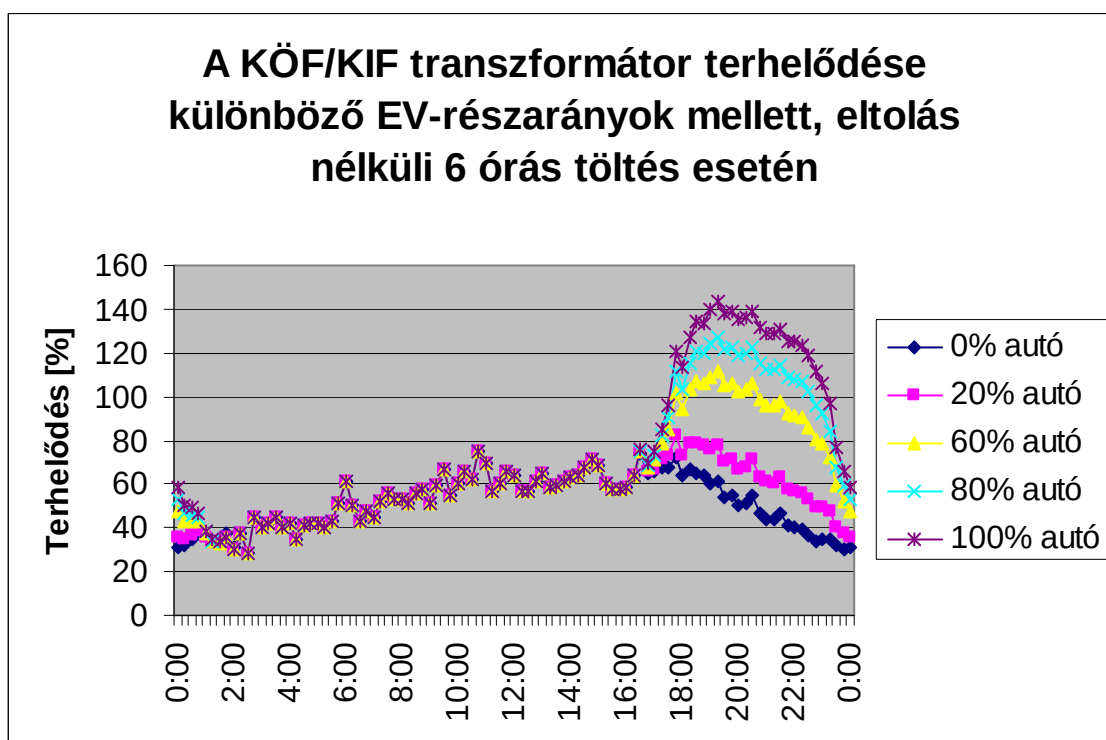


36. ábra: Példa a DIgSILENT Power Factory szimulációs szoftver által szolgáltatott kimenetre

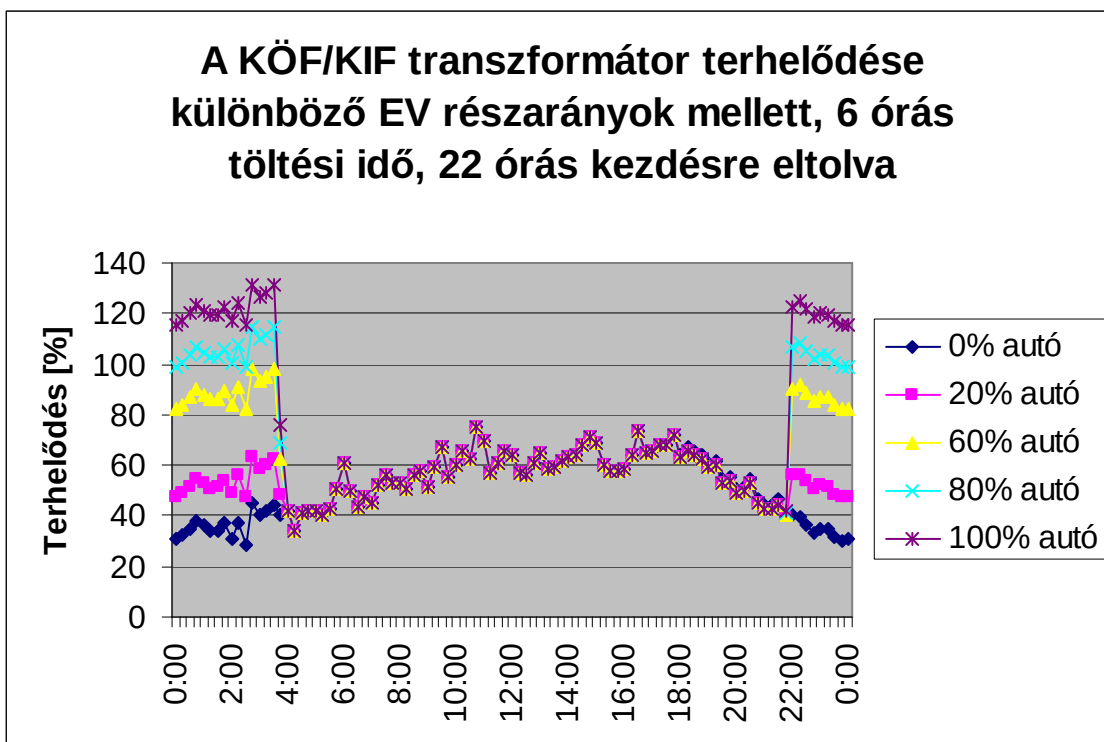
Ilyen ábrákat nehéz összehasonlítani, ezért a jobb megértés céljából az adatsorok exportálásával Excel diagramokat hoztunk létre. Az így összefoglalt eredmények láthatók a következő ábrákon:



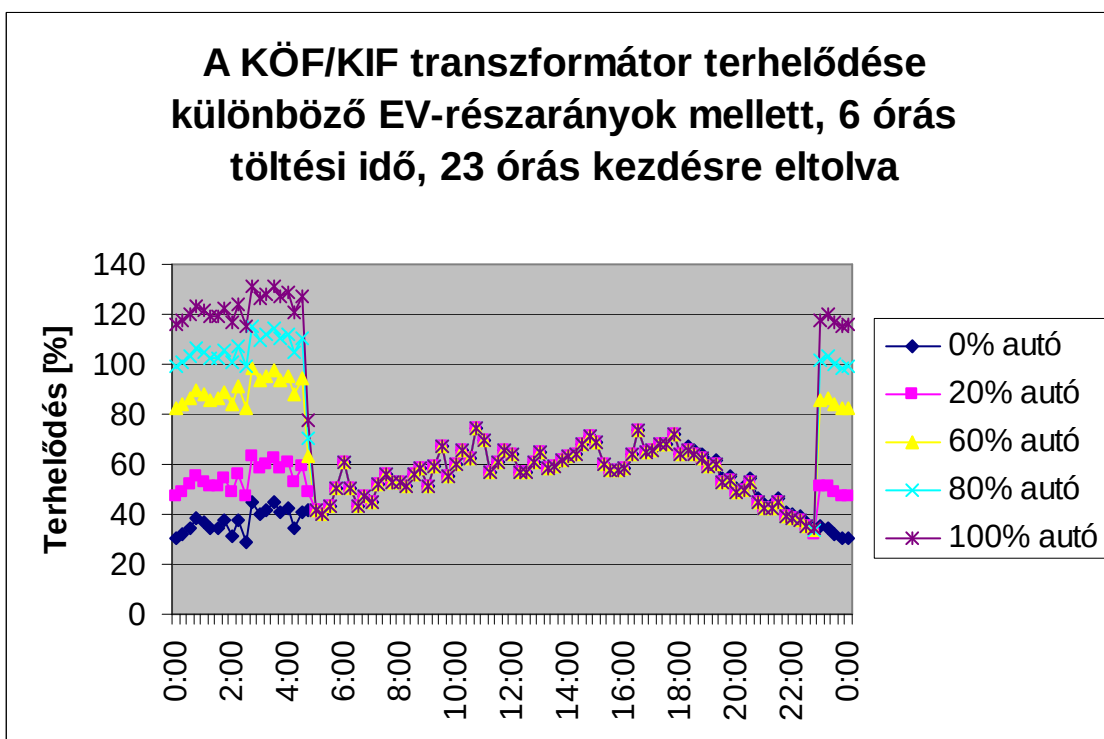
37. ábra: A KÖF/KIF transzformátor terhelődése 8 órás, eltolás nélküli töltés esetén



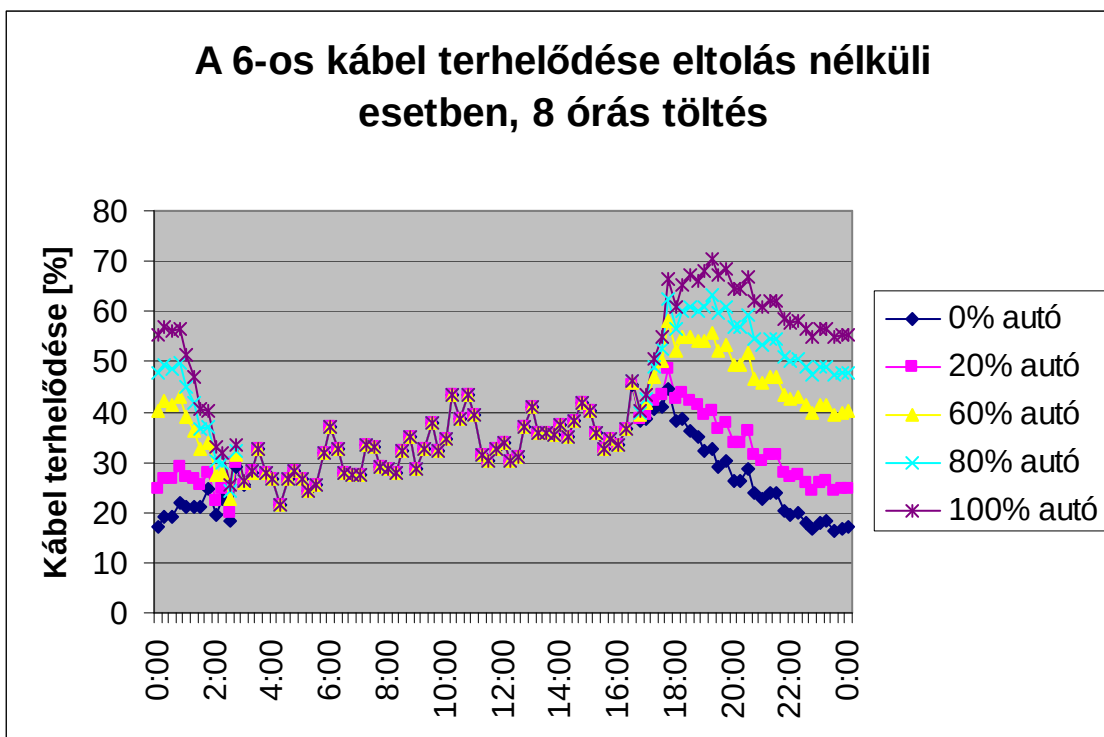
38. ábra: A KÖF/KIF transzformátor terhelődése 6 órás, eltolás nélküli töltés esetén



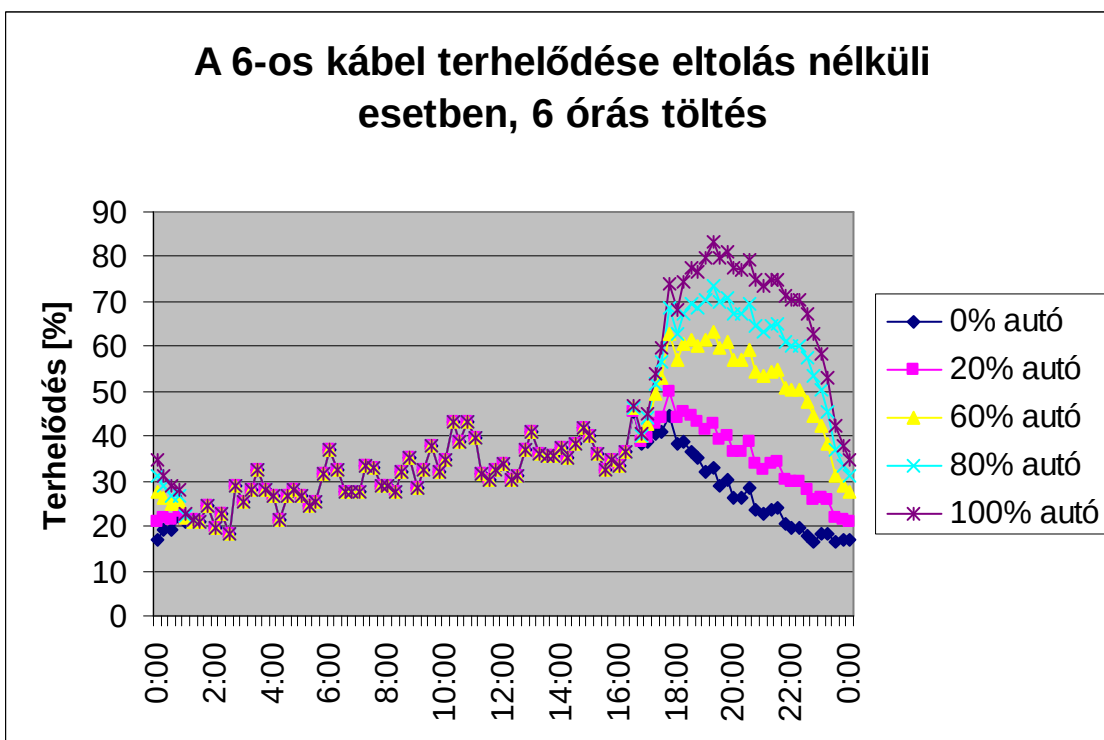
39. ábra: A KÖF/KIF transzformátor terhelődése 6 órás, 22 órára eltolt kezdésű töltés esetén



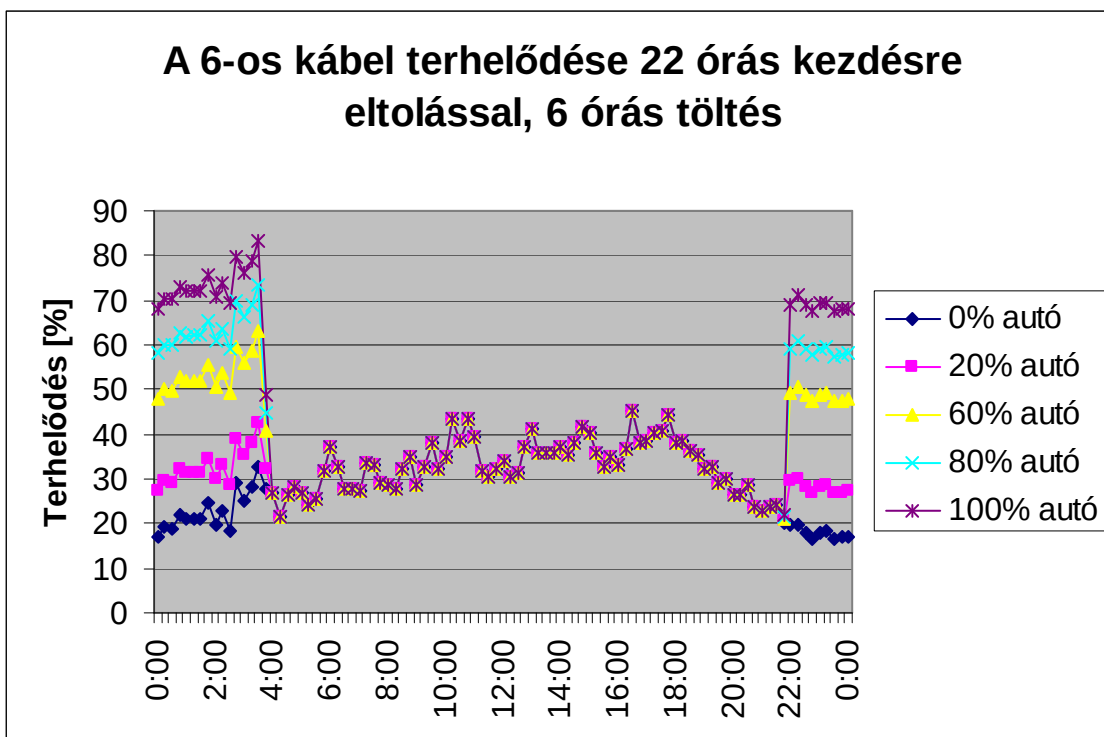
40. ábra: A KÖF/KIF transzformátor terhelődése 6 órás, 23 órára eltolt kezdésű töltés esetén



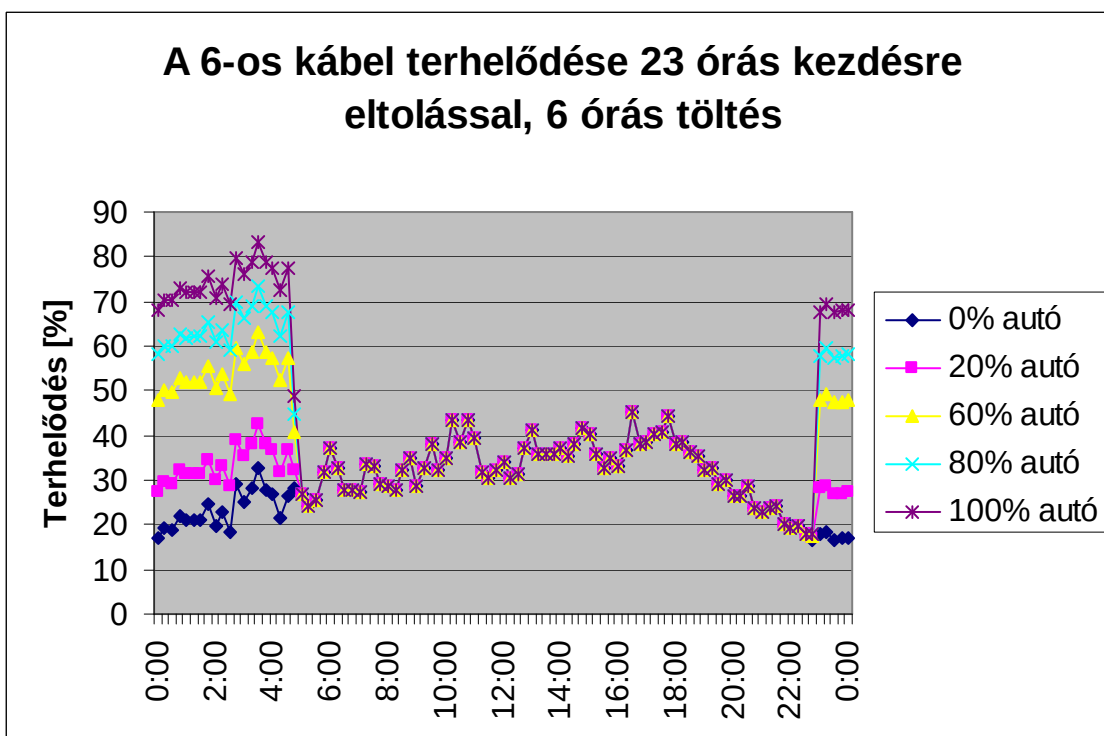
41. ábra: A legjobban terhelődő kábel terhelődése 8 órás, eltolás nélküli töltés esetén



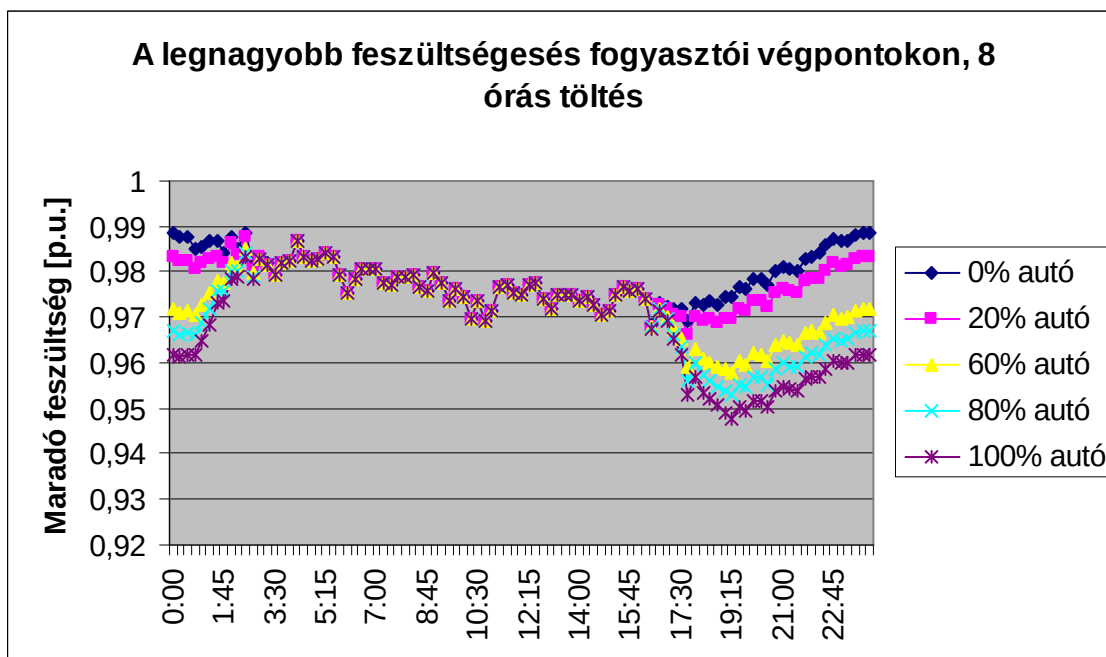
42. ábra: A legjobban terhelődő kábel terhelődése 6 órás, eltolás nélküli töltés esetén



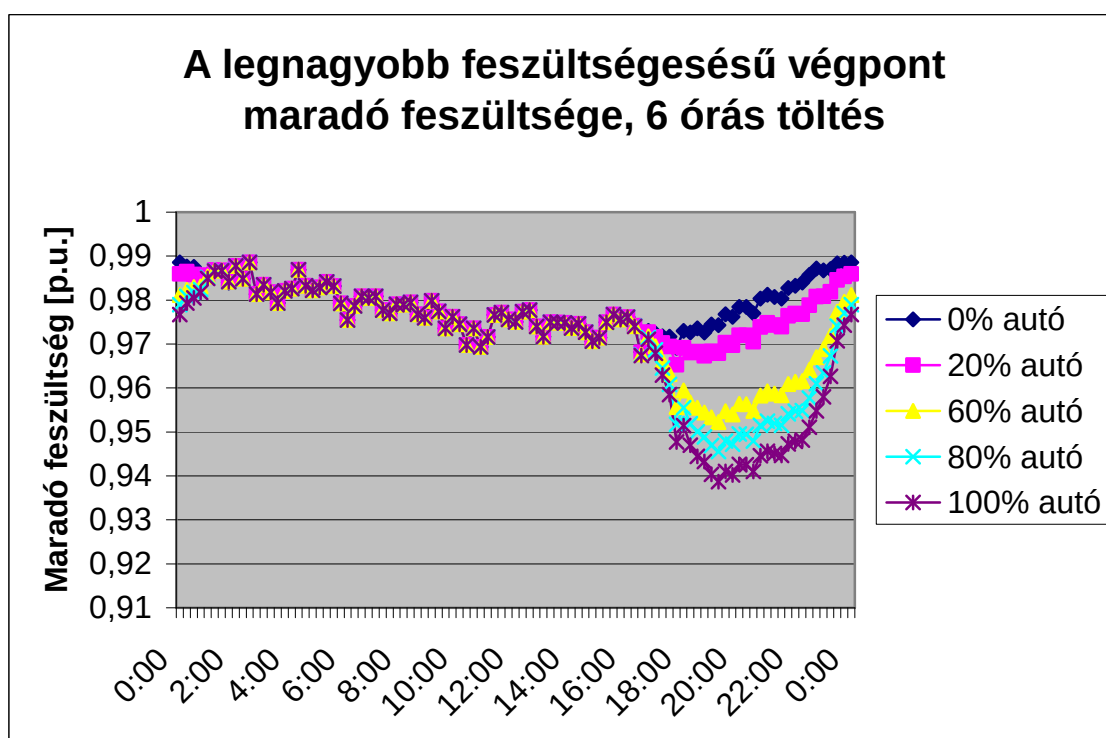
43. ábra: A legjobban terhelődő kábel terhelődése 6 órás, 22 órára eltolt kezdésű töltés esetén



44. ábra: A legjobban terhelődő kábel terhelődése 6 órás, 23 órára eltolt kezdésű töltés esetén

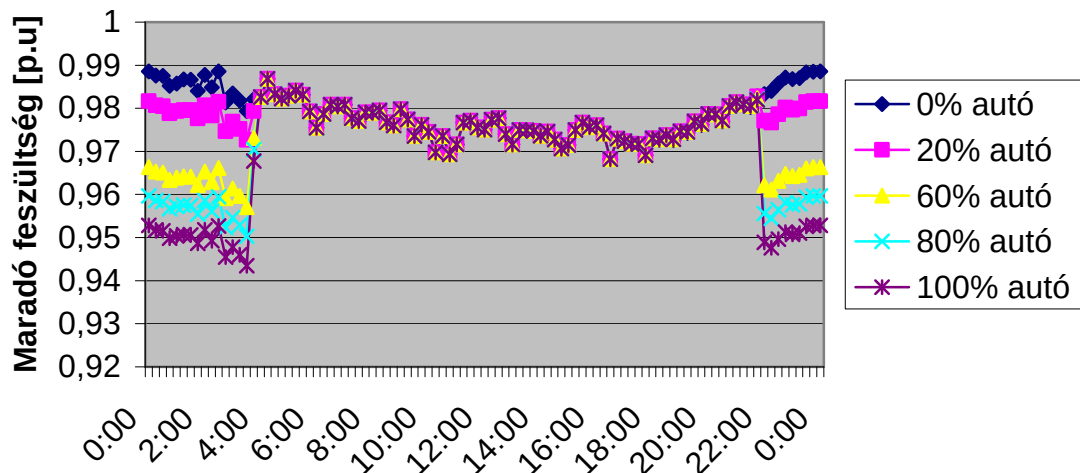


45. ábra: A legnagyobb feszültségesés fogyasztói végponton, 8 órás, eltolás nélküli töltés esetén



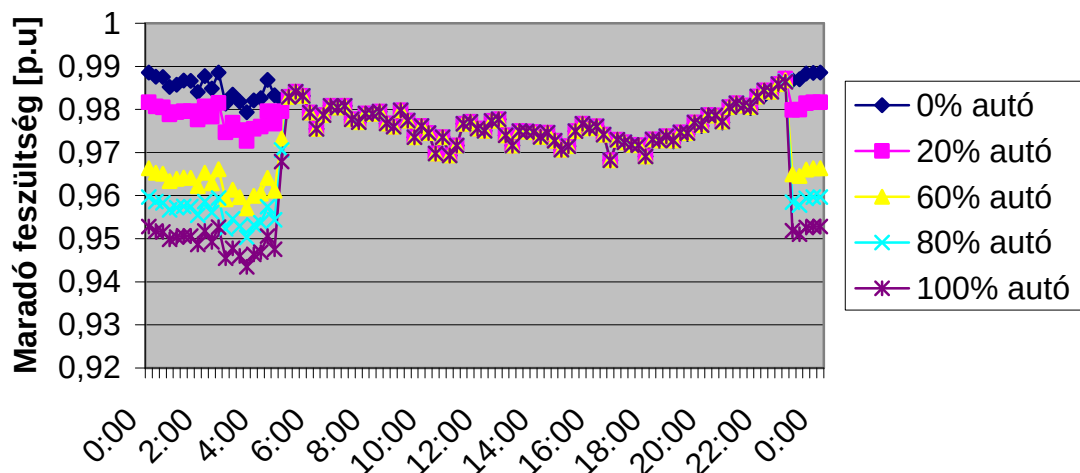
46. ábra: A legnagyobb feszültségesés fogyasztói végponton, 6 órás, eltolás nélküli töltés esetén

**A legnagyobb feszültségesésű végpont
maradó feszültsége, 6 órás töltés, 22 órára
eltolva**



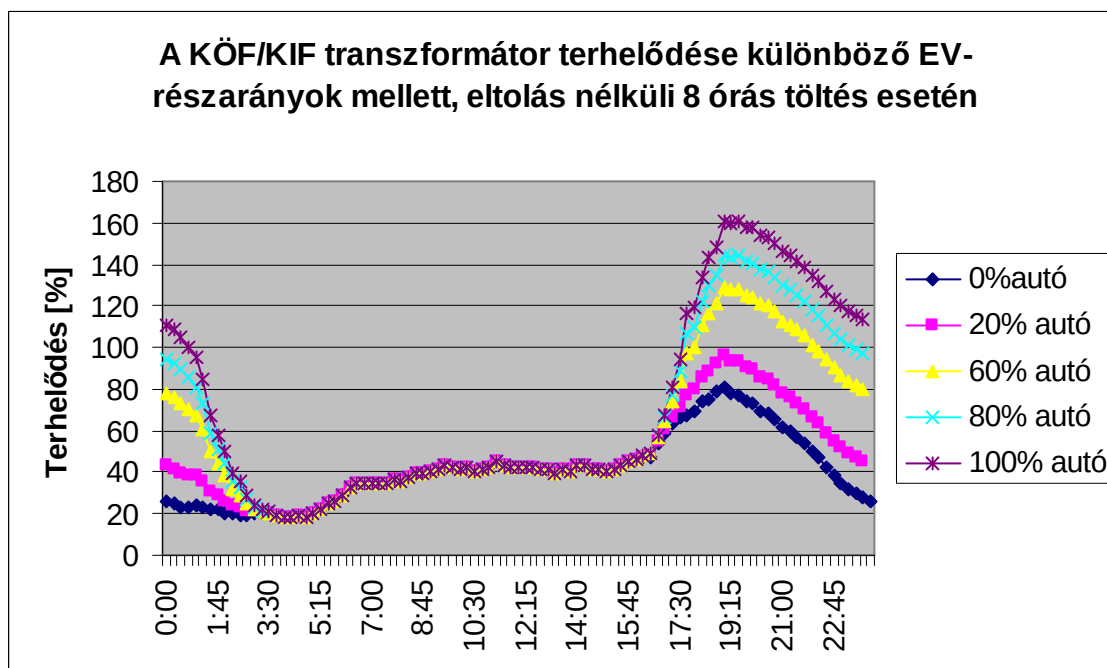
47. ábra: A legnagyobb feszültségesés fogyasztói végponton, 6 órás, 22 órára eltolt kezdésű töltés esetén

**A legnagyobb feszültségesésű végpont
maradó feszültsége, 6 órás töltés, 23 órára
eltolva**

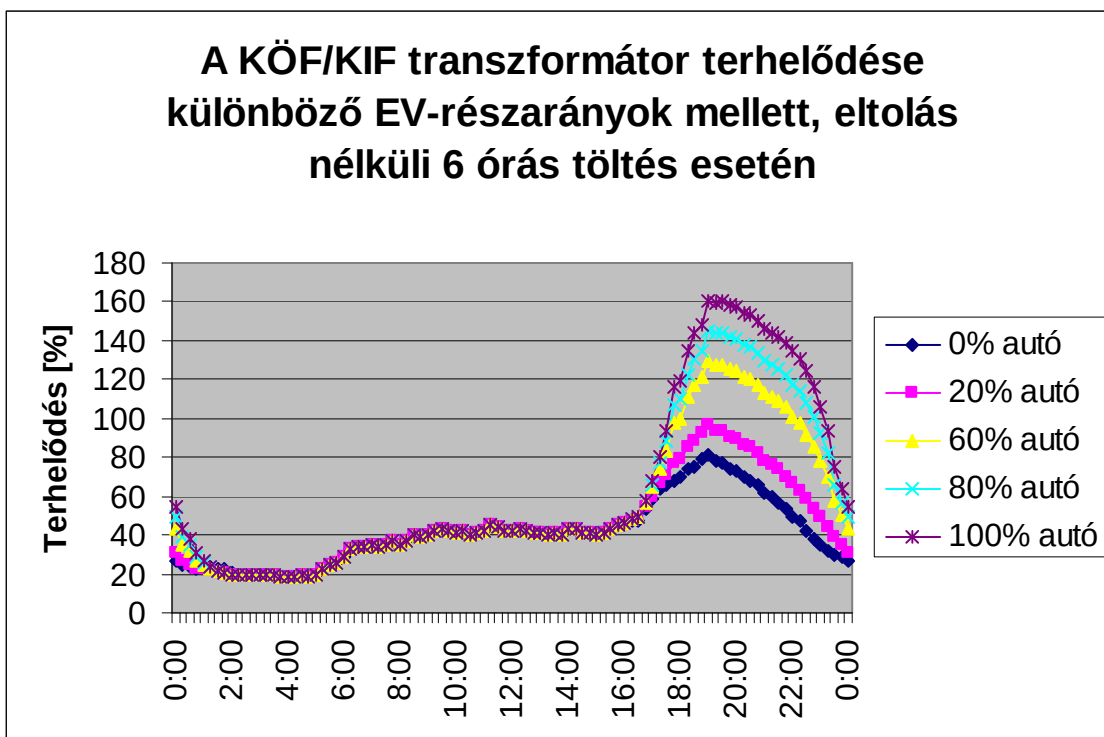


48. ábra: A legnagyobb feszültségesés fogyasztói végponton, 6 órás, 23 órára eltolt kezdésű töltés esetén

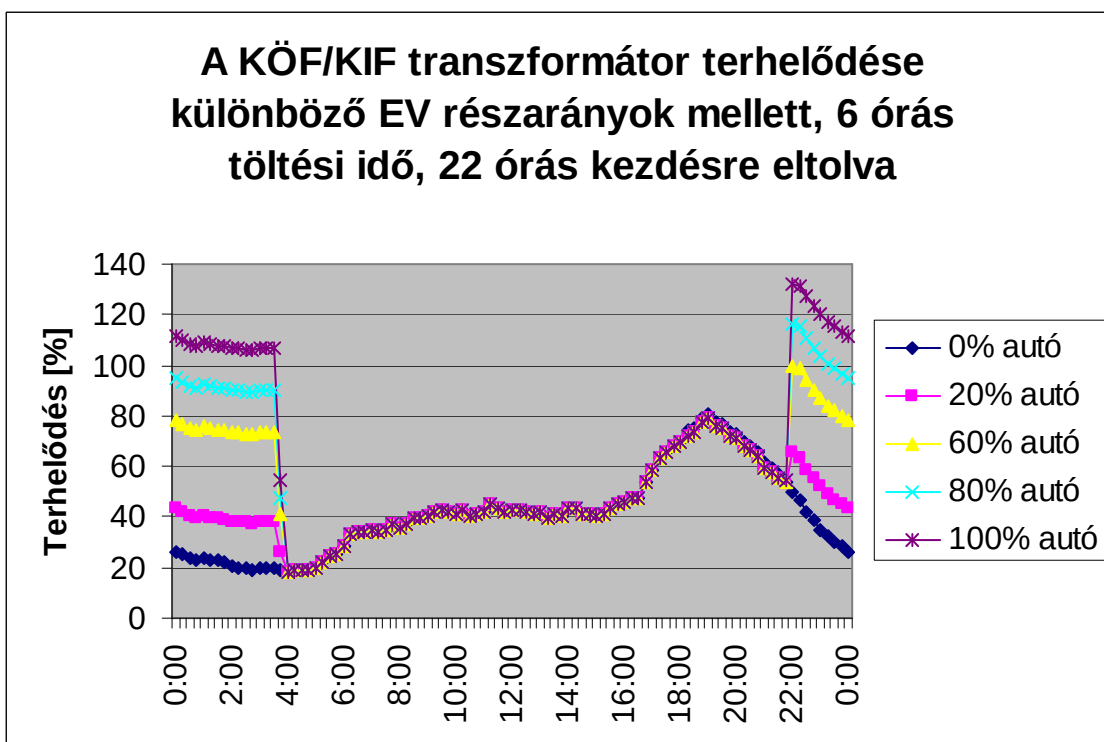
A szimulációkat egy másik háztartási profilokat tartalmazó adatbázis [19] esetén is megvizsgáltuk. Ez az adatbázis átlagos háztartási fogyasztást tartalmaz, gyakorlatilag megegyezik a MEH által publikált [26] lakossági fogyasztási profilokkal. Mivel ezek átlagos fogyasztást jelentenek, nincs szükség többféle háztartási profil létrehozására, hanem minden háztartási profilra ezt lehet beállítani. Értelemszerűen a terhelődés más lesz, mint amikor egyedi háztartási profilokat állítottunk be, így érdemes ezt az átlaggal járó hatást is tanulmányozni.



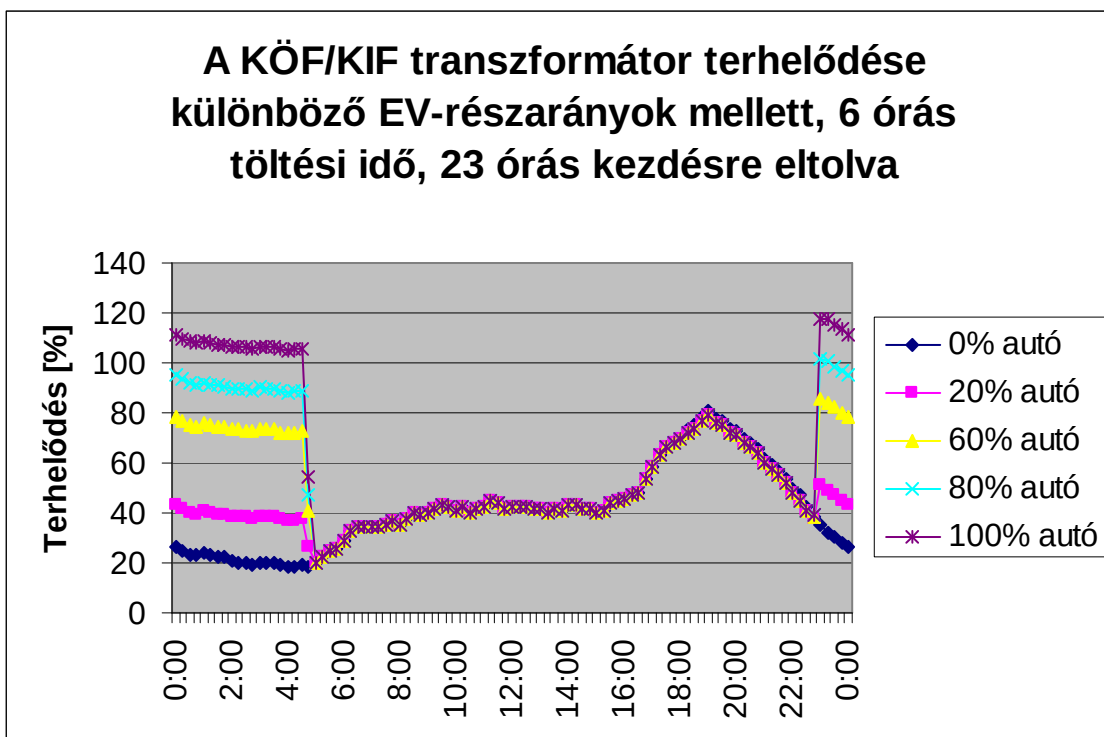
49. ábra: A KÖF/KIF transzformátor terhelődése 8 órás, eltolás nélküli töltés esetén



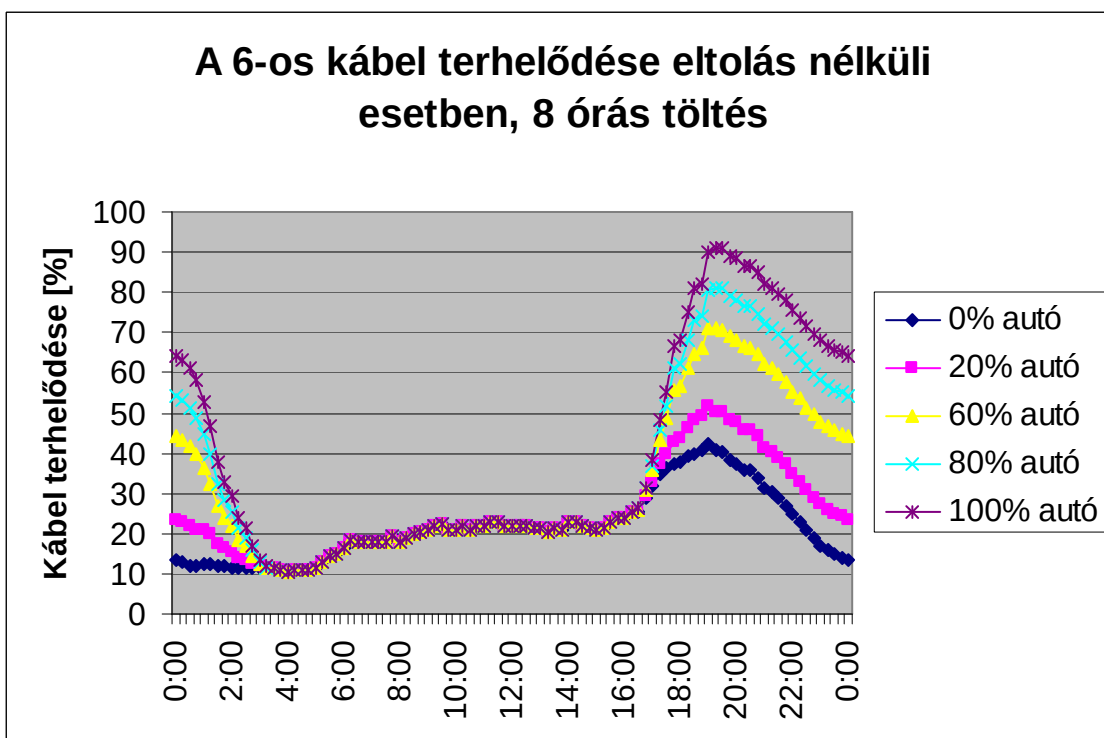
50. ábra: A KÖF/KIF transzformátor terhelődése 6 órás, eltolás nélküli töltés esetén



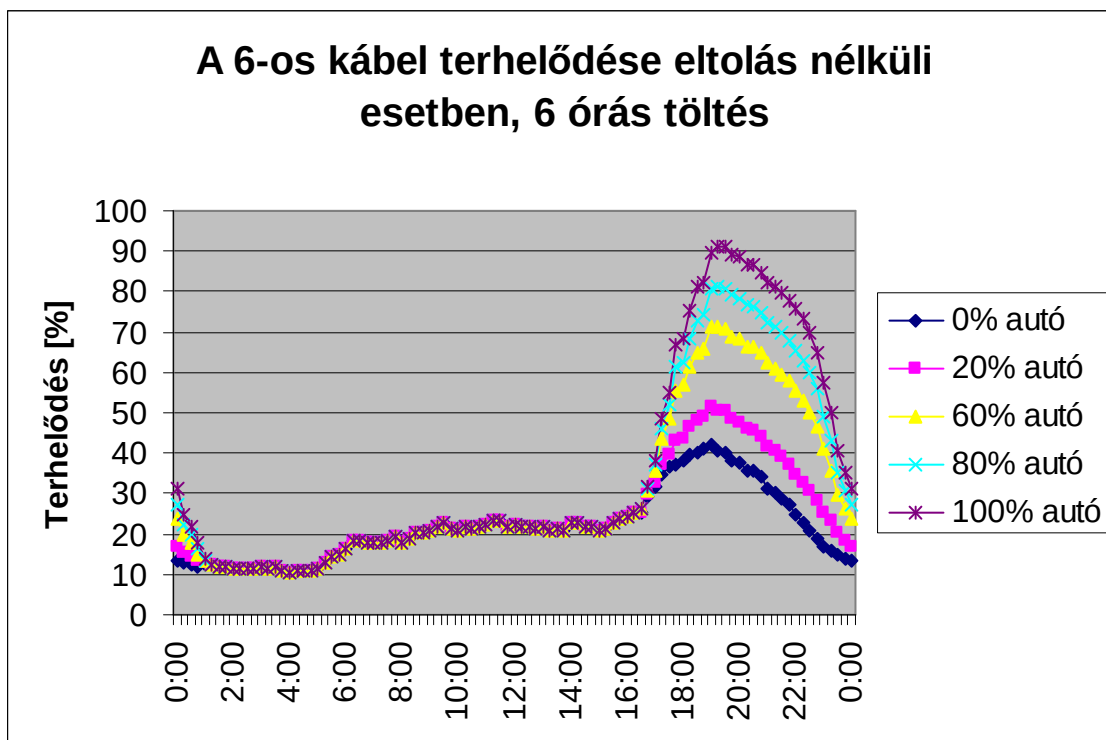
51. ábra: A KÖF/KIF transzformátor terhelődése 6 órás, 22 órára eltolva kezdésű töltés esetén



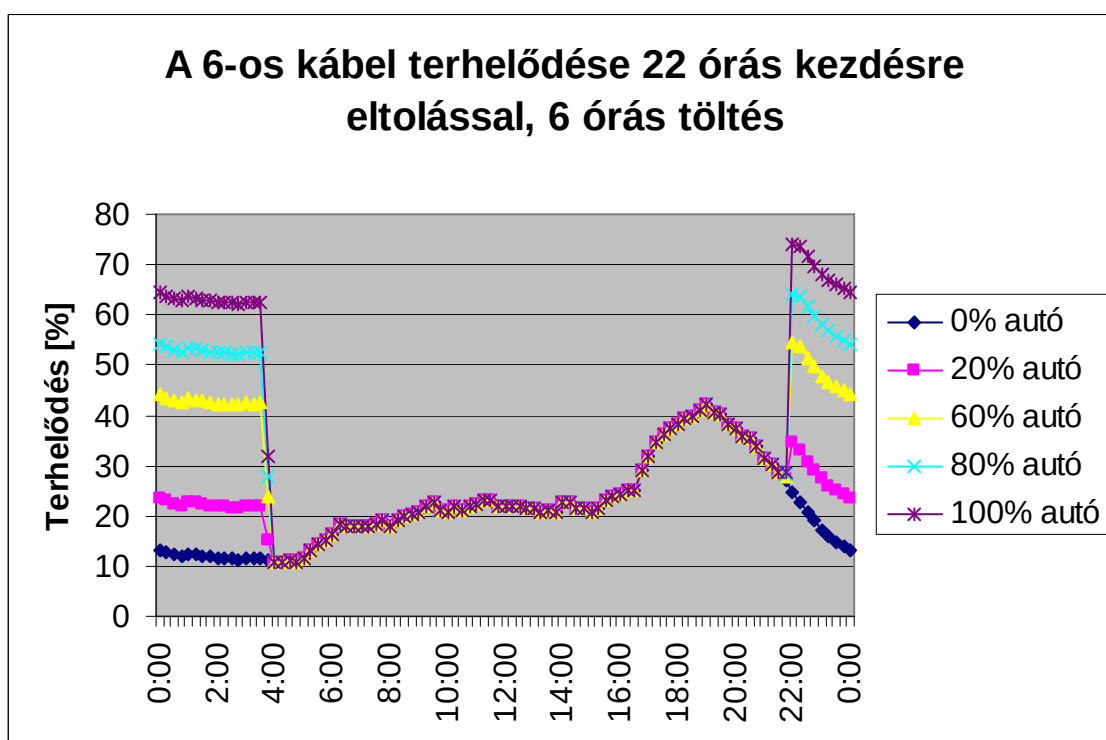
52. ábra: A KÖF/KIF transzformátor terhelődése 6 órás, 23 órára eltolt kezdésű töltés esetén



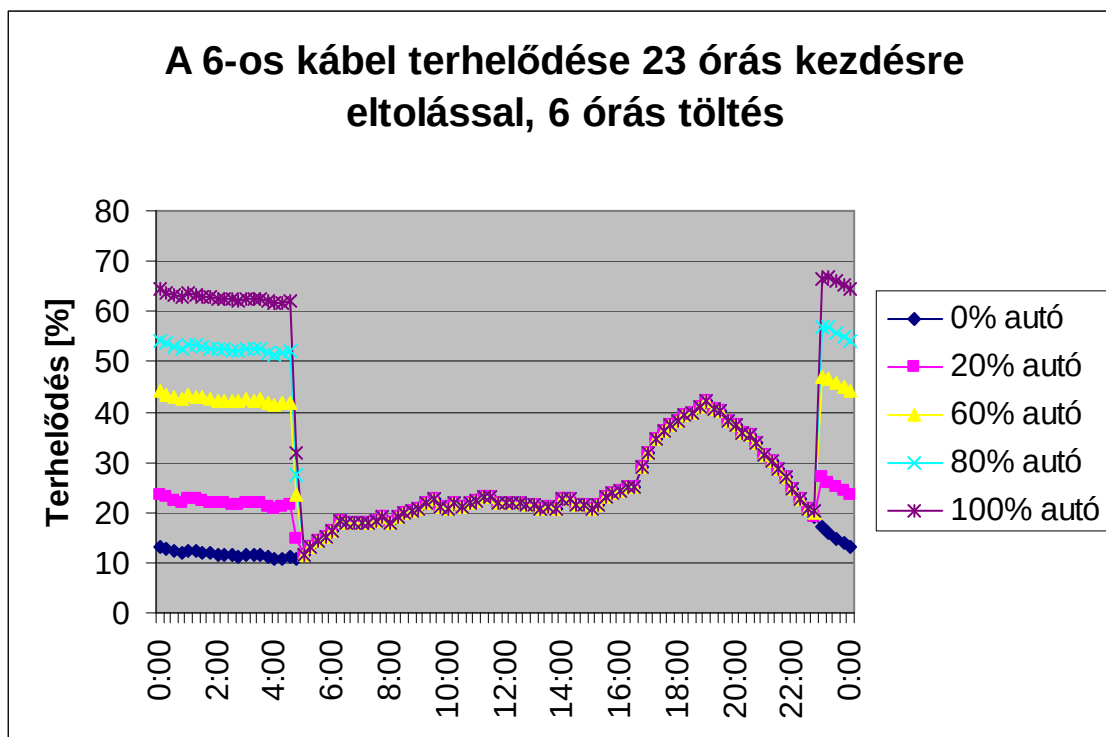
53. ábra: A legjobban terhelődő kábel terhelődése 8 órás, eltolás nélküli töltés esetén



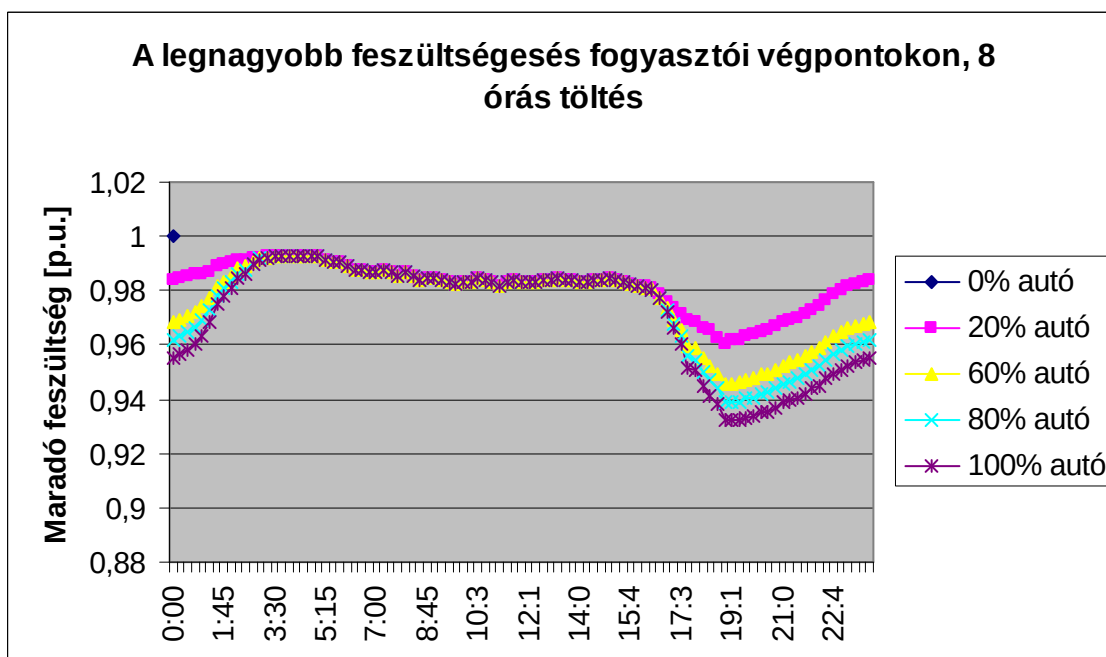
54. ábra: A legjobban terhelődő kábel terhelődése 6 órás, eltolás nélküli töltés esetén



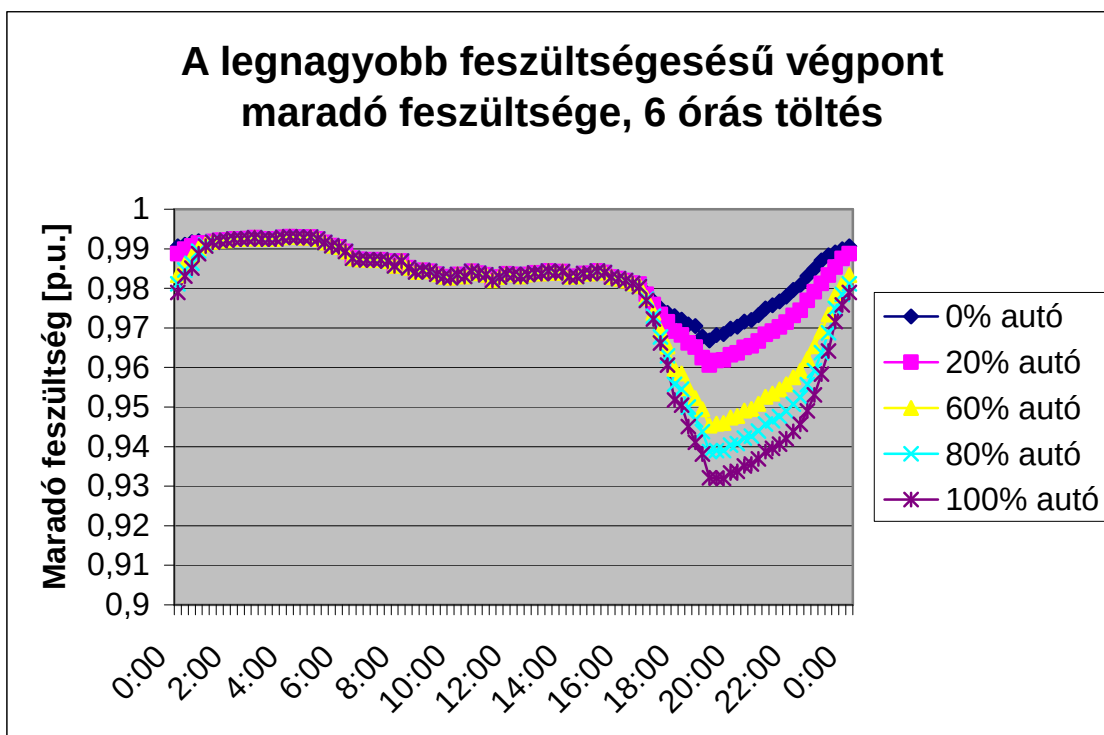
55. ábra: A legjobban terhelődő kábel terhelődése 6 órás, 22 órára eltolt kezdésű töltés esetén



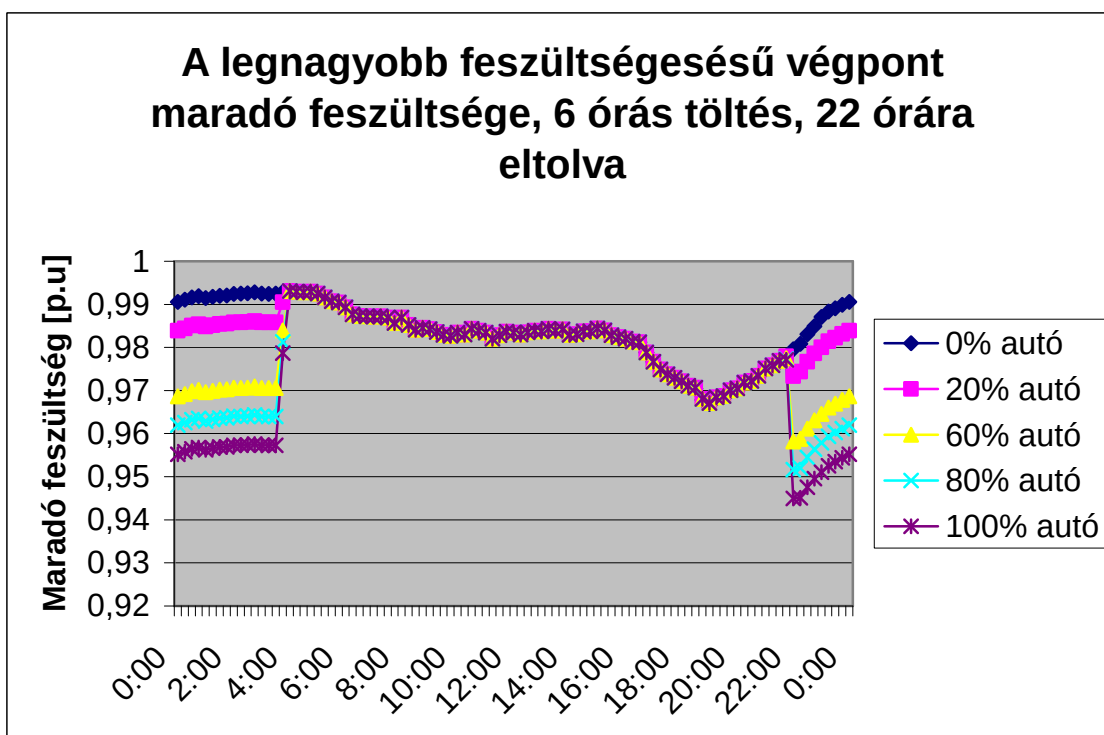
56. ábra: A legjobban terhelődő kábel terhelődése 6 órás, 23 órára eltolt kezdésű töltés esetén



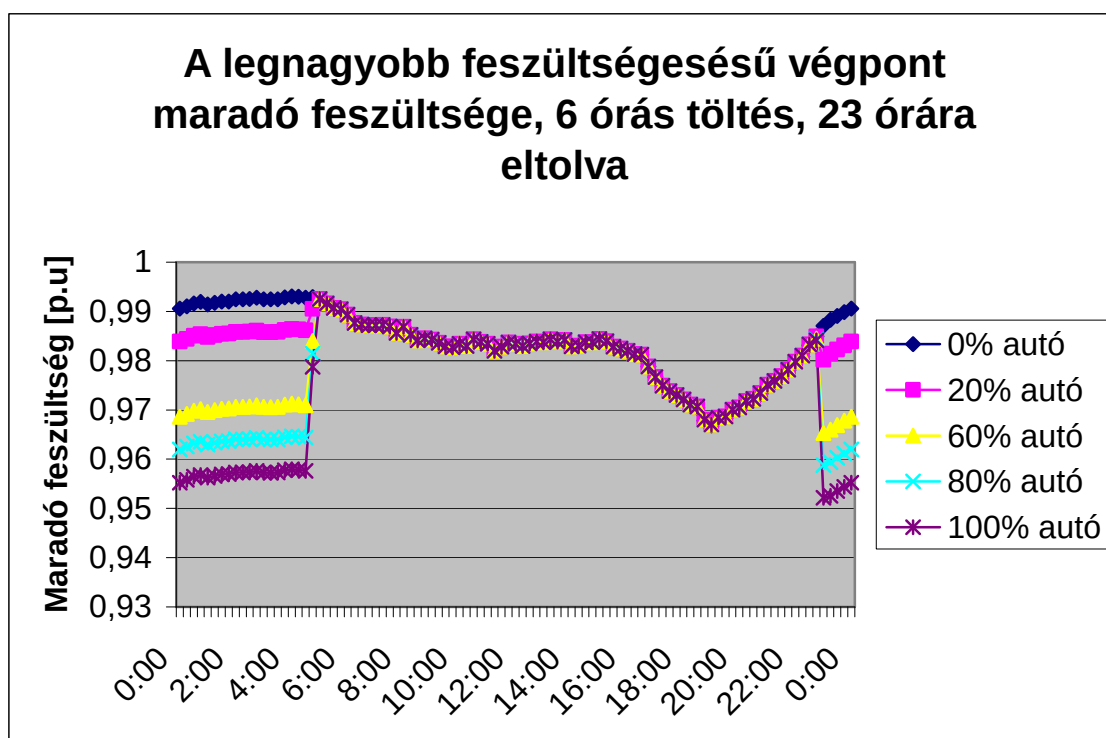
57. ábra: A legnagyobb feszültségesés fogyasztói végpontokon, 8 órás, eltolás nélküli töltés esetén



58. ábra: A legnagyobb feszültségesés fogyasztói végponton, 6 órás, eltolás nélküli töltés esetén



59. ábra: A legnagyobb feszültségesés fogyasztói végponton, 6 órás, 22 órára eltolt kezdésű töltés esetén



60. ábra: A legnagyobb feszültségesés fogyasztói végponton, 6 órás, 23 órára eltolt kezdésű töltés esetén

3.4. A kapott eredmények értékelése

A szimuláció során egy valós hálózatot vizsgáltunk meg. Az adott fogyasztói körzethez tartozó háztartási profilokat kétféleképpen választottuk meg: először mérési adatokon alapuló, egyéni háztartási profilokat állítottunk be, s így a körzetben található minden háztartáshoz a 30-féle profil valamelyike lett hozzárendelve. Másodjára átlagos fogyasztási görbéket vettünk fel és állítottunk be: ebben az esetben minden háztartás fogyasztási profilja ugyanúgy néz ki.

A villamos autók töltésénél többféle esetet különböztettünk meg:

- Az első eset az volt, amikor a tulajdonosok hazaérkezés után rögtön tölteni csatlakoztatják a járműveket. Külön megvizsgáltuk, hogy 6 órás, illetve 8 órás töltési időtartam esetén milyen terhelődéssel kell számolni, s a szimulációs eredmények alapján elmondhatjuk, hogy már viszonylag kevés villamos autó esetén is túlterhelődik a hálózat.
- Második esetként a töltés időbeli eltolásának hatását vizsgáltuk meg. Az eltolásnak többféle oka is lehet, az általunk megvizsgált lehetőség egy többféle

szempontból is gazdaságos és támogatott eset: a rendszerszintű szabályozási igényekhez igazított eltolás. A rendszerszintű tartalékokat a fel- és leszállás során lehet igénybe venni, a villamos autók töltése a leszállás igény kielégítéséhez képes hozzájárulni. A statisztikai elemzések azt mutatták, hogy a hajnali órákban jelentős leszállási igény lép fel a villamosenergia-hálózaton, így a rendszerszintű igények és a villamos autók töltési igénye szerencsésen összeegyeztethető. A szimuláció során azt vizsgáltuk meg, hogy ez az eltolás a kisfeszültségű hálózat terhelődése szempontjából milyen hatásokkal jár. Sikerült kimutatni, hogy az időbeli eltolás kedvező hatással van a hálózati elemek terhelődésére, ugyanakkora terhelődés pedig nagyobb villamos autó részarány esetén áll elő. A villamos autók töltésének időbeli eltolása így a jövőben mindenképpen támogatandó, mind hálózati, mind rendszerirányítói oldalról előnyökkel jár.

- A szimuláció során a végponti fogyasztóknál tapasztalható feszültségesést is megvizsgáltuk, s megállapíthatjuk, hogy sem az eltolás nélküli, sem az időben eltolás nélküli töltés esetén nem tapasztalható a megengedettnél nagyobb mértékű feszültségesés.

Összességében megállapíthatjuk, hogy a villamos autók várhatóan nem fogják jelentősen befolyásolni az elosztóhálózatot, amíg kis számban vannak jelen. Nagy arányú elterjedésük a meglévő hálózati infrastruktúra túlterhelődését eredményezheti, így az áramszolgáltatónak fel kell készülnie arra, hogy ezt a problémát kezelje. A problémák megoldhatók a hálózat megerősítésével, rekonstrukciójával, illetve cseréjével, de léteznek ennél hatékonyabb és más előnyökkel járó megoldások is: ilyen a töltések időbeli eltolása, valamint az intelligens töltés. Mindezek kidolgozása és implementálása a jövő energetikájának egy fontos kérdése.

3.5. További feladatok a villamos autók kisfeszültségű elosztóhálózatra gyakorolt hatásának vizsgálatában

A szimuláció során sok elhanyagolást tettünk, melyek célja a szimuláció egyszerűsítése volt. Alapvetően a fogyasztók viselkedését (mind a háztartási fogyasztókat, mind a villamos autókat) sztochasztikus modellek segítségével lehet figyelembe venni. Nem mindegyik modellnél éltünk azonban ezzel a lehetőséggel. A

további kutatómunka keretében ezért szükséges lehet a következők meghatározása, illetve figyelembe vétele:

- A villamos autók akkumulátorai maradó töltöttségének (SOC) figyelembe vétele az éjszakai töltéskor. Nyilvánvaló, hogy ha az akkumulátorok maradó feszültsége nem a megengedett minimális szintű, vagyis nem teljesen kisütött állapotról kell az akkumulátort feltölteni, akkor a töltési idő rövidebb. Ez lehetőséget ad arra, hogy az autók töltését a hazaérkezésük utáni későbbi órákra lehessen eltolni, ami már kívül esik a villamos hálózat csúcsterhelésének időszakán. Az akkumulátorok maradó töltöttségét az autók által napközben megtett út vizsgálatával lehet meghatározni a valószínűségi számítás eszközeivel (sztochasztikus folyamatok).
- Mivel az SOC figyelembe vétele esetén a töltés rövidebb ideig tart, mint a szimuláció során is használt esetben, ezért érdemes lehet a vizsgálat pontossága érdekében megvizsgálni azt, hogy mi történik azután, hogy feltöltöttük az akkumulátort. A [20] irodalom tanulsága szerint a feltöltés után csepptöltésre vált át a töltő, a szimuláció pontosítására ezt a hatást figyelembe lehet venni (bár jelentős hatást nem várunk tőle).
- Sztochasztikus fogyasztói modell létrehozása és alkalmazása. A szimuláció során a háztartási fogyasztói profilokat valós mérési eredmények felhasználásával alakítottuk ki, mely így statikus profilokat eredményezett. A valós mérések száma azonban korlátozott és nyilván ahány háztartás, annyiféle fogyasztói profil vehető fel.
- Az autók eloszlását ugyan figyelembe vettük, viszont az egyes kábelszakaszokra jutó autók beérkezési eloszlását nem. Előfordulhat ugyanis olyan eset, amikor egy-egy kábelszakaszra beérkező autók időben „összetorlódnak”, ezáltal lokális túlterhelődés jön létre.
- A háztartások fogyasztásában figyelembe vehetnénk a $\cos \varphi$ változását: ez az adott fogyasztók bekapcsolásával változik, vagyis a sztochasztikus fogyasztói modellhez köthető.

Irodalomjegyzék

[1] Járművillamosság – Schmidt István, Rajki Imre, Vincze Gyuláné

ISBN 963 420 710 3, Műegyetemi Kiadó

5.fejezet: Villamos és hibrid autók, pp. 165-212.

[2] A review of plug-in hybrid vehicles and vehicle-to-grid capability – Bill Kramer, Sudipta Chakraborty, Benjamin Kroposki

[Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE](#)

Digital Object Identifier: [10.1109/IECON.2008.4758312](#)

Publication Year: 2008 , Page(s): 2278 – 2283

[3] A new car, a new grid – Larry Dickerman, Jessica Harrison

IEEE Power&Energy Magazine, March/April 2010, pp. 55-61.

[4] Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition – Benjamin K. Sovacool, Richard F. Hirsh

Energy Policy (2009), pp. 1095-1103.

[5] The impact of transport electrification on electrical networks – K.J. Dyke, N. Schofield, M. Barnes

[Industrial Electronics, IEEE Transactions on](#)

Volume: 57 , [Issue: 12](#)

Digital Object Identifier: [10.1109/TIE.2010.2040563](#)

Publication Year: 2010 , Page(s): 3917 – 3926

[6] Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles – Shaik Amjad, S. Neelakrishnan, R. Rudramoorthy

Renewable and Sustainable Energy Reviews 14(2010), pp. 1104-1110.

[7] Examination of a PHEV bidirectional charger system for V2G reactive power compensation – Mithat C. Kisacikoglu, Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert

[Applied Power Electronics Conference and Exposition \(APEC\), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE](#)

Digital Object Identifier: [10.1109/APEC.2010.5433629](#)

Publication Year: 2010 , Page(s): 458 – 465

- [8] A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation – Christophe Guille, George Gross
Energy Policy 37 (2009), pp. 4379-4390.
- [9] Effects of different PHEV control strategies on vehicle performance – P. Tulpule, V. Marano, G. Rizzoni
2009 American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, June 10-12, 2009, pp. 3950-3955.
- [10] Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization – Scott B. Petersen, Jay Apt, J.F. Whitacre
Journal of Power Sources 195 (2010), pp. 2385-2392.
- [11] Smart charging strategies for electric vehicles: enhancing grid performance and maximizing the use of variable renewable energy resources – J.A. Peças Lopes, F.J. Soares, P.M. Almeida, M. Moreira da Silva
EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stavanger, Norway, May 13-16, 2009.
- [12] Smart charging strategies for efficient management of the grid and generation systems – F. J. Soares
EES-UETP DTU, Lyngby, Copenhagen, 2010. September 22.
- [13] Using fleets of electric-drive vehicles for grid support – Jasna Tomić, Willett Kempton
Journal of Power Sources 168 (2007), pp. 459-468.
- [14] The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid – Kristien Clement-Nyns, Edwidge Haesen, Johan Driesen
IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25., no. 1., February 2010, pp. 371-380.
- [15] Impact assessment of PHEV charge profiles on generation expansion using National Energy Modeling System – Xiaolong Yu
Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE
Digital Object Identifier: 10.1109/PES.2008.4596189
Publication Year: 2008 , Page(s): 1 – 5
- [16] Modeling the impact of increasing PHEV loads on the distribution infrastructure – Chris Farmer, Paul Hines, Jonathan Dowds, Seth Blumsack
Proceedings of the 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2010

[17] PD-Team Mérnöki Iroda Kft.: Gellérthegy-Lágymányos kisfeszültségű elosztóhálózatának alapterve
ELMŰ Nyrt. Dél-Budai Régió

[18] Selected extreme value problems in electric power engineering - Cost efficient operation of distribution systems – Raisz Dávid
Doktori disszertáció, 2010
http://www.vet.bme.hu/dokt/tananyag/RaiszDavid_PhD_disszertacio_2010_11_29.pdf

[19] Dr. Dán András, Dr. Vajta László, Kálmán Viktor, Takács Tibor, Molnár Zoltán -
Intelligens kommunális villamos fogyasztásmérés lehetőségének vizsgálata kutatás fejlesztés
keretében az E.ON Tiszántúli Áramszolgáltató Zrt-nél.
In: MEE 55. Vándorgyűlés. Eger, Magyarország, 2008.09.10-2008.09.12.

[20] Villamos autók akkumulátor töltésének hálózati visszahatás csökkentése – Dr. Dán András
Tanulmány, Innotech Műegyetemi Innovációs Egyesület, 2010. november

[21] Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems – Qian, K.;
Zhou, C.; Allan, M.; Yuan, Y.
[IEEE Transactions on](#) Power Systems, Volume: PP , [Issue: 99](#)
Digital Object Identifier: [10.1109/TPWRS.2010.2057456](#)
Publication Year: 2010 , Page(s): 1-9

[22] Characterizing naturalistic driving patterns for plug-in hybrid electric vehicle analysis –
Brian Adornato, Rakesh Patil, Zoran Filipi, Zevi Baraket, Tim Gordon
[Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE](#)
Digital Object Identifier: [10.1109/VPPC.2009.5289786](#)
Publication Year: 2009 , Page(s): 655 – 660

[23] Valószínűség-számítás (példatár) – Solt György
14. változatlan utánnnyomás, Műszaki Kiadó, Budapest
ISBN 963 16 3037 4
VI. fejezet: Fontosabb eloszlások – Poisson-eloszlás, 234-241. oldal

[24] Felsőbb matematika villamosmérnököknek (BMETE90MX30) jegyzetek
www.math.bme.hu/~szbalazs/vill

[25] Elektromos járművek integrálása a villamosenergia-hálózatba – Szabó Kristóf István
Önálló laboratóriumi beszámoló, 2010. BME Villamos Energetika Tanszék

[26] http://www.eh.gov.hu/gcpdocs/201103/naptar2011_123_dst_javitott.XLS
http://www.eh.gov.hu/gcpdocs/201103/profilok_2011_esz_eon.xls