

Töltés ütemezési módszerek smart gridhez csatlakoztatott elektromos járműveknél

Csonka Bálint – Dr. Csiszár Csaba

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME)
 Közlekedésmérnök és Járműmérnöki Kar (KJK)
 Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszák (KUKG)
 telefon: 20/446 4682
 e-mail: csonka.balint@mail.bme.hu, csiszar.csaba@mail.bme.hu

Kivonat: Az elektromos hálózatok terhelése jelentősen ingadozik. Intelligens töltés menedzsment módszerekkel az elektromos járművek töltési folyamatai és a hálózat terhelése összehangolható, így a kapacitások hatékonyabban kihasználhatók. Olyan módszert dolgoztunk ki, ami a töltés optimalizálás során figyelembe veszi a felhasználó elvárásait, az energia változó díjtételét és támogatja a kétirányú energiaáramlást a jármű és a hálózat között. A módszer alkalmazásával csökkenthető egyrészt a hálózat terheltségének ingadozása az energiaigények időbeli áthelyezésével, másrészt pedig a felhasználó töltési költsége, miközben biztosított a jármű rendelkezésre állása az elzetesen megadott utazási igények szerint. Érzékenység vizsgálattal meghatároztuk, hogy a változó díjtételek, valamint a töltési igények előre tervezése hogyan befolyásolja a töltési költségeket. Az eredmények alapján megállapítottuk, hogy a módszer alkalmazásával jelentősen, akár 40%-kal is mérsékelhető a töltési költség.

Kulcsszavak: elektromos jármű, töltés ütemezés, költség optimalizálás, smart grid, érzékenység vizsgálat

Nomenklatúra

B_{V2G} : visszatáplálásból származó bevétel
 C_p : elektromos áram vételi ára (elektromos jármű felhasználó szempontjából)
 C_p^{\min} , C_p^{\max} : elektromos áram vételi árának minimum és maximum értéke változó díjtétel esetén
 C_s : elektromos áram eladási ára
 C_{V2G} : visszatáplálásból származó költség
 E_{opt} : visszatáplálásból származó legnagyobb profit értékhez tartozó energiamennyiség
 P_{V2G} : visszatáplálásból származó profit
 R_c : elektromos jármű pillanatnyi hatótávja
 R_c : hatótáv követelmény egy adott töltési esemény végén
 R_{\min} : minimum hatótáv követelmény
 t_{start} , t_{end} : kezdő és befejező időpontja amikor az elektromos jármű töltőhöz van csatlakoztatva

Bevezetés

Napjainkban az elektromos hálózatról tölthető elektromos járművek egyre nagyobb figyelmet kapnak számos pozitív tulajdonságuk miatt, mint például az alacsony üzemeltetési költség és a zéró lokális károsanyag kibocsátás. A széleskörű elterjedést azonban akadályozza a jelenlegi magas beszerzési ár. A jármű egyik legdrágább komponensének, az akkumulátor árának csökkenésével egyidejűleg egyre nagyobb számban fognak megjelenni elektromos autók a közút- és az elektromos hálózaton. Számos tanulmány foglalkozik a közlekedési igények intelligens szétosztásával a korlátos kapacitású közúthálózaton, amivel virtuális kapacitásbővítés érhető el (például [1], [2]). Hasonlóan szükség van az elektromos hálózaton megjelenő jármű töltések menedzselésére is. Egyirányú energiaáram esetén ez a többletterhelés elosztását célozza, aminek fontosságát vizsgálta a [3] tanulmány is. Kétirányú energiaáram esetén az akkumulátorok, mint tartalék kapacitás használhatók fel [4]. Intelligens töltés ütemezéssel megvalósítható az elektromos járművek töltésének időbeli és térbeli szétosztása, ami csökkenti az elektromos hálózat terhelésének ingadozását. A töltés ütemezésekor két szempontot különböztetünk meg: elektromos járműfelhasználói és elektromos hálózat üzemeltetési szempontot. A felhasználó elvárása, hogy a töltés kényelmes legyen, a vételezett energiával a közlekedési igényeit a lehető legalacsonyabb áron szolgálja ki. Az üzemeltető célja a kapacitások egyenletes és magas kihasználása. A töltés díja a

parkolási díjhoz hasonlítható. Mivel a parkolási díjak befolyásolják a közlekedési szokásokat [5], így az elektromos hálózat üzemeltetése a díjak differenciálásával tudja befolyásolni a töltési szokásokat. Jelen tanulmányban olyan töltésütemezési módszert dolgozunk ki, ami a felhasználói optimumot keresi egy olyan hálózaton, ahol az elektromos hálózat üzemeltetése változó díjtételekkel részesít elnyben vagy 'büntet' bizonyos töltési állapotokat és időszakákat. Továbbá kétirányú energiaáramlás valósítható meg a jármű és a hálózat között.

A kutatás során az alábbi kérdésekre keressük a választ:

-) A változó díjtétel ingadozása, és az elektromos áram vételi-eladási ár közötti különbségének mértéke hogyan befolyásolja az ügyfél számára megtakarítható összeget?
-) Hogyan változik a töltési költség, ha a felhasználó előre bejelenti töltési igényét?

A cikk további részének a felépítése a következő: az 1. fejezetben a témához kapcsolódó szakirodalmi eredményeket foglaljuk össze. A 2. fejezetben bemutatjuk a kidolgozott töltés ütemezési módszert. A 3. fejezetben ismertetjük a töltés szimulációt, amivel a módszer működését és eredményességét szemléltetjük. A 4. fejezetben a szimuláció eredményeit mutatjuk be és magyarázzuk. Végül a konklúzió fejezetben összegezzük a kutatás legfontosabb megállapításait.

1. Irodalmi áttekintés

Az elektromos járművek töltés optimalizálásával számos tanulmány foglalkozik melyek az alábbi csoportokba sorolhatók: töltési állomás helyszínének kijelölése (például [6], [7]), töltési folyamat során a töltési áram optimalizálása az akkumulátor élettartamának növelése érdekében (például [8], [9]), és az elektromos járműveknek a villamos hálózatra gyakorolt negatív hatásának a mérséklése. A villamos hálózatra gyakorolt hatást vizsgáló tanulmányokat is két részre lehet osztani, aszerint, hogy vagy a hálózat egy kis elemét, mint például egy háztartás ([10]) vagy munkahely ([11]), vagy a teljes hálózatot vizsgálják. Az irodalomkutatás során az utóbbi tanulmányok eredményeire fókuszáltunk.

A [12] tanulmányban változó díjtételt feltételezve az elektromos hálózaton egy áruszállító flotta járműveinek a töltési költség minimalizálásához dolgoztak ki egy jármű flotta modellt. A dinamikus programozáson alapuló optimalizáló módszer a flotta járműveinek a historikus közlekedési szokásai alapján határozza meg a pillanatnyi töltési teljesítményt.

Az előzőhöz hasonlóan a [13] tanulmányban áruszállító kisteherautók töltéséhez kétszintű töltés optimalizációs módszert dolgoztak ki, ami a töltési teljesítményt járművenként és hálózati kiterjedésben is optimalizálja. A két szint alkalmazásának előnye, hogy így mind a felhasználó (jármű akkumulátorának élettartama) mind a hálózat üzemeltetési elvárásai (terhelés kiegyenlítése) figyelembe vehetők. A módszer alapján meghatározható egy jármű flottán belül az elektromos járművek optimális aránya. A módszer hiányossága, hogy az alkalmazhatóságát kétféle tarifarendszerrel vizsgálták és csak hálózati járművek irányban valósulhat meg az energiaáram.

A [14] cikkben egy szekvenciális optimalizáló algoritmust mutatnak be, amivel az elektromos járművek éjszakai töltésének a költsége minimalizálható. A módszer újszerűsége, hogy figyelembe veszi a kétirányú energiaáramot is. Hátránya, hogy függetlenül a felhasználó aktuális közlekedési igényétől minden esetben teljesen feltölti a járművek akkumulátorát.

A [15] tanulmány szerzői a jármű flotta és az elektromos hálózat jellemzői alapján optimalizálták a töltés ütemezését; elsősorban a hálózat üzemeltetési szempontjait figyelembe véve és egyirányú energiaáramot feltételezve. Az elektromos járművek várható töltési igényét 'csak' becsülték. Ennek hátránya, hogy a felhasználói érdekeket nem veszi teljeskörűen figyelembe.

Az előbbieknél nagyobb hangsúlyt fektet az elektromos jármű flotta töltési igényének a meghatározására a [16] tanulmány. A hálózathoz csatlakoztatott járműveket csoportokba sorolják a használati jellemzők alapján. Ezután a töltési költséget járműcsoportonként optimalizálják.

Az eddig ismertetett megoldásoktól eltérően optimalizálási kritériumot alkalmaznak a [17] cikkben bemutatott módszernél. A modellben a hálózathoz csatlakoztatott elektromos járművek bejelentik a töltés hasznosságát az adott pillanatban, úgy mond egymásra licitálnak, és ennek megfelelően osztja szét a töltési kapacitást a hálózat üzemeltetése. A módszer hátránya, hogy a közlekedési igények kiszolgálása nincs garantálva, azonban a töltés hasznossága maximális az adott pillanatban.

A korábbi tanulmányok elsősorban az elektromos hálózat üzemeltetési szempontjait vették figyelembe (centralizált optimum keresés) és egyirányú energiaáramot feltételeztek. Továbbá a felhasználói elvárásokat aggregáltan becsülték a historikus adatok alapján, és nem járművenként külön-külön. A decentralizált optimum keresésnek, azaz amikor az elektromos hálózat felhasználóinál külön-külön határozzák meg az optimumot, nincs mélyreható irodalma; így a kutatási eredményeink részben betöltik ezt az űrt.

2. Töltés ütemezés módszer

A kidolgozott töltés ütemezés módszer lényege, hogy a felhasználótól és az elektromos hálózat üzemeltetőtől beérkező adatok alapján határozza meg az ügyfél számára legalacsonyabb töltési költséget úgy, hogy a közlekedési igényei kiszolgálását garantálja. A módszer kimenete a töltési terv, ami tartalmazza, hogy a jármű és elektromos hálózat között mikor és milyen irányú az energiaáram. A felhasználó a következő bemenő adatokat adja meg:

- töltési esemény: a kezdő és befejező időpontok, azaz amikor a jármű a töltőponthoz van csatlakoztatva (t_{start} és t_{end}), valamint a töltés maximális teljesítménye
- közlekedési igény: minimum hatótávolság, aminek minden esetben rendelkezésre kell állnia (R_{min}), valamint a becsült utazási távolság az adott két töltési esemény között (R_e). A felhasználó több R_e értéket is megadhat előre
- töltési mód: csak töltés vagy töltés és visszatáplálás is megengedett.

A töltés teljesítménye azért lényeges, mert befolyásolja, hogy egységnyi idő alatt mekkora energia mennyiséget tud a jármű felvenni. A díjtételeket a szolgáltató közli töltőállomásokra és időszakokra bontva. Az R_{min} a jármű biztonsági tartaléka. Abban az esetben, ha a jármű hatótávja R_{min} alá csökken, akkor mindaddig maximális teljesítménnyel töltődik az akkumulátor, amíg a minimális hatótávhoz tartozó töltöttségi szintet el nem éri.

A módszer kidolgozása során az alábbi feltételezéseket és lehatárolásokat tettük:

- az akkumulátorban tárolt energiát az ügyfél eladhatja az elektromos hálózat üzemeltetőjének
- a jármű bármikor szüneteltetheti a töltést és tetszőlegesen vált töltés és visszatáplálás között
- a töltési költség csak a vételezett energia mennyiségtől függ
- az elektromos áram ára előre ismert a megadott töltési események ideje alatt, különben nem érhető el a minimum töltési költség
- az áram (felhasználói szemszögből) vételi ára (C_p - töltés) mindig magasabb, mint az eladási ár (C_s - visszatáplálás).

A töltés ütemezés módszert két részre bontottuk aszerint, hogy a visszatáplálás megengedett vagy nem.

2.1 Töltés ütemezés – visszatáplálás nem engedett

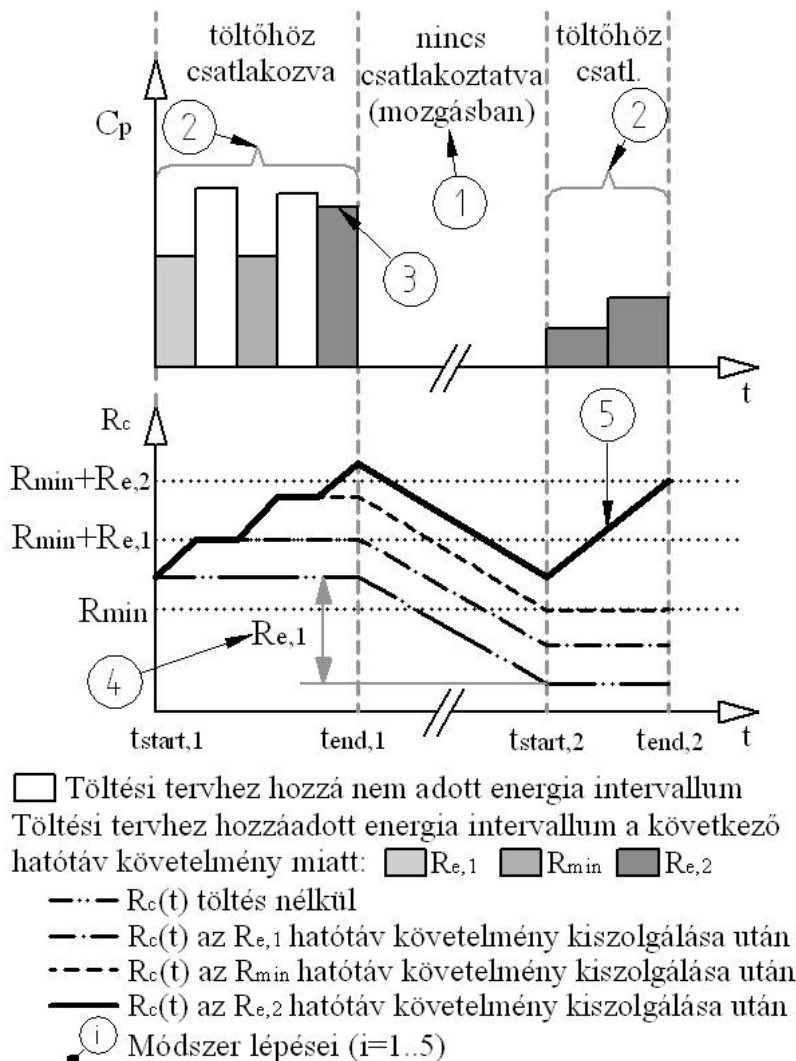
Az ütemezés lépései a következők:

1. Azon időszakok figyelmen kívül hagyása, amikor a jármű várhatóan nem lesz töltőponthoz csatlakoztatva.
2. A töltési időszakok azonos energia-mennyiség intervallumokra bontása. Egy intervallum hossza a töltési teljesítménytől függ. Mivel 1 perc töltés 3kW-os töltési teljesítmény esetén (az otthoni töltés átlagos teljesítménye az EU-ban) a töltött energia mennyisége 0,05 kWh, ezért mi 0,05 kWh nagyságú energia intervallumokat javasolunk.
3. A C_p meghatározása minden időszakra. C_p meghatározása az elektromos áram ára és az energia intervallum nagysága alapján történik.
4. Szükséges energia mennyiség becslése az R_e alapján.
5. R_{min} kritérium ellenőrzése minden töltési esemény kezdeti időpontjára, és R_e kritérium ellenőrzése az utazást megelőző utolsó töltési esemény befejező időpontjára.
 - 5.1. Az első olyan időpont kiválasztása, amikor az R_{min} vagy R_e hatótáv követelmény nem teljesül. Az első töltési esemény kezdetére nem vizsgáljuk meg az R_{min} követelményt, mert az azt megelőző töltési lehetőségeket nem lehet számításba venni.

5.2. Azon energia intervallumok kilistázása, amelyek megelik a kiválasztott időpontot és C_p a legalacsonyabb.

5.3. Azon energia intervallum hozzáadása a töltési tervhez, ahol a töltési idő a legrövidebb.

Az 5. lépés állapításait addig ismétli a módszer ameddig az összes, a felhasználó által megadott hatótáv követelmény teljesül. Az 1. ábra a módszer működését mutatja be a lépésekkel együtt. A négy R_c függvény a jármű aktuális hatótávját szemlélteti az idő és a töltési tervhez adott energia intervallumok függvényében. Az ábrán látszik, hogy töltés nélkül a hatótáv $t_{end,1}$, $t_{start,2}$ és $t_{end,2}$ időpontokban a hatótáv követelményeket nem teljesíti. Emiatt 3 lépésben energia intervallumokat rendelünk a módszer alapján a töltési tervhez, hogy a hatótáv követelmények teljesüljenek.

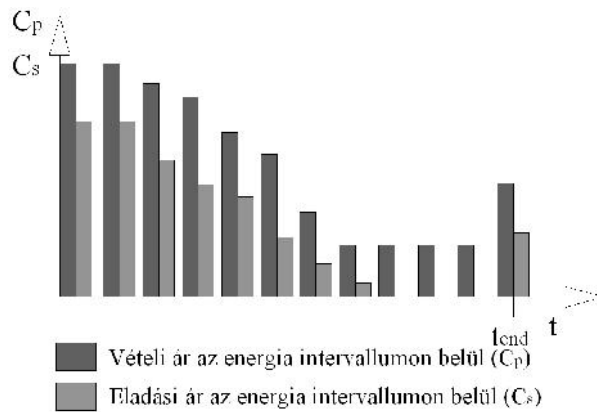


1. ábra: Töltés ütemezés – visszatáplálás nem megengedett – módszer lépései; az energia vételi ára és az elektromos jármű hatótávja az idő függvényében

2.2 Töltés ütemezés – visszatáplálás megengedett

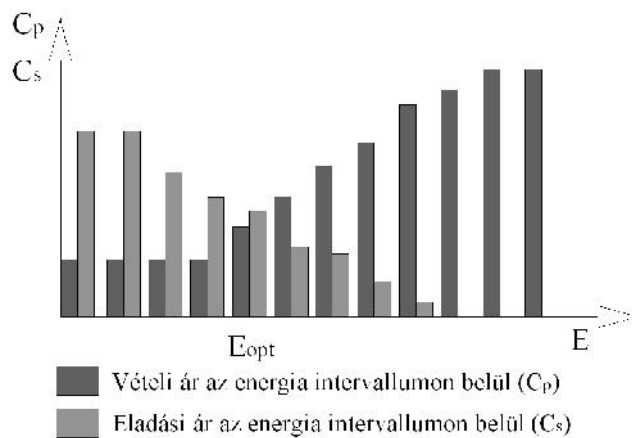
A visszatáplálás ütemezés akkor történik, ha a töltés ütemezés során az összes hatótáv követelményt sikerült kiszolgálni. A visszatáplálás ütemezés lépései a következők:

1. A töltőhöz csatlakozott idő intervallumok felosztása egységnyi energia intervallumokra.
2. C_s meghatározása minden energia intervallum esetén az elektromos áram ára és az energia intervallum nagysága alapján (2. ábra).



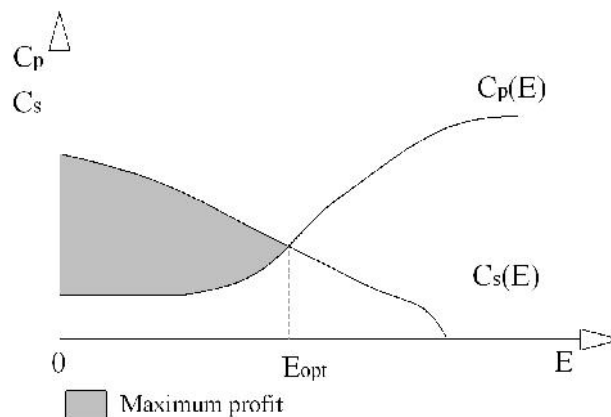
2. ábra: Vételi és eladási ár a töltési intervallumokon belül id. rendben

3. A szabad visszatáplálási intervallumok ár szerinti csökkenés, a szabad töltési intervallumok ár szerinti növekvő sorba rendezése (3. ábra).



3. ábra: Vételi és eladási ár a töltési intervallumokon belül ár szerinti sorrendben

4. Az energia visszatáplálásból a felhasználó profitot realizál. A realizálható profit maximum értékéhez (P_{V2G}) tartozó energiamennyiség az E_{opt} . E_{opt} ott van, ahol a visszatölthető energiamennyiség a legnagyobb, és az eladási ár nagyobb vagy egyenlő, mint a vételi ár, vagyis $C_s(E) \geq C_p(E)$. P_{V2G} a visszatáplálásból származó bevétel (B_{V2G}), és a visszatáplálás miatt megnövekedett töltési igény okozta extra kiadás (C_{V2G}) különbsége. Az elérhető maximális profitot a 4. ábra szemlélteti, feltételezve, hogy a töltési intervallumok energia egysége tart a nullához.



4. ábra: Visszatáplálásból származó profit az energiamennyiség függvényében, (a töltési intervallumok energia egysége nullához tart)

5. Az E_{opt} eltti energia intervallumok (visszatáplálás és töltés egyaránt) hozzáadása a töltési tervhez.
 6. R_{min} és R_c hatótáv követelmények újbóli ellenőrzése. Ha valamelyik nem teljesül, akkor két lehetséges módja van a hatótáv növelésnek:

- Visszatáplálás volumenének csökkentése. Ebben az esetben a profit az E_{opt} -nál kevesebb energia visszatáplálása miatt csökken.
- Töltés volumenének növelése. Ebben az esetben a profit a töltési tervhez hozzáadott extra töltési intervallum miatt csökken.

A két lehetőség közül az kerül kiválasztásra, ahol a profit csökkenés mértéke kisebb.

P_{V2G} , B_{V2G} és C_{V2G} értéke az (1), (2) és (3) alapján számítható.

$$P_{V2G}(E) \times B_{V2G}(E) \times C_{V2G}(E) \quad (1)$$

$$B_{V2G}(E) \times \int_0^E C_s(E) dE \quad (2)$$

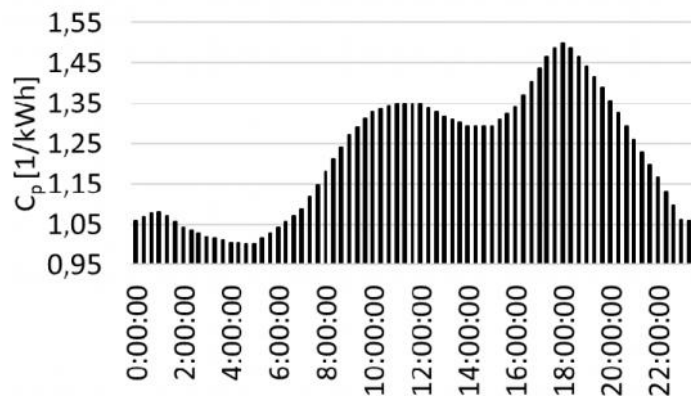
$$C_{V2G}(E) \times \int_0^E C_p(E) dE \quad (3)$$

3. Töltés ütemezés szimuláció

A töltés ütemezés módszerét olyan alap töltési stratégiákkal hasonlítottuk össze, amik nélkülözik a fejlett információs rendszerek döntéstámogatását. A két különbsége a módszerrel elérhető költségmegtakarítás. A költségmegtakarítás mértékét több tényező (közlekedési szokások, jármű és elektromos hálózat paraméterei) is befolyásolja. Ezek közül mi a C_p , C_s és a töltési igény bejelentés időpontjának a hatását vizsgáltuk szimulációval.

A szimulációban szereplő jármű akkumulátor kapacitása 50 kWh. A jármű mindig töltőállomáshoz van csatlakoztatva, amikor nincs mozgásban. A jármű átlagos energiafogyasztása menet közben 7,5 kWh/óra. A töltési teljesítmény mindig 3,6 kW. Az akkumulátor töltöttsége a szimuláció kezdetekor 5%.

Az elektromos hálózaton olyan változó díjtételt alkalmaztunk a szimulációban, ami követi a hálózat terhelésének napon belüli ingadozását. Ennek megfelelően az ár akkor a legmagasabb (C_p^{max}), mikor a legnagyobb a hálózat terhelése, és akkor a legalacsonyabb (C_p^{min}), mikor a terhelés a legkisebb. A két érték között lineáris interpolációval számítjuk az árat. C_p és C_s értéke is 20 percenként változhat. A szimulációban az Egyesült Királyság elektromos hálózatán tapasztalható napi terhelés ingadozást vettük alapul, ahol a maximum terhelés körülbelül 50%-kal nagyobb a legkisebb terhelésnél. [18] C_p változását az időfüggvényében az 5. ábra mutatja be. Az egyszerűsítés miatt $C_p^{min}=1$.



5. ábra: C_p ingadozása egy napon belül a szimulációban ($C_p^{max}/C_p^{min}=1,5$)

A szimulációban külön vizsgáltuk a módszer hatékonyságát a napi rutinban és egy hosszútávú utazást megelőző időszakban:

-) **napi rutin:** egy 24 órás időtartamra vonatkozott a vizsgálat
-) **hosszútávú utazást megelőző időszak:** a vizsgált időszak végén magas hatótávot várunk el.

Az eltérő esetek 'menetrendjét' az 1. és 2. táblázat tartalmazza. A táblázatban egyszerűsítve szerepel a hatótáv követelmény: az utazás teljesítéséhez szükséges minimális akkumulátor kapacitást tüntettük fel az időintervallum végére vonatkozóan.

1. táblázat: Napi rutin menetrendje

Id intervallum	Jármű helyzete	Minimum akkumulátor kapacitás
20:40-7:20	Otthon	25%
7:20-8:20	Mozgásban	-
8:20-17:00	Nem otthon	20%
17:00-17:40	Mozgásban	-
17:40-19:40	Nem otthon	30%
19:40-20:40	Mozgásban	-

2. táblázat: Hosszútávú utazást megelőző napok menetrendje

Nap	Id intervallum	Jármű helyzete	Minimum akkumulátor kapacitás
Első nap	0:00-7:20	Otthon	25%
	7:20-8:20	Mozgásban	-
	8:20-17:00	Nem otthon	20%
	17:00-17:40	Mozgásban	-
	17:40-19:40	Nem otthon	30%
	19:40-20:40	Mozgásban	-
	20:40-0:00	Otthon	-
n+1. nap	0:00-7:20	Otthon	25%
	7:20-8:20	Mozgásban	-
	8:20-17:00	Nem otthon	90%

Az alap töltési stratégiák a következők:

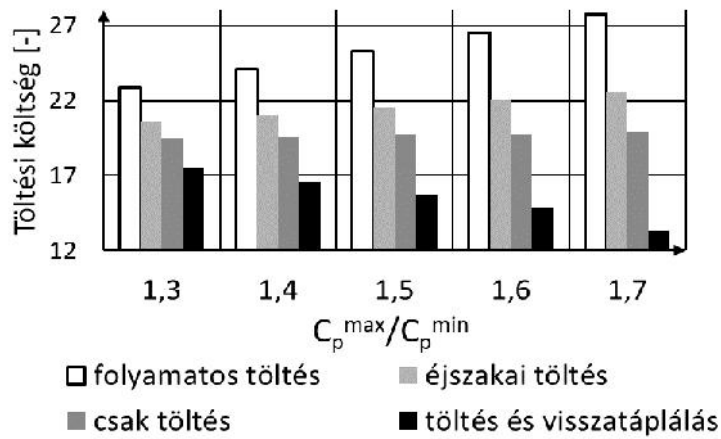
-) **folyamatos töltés:** a jármű mindig töltődik, amíg a hálózathoz van csatlakoztatva. Egyedüli kivétel a hosszútávú utazást közvetlenül megelőző töltési esemény, amikor a hatótáv kritérium teljesítése után leáll a töltés a költségek összehasonlíthatósága miatt
-) **éjszakai töltés:** a járművet csak a nap végén, otthon tölti a jármű felhasználója az éjszakai áram alacsonyabb díja miatt.

A módszer hatékonyságát érzékenységi vizsgálattal vizsgáltuk. A vizsgálat kiinduló hipotézisei a következők:

1. Az elérhető költségmegtakarítás mértéke nő, ha nő a különbség C_p^{\max} és C_p^{\min} között, vagy ha csökken a különbség C_p és C_s között.
2. A töltés ütemezés visszatáplálással és visszatáplálás nélküli esetek közötti különbség csökken, ha nő a különbség C_p és C_s között.
3. Minél előbb jelzi a felhasználó a magas hatótáv követelményt, annál nagyobb a költségmegtakarítás.

4. Szimuláció eredménye

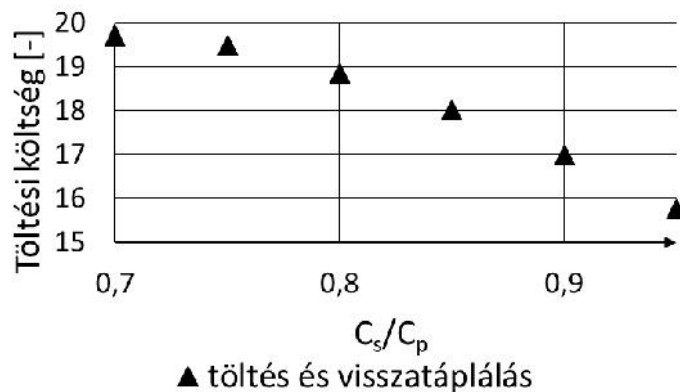
Először a C_p^{\max} és C_p^{\min} arányának változása és a töltési költség mértéke közötti kapcsolatot vizsgáltuk. A vizsgálatot elvégeztük a két alap és két töltés ütemezési stratégiára is. A vizsgálatot a napi rutinra végeztük először. A többi paramétert nem változtattuk. Az eredményt az 6. ábra szemlélteti.



6. ábra: Töltési költség az elektromos áram ingadozásának mértéke függvényében napi rutin esetén, $C_s/C_p=0,95$

A töltés ütemezés módszer mindkét esetben alacsonyabb töltési költséget eredményez. Az 'éjszakai töltés' és a 'csak töltés' módok között alacsony a különbség. Az utóbbi kevésbé érzékeny a változásra, mert a töltés a völgyidő szakban történik, ahol a változás mértéke nem jelentős. A töltési költség a 'töltés és visszatáplálás' mód esetén (a többi móddal ellentétben) csökken, ha a C_p^{\max}/C_p^{\min} értéke nő. Ennek oka, hogy a visszatáplálásból származó profit mértéke nő. Azt is megállapítottuk, hogy változó díjtételek esetén a legrosszabb stratégia a folyamatos töltés. Tehát az első kiinduló hipotézis igaz.

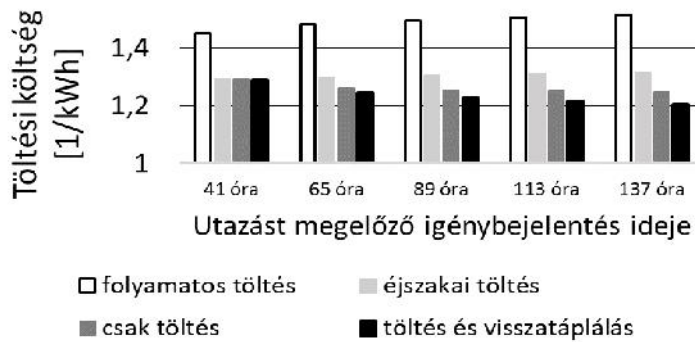
Második lépésben a C_s/C_p érték változásának a hatását vizsgáltuk meg napi rutin és töltés ütemezés - visszatáplálással stratégia esetén. Az eredményt az 7. ábra mutatja be.



7. ábra: Töltési költség a C_s/C_p arányának függvényében napi rutin esetén

A töltési költség különbsége a csak töltés és töltés és visszatáplálás stratégia között csökken, ha C_s/C_p értéke csökken. A különbség teljesen eltűnik, ha $C_s/C_p = 0,7$. A visszatáplálásból származó profit csökken, ha C_s/C_p aránya csökken. Ezért annak érdekében, hogy a felhasználókat ösztönözzék a visszatáplálásra, a C_p és C_s értéke között nem lehet nagy különbség. Tehát a második kiinduló hipotézis igaz. Továbbá ebből a szempontból előnyösebb egy nagy teljesítményű töltő használata, mert az növeli a visszatölthető energia mennyiségét és így a profitot is. Valamint a nagy teljesítményű otthoni töltő az elektromos hálózat ingadozásának kiegyenlítésének is hatékony eszköze. Ugyanakkor jelenleg otthoni éjszakai töltéshez lassú töltőt javasolnak, ami az akkumulátor kímélt töltését teszi lehetővé.

Végül megvizsgáltuk az igény bejelentés időpontjának a hatását hosszútávú utazás esetén. A töltés fajlagos költségét töltési stratégiánként ábrázoltuk annak függvényében, hogy a hosszútávú utazás előtt mennyivel korábban állította be az igényt a felhasználó (8. ábra).



8. ábra: Fajlagos töltési költség az igénybejelentés

A töltés ütemezési módszerek esetén a fajlagos töltési költség alacsonyabb, mint a két alap töltési stratégia esetén, és a különbség enyhén n minél korábban bejelenti a felhasználó a töltési igényét. Minél hamarabb bejelenti az igényt, annál alacsonyabb a töltési költség a módszer alkalmazása esetén. Ennek oka, hogy egyre kevesebbet kell tölteni a járművet napközben, mert az alacsonyabb tarifájú éjszakai töltés is elegendő a töltési igény kiszolgálására. Tehát a harmadik kiinduló hipotézis igaz. Éjszakai töltés esetén a fajlagos töltési költség enyhén n . Ennek a jelenségnek az az oka, hogy az első napokban a jármű akkumulátora üres és egész este tölt a jármű. A későbbi napok során csak a kora esti órákban tölt, mert utána eléri a 100%-os töltöttséget. A kora esti órák magasabb töltési díja a teljes töltés fajlagos díját is megnöveli. Ugyanez a jelenség igaz a folyamatos töltés stratégiájára is. A fajlagos töltési költség a végtelenben megegyezik a napi rutin fajlagos költségével, ugyanis a hosszútávú utazás töltési igénye elhanyagolható lesz az összes napi rutin töltési igényéhez képest.

Az eredmények alapján a töltés ütemezés minden esetben csökkenti a töltési költséget. Habár a paraméterek változása jelentősen befolyásolja a költségmegtakarítás mértékét. A szimuláció legfontosabb megállapítása, hogy ha C_p^{\max}/C_p^{\min} és C_s/C_p aránya kellően magas (1,7 és 0,95) akkor töltés ütemezéssel a töltési költség napi rutin esetén 12% vagy 41%-kal csökkenthető az éjszakai töltéshez képest. A magas töltési igény költségét a korai bejelentés (137 óra) 5,3%-kal vagy akár 8,7%-kal is csökkentheti.

Konklúzió

A tanulmányban bemutatott módszer legjelentősebb újrszerősége a korábbi tanulmányokhoz képest, hogy a töltés ütemezésnél a felhasználói optimumot keresi és figyelembe veszi a kétirányú energiaáramot is. A módszer alkalmazhatóságát és eredményességét egy szimulációban elvégzett érzékenységi vizsgálattal támasztottuk alá. Megállapítható, hogy a töltés ütemezéssel jelentősen csökkenthető a töltési költség. Mivel a változó díjtétel alkalmazásával az elektromos járművek töltése egyenletesen elosztható az elektromos hálózaton térben és időben is, a módszer alkalmazása nem csak a felhasználó, hanem az elektromos hálózat üzemeltetője számára is előnyös.

A kutatás legfontosabb megállapítása, hogy a költségmegtakarítás jelentősen függ a változó díjtételtől, ennek megfelelően a teljes költség 5,3-41%-kal csökkenthető. Általánosságban, ha visszatápláláskor az áram eladási ára jelentősen alacsonyabb, mint a vételi ár (a szimulációban, ha az eladási árak kevesebb, mint 70%-a a vételi ár), akkor a visszatáplálásból nem származik haszna a felhasználónak. Ezért a visszatáplálás motiválásához magas eladási ár bevezetése javasolt. Megállapítottuk, hogy a hosszútávú utazások magas energiaigényéhez tartozó költség az igény minél korábbi bejelentésével csökkenthető. A korábbi tanulmányok az akkumulátor élettartamának növelése érdekében alacsony teljesítményű éjszakai töltést javasolnak. Ezzel ellentétben az elektromos hálózat és a visszatáplálásból származó profit növelése érdekében a magas teljesítményű éjszakai töltés javasolt.

A kutatás folytatásaként arra keressük a választ, hogy hogyan befolyásolják a jármű és töltőpont jellemzők (pl.: jármű akkumulátor kapacitása, töltési teljesítmény) a töltési költséget.

Irodalomjegyzék

- [1] Bede Zs. – Péter T.: Optimal control with the dynamic change of the structure of the road network, *Transport* 2014/29(1) 36-42 DOI: <https://doi.org/10.3846/16484142.2014.895959>
- [2] Péter T.: Tartományszint forgalom-és környezeti terhelést figyelembe vev optimális közúti irányítás, IFFK 2014 konferencia, Budapest 2014. augusztus 25-27.
- [3] Søndergren C.: Edison project: electric vehicles in future market models 2011 1-5
- [4] Kempton W. – Tomi J.: Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy, *Journal of Power Sources* 2005/144 280-294 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.022>
- [5] Morfoulaki M. – Kotoula K. M. – Myrovali G.: Calculating the Impacts of Alternative Parking Pricing and Enforcement Policies in Urban Areas with Traffic Problems, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 2017/45 35-41 DOI: <https://doi.org/10.3311/PPtr.9812>
- [6] Zhang C. – Jiang J. – Gao Y. – Zhang W. – Liu Q. – Hu X.: Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time, *Applied Energy* 2017/194 569-577 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.059>
- [7] Vincent T. L. – Weddle P. J. – Tang G.: System theoretic analysis of battery charging optimization, *Journal of Energy Storage* 2017/14 168-178 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.09.009>
- [8] Nie Y. – Ghamami M.: A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure, *Transportation Research Part B* 2013/57 172-190 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2013.08.010>
- [9] Andrenacci N. – Ragona R. – Valenti G.: A demand-side approach to the optimal deployment of electric vehicle charging stations in metropolitan areas, *Applied Energy* 2016/182 39-46 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.137>
- [10] Javaid N. – Naseem M. – Rasheed M. B. – Mahmood D. – Khan S. A. – Alrajeh N. – Iqbal Z.: A new heuristically optimized Home Energy Management controller for smart grid, *Sustainable Cities and Society* 2017/34 211-227
- [11] Huang Y. – Zhou Y.: An optimization framework for workplace charging strategies, *Transportation Research Part C* 2015/52 144-155
- [12] Škugor B. – Deur J.: A novel model of electric vehicle fleet aggregate battery for energy planning studies, *Energy* 2015/92 444-455 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.030>
- [13] Škugor B. – Deur J.: A bi-level optimisation framework for electric vehicle fleet charging management, *Applied Energy* 2016/184 1332-1342 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.091>
- [14] Alvao-Hermana R. – Fraile-Ardanuy J. – Merino J.: Algorithm development for night charging electric vehicles optimization in big data applications, *Procedia Computer Science* 2017/109 793-800 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.329>
- [15] Sundstrom O. – Binding C.: Flexible Charging Optimization for Electric Vehicles Considering Distribution Grid Constraints, *IEEE Transactions on Smart Grid* 2012/3(1) 26-37 DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2168431>
- [16] Kristoffersen T. K. – Capion K. – Meiborn P.: Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment, *Applied Energy* 2011/88(5) 1940-1948 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.015>
- [17] Galus M. D. – Andersson G.: Demand Management of Grid Connected Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEV), *Energy 2030 Conference*, Atlanta 2008. november 17-18. DOI: <https://doi.org/10.1109/ENERGY.2008.4781014>
- [18] www2.nationalgrid.com/uk