

A hangfrekvenciás fogyasztói befolyásolásban rejlő lehetőségek

Raisz Dávid, Dr. Dán András

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
raisz.david@vet.bme.hu*

Absztrakt: A cikk eljárást mutat arra, hogyan lehet vezérelt fogyasztókat HKV (ill. RKV) segítségével oly módon vezérelni, hogy összeegyeztethető legyen a napi legkisebb országos terhelés maximalizálásának és a kiegyenlítő energia csökkentésének célja, különböző korlátozó feltételek betartása mellett.

Kulcsszavak: vezérelt fogyasztók, modellezés, völgyfeltöltés, kiegyenlítő energia, optimalizálás

1. Bevezetés

A cikk célja egyrészt olyan modellezési eljárás bemutatása, melynek segítségével lehetővé válik vezérelt fogyasztói csoportok (elsősorban bojler, de akár hőtárolós kályha csoportok) teljesítmény-időfüggvényének szimulációja, másrészt a fenti modell alapján olyan vezérlési alapprogramok kidolgozása, amelyek segítségével a napi legkisebb országos terhelés maximalizálható az alábbi (írott, ill. a fogyasztók komfortérzetét biztosító íratlan) feltételek betartása mellett:

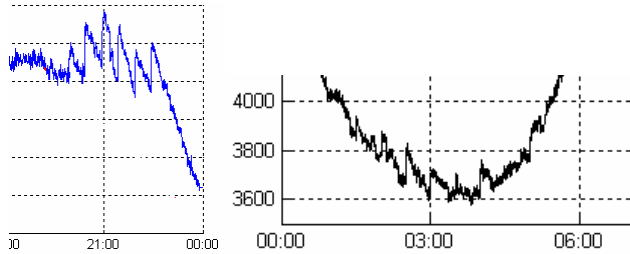
- bármely 5 perces időintervallumon belüli terheléslökések nagysága ne haladja meg rendszerszinten a 90 MW-ot (ld. [5] 6.8.12 pontját)
- minden vezérelt csoport összesen legalább napi 8 órát legyen bekapcsolt állapotban
- valamely fogyasztói csoport be- majd kikapcsolása között eltelt idő minimum 30 perc legyen.

Harmadszor egy olyan eljárást ismertetünk, amellyel a fenti vezérlési program kismértékű módosításával különféle szolgáltatói célfüggvények (pl. mérlegköri kiegyenlítő energia csökkentése) is kielégíthetők.

2. Vezérelt fogyasztói csoportok modellezése

A vezérelt fogyasztói csoportok modellezésére született [1] eljárás nehezen áttekinthető, csatolt Fokker-Planck parciális differenciálegyenletek megoldását igényli, és nagyon erős egyszerűsítő feltevések szükségesek [2], ha terhelés vezérlésre kívánjuk felhasználni.

A [3]-ban ismertetett eljárás lényegesen egyszerűbb. A napi terhelési görbék vizsgálata alapján látható, hogy egy vezérelt csoport bekapcsolása után e csoport teljesítményfelvétele közel exponenciális jelleggel csökken.



1. ábra

A rendszerterhelésben megfigyelhető ugrások

Ezért ez a modell azon a feltételezésen alapul, hogy egy csoport t_0 időpontban történő bekapcsolása után ezen fogyasztók teljesítményfelvétele a következő függvénnyel közelíthető:

$$P^{vt}(t) = P_0 e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}} - P_0 e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}} \quad (1)$$

ahol P_0 a csoport névleges beépített teljesítménye, τ_1 és τ_2 időállandók

E módszer előnye, hogy mindössze háromparaméterű, és ezek – még akkor is, ha időfüggőeknek tekintjük őket – pusztán a napi terhelési görbe alapján egyszerűen meghatározhatók. A modell hátránya egyszerűségéből fakadóan az, hogy bizonyos időszakokban nagyon pontatlan, pl. a kora reggeli órákban történő teljesítményfelvételnövekedést nem tudja követni.

E hátrány kiküszöbölésére született a bojler fizikai viselkedését alapul vevő modell (amely hőtárolós kályhákra kis módosítással szintén alkalmazható, de jelen cikkben ennek ismertetésétől eltekintünk).

A modell magja a forróvítárolók hőtechnikai egyenlete (2):

$$C \frac{dT(t)}{dt} = -a(T(t) - T_k(t)) - c_v q(t)(T(t) - T_{be}) + P \cdot v(t)b(t) \quad (2)$$

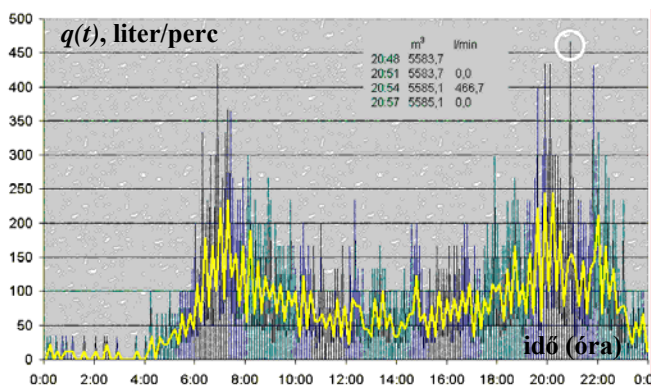
ahol $T(t)$ a bojlerben lévő víz átlagos hőmérséklete a t időpontban; C : bojler hőkapacitása (Joule/°C); $T_k(t)$: külső (szoba-) hőmérséklet (°C); $T_{be}(t)$: befolyó hidegvíz hőmérséklete (°C), a : bojlerfal hővezetési tényezője (W/°C); $q(t)$: melegvíz kivétel intenzitása (m³/sec); c_v : víz fajhője (Joule/m³ °C); P : bojler fűtőszálának

teljesítménye (W); $v(t)$: szolgáltatói vezérlés állapota (1 ha bekapcsolt, 0 ha kikapcsolt); $b(t)$: termosztát állapota (1 ha bekapcsolt, 0 ha kikapcsolt állapotban van), vagyis

ha $T(t) < T^b$ akkor $b(t) = 1$, ha $T(t) > T^k$ akkor $b(t) = 0$

ahol T^b a termosztát be-, T^k pedig a kikapcsolási hőmérséklete (a kettő között átlagosan 2-3 °C hiszterézis jellemző).

Egyetlen háztartás használatimelegvíz (HMV) fogyasztását – a (2) egyenletben $q(t)$ – pontosan nem ismerhetjük előre, azonban több háztartás együttes HMV fogyasztása elég jól becsülhető. A [4] irodalom közli pl. egy 260 lakásos társasház HMV fogyasztás intenzitásának 1 nap alatt mért időfüggvényét (2. ábra)

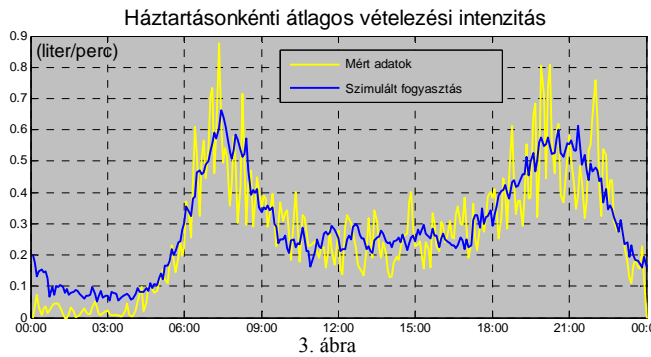


2. ábra

260 lakásos társasház HMV fogyasztása

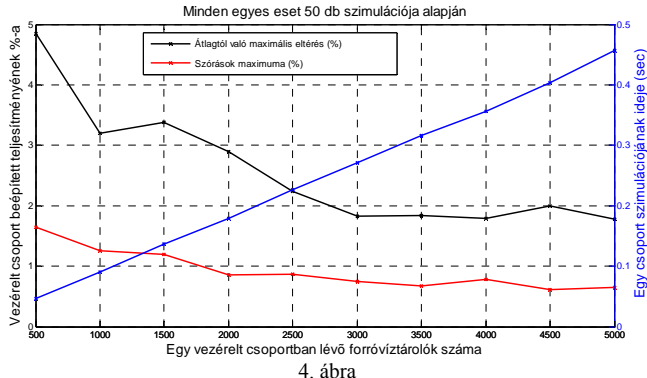
Hasonló adatok birtokában készíthető egy olyan HMV-fogyasztási modell, amely egyes háztartások $q(t)$ időfüggvényeit véletlenszerűen adja meg, de úgy, hogy 260 háztartás $q(t)$ időfüggvényének összege megegyezzen a 2. ábrán láthatóval.

Az irodalomban (pl. [6]) található adatok a hálózati hidegvíz hőmérséklet havonkénti átlagaira vonatkozóan is. Ennek segítségével T_{be} paraméter is meghatározható.



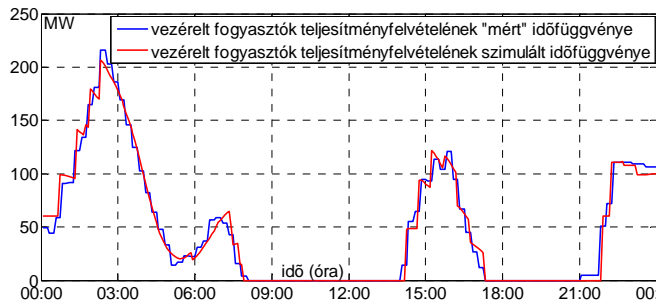
Háztartásonkénti HMV fogyasztás modelljének jósága

A sok bojler viselkedésének összegzésénél nem törekszünk – egyszerűsítések árán – zárt alakú kevés változós egyenletek levezetésére (mint [1]-ben), hanem a (2) egyenlet 3-4000 példányát számoljuk párhuzamosan. Ez a szám még elég alacsony ahhoz, hogy a mai processzorokkal rövid idő alatt elvégezhetőek legyenek a számítások, de már elég nagy ahhoz, hogy a véletlenszerűen felvett paraméterek (beállított termosztát hőmérsékletek, vízkivételi modell paraméterei) aktuális értékeitől ne függjön az eredmény.



Modell szórásának és szimulációs idejének függése a szimulált bojlerlek számától

E modell hátránya, hogy sok paramétere van, és ezek értékének meghatározásához soron kívüli ki- és bekapcsolásokra van szükség. Előnye viszont, hogy e kapcsolások során meghatározható a napi terhelési görbe vezérelt fogyasztók nélküli része is („torzítatlan terhelési görbe”, a továbbiakban $P^{II}(t)$), valamint – mivel a fizikai folyamat leképezésén alapul – a három modell közül feltehetően a legpontosabb. Az 5. ábrán látható egy – szolgáltató által becsült, „mért” – és a modell segítségével szimulált vezérelt fogyasztói terhelési görbe ($P^{VI}(t)$).



5. ábra

A modellparaméterek illesztésének eredménye

3. „Völgyfeltöltés”

Ha rendelkezésre áll a torzítatlan terhelési görbe, valamint a vezérelt fogyasztóknak egy megfelelő modellje, akkor szimulálható különféle vezérlési alpprogramoknak (AP) a terhelési görbére gyakorolt hatása.

A feladat bonyolultságának érzékeltetésére tételezzük fel, hogy a vezérelt fogyasztók bekapcsolásának – gazdasági okokból – mindössze napi 15 óra időtartamban van realitása. Tételezzük fel továbbá, hogy minden vezérelt fogyasztó 5 percenként kapcsolható (legyen a vezérlési intervallum $VI = 5$ perc; néhány szolgáltatónál ez az idő hosszabb, RKV esetén akár rövidebb is lehet). Ekkor az AP időrasztere $15 \cdot (60/5) = 180$ időpontból áll. Ha még azt is feltételezzük, hogy szolgáltatónként 8, azaz összesen 48 vezérelt fogyasztói csoport létezik, akkor az AP $180 \cdot 48 = 8640$ be/ki parancsból áll.

Az AP eredményeként létrejön egy eredő terhelési görbe ($P^{et}(t) = P^r(t) + P^{vt}(t)$), amelytől elvárjuk, hogy legkisebb értéke maximális legyen. A feladat tehát egy több ezer változós függvény változóinak optimalizálása, amelyre egy speciális, kétlépcsős eljárást dolgoztam ki.

Az **első lépés** egy olyan algoritmus kifejlesztése, amely egy tetszőlegesen előírt $P_{cél}^{vt}(t)$ célfüggvény esetén előállít egy olyan AP-ot, amelynek hatására létrejövő $P^{vt}(t)$ fogyasztói terhelési görbe követi – ameddig ez lehetséges – az előírt célfüggvényt, az 1. fejezetben leírt feltételek betartásával.

Legyen a fogyasztói csoportok száma N . Minden fogyasztói csoportra ($j = 1..N$) folyamatosan futtatjuk a 2. fejezetben leírt modellt, és így számon tartjuk, hogy mekkora lenne az a $P_j^{vt}(t)$ teljesítmény, amelyet a j -edik csoport felvenne, ha „BE” vezérlést kapna. A j -edik fogyasztói csoporthoz hozzárendeljük továbbá a $BI_j(t)$ változót, amelyet minden nap a délutáni völgyidőszak kezdetén nullázunk. E változóban számon tartjuk,

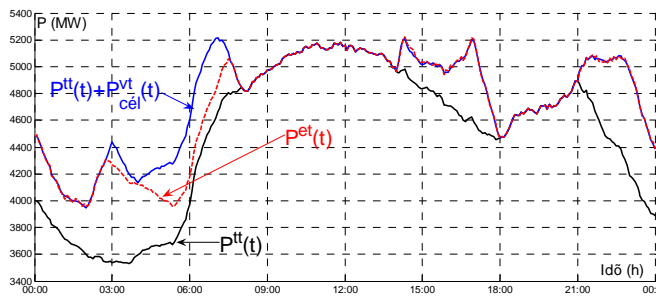
hogy a legutóbbi nullázás óta összesen mennyi ideig volt bekapcsolva e fogyasztói csoport. Minden egyes vezérlési parancs kiadása előtt (minden VI elején) növekvő sorba rendezzük a csoportokat a $BI_j(t)$, ennek azonossága esetén a $P_j^{vt}(t)$ jellemzőjük szerint.

(A sor elején azok a csoportok lesznek, akiket „sürgős” bekapcsolni, a végén azok, akik már sokat voltak bekapcsolva.) E sorrendet módosítjuk úgy, hogy a sor elejére kerüljenek a 30 percnél rövidebb idő óta bekapcsolt állapotban lévő, végére pedig a 30 percnél rövidebb ideje kikapcsolt állapotban lévő csoportok.

Ezután a „BE” vezérlést kapó csoportokat a sor elejéről választjuk ki egészen addig, amíg az alábbi feltételek bármelyike teljesül:

- a sorban következő csoport bekapcsolásának hatására $P^{vt}(t)$ meghaladná a $P_{cél}^{vt}(t)$ aktuális értékét
- a sorban következő csoport bekapcsolásának hatására $|P^{vt}(t) - P^{vt}(t-1)| > 90$ MW lenne.

A **második lépés** e $P_{cél}^{vt}(t)$ célfüggvénynek az optimalizálása úgy, hogy a létrejövő napi terhelésminimum a legnagyobb legyen. (Erre a feladatra egy ún. *genetikus algoritmust* alkalmaztam, ennek részleteire itt nem térek ki.)



6. ábra

A „völgyfeltöltési” algoritmus eredménye

Az eljárás eredménye a 6. ábrán látható. E példa kidolgozása során feltételeztük, hogy országosan $N = 25$ db, egyenként 40 MW beépített teljesítményű csoport létezik, ill. vonható be a „völgyfeltöltést” célzó vezérlésbe. A $P^{tt}(t)$ görbét a 2003. 07. 23-i adatok alapján becsültük, ekkor a napi rendszerterhelés minimuma 3656 MW volt. Az AP optimalizálása után a legkisebb teljesítményfelvétel értéke 3956 MW lett, úgy, hogy közben az összes korlátozó feltétel teljesült.

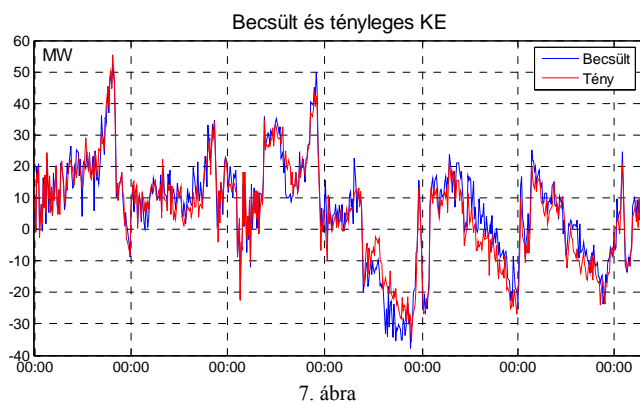
4. Kiegyenlítő energia becslése, csökkentése

Ahhoz, hogy a vezérelt fogyasztók segítségével csökkenteni lehessen a kiegyenlítő energiát (KE), szükség van

- a KE becslésére egy elszámolási mérési időintervallumon (EMI) belül
- a KE árának értékére, amely szintén csak becsülhető, hiszen pontos értékét csak később határozzák meg

Annak érdekében, hogy a KE csökkentés és a „völgyfeltöltés”, mint két különböző cél összeegyeztethető legyen, szükség lehet egy mérőszámra, amellyel a korábban meghatározott AP-tól való eltérés mérhető, és amelyre felső korlát szabható vagy amely alapján kiegészítő díj kiszabható.

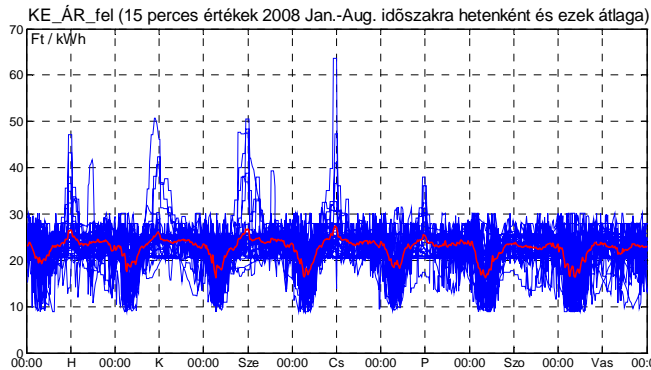
A KE becsléséhez szükség van perces gyakoriságú mérési adatokra, célszerűen a szolgáltató körzethatáraitól, a KDSZ SCADA-ból. Ezekből az adatokból a teljes EMI-ra vonatkoztatott KE becslése az EMI kezdetétől percenként elvégezhető, egyre növekvő pontossággal, pl. egy neurális hálózat alapú eljárással. Egy konkrét áramszolgáltató esetére kifejlesztett rendszer az alábbi KE becslési pontosságot adta:



7. ábra
A KE becsült és tényleg értékei

A KE árának becsléséhez a leszabályozás elszámolási egységárát vehetjük 0-nak ($KE_AR_{le} = 0$). A felszabályozás elszámolási egységárát (KE_AR_{fel}) pl. úgy becsülhetjük, hogy a hét minden negyedórájához hozzárendeljük az ugyanezen negyedóra vonatkozó múltbéli árak átlagát.

A becslés pontosságáról tájékoztat az alábbi ábra:



8. ábra

KE árának egyszerű becslése

(Készíthető egy ennél alaposabb, több adatot – pl. áramtözsde jegyzésárai – felhasználó becslő rendszer is, ennek részleteire itt szintén nem térek ki.)

A – valamely korábban meghatározott – AP-tól való eltérés mérésére többféle eljárás szóba jöhet.

a) Minden j vezérelt csoporthoz hozzárendelhető egy idő dimenziójú $ELT_j(t)$ változó, amelyet minden nap a délutáni völgyidőszak kezdetén nullázunk; értékét 1 VI hosszával növeljük, ha a csoport az AP-tól *eltérően* „BE” vezérlést kap; és értékét 1 VI hosszával csökkentjük, ha a csoport az AP-tól *eltérően* „KI” vezérlést kap. Az ELT értékekre megszabható egy maximális és egy minimális érték.

b) A fenti mérőszám szorozható a vezérelt csoport beépített teljesítményével, ekkor egy kWh dimenziójú mérőszámot kapunk.

c) Bevezethető egy időtől függő (akár „fel” és „le” irányban eltérő) Ft/kWh egységár is ($ELT \text{ \AA}R$), amit a b) alatti mérőszámmal szorozva kapható meg az eltérés miatt fizetendő díj. (Alábbi példában e mérőszámot használjuk.)

A KE csökkentésének algoritmusá vázlatosan az alábbi:

Minden VI elején dönteni kell a bekapcsolandó csoportokról. Az AP szerinti, aktuális VI-ra vonatkozó vezérlést jelölje $V(t)$, amely egy N elemű, 0 vagy 1 értékeket tartalmazó vektor, ennek j -edik elemét jelölje $V(t,j)$.

1. Ehhez a vezérléshez rendeljünk hozzá egy $H(V(t))$ értéket, amely Ft dimenziójú, és azt aktuális vezérlésből származó „hasznot” méri. (Definícióját ld. alább.)
2. Minden j csoporthoz határozzuk meg azt a $H'(V(t,j'))$ értéket, amelyet úgy kapunk, hogy a $V(t)$ vezérlési vektor j -edik elemét az ellenkezőjére változtatjuk.
3. Keressük meg az $MH = \max_j(H'(V(t,j')))$ értéket.

4. Ha $MH > H(V(t))$, akkor az aktuális vezérlést változtassuk meg $V(t)$ helyett $V(t, j')$ – re, és térjünk vissza az 1. ponthoz, ellenkező esetben a haszon ebben a VI -ban nem növelhető tovább.

(Ha van rá elegendő számítási kapacitás, akkor a fenti iterációs eljárás helyett végig lehet próbálni az összes lehetséges változtatást is – ez N csoport esetén 2^N lehetőség – és ezek közül kiválasztható a maximális hasznot eredményező vezérlés.)

A H haszon-függvény értékét az alábbiak szerint számoljuk:

$$H = P^{akt} (\dot{A}R_{elad} - \dot{A}R_{vesz} - KE - \dot{A}R) \cdot |VI \text{ hossza}| - \sum_{j=1}^N |ELT_j(t)| P_j^{névl} \cdot ELT - \dot{A}R(t) \quad (3)$$

ahol

$$P^{akt} = \sum_{j=1}^N P_j^{vt}(t) V(t, j) - P^{HKV+KE}(t) \quad (4)$$

$$KE - \dot{A}R = \begin{cases} KE - \dot{A}R_{le}(t), & \text{ha } P^{akt} < 0 \\ KE - \dot{A}R_{jel}(t), & \text{ha } P^{akt} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

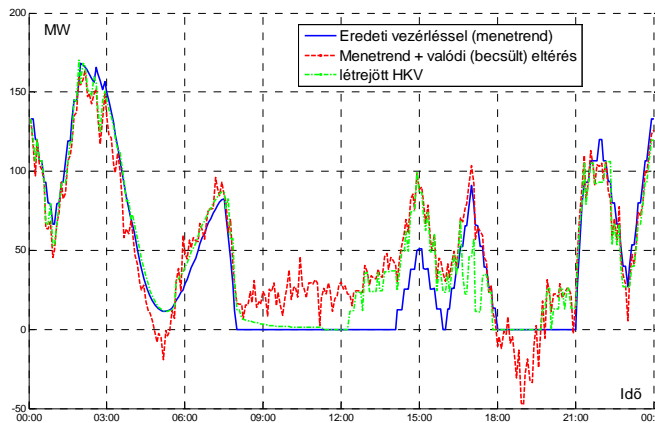
$P_j^{névl}$ a j -edik vezérelt csoport összes beépített teljesítménye

$P^{HKV+KE}(t)$ a t -edik VI -ban a menetrend részeként megadott, összes vezérelt fogyasztásnak és a becsült szükséges kiegyenlítő szabályozási teljesítménynek az összege. (Ez az a teljesítmény, amit biztosítani kívánunk a vezérelt fogyasztókkal.)

Fenti eljárást szemlélteti a következő példa. Feltételezzük, hogy a szolgáltató 16 vezérelt csoportot tud kezelni, ezek összes beépített teljesítménye 215 MW. Legyen a villamos energia beszerzési ára 21 Ft/kWh, az eladási ára 32.6 Ft/kWh, a KE leszabályozás elszámolási egységárának becsült értéke 0.1 Ft/kWh, a KE felszabályozás elszámolási egységárának becsült értéke 23 Ft/kWh (minden időben). A valódi KE árakat a 2008. május 7-ei adatokkal vesszük figyelembe. A KE becslésének pontatlanságát egy adott EMI három 5-perces VI -ában úgy szimuláljuk, hogy az első VI -ban az előző EMI -re vett KE -t vesszük becslésként, a másodikban az aktuális EMI -ben kialakuló KE valódi értékéhez egy véletlenszerű, normális eloszlású, 4.6 MW szórású, a harmadik VI -ban pedig a valódi értékhez egy véletlenszerű, normális eloszlású 2.5 MW szórású zajt adunk hozzá. A 9. ábrán kék görbe jelöli az előre meghatározott AP hatására kialakuló, menetrendben megadott vezérelt fogyasztás alakulását. A piros görbe azt a teljesítmény-időfüggvényt jelöli, amelyet a HKV -val biztosítani kellene a KE nulla értéken tartásához. Az eredeti vezérléssel a KE díja -2.016 MFt-ra adódna.

A példa első részében legyen $ELT_AR = 0 Ft/kWh$. Ekkor a fenti algoritmus eredménye $+0.555$ MFt visszatérítés, viszont az $ELT_j(t)$ változók abszolút értékeinek maximuma 5.58 óra, vagyis nagyon nagy az eltérés az AP-tól.

Ha $ELT_AR = 10 Ft/kWh$, akkor a fenti algoritmus a zöld görbét eredményezi, a teljes fizetendő díj -0.952 MFt-ra adódik, és az $ELT_j(t)$ változók maximális abszolút értéke 3.5 óra.



9. ábra

A KE csökkentési algoritmus eredménye

Ha ELT_AR értékét nagyon nagyra választjuk, akkor a kialakuló vezérlés meg fog egyezni az eredetivel.

Fentiekből látható, hogy az ELT_AR megfelelő megválasztásával biztosítható két különböző célfüggvény szerinti vezérlési program közötti tetszőleges átmenet. (A példákban az összes korlátozó feltétel teljesült.)

5. Összefoglalás

A cikk először bemutatja a vezérelt (HKV vagy RKV) fogyasztói csoportok modellezésének matematikai háttérét, majd arra keresi a választ, hogy hogyan lehet a vezérlési alapprogramjukat úgy meghatározni, hogy

- a rendszerszintű (hajnali) völgyterhelés a lehető legnagyobb legyen, és
- teljesüljenek a teljesítményugrásra valamint a fogyasztói komfortérzet biztosítása érdekében előírt korlátozó feltételek.

A következőkben arra kerestük a választ, hogy a rögzített alpprogramtól való napközbeni kismértékű eltérés árán, a fenti cél szem előtt tartásával, az elosztói

engedélyes hogyan tudja csökkenteni kiegyenlítő energiáját. Az eredmények azt mutatják, hogy az említett célok és korlátozó feltételek összhangba hozhatók, vagyis a HKV/RKV rendszerben rejlenek további, jelenleg kiaknázatlan lehetőségek.

Meg kell említeni, hogy a módszer gyakorlati alkalmazása számos nehézségbe ütközhet, ezek pl.:

- a KE becsléséhez szükség van valós idejű mérési adatokra, amelyek azonban az egyre nagyobb számban jelen lévő kiserőművektől korlátozott mértékben állnak rendelkezésre; ez a KE becslés pontosságát ronthatja
- szükség van a jelenlegi piaci szabályozási rendszer egy részének újragondolására, legalább három érintett szereplő (a Rendszerirányító, az Elosztói engedélyesek és az Egyetemes szolgáltatók) részben ellentétes érdekeinek figyelembevételével.

6. Irodalomjegyzék

- [1] J. C. Laurent, R. P. Malhamé: „A Physically-Based Computer Model of Aggregate Electric Water Heating Loads”, IEEE T. on Power Systems, Vol. 9. No. 3, Aug. 1994
- [2] Jean-Charles Laurent *et al*: “A Column Generation Method for Optimal Load Management via Control of Electric Water Heaters”, IEEE Tr. on Power Systems. Vol. 10, No. 3, August 1995
- [3] Dr. Dán András, Dr. Tajthy Tihamér, Raisz Dávid: „A villamosenergia rendszerérdek közvetítésének árszabályozási lehetőségei, különös tekintettel a vezérelt, külön mért tarifakategória szerepére és az alkalmazott zónaidőkre”, MEH Publikációk, 2003. november
- [4] Huszti József, Némethi Balázs: „A használatimelegvíz-fogyasztás mértékadó intenzitásának és napi lefutásának méréses vizsgálata új méretezési összefüggések kidolgozása érdekében”, Távhőforum 2003, Hévíz
- [5] Üzemi Szabályzat (érvényes: 2008. 01. 01-jétől)
- [6] Rudolf Binting: „Untersuchung der Struktur des Brauchwasserbedarfes einer Wohnhausanlage zur allgemeinen Dimensionierung der solaren Warmwasserbereitung”, Diplomateriv (német nyelven), Bécs, 2002

Raisz Dávid (raisz.david@vet.bme.hu) 2000-ben szerzett villamosmérnöki oklevelet a BME Villamos Művek Tanszékén, jelenleg tudományos segédmunkatárs, doktori fokozatának megszerzésére készül, a MEE és az IEEE tagja.

Dr. Dán András az MTA doktora, egyetemi tanár, a BME Villamos Energetika Tanszék tanszékvezető helyettese, a MEE tagja, IEEE Senior Member.

A cikk egy rövidített változatát az „Elektrotechnika” c. folyóirat 2009. januári száma fogja közölni.