

A gázmotoros áramszolgáltatás üzleti lehetőségei az egészségügyi szektorban

Vokony, István

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
vokony.istvan@vik.bme.hu

Sinkovics, Bálint

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
sinkovics.balint@bme.hu

Sörös, Péter Márk

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
sores.peter@vik.bme.hu

Divényi, Dániel

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
divenyi.daniel@vik.bme.hu

Szalmáné, Csete Mária

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
csete.maria@gtk.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÓ

A kutatásban új energiatermelő eszközökre alapozva a hő- és villamos energia biztosítása mellett helyben a szünetmentes ellátást szavatoló – telephelyen kívülre rendszerszintű szolgáltatás értékesítésére építő – üzemeltetési koncepciót alakítottunk ki. A szektorra jellemző nemzetközi tapasztalatok alapján teljes üzleti koncepciót szükséges kialakítani a sikeres pilotprojektekhez. A megvizsgált műszaki-gazdasági és regulációs környezet tendenciái alapján látható, hogy a ma még bizonytalan kimenetelű változások iránya egyöntetű: mind támogatja a szekunder szabályozásra alkalmas kiserőművi eszközök piaci térnyerését és profitabilitásának fennmaradását. Fontos feladat az unikális elemek azonosítása az értékajánlatokban. A kutatás célja annak feltárása, hogy a realizált árkülönbség, a hőoldali bevételek, a termelési kihasználtság, az optimalizált üzemviteli működtetés, a méretezés stb. közül melyik és milyen mértékben van hatással a beruházásra, az üzemeltetésre és összességében az üzleti modellre, annak eredményességére.

KULCSSZAVAK: termelés optimalizálás, ESCO, gázmotor, üzemeltetés, UPS

JEL-KÓDOK: O0, O1, O3

DOI: https://doi.org/10.35551/PSZ_2022_3_6

Napjainkban már nem az a fő kérdés, hogy megújuló alapú vagy fenntartható energiaellátási megoldásokat válasszunk-e a hagyományos megoldások helyett, hanem sokkal inkább az, hogy a környezet- és klímabarát, energiahatékony megoldások közül melyik technológia és üzleti modell illeszkedik (Zheng et al. 2017) leginkább a felhasználási területhez és beruházási korlátokhoz. Az EU-s és hazai szakpolitikai környezet iránymutatásai és célkitűzései is mind ezt támasztják alá.

A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (Corera, J., 2006) nem jelent radikális változást az elmúlt évtizedekben alkalmazott hő- és villamosenergia-termelési módokhoz képest, mindemellett magas hatásfokkal és jó megtérülési mutatóval bír. (Plahn P., Keene, K. Pendray J., 2015) A közvetlen előnyökön túl pedig közvetett haszna is van: a DSO (distribution system operator – elosztóhálózati engedélyes) számára lehetőséget hordoznak ezek az egységek egy szabályozható, elosztott energiatermelési pool kialakításában (Sioshansi, F., 2021), ami napjainkban a flexibilis szolgáltatás műszaki alapjait jelenti. (Bozkaya, B., Zeiler, W., Boxem, G., 2014) Természetesen egy ilyen alkalmazás nemcsak műszaki szempontoknak kell, hogy megfeleljen, sőt egy pénzügyileg életképes szolgáltatáscsomagot kell kialakítani, akár a szabályozásirtalék-piacon történő részvétellel vagy önmagában az alapfunkciókból adódóan: az intézmény normál- és szükségellátása céljából (European Council, 2022).

A gázmotorok alkalmazásának a kórházi energiaellátás fejlesztésére hazánkban már évtizedes története van hol sikeres, hol kevésbé sikeres megoldásokkal. A jelenlegi piaci környezetben, valamint a kórházak jelentős (mind villamos, mind pedig hőoldali) energiaigényére (Erdélyi, A., Pulay Gy., 2021), jellegzetes időbeli igényeloszlására alapozva az alapvető fontosságú, folyamatosan rendelkezésre álló, megbízható és minőségi energiael-

látás biztosítására együttesen megoldást kínáló szolgáltatáscsomag (Elekes, A., 2018) teljes egészében átalakíthatja a kórházak és energia-szolgáltatók eddigi kapcsolatrendszerét egy mindkét fél számára sikeres konstrukcióvá. (Gurieff, N., Green, D., Koskinen, I., et al, 2020) Különösen aktuális a kutatás amiatt is, mert a 2000-es években nagymértékben elterjedt KÁP/KÁT (kötelező átvételi támogatás, korábban KÁP) villamosenergia-értékesítésre létesített kapcsolt gázmotoros termelőegységek jó része műszakilag teljesen leamortizálódott, továbbá a kórházak hőszolgáltatási szerződése is lejáratközele, vagy már le is járt, és csak átmenetileg hosszabbítják meg a jelenlegi eszközparkkal és szolgáltatóval. Ugyanakkor mint energetikai telephelyek, helyszínek kiválóan alkalmasak elosztott és rugalmas, menettrendtartó kapacitások fenntartására, bővítésére, modernizálására, a kapcsolt energiatermelés előnyeinek, a primer energia megtakarításának realizálására, ami a feszített földgázipiaci környezetben elkerülhetetlen feladata a hazai energiaszektornak. (Mihálovits, Zs., Tapaszti, A., 2018)

Tanulmányunkban kidolgoztunk egy lehetséges elképzelést a szolgáltatási koncepció fejlesztési irányára vonatkozóan, amelynek főbb sarokpontjai a következők.

▶ A DSO attraktív szolgáltatási ajánlattal sikeresen tud megjeleníteni a kórházak energiaellátásában és egyedi igényeinek kiszolgálásában egy új gázmotoros kapacitás létesítésével.

▶ Egyedi, megkülönböztető szolgáltatásként a szünetmentes villamosenergia-ellátás biztosításával értékesebbé válik az ügyfélajánlat;

▶ A DSO emellett ingyen/kedvező áron ad hőt a kórházaknak, a gázmotor tartalékpiacra értékesítő üzemeltetésével, valamint a villamos energia közvetlen értékesítésével az ügyfél számára, ami nagymértékben tudja javítani az elérhető üzemi fedezetet;

▶ A hálózati oldali szinergiahatásokkal együtt (földgázfogyasztás, RHD-rendszerhasználati

díj) rentábilis lehet a zérus/alacsony hődjú hőszolgáltatásra építő, kapcsolt gázmotoros termelés.

Ahogy korábban is említettük, a műszaki megvalósítási javaslatok a lehetőséget teremtik meg, az irányt a gazdasági megfontolások fogják meghatározni.

Cikkünkben a téma meghatározása után összefoglaljuk, milyen műszaki-gazdasági forgatókönyveket lehet elképzelni, és ezek optimalizációjaként milyen szolgáltatásoknak (Mancarella, P., 2014) van létjogosultságuk. A következő fejezetben a gázmotor működésének műszaki szimulációs vizsgálatát mutatjuk be. A negyedik fejezetben az üzemeltetési kérdéseket és a költség szerkezetet tárgyaljuk. Az üzemkövetés matematikai modelljét és szimulációs elemzését az ötödik fejezet mutatja be. A hatodik fejezetben pedig a vizsgálatok kiértékelése, az üzemoptimalás bemutatása kapott helyet, azaz megmutatjuk, milyen szerkezetben képes nyereségesen üzemelni a gázmotor, egy ESCO (Energy Service Company) beruházási konstrukció esetén. Zárásként pedig a konklúzió és a hivatkozásjegyzék olvasható.

SZÜNETMENTES VILLAMOS ELLÁTÁS – EGYÉB KONCEPCIÓ

Gázolaj alapú motorok, aggregátorok

A szünetmentes ellátás hagyományos megoldásai a dízel energiaforrásról üzemeltethető, sok esetben konténeres kialakítású, belső égésű motoros (aggregátoros) energiatermelők. A közlekedésből jól ismert klasszikus kialakításukkal megbízható, gyorsan indítható és felterhelhető energiaforrásokról van szó, melyek alkalmazását a gyakorlatban a tüzelőolaj-ellátás, a zajosságuk, az emissziós követelmények – különösen városi környezetben – jelentős mértékben korlátozzák. A teljes névleges

teljesítménytartományuk elérhető, ugyanakkor nem jellemző rájuk a kapcsolt energiaellátás kiépítése, vagyis a hőenergia nem hasznosítható a továbbiakban.

A korszerű (Li-ionos technológiájú) akkumulátorok rendkívül rugalmasak, nagy tárolt energiakapacitás és teljesítmény jellemzi őket. Magas beruházási költségük, tűzvédelmi és biztonságtechnikai kötöttségeik miatt viszont csak korlátozottan alkalmasak a felhasználáshoz közeli, épületen belüli elhelyezésre. Emiatt előnyeik, az alacsony zajszint és az emissziómentesség kevésbé érvényesülnek; ha külön energetikai épületben helyezik el őket, már a hagyományos gáz/dízel alapú megoldások is felmerülhetnek. A nagy beruházási költség, továbbá a nettó energiaelnyelés miatt az üzemeltetési költségeik csak folyamatos kihasználtsággal térülnek meg. Nagy hozzáadott értékű rugalmassági szolgáltatások esetén ismertek jelenleg megtérülő scenáriók. Hátrányuk még azonban a konkrét alkalmazás szempontjából a hőfelhasználás megoldásának hiánya.

Mivel a gázmotorok igen rugalmasan szabályozhatók, műszaki adottságaik miatt előnyük lehet a vizsgált piacokon. Az üzemi tartományon belül, a 40–100 százalékos teljesítménytartományban mintegy 0,2–1,2 MW/perc sebességgel is szabályozhatók, így a kiegyenlítő szabályozás feltételei teljesíthetők, ha sikerül megfelelő kapacitású egységeket összekapcsolni.

ÜZEMELTETÉSIMODELL-JAVASLAT

Az összetett, műszaki és gazdasági optimalizációt is igénylő értékeléshez több, egymásra épülő elemzési réteget használtunk.

A lépéssorozatnak része a tényleges üzemeltetési optimalizáció is, amelynek a rugalmas gázmotorok esetében jelentős szabadsági foka van. (Közel nincs 100% környékén a lehetséges és tényleges hasznosítási órák számának ará-

nya.) A számításokat ugyanakkor bottom-up módon felépített, idősoros műszaki üzemviteli szimulációra és üzemeltetési cash flow kalkulációra alapozva végeztük, aminek a végén a teljes ESCO projekt üzleti modelljét értékeltük.

A gázmotorok műszaki üzemeltetési modellezését két részre bontottuk: üzemtervezés-optimalizálás és üzemkövetés-szimuláció.

A gazdasági változók (árak, teljesítményigények) szerinti üzemtervezés-optimalizálás eredménye megadja, hogy egy adott órában, adott ár és terhelés mellett hány gázmotor működjön, beállítja azok terhelését, valamint az elegendő hőmennyiséget.

Az üzemtervezés-optimalizálást a kívánt eredmények miatt a 2018 és 2040 közötti időszakra óránként végeztük, tehát forgatókönyvenként közel 200 000-szer. Az időhatékony-ság céljából a feladatot mixed integer linear programming (MILP) alakban fogalmaztuk

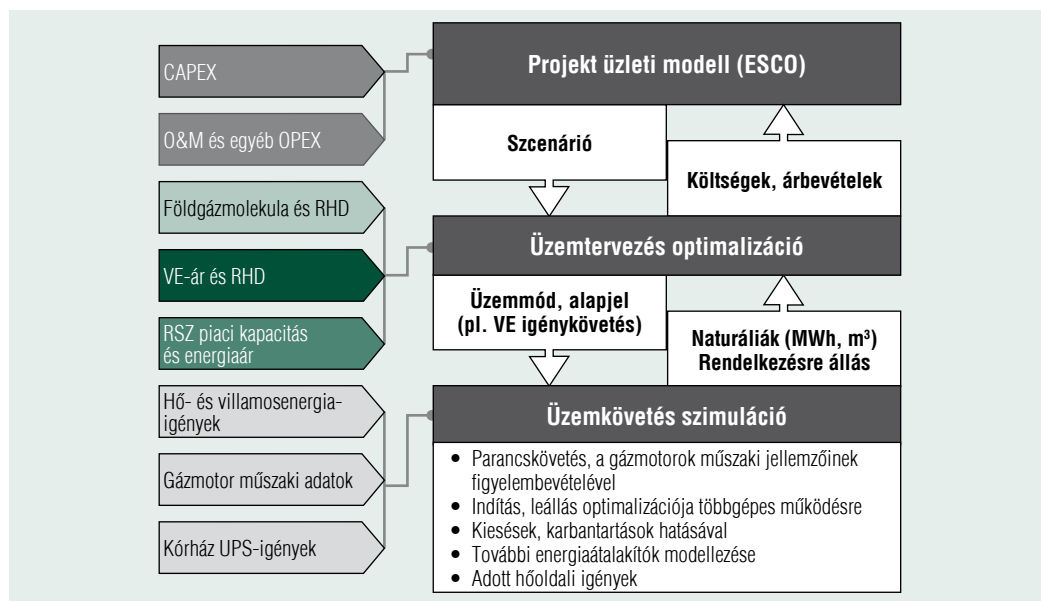
meg. Ebben a lineáris korlátok miatt némi egyszerűsítés szerepel, mivel nem vettük figyelembe a terhelésfüggő hatásfokot, ami nem kezeli az intertemporális korlátokat. A kapott alapjelek műszaki valószerűségét azonban a modellezés második szakaszában szimulációkkal ellenőriztük. Az optimalizálás matematikai leírását *A gázmotoros üzemeltetés ár- és költségkeretei* című fejezet mutatja be.

Az üzemkövetés-szimuláció bemutatja, hogy a kiszámított gázmotor-villamosalappal a rendelkezésre álló motorok műszaki paramétereire szerint miként követhető. A szimulációnak ez a részleme erősen műszaki fókuszú: figyelembe veszi a gradienskorlátokat, a hőszolgáltatási korlátokat, a be- és kikocszolást, a rendelkezésre állást és a karbantartásokat.

Az 1. ábrán a szimulációs keretrendszer számítási rétegei, illetve e felhasznált adatforrások kapcsolata látható.

1. ábra

A SZIMULÁCIÓS KERETRENDSZER SZÁMÍTÁSI RÉTEGEI, ILLETVE A FELHASZNÁLT ADATFORRÁSOK KAPCSOLATA



Forrás: saját szerkesztés

A GÁZMOTOR ÜZEMKÖVETÉSI, MŰSZAKI SZIMULÁCIÓJA

A gázmotor üzemviteli, idősoros szimulációja során egy adott, az üzemtervezés-optimalizáció által kalkulált üzemeltetési elvárásnak, alapjelnek megfelelő, többgépes műszaki optimalizáció és működés-ellenőrzés történik meg, figyelembe véve a gépparamétereiket, a hő- és villamosenergia-korlátokat, valamint a lehetséges kieséseket.

A motorüzem változói egy korábbi kiserőműves felmérés tapasztalatai alapján:

- 98 százalékos rendelkezésre állás (Samad, T., Koch, E., Stluka, P., 2016),
- 600 kW/perc szabályozásgradiens motoronként,
- elengedhető a hő a termelt hőenergia 0–80 százalékos tartományában,
- a teljes villamos kapacitás min. 60 százaléka a tartós minimumterhelés 40 százalékáig megengedett (bár időben korlátozva) a teljesítmény visszafogása (alapvetően a kokszolódási korlát leképezése miatt).

A MATLAB környezetben implementált idősoros modell eredményként kapott tényleges villamos teljesítmény-idősor összehasonlítható az alapjellel.

Az üzemkövetés-szimulációhoz egy igen részletes gázmotormodellt alkalmaztunk, amely számos technikai korlátot figyelembe vesz: a hőigénykövetést, az indítási és leállítási időt, a kokszolódást, a kieséseket. Az egyes szempontok részletes bemutatását a további alfejezetek ismertetik.

A A HŐRENDSZER MODELLEZÉSE. A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés üzemére a hőoldali elvárások jelentős mértékben hatnak, a hőrendszert egy nem ideális tárolóként képeztük le. Az aktuális hőigény feletti betáplálás ezt a hőrendszert tölti, a hőigény részleges teljesítése a hőrendszerben lévő hőt (HIS) csökkenti. Ez a modellezett hőmennyiség akár ne-

gatív is lehet (ekkor a rendszer az igényekhez képest alulfűtött). A hőrendszer veszteségét, illetve a rendszerre tápláló többi hőforrást modellezve a HIS értéke előjeltől függetlenül folyamatosan nullához tart, kb. egy óra alatt 88–90 százalékos értékre csökken (2. ábra).

B A HŐIGÉNY KÖVETÉSE. A gázmotor az üzemtervezés-optimalizálásból származó villamos alapjelet követi, de minden esetben számítunk egy hőalapjelet is. Ez utóbbi figyelembe veszi az aktuális hőigényt, valamint a rendszerben lévő hőmennyiséget is (korábban túlfűtött rendszer esetén csökkenti, alulfűtött rendszerre kicsit jobban motiválja a rátáplálást). Mivel a villamos alapjelnek van prioritása, ezért a hőalapjelet csak a lehetőségekhez képest próbálja követni a gázmotor.

A villamos alapjelhez meghatározott üzemállapothoz tartozik egy megtermelt hőmennyiség is. Ha ez nagyobb, mint az aktuális hőalapjel, akkor a felesleget a gázmotor a bypass-ágakon elengedi.

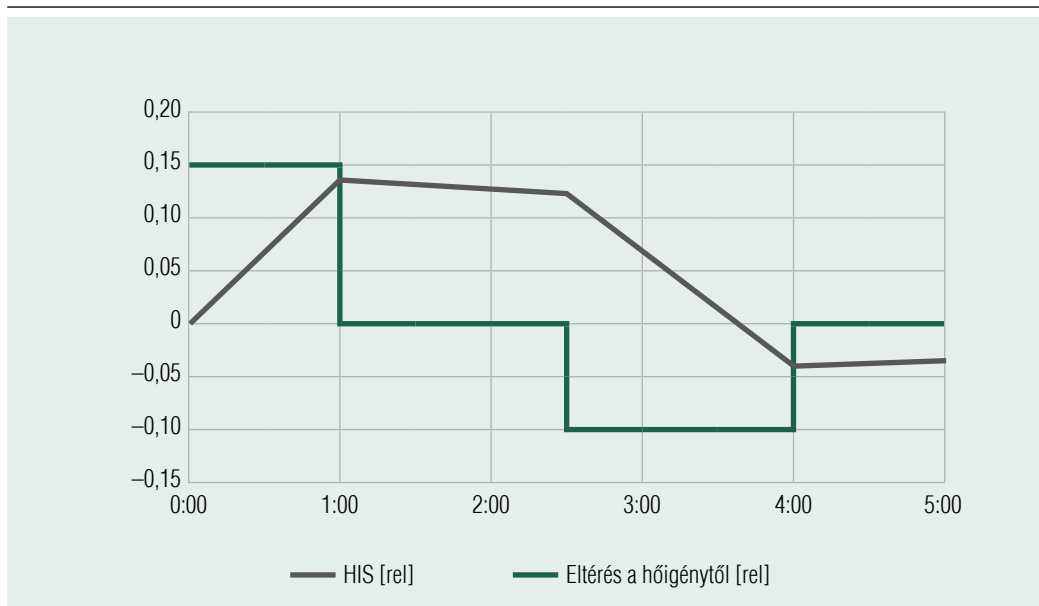
Mivel a hőalapjel követését a villamos alapjel követése felülírhatja, ezért a hőrendszer jelentős túl- és alulfűtését két további korlát implementálásával kezeltük.

A hőrendszer jelentős túl-, illetve alulfűtésének korlátját a hőrendszer-toleranciával paramétereztük: a hőrendszerben ténylegesen jelen lévő hőtöbbletet vagy hiányt erre a megengedett maximális értékre vonatkoztatva egy relatív értéket kapunk. Magas (50 százaléknál nagyobb) HIS-értékeknel a gázmotor korlátozza a rendszerbe táplálható (vagy –50 százaléknál kisebb értéknél az onnan kivehető) hőt a 3. ábra karakterisztikája alapján. Ez a korlátozás már képes felülbírálni az üzemtervezés-optimalizálás villamos alapjelét is.

Az első korlát azonban még mindig képes hosszabb ideig túl- vagy alulfűtésben tartani a rendszert. Ezért, ha a HIS > 50% huzamosabb ideig (1 óráig) fennáll, akkor a gázmotor mintegy második korlátként, függetlenül az üzem-

2. ábra

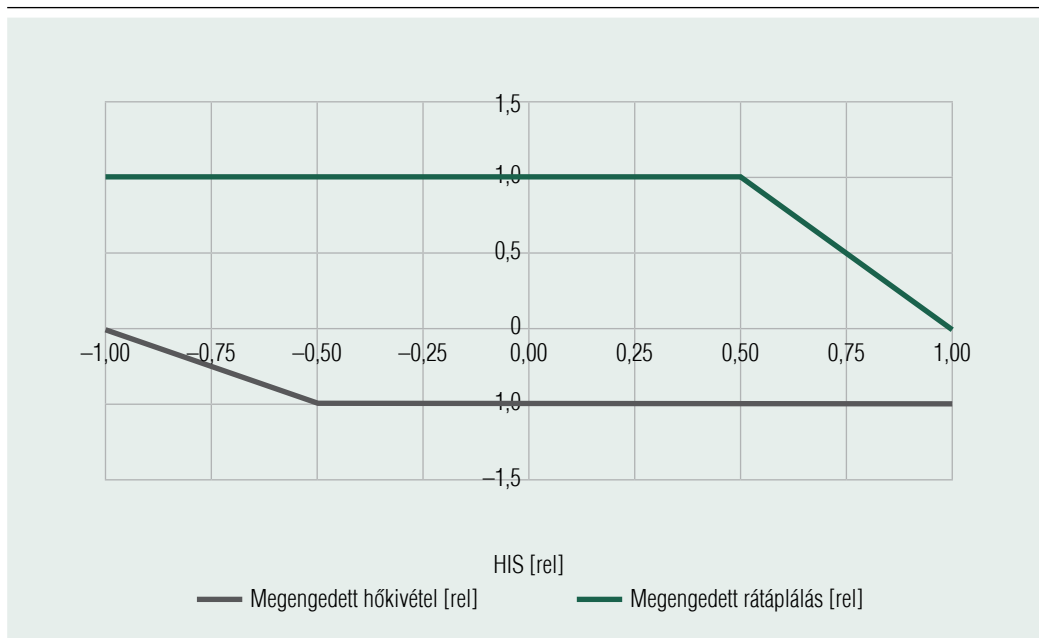
A HŐRENDSZER MODELLEZÉSE (A MENNYISÉGEKET VISZONYLAGOS EGYSÉGEKBE FELTÜNTETVE)



Forrás: saját szerkesztés

3. ábra

A HŐIGÉNYTŐL VALÓ ELTÉRÉS KORLÁTOZÁSA



Forrás: saját szerkesztés

tervezés-optimalizálás alapjelétől, saját vezérléssel egyensúlyba állítja a HIS értékét.

C GÉPMENEDZSELÉS (SZABÁLYOZÁS, INDÍTÁS, LEÁLLÍTÁS, KOKSZOLÓDÁS). Az üzemkövetés-szimuláció feladata, hogy a villamos alapjel követhetéséhez meghatározza az egyes gázmotorok optimális terhelését. Ennek az algoritmusnak a főbb lépései.

① A nem vezérelhető gázmotorok teljesítményének meghatározása

- A kiesés/karbantartás alatt álló gázmotorok vezérlésének tiltása.
- A túl sokáig minimális terhelésen futó gépek felvezérlése (a kikokszolás érdekében) – független a villamos alapjeltől, az adott gázmotor műszaki elvárásai felülírják.
- Előző időszakban megkezdett indítások/leállítások folytatása és befejezése – független a villamos alapjeltől, az elindított/leállított gépek indítási/leállítási folyamatát le kell zárni.

② A vezérelhető gázmotorokra jutó teljesítmény és az ehhez szükséges gázmotorszám meghatározása.

③ A szükséges új motorindítás és leállítás megkezdése.

④ Az üzemelő motorok alapjelének beállítása.

A nem vezérelhető gázmotorok teljesítményének meghatározása

A nem vezérelhető gázmotorok közé tartoznak a karbantartás/kiesés miatt nem működtethető gépek. A kiesés bekövetkezésekor az adott motort a modell azonnal leállítja, a gradienskorlát figyelembevétele nélkül. Értelemszerűen a nem üzemelő gépek leadott teljesítménye zérus.

A gázmotorok műszaki követelményei megengednek egy átmenetileg tartható minimális teljesítményt. Ez az alsó határ azon-

ban a modellben csak 3 óráig tartható, ezután a gázmotort „ki kell kokszolni”. A kikokszolás azt jelenti, hogy legalább 30 percig, tartósan legalább a megengedett minimális teljesítményen kell üzemeltetni. A vezérlési modell – ha egy gázmotor 3 óráig az átmeneti tartományában üzemel – kivessi az üzemkövetés vezérelhető gépcsoportjából, és 30 percig a tartósan megengedett minimális teljesítményen üzemelteti. Ennek a gázmotornak a terhelése nem változtatható, de nem is zérus, mint a kiesett egységeké.

Végül az indítás/leállítás alatt lévő motorok tartoznak a nem vezérelhető egységek közé. Ezek teljesítménye a nulla és az átmenetileg megengedett minimális teljesítmény között van, s a parancstól függően teljesítményük a megengedett gradienssel folyamatosan növekszik (felfutás) vagy csökken (leállás).

Az üzemelő gépek számának meghatározása

A nem vezérelhető gépek teljesítménye tehát rögzített, ezt a villamos alapjeltől levonjuk. A fennmaradó teljesítményt a vezérelhető gépek alapjelének megadásával kell elérni. Mivel a gépek részterhelésen is üzemeltethetők, ezért előfordul, hogy egy adott teljesítmény nem determinálja egyértelműen az üzemben tartandó motorok számát. Például 2 darab 800 kW-os gázmotor esetén 720 kW-os teljesítmény teljesíthető két motorral (360 kW+360 kW, 45 százalékos terhelés), illetve egy géppel is (720 kW, 90 százalékos terhelés).

A szükséges új motorindítás és leállítás

A ténylegesen üzemben tartandó gépek számát a következő, egyszerű szabályokkal határozza meg a modell. Csak annyi motort állít le,

amennyit feltétlen szükséges. Ha gépindításra van szükség, akkor azt minden esetben végrehajtja. Előfordulhat, hogy az algoritmus gépindítást jelez szükségesnek, de nincsen indítható gép (pl. kiesett). Ilyenkor természetesen a vezérelhető gépek lesznek nagyobb mértékben felszabályozva a hiba csökkentése érdekében.

Az üzemelő motorok alapjelének beállítása

A rendelkezésre álló és üzemelő gépeknek, amelyek nem estek ki, nincs karbantartás vagy kikokszolás fázisa, tehát indítás vagy leállítás alatt kell teljesíteni a fennmaradó alapjelet. Ennek logikája nagyon hasonlít az indításhoz:

- ha növelni kell a teljesítményüket, akkor

először a nagyobb terhelésen lévő motorok terhelését emelik (maximum a névlegesig);

- ha a teljesítményüket összességében kell csökkenteni, akkor a kisebb terhelésen lévő motorok terhelését csökkentik.

A GÁZMOTOROS ÜZEMELTETÉS ÁR- ÉS KÖLTSÉGKERETEI

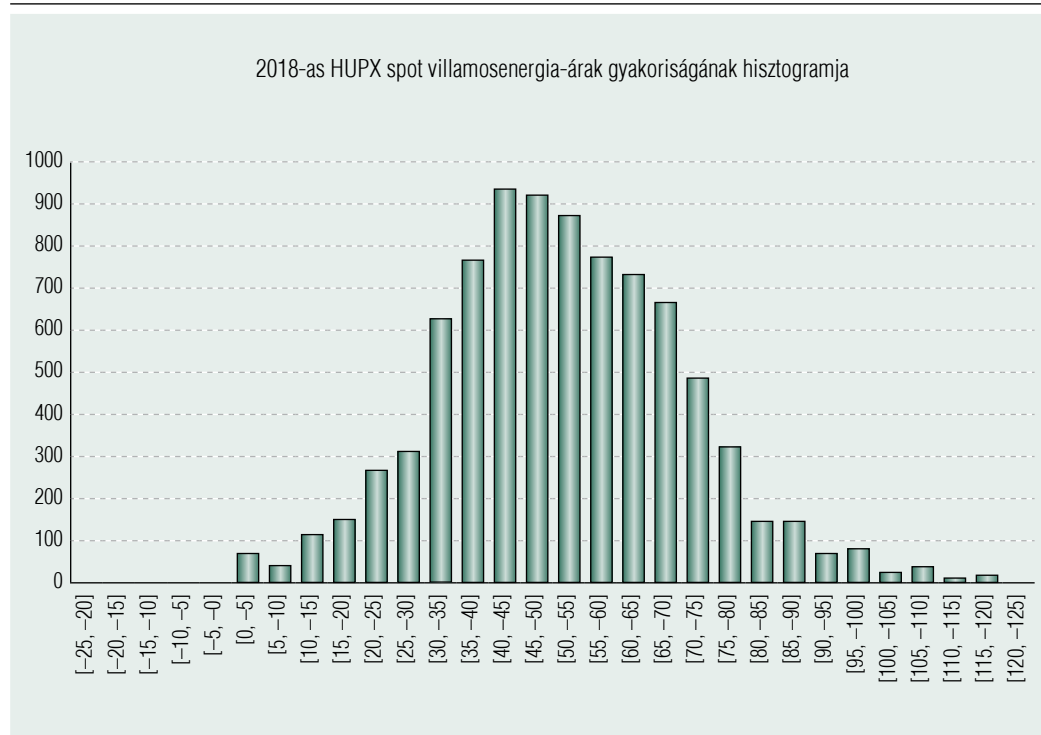
Az energiahordozók árkomponensei

A villamos energia nagykereskedelmi ára

Az erőművi értékesítésre vonatkozóan órás energia-árváltozásokkal számolunk, aminek alapja a 2018. évi HUPX (Hungarian Power Exchange) day-ahead spot elszámolóár-idősr (4. ábra).

4. ábra

A VILLAMOSENERGIA-ÁRAK ALAKULÁSA A MÁSNAPI TŐZSDÉN



Forrás: saját szerkesztés, felhasznált adatforrás: hupx.hu

A további évekre vonatkozóan azonos éven belüli lefutású árprofillal számolunk, amelyet a jövőbeli átlagos zsinórár (base termék) változásaival indexálunk. Ezekre vonatkozóan, ameddig van jegyzett elszámolási ár a hazai határidős villamosenergia-piacon, azaz négy évre előre, a tőzsdei árakat vesszük figyelembe. A következő évekre vonatkozóan konzervatívan 3 százalékos éves növekedést feltételeztünk.

Földgáz-nagykereskedelmi árak

A földgáz esetében a jövőbeni nagykereskedelmi árazás tekintetében azonos módszertan szerint jártunk el, mint a villamos energia esetében. Apróbb eltérés a villamos energiához képest, hogy a TTF erős likviditása miatt 5 évre előretekintő, azaz 2019–2023-ra vonatkozóan is rendelkezésre állt a piaci jegyzés, így csak 2024-től kezdődően vettük figyelembe az évi 3 százalékos emelkedő indexálást.

Hőszolgáltatási értékesítési árak

A hőszolgáltatásra vonatkozó értékesítési árakra kiindulásul a vizsgált kórház korábbi releváns adatait használtuk fel az alábbiak szerint: hődíj, gázdíj, gőzdíj.

A hődíj a hőmennyiségmérők által mért, a kórházi hőközpontokon keresztül átadott hőmennyiségre fizetendő díjtétel. A kórház esetében ez mind a használati meleg víz, mind a fűtés, mind pedig a gőz formájában átadott hőmennyiségekre egyaránt vonatkozó tétel. A hődíjakat a gázdíjak változása alapján kalkuláltuk a gáz-hő konverzió hatásfoka alapján.

A gázdíj a hőszolgáltató által a szerződésben rögzített és a hővásárlóra áthárított földgáz-költség, amely lényegében átfolyó tételként szerepel a legtöbb szerződésben. Ennek alapján indexálódik a fizetendő hődíj a megvizsgált szerződések többségében.

A gőzdíj az átvett gőz után fizetendő összeg. Bizonyos szerződések nem határoznak meg külön gőzdíjat, hanem a hődíj alapján a gőz

entalpiáját figyelembe véve adják meg azt. A szokásos konverziós arány kb. 2,5 GJ/tonna.

A rendszerszintű szolgáltatási piaci bevételek és a kiegyenlítési költség

A virtuális erőművekként aggregált gázmotorok számára a szabályozásirtalék-piac igen attraktív üzleti modellt biztosíthat gyors teljesítményváltózási képességüknek köszönhetően. A motorok esetében a gyorsabb és így értékesebb aFRR (szekunder) termék kapacitáspiaca releváns, mind a fel-, mind pedig a le szabályozási irányra.

A rendszerszintű szolgáltatás értékesítési árait a legfrissebb negyedéves tartaléklekötési tenderek alapján, a 2018 Q3 – 2019 Q2 időszakra vonatkozó eredmények átlagaként határoztuk meg. Mivel a scenáriókban a gázmotorok alapvetően magas kihasználtságúak (így támogatják az UPS szolgáltatást is), így a realizálható értékesítési ár az éves átlagos piaci árral kellő pontossággal közelíthető.

Az üzemeltetési és beruházási költségek adatai

A gázmotor beruházási és üzemeltetési költségeiről részletes szakirodalmi elemzést végeztünk. A ráfordítások közül a karbantartások és a nagyfelújítások különösen jelentős tételt képeznek. A jellemző néhány 1000, illetve 2000 üzemórás kisebb javítások, ellenőrzések mellett 8000–16 000 üzemóra után nagyjavításra, míg 45 000–80 000 üzemóra után komplett főjavításra (turbócsere, új perselyek stb.) van szükség. Praktikusan ez azt jelenti, hogy a 10 év után esedékesse váló teljes főjavítás előtt szükséges a gázmotor fenntartásának, üzleti értékének újbóli meghatározása, és döntenie kell arról, hogy a fennmaradó jellemzően 30 000–50 000 üzemórás élettartam alatt a gépegység

kitermeli-e a főjavítás árát. A különböző források eltérően jelenítik meg a gázmotorok üzemeltetési költségeit. Bizonyos költségek a gép beépített teljesítményével skálázódnak, így fix jellegű O&M költséget jelentenek. Több elemzés ugyanakkor mindennemű üzemeltetési és karbantartási költséget a megtermelt villamos energiára fajlagosítja, így csak változó O&M-mel számol. Mindazonáltal a változó szervizköltség-kalkulációk mindegyike tartalmazza a különböző nagyjavításokat is. Az egyes hivatkozásokban említett adatokat részletesen az 1. táblázat tartalmazza.

Mindezek alapján a modellszámítás során egy konzervatív becslési megközelítéssel számolva a teljes beruházási költséget tartalmazó CAPEX fajlagos egységár 2000 EUR/kW, a fix O&M 30 EUR/kW, míg a változó O&M 5 EUR/MWh. Az üzemeltetési költségek évente 3 százalékkal növekednek, követve a szolgáltatás várhatóan a hosszú távú inflációs rátával arányos növekedését.

AZ ÜZEMKÖVETÉS-SZIMULÁCIÓ MATEMATIKAI MODELLJE

Az üzemtervezés-optimalizálás matematikai formalizálását két gázmotoros egység együttes vezérlésén keresztül mutatjuk be. A gépekhez köthető döntési változók (2. táblázat). Az elengedhető hőmennyiség maximális értéke műszaki paraméter (maxbypassableheat), az optimalizálás bemeneteként adott. Az üzemelés bináris (op) és a terhelést leíró folytonos (LD_1, LD_2) változók közötti kapcsolatot az alábbi kényszerek biztosítják, melyek egyben előírják a minimális megengedett terhelést is az alábbiak szerint:

$$\min LD - (1 - op_1) \min LD \leq LD_1 \quad (1)$$

$$LD_1 \leq op_1 \quad (2)$$

Ha a gázmotor üzemben kívül van ($op=0$), akkor a fenti korlátokból következően a terhelés 0. Ellenkező esetben ($op=1$) a terhelést alulról a

1. táblázat

AZ ÁRAK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA AZ ELÉRHETŐ SZAKIRODALMI ÉS ÜZLETI FORRÁSOK ALAPJÁN

Forrás	CAPEX gépegység [€/kW]	CAPEX egyéb [€/kW]	Fix O&M [€/kW]	Változó O&M [€/MWh]	Összes O&M [€/MWh]
Energinet, 2018	1 000	–	10	5,4	6,7
IEA-ETSAP, 2010	870	–	35	0,0	4,7
EPRI, 2017	900	–	30	4,9	8,9
EIA, 2016	1 170	–	6	5,1	5,9
MIT, 2016	1 500–3 000	–	0	8,0–10,5	8,0–10,5
Wartsila, 2018	?	–	?	5,0	5,0<
EPA, 2015	1 325	675	0	20,0	20,0
Energy.gov, 2016	950–1 150	–	0	14,0–16,5	14,0–16,5
MDPI, 2017	?	–	?	6,5	6,5<

Forrás: saját szerkesztés

A GÉPEK DÖNTÉSI VÁLTOZÓI

A változó neve	Értelmezési tartomány	Megnevezés
op1, op2	{0;1}	a gázmotor üzemel
LD1, LD2	[0;1]	a gázmotor relatív terhelése
bypassed1, bypassed2	[0;maxbypassableheat]	a gázmotor elengedett hője [kW]

Forrás: saját szerkesztés

paraméterként megadott $minLD$, felülről pedig maga a bináris változó – melynek értéke ekkor 1, azaz 100 százalék – korlátozza.

A fenti egyszerű logikán túl a piaci logikából adódóan a következő korlátokat állítottuk fel. Az optimalizálás egy órára fut ($\Delta t=1h$), tehát a szükséges gázenergiát a teljesítményből származtathatjuk a szűrkeszínű segédváltozó felhasználásával.

$$E_{gas} = P_{gas} (LD_1 + LD_2) \Delta t \quad (3)$$

A villamosenergia-termelést a villamos hatásfokkal (μ_{el}) számítjuk:

$$E_{el} = E_{gas} \mu_{el} \quad (4)$$

A termelt villamos energia két célra fordítható: vagy a szervezett villamosenergia-piacon (EM) értékesítik ($E_{el,EMsold}$), vagy a kórház villamos igényét elégíti ki ($E_{el,LDsold}$), az egyenletben minden tag csak pozitív lehet:

$$E_{el} = E_{el,LDsold} + E_{el,EMsold} \quad (5)$$

Ugyanakkor a kórháznak villamos igényét nemcsak a motor termeléséből ($E_{el,LOADsold}$), hanem hasonlóan a HUPX-ről vásárolva ($E_{el,HUPXbought}$) is lehet biztosítani:

$$E_{el,demand} = E_{el,LDsold} + E_{el,EMbought} \quad (6)$$

A villamos- és hőenergia-szolgáltatáson túl a szabályozási tartalékban ($afrr$) felajánlható a

teljes telephely fennmaradó kapacitása mind fel (E_{afrrp}), mind le (E_{afrrn}) irányban egy szabályozási központba való integráció esetében. Itt jegyezzük meg, hogy a szabályozó központok leirányú tartalékok esetén rendszerint nem számolnak az egyes gázmotorok minimális terhelésével, mivel a nagyszámú motor esetén rövid ideig mindig biztosítható a szükséges leirányú kapacitás, továbbá a nagy gradienskapesség miatt egy-egy gázmotor leállítás nem jelent műszaki korlátot.

$$E_{afrrp} = 2E_n - E_{el} \quad (7)$$

$$E_{afrrn} = E_{el} \quad (8)$$

A villamos és műszaki korlátokon túl a hőtermeléssel kapcsolatos peremfeltétel az egységenkénti termelt hő ($E_{heatprod}$). Az egységenként termelt hőt a hőhatásfok (μ_{heat}) határozza meg:

$$E_{heat_prod1} = P_{gas} \mu_{heat} LD_1 \quad (9)$$

$$E_{heat_prod2} = P_{gas} \mu_{heat} LD_2 \quad (10)$$

A hőrendszerbe betáplált hő (Eheatsupply) a hőelengedéssel (bypassed) szabályozható:

$$0 \leq E_{heat_supply1} = E_{heat_prod1} - bypassed_1 \quad (11)$$

$$0 \leq E_{heat_supply2} = E_{heat_prod2} - bypassed_2 \quad (12)$$

Végül a hőrendszer igénye ($E_{heatdemand}$) és a betáplált hő kapcsolata tartalmazza a nem szolgáltatott hőmennyiséget ($E_{el,notserved}$).

$$E_{heatdemand} = E_{heat_supply1} + E_{heat_supply2} + E_{el,notserved} \quad (13)$$

A korlátok után ismertetjük a célfüggvény megfogalmazását, amely az alábbi költségelemeket tartalmazza:

- EM tranzakciók költségét ($E_{el,EMsold} - E_{el,EMbought}$) a szervezett villamosenergia-piaci áron (p_{EM});
- a kórháznak eladott villamos energiából ($E_{el,demand}$) származó bevételt rögzített kereskedői áron (p_{el});
- a fel- és leirányú tartalékok rendelkezésre állási díjából (p_{afrrp} , p_{afrrn}) származó bevételt;
- a hőbevételt, amely csak a hőigény után kerül kifizetésre, ha azt a gázmotor betáplálja, p_{heat} az egységnyi hő ára;
- végül a primer energia (földgáz) költségét (p_{gas}).

$$\begin{aligned} & (E_{el,EMsold} - E_{el,EMbought}) p_{EM} \\ & + (E_{el,demand}) p_{el} \\ & + E_{afrrp} p_{afrrp} \\ & + E_{afrrn} p_{afrrn} \\ & + (E_{heatdemand} - E_{el,notservel}) p_{heat} \\ & - E_{gas} p_{gas} \end{aligned} \quad (14)$$

ÜZEMOPTIMALIZÁLÁSI SZCENÁRIÓK ISMERTETÉSE

Az üzemoptimalizálás során 2020-ra meghatározott menetrendekre az üzemkövetési simulációt minden vizsgált forgatókönyvre elvégeztük. Ellenőriztük a működés pontosságát, a menetrendtartást, valamint műszaki korlátok betartását (indítási számok, részterhelés). Számítottuk a gépenkénti futási időket terhelési állapot szerint kategorizálva (százalékosan a teljes terhelésen és a részterhelésen töltött időt). Az utóbbinál a több scenárió esetén látható <1 százalékos érték elhanyagolható, ugyanis ez gyakorlatilag az indítási felfutásokhoz kapcsolódik. Az elvárt alapjel és a tényleges villamosenergia-termelvény közötti eltérés kiegyenlítő energiaköltséget okoz, melyet szintén idősorosan számítottunk ki.

A vizsgált gázmotorvariánsokat a Jenbacher 3-as, 4-es és 6-os gépcsaldájából választottuk (Chengyang, L., Jing Yang, R., Yu, X., et al, 2021). Más gyártók termékepalettáin a vizsgált 1–2 MW-os mérettartományban a főbb paraméterekben nagyon hasonló termékek érhetők el, így ennek a gyártónak a kiválasztása is adhat általános megállapításhoz eredményeket.

A telephelyre alkalmas gázmotortípusok hőteljesítmény-, villamoshatásfok- és teljesítményadatait a 3. táblázat tartalmazza. A 4. táblázat pedig a különböző konfigurációkat hasonlítja össze.

A telephelyi teljesítményigények, adottságok, valamint a gázmotor-terméksorozat egyedi típusainak méretlépcsői alapján:

- egygépes konfigurációban a J612-es és J420-as típusokkal,
- kétgépes konfigurációban a J316-os és J320-as egységekkel,
- háromgépes konfigurációban pedig a J312-es géppel végeztük el a számításokat.

A futtatás során tisztán az üzemi eredményesség maximalizálása a cél az adott energiaigények és árak mellett. Ez esetben tehát lehetséges a kórház energiaigényének piacról, tőzsdéről való ellátása is, ha az kedvezőbb, mint a saját termelés. A kórház hőigénye a vizsgált gázmotorok névleges teljesítményének közelében van, a hőértékesítés szinte folyamatosan lehetséges.

A lehetséges alternatív forgatókönyvek, a műszaki és üzemviteli kombinációk sokféleségét szűkítendő, elsőként az üzemvitel szempontjából megfelelő (indítások száma, részterhelések jellege) egy, két és három gázmotoros konfigurációk kiválasztását végeztük el az 5. táblázatban bemutatott 5 esetből. Az üzemkövetési elemzés a ténylegesen megvalósuló gázmotor-üzemállapotok mellett egyben a kiegyenlítő energia mennyiségére és a költségére is pontos idősoros eredményt ad. A futtatási időszakra a gázmotorok üzemállapotának

3. táblázat

A TELEPHELYRE ALKALMAS GÁZMOTORTÍPUSOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Típus	Vill. telj. [kW]	Hőteljesítmény [kW]	Villamos hatásfok [%]	Gázmotorok száma
Jenbacher 3				
J312	635	739	40,8	3
J316	851	991	40,7	2
J320	1 067	1 241	40,9	2
Jenbacher 4				
J420	1 497	1 563	42,9	1
Jenbacher 6				
J612	2 017	1 930	45,2	1

Forrás: saját szerkesztés

4. táblázat

A KÜLÖNBÖZŐ KONFIGURÁCIÓK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

	aFRR +[MWh/év]	aFRR -[MWh/év]	Hőérté- kesítés [MWh/év]	VE termelés [MWh/év]	Gáz- fogyasztás [MWh/év]	δ	Primer hatásfok (%)	Villamos hatásfok (%)
3x635kW	2 799	13 843	16 110	13 843	33 928	0,86	88,3	40,8
2x1067kW	3 108	15 535	18 068	13 772	37 982	0,76	83,8	36,3
1x2017kW	2 659	14 962	14 316	13 193	33 101	0,92	83,1	39,9

Forrás: saját szerkesztés

5. táblázat

ÜZEMÁLLAPOT-ÖSSZEHASONLÍTÁS

Motorkonfiguráció	Terhelés (állás-részterhelés-teljes terhelés) [%]	Fajlagos kiegyenlítési költségek [€/kW]
3xJ312	21-0-79	17,6
2xJ316	16-6-79	17,3
2xJ320	22-0-78	16,1
1xJ420	21-0-79	22,1
1xJ612	20-0-78	22,3

Forrás: saját szerkesztés

megoszlását, illetve a kiegyenlítési költségek alakulását az 5. táblázat tartalmazza.

A vizsgált motorkombinációk közül az egyik legfontosabb kérdés az optimális méretezés, ugyanis a magas kihasználási óraszám alapjaiban határozza meg a megtérülést. A 2 db J316-os motort modellező konfiguráció esetében a vizsgált energiaigény-görbékhez illesztett optimáló működés sok esetben részterheléses üzemhez vezet, míg az 1db J420-as scenáriót rosszabb megtérülése, magasabb fajlagos beruházási költsége miatt elvetettük.

A kiegyenlítési költségek kb. 20–50 ezer EUR/év értékűek, azaz a teljes bevétel 1–2 százalékát, a működési költségek 3–5 százalékát teszik ki. Így önmagukban nem okozzák a megtérülési kilátások jelentős romlását, noha a vártak megfelelően az egygépes kialakítások valamelyest kedvezőtlenebb eredményt adnak.

Összehasonlítva a kiválasztott egy- és háromgépes kialakítás éves üzemét (5. ábra),

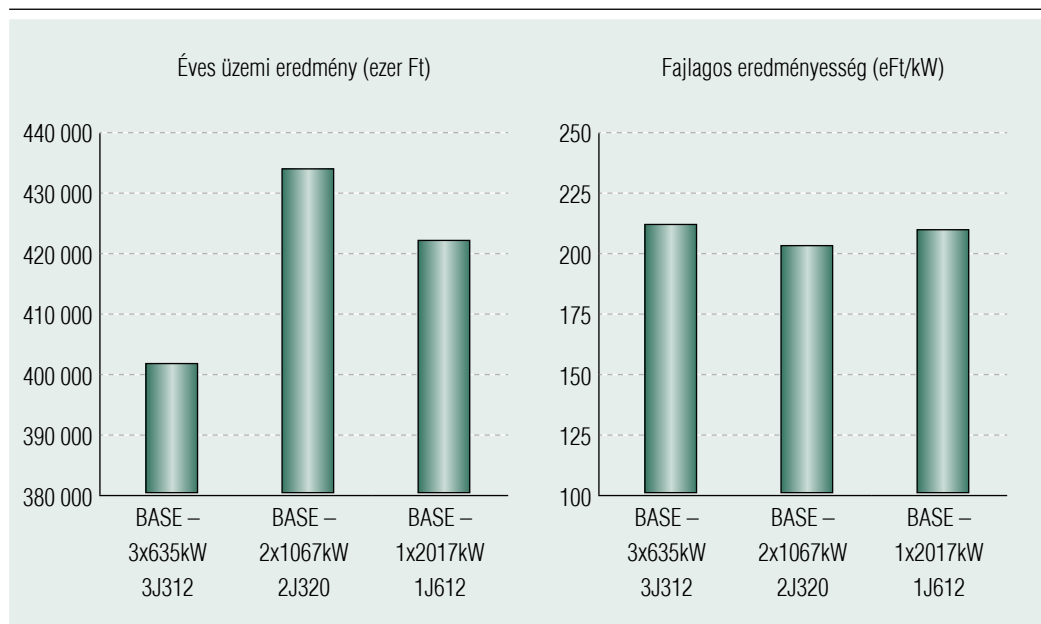
noha több gép esetén az átlagos kihasználtság nem nagyobb, mégis több olyan időszak határozható meg, amikor egy-egy motornak a kisebb teljesítménnyel már érdemes belépnie a termelésbe.

A menetrend-optimalizálás eredményét 10 évre előre tekintve vizsgáltuk a kiemelt három műszaki forgatókönyvre. Az értékesített rugalmasság, tartalékkapacitás a motorkihasználtsággal és a beépített kapacitással arányosan változik az aFRR- termék esetében. Az aFRR+, azaz felszabályozás esetén már a háromgépes rendszer relatív hátránya is csökken a kétgépes összeállításhoz képest.

Érdeemes még kiemelni, hogy a névleges (teljes terheléshez tartozó) gázmotorhatásfokok a valóságban korlátozottan realizálhatók, és a rugalmasabb hárommotoros kialakítás a kevesebb részterhelés miatt végül kedvezőbb hatásfokú, mint a base load termelésben hatékonyabb 6-os sorozatú gépek.

5. ábra

AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA AZ 1-2-3 GÉPES RENDSZERRE



Forrás: saját szerkesztés

Az egyszerűsítetten számított éves átlagos eredményesség (operational spread) számítása során a hő- és villamosenergia-értékesítési bevételeket, a földgázkötségeket, valamint a kiegyenlítő energiaköltségeket is figyelembe vettük. Ahogyan az 5. ábra alapján látható, az abszolút eredményesség mintegy 7–8 százalékkal eltér a két szélső érték között, azonban az összkapacitásra vetített fajlagos, azaz a beruházási költséggel arányos mutató már csak 3,5 százalékos legnagyobb különbséget mutat, és a motorok sorrendje is megváltozott.

Mindezek alapján kijelenthető, hogy az eredményoptimalizált működés során a háromféle kialakítás üzeme hasonlóan alakul, de több további szempont szerint a háromgépes kialakítás a leginkább kedvező.

Az esetek közötti további eltéréseket a CAPEX és más OPEX tételek figyelembevételével, valamint a módosított alapjel-optimalizáció esetén kereshetünk. A projekt egészére vonatkozó megtérülésszámítás és a módosított alapjelű üzemvitel elemzése a jövőbeli bizonytalanságok szélesebb skáláján is segít kiválasztani a robusztus megoldást az alternatívák közül.

ÖSSZEFOGLALÁS

A UPS-k hasznosítása a kórházak szünetmentes tápellátásában a múltban változó sikereket mutatott. A jelenlegi műszaki-gazdasági környezet és a kórházak villamosenergia- és hőenergia-igényének jellegzetes időbelisége azonban ezt a képet teljesen megváltoztathatja. A cikkben a szerzők egy tanulmányt mutattak be, amelynek célja a UPS üzleti modellek több tényezőtől való függésének értékelése volt, beleértve az árreakciókat, a hőenergia-bevételt, az éves felhasználási tényezőket. Esettanulmányt mutattak be az egy-, két- és háromgépes kon-

figurációkra. Ezen esetek összehasonlítása azt mutatta, hogy míg több gép használata esetén az átlagos kihasználtsági tényező nem magasabb, addig a villamosenergia- és hőenergia-igény időbelisége jobb lehetőségeket teremt kisebb egységek indítására. Az aFRR szolgáltatás esetén az értékesített flexibilitás (tartalékkapacitás) arányos az üzemelő UPS-k kihasználtságával és névleges kapacitásával. Az aFRR+ szolgáltatások esete (felfelé szabályozás) még a háromgépes rendszer hátrányainak relatív csökkenését is jelzi a kétegéses konfigurációhoz képest.

Az alapeset feltételezésével kedvező megtérülés várható. A projekt pozitív cash flowja az üzemeltetés alatt stabil, az üzemórától függetlenül kb. 2033–36-ig várható az élettartam. A scenáriók eredményei kedvezőek piaci árszint esetén: alapidíjjal 11,0–11,5 százalékos az IRR, alapidíj nélkül is kedvező, 8,3 százalékos IRR (2019-ben, nem 2022-es premiszszákkal!).

Több érzékenységvizsgálat készült az alapjel-optimalizációt tartalmazó forgatókönyvekkel. A CAPEX/OPEX növekmény, a beruházáskésedelem negatív hatású, 1 év csúszás és/vagy 10% beruházás ráfordításnövekedés 1,5 százalékos IRR csökkenést jelent. Az adó meghatározása közelítő számítással készült, nemcsak a TAO (9%) és az energiaellátók jövedelemadó-hatása (31%) számítható, hanem az esetleges profitmegosztási konstrukciók is. Az egyharmados megosztás közel nullszaldóssá teszi a projektet.

A szerzők végső következtetése az, hogy ha a UPS-ek működése kizárólag a profit optimalizálására épül, akkor a háromgépes konfiguráció minden tekintetben szilárd teljesítményt mutat, és további jelentős előnyök is láthatók több szempont figyelembevételével, különösen üzleti céllal. ■

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk megköszönni a kutatásban részt vevő kollégák, dr. Hartmann Bálint és Kiss József közreműködését és hozzájárulását, hogy ezek az eredmények elkészülhettek.

IRODALOM

- ANTTI ALAHÄIVÄLÄ, JUHA KIVILUOMA, JYRKI LEINO AND MATTI LEHTONEN (2017). System-Level Value of a Gas Engine Power Plant in Electricity and Reserve Production, <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/983/pdf>
- BOZKAYA, B., ZEILER, W., BOXEM, G. (2014). *Integration Of Aquifer Thermal Energy Systems (Ates) Into Virtual Power Plant As A Source Of Flexibility*; Fifth German-Austrian IBPSA Conference RWTH Aachen University
- CHENGYANG, L., JING YANG, R., YU, X., ET AL SUN, C., WONG, P.S.P., ZHAO, H. (2021). Virtual power plants for a sustainable urban future, *Sustainable Cities and Society*, 65., <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102640>
- CORERA, J. (2006). *Virtual Power Plant Concept in Electrical Networks*; 2nd International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources Napa, CA
- ELEKES, A. (2018). Fenntartható növekedés – fenntartható pénzügyi szolgáltatások az Európai Unióban, *Pénzügyi Szemle*, 63(3), 328–344. oldal
- ERDÉLYI, A., PULAY GY. (2021). Mérhető hozzájárulás a tisztább energiaellátáshoz, *Pénzügyi Szemle online*, <https://www.penzugyszemle.hu/tanulmányok-cloadasok/merheto-hozzajarulas-a-tisztabb-energiaellatashoz>, 2021. április 08.
- GURIEFF, N., GREEN, D., KOSKINEN, I., ET AL LIPSON, M., BALDRY, M., MADDOCKS, A., MENICTAS, C., NOACK, J., MOGHADERI, B., DOROODCHI, E. (2020). Healthy Power: Reimagining Hospitals as Sustainable Energy Hubs, *Sustainability*, 12(20), 8554, <https://doi.org/10.3390/su12208554>
- MANCARELLA, P. (2014). MES (multi-energy systems). An overview of concepts and evaluation models, *Energy*, 65., <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>
- TAPIA-AHUMADA, K., DUENAS, P. (2016). Interplay of Gas and Electricity Systems at Distribution Level, <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2016/12/Working-Paper-Interplay-of-Gas-and-Electricity-Systems-TapiaAhumadaDuenas-December2016.pdf>
- MIHÁLOVITS, Zs., TAPASZTI, A. (2018). Zöldkötvény, a fenntartható fejlődést támogató pénzügyi instrumentum, *Pénzügyi Szemle*, 63(3), 312–327. oldal
- PLAHN, P., KEENE, K., PENDRAY, J. (2015). *330 kW_e Packaged CHP System with Reduced Emissions*; United States, <https://doi.org/10.2172/1223435>
- SAMAD, T., KOCH, E., STLUKA, P. (2016). Automated Demand Response for Smart Buildings and Microgrids: The State of the Practice and Research Challenges, *Proceedings of the IEEE*, 104(4), <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2520639>
- SIOGHANSI, F. (2021). *How can flexible demand be aggregated and delivered?*; Variable Generation, Flexible Demand, Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823810-3.00014-5>

WARTSILA (2022). Combustion Engine vs. Gas Turbine: Pulse Load Efficiency and Profitability, Letöltés helye: <https://www.wartsila.com/energy/learn-more/technical-comparisons/combustion-engine-vs-gas-turbine-pulse-load-efficiency-and-profitability>. A letöltés ideje: 2022. 08. 31.

ZHENG MA, JOY DALMACIO BILLANES, BO NORREGAARD JORGENSEN (2017). Aggregation Potentials for Buildings – Business Models of Demand Response and Virtual Power Plants; *Energies* 2017, 10(10), 1646, <https://doi.org/10.3390/en10101646>

Electric Power Research Institute (2017). Power Generation Technology Data For Integrated Resource Plan Of South Africa

European Council (2022). Fit for 55. The EU's plan for a green transition, <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

International Energy Agency – Energy Technology Systems Analysis Program (2010) Combined Heat and Power, https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E04-CHP-GS-gct_ADfinal.pdf

U.S. Department of Energy (2016). Combined Heat and Power Technology Fact Sheet Series, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/CHP-Recip%20Engines.pdf>

U.S. Energy Information Administration (2016). Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants