

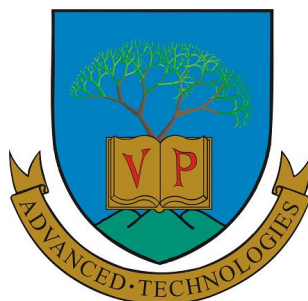
DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

BÁLINT ROLAND

PANNON EGYETEM
INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

VESZPRÉM
2021

Pannon Egyetem
Műszaki Informatikai Kar
Informatikai Tudományok Doktori Iskola



ENERGIA MENEDZSMENT TÁMOGATÁSA FOGYASZTÓI ÉS NAPERŐMŰ MODELL SEGÍTSÉGÉVEL

DOI:10.18136/PE.2021.774

Doktori (PhD) Disszertáció
Szerző: Bálint Roland

Témavezető: dr. Magyar Attila

Készült a
Pannon Egyetem
Informatikai Tudományok Doktori Iskola
keretein belül

Veszprém
2021

Kétoldalas nyomtatás miatt üres oldal

ENERGIA MENEDZSMENT TÁMOGATÁSA FOGYASZTÓI ÉS
NAPERŐMŰ MODELL SEGÍTSÉGÉVEL

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében készült a
Pannon Egyetem
Informatikai Tudományok Doktori Iskola keretében

Írta:
Bálint Roland

Témavezető: dr. Magyar Attila

Elfogadásra javaslom: igen / nem

.....
dr. Magyar Attila

A jelölt a doktori szigorlaton %-ot ért el.
Veszprém,

.....
Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: : igen / nem

.....
aláírás

Bíráló neve: : igen / nem

.....
aláírás

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján %-ot ért el.
Veszprém,

.....
Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése:
Veszprém,

.....
EDHT elnöke

Kétoldalas nyomtatás miatt üres oldal

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt köszönetemet fejezem ki témavezetőmnek, dr. Magyar Attilának, aki töretlen lelkesedéssel és türelemmel vezetett tanulmányaim és kutatásaim során és ellátott az elért eredményekhez szükséges tanácsokkal. Továbbá köszönöm dr. Hantos Katalin professzor asszonynak, hogy tanulmányaim elején társtémavezetőként elindított és egyengette az utamat a tudomány rögzös útjain.

Nagyon köszönöm kollégáim támogatását, kiemelten dr. Fodor Attiláét, aki rengeteget segített a dolgozatban szereplő mérési eredményeknél. Külön köszönet hallgatótársaimnak, Pózna Anna Ibolyának és Neukirchner László Richárdnak, akikkel együtt ástuk bele magunkat a \LaTeX -es cikk- és dokumentumírás rejtelseibe.

Szívből hálás vagyok és köszönettel tartozom családomnak, főként szüleimnek, nagyszüleimnek, akik az elmúlt közel harminc évben végig töretlenül segítettek és támogatták tanulmányaimat, ahol tudták. Köszönöm öcsémnek, Ádámnak, hogy gimnáziumban az akkori elektronikai hobbijával elindított abba az irányba, ami eddig vezetett. Köszönöm páromnak, hogy az elmúlt években türelemmel kísérte végig a dolgozat elkészülését.

Köszönöm barátaimak, Román Lillának és Nagy Zoltánnak az angol és német szövegek átolvasását és javítását, valamint dr. Barta Krisztiánnak, hogy lefordította az absztraktot kínai nyelvre.

Tartalmi kivonat

A környezettudatosság a modern társadalmak aktuális trendje. Ma már igyekszünk a zöld energiát (nap-, szél- és vízenergia) előnyben részesíteni a fosszilizással szemben a karbonlábnyomunk csökkentése érdekében. A Nap az egyik legnagyobb rendelkezésre álló energiaforrásunk, és az általa kibocsátott energia felhasználható hőenergiaként (pl. napkollektorok), de átalakítható elektromos energiává is. A fenti két megoldás által termelt energia mennyisége közvetlenül függ a napsugárzástól. Mivel a fenntartható fejlődés egyre fontosabbá válik az egész világon, a fotovoltaikus erőművek (PVPP, Photovoltaic Power Plant) energiatermelésének előrejelzése egyre szükségesebb lesz.

A dolgozatban a megújuló energiaforrások, főként PV erőművek terjedésével járó termelés ingadozások kezeléséhez felhasználható modellekről és algoritmusokról lesz szó, amik segítségével menedzselhető, ütemezhető egy energia közösség által fogyasztott és termelt energia.

A dolgozat első felében az egyszerű dinamikával rendelkező elektronikai berendezések ütemezésére alkalmas modell alapú heurisztikus algoritmus kerül bemutatásra napközben változó energiaárak (day-ahead market) mellett, amely alkalmazásával optimalizálható, csökkenthető az eszköz által fogyasztott energia ára.

A második részében egy időjárási előrejelzésen alapuló, hőmérsékletfüggő PV modellt mutat be, mely segítségével, megfelelő időjárási előrejelzések segítségével, lehet előre becsülni a naperőmű által termelt energiát. A dolgozat eredményei alapján a becsült termelés, és a prezentált heurisztikus algoritmus segítségével ütemezhetőek bizonyos villamos fogyasztók a nap folyamán úgy, hogy a megtermelt ingyenes zöldenergia minél nagyobb része legyen lokálisan elfogyasztva.

Abstract

Focusing on environmental awareness is a current trend in modern societies. Today, we are trying to prioritize green energy (solar, wind and hydropower) over fossil to reduce our carbon footprint. The Sun is one of our largest available sources of energy, and the energy it emits can be used as thermal energy (e.g., solar thermal collector), but can also be converted into electrical energy. The amount of energy produced by the above two solutions depends directly on the solar radiation. As sustainable development becomes more and more important around the world, forecasting the energy production of Photovoltaic Power Plants (PVPP) will become increasingly necessary.

The dissertation will discuss models and algorithms that can be used to handle production fluctuations associated with the spread of renewable energy sources, especially PV power plants, which can be used to manage and schedule the energy consumed and produced by an energy community.

Abstrakt

Das Umweltbewusstsein ist der aktuelle Trend in modernen Gesellschaften. Heute versuchen wir, grüne Energie (Sonne, Wind und Wasserkraft) vor fossilen zu priorisieren, um unseren CO_2 -Fußabdruck zu verringern. Die Sonne ist eine unserer größten verfügbaren Energiequellen, und die von ihr abgegebene Energie kann als Wärmeenergie (z. B. Solarthermiekollektor) verwendet werden, aber auch in elektrische Energie umgewandelt werden. Die Energiemenge, die durch die beiden obigen Lösungen erzeugt wird, hängt direkt von der Sonnenstrahlung ab. Da eine nachhaltige Entwicklung weltweit immer wichtiger wird, wird die Prognose der Energieerzeugung von Photovoltaik-Kraftwerken (PVPP, Photovoltaic Power Plant) zunehmend erforderlich.

In der Dissertation werden Modelle und Algorithmen erörtert, mit denen Produktionsschwankungen im Zusammenhang mit der Verbreitung erneuerbarer Energiequellen, insbesondere von PV-Kraftwerken, bewältigt werden können, mit denen der Energieverbrauch und die Energieerzeugung einer Energiegemeinschaft verwaltet und geplant werden können.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
Motiváció és cél	8
2. Rendszer- és irányításelméleti alapok	11
2.1. Lineáris, időinvariáns állapotter modell	11
2.1.1. Folytonos idejű lineáris időinvariáns állapotter modell . .	12
2.1.2. Diszkrét idejű állapotter modell	14
2.2. Modellezés fizikai elvek alapján	16
2.3. Szakaszonként lineáris rendszermodell	19
2.4. Paraméterbecslés	20
2.5. Modell prediktív irányítás	22
3. Egyszerű dinamikai modellel felírható villamos berendezések ütemezése	25
3.1. Hűtőgép modellezése	26
3.1.1. Háztartási hűtőgép modellezése fizikai elvek alapján . . .	26
3.1.2. Hűtőgép modellezése villamos hálózat analógiájával . . .	30
3.2. Dinamikus villamos berendezések irányításának feltételei	33
3.2.1. Működési korlátok	33
3.2.2. Működési költség	33
3.2.3. Szabályozási cél	35
3.3. Költségoptimalizálás és ütemezés modell prediktív irányítás használatával	36
3.3.1. Ütemezés Multi-parametric toolbox segítségével	36
3.3.2. Heurisztikus elágazás és korlátozás algoritmus	38
3.3.3. Adaptív heurisztikus algoritmus	47
3.3.4. Adaptív heurisztikus MPC alkalmazása fagyasztóládára .	53
3.4. Összefoglalás	59
4. Napenergiából származó villamos energia becslése időjáráselőrejelzés alapján	61
4.1. Szolárgeometria	63
4.2. Besugárzási szög	67
4.3. Globális napenergia besugárzás	69
4.3.1. Szolárgeometria modell verifikálása	74
4.4. Hőmérsékletfüggő PV modell	76
4.4.1. Időjárás előrejelzési adatok	78

4.4.2. Hőmérsékletfüggő PV modell verifikálás	82
4.4.3. Hőmérsékletfüggő PV modell validálás	84
4.5. Összefoglalás	88
5. Elért eredmények	89
5.1. Új tudományos eredmények	89
5.2. Alkalmazási területek	90
5.3. Továbbfejlesztési lehetőségek	91
5.4. Saját publikációk	92
5.5. Tézisekhez nem kapcsolódó publikációk	92
Jelölésjegyzék	93
Rövidítésjegyzék	97
Ábrák jegyzéke	98
Táblázatok jegyzéke	100
Függelék	101
Bojler fordított dinamikával	101
Kínai absztrakt	102
Negatív energiaár ábrák	102

1. fejezet

Bevezetés

A modernkori ember mindennapjait erőteljesen befolyásolja a technika, ami az utóbbi évtizedekben erőteljes és gyors fejlődésen ment keresztül. A használati cikkeink jelentős része villamos energiával működik, amihez elengedhetetlen a megfelelő tápellátás, legyen az elem, akkumulátor, vagy a villamos hálózat. Napjainkban a villamos távvezeték hálózat kiterjedése akár több kontinenst is érinthet, és annak üzemeltetése egy komplex mérnöki kihívás. Szerepek szempontjából az üzemeltető előállítja a villamos energiát, amit a távvezetéseken keresztül eljuttat a fogyasztókig, akik a fogyasztásuk függvényében fizetik az energia árát a szolgáltatónak.

A Földön a fenntartható életmód egyik fontos eleme a háztartási szektor által fogyasztott és termelt energia kezelése. A megújuló energiaforrások terjedésével manapság az egyik legnagyobb technikai kihívás az energia termelésének és felhasználásának hatékony tervezése, irányítása. A fenntartható energiafogyasztás kihívásainak való megfelelés érdekében számtalan fejlesztés zajlik az intelligens hálózati technológiák zászlaja alatt. A korlátozottan rendelkezésre álló energiaforrásokkal és az energiatermelési kapacitással szemben a gyorsan növekvő és dinamikusan változó energiafogyasztással együtt az elektromos energia szolgáltatói és a villamos hálózat operátorai, valamint maguk az elektromos készülékek egyre több és több intelligens megoldást kínálnak különböző gazdasági, műszaki és környezetvédelmi célokkal, amik megkönnyítik az intelligens hálózati technológiák és megoldások fejlesztését mind a fogyasztói, mind a szolgáltatói oldalon. E fejlődés egyik fontos befolyásoló tényezője a villamosenergia-piac, amely folyamatosan bővül, és az ezeken keresztül értékesített energia mennyisége egyre növekszik.

A szolgáltatói oldal megközelítései tartalmazzák az optimalizált árazási módszereket [1], amelyek célja az energiahálózat kiegyensúlyozása az ellátás változásainak függvényében (pl. a megújuló energiaforrások változó rendelkezésre állása miatt), valamint a változó energiafogyasztás kielégítése. Az optimalizált árazás eredményeként akár óránként változó villamosenergia-árak állnak rendelkezésre a napi villamosenergia-piacon¹ [2]. A [3] cikk szerzői elemezték a mikrohálózat (microgrid) hatását és lehetséges közreműködését az áramszolgáltatás igényének és kínálatának beállításában az óránként változó

¹ weboldal: <https://www.nordpoolgroup.com/>

villamosenergia-piacon az ár alapú keresletre adott válasz révén, és arra a következtetésre jutottak, hogy a hálózat hatásfoka és a rugalmassága egyaránt javult.

A [4] munkában új keretet javasoltak olyan decentralizált energiakoordinációra és -termelésre, amely felhasználható az energiaszállítás illetve az energiaáramlás ütemezéséhez.

Ezeket a feladatokat mind energia fogyasztási, mind energia termelési oldalról meg lehet vizsgálni, és megfelelő smart megoldást lehet keresni a definiált problémára, majd a két eredményt ötvözve egy komplex energiamenedzsmentet megvalósítani.

Fogyasztási oldalról

Fogyasztói oldalról nézve, a legtöbb ember a legolcsóbb megoldást keresi azáltal, hogy készülékét (pl. mosógép, mosogatógép) alacsony energiaár mellett használja, azonban vannak olyan egyszerű villamos eszközök (pl. hűtőszekrények, fagyasztóládák, villanybojlerek), amelyek egész nap üzemelnek. Ilyen berendezések esetén tipikusan nincs lehetőség arra, hogy csak olcsó villamos energia mellett üzemeltessük, mivel akár több óra is eltelhet a kívánt energiaár megjelenéséig.

Ezért a szolgáltatókból, fogyasztókból és az elektromos hálózathoz álló kompozit rendszer költségoptimalizált működtetése a működési, ütemezési és szabályozási problémák széles választékát kínálja. A fogyasztók oldalán csökkentett működési költség mellett üzemeltethetők bizonyos elektromos készülékek azok ütemezett be- és kikapcsolásával, figyelembe véve a dinamikusan változó villamos energia árakat és a berendezés üzemelési korlátait. A legegyszerűbb esetben ez a probléma egy optimális ütemezési feladatot eredményez, amelyre az irodalomban több megoldás is fellelhető. A [5] cikk egy irodaépület optimális napi mikrohálózat alapú ütemezési módszerét mutatja be az időjárás viszonyok alapján. Az optimális lakóépület fogyasztáshoz szabályozási módszerrel valamint a költség becslésével foglalkozik a [6] irodalom. A háztartási készülékek az optimális működtetés vagy ütemezés tárgyát képezhetik, lásd például a [7] cikket. A [8] cikk egy lehetséges megoldást kínál az olívaolaj-termelés során felhasznált energia költségeinek minimalizálására a változó energiaárak mellett. E megoldások fontos eleme a már említett napi villamosenergia-piac (DAM, Day-ahead Market), ahol az optimalizált árazás eredményeként akár óránként változó villamosenergia-árak állnak rendelkezésre. Ilyen, óránként változó energiaárral rendelkező piac található például Norvégiában és Svédországban.

Az optimális szabályozási problémák megoldására rendelkezésre álló szabályozási módszerek folyamatos fejlesztése ellenére sem alkalmazták azokat a háztartási berendezésekre, ahol általában bang-bang vagy PID típusú szabályozókat használtak. A bonyolultabb, számítógépet vagy mikrokontrollert igénylő algoritmusok használata ilyen berendezésekben kerülendő volt. Ugyanakkor

az elmúlt években, évtizedben a nagy számítási potenciállal rendelkező kis teljesítményű mikrovezérlők (MCU, Microcontroller Unit) forradalmasították a beágyazott rendszerek területét, ezáltal megnyitva a lehetőséget a fejlett szabályozási módszerek alkalmazására is ezen a területen. A [9] esetében vegyes egész lineáris programozáson alapuló megközelítést használ a háztartási gépek optimális ütemezésére intelligens környezetben. Az állatok viselkedésén, raj intelligencián alapuló részecske-raj (PSO, Particle Swarm Optimization) optimalizálás és hasonló lágy számítási módszerek ([10]) szintén alkalmazhatók az energiafelhasználás optimalizálására az intelligens otthoni alkalmazásokban. Egy optimális ütemezési feladat megoldására több módszer is alkalmazható az eddig említettekén kívül. A [11] cikk egy algoritmust mutat be, ahol különféle háztartási készülékek optimális ütemezése nemlineáris egész programozási problémaként lett megfogalmazva és genetikai algoritmussal lett megoldva. A [12] irodalom fagyasztók hőmérsékletének szabályozására javasol egy adaptív megoldást.

Továbbá a modell prediktív irányítás (MPC, Model Predictive Control) is hatékony és népszerű módszer a többváltozós optimális irányítási vezérlési problémák megoldására az energiával kapcsolatos irányítási és ütemezési alkalmazásokban ([13]). Ez az irányítási módszer mind az ipari, mind a tudományos területeken széles körben elismert, hatalmas elméleti háttere és a többváltozós szabályozási problémák egyidejű kezelésére való képessége miatt [14]. A modellparaméterek online becslése (pl. változó hőmérsékleti helyzetben) lehetővé teszi a szabályozó számára, hogy a használt modellt a tényleges rendszerhez igazítsa, lásd [15] cikket, ahol a hűtőrendszer dinamikájában, és így fogyasztásában bekövetkezett megváltozás alapján becslik meg az élelmiszer tényleges hőmérsékletét egy szupermarketben. A [16] szerzői decentralizált MPC architektúrát javasolnak egy decentralizált és moduláris, több hűtő egységgel rendelkező légkondicionáló rendszer számára, hogy elkerüljék az egymással versengő szabályozókat és a központosított szabályozó megvalósításának gyakorlati nehézségeit. A prediktív irányítás a [17] cikkben bemutatott intelligens hálózatban is használható elektromos járművek töltésének szabályozására. A modell prediktív megközelítéshez azonban szükség van a vezérelt dinamikus rendszer megbízható dinamikus modelljére. A [18] cikk szerzői a felhasználó oldali energiamedzsmenthez (DSM, Demand Side Management) javasolnak egy szürke doboz modellezési megközelítést a háztartási hűtőszekrényekhez. A szerzők a [19] cikkben egy háztartási hűtőszekrény dinamikus modelljét mutatják be paraméter meghatározással.

A modell alapú szabályozótervezés lehetővé teszi a mérnökök számára, hogy szimulációs kísérleteket végezzenek a szabályozás tervezési szakaszában, mivel a szabályozandó rendszer dinamikus modellje ismert. A [20] munka egy szimulációs szoftver eszközt javasol az intelligens tápegységek optimális ütemezéséhez.

Az optimalizálás, ütemezés során villamos berendezések esetén a minimális energiafogyasztásra kell törekedni. Azonban ha az elfogyasztott villamos energia ára időben változik, akkor lehet optimalizálni a működést a működési költ-

ségre, azaz az elfogyasztott energia után fizetendő árra.

A háztartási készülékek fontos, mégis viszonylag egyszerű osztálya a fűtő-/hűtőberendezések, például hűtőszekrények, vízmelegítők stb. Az optimális működésüket különféle körülmények között is széles körben vizsgálják, lásd a [21] doktori értekezést és a szerző benne található publikációit. A dolgozat tárgya egy háztartási hűtőgép, hűtőszekrény költség-optimalis működése. Noha az élelmiszerbiztonság elsődleges szempont, a hűtőszekrényt lehet költség-optimalis módon működtetni, amely megfelel a biztonsági hőmérsékleti határértékeknek. Figyelembe véve az egyszerű dinamikus modellt az elektromos kapcsoló bemenetével, valamint kalkulálva az ismert, de óránként változó áramellátási és hőmérsékleti korlátokat, meg lehet határozni egy modell-prediktív szabályozási problémát szakaszonként lineáris (PWA, Piecewise Affine) modell segítségével az optimalis ütemezés megtervezéséhez.

Az előző megoldáshoz hasonlóan egy elektromos vízmelegítő, bojler is ütemezhető, hogy az elfogyasztott energia ára minimális legyen. A modell alapú irányításhoz az irodalomban fellelhető elektromos vízmelegítő modell [22].

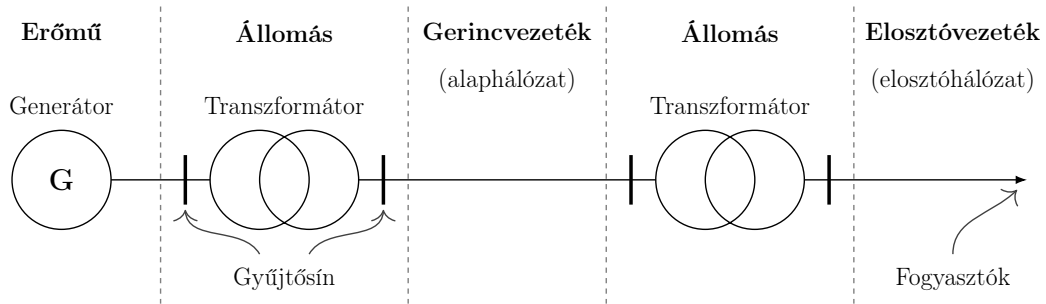
Termelési oldalról

A villamos energia termelésénél fontos szempont az energiamérleg, aminek jelentése, hogy a hálózatba betáplált (erőművek) és az onnan kivett (fogyasztók, veszteségek) teljesítmények egyenlők. Amennyiben ez nem teljesül, úgy feszültség ingadozás léphet fel, ami a hálózat épségének megóvásáért felelős védelmek megszólalását eredményezhetik. Ilyen esetben kisebb-nagyobb körzetek maradhatnak villamos energia nélkül a probléma kiküszöböléséig. Az 1.1 ábra szemlélteti a villamos erőátviteli rendszer vázlatos felépítését. Látható, hogy az erőműben a generátorral megtermelt energiát egy transzformátor állomással az alaphálózat feszültségére transzformálják (pl. 120 kV , 220 kV , 400 kV), majd a fogyasztóknál letranszformálják a megfelelő feszültségszintre. Ez ipari fogyasztó esetén tipikusan 10 kV - 20 kV -os (Középfeszültségű elosztóhálózat), míg háztartási fogyasztóknál a $0,4\text{ kV}$ ($3 \times 400/230\text{ V}$ -os (Kisfeszültségű elosztóhálózat) feszültségszintet jelent. Amennyiben az egyes körzethez, mikrogridhez tartozó állomás hibát észlel az a védelem aktiválásához, megszólalásához vezet. Ezzel csak az adott körzet kerül leválasztásra a hálózatról, a többi fogyasztó irányába az energiaszolgáltatás folyamatos marad.

A hosszú évek mérési adatai alapján a villamos hálózat rendszerfelügyelője (Magyarországon MAVIR Zrt.) előre meghatározza a következő napi várható fogyasztást figyelembe véve több, fogyasztást befolyásoló tényezőt:

- munkanap vagy munkaszüneti nap,
- hétköznap vagy hétvége,
- évszak, időjárás.

A tervezett fogyasztás alapján az erőművek termelését és az esetleges importált és exportált energiát tudják ütemezni, valamint ezek alapján a várható rendszerterhelést.



1.1. ábra. Villamos energiaátviteli rendszer vázlatos rajza

Az elmúlt években egyre nagyobb figyelmet kap a zöldenergia igénye, aminek hatására a megújuló energiaforrások, mint a napelem és a szélgenerátor kezd terjedni. Magyarországon főként a napelemek száma és ezzel a termelési kapacitása nő nagy ütemben. Sajnos a napelemek termelése (és a szélenergiának is) nehezen ütemezhető időjárásfüggő mivoltának köszönhetően, így nincsen a kiszámíthatóság és az irányíthatóság szempontjából kedvező tulajdonságai, amelyek rendelkezésre állnak a fosszilis- és atomerőműveknél. A PV panelek által termelt villamos energiát például csak a létesítmény geometriai paramétereit és a megfelelő napenergia-becslő rendszer alapján lehet optimalizálni [23]. A megújuló energiaforrások által termelt villamos energia nagyban függ a tényleges időjárástól, azaz a generált energia mennyisége folyamatosan ingadozik, az nem áll mindig rendelkezésre. Mivel a megújuló energia aránya a teljes villamos energiában növekszik, ez a kiszámíthatatlanul ingadozó termelés számos villamos energiahálózat biztonságával kapcsolatos kérdést vet fel [24].

A napsugárzási modelleket régóta alkalmazzák a besugárzott napenergia mennyiségének becslésére. Ezeket a modelleket főként az ökológiai vizsgálatoknál alkalmazták. A [25]-ben javasolt besugárzási modell havi és napi módon határozza meg az adott területeken a napsugárzás energiáját az éghajlati vizsgálatokhoz. Az ily módon számolt energia alapján becsülhető a haszonnövények termésének érési, és így a betakarítási ideje.

Manapság a besugárzási modellek elsődleges alkalmazási területe a fotovoltaikus energiatermelés becslése lehet. Mivel az ilyen készülékek száma folyamatosan növekszik, növekszik minden olyan megoldás fontossága, amely javítja a naperőművet tartalmazó elosztóhálózat stabilitását, az energiaminőséget és az optimalizálható energiamenedzsmentet is.

Néhány országban a megújuló energiatermelés által képviselt bizonytalanság el-lensúlyozása érdekében a nem háztartási méretű fotovoltaikus erőmű üzemeltetői kötelesek energiatermelési tervet benyújtani. Az elosztórendszer-üzemeltetője meghatározza az eltérés mértékére és a lehetséges kompenzációra (büntetésre) vonatkozó szabályokat, így próbálva csökkenteni az eltérést a tervezett és a tényleges termelés között. A PV erőmű üzemeltetője szempontjából fontos a büntetés minimalizálása, így számukra nagy igény van a várható energiatermelés minél pontosabb előrejelzésére szolgáló megoldásokra.

Az energiatermelés ütemezése az átvitelrendszer-üzemeltető (TSO, Transmission System Operator), az elosztórendszer-üzemeltető (DSO, Distribution System Operator), a virtuális erőmű (VPP, Virtual Power Plant) és a mikrohálózat-üzemeltetők egyik legfontosabb feladata. Az operátornak meg kell becsülnie az ügyfelek fogyasztását és a megújuló energiaforrásokból (RES, Renewable Energy Sources) származó energiatermelést. Különböző működési és kezelési stratégiák vannak az elosztóhálózat, az átviteli hálózat, az energiatermelők vagy a mikrohálózat üzemeltetői számára [26], [27]. Mikrohálózat menedzselése esetén alapvető fontosságú, hogy az algoritmus hozzávetőleges információval rendelkezzen a megújuló energiaforrásokból (nap- vagy szélenergia) előállított villamos energiáról, így a változások a termelésben kompenzálhatók legyenek (pl. akkumulátor töltése/kisütése, terhelések engedélyezése/tiltása, dízelüzemű generátor be-/kikapcsolása, stb.) [28].

Másrészt a villamosenergia-hálózat biztonsága ugyanolyan fontos, mint a korábban említett pénzügyi szempontok. Számos hálózati stabilitással és az energiaminőséggel kapcsolatos mutatószám létezik, köztük a már említett energiaegyensúly az üzembiztonság szempontjából kulcsfontosságú. Az energiahálózat energetikai egyensúlyának biztosítása érdekében a klasszikus erőműveket úgy ütemezik, hogy a teljes termelés kielégítse a keresletet, annak ellenére, hogy a hálózaton jelen lévő megújuló erőművek termelése bizonytalan. A sikeres energiakiigyeenlítés két fő tényezőtől függ: az erőművek számára előírt rendelkezésre álló energiatermelési tartaléktól, valamint a megfelelő kereslet és megújuló termelés előrejelzésétől. Ezen felül az energia-pozitív rendszerek működtetése és irányítása szempontjából kulcsfontosságú a teljesítmény becslése és/vagy előrejelzése [29], [30].

A napenergia a Nap felől sugárzás és fény formájában érkezik a Földre. Ezért minden napenergia-előrejelzési modell valamilyen szoláris-geometria modellen alapul. Ezek a modellek elsősorban a részletesség szintjén különböznek, pl. [31] egy geometriai modellt mutat be, amely figyelembe veszi a légkör hatását a fényre különböző hullámhosszokon. Másrészt például a [32], [33] egyszerűbb modellt ad. A fotovoltaikus modellek egyik része a PV panelek jellemzőivel foglalkozik [34], [35]. A [36] cikkben a PV modell paramétereit hosszú távú kültéri mérésekkel becsülik meg. Mások a hűtés hatását vizsgálják a napelemre (akár a hibrid panel léghűtésével), lásd [37], a cikk szerzői megvizsgálják a hűtőközeg és a hűtőrendszer hatását a panel paramétereire. A hibrid paneleket [38] irodalomban vizsgálják, ahol a panel hatékonyságát modell alapú technika növeli [39]. A hibrid PV panelek modellezésében a víz hőmérséklete kulcsfontosságú változó, amelyre becslést a [40] cikk szerzői adnak meg.

Számos munka az energia meghatározására vagy előrejelzésére, valamint annak a felület geometriai paramétereiktől való függőségére összpontosít. A napsugárzás besugárzási szögének általános modelljét az észak-dél irányhoz, az azimut-hoz viszonyítva a [33] cikk mutatja be, amely mind rögzített, mind nyomkövető felületekhez használható. A [41] irodalomban egy egyszerű spektrummodell található, amely alkalmazható a lejtős felületekre tiszta égbolt (Clear Sky) esetén.

Nagyon jó összehasonlító tanulmány szerepel a [42] és a [43] irodalmakban, ahol különféle terület-specifikus modelleket analizáltak az optimális dőlésszög szempontjából. Sajnos a magyar régiót nem fedik le a tanulmányban használt modellek. Egy rövid távú (óránkénti) napsugárzás-előrejelzés félig empirikus módszert javasolnak a [44] cikk szerzői, a széles körben alkalmazott Ångström-Prescott modell alapján.

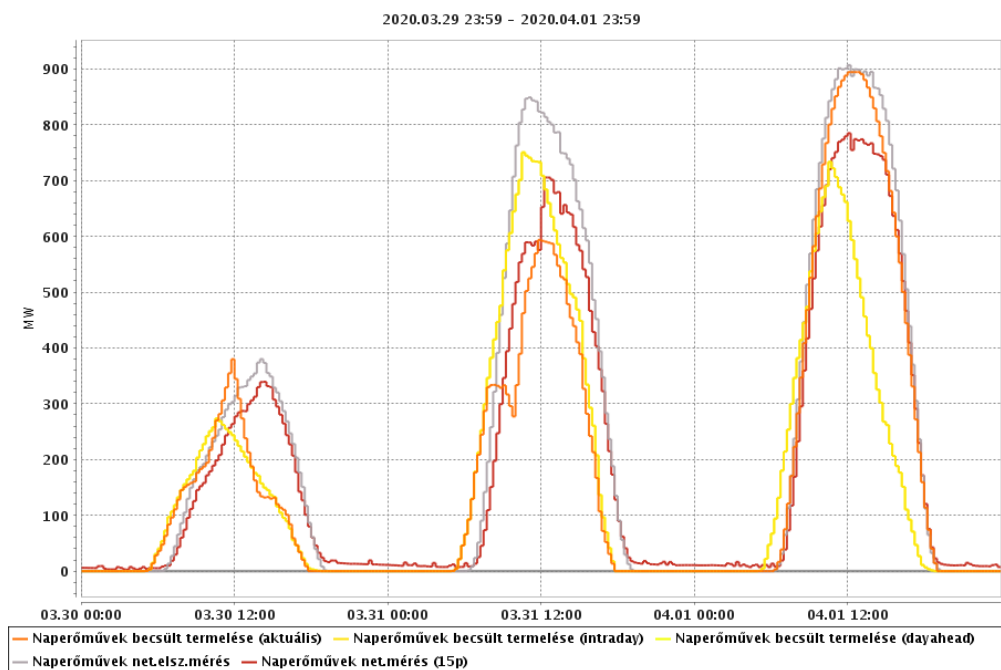
A PV panelek hőmérséklettől függő modellezése fontos, mivel a hatásfok a hőmérséklet emelkedésével csökken [45]. A [46] cikk egy PV panel hőmérsékleti modelljére tesz javaslatot, amely figyelembe veszi az infravörös tartományt, mások, pl. [47] egyszerűsített termikus modellt javasol. Különböző geometriai paraméterek (például dőlés és tájolás) befolyásolhatják a panelek hőmérsékletének változását [48].

Az adatvezérelt módszerek nagyon népszerűek a mérnöki munka minden területén [49], [50], ugyanez vonatkozik a prediktív elven működő napenergia becselő modellekre [51], [43], [52] és [53]. Az [54] cikk szerzői adaptív prediktív modellt javasolnak, amely a modell paramétereit a tényleges mérésekhez igazítja, azonban csak tiszta égbolt adatait használja, azaz nem veszi figyelembe a felhőzetet. A mesterséges intelligencia alapú becslések is népszerűek, lásd [24] rövid távú (1-2 órás) előrejelzést javasol, ahol egy AI alapú módszer kerül betanításra mérési adatok alapján. A [44] szerzői javaslatot tesznek egy rövid távú besugárzási előrejelzésre, amely több modell eredményeit használja fel.

Motiváció és cél

A megújuló energiaforrások gyorsuló térhódításával egyre nagyobb problémák jelentkezhetnek a villamosenergia rendszeren. Ilyen probléma a mikrohálózaton lokálisan megtermelt többletenergia, mivel ilyen esetben az energia áramlási iránya megváltozik, ami nem normál üzemi működés a villamos hálózaton.

A MAVIR(Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt.) most is rendelkezik a napenergia becsléséhez szükséges ismeretekkel, ami felhőzet mentes napon megfelelő pontosságú adatokkal tud szolgálni, azonban változó időjárási viszonyok esetén nagy eltérés lehet akár egymás mellett lévő napelem farmok termelésében is. Az 1.2. ábra 2020.03.30. és 2020.04.01. közötti időszakra szemlélteti az országos előre jelzett és a mért naperőmű termelés értékét a MAVIR adatai alapján ².



1.2. ábra. MAVIR által becsült és a mért valós naperőmű termelés

Megfelelő fogyasztói modell, és hozzá tartozó ütemező algoritmus segítségével a mikrohálózaton, legyen az akár a háztartás, vagy egy teljes transzformátorkörzet, lokálisan megtermelhető energia előre becslése esetén bizonyos villamos fogyasztók ütemezett üzemeltetésével elfogyasztható a lokálisan termelt energia, ezzel elkerülhető, hogy a transzformátoron az energia áramlásának iránya megváltozzon. Továbbá az is fontos, hogy így a távvezetéseken és a transzformáláskor keletkező veszteség a lokális elfogyasztás esetén csökken, így növelhető a villamos energia fogyasztás hatásfoka is.

² forrás: <https://www.mavir.hu/web/mavir/naptermeles-becsles-es-teny-adatok>

A célom, hogy a dolgozat további fejezeteiben ismertetett modellek és módszerek alkalmazhatóak legyenek későbbiekben egy komplex, energiamenedzsmentet támogató rendszer elkészítéséhez.

A 3. fejezetben a munkám során elkészült adaptív heurisztikus modell prediktív irányító algoritmus kerül bemutatásra, mely alkalmazható egyszerű dinamikával rendelkező villamos fogyasztók ütemezésére változó energiaárak mellett. Az algoritmus működése és az elért eredmények hűtő és fagyasztó berendezésekre kerül szemléltetésre a működési költség minimalizálása mellett. A ütemező alkalmazható egyéb dinamikával rendelkező berendezésekre, például elektromos vízmelegítő, is, valamint a költségfüggvény módosításával alkalmas lehet lokális energiamenedzsmenthez szükséges ütemezésre is.

A 4. fejezetben egy saját, naperőművek termelésének becsléséhez használható, napelem modell kerül bemutatásra, mely időjárási előrejelzések alapján becsüli meg a várható termelést a következő időszakra a megadott paraméterekkel telepített erőmű esetén. A modell figyelembe veszi az energiamérleg alapján a napelemek hőmérséklet megváltozásából adódó hatásfokváltozást.

A dolgozat 3. és 4. fejezeteiben szereplő eredmények alapján a modellek a későbbiekben felhasználhatóak egy transzformátor körzet, mikrogrid energiamenedzsmentjének megtervezéséhez és ütemezéséhez úgy, hogy a transzformátoron az energia áramlásának iránya ne változzon a normál üzem közbeni irányhoz képest. Ennek feltétele, hogy a lokálisan háztartási erőművekkel megtermelt energia, ami becsülhető a 4. fejezetben szereplő modell használatával, a mikrogriden belül legyen elfogyasztva, ami a 3. fejezetben prezentált heurisztikus MPC ütemező algoritmus segítségével megoldható a költségfüggvény megfelelő módosításával.

Kétoldalas nyomtatás miatt üres oldal

2. fejezet

Rendszer- és irányításelméleti alapok

Ebben a fejezetben a dolgozat későbbi fejezeteiben használt rendszer- és irányításelméleti fogalmak és módszerek kerülnek ismertetésre.

2.1. Lineáris, időinvariáns állapotter modell

A rendszer- és irányításelmélet fő alkalmazási területe a mérnöki tudományok, amik főként kémiai, fizikai törvényekre, ismeretekre támaszkodnak (például mechanika, elektromosság), és ezek mind erős matematikai alapokra (köztük differenciálegyenletekre) épültek [55]. Két alapvető fogalma:

1. Jelek,
2. Rendszerek.

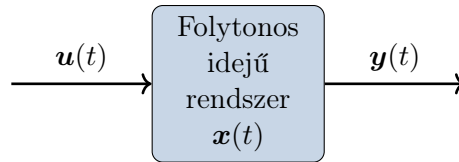
A környezetünkben előforduló, időfüggő viselkedésű objektumok hatnak egymásra. Ilyenek lehetnek a fizikai, kémiai, környezeti vagy akár biológiai folyamatok, reakciók. Ez a ráhatás különböző módon és alakban történhet. Ezek, az interakciókat leíró időfüggő mennyiségek, legyen az skalár, vagy egyes esetekben vektor, a jelek.

Amennyiben több jel van egyszerre az vektoros formában (pl. \mathbf{x} vektor) írható le, melynek minden komponenséhez minden t időpillanatban egy érték rendelhető, formálisan felírva a (2.1) egyenleten látható. *A dolgozat további részében a vektorok és a mátrixok jelölése mindig félkövér betűvel történik.*

$$\mathbf{x} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n \quad , \quad \mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \quad (2.1)$$

A rendszer pontos definiálásához először is fontos tisztázni, hogy az előzőekben definiált jelek esetén bizonyos jelekre lehet közvetlenül hatni (pl. kapcsoló vagy szelep állása) vagy mérni (pl. hőmérséklet, légáramlás sebessége), bizonyos jelek esetén viszont csak közvetve van lehetőség hatást gyakorolni az előbb említett jelek segítségével. A felhasználó, vagy külső környezet által befolyásolható jelek szolgálnak egy rendszer bemeneteként, a rendszer ezekre adott

mérhető válaszai a kimenetek. A rendszer bemenetei és kimenetei közötti matematikai kapcsolatot modellnek nevezzük. Egy ilyen folytonos idejű rendszert szemléltet a 2.1. ábra.



2.1. ábra. Folytonos idejű rendszer és annak bemeneti és kimeneti jelei

Ahogy a 2.1. ábrán is látható a bemenetet $\mathbf{u}(t)$ és a kimenetet $\mathbf{y}(t)$ jelöli. Egy rendszer működése az őt leíró modell alapján több tulajdonsága szerint is csoportosítható, például statikus, dinamikus, időfüggő, időinvariáns, lineáris, folytonos stb.

2.1.1. Folytonos idejű lineáris időinvariáns állapotter modell

Az olyan, egyszerű dinamikával rendelkező rendszerek esetén, ahol a modell felírásakor lineáris, állandó együtthatós inhomogén differenciálegyenletek kerülnek felírásra előszeretettel használt az állapotter modellel való rendszer leírás [55]. Folytonos idejű lineáris időinvariáns rendszer esetén az állapotter modell a (2.2) állapot- és (2.3) kimeneti egyenletekkel írható fel.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t) \quad (2.3)$$

Ennél az alaknál megkülönböztethető az állapotváltozók ($\mathbf{x}(t)$), bemeneti változók ($\mathbf{u}(t)$) és kimeneti változók ($\mathbf{y}(t)$) halmaza. Ezeknek a vektoroknak a mérete, dimenziója különbözhet egymástól, azonban minden esetben oszlopvektorokról beszélünk, méretük a (2.4) formában írható le, ahol n az állapotváltozók, m a bemeneti változók és k a kimeneti változók száma.

$$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \quad \mathbf{u} \in \mathbb{R}^m, \quad \mathbf{y} \in \mathbb{R}^k \quad (2.4)$$

Fontos a kezdeti állapot, ami az \mathbf{x} vektor elemeinek ismerete a t_0 kiindulási időpillanatban, jelölés szerint $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ állapotváltozók értéke.

A (2.2) állapotegyenletben szereplő \mathbf{A} állapotmátrix és \mathbf{B} bemeneti mátrix, a (2.3) kimeneti egyenletben pedig a \mathbf{C} kimeneti mátrix és a \mathbf{D} segédmátrix dimenziói:

$$\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}, \quad \mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}, \quad \mathbf{C} \in \mathbb{R}^{k \times n}, \quad \mathbf{D} \in \mathbb{R}^{k \times m} \quad (2.5)$$

A (2.2)-(2.3) egyenleteket Laplace transzformáltja az alábbi formulákat adja:

$$s\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}\mathbf{U}(s) \quad (2.6)$$

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C}\mathbf{X}(s) + \mathbf{D}\mathbf{U}(s) \quad (2.7)$$

Az állapotegyenlet Laplace transzformáltját (2.6) rendezve $\mathbf{X}(s)$ -re, valamint ezt behelyettesítve a (2.7) egyenletbe a következőt kapjuk:

$$\mathbf{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}\mathbf{U}(s) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{Y}(s) = [\mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D}] \mathbf{U}(s) \quad (2.9)$$

Fontos megjegyezni, hogy a (2.6)-(2.9) egyenletek zéró kezdeti feltételek mellett értendők.

Az állapotok időfüggvényét ($\mathbf{x}(t)$) megkapjuk a (2.8) inverz Laplace transzformáltjából, azaz $\mathcal{L}^{-1}\{\mathbf{X}(s)\}$, azonban ehhez megfelelő alakra kell hozni. A $(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ alakot úgynevezett mátrix-polinomiális alakra lehet hozni Taylor-sorba fejtéssel:

$$(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \left[s \left(\mathbf{I} - \frac{\mathbf{A}}{s} \right) \right]^{-1} = \frac{1}{s} \left(\mathbf{I} + \frac{\mathbf{A}}{s} + \frac{\mathbf{A}^2}{s^2} + \dots \right) \quad (2.10)$$

A (2.10) egyenlőség inverz Laplace transzformáltját hívjuk mátrix exponenciálisnak, dimenziója megegyezik az \mathbf{A} állapotmátrix dimenziójával és formálisan az alábbiak szerint néz ki:

$$\mathcal{L}^{-1}\{(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\} = \mathbf{I} + \mathbf{A}t + \frac{1}{2!} \cdot \mathbf{A}^2 t^2 + \dots = e^{\mathbf{A}t} \quad (2.11)$$

A (2.11) eredményét és jelölését használva a (2.8) egyenlet inverz Laplace transzformálásánál megkapjuk az állapotvektor időfüggvényét (2.12), ami a kezdeti értékek hatásából, valamint a bemenetek hatásából tevődik össze. Az utóbbi egy konvolúciós integrál forma az egyenletben. A (2.9) kimeneti egyenletből, visszaírva az $\mathbf{X}(s)$ -t, inverz Laplace transzformációval kapjuk a (2.13) egyenletet.

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}t} \mathbf{x}(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B} \mathbf{u}(\tau) d\tau \quad (2.12)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t) \quad (2.13)$$

A bemutatott módszert a mérnöki tudományok területén is alkalmazzák például elektromos rendszerek, hálózatok működésének felírásához [56].

2.1.2. Diszkrét idejű állapotter modell

Az előző, 2.1.1. fejezetben szereplő matematikai modellek folytonos idejű rendszerek leírására alkalmasak. Sok esetben azonban szükséges diszkrétizálni ezeket a rendszer modelleket, hogy a számításokat, szimulációkat el lehessen végezni számítógép, vagy mikrokontroller segítségével. Továbbá szabályozás esetén, a digitális technika gyors fejlődésének köszönhetően, ma már túlnyomó többségben számítógéppel, vagy egyéb programozható digitális eszközzel történik a beavatkozás is. Ezért a diszkrétizált rendszer modelljére a szabályozó és a rendszer közti kompatibilitás miatt is szükség van. Ilyen esetben a diszkrét idejű állapotter modell felírására van szükség, amit a (2.14) és (2.15) egyenletek szemléltetnek.

$$\mathbf{x}((k+1) \cdot \tau_s) = \mathbf{\Phi} \mathbf{x}(k \cdot \tau_s) + \mathbf{\Gamma} \mathbf{u}(k \cdot \tau_s) \quad (2.14)$$

$$\mathbf{y}(k \cdot \tau_s) = \mathbf{C} \mathbf{x}(k \cdot \tau_s) + \mathbf{D} \mathbf{u}(k \cdot \tau_s) \quad (2.15)$$

A diszkrét idejű modell állapotmátrixa ($\mathbf{\Phi}$) és bemeneti mátrixa ($\mathbf{\Gamma}$) a folytonos idejű rendszer diszkrétizálásával kapható meg. Azonban a diszkrétizálás után a rendszer állapotát csak diszkrét időpillanatokban ($t_k = k \cdot \tau_s$) tudjuk megmondani. Ez a t_k időpillanat egész számú többszöröse a τ_s mintavételezési időnek, ami a rendszer egy jellemzője, és időben állandó. Ezt figyelembe véve τ_s elhagyható a képletből, és egyszerűbb formulával is leírható, ahol \mathbf{x}_k jelöléssel a t_k időpillanatban lévő állapotvektort jelöljük. Ez a formális leírási mód a (2.16) és (2.17) egyenleteken látható.

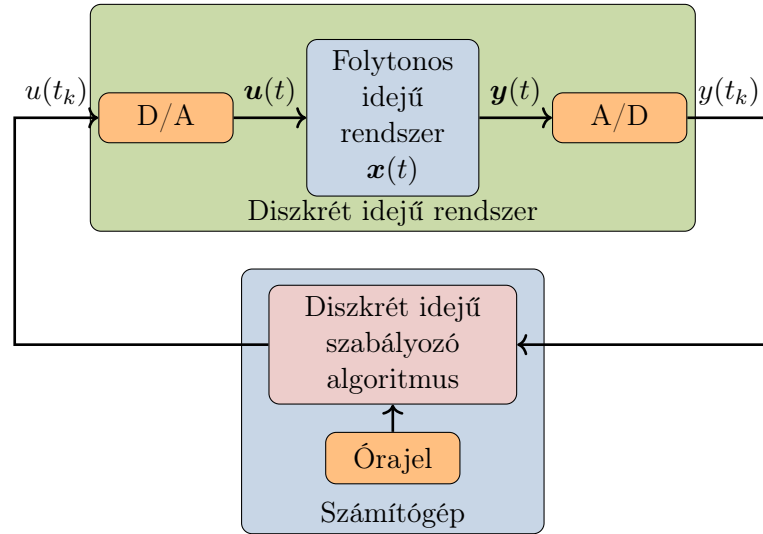
$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{\Phi} \mathbf{x}_k + \mathbf{\Gamma} \mathbf{u}_k \quad (2.16)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C} \mathbf{x}_k + \mathbf{D} \mathbf{u}_k \quad (2.17)$$

A folytonos és diszkrét idejű rendszerek kapcsolatát szemlélteti a 2.2. ábra.

A diszkrétizált modell állapotegyenletében szereplő állapot- és bemeneti mátrixok meghatározásához az előző fejezetben a folytonos idejű állapotegyenlet megoldásából (2.12) kell kiindulni. Fontos, hogy jelen esetben a mintavételezett rendszer jeleihez nulladrendű tartószervet rendelünk. Ez azt jelenti, hogy két mintavételezési időpont (pl. t_k és t_{k+1}) között a jelek értéke állandó, és azok csak a mintavételezési időpillanatokban változhatnak meg. Behelyettesítve a (2.12) képletbe két szomszédos időpillanatot, azaz $t = t_{k+1}$ és $t_0 = t_k$ értékeket az alábbi, (2.18) egyenletet kapjuk:

$$\mathbf{x}(t_{k+1}) = e^{\mathbf{A}(t_{k+1}-t_k)} \mathbf{x}(t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} e^{\mathbf{A}(t_{k+1}-\tau)} \mathbf{B} \mathbf{u}(\tau) d\tau \quad . \quad (2.18)$$



2.2. ábra. Kapcsolat a folytonos és a diszkrét idejű rendszerek között

Már említésre került, hogy a mintavételezés azonos (τ_s) időnként történik periodikusan, így a $t_{k+1} - t_k = \tau_s$ helyettesítés használható. A folytonos és diszkrét idejű modell jeleinek értékei azonosak a mintavételezési pillanatokban, így használható a (2.16) és (2.17) formuláknál használt jelölés:

$$\mathbf{x}(t_{k+1}) := \mathbf{x}_{k+1}, \quad \mathbf{u}(t_k) := \mathbf{u}_k \quad . \quad (2.19)$$

A (2.18) egyenlet jobb oldali összegének első tagja ezek felhasználásával meghatározható, azonban az integrál értékének meghatározásához további számítás, helyettesítés szükséges. Ennek egyszerű levezetéséhez érdemes bevezetni egy új, θ változót, aminek értéke legyen

$$\theta = \tau - t_k, \quad (2.20)$$

akkor

$$t_{k+1} - \tau = (t_{k+1} - t_k) - (\tau - t_k) = \tau_s - \theta \quad . \quad (2.21)$$

Ezt behelyettesítve a (2.18) egyenletbe kapjuk a (2.22) képletet. További egyszerűsítés, hogy nulladrendű tartószervvel rendelkező mintavételezett rendszer-ről lévén szó, t_k és t_{k+1} között a bemeneti vektor értéke nem változik, azaz helyettesíthető a t_k időbeli értékével, \mathbf{u}_k -val.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= e^{\mathbf{A}\tau_s} \mathbf{x}_k + \int_0^{\tau_s} e^{\mathbf{A}(\tau_s-\theta)} \mathbf{B} \mathbf{u}_k d\theta \\ &= e^{\mathbf{A}\tau_s} \mathbf{x}_k + e^{\mathbf{A}\tau_s} \int_0^{\tau_s} e^{-\mathbf{A}\theta} d\theta \mathbf{B} \mathbf{u}_k \end{aligned} \quad (2.22)$$

A (2.22) egyszerűsített formulában az integrál értékének meghatározása az exponenciális függvény definíció szerinti integrálásával számítható, azaz:

$$\int_0^{\tau_s} e^{-\mathbf{A}\theta} d\theta = \left[-\mathbf{A}^{-1} e^{-\mathbf{A}\theta} \right]_0^{\tau_s} = \mathbf{A}^{-1} \left(\mathbf{I} - e^{-\mathbf{A}\tau_s} \right) \quad . \quad (2.23)$$

Visszahelyettesítve az integrál értékét a (2.22) egyenletbe:

$$\mathbf{x}_{k+1} = e^{\mathbf{A}\tau_s} \mathbf{x}_k + \mathbf{A}^{-1} \left(e^{\mathbf{A}\tau_s} - \mathbf{I} \right) \mathbf{B} \mathbf{u}_k \quad . \quad (2.24)$$

Látható, hogy x_{k+1} lineáris kombinációja az x_k állapot és u_k bemeneti vektoroknak. A fenti és a (2.16) egyenlet segítségével kifejezhetők a diszkrétizált állapottermodell állapot- és bemeneti mátrixai a folytonos idejű rendszer mátrixai segítségével (2.25).

$$\Phi = e^{\mathbf{A}\tau_s} \quad , \quad \Gamma = \mathbf{A}^{-1} \left(e^{\mathbf{A}\tau_s} - \mathbf{I} \right) \mathbf{B} \quad (2.25)$$

Mivel a (2.23)-(2.25) egyenletekben szerepel az \mathbf{A} mátrix inverze, így az állapotmátrixnak invertálhatónak kell lennie.

Fontos megjegyezni, hogy a folytonos és a diszkrét idejű rendszermodellek csupán a $t_k = k \cdot \tau_s$ időpillanatokban vannak kapcsolatban egymással, tehát fontos a megfelelő mintavételezési idő megválasztása a diszkrétizálás során. A diszkrét idejű rendszermodellek alkalmazását a számítógépes vezérlés és irányítás indokolja, amik adott órajellel működnek, tehát csak diszkrét időpillanatokban képesek beavatkozni.

2.2. Modellezés fizikai elvek alapján

Modellezés során valamely környezetbeli problémára keresünk olyan matematikai leírást, amely az ismert bemeneti és kimeneti jelek között teremti meg a kapcsolatot [57]. A modellezés célja lehet valamely dinamikus jelenség előrejelzése, predikciója, de diagnosztikai, vagy irányítási célú modellek is léteznek, ezek részletessége, és alkalmazási területe eltérő. A modell felépítése során az alábbi lépéseken szükséges végigmenni:

1. Probléma definiálás, formális leírása
 - rendszer definiálása
 - modellezési cél meghatározása
 - folyamatábra készítése
2. Mechanizmusok megfigyelése
 - működési jelenségek gyűjtése
3. Adatok gyűjtése és értékelése
 - adatlapokból, táblázatokból értékek összegyűjtése

- tulajdonságok és működési adatok gyűjtése
- mért előzetes adatok megfigyelése

4. Modell megalkotása

- mérlegegyenletek meghatározása
- modellezési feltételek megfogalmazása
- modellegyenletek meghatározása
- kezdeti és határköri körülmények meghatározása

5. Modell megoldása

- megoldási módszer implementálása vagy átdolgozása
- modell ellenőrzése (pontosság és megbízhatóság)

6. Modell verifikálása

- modell működésének ellenőrzése mérnöki intuíció szerint
- modell dinamikai tulajdonságainak ellenőrzése (pl. stabilitás)

7. Modell kalibrálása és validálása

- modell kalibrálása, ismeretlen paraméterek becslése mérési adatok segítségével
- modell validációja a valós rendszer és a modell adatainak összehasonlításával statisztikai módszerek segítségével

Bonyolultságát tekintve lehet elosztott paraméterű és koncentrált paraméterű a modell. A dolgozatban szereplő modellekhez koncentrált paraméterű dinamikai modellt alkalmaztam, így a fejezetben csak ez a modellezési eljárás kerül kifejtésre.

A rendszer modelljének matematikai felírása a rendszer működését meghatározó alapvető fizikai összefüggések alapján történik. Ezek a törvények egy dinamikai rendszer esetén differenciál egyenletek, amik megfelelő rendezés után, a 2.1. fejezetben ismertetett állapotter modell felírásához használt alakra hozhatók. Ilyen fontos fizikai törvények:

- Tömegmegmaradás
- Energiamegmaradás
- Lendület- és perdületmegmaradás

Az, hogy az említett egyenletek felírásához melyik törvényt szükséges használni függ a fizikai rendszer típusától, annak működésétől, modellezni kívánt jelenségtől:

- Mechanikai rendszer
- Termodinamikai rendszer
- Elektromos rendszer

- Kémiai, biológiai rendszer

A disszertációban termodinamikai rendszerek kerültek felírásra és alkalmazásra, aminek a fontosabb mechanizmusai, amiket figyelembe kell venni az egyenletek felírásakor a következők:

- anyagok áramlása
- fűtés, hűtés
- tömeg- és energiaátvitel
- fázisátmenetek (pl. párolgás)

A munkám során megvalósított és használt modellek olyan fizikai rendszereket írnak le, amiknél anyagáramlás és fázisátmenet nem jellemző. Így modellezés során a hűtés/fűtés és az energiaátvitel mechanizmusán alapuló egyenletek kerültek felírásra. Az energiamérleg az alábbi alakban írható fel:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Energia} \\ \text{megváltozás} \\ \Delta E \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Betáplált} \\ \text{energia} \\ E_{in} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Kivett} \\ \text{energia} \\ E_{out} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Energia} \\ \text{forrás/nyelő} \\ E_s \end{array} \right\} .$$

Egy adott hőmérsékletű és ismert összetételű test energiája számolható a (2.26) képlettel, ahol E a test aktuális energiája, c a fajlagos hőkapacitása, m a tömege és T pedig az aktuális hőmérséklete. A fajlagos hőkapacitás és tömeg szorzata adja a hőkapacitást ($c \cdot m = C$).

$$E = c \cdot m \cdot T \quad (2.26)$$

Ezek alapján egy anyag energiamegváltozását az alábbi alak írja le a hőmérséklet felhasználásával:

$$\Delta E = \frac{dE}{dt} = \frac{dCT}{dt} = C \frac{dT}{dt} . \quad (2.27)$$

Két anyag közti hő- és energiaátadás során fontos figyelembe venni a hőátadási tényezőt, ami függ az érintkező felületek nagyságától és a hővezető közegtől (pl. álló vagy áramló közeg). Koncentrált paraméterű modell esetében az egyes fizikai objektumok tulajdonságai térben homogének. Ennek következménye az a feltételezés, hogy a hőmérséklet, sűrűség, stb. állandó az adott objektumon belül.

Példa 1 Energiamérlegen alapuló modell felírására egyszerű példa, ha egy ismert paraméterekkel rendelkező felmelegített (vagy lehűtött) vasgolyót hagyva az asztalon az lehűl (vagy felmelegszik), és hőmérséklete egy idő után a környezet hőmérsékletét fogja elérni. A fejezet elején említett 7 modellezési lépésen végighaladva felírható a szükséges viselkedés és azok alapján a modell. A golyó energiájának időbeli megváltozása a környezet hőmérsékletétől és a golyó valamint a környezeti levegő közti hőátadástól fog függni. Ennek matematikai leírása az energiamérleg alapján a (2.28) formulán látható, ahol E_g a golyó

energiája, C_g a golyó hőkapacitása, T_g a golyó aktuális hőmérséklete, K_{g-l} a golyó és a környezet közötti hőátadási tényező és T_l a környezet (levegő) hőmérséklete.

$$\frac{dE_g}{dt} = C_g \frac{dT_g}{dt} = K_{g-l}(T_l - T_g) \quad (2.28)$$

A fenti egyszerű példánál az alábbi egyszerűsítések kerültek alkalmazásra:

- a golyó hőmérséklete homogén, minden pontjában azonos,
- a hővezetés nagysága nem függ a hőmérsékletek különbségétől, az állandónak tekinthető,
- a golyót tartó felület hatása elhanyagolható.

Amennyiben a golyó hőmérséklete szabályozható (fűthető vagy hűthető), akkor a megfelelő hatással kiegészül a (2.28) differenciálegyenlet, és így a (2.29) egyenlet írja le a rendszert, ahol K_{g-sz} a golyó és a szabályzott test közti hőátadási tényező és T_{sz} a szabályzott test hőmérséklete.

$$C_g \frac{dT_g}{dt} = K_{g-l}(T_l - T_g) + K_{g-sz}(T_{sz} - T_g) \quad (2.29)$$

A 2.1. fejezetben ismertetett állapotter modell alakra alakítva a (2.29) egyenletet a (2.30) alakú differenciál egyenlet jön létre. A (2.31) egyenleten szerepel az állapottermodell alakra hozott modell.

$$\frac{dT_g}{dt} = -\frac{K_{g-l} + K_{g-sz}}{C_g} T_g + \frac{K_{g-l}}{C_g} T_l + \frac{K_{g-sz}}{C_{sz}} T_{sz} \quad (2.30)$$

$$[\dot{T}_g] = \left[-\frac{K_{g-l} + K_{g-sz}}{C_g} \right] \cdot [T_g] + \begin{bmatrix} \frac{K_{g-l}}{C_g} & \frac{K_{g-sz}}{C_{sz}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_l \\ T_{sz} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

2.3. Szakaszonként lineáris rendszermodell

Bizonyos esetekben előfordulhat, hogy egy-egy változó hatására, legyen az állapot, külső paraméter vagy bemeneti változó, a rendszert leíró dinamika változik, a kvalitatív rendszer viselkedése megváltozik, ezáltal a rendszer modellje is változik. Ilyen lehet például az eszköz, vagy annak egy alrendszerének be- illetve kikapcsolása, ahol a rendszer működésében változás áll be, így különböző állapotter modellel lehet leírni azonos állapot és bemeneti változók mellett. Ilyen esetben a dinamikában lesz változás, azonban mindkét alrendszermodell egy-egy állapottermodell, csak más-más mátrixokkal. Ilyen változásra egyszerű példa a tipikusan hűtésnél használt ventilátoros megoldások. Amíg a rendszer hőmérséklete egy meghatározott hőmérséklet alatt van a ventilátor nem üzemel. Amikor átlépi ezt a hőmérsékletet a ventilátor bekapcsol, és a passzív hűtést felváltja egy aktív keringetési hűtés, ami képes visszahűteni a

rendszert a megfelelő hőmérsékletre. Mindkét esetben leírható a rendszer működése egy-egy állapottermodell segítségével, azonban az aktív hűtés esetén a hőleadás gyorsabb, így más a dinamikája a rendszernek.

Ilyen dinamikai megváltozás esetén használható a szakaszonként lineáris (PWA, Piecewise Affine) modell ahol lehetőség van a különböző dinamikák összekapcsolására, azok egy rendszerként való kezelésére. Az ilyen rendszerekkel, azok tulajdonságaival és irányításával foglalkozik az [58] és [59] irodalom. Egy szakaszonként lineáris rendszer leírását szemlélteti diszkrét idejű rendszer esetén az alábbi (2.32) egyenlet, ahol n darab rendszerből áll össze a teljes rendszermodell.

$$\Sigma_i : \begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{\Phi}_i \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{\Gamma}_i \cdot \mathbf{u}_k + \mathbf{f} \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_i \cdot \mathbf{x}_k \end{cases}, i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2.32)$$

Azt, hogy aktuálisan melyik lineáris modell kerül alkalmazásra különböző szabályokkal kell definiálni. Ezek a szabályok függhetnek a modell állapotaitól (pl. folyadék hűtésnél és melegítésnél a fagyás és forráspont) és/vagy a bemeneteitől (pl. az eszköz be vagy ki van kapcsolva; autó sebességénél a váltó áttételének fokozata). A szabályok segítségével az állapot- és bemeneti változók által kifeszített tér alapján kerül kiválasztásra a megfelelő modell.

A (2.32) alakú szakaszonként lineáris állapottermodell esetén lehetőség van a konstans bemenetek, zavarások elkülönítésére az \mathbf{f} taggal, így ami minden részrendszer esetén azonos az leválasztható a bemeneti vektorból. Ilyen típusú rendszerleírás esetén szükséges definiálni, hogy melyik modell milyen feltételek teljesülése esetén érvényes. Ez a fenti, ventilátoros példa esetén lehet a ventilátor üzemállapota, ami egy bemeneti változó, vagy amennyiben a hőmérséklet, ami alapján kapcsol a ventilátor állapotváltozó, úgy aszerint is fel lehet bontani a működési tartományt. A megfelelő állapottermodell, aktuális rendszermodell kiválasztása ezek alapján az egyértelműen megfogalmazható szabályok alapján történik.

2.4. Paraméterbecslés

A dinamikus rendszerek paramétereinek becslése fontos területe a rendszer- és irányításelmélet tudományának. Sok esetben a modellezés során felírt matematikai modellben szereplő értékek, paraméterek halmazának egy részét (vagy egészét) nem, vagy csak speciális eszközökkel, módszerekkel lehet mérni. A modell megfelelő viselkedéséhez azonban fontos a rendszer dinamikájának pontos ismerete, amihez azonban elengedhetetlen a paramétereinek ismerete [60].

Jelen fejezetben a dolgozatban is használt modellek paramétereinek becsléséhez szükséges alapismeretek kerülnek bevezetésre.

A paraméterek becsléshez három fontos ismeretre van szükség:

1. Modell ($\hat{y} = M(x; \theta)$): a fizikai rendszer dinamikáját leíró rendszermodell (például állapotter modell), ahol M a leírt modell, x a független változók, θ az ismeretlen paraméterek halmaza és \hat{y} a modell segítségével számolható és a rendszeren mérhető függő változók
2. Mérési eredmények (y): a fizikai rendszeren mért megfelelő mérési adatsor
3. Hibafüggvény ($\|y - \hat{y}\|$): egy alkalmas jelnorma, amivel a mért és a becslés során kapott adatsor kiértékelhető, és az eltérés minimalizálható

A becslésnél a modell által számolt értékek (\hat{y}) és a rendszeren mért értékek (y) közti eltérés minimalizálása a cél, azaz a paraméterek meghatározása, hogy a hibafüggvény értéke minimális legyen (2.33).

$$\|y - \hat{y}\| \rightarrow \min \quad (2.33)$$

A paraméterbecslések során előszeretettel alkalmaznak legkisebb négyzetes hibán alapuló hibafüggvényeket a nem ismert paraméterek meghatározására. A becslő eljárás feladata, hogy a fizikai rendszer ismeretlen θ_0 paramétervektorára egy olyan $\hat{\theta}$ becsült paramétervektort találjon, ahol a (2.33) képletben szereplő hibafüggvény értéke minimális. Ilyen lehetséges négyzetes hibafüggvényt (f_ε) mutat a (2.34) egyenlet, ahol N a minták száma, θ a modellenél használt aktuális paramétervektor, $\hat{y}(k; \theta)$ pedig a diszkrét idejű paraméteres rendszermodell.

$$f_\varepsilon(y, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} [y(k) - \hat{y}(k; \theta)]^2 \quad (2.34)$$

Több lehetséges paraméterbecslő eljárás is létezik. Az egyik ilyen módszer a gradiens módszer, ahol lineáris esetben deriválás segítségével vannak meghatározva a minimum értékek a paraméterekhez. Lineáris modell esetén ez egy egyszerű eljárás, és könnyen megvalósítható.

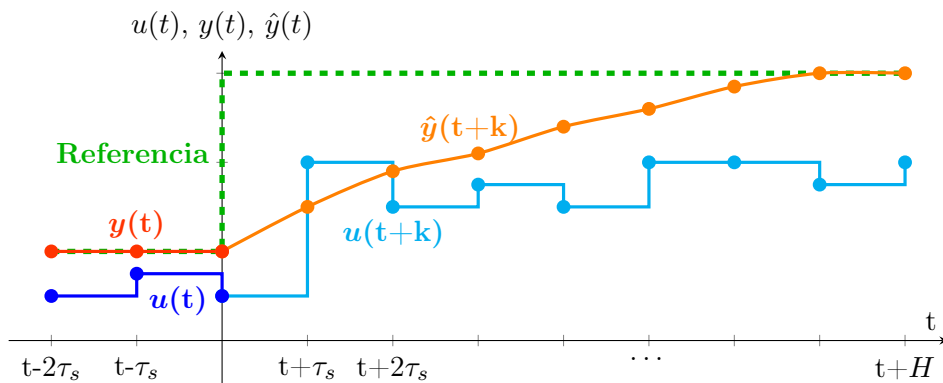
Nemlineáris modellek esetén a direkt minimalizálás nem járható út. Az ilyen esetekben használt rekurzív paraméterbecslő algoritmus változtatja a θ paramétervektor értékeit úgy, hogy a f_ε hibafüggvény értéke csökkenjen. A minimális érték elérésekor használt paramétervektor értékei adják a $\hat{\theta}$ vektor elemeit. Egy lehetséges algoritmus a hibafüggvény minimalizálására a Nelder-Mead szimplex algoritmus [61], ami egy direkt kereső algoritmus és egyszerűsége miatt sok területen alkalmazzák. Nagy előnye, hogy bizonytalan függvények és nem folytonos függvények esetén is jól működik, valamint MATLAB programhoz is található olyan minimalizáló függvény, ami ezt az algoritmust alkalmazza.

2.5. Modell prediktív irányítás

Model prediktív irányítás (MPC, Model Predictive Control) egy speciális irányítási forma, ahol a rendszer modelljének ismeretében kerül megválasztásra a megfelelő bemenet, és ezzel kerül irányításra annak működése [62]. Jól használható például különböző hajtások esetén a fordulatszám vagy nyomaték szabályozására, vagy akár a robotikában. Egy MPC megvalósításához három fontos dologra van szükség:

- a rendszert leíró predikciós modell,
- irányítási célt leíró célfüggvény és
- az adatokat összefogó és feldolgozó megfelelő algoritmus.

A modell prediktív irányítás esetén ismerni kell tehát a rendszer bemenetét, ami változtatható, és a kimenetét, ami irányítandó. Ezen kívül fontos még az említett rendszermodell ismerete, ami kapcsolatot teremt a bemenet és a kimenet között. Ezek alapján egy algoritmussal számolható a rendszer viselkedése és meghatározható egy bemeneti jelsorozat, amivel a kívánt kimenet kerül beállításra. Az időben a rendszer viselkedésének előreszámolását, a működés előrelátását horizontnak (H) nevezzük. Ezt a működést szemlélteti a 2.3. ábra.

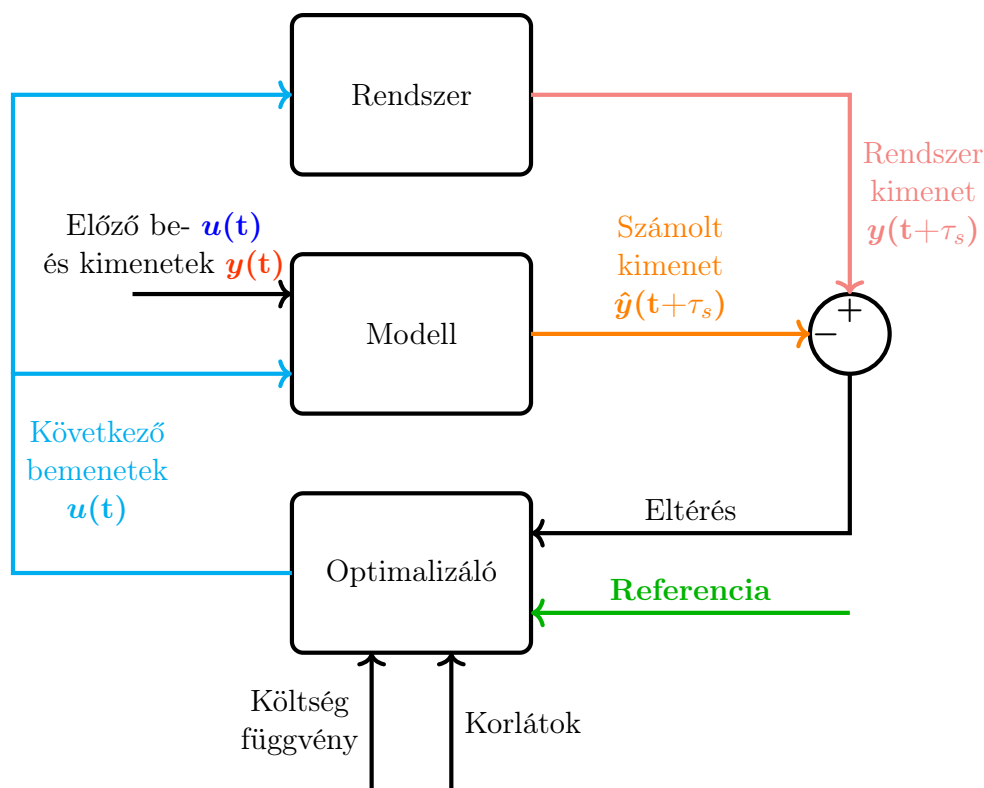


2.3. ábra. Model prediktív irányítás

Az $u(t)$ (kék) és $y(t)$ (piros) időfüggvények a rendszerre a múltban adott bemenet és az arra kapott válasz a kimeneten. Az ábrán a Referencia (zöld) az alapjel, ami megváltozására az MPC számolja az $u(t+k)$ ($0 < k \leq H$) bemeneti (világos kék) jelsorozatot előre a horizont értékéig, ami a rendszer kimenetét a referenciaértékre állítja a modell alapján számolt $\hat{y}(t+k)$ becsült kimenetet (naranccsárga) követve.

Az optimalizáló a bemenetre számolt jelsorozattal a rendszert a jelenlegi állapotból a kívánt állapotba juttatja ügyelve arra, hogy a beletáplált szabályoknak eleget tegyen. Az MPC algoritmus újra futtatható, és ezzel a bemenet újra számolható az aktuális pillanattól, amennyiben zavarás, vagy egyéb külső

hatás miatt a modell alapján számolt és a rendszeren mért értékek között eltérés jelentkezik. Egy általános MPC algoritmus működését szemlélteti a 2.4. ábra.



2.4. ábra. Model prediktív irányítás algoritmusának működése

Látható, hogy az optimalizáló működéséhez megfogalmazott szabályok, az úgynevezett költségfüggvény és korlátok formájában kerülnek beállításra. A költségfüggvény segítségével definiálhatóak bizonyos kritériumok, amiket az optimalizálónak figyelembe kell vennie a bemenet meghatározásánál. Ilyen lehet például az energiaár, üzemidő, beállási idő vagy terhelési szint figyelembevétele a kívánt kimenet beállításához, ami egyes esetekben lassíthatja is a kívánt irányítási cél elérését. Az optimalizáló algoritmus törekszik arra, hogy ezt a költségfüggvényt minimalizálja a bemenet meghatározásánál.

A korlátok az adott rendszerhez kapcsolódó üzemi korlátozások, amiket nem léphet át a rendszer a működés, azaz a kívánt kimenet elérése során. Ilyen korlát lehet hőmérséklet, fordulatszám, nyomaték, áram, maximális gyorsítási és lassítási sebesség, stb.

Kétoldalas nyomtatás miatt üres oldal

3. fejezet

Egyszerű dinamikai modellel felírható villamos berendezések ütemezése

A villamos energia az elmúlt évtizedekben mindennapjaink fontos részévé vált. Rengeteg háztartási gépünk működtetéséhez szükséges villamos áram, és ezek a berendezések nagymértékben hozzájárulnak a mindennapi kényelmünk biztosításához (hűtőgép, klíma, TV, stb.) és napi teendőink gyors és egyszerű elvégzéséhez (mosógép, mosogatógép, robotporszívó, stb.).

Az európai-, főként az északi országokban, lehetőség van a villamos energia vételezésénél olyan tarifacsomag választására, ahol az energia egységára időben nem állandó, hanem annak árát az előre becsült fogyasztási és termelési szokások befolyásolják, naponta akár többször is változhat. Magyarországon is található napközben változó áramdíjszabással rendelkező tarifa (E.ON két zónaidős áram: A2 tarifa¹), azonban itt a díjszabás csak hétköznapi (egy-egy energiaár csúcs és völgyidőszakra) és hétvégi (egész nap völgyidőszaki díjszabás) léptékben változik.

Bizonyos, szakaszosan üzemelő villamos berendezések megfelelő ütemezésével lehetséges a felhasznált energia költségét minimalizálni, amennyiben olcsóbb energiaár mellett a berendezést tovább üzemeltetjük a működési korlátok között. Ilyen berendezések lehetnek például a hűtő és fűtő berendezések:

- hűtőgép,
- fagyasztószekrény és -láda,
- légkondicionáló berendezés,
- villanybojler.

Ezeknek a berendezéseknek a működése leírható egyszerű dinamikai modellekkel és a felhasznált energiát hűtésre vagy fűtésre használják fel. Betartva a hőmérsékletkorlátokat olcsóbb energiaár mellett tovább üzemeltetve a készüléket később kell bekapcsolni drágább energiaár mellett, azaz csökkenthető a villamos energia fogyasztása a készüléknek magasabb energiaár mellett.

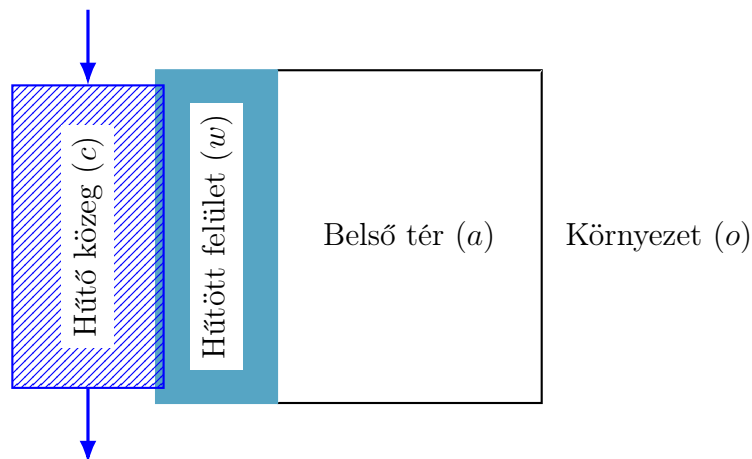
¹ link: <https://www.eon.hu/hu/lakossagi/aram/arak.html>

3.1. Hűtőgép modellezése

Egy hűtőszerény működése közben a kompresszor pumpálja a hűtőközeget a hűtött felület(ek) felől a hűtőszerény hátulján található hőleadó rács felé. Így működés közben a hűtő belső felületében található hőcserélőben alacsony nyomás jön létre, ami hatására a környezetétől hőt von el, a hőleadó rács belsejében pedig megnő a nyomás, azaz hőt ad le. A hűtőgép kikapcsolása után, a két hőcserélőt összekötő kapilláris folytócsövön keresztül a nyomás kiegyenlítődik.

3.1.1. Háztartási hűtőgép modellezése fizikai elvek alapján

A pontos szabályozáshoz elengedhetetlen a minél pontosabb rendszer modell ismerete. A modellezés során a 2.2. fejezetben ismertetett dinamikus fizikai rendszerek modellezési lépéseket, módszereket szükséges követni. Figyelembe véve egy hűtőgép fizikai felépítését, ahogy az a [S1] cikkben is szerepel, azt a 3.1. ábrával lehet szemléltetni.



3.1. ábra. Hűtőgép sematikus felépítése a főbb részegységek feltüntetésével

A hűtőgép felépítését és működését nézve négy fő részegységet kell figyelembe venni. Az első a hűtő közeg, amit a kompresszor áramoltat bekapcsolt állapotban. Ez a közeg hűti a hűtőgép belső falában lévő hőcserélőt. A hűtött falfelület lehűti a hűtőgép belsejét. Azonban kikapcsolás után a hűtőgép lassan felveszi a környezet hőmérsékletét, azaz a környezet is hatással van a rendszerre.

A fizikai modellt és annak működését figyelembe véve felírható a rendszer dinamikája, és ezzel meghatározható az állapotter reprezentáció is. A hőkapacitások jelölése C , tehát a hűtött felület hőkapacitása C_w és a belső tér hőkapacitása C_a . A hőmérsékletek jele T . Tehát a két, szabályozandó hőmérséklet a hűtött fal T_w hőmérséklete és a belső légtér T_a hőmérséklete. Ezekon kívül még a másik két hőmérséklet a hűtés során a hűtőközeg T_c hőmérséklete és a környezet T_o hőmérséklete. A fizikai rétegek között az energia átadását,

azaz jelen esetben a hőáramlást a hővezetések jellemzik. Ezek jelölése K . A hővezetés a hűtőközeg és a hűtött felület között K_c , a hűtött felület és a belső légtér között K_w , a belső légtér és a környezet között K_o , valamint a hűtött felület és a környezet között K_x .

Hűtőgép energiamérlege

Ezek ismeretében felírható az energiamérlegen alapuló dinamikája a hűtőgépnek [57] a 2.2. fejezet alapján. A modell felírásánál a belső hőmérsékletre és a hűtött fal hőmérsékletére szükséges felírni az egyenleteket az energiamérleg alapján, amik a (3.1) és (3.2) egyenleteken láthatóak. A T_c hőmérséklet egy, a hűtőgép működésből adódó konstans érték, valamint a környezet T_o hőmérsékletének hőkapacitása nagyságrendekkel nagyobb, mint a rendszer (C_a és C_w) belső hőkapacitásai, azaz ennek változása a működés során elhanyagolható. Az S változó a hűtőgép működésének aktuális állapota.

$$C_a \cdot \frac{dT_a}{dt} = K_w(T_w - T_a) + K_o(T_o - T_a) \quad (3.1)$$

$$C_w \cdot \frac{dT_w}{dt} = K_w(T_a - T_w) + K_x(T_o - T_w) + K_c(T_c - T_w) \cdot S \quad (3.2)$$

A (3.1) és (3.2) egyenletek alapján meghatározható az állapot- és bemeneti vektorok elemei.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} T_a \\ T_w \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} S \\ T_o \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Energiamérleget alkalmazva felírható akár az elektromos bojler dinamikája is, ahogy az a [63] cikkben is szerepel. A felírt modell alapján a további lépéseket követve hasonló módon elkészíthető a bojler rendszermodellje.

Hűtőgép állapotter reprezentációja

Az üzemelés közben, a berendezés ki- és bekapcsolását az S bináris bemeneti változó szemlélteti ($S \in \{0, 1\}$). A (3.2) egyenlet alapján látható, hogy az utolsó tagja az összegnek az S bemeneti változó hatására bekapcsolt esetben ($S = 1$) hozzáadódik, azonban kikapcsolt állapotban ($S = 0$) kiesik. Ezek alapján a 2.3. fejezetben ismertetett PWA modell segítségével írható le a rendszer működése két külön dinamika segítségével.

Bekapcsolt állapot esetén Bekapcsolt állapotban az $S = 1$, tehát a (3.2) egyenlet minden tagja szerepel a modellben. Az így kapott egyenleteket rendezve kapjuk az alábbi, (3.4) és (3.5) egyenleteken szemléltetett mátrixokat az állapottér modell paraméteres felírásához.

$$\mathbf{A}_{on} = \begin{bmatrix} -\frac{K_w + K_o}{C_a} & \frac{K_w}{C_a} \\ \frac{K_w}{C_w} & -\frac{K_w + K_c + K_x}{C_w} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{B}_{on} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_o}{C_a} \\ \frac{T_c \cdot K_c}{C_w} & \frac{K_x}{C_w} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{on} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Kikapcsolt állapot esetén Kikapcsolt hűtőgép esetén az $S = 0$ miatt az ezzel megszorzott utolsó tag a (3.2) egyenletben 0, azaz kiesik. Itt az egyenletek rendezésével a lent látható (3.6) és (3.7) rendszermátrixok adódnak.

$$\mathbf{A}_{off} = \begin{bmatrix} -\frac{K_w + K_o}{C_a} & \frac{K_w}{C_a} \\ \frac{K_w}{C_w} & -\frac{K_w + K_x}{C_w} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{B}_{off} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_o}{C_a} \\ 0 & \frac{K_x}{C_w} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{off} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Szakaszonként lineáris modell A két külön dinamika miatt bekapcsolt és kikapcsolt esetben a 2.3. fejezetben ismertetett szakaszonként lineáris rendszer felírására van szükség. Az előzőekben kapott (3.4)-(3.7) egyenletekben szereplő mátrixokat felhasználva a már ismertett 2.32. alakú állapottér reprezentációt szükséges meghatározni.

Összehasonlítva az \mathbf{A}_{on} (3.4) és \mathbf{A}_{off} (3.6) mátrixokat azok a jobb alsó, a_{22} értékükben különböznek, tehát a PWA rendszernél ezt a két mátrixot meg kell különböztetni dinamikailag.

Megvizsgálva a \mathbf{B}_{on} (3.5) és \mathbf{B}_{off} (3.7) mátrixokat látható, hogy a bal alsó, b_{21} értékében különböznek, ami kikapcsolt állapotban 0. A \mathbf{B} mátrixok első oszlopa az S bemeneti változó állapotával van megszorozva, azaz kikapcsolt (*off*) esetben mindegy, hogy ebben az oszlopban milyen értékek szerepelnek, az minden esetben 0 értékű lesz $S = 0$ miatt. Ennek köszönhetően a \mathbf{B}_{off} mátrix helyett használható a \mathbf{B}_{on} mátrix is. Ezt kihasználva nincs szükség két

különböző bemeneti mátrix használatára, elég a $\mathbf{B} \equiv \mathbf{B}_{on}$ használata, ezzel egyszerűsödik a PWA rendszermodell felírása. Továbbá, a környezet hőmérsékletének (T_o) hatása szerepel a \mathbf{B} mátrix második oszlopában. Ez a hőmérséklet, a környezet rendszerhez képest (C_w, C_a) relatív nagy hőkapacitását figyelembe véve, tekinthető konstans bemenetnek, annak értékére a hűtőgépnél a működése nincs hatással. Ezt felhasználva a T_o bemeneti változó és a \mathbf{B} mátrix második oszlopának szorzata kiemelhető konstans hatásként az \mathbf{f} tagba. Ezeket figyelembe véve a PWA rendszer két állapotmátrixszal ($\mathbf{A}_{on}, \mathbf{A}_{off}$) rendelkezik, amiknek kiválasztása az S bemeneti bináris változótól függ:

$S=1$: A rendszer dinamikáját az \mathbf{A}_{on} mátrix írja le

$S=0$: A rendszer dinamikáját az \mathbf{A}_{off} mátrix írja le

A PWA rendszerénél a \mathbf{B} , az \mathbf{f} és a \mathbf{C} mátrixok mindkét dinamika esetén azonosak, és paraméteres értékük a (3.8) egyenletben szerepeltek szerint számítható.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_c \cdot K_c}{C_w} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \frac{K_o \cdot T_o}{C_a} \\ \frac{K_x \cdot T_o}{C_w} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

A rendszer identifikálása, és a rendszermátrixok meghatározása egy, a [64] cikkben bemutatott hűtőgép hőmérsékleteinek, fogyasztásának és a környezet hőmérsékletének mért adatai alapján történt. Ezeket az adatsorokat felhasználva a rendszer mátrixai a 2.4. fejezetben ismertett paraméterbecslési eljárás segítségével kerültek megállapításra. A becslés MATLAB környezetben történt `fminsearchbnd` függvény használatával, ami egy Nelder-Mead szimplex algoritmuson [61] alapuló minimalizáló függvény. A minimalizált hibafüggvény egy négyzetes hibafüggvény, ami a (3.9) képlet alapján számolható.

$$V(\Theta) = \int_{t_0}^{t_f} w_a \left(T_a(t) - \hat{T}_a(t) \right)^2 + w_w \left(T_w(t) - \hat{T}_w(t) \right)^2 dt \quad (3.9)$$

A $V(\Theta)$ hibafüggvény értéke a rendszeren mért ($T_a(t), T_w(t)$) hőmérsékletek, és az aktuális Θ paraméterekkel modell alapján számolt ($\hat{T}_a(t), \hat{T}_w(t)$) hőmérsékletek különbségétől függ. A w_a és w_w értékekkel a hőmérséklet eltérések súlyozására van lehetőség annak függvényében, hogy a belső tér T_a vagy a hűtött felület T_w hőmérséklet eltérését vegye nagyobb súllyal figyelembe az algoritmus a minimalizálás során.

A diszkrétizált modellre kapott PWA rendszer mátrixainak értékei, valamint az állapot- és bemeneti vektorok a (3.10)-(3.12) egyenleteken láthatóak.

$$\Phi_{on} = \begin{bmatrix} 0,9998 & 0,0001 \\ 0,0004 & 0,9977 \end{bmatrix}, \quad \Phi_{off} = \begin{bmatrix} 0,9998 & 0,0001 \\ 0,0010 & 0,9988 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -0,0024 \\ -0,045 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} 0,0022 \\ 0,0028 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} T_a \\ T_w \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = [S] \quad (3.12)$$

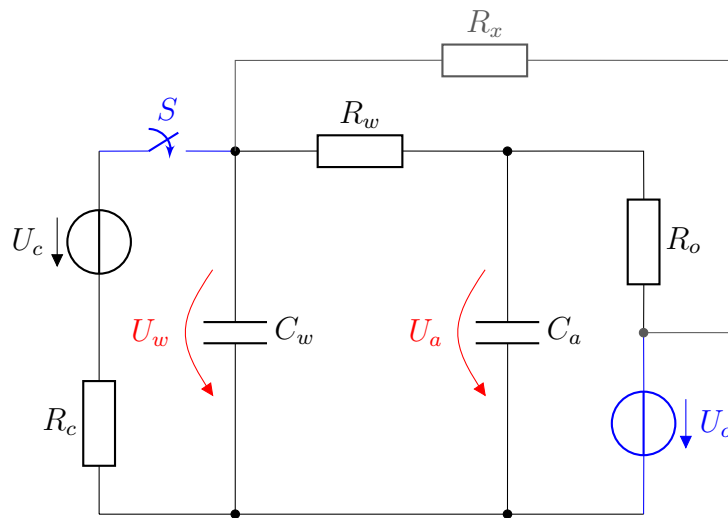
Ezek alapján a PWA rendszer, és ezzel a hűtőgép megfelelő dinamikájának leírása a következő, (3.13) egyenlet alapján írható le.

$$\Sigma_i : \begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \Phi_i \cdot \mathbf{x}_k + \Gamma \cdot \mathbf{u}_k + \mathbf{f} \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}_k \end{cases}, \quad i \in \{on; off\} \quad (3.13)$$

A fent leírtak 2.2. fejezet alapján felírt fizikai modell, és a 2.3. fejezetben szereplő szakaszonként lineáris modell segítségével felírt hűtőgép modelljét mutatja be. A 2.4. fejezet alapján a diszkrétizált modell rendszermátrixai meghatározásra kerültek paraméter becslő eljárással.

3.1.2. Hűtőgép modellezése villamos hálózat analógiájával

A hűtőgép egyszerű dinamikájának köszönhetően működése szemléltethető és felírható egy villamos hálózattal [S2] a megfelelő áramköri elemek megválasztásával, ami segítségével a modellezéshez szükséges egyenletek is meghatározhatóak. Egy ilyen helyettesítő áramkör látható a 3.2. ábrán.



3.2. ábra. Hűtőgép működésének felírása áramköri elemekkel villamos áramkörrel való modellezéshez.

Ilyen módon való helyettesítésnél a feszültségek megfeleltethetők a hőmérsékleteknek, a kondenzátorok a hőkapacitások, az ellenállások a hőszigetelések (hővezetés vagy hőátadás reciproka) valamint a kapcsoló a két üzemállapot közötti kapcsolást teszi lehetővé. Az U_c feszültségérték a hűtött felület stacioner hőmérsékletét jelenti bekapcsolt állapot esetén, ami alá nem képes hűteni folyamatos üzem esetén se a berendezés a kapilláris folyócső miatt.

Az R_c ellenállás a kompresszor és a hűtött felület időállandójához szükséges. Az R_w ellenállás a hűtő belsejében a hűtött felület és a belső légtér közötti hőátadás értékének a reciproka, az R_o ellenállás szemlélteti a hűtőgép hőszigetelését a környezet irányába, valamint az R_x ellenállás a hűtött fal és a környezet közötti hatást jelenti. A két kondenzátor a hőkapacitásokat jelenti, azaz C_w a hűtött felület és a C_a a belső hűtött légtér hőkapacitásának felel meg. Ezeknek a kondenzátoroknak a feszültségei felelnek meg a hűtött felület és a belső légtér hőmérsékletének.

A maradék két áramköri elem a környezeti hőmérsékletet szemléltető U_o feszültségforrás, valamint az üzemállapotkapcsolására szolgáló S kapcsoló. A kapcsoló zárt állapotában a berendezés üzemel, azaz bekapcsolt (*on*) állapotot és nyitott kapcsoló esetén a kikapcsolt (*off*) állapotot jelenti.

Energiatárolókat tartalmazó villamos hálózatok leírásához differenciálegyenletek felírására van szükség, így modellezésükhöz állapottermodell (2.1.1 fejezet) kerül felírásra, ami a (2.2) állapot- és a (2.3) kimeneti egyenletből áll.

Jelen modell esetében az állapot és bemeneti vektor az alábbiak szerint néz ki:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_w \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} U_o \\ S \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Azonban a mátrixok felírásánál itt is figyelembe kell venni, hogy két, egymástól eltérő dinamika van az S kapcsoló állapotától függően:

- bekapcsolt állapotban (*on*): hűtés
- kikapcsolt állapotban (*off*): melegedés

Zárt kapcsoló esetén az állapotátmeneti mátrix és a bemeneti mátrixok az alábbiak:

$$\mathbf{A}_{on} = \begin{bmatrix} -\frac{\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_o}}{C_a} & \frac{\frac{1}{R_w}}{C_a} \\ \frac{\frac{1}{R_w}}{C_w} & -\frac{\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_x}}{C_w} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

$$\mathbf{B}_{on} = \begin{bmatrix} \frac{\frac{1}{R_o}}{C_a} & 0 \\ \frac{\frac{1}{R_x}}{C_w} & \frac{\frac{1}{R_c} \cdot U_c}{C_w} \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Nyitott állapotú kapcsolóval az alábbi mátrixokat kapjuk:

$$\mathbf{A}_{off} = \begin{bmatrix} -\frac{\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_o}}{C_a} & \frac{\frac{1}{R_w}}{C_a} \\ \frac{\frac{1}{R_w}}{C_w} & -\frac{\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_x}}{C_w} \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

$$\mathbf{B}_{off} = \begin{bmatrix} \frac{\frac{1}{R_o}}{C_a} & 0 \\ \frac{\frac{1}{R_x}}{C_w} & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Mind kikapcsolt, mind bekapcsolt állapotban a kimeneti mátrix egy 2×2 -es egységmátrix, mivel a két hőmérséklet a szabályozandó paraméter, a segédmátrix pedig nullmátrix:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

Észrevehető, hogy az itt reprezentált villamos helyettesítőképen alapuló modellek bekapcsolt és kikapcsolt esetre nézve azonosak a 3.1.2. fejezetben bemutatott fizikai modellezési elveken alapuló rendszermodellel az alábbiakat feltételezve:

- A hőkapacitásoknak a megfelelő kondenzátorok kapacitása feleltethető meg: $C \equiv C$
- A hőmérsékleteknek a feszültségértékek a megfelelőjük : $T \equiv U$
- A hővezetéseknek a megfelelő ellenállások reciproka felel meg: $\frac{1}{R} \equiv K$
- A rendszer állapota a kapcsoló állásának felel meg: $S \equiv S$

Az eltérés a [S2] cikkben szereplő modellhez képest a K_x , ami a hűtött fal és a környezet közötti hatást jelenti. Ez a villamos modell esetében az R_x ellenállás behelyezésével a villamos modellben is megjelenik, ami szürke színnel van jelölve.

A fejezetben ismertetett módszerben az érdekesség, hogy egy fizikai rendszert, jelen esetben hűtőszekrényt, a megfelelő villamos alkatrészek segítségével lehet rekonstruálni, és a működésének a leírásához a modellt, a megfelelő helyettesítések elvégzésével, fel lehet írni. Ez lehetőséget ad arra, hogy egy fizikai rendszer más szemszögből legyen megvizsgálva, és az elektronikában használatos összefüggések, mérések segítségével lehessen megvizsgálni a rendszer ekvivalens modelljét.

3.2. Dinamikus villamos berendezések irányításának feltételei

Minden villamos berendezés esetén figyelembe kell venni, hogy a berendezés működtetése közben a meghatározott üzemi korlátok ne legyenek átlépvé. Továbbá egy berendezés üzemeltetése költségekkel jár, még akkor is, ha csak az általa használt villamos energiáról van szó. A szabályozási cél meghatározásánál ezeket figyelembe kell venni, és ezek alapján meghatározni a berendezés megfelelő üzemállapotát. Ezeknek a feltételeknek, korlátoknak a leírását célszerű oly módon megtenni, hogy azt ne csak az előző fejezetben ismertetett hűtőgép modellhez lehessen felhasználni, hanem egyéb, hasonló dinamikával, és így hasonló rendszerleíró modellel rendelkező berendezés esetén is alkalmazható legyen. Ezzel biztosítható, hogy több, akár más dinamikával rendelkező eszközöket is egyszerűen lehessen később szabályozni.

3.2.1. Működési korlátok

Minden villamos eszköz esetén a gyártó a felhasználó rendelkezésére bocsátja a felhasználói kézikönyvet, amiben egyértelműen leírja a berendezés üzemi paramétereit valamint a szabályokat, amiket az elhelyezés és üzemeltetés során be kell tartani. Ezen szabályok be nem tartása esetén a berendezést működtető elektronika nem biztos, hogy a leírt üzemi paramétereket tudja tartani. Ilyen lehet az elhelyezés helyének a hőmérséklete, páratartalma vagy akár szellőzése is.

A szabályozó elektronika és algoritmus tervezése esetén feltételezhető, hogy a felhasználó a leírtakat betartja az elhelyezésnél. Így a szabályozásnál csak azokat a korlátokat, működési kritériumokat szükséges figyelembe venni, amik a berendezés megfelelő üzemeléséhez elvárt értékek, és amiket a felhasználó beállított. Ilyen tipikus érték a hűtő/fűtő berendezéseknél a beállított hőmérséklet tartása egy definiált histerézissel.

Amennyiben a gyártó által biztosított szabályozó elektronika módosítása, kiváltása a cél, úgy az új szabályozónak is figyelembe kell venni a megfelelő működéshez szükséges betartandó korlátokat. Hűtőgép esetén a benne tárolt étel beállított hőmérséklet alatti hőfokon tartása egy ilyen korlát, ami a megfelelő működéshez szükséges, azonban nem lehet 0°C alá hűteni, mivel akkor bizonyos élelmiszerek megfagyhatnak, ami már nem megfelelő működést jelent.

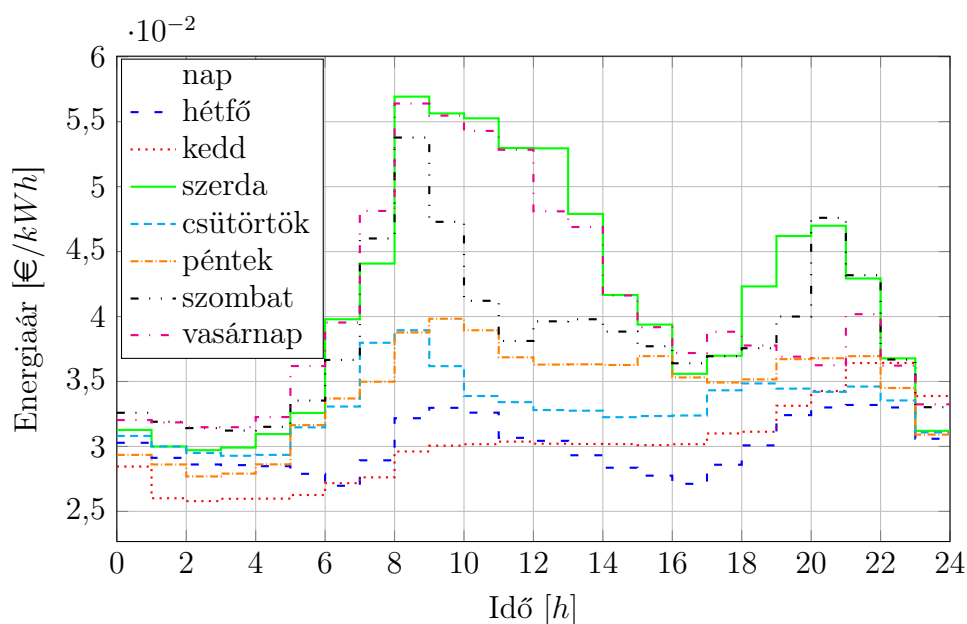
3.2.2. Működési költség

Elektromos berendezés esetén a működéshez szükséges energiát a villamos hálózathoz nyeri az eszköz. Ezt a fogyasztást villanyórakkal mérik, és a szolgáltató számlázza az elfogyasztott energia értékét a fogyasztóknak. Amennyiben a villamos energia egységára (Ft/kWh) állandó a nap folyamán, úgy a villamos berendezés működtetése a nap bármely időszakában azonos költséget jelent. Magyarországi viszonylatban a lakossági fogyasztók számára a villamos energia vételezésére két tarifa áll rendelkezésre, az A1 és az A2 tarifa. A1 tarifa

esetén az energia ára a nap bármely szakában azonos, míg A2 tarifa esetén csúcsidőszakban (napközben) ennél kicsit drágább, völgyidőszakban (éjjel és hétvégén) kicsit olcsóbb. (Fontos említeni, hogy létezik több tarifa is, azonban azoknál megköti a szolgáltató, hogy csak milyen berendezést lehet róla üzemeltetni.)

Az észak európai országokban lehetőség van olyan változó tarifájú csomag használatára, ahol az energiaárat egy napra előre teszik közzé a becsült termelés és fogyasztás figyelembevételével, és óránként változik az egységár [2]. Mikor várhatóan a fogyasztott energia mértéke közel azonos a hálózatra táplált tervezett energiával az egységár magasabb, és mikor a fogyasztás alacsonyabb, mint az erőművek által a hálózatra táplált tervezett energia (tipikusan éjjeli órák) ez az egységár alacsonyabb. Egy ilyen változó energiaárú piac (DAM) változásait mutatja a 3.3. ábra egy teljes heti adatsort használva².

Látható, hogy az energia árában a délelőtti órákban és a kora esti órákban jelentkezik a csúcserték. Ez jól szemlélteti a fogyasztók napi rutinját is, ami egyben függ a villamos energia fogyasztásával, és így az árával is. Az ábrán két nagyobb csúcsidőszak figyelhető meg. Az első az irodai munkahelyek, boltok, iskolák miatt van, amik reggeltől kora délutánig tartanak nyitva. Ezt követi az energia ára is, hiszen ilyenkor nagyobb a fogyasztás. A második, kora esti órákban látható csúcsidőszak, amikor a fogyasztók nagy része már otthon van és használja az elektromos berendezéseit.



3.3. ábra. Energiaárak változása DAM esetén egy hétre.

Ilyen típusú piac esetén már érdemes meggondolni, hogy egyes berendezések mikor üzemelnek, hiszen, ahogy azt az ábra is mutatja, nagy különbségek (majdnem kétszeres) lehetnek egy napon belül is az energia árában. Ez nem csak a szakaszosan üzemeltetett berendezésekre (mosógép, villanytűzhely, mosogatógép) igaz, hanem a folyamatosan üzemelő gépekre is, mint a villanybojler

² forrás: www.nordpoolgroup.com/Market-data1/#/nordic/table

vagy a hűtőszekrény, fagyasztószekrény. Megfelelő ütemezés mellett pénzt lehet spórolni azzal, hogy tovább üzemel a berendezés olcsóbb energiaár mellett. Ez azt jelenti, hogy bojler esetén a szokásosnál melegebb vizet állít elő, hűtőgép esetén pedig jobban lehűti az ételt, így magasabb energiaár mellett csak később kell újra bekapcsolnia a berendezésnek. Ilyen ütemezés esetén tipikusan több energiát fogyasztanak a berendezések, azonban fogyasztói oldalról nézve a költséget nem ez határozza meg, hanem a fogyasztás pillanata és az aktuális energiaár. Viszont, amennyiben az energia árát főként a megújuló energiaforrások termelése és rendelkezésre állása határozza meg, úgy nagyobb fogyasztás is zöldebb energia fogyasztást jelent.

3.2.3. Szabályozási cél

Szabályozás esetén fontos a megfelelő módszer és az elérni kívánt cél kiválasztása. A fogyasztói oldalról nézve egy villamos berendezés szabályozásának célja lehet a már említett működési költség, azaz a villanyszámla minimalizálása. Tehát az elsődleges cél, hogy a berendezés működtetésének ütemezésével minimalizáljuk a működési költséget az alábbiakat figyelembe véve:

- A működési költség a nap folyamán elfogyasztott villamos energia ára.
- Az energia ára óránként változik, két változás között állandó.
- Az energia árát 24 órára előre tudjuk.
- A berendezés szabályozása során az üzemelési korlátok között kell működjön:
 - Elvart működési értékek betartása mellett
 - a gyártó és berendezés által meghatározott korlátok betartása.
- A berendezés környezetre gyakorolt hatása elhanyagolható.
- A bemeneti változó (S) bináris változó (0/1, vagyis *off/on*).
- Az aktuális modell dinamikát a rendszer állapota alapján kell megválasztani.

A szabályozás célja az üzemeltetési költség minimalizálása, amit az alábbi, (3.20) egyenlet ír le változó energiaár függvényében:

$$cost = \sum_{k=0}^{N-1} (p_k \cdot S_k \cdot \tau_s), \quad (3.20)$$

ahol p_k az energia ára (kWh) és S_k az állapot a $k = \tau_s \cdot n$ időpillanatban (τ_s : szimulációs lépték, mintavételi idő). A képlet a költséget $N \cdot \tau_s$ időpillanatig számolja.

3.3. Költségoptimalizálás és ütemezés modell prediktív irányítás használatával

Az üzemeltetési költség minimalizálása egy optimalizálási feladat. A megfelelő rendszermodell és költségfüggvény ismeretében meg lehet határozni olyan bemeneti jelsorozatot egy rendszernél, amellyel a költségfüggvény értéke csökkenthető. A minimális költségfüggvényhez tartozó bemeneti jelsorozat az optimális megoldás. Ezt a módszert nevezzük model prediktív irányításnak (MPC, Model Predictive Control), ami a 2.5. fejezetben került bemutatásra. Ilyen MPC feladatok megoldására alkalmas a Multi-parametric toolbox (MPT) MATLAB környezetben [65].

Az optimalizálási feladatnál a 3.1.1. fejezetben bemutatott hűtőgép modell kerül ütemezésre. Ebben az esetben a szabályozási célt az alábbiak szerint szükséges pontosítani:

- A hűtőgép hőmérsékletei üzem közben az alábbi korlátok között mozoghat:
 - Belső tér hőmérséklete (T_a) $0,1^\circ\text{C}$ és $5,5^\circ\text{C}$ között,
 - a hűtött felület hőmérséklete (T_w) -19°C és $5,5^\circ\text{C}$ között maradjon.
- A hűtőgép állapota (S) 5 percenként változtatható.
- A környezet hőmérséklete (T_o) állandó.

3.3.1. Ütemezés Multi-parametric toolbox segítségével

Az MPT toolboxban az ütemezési probléma megoldásához meg kell adni a rendszermodellt. Természetesen lehetőség van PWA modell megadására, de ekkor definiálni kell a "teret" is, hogy milyen értékek (állapotok, bemenetek) mellett melyik dinamikát használja a számításoknál.

MPC feladatoknál fontos paraméter a horizont (H), azaz az "előrelátás" értéke. Ez az érték azt mondja meg, hogy mennyi időre szimulálja a rendszer viselkedését előre az optimális bemenet kiválasztása céljából. Diszkrét rendszer lévén a horizont mérete a szimulációs lépték (τ_s mintavételezési idő) egészszámmú többszöröse lehet, azaz $H = \tau_s \cdot n_h$.

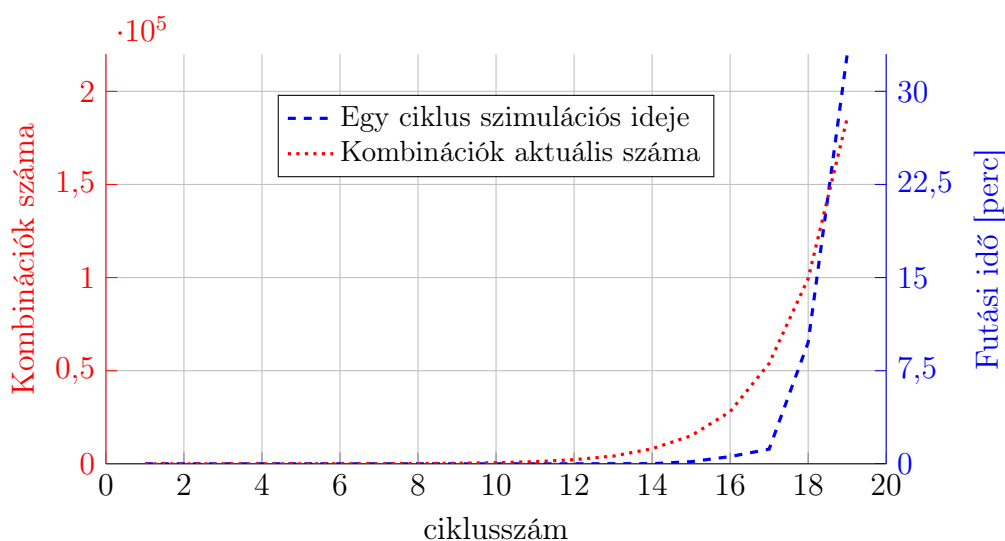
Az MPT megfelelő beállítása után a modell prediktív irányítás algoritmusnál a horizont méretét célszerű változtatni a költségbeli különbségek megfigyelése céljából. Ennél a módszerrel került fel a probléma az MPT esetében, hogy viszonylag kis horizontmérettel is nagy a futási idő, és a horizont növelésével exponenciálisan nő ez az idő. A 3.1. táblázatban láthatóak a horizont méretének a növelésének a hatásai a szimulációs időre nézve. A szimulációnál a szimulációs lépték (τ_s) 300s , azaz 5 perc minden esetben, tehát az $n_h = 12$ esetben 1 óras az előrelátás mértéke és egy teljes napra van tervezve az ütemezés.

Ezekre a futási időkre nagy hatással van az energia árának a függvénye is az adott napra. A 3.4. ábrán egy másik napi energiaárfüggvény használatával futtatott szimulációs adatok láthatóak. A vízszintes tengelyen az iteráció

3.1. táblázat. A horizont méretének hatása a futási időre nézve

Horizont mérete (n_h)	8	10	12	13
Futási idő (perc)	2	8	59	111

száma látható, a bal oldali (**piros**) tengelyen leolvasható a piros pontozott adatsorral az adott iterációban az MPT által számolt lehetséges kombinációk száma, valamint a jobb (**kék**) oldalon a kék szaggatott adatsorhoz az adott iteráció lefuttatásához szükséges ciklus időt.



3.4. ábra. Ciklusok futási ideje és kombinációk száma az egyes iterációkban $n_h = 13$ esetén

A 3.4. ábra jól mutatja, hogy az első 10-12 ciklus alatt a kombinációk száma és ezzel a szimulációs idő is alacsony, azonban az ütemezés előrehaladtával a kombinációszám exponenciálisan nő és ez nagy hatással van a ciklusidőre nézve is. Jól látható, hogy a 19-edik ciklus lefutásához szükséges idő több, mint 30 perc volt a sok lehetséges bemeneti kombináció miatt. Az itt használt áramköltség időfüggvénnyel $n_h = 13$ esetén már nem futott le az MPC belátható időn belül. Ebben az esetben ($\tau_s = 5perc$) a horizont mérete alig több mint 1 óra, ami órás energiaár váltások esetén nem megfelelő érték. Továbbá 5 perces lépték mellett egy teljes nap ütemezéséhez 288 ciklus lefutása szükséges.

Az MPT toolboxban található MPC algoritmus kis horizontméret esetén ($n_h \leq 12$) képes megoldani az ütemezést, azonban a számoláshoz nagyteljesítményű processzor (asztali számítógép, laptop) szükséges, és még így is sok időt vesz igénybe az egyszeri futtatása a modellnek. A cél az lenne, hogy a kész algoritmust futtatni lehessen egy mikrokontrolleren, ami beépíthető a hűtőgépbe, hogy onnan felügyelje és vezérelje annak működését. Mivel a mikrokontrollereknek a számítási kapacitása nagyságrendekkel kisebb, mint egy asztali számítógép processzoráé, így szükséges egy új módszer, algoritmus kidolgozása, amit egy ilyen vezérlőn is lehet futtatni valós időben.

Továbbá az MPT toolboxban nincs lehetőség időfüggő energiaár megadására. Ez a probléma megoldható volt egy időváltozó bevezetésével valamint minden óra intervallumra egy-egy külön *on/off* modell definiálásával, amibe belekerült az aktuális energiaár. Így a szükséges két állapottér modell helyett 24 órás szimulációhoz legalább 48 modell definiálására és kezelésére van szükség, ami naponta változik az új energiaárak miatt. Ez feltehetően tovább lassítja az MPT toolbox algoritmusának működését.

A fejezetben bemutatott *MPT* toolbox nem megfelelő a hűtőszekrény MPC-vel történő irányítása a nagy számítási igénye miatt. A sok lehetséges bemeneti kombináció miatt, és annak exponenciális növekedése következtében a számítás ideje gyorsan nő. Az MPT segítségével megvalósított MPC minden kombinációval tovább számol, ami nem lépi át a definiált korlátokat, azonban ezt a halmazzt lehet csökkenteni heurisztikák segítségével.

3.3.2. Heurisztikus elágazás és korlátozás algoritmus

Megfigyelve az MPT toolbox által kapott eredményeket látható, hogy a problémát az okozza, hogy a kombinációk száma az idő előrehaladásával exponenciálisan nő. Mivel csupán egy bemenete van a rendszernek, ami egy bináris változó, így sejthető, hogy a kombinációk száma minden iterációban duplázódik. Mivel a hőmérsékletekre volt definiálva korlát, így az MPT az ebből a működési tartományból kilépő kombinációkat eldobta, azonban még így is túl sok lehetőséggel kellett számolnia.

A számítás gyorsítására egyik lehetőség, hogy az adott algoritmusnál a működési tartományt szűkítjük, azonban ez befolyással lesz a kapott eredményre is az ütemezésnél. Másik lehetséges megoldás egy olyan algoritmus kidolgozása, ami figyelembe veszi az ilyen egyszerű dinamikai rendszer tulajdonságait, valamint a minimalizálandó energiaköltséget is figyelembeveszi a kombinációk számának csökkentésénél. Egy hűtőgép dinamikája esetén ez azt jelenti, hogy bekapcsolt állapotban a hőmérsékletek csökkennek. Hasonló a helyzet egyéb hűtő berendezésnél, például fagyasztószekrényénél és légkondicionáló berendezésnél. Egy bojler esetében azonban működés közben a vizet melegíti a fűtőszál, azaz a dinamika ellentétes. *A dolgozatban az algoritmus hűtő berendezésre, és ott is a már ismertett hűtőgépre kerül bemutatásra, azonban az ellentétes dinamikájú fűtő berendezésekre is működőképes a szabályokban szereplő kritériumok minimális módosításával. A 5.5. Függelék fejezetben egy elektromos bojler modellje valamint hozzá egy lehetséges megoldás kerül felvételre, hogy az itt szereplő algoritmus módosítás nélkül is alkalmazható legyen rá.*

Mivel a bemenet bináris (*on/off* állapotok) így egyszerűen alkalmazható egy, az elágazás (állapotok duplikálása) és korlátozás (nem megfelelő állapotok törlése) algoritmuson (B&B, Branch and Bound) alapuló ütemezés.

Egy hűtőgép esetén a dinamikából az alábbi állítások fogalmazhatóak meg:

- Bekapcsolt állapotban a hőmérsékletek csökkennek, és az üzemelés költsége (elfogyasztott energia ára) nő
- Kikapcsolt állapotban a hőmérsékletek nőnek, és az üzemelés költsége nem változik

Ezeket figyelembe véve megfogalmazhatóak bizonyos heurisztikák, amik segítségével ciklusonként a kombinációk száma nagymértékben csökkenthető. Az algoritmus és a benne foglalt szabályok leírásában a működési korlátok jelöléséhez a (3.21) egyenlet szerinti forma kerül bevezetésre.

$$\underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x}_k \leq \bar{\mathbf{x}} \quad , \quad (3.21)$$

ahol az alsó és felső korlátot az állapotokra vonatkozóan a (3.22) egyenlet szerint definiáljuk.

$$\underline{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} T_a^{min} \\ T_w^{min} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} T_a^{max} \\ T_w^{max} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Az exponenciális kombinációs szám és ciklusidő elkerülése miatt a kombinációkat minden ciklusban ellenőrizni kell és a megfelelő heurisztikus szabályok szerint a biztosan nem optimális megoldást eredményező kombinációkat törölni a lehetséges megoldások közül. A heurisztikus *B&B* algoritmushoz használt szabályok alapja hűtő esetére a következőképpen fogalmazhatóak meg:

Szabály 1 Bármelyik bemeneti kombináció, amely esetén az \mathbf{x} átlépi a (3.21) szerinti korlátokat nem megengedett.

Szabály 2 Bármilyen bemeneti kombináció, melynél nagyobb költség mellett \mathbf{x} is nagyobb, nem optimális.

Szabály 3 Bármely bemeneti kombináció, ahol az utolsó bemenet $S = 1$ és az adott állapot elérhető kisebb költséggel, nem optimális.

Az első szabály a működési korlátok betartásáért felelős, a második pedig az azonos, vagy akár nagyobb hőmérsékletű állapotok magasabb költségű elérését tiltja. Ez a két szabály könnyen ellenőrizhető és belátható.

A harmadik szabály létjogosultsága belátható, azonban algoritmusba foglalása jelen megfogalmazással nehéz. A minimalizálandó üzemeltetési költség (3.20) függ az energia árának értékétől és a berendezés üzemelésétől. Belátható, hogy konstans energiaár esetén az optimális ütemezés a dinamikájából adódóan az, ha a berendezést mindaddig kikapcsolt állapotban hagyjuk, amíg az át nem lépne a definiált hőmérséklet korlátot. Ekkor bekapcsoljuk, és egy időegységnyt működtetjük, majd újra kikapcsoljuk. Csökkenő energiaár mellett szintén ugyanez a helyzet áll fenn, mivel több ideig tartó üzemeltetést a következő időszakban kisebb költségen lehet megtenni.

Az ütemezés akkor válik bonyolulttá, amikor az energia ára drágul. Ilyenkor

előállhat az a helyzet, hogy olcsóbb ár mellett megéri tovább üzemeltetni, és így a magasabb ár mellett tovább lehet hagyni a rendszert kikapcsolt állapotban. Azonban ebben az esetben sem éri meg folyamatosan üzemeltetni a rendszert. Ilyenkor számolható, hogy a jelenlegi energiaár mellett mennyi ideig érdemes bekapcsolni a berendezést úgy, hogy a következő időszakasz energiaára alapján lehetőség van költség csökkentésre. Ennek számolására az alábbi, (3.23) képlet használható:

$$t_i^p = \left\lceil \frac{p_{i+1}}{p_i} \right\rceil \cdot \tau_s, \quad i = 1, \dots, 24 \quad , \quad (3.23)$$

ahol p_i az energia ára az i -edik órában (időperiódusban), és a $\lceil \cdot \rceil$ a kapott érték felső egészrésze.

A számolt idők az egyes periódusokra felhasználható egy új, energiaárváltozástól függő, alsó hőmérsékletkorlát meghatározására. A hűtő modelljét a felső, T_a^{max} hőmérsékletkorlátból és egy üzem közbeni T_w , hűtött felület hőmérsékletből ($0^\circ\text{C} - (-4^\circ\text{C})$) indítva, t_i^p ideig bekapcsolt ($S = 1$), *on* modell alapján számolva, a kapott hőmérsékletértékek alapján meghatározható az aktuális időszakaszra az \hat{x}_i korlát. Ezt a \hat{x}_i korlátot lehet használni **Szabály 3** kiegészítésére.

Szabály 3' Ha bármely bemeneti kombináció esetén $x < \hat{x}_i$ és ha a következő ciklus hűtés, akkor az aktuális bemeneti kombináció nem optimális.

Fontos, hogy t_i^p , és ezzel együtt az \hat{x}_i értékek számolására egyszer van szükség az új energiaár függvényének definiálása után, ezt nem szükséges ciklusonként újraszámolni. A heurisztikus algoritmus működését bemutató pszeudokódot szemlélteti az Algoritmus 1.

Az algoritmus az alábbiak szerint működik:

Definiálás A rendszer modellje ($\Sigma_{on}, \Sigma_{off}$), kiinduló állapot (\mathbf{x}), korlátok ($\underline{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{x}}$), energiaár függvény (p) és horizont méret (n_h) megadása

Inicializálás A költségvektor ($cost$), bemeneti vektor (U) és állapot vektor (X) inicializálása

Ciklus A ciklus során történik a lehetséges új állapotok létrehozása (elágazás) majd a nem megfelelő állapotok törlése (korlátozás)

Új állapotok számítása A bemeneti vektorokat és állapot vektorokat tartalmazó mátrixok és a költségvektor duplázása. A bemeneti mátrix első feléhez 1 (*on*) a második feléhez 0 (*off*) hozzáfűzése. A modell alapján az új állapotok számítása. A bemenet és az árfüggvény alapján a költségvektor számítása.

Állapotok számának csökkentése A definiált szabályok alapján a biztosan nem optimális megoldáshoz vezető sorok törlése.

Optimális megoldás kiválasztása A minimális üzemeltetési költséghez tartozó bemeneti sorozat kiválasztása.

Algorithmus 1 Heurisztikus ütemező algoritmus

procedure HEURISTIC B&B

Input:

$\Sigma \leftarrow \Sigma_{on}, \Sigma_{off}$

\mathbf{x} actual state

$\underline{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}$ bound

$\hat{\mathbf{x}}$ bound (Rule 3)

p electricity prices

$n_h \leftarrow$ horizon size

Initialization:

$cost$ empty column vector

U, X empty matrices

for $i = 0 : 1 : n_h$ **do**

branch:

$$U = \left[\begin{array}{c|c} U & \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \end{matrix} \\ \hline U & \begin{matrix} \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} \end{array} \right], \quad X = \left[\begin{array}{c} X \\ X \end{array} \right], \quad cost = \left[\begin{array}{c} cost \\ cost \end{array} \right]$$

for $k = 1 : \text{rows}(U)$ **do**

$X_{k,i+1} = \Sigma(X_{k,i}, U_{k,i})$

update $cost_k$

bound (Rule 1):

if $X_{k,i+1} \notin [\underline{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}]$ **then**

delete row $X_{k,\cdot}, U_{k,\cdot}$ and $cost_k$

end if

bound (Rule 3):

if $X_{k,i+1} < \hat{\mathbf{x}}_k$ and $U_{k,i+1} = 1$ **then**

delete row $X_{k,\cdot}, U_{k,\cdot}$ and $cost_k$

end if

end for

bound (Rule 2):

for $k, l = 1 : \text{rows}(U), k \neq l$ **do**

if $X_{k,i+1} > X_{l,i+1}$ and $cost_k > cost_l$ **then**

delete row $X_{k,\cdot}, U_{k,\cdot}, cost_k$

else

if $X_{l,i+1} > X_{k,i+1}$ and $cost_l > cost_k$ **then**

delete row $X_{l,\cdot}, U_{l,\cdot}, cost_l$

end if

end if

end for

end for

optimal solution:

minimal value of $cost = cost_{k_{opt}}$

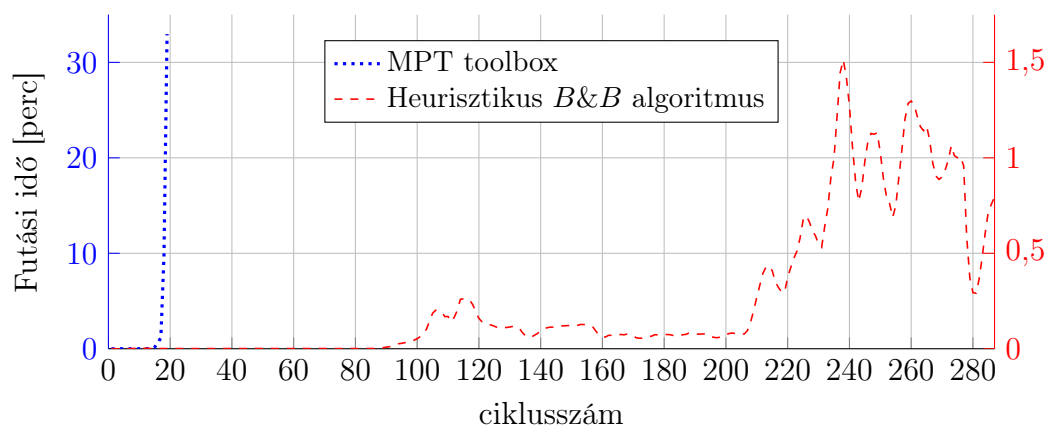
Minimizing sequence $U_{k_{opt},\cdot}$

end procedure

Az Algoritmus 1 több, abban nem részletezett műveletet is tartalmaz. Ilyen például az $update\ cost_k$, ami az aktuális bemenet és villamos energiaár alapján frissíti az addig fogyasztott energia árát ($cost_k = cost_k + U_{k,i} \cdot p_{k,i}$). A heurisztika alapján a biztosan nem optimális megoldáshoz vezető bemeneti kombinációt a **delete row** $X_{k,}$ sor írja le, ami törli a k -adik sor összes elemét ($. \in [0; i]$). A $cost_{k_{opt}}$ függvény az n_h lépés utáni $cost_k$ vektor minimumát adja vissza ($\min\{cost_k\}$), majd a **Minimizing sequence** $U_{k_{opt},}$ függvény az ehhez tartozó bemeneti kombináció(ka)t.

A heurisztikus MPC algoritmus kiindulási állapotnak az aktuálisan mért hőmérsékleteket állítja be. Minden iterációban duplázza az aktuális állapotokat és bemeneti kombinációkat, majd az egyik felét bekapcsolt ($S = 1$), másik felét kikapcsolt ($S = 0$) bemenettel egészíti ki és modell alapján számolja az így kapott állapotokat (hőmérsékleteket). Következő iteráció előtt az ismertett szabályok alapján törli a nem optimális megoldáshoz vezető lehetőségeket. A lépéseket a definiált H horizont értékéből számított $n_h = H/\tau_s$ cikluson keresztül ismétli, majd a kapott lehetőségek közül kiválasztja a minimális költséggel rendelkező bemeneti kombinációt, és a bemeneti vektor S értékének első eleme kerül a bemenetre.

A heurisztikus ütemező MPC algoritmus eredményességét a 3.5. ábra szemlélteti.



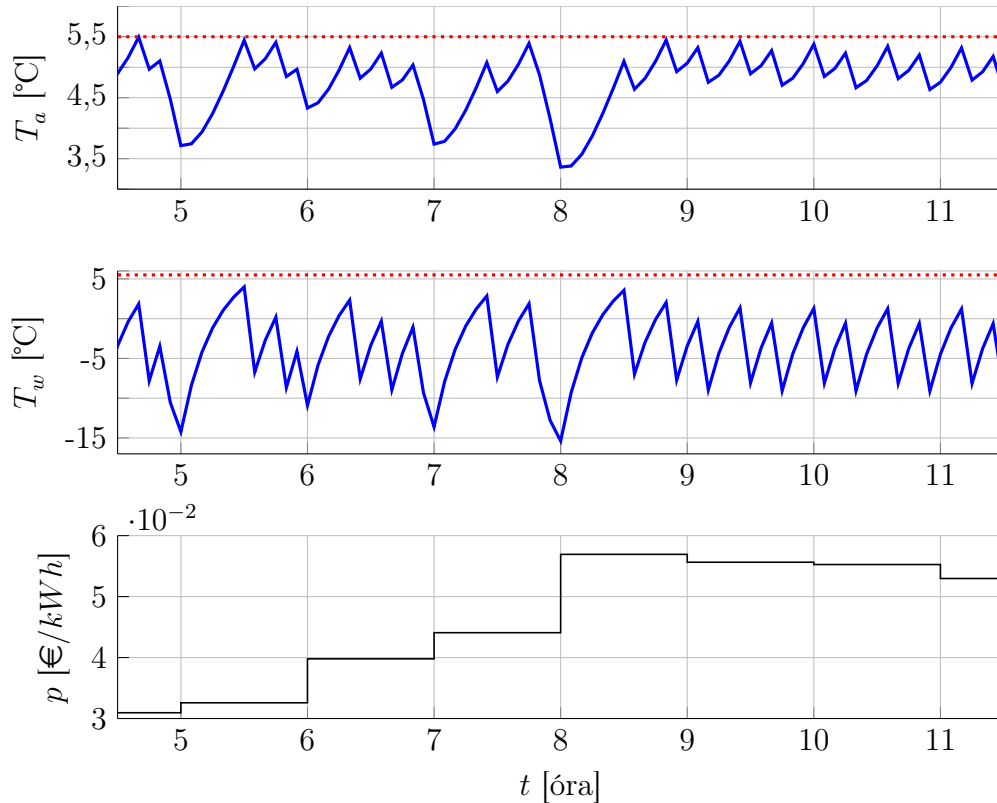
3.5. ábra. Ciklusok futási ideje egyes iterációkban MPT toolbox (**kék pontozott**) és saját heurisztikus $B\&B$ (**piros szaggatott**) algoritmus esetén

A két algoritmust összehasonlító ábrán jól látszódik, hogy amíg MPT toolbox használatával már a 20-adik ciklus fél óránál nagyobb ciklusidővel rendelkezik, addig a heurisztikus algoritmus ciklusidejének maximuma a 240-edik ciklus környékén van, és csupán 1,5 perc. Belátható, hogy egy megfelelő heurisztikákkal ellátott algoritmus sokkal hatékonyabb működésre képes.

Hűtőgép ütemezése heurisztikus MPC algoritmussal - Esettanulmány

Mint ahogy az már említésre került, az ütemezésnek emelkedő energiaár mellett van nagyobb értelme, hiszen csak ezen a tartományon lehet az olcsóbb

túlhűtéssel energiát tárolni és ezzel csökkenteni az üzemelési költséget. Ez a működés látható a 3.6. ábrán az identifikált rendszerrel szimulált adatokon.



3.6. ábra. A T_a és T_w hőmérsékletek és az óránkénti villamos energia ár a heurisztikus MPC algoritmus alkalmazásával

Jól kivehető, hogy az energiaár növekedése esetén (8 óráig) egész óránál az ütemező tovább hűti a rendszert, és csökkenő árak mellett csak akkor kapcsol be, amikor átlépne a felső korlátot a hőmérséklet (**piros pontozott** vonal).

A heurisztikus MPC ütemező algoritmus első próbatétele a teljes napos horizonttal ($n_h = 288$) futtatott ütemezés volt, ami az MPT toolbox használata esetén nem adna reális időn belül eredményt. A kapott szimulációs időket a 3.2. táblázat foglalja össze egy teljes hetes energiaárfüggvény felhasználásával. Fontos megjegyezni, hogy egy teljes napos ütemezéshez az algoritmusnak $\tau_s = 5\text{ perc}$ esetén 288 alkalommal kell lefutnia, és minden futás után, csak a minimális költséggel rendelkező bemeneti kombináció első bemenetét (*on/off*) használja fel mint következő bemenet. Tehát az átlagos ciklusidő a kapott idő 288-ad része. Összehasonlításként szerepelnek a táblázatban 4 órás, $n_h = 48$ horizontmérettel futtatott eredmények is.

Látható, hogy a horizont méretének csökkentése kis mértékben hatással van a minimalizálandó költségre, azonban az algoritmus futási ideje nagymértékben függ az előrelátás mértékétől. A 24 órás horizontmérettel számolt ütemezés optimális költséget eredményez, de a valós idejű futtatás miatt érdemes kisebb horizontméretet alkalmazni. Valamint a táblázatban szereplő értékek azt is

3.2. táblázat. Algoritmus futási ideje 24 órás és 4 órás horizont esetén

nap	$H = 24$ óra ($n_h = 288$)		$H = 4$ óra ($n_h = 48$)		százalékos eltérés	
	költség [€/kW]	idő [perc]	költség [€/kW]	idő [perc]	költség [%]	idő [%]
hétfő	0,20235	75	0,20394	16,9	+0,79	-77,47
kedd	0,20200	1013,2	0,20650	78,9	+2,23	-92,21
szerda	0,27748	234	0,28111	48,8	+1,31	-79,18
csütörtök	0,22255	116,1	0,22739	38,3	+2,17	-67,04
péntek	0,23127	267,7	0,23618	32,3	+2,12	-87,93
szombat	0,25819	222,3	0,26281	45,1	+1,79	-79,70
vasárnap	0,27286	100,4	0,27488	18,7	+0,74	-81,34

jól szemléltetik, hogy az ütemezés ideje nagymértékben függ az adott nap energiaárffüggvény menetétől, árváltozásaitól (3.3. ábra).

A szerdai energiaárffüggvény esetén az ütemezési időt különböző horizontméretek esetén a 3.3. táblázat foglalja össze. Látható, hogy az optimálishoz ($n_h = 288$) képest kicsi horizont alkalmazása esetén is a közel optimális költséget ér el az algoritmus az ütemezés során. Az eltérés 1%-os az optimálishoz képest költségben, viszont az ütemezéshez szükséges futási idő töredéke (kiseb mint 2%) az optimális megoldás számításának.

3.3. táblázat. Működési költségek és ütemezéshez szükséges idő különböző horizontméretek (H) mellett

H	24 óra	1 óra	2 óra	3 óra	4 óra
költség [€/kW]	0,278	0,281	0,281	0,281	0,281
t_{opt}^{day} [perc]	234	0,10	0,45	1,59	3,71

Összehasonlítva az MPT toolbox által használt MPC algoritmus és a saját heurisztikus MPC ütemező futási eredményein egyértelműen látszódik a különbség (3.4. táblázat). Mivel az MPT nem képes valós időn belül ütemezni nagy horizontméret esetén, így az összehasonlításhoz $H = 1$ óra ($n_h = 12$) horizont került beállításra. Itt is számottevő a különbség az ütemezési időben, valamint MPT esetén a költség is magasabb, mint heurisztikus B&B MPC esetén.

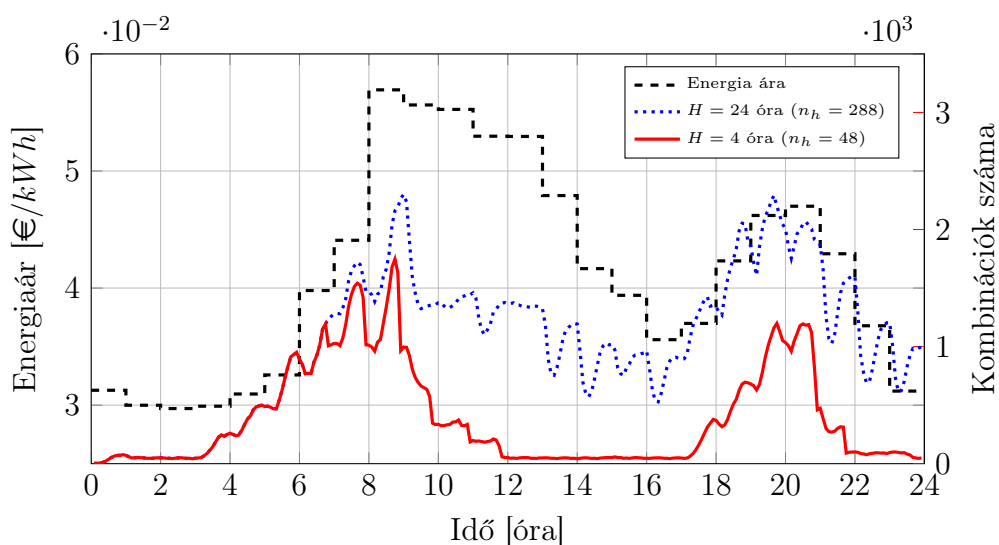
Az ütemezés futási idejének eltérését a horizont miatti kombinációs számok eltérése okozza a ciklusokban. Ezt szemlélteti a 3.7. ábra. Jól látszódik, hogy mindkét horizontméret (24 óra és 4 óra) esetén az első 7 órában a kombiná-

3.3. KÖLTSÉGOPTIMALIZÁLÁS ÉS ÜTEMEZÉS MODELL PREDIKTÍV IRÁNYÍTÁS HASZNÁLATÁVAL

3.4. táblázat. MPT és heurisztikus B&B ütemező algoritmusok futási idejének és a kapott költségek összehasonlítása $H = 1$ óra esetén egy napra

	MPT	heurisztikus B&B	
t_{opt}^{day} [perc]	139,22	0,10	-99,93%
költség [€/kW]	0,3003	0,2814	-6,29%

ciós számok azonosak, és különbség csak ezután látható. Ennek oka az, hogy az energia ára csak a harmadik órától emelkedik, addig csökken, azaz az optimális irányítás mindkét esetben a már említett, csak szükség esetén való hűtés. 4 órás horizont esetén a hetedik órától, ahol már 4 órája monoton nő az energia ára, érvényesül a horizont hatása, azaz bizonyos kombinációk törlésre kerülnek a lehetséges bemenetek közül. A nagy különbség az árfüggvény monoton csökkenése esetén, azaz a nyolcadik óra után figyelhető meg. Ezen a tartományon a kisebb horizont esetén nagymértékben csökken a kombinációk száma minden lépésben, majd 4 óra elteltével, 12 órától a kombinációs szám visszaáll egy minimális értékre mindaddig, amíg az energiaár újra nőni nem kezd 19 órától. 24 órás horizont esetén is csökken a kombinációk száma ezen a tartományon, azonban nem olyan drasztikusan, mint a kisebb horizontméret esetén.



3.7. ábra. A kombinációk számának alakulása az ütemezés folyamán 24 órás és 4 órás horizontméret esetén a szerdai energiaárak mellett

A 3.4 táblázatban szereplő adatokon látható, hogy a javasolt heurisztikus MPC ütemező algoritlussal nagyságrendekkel gyorsabb ütemezés érhető el, mint az MPT toolboxban szereplő MPC-vel jobb költség mellett. A 3.2 táblázat alapján számolható, hogy a különböző napokra 24 és 4 órás horizontmérettel az átlagos futási idő. Mivel minden esetben egy teljes napra történt az ütemezés, ami 5 perces léptékkel 288 ciklust jelent, így a legtöbb számolást igénylő nap (kedd) esetén 24 órás előrelátással 3,5 *perc*, míg 4 órás előrelátás

esetén 0,27 *perc* az átlagos futási ideje egy ciklusnak. A 24 órás előrelátás azonban nem reális érték, erre az optimális költség megállapításához volt szükség. 4 órás horizontméret mellett elmondható, hogy az algoritmus képes valós időben ütemezni. Azonban a 3.7 ábra jól szemlélteti, hogy az ütemezés során a kombinációk számának alakulására, és ezzel a ciklus futási időkre is hatással van a horizont mérete, valamint a napi energiaár függvényének a monotonitása is.

A heurisztikus MPC ütemező algoritmus eredményei összehasonlításra kerültek több ütemező algoritmussal a [66] cikkben, ahol költségoptimalizálásban jól szerepelt. A 3.5. táblázat a [66] cikkben szereplő üzemeltetési költség megtakarítás összehasonlításának eredményeit mutatja több ütemező algoritmus alapján. Az első OC oszlop szemlélteti az ismertetett heurisztikus MPC ütemező algoritmus működésének eredményességét a többi algoritmussal szemben.

3.5. táblázat. Üzemeltetési költség megtakarítás különböző algoritmusok alapján [66]

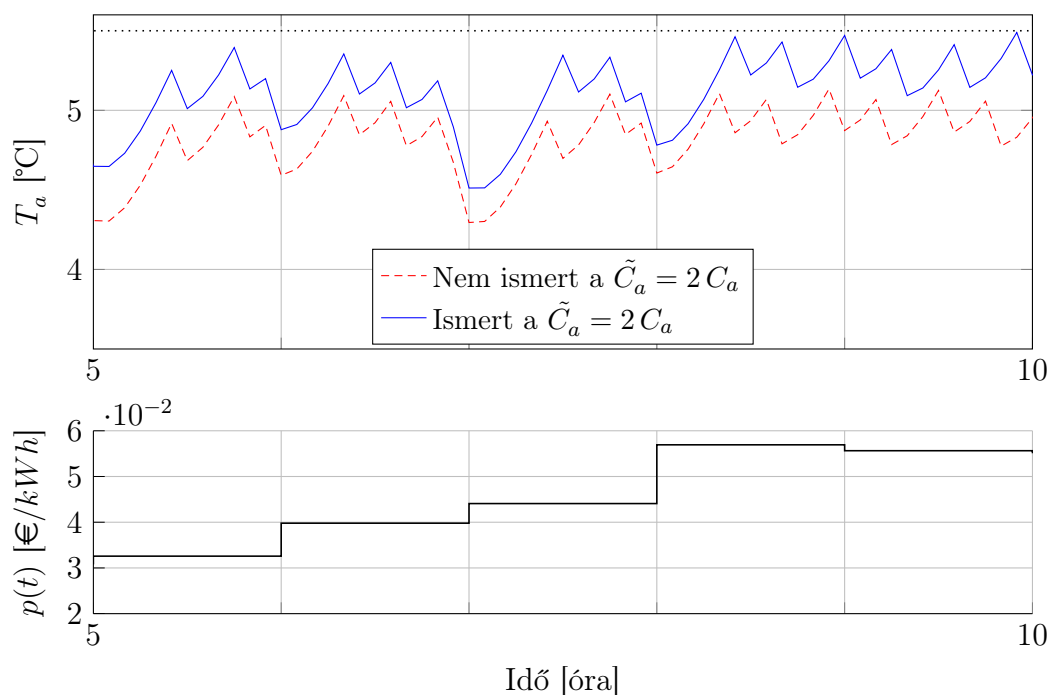
Költség megtakarítás [%]	OC ³	CC-N ⁴	HMPC ⁵	HMPC-EPS ⁶	HMPC-N ⁷	HMPC-W ⁸
hétfő	9,6	6,8	9,3	7,5	8,9	8,8
kedd	13,7	10,4	13,7	13,7	12,7	11,8
szerda	8,8	7,3	8,4	7,1	8,5	7,2
csütörtök	7,9	6,4	7,5	5,8	7,3	5,8
péntek	8,9	8,7	8,7	7,7	8,4	5,4
szombat	9,0	8,9	8,6	9,0	8,7	6,7
vasárnap	9,1	9,0	7,1	6,9	8,5	6,0
teljes hétre	9,7	8,1	9,3	8,4	9,1	7,7

A fejezetben bemutatásra került egy heurisztikus MPC algoritmus hűtőgép ütemezéséhez a költségoptimalis üzemelés eléréséhez óránként változó energiaárak mellett. A prezentált algoritmus módosítás nélkül használható hasonló dinamikájú rendszerek (pl. fagyasztóláda, légkondicionáló berendezés) ütemezésére és a működési költség csökkentésére, de a szabályok minimális módosításával ellentétes dinamikával rendelkező rendszer (pl. villany bojler) költségoptimalis ütemezésére is alkalmas. A rendszerek működési elvén alapuló heurisztikáknak köszönhetően az MPT toolbox ütemezéséhez viszonyítva egy gyorsabb és jobb költség minimalizálást elérő algoritmust sikerült implementálni a probléma megoldására. A futási eredményeken megvizsgáltam, hogy az algoritmus futási sebességére és az ajánlott ütemezés költségére milyen hatással van az előrelátás, horizont mérete.

³ Optimal Control ⁴ Conventional Control ⁵ Heuristic Model Predictive Controller
⁶ HMPC with Enhanced Power Shift ⁷ HMPC with Narrow temperature range ⁸ HMPC with Wide temperature range

3.3.3. Adaptív heurisztikus algoritmus

Egy hűtőgép működése közben a benne található étel és ital mennyisége változik, hiszen folyamatosan fogy illetve bevásárláskor újra bekerül. Ez a változás azzal jár, hogy a hűtőgép belső terének hőkapacitása (C_a) üzem közben változik, ami hatására a rendszert leíró modell paraméterei is változnak. Az ismertett heurisztikus MPC egy adott hőkapacitás esetén képes megfelelően működni. Annak megváltozása esetén az ütemezés nem fogja a költségoptimalis megoldást eredményezni. Ezt a problémát már felveti a [S1] cikk, és a [S3] egy lehetséges megoldását mutatja be. A 3.8. ábra szemlélteti az eltérést az ütemezésben, amikor a belső hőkapacitás kétszerese az üres hűtőgépeznek. A rendszer aktuális hőkapacitására a \tilde{C}_a jelölést használom. **Kékkel** az az eset látható, mikor az MPC modellje is ezzel a hőkapacitással számol, a **piros** szaggatott vonal pedig azt az esetet mutatja, mikor az eredeti, egyszeres hőkapacitással számol a heurisztikus MPC ütemező.



3.8. ábra. A rendszer aktuális \tilde{C}_a hőkapacitás érték ismeretének a hatása a heurisztikus MPC algoritmus működésére nézve $H = 2$ óra esetén

A 3.8. ábra jól szemléltet, hogy abban az esetben, ha a rendszer hőkapacitását nem ismeri az MPC az algoritmus akkor is megfelelően irányítja a hűtőgépet és nem engedi a felső korlát fölé a hőmérsékletet. Ennek oka, hogy a rendszer dinamikája növekvő hőkapacitás esetén lomhább lesz, azaz lassabban változnak a hőmérsékletek. Az így kapott irányítás nem lesz költségoptimalis, de a működés szempontjából a definiált hőmérséklet korlátokat nem fogja átlépni a rendszer. A minimális hőkapacitás üres hűtőszekrény esetén van, tehát az üres berendezés rendszer paramétereinek használatával a heurisztikus MPC alkalmazható.

Természetesen megváltozott hőkapacitás esetén nem csak a ütemezés változik meg a minimális üzemeltetési költséghez, hanem ennek a költségnek a nagysága is. A 3.6. táblázat szemlélteti az optimális ($n_h = 288$, $H = 24$ óra) ütemezés esetén a költséget, valamint $H = 2$ óra horizont esetén több \tilde{C}_a érték mellett az MPC futtatása alapján kapott költségeket, ha a rendszer ismeri az aktuális hőkapacitás értékét, valamint abban az esetben, ha a rendszermodell az eredeti hőkapacitással számol. A táblázatban relatív hőkapacitások szerepelnek, ahol az egység az eredeti rendszer C_a hőkapacitása.

3.6. táblázat. A rendszer \tilde{C}_a hőkapacitás változásának a hatása az üzemeltetési költségre [$\text{€}/kW$]-ban $H = 2$ óra esetén

\tilde{C}_a	C_a	$1,5 C_a$	$2 C_a$	$3 C_a$	$5 C_a$
optimális költség	0,2787	0,2731	0,2716	0,2680	0,2649
ismert a \tilde{C}_a	0,2817	0,2748	0,2722	0,2683	0,2654
nem ismert a \tilde{C}_a	0,2817	0,2817	0,2817	0,2837	0,2833

Ahhoz, hogy az ütemező algoritmus megfelelően működjön szükség van a hőkapacitás változásának detektálására, valamint megváltozás esetén a rendszer paramétereiben ezt a hatást becsülni és figyelembe venni. A megváltozott hőkapacitás detektálásához elég a mért és a modell alapján becsült hőmérsékleteket összehasonlítani. Erre használható a (3.24) képlet, ahol a $\hat{T}_a(k)$ a mért hőmérséklet és $T_a(\tilde{C}_a, k)$ a modell alapján számolt hőmérséklet az aktuális hőkapacitással.

$$\Delta T_a(\tilde{C}_a) = \hat{T}_a(k) - T_a(\tilde{C}_a, k) \quad (3.24)$$

Amennyiben a $\Delta T_a(\tilde{C}_a)$ nem nulla, úgy a valós és a rendszermodellben használt hőkapacitásban eltérés van. Egy maximális eltérési küszöbértéket (ΔT) definiálva az ennél nagyobb eltérés esetén a rendszer hőkapacitását a modellben szükséges újraszámolni. Mivel a hőkapacitás mérése bonyolult művelet, így a rendelkezésre álló információk alapján az aktuális hőkapacitás becslése szükséges.

Az (3.4)-(3.7) mátrixok alapján felírható paraméteresen a C_a paramétertől függő állapot- és bemeneti mátrix. Ezek a paraméteres mátrixok szerepelnek a (3.25) formulákon.

$$\mathbf{A}(C_a) = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{C_a} & \frac{a_{12}}{C_a} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}(C_a) = \begin{bmatrix} \frac{b_{11}}{C_a} & \frac{b_{12}}{C_a} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

A Matlabban lehetőség van a folytonos idejű rendszermodell alapján beépített függvény használatával meghatározni a diszkrét idejű modell mátrixait. Azonban ezt minden becslés és hőkapacitás változás után meg kell tenni, ami

nagy számítási igényt jelent, főleg egy mikrokontrolleren futtatott a végleges algoritmus esetén.

A (3.25) mátrixok segítségével meghatározott diszkrét idejű paraméteres modell állapotmátrixát, a (2.25) összefüggést alkalmazva, a (3.26) paraméteres mátrix szemlélteti, ahol az s_1 és s_2 értékek C_a -tól függő értékek, amiket a (3.27) képlet alapján lehet számolni.

$$\begin{aligned} \Phi(C_a) &= e^{\mathbf{A}(C_a) \cdot \tau_s} = \\ &= \begin{bmatrix} \frac{-s_1 + a_{22}}{s_2 - s_1} e^{s_1 \tau_s} + \frac{s_2 - a_{22}}{s_2 - s_1} e^{s_2 \tau_s} & \frac{-a_{12}}{(s_2 - s_1) C_a} e^{s_1 \tau_s} + \frac{a_{12}}{(s_2 - s_1) C_a} e^{s_2 \tau_s} \\ \frac{-a_{21}}{(s_2 - s_1)} e^{s_1 \tau_s} + \frac{a_{21}}{(s_2 - s_1)} e^{s_2 \tau_s} & \frac{-s_1 + a_{11}}{(s_2 - s_1) C_a} e^{s_1 \tau_s} + \frac{s_2 - a_{11}}{(s_2 - s_1) C_a} e^{s_2 \tau_s} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$s_{1,2} = \frac{a_{11} + C_a a_{22} \pm \sqrt{(a_{11} + C_a a_{22})^2 - 4C_a(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}}{2C_a} \quad (3.27)$$

A (3.26) felhasználásával a C_a paraméteres bemeneti mátrix a (3.28) képlettel számolható ki.

$$\Gamma(C_a) = \mathbf{A}(C_a)^{-1}(\Phi(C_a) - \mathbf{I})\mathbf{B}(C_a), \quad (3.28)$$

A megváltozott hőkapacitás becslése a rendszermodell segítségével történik intervallum felezéses módszer alkalmazásával. Az aktuális hőkapacitás (\tilde{C}_a) az intervallum egyik végpontja, a másik végpontja pedig a $\tilde{C}_a \pm L \cdot C_a^{min}$, ahol az L az intervallum tetszőlegesen választható hossza és C_a^{min} a hűtőgép minimális hőkapacitása. Az intervallum másik végének a pozícióját ($L \cdot C_a^{min}$ előjelét) a hőmérséklet eltérése az előjele és a rendszer dinamikája alapján lehet kiválasztani. Ebben az esetben számolható a (3.29) képlettel, hogy az L intervallumon ε hibával maximálisan mennyi iterációra van szükség a becsléshez.

$$N_{C_a} = \log_2 \left(\frac{L \cdot C_a^{min}}{\varepsilon \cdot C_a^{min}} \right) = \log_2 \left(\frac{L}{\varepsilon} \right). \quad (3.29)$$

Megvizsgálva a hőkapacitás becslése során a Matlab beépített folytonos idejűből diszkrét idejű állapottér modellbe konvertáló függvényének futási idejét és a paraméteresen felírt (3.26) és (3.28) diszkrét idejű rendszermátrixokat használva a diszkrét idejű állapottér modell mátrixok számítására a 3.7. táblázatban szereplő konvertálási idők lettek mérve. Látható, hogy a két módszer között két nagyságrendbeli eltérés van a futási időben a parametrikus modellel való számolás javára.

A MPC algoritmus az adaptivitás, C_a becslés miatt kismértékben változik. A 41. oldalon található Algoritmus 1 részében a rendszermátrixok a (3.26) és (3.28) paraméteres mátrixok mind a bekapcsolt (Σ_{on}), mind a kikapcsolt

3.7. táblázat. Aktuális C_a becslésének ideje intervallum felezés használatával

	Matlab függvénnyel	parametrikus modellel
futási idő [ms]	37-40	0,35-0,4

(Σ_{off}) rendszerdinamika esetén. Azonban minden MPC ütemezési lépés előtt szükség van a hőkapacitás megváltozásának vizsgálatára, és szükség esetén annak újra becslésére. Ehhez a heurisztikus MPC algoritmust az Algoritmus 2 résszel szükséges kiegészíteni.

Algoritmus 2 Adaptív MPC ütemező algoritmus

procedure ADAPTIVE MPC SCHEDULING METHOD

Input:

τ_s sampling time

$P = [T_c, K_w, K_o, K_c, C_a, C_w, K_x, C_{a_{min}}]$ system parameters

Scheduling method:

for (in each τ_s time step) **do**

measure the temperatures of the refrigerator X_{mes}

if $X_{mes} - X_{sim} > \Delta T$ **then**

RUN C_a estimation

end if

RUN Heuristic B&B MPC Procedure with C_a (Algorithm 1)

end for

end procedure

Az Algoritmus 2 minden ciklus elején ellenőrzi a mért és az előző ciklusban számolt értékeket, és amennyiben eltérés jelentkezik újra becsli a C_a értékét (C_a estimation). Az ellenőrzés és esetleges becslés után az Algoritmus 1 futtatásával az algoritmus minimalizálja a működési költséget. A C_a estimation függvény működése:

Intervallum végpontjának meghatározása Az intervallum egyik végpontja a modellben szereplő aktuális hőkapacitás (C_a). A mért és számolt hőmérsékletek különbségéből a dinamika alapján meghatározható, hogy az aktuális hőkapacitás nagyobb vagy kisebb. Nagyobb esetén a $[C_a; C_a + L]$, kisebb esetén pedig a $[C_a - L; C_a]$ intervallumon indul a keresés, ahol L értéke egy meghatározott maximális megváltozás.

Új hőkapacitás meghatározása Ciklikusan intervallum felezése

Intervallum felezése Az aktuális intervallum felezőpontjával a modell futtatása. Dinamika alapján meghatározza, hogy a rendszer hőkapacitása nagyobb, vagy kisebb a felezőponthoz képest. Intervallum megfelelő végpontjának módosítása.

Intervallum méretének ellenőrzése Leállási feltétel ellenőrzése az intervallum mérete alapján.

Ütemező futtatása Az Algoritmus 1 futtatása a kapott értékkel

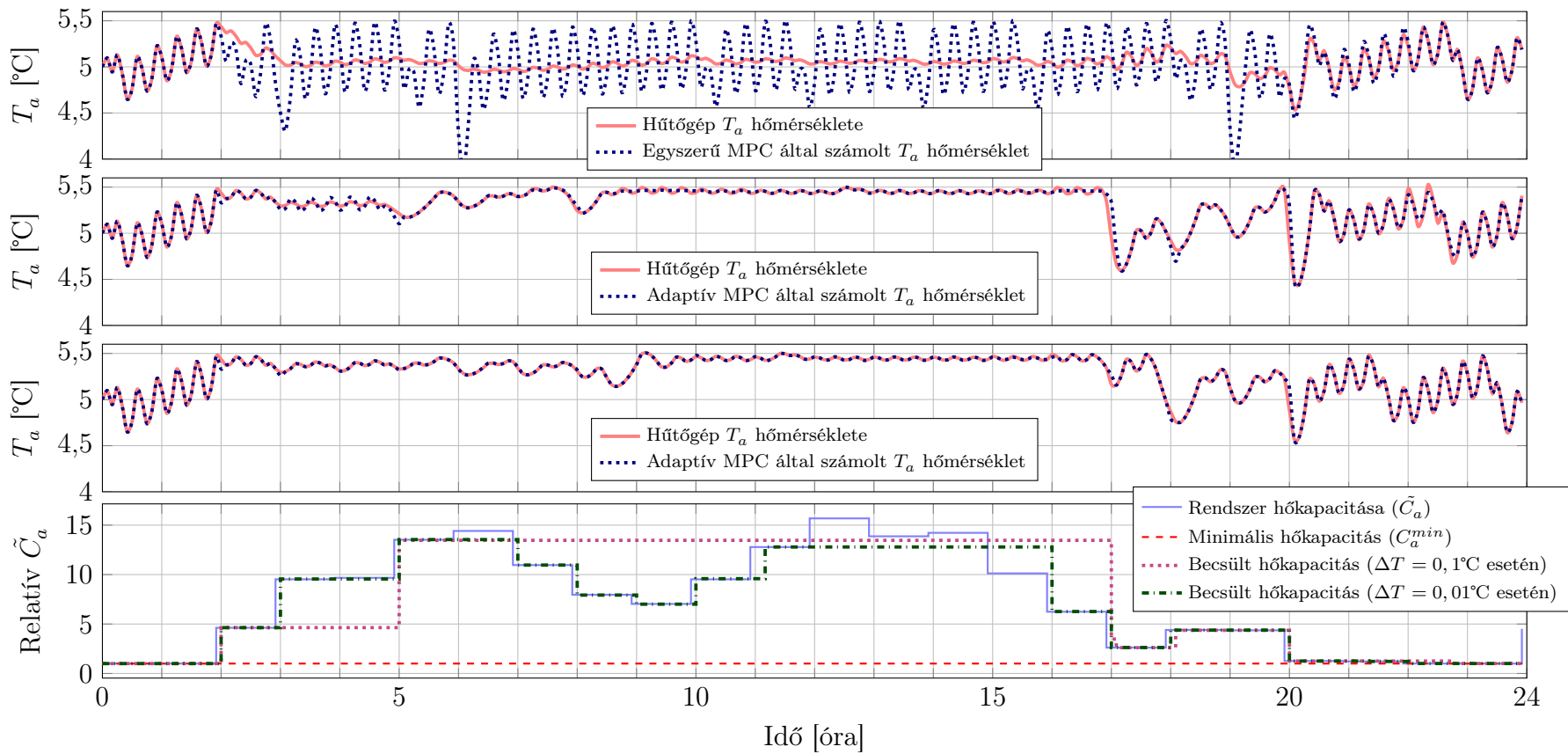
Hűtőgép ütemezése adaptív heurisztikus MPC algoritmussal - Eset-tanulmány

Az előzőekben ismertetett adaptív heurisztikus MPC ütemező algoritmus eredményeit és az egyszerű heurisztikus algoritmussal való összehasonlítását szemlélteti a 3.9. ábra. A felső három diagram a rendszer és az ütemező működését mutatja be különböző MPC paraméterezés esetén, az utolsó pedig a hőkapacitásokat ábrázolja a különböző esetekben. A szimulációk során a hőkapacitás egysége a minimális, azaz az üres hűtőszekrény hőkapacitása (C_a^{min}), és a maximális hőkapacitás ($20 \cdot C_a^{min}$) között változhat.

Az első ábrázolás a nem adaptív MPC ütemezését és annak hatását szemlélteti a hűtőgép belső hőmérsékletére nézve. Ebben az esetben az MPC a minimális C_a^{min} értékkel számol. Látható, hogy a számolt hőmérsékletértékekben (**kék pontozott**) nagy változások vannak, de a hőmérséklet a felső hőmérsékletkorlátot nem lépi át. Ennek az irányításnak a hatására a változó hőkapacitás miatt a rendszer hőmérséklete a **piros folytonos** vonallal ábrázolt értékek szerint alakul. Egyértelműen látszik, hogy a hőkapacitás növekedése miatt a belső tér hőmérsékletének hullámossága csökken, valamint értéke a megengedett felső korlát alatt van. Ebből következően a hűtőgép az üzemi körülményeket betartva üzemel, azonban a működtetési költség az eltérő hőkapacitás miatt több mint az optimális irányítás esetén.

A második és harmadik ábrázolásokon az adaptív MPC működése látható $\Delta T = 0,1^\circ\text{C}$ (második) és $\Delta T = 0,01^\circ\text{C}$ (harmadik) esetben. Mind a két ütemezés esetén nagy eltérés az előzőhöz képest, hogy nagy C_a esetén az ütemező a felső határhoz közel tudja tartani a hőmérsékletet, így kisebb üzemelési költséget tud elérni. Az ütemezésben látható minimális eltérés, azonban a hőkapacitás becslésénél, azaz az MPC során használt hőkapacitás értékében nagyobb eltérés látható. Ennek oka, hogy $0,1^\circ\text{C}$ eltérés esetén 3-5 óra között az eltérés a hőkapacitásban nem okoz különbséget a dinamikában, hogy annak újrabecslése szükséges legyen. Azonban $0,01^\circ\text{C}$ használatával sűrűbben becsülte meg a becslő algoritmus a rendszer aktuális hőkapacitását.

Ez a fejezet a hűtőszekrény tartalmának változása miatt megváltozó hőkapacitás érték hatásaival foglalkozott a javasolt heurisztikus MPC működésére nézve. A modell megfelelő ismeretében javasoltam egy lehetséges módszer az aktuális hőkapacitás megbecslésére és ezzel az időszakosan változó rendszert is lehet ütemezni az adaptív heurisztikus MPC segítségével.



3.9. ábra. MPC irányított rendszerek valós (folytonos) és ütemezésnél számolt (pontozott) T_a hőmérsékletei különböző ütemező-paraméterezés esetén. Felső: nem adaptív heurisztikus MPC; Második: adaptív MPC $0,1^\circ\text{C}$ hőmérséklet toleranciával; Harmadik: adaptív MPC $0,01^\circ\text{C}$ hőmérséklet toleranciával; Alsó: a rendszer aktuális (folytonos) hőkapacitása (\tilde{C}_a), minimum (szaggatott) hőkapacitás (C_a^{min}) és becsült (pontozott - $\Delta T = 0,1^\circ\text{C}$, pontvonal - $\Delta T = 0,01^\circ\text{C}$ toleranciával) hőkapacitások

3.3.4. Adaptív heurisztikus MPC alkalmazása fagyasztóládára

Egy fagyasztóláda és egy hűtőszekrény működése és dinamikája nem tér el, különbség csupán a működési értékekben és korlátokban van. Így a hűtőszekrényre készült adaptív heurisztikus modell prediktív irányításon alapuló ütemező algoritmus alkalmazható egy fagyasztóláda ütemezésének tervezésére is [S4].

A modell felírásához első lépés a fagyasztóláda paramétereinek meghatározására. Ehhez egy fagyasztóláda hőmérsékletei lettek mérve a környezeti hőmérséklettel és az üzemállapot (S) változóval együtt. A mérés egy dsPIC33 típusú mikrokontroller segítségével lett elvégezve. A hőmérsékletek Pt100-as hőmérő szenzorokkal, az üzemállapot pedig a fagyasztóláda által felvett áram alapján lettek mérve. A mérés 1 s-os mintavételezéssel történt.

A paraméterek becsléséhez a (3.4)-(3.7) paraméteres modell került felhasználásra, valamint a már említett `fminsearchbnd` MATLAB függvény segítségével lettek meghatározva a rendszer paraméterei. A paraméterbecslés során használt minimalizálandó négyzetes költségfüggvény a (3.9) alapján a (3.30) diszkrét idejű alakban írható fel.

$$V(\Theta) = w_a \sum_{k=1}^n \left(T_a(k) - \hat{T}_a(k) \right)^2 + w_w \sum_{k=1}^n \left(T_w(k) - \hat{T}_w(k) \right)^2 \quad (3.30)$$

A költségfüggvény a paraméterek meghatározásánál a fagyasztóládán mért $T_a(t)$ belső tér és $T_w(t)$ hűtött oldalfal és az aktuális paraméterekkel rendelkező modell alapján számolt ($\hat{T}_a(t)$ és $\hat{T}_w(t)$) hőmérsékletek különbségétől függ. A két hőmérséklet hatását a $V(\Theta)$ függvényre a w_a és w_w értékek segítségével súlyozható. A paraméterbecslés során a $w_a = 3$ és $w_w = 1$ súlyozás került beállításra, így a működés szempontjából fontosabb belső tér hőmérsékletét nagyobb arányban vette figyelembe az algoritmus a paraméterek (Θ) megállapításánál.

A paraméterbecslés során kapott rendszer paramétereket a 3.8. táblázat tartalmazza. A becsült paraméterekkel modell alapján számolt és a mért hőmérsékleteket a 3.10. ábra szemlélteti.

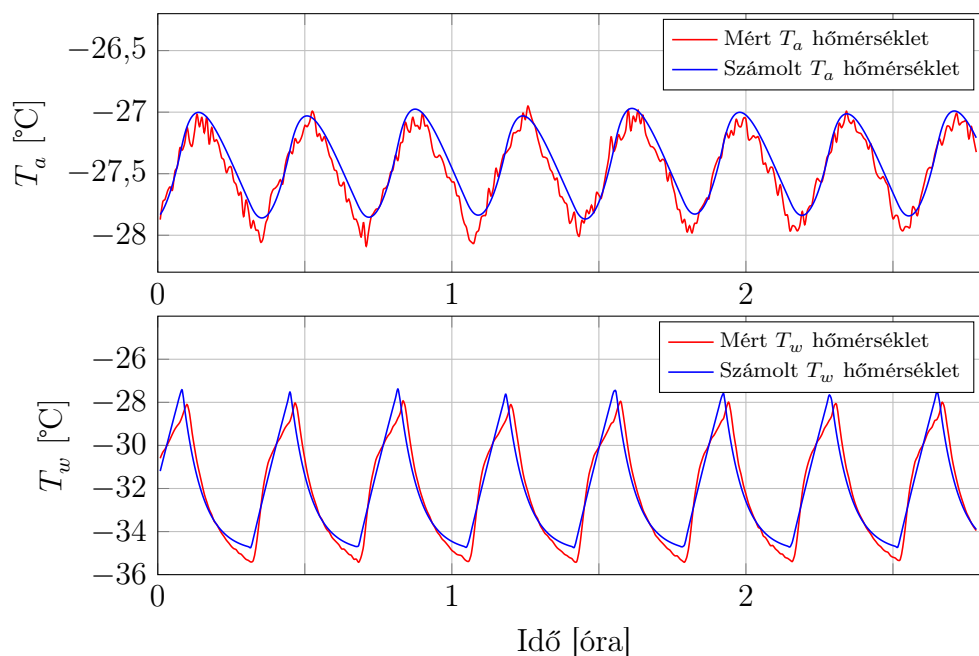
Az eltérések a mért és a modellezett hőmérsékletek között tized fokos nagyságrendbe esnek. Ezt az eltérést több tényező is befolyásolja:

- Hőmérő szenzorok elhelyezése
 - T_a : Hűtött falhoz közel vagy belső tér közepe felé
 - T_w : Hűtött falon két hűtőcső menet között, vagy pont rajta mérünk
- A fagyasztóláda ventillátoros légkeringetése
- Mérő eszköz A/D konvertere

Az azonban elmondható, hogy a kapott eredmények a hőmérsékleteket üzem közben megfelelően közelítik a becslés során kapott paraméterek használatával.

3.8. táblázat. Becsült fagyasztólada paraméterek

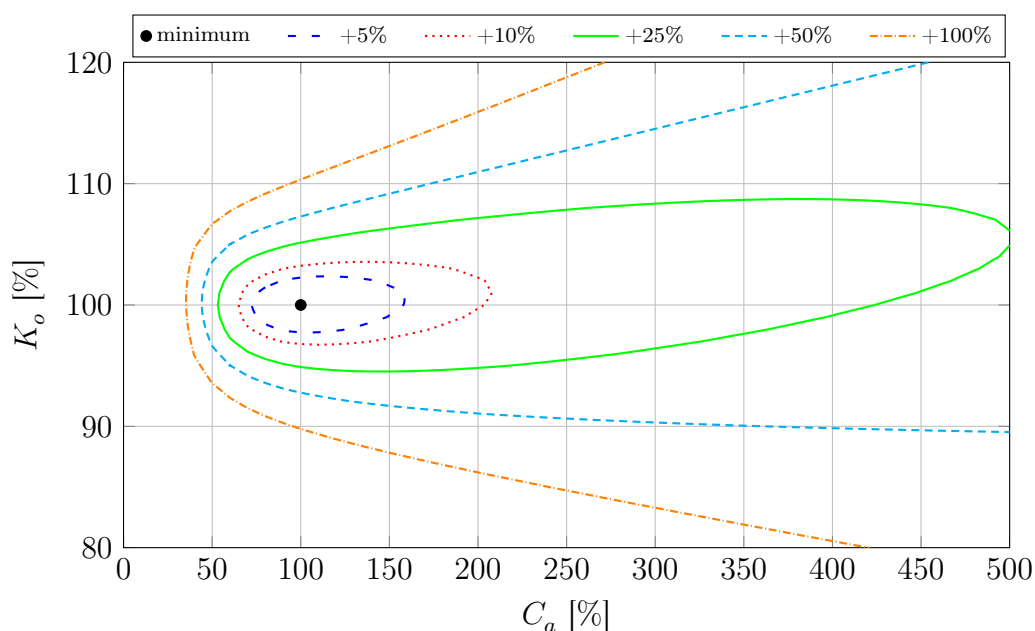
Paraméter	Jelölés	Becsült érték	Mértékegység
Hűtő közeg hőmérséklete	T_c	-43,6	$^{\circ}\text{C}$
Belső tér és hűtött fal közötti hőátadás	K_w	0,0241	$\text{kW}/^{\circ}\text{C}$
Belső tér és környezet közötti hőátadás	K_o	0,0021	$\text{kW}/^{\circ}\text{C}$
Hűtött fal és környezet közötti hőátadás	K_x	0,0186	$\text{kW}/^{\circ}\text{C}$
Hűtött fal és hűtő közeg közötti hőátadás	K_c	0,173	$\text{kW}/^{\circ}\text{C}$
Belső tér hőkapacitása	C_a	40,1	$\text{kJ}/^{\circ}\text{C}$
Hűtött fal hőkapacitása	C_w	71,4	$\text{kJ}/^{\circ}\text{C}$



3.10. ábra. Mért és modell által számolt hőmérsékletek a 3.8 táblázatban szereplő paraméterek használatával

A paraméter becslés jóságának, bizonytalanságának az ellenőrzéséhez használható a konfidencia tartományok vizsgálata. Ezeknek a görbéknek az elemzésével megállapítható, hogy a becslőt paraméterek milyen hatással vannak egymásra, azok független változók-e a becslés során. Két, egymástól függő paraméter becslése bizonytalan értékeket adhat a becslés során, azonban az egymástól független paramétereket pontosan meg lehet becsülni.

A K_o és C_a paraméterekre vonatkozó konfidenciatartományokat szemlélteti a 3.11. ábra.



3.11. ábra. A K_o és C_a paraméterekre vonatkozó szintgörbék

A tengelyeken a 100% értékek jelölik a paraméterbecslés során kapott értékeket, és ezekhez az értékekhez képest az eltérések szerepelnek a tengelyeken százalékosan. A berajzolt szintgörbék a minimalizálásnál is használt költségfüggvény eltérését jelölik százalékosan (+5%, +10%, +25%, +50%, +100%) a minimumhoz képest. Az ábra alapján a két paraméter nem mutat függőséget egymáshoz viszonyítva.

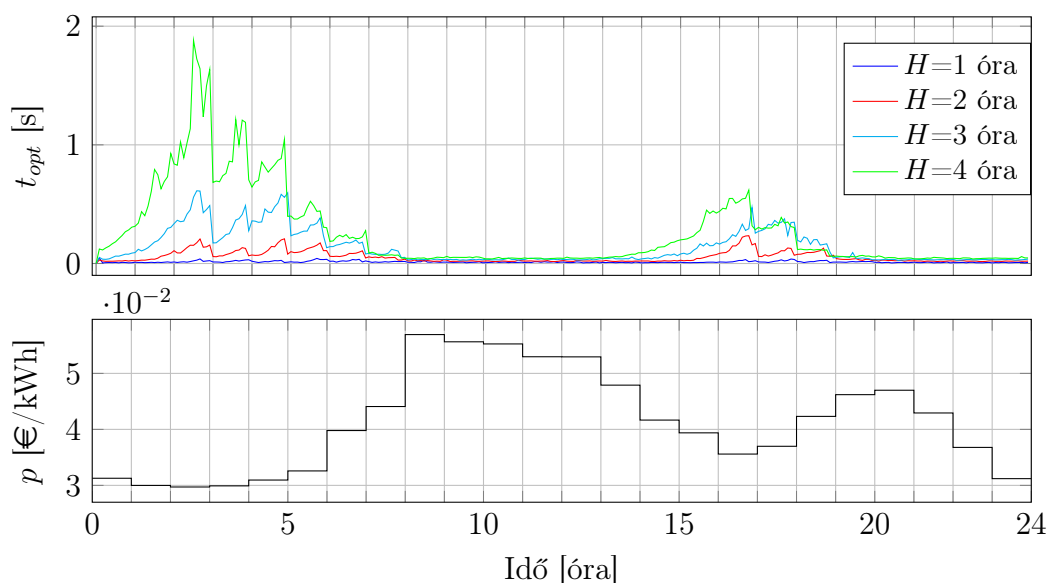
Az összehasonlítás minden paraméterpárra megtörtént, és azok alapján a paraméterbecslés során kapott értékek pontossága megfelelő.

Adaptív heurisztikus MPC alkalmazása fagyasztóládára - Esettanulmány

A paraméter becslés során kapott paraméterek használatával a fagyasztóláda diszkrét idejű paraméteres (C_a) szakaszonként lineáris modelljét elkészítettem. A 3.3.3. fejezetben ismertetett, hűtőgépre készült modell prediktív irányításon alapuló ütemező algoritmusban az értékeket a fagyasztóláda működési korlátaira módosítottam, hogy tesztelhető legyen ezen, a hasonló dinamikával rendelkező rendszeren is működőképes-e az algoritmus egyéb módosítás nélkül. A következő részben a fagyasztóládán futtatott heurisztikus ütemező algoritmus eredményeit prezentálom.

A 3.12. ábra az előrelátás nagyságának a hatását szemlélteti az egyes ciklusidőkre. Látható, hogy az egy ciklus számítási ideje csökkenő energiaár mellett alacsony és közel állandó, azonban növekvő energiaárak esetén nagymértékben megnőhet a számításához szükséges idő.

A 3.9. táblázat adatai mutatják, hogy a teljes napra futtatott ütemezés mennyi időt igényel különböző horizontméretek alkalmazása mellett. Továbbá az utolsó sorban látható, hogy a napon belül hányszor emelkedik az energia ára



3.12. ábra. A H horizont méretének hatása az egyes ciklusok futási idejére

($p_{t+1} > p_t$) az órás változások során. Egyértelműen látható, hogy az energia árának monotonitása nagy hatással van az ütemezés idejére, hiszen a nap folyamán minél többször van növekedés az árban, annál tovább tart a számítás. A horizont méretének nagysága is befolyásolja ezt, hiszen az ütemezés során, az aktuális nap végén a következő napi árakat is figyelembe veszi az algoritmus az első H órára, ami a táblázatban nem szerepel a változó horizontméret miatt. Ebből kifolyólag tapasztalható, hogy a szerdai és a csütörtöki napoknál az idő hol az egyik napnál, hol a másik napnál lett több a horizont méretétől függően.

3.9. táblázat. Szimulációs idő másodpercben a hét napjaira különböző horizontméret használata mellett, valamint az utolsó sorban, hogy az adott napon hányszor emelkedik az energia ára

Horizont méret (H)	Hétfő	Kedd	Szerda	Csütörtök	Péntek	Szombat	Vasárnap
1 óra	7	10	7	7	8	8	7
2 óra	30	47	35	32	36	36	26
4 óra	130	327	168	153	180	187	113
8 óra	427	2 675	926	731	1 051	914	642
12 óra	1 023	6 900	1 882	1 381	1 881	2 377	1 213
24 óra	3 507	26 504	4 743	4 843	5 099	6 637	2 540
A nap folyamán az energiaár növekedésének száma							
	9	17	11	11	14	12	9

A 3.10. táblázat mutatja az üzemeltetési költségeket különböző horizont-méreteket használva ($\tau_s = 300\text{ s}$), valamint az eredeti, hiszterézises szabályozást alkalmazva 1 másodperces és 1 perces léptékkel üres fagyasztóra ($\tilde{C}_a = C_a^{min}$) futtatva. Látható, hogy 5 perces szimulációs léptékkel az adaptív heurisztikus MPC ütemezés átlagosan az 1 másodperces normál szabályozáshoz képest 4%-kal, az 1 perces normál szabályozáshoz képest 5%-kal jobb költséget képes elérni. Ez a megtakarítás kevésnek tűnik, azonban nem üres fagyasztóláda, azaz nagyobb belső hőkapacitás esetén ez a megtakarítás nő.

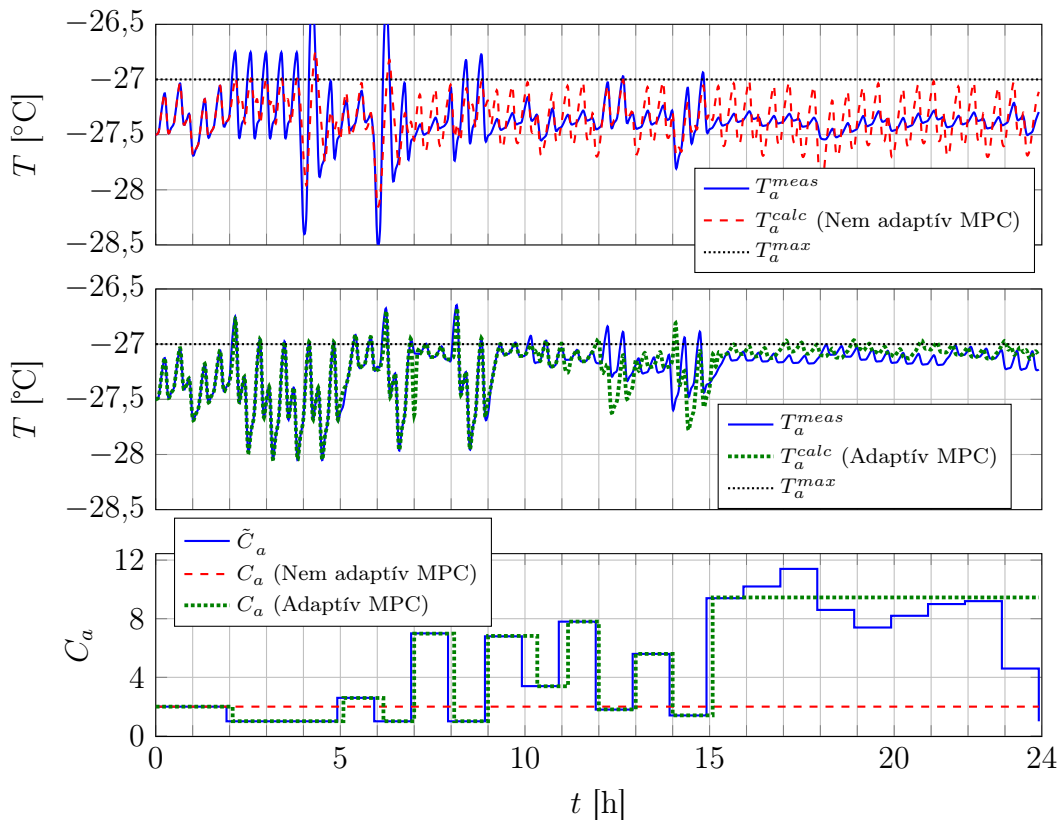
3.10. táblázat. Költségek heurisztikus MPC és normál hiszterézises szabályozás esetén állandó $C_a = C_a^{min}$ mellett

Horizont méret (H)	Hétfő	Kedd	Szerda	Csütörtök	Péntek	Szombat	Vasárnap
1 óra	0,442	0,445	0,607	0,487	0,509	0,565	0,597
2 óra	0,440	0,442	0,604	0,484	0,503	0,563	0,595
4 óra	0,442	0,445	0,607	0,487	0,506	0,566	0,595
8 óra	0,438	0,437	0,602	0,482	0,501	0,561	0,593
12 óra	0,440	0,442	0,604	0,485	0,503	0,563	0,595
24 óra	0,440	0,445	0,604	0,485	0,503	0,563	0,595
Hiszterézises (normál) szabályozás							
$\tau_s = 1\text{ s}$	0,457	0,457	0,628	0,503	0,522	0,584	0,618
$\tau_s = 60\text{ s}$	0,464	0,464	0,638	0,510	0,531	0,594	0,627

A 3.13. ábra szemlélteti a nem adaptív és az adaptív heurisztikus MPC működése közötti különbséget. Az alsó diagram mutatja a fagyasztó aktuális (\tilde{C}_a) hőkapacitását valamint az MPC algoritmus által használt értékeket. A felső két részabrában a mért (T_a^{meas}) és modell alapján \tilde{C}_a hőkapacitás használatával számolható tényleges hőmérsékletek valamint az ütemező algoritmus által számolt hőmérsékletek a benne tárolt hőkapacitással.

A legfelső mutatja, hogy nem adaptív rendszer esetén hogyan viselkedik az MPC ütemező algoritmus, ha a hőkapacitás nem a leggyorsabb dinamikához tartozó C_a^{min} , hanem annál minimálisan nagyobb érték. Ilyenkor, ha a valós hőkapacitás kisebb mint ez az érték, a rendszer hőmérséklete (**folytonos**) átlépheti a T_a^{max} felső hőmérsékletkorlátot (**pontozott**) pedig az MPC által becsült hőmérsékletérték (**szaggatott**) ez alatt marad.

A középsőn látható, hogy az adaptív esetben is előfordul, hogy átlépi a fagyasztó hőmérséklete (**pontozott**) a beállított korlátot. Ezeknek a túllendüléseknek az oka, hogy változott (csökkent) a hőkapacitás, ezzel gyorsabb lett a rendszer dinamikája és az MPC még az előző hőkapacitás értékkel számolta az ütemezést. Az alsó diagramon látható, hogy az adaptív verzió egy-két ciklus után követi a hőkapacitás megváltozását, amennyiben az eltérés miatt a hőmérsékletekben nagyobb a különbség, mint a definiált korlát.



3.13. ábra. Felső: nem adaptív algoritmus működése változó \tilde{C}_a hőkapacitás mellett; Középső: adaptív algoritmus működése; Alsó: Az aktuális (**folytonos**) \tilde{C}_a hőkapacitás, valamint a nem adaptív algoritmus (**szaggatott**) által használt C_a és az adaptív algoritmus (**pontozott**) által számolt és használt C_a hőkapacitás

3.11. táblázat. Napi üzemeltetési költségek [€/kW]-ban $H = 2$ óra esetén nem adaptív és adaptív MPC használatával.

Algoritmus	Hétfő	Kedd	Szerda	Csütörtök	Péntek	Szombat	Vasárnap
Nem adaptív	0,440	0,442	0,604	0,484	0,503	0,563	0,595
Adaptív	0,430	0,430	0,589	0,474	0,491	0,550	0,580

A 3.11. táblázat mutatja, hogy az ütemezés során a költségben milyen eltérések jelentkeznek a nem adaptív és az adaptív heurisztikus modell prediktív irányításon alapuló ütemező algoritmusok használatával. Átlagosan 3% körüli költségcsökkenést eredményez az adaptív verzió használata az ütemezéshez.

A fejezetben bemutatásra került egy fagyasztóláda modelljének implementálása a már bemutatott hűtőgép modell és a fagyasztóládán végzett mérési adatok felhasználásával. Az így kapott modellen alkalmaztam a hűtőgépre készített adaptív heurisztikus MPC algoritmust és a kapott eredmények alapján összehasonlítottam a működési költségeket a nem adaptív heurisztikus ütemező verzióval, valamint a hagyományos, hiszterézises (on-off) szabályozással. Az adatok alapján elmondható, hogy a hagyományos szabályozáshoz képest a heurisztikus MPC üres fagyasztóláda esetén 4 – 5%-os költségcsökkenést eredményez. Változó hőkapacitás esetén az adaptív verzió ezt a költséget képes még jobban csökkenteni.

3.4. Összefoglalás

A 3. fejezetben az egyszerű dinamikával rendelkező rendszerek model prediktív irányításán alapuló heurisztikus ütemező algoritmust ismertettem. A 3.1. fejezetben két javasolt módszert is bemutattam egy hűtőszekrény dinamikájának és modelljének felírásához. Először fizikai modellen alapuló egyenletek felírásával (3.1.1. fejezet), majd villamos hálózat segítségével (3.1.2. fejezet) történt egy hűtőszekrény egyszerű állapotter modelljének a felírása. Az így kapott rendszermatrixok értékeinek meghatározása mérési adatsorok és paraméterbecslés segítségével megtörtént.

A 3.2. fejezetben röviden ismertettem egy hűtőszekrény elvárt üzemelés közbeni működési feltételei és korlátai, amiket a szabályozás, ütemezés során be kell tartani. Ezek figyelembe vételével a 3.3. fejezetben prezentáltam a megvalósított modellhez szóba jöhető ütemezési megoldásokat. A Matlabhoz letölthető MPT toolbox MPC algoritmus nem tudja teljesíteni az elvárásokat a prezentált hűtőgép modellre (3.3.1. fejezet), mivel a definiált működési korlátok és az óránként változó energiaárak figyelembevételével a futási idő túl nagy.

A 3.3.2. fejezetben bemutatott és kifejttet saját, heurisztikákon alapuló, megvalósított és javasolt heurisztikus modell prediktív irányításon alapuló ütemező algoritmus nagyságrendekkel gyorsabb futásra képes mint az előzőekben vizsgált MPT toolbox MPC algoritmus. Az algoritmus működését igazolom a fejezetben ábrákkal és táblázatokkal szemléltetett futási eredményekkel.

A 3.3.3. fejezet az ismertetett heurisztikus MPC algoritmusom adaptív kiterjesztésével foglalkozik, hogy a hűtőszekrény üzem közben megváltozott belső tartalma, hőkapacitása esetén is megfelelő optimális ütemezést javasoljon az algoritmus.

Az utolsó, 3.3.4. fejezetben a korábban ismertetett adaptív heurisztikus ütemező algoritmusom került alkalmazásra egy, mérések alapján becsült paraméterű fagyasztóláda modelljére, és az így kapott eredményeim kerültek összehasonlításra, bemutatásra.

Kétoldalas nyomtatás miatt üres oldal

4. fejezet

Napenergiából származó villamos energia becslése időjáráselőrejelzés alapján

Manapság a környezetvédelem egyre nagyobb szerepet kap a globális felmelegedés hatásai miatt. Emiatt a megújuló energiaforrások egyre fontosabb szerepet kapnak a villamos energia termelésben globálisan. A megújuló energiaforrások a következő két csoportra oszthatóak:

Gyorsan megújuló energiaforrások Ezekre az energiaforrásokra mondható, hogy bizonyos értelemben kimeríthetetlenek annak előfordulása és jellege szerint. Azaz szinte azonnal újra termelődnek. Ilyen erőforrások:

- napenergia,
- szélenergia,
- vízenergia,
- geotermikus energia.

Lassan megújuló energiaforrások Ezek az energiaforrások is rövid, emberi mértékben nézve belátható időn belül újra termelődnek, azonban ehhez több idő kell mint az előző energiaforrások esetén. Ilyen tipikusan a növényeken alapuló energiaforrások:

- fa,
- biomassza,
- bio üzemanyagok.

Hazánkban is rohamosan nőtt az elmúlt években a megújuló energiából származó energiatermelés, főként a napenergia terén. Magyarország naperőműveinek kapacitását mutatja a 4.1. táblázat évenként az IRENA (International Renewable Energy Agency) 2019-es statisztikái alapján ¹.

¹ forrás: <https://www.irena.org>

4. NAPENERGIÁBÓL SZÁRMAZÓ VILLAMOS ENERGIA BECSLÉSE IDŐJÁRÁSELŐREJELZÉS ALAPJÁN

4.1. táblázat. Magyarország naperőműveinek teljesítménye MW-ban 2007-től az IRENA statisztikái alapján

év	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Teljesítmény [MW]	0	1	1	2	4	12	35	77	168	225	344	665

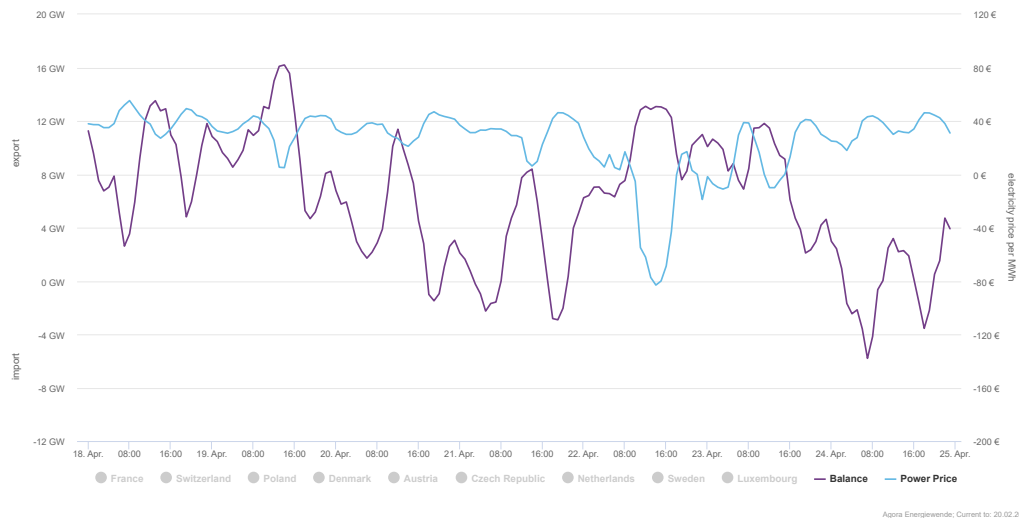
A megújuló energiaforrások egy részének a nagy hátránya a hagyományos erőművekkel szemben, hogy időjárásfüggő, és így nehezen szabályozható és tervezhető. Ilyen energiaforrások főként a nap- és szélenergia, hiszen éjjel nem süt a nap, szélcsendben pedig nem forog a szélkerék. Az egyik megoldás a megtermelt többletenergia eltárolása és mikor nem áll rendelkezésre elég megújuló energia az eltárolt energiával lehet pótolni. Ennek megvalósításához azonban nagykapacitású energiatárolókat szükséges kiépíteni, amik nagy helyet foglalnak, költségesek, és folyamatos karbantartást igényelnek. Másik lehetőség a hagyományos erőművek irányítása, hogy a megújuló energiaforrásból kieső szükséges energiát megtermeljék, így megtartva a villamos hálózat energiaegyensúlyát.

Azonban minden erőműnek megvan a maga szabályozási sebessége, tehát sok esetben a gyors teljesítmény változásokat (pl naperőművek esetén felhőátvonulás) nem tudják követni. Lehetőség van az összeurópai villamos hálózaton a többletenergiát energiatőzsdére vinni és ott eladni, valamint az energiahiányt határon túlon megtermelt energiával kiváltani. Azonban a kereslet-kínálat szabályai szerint nagy túltermelés esetén az energia ára csökken, egyes esetekben akár negatív tartományba is mehet. Ilyen esetben előfordulhat, hogy az energia elfogyasztásáért többet fizetnek, mint amennyibe kerül egyéb esetben az energia. Ez látható a 4.1. ábrán, ahol közel kétszeres árat ért el az energia ára negatívban, mint amennyibe előtte és utána került². *A Függelék fejezetben a 4.1. ábra teljes oldalas méretben, valamint ezzel kapcsolatos további ábrák is megtekinthetők.*

Azaz a nem szabályozható, időjárásfüggő megújuló energiaforrások esetében fontos lenne, hogy előre megbecsülhető legyen megközelítőleg a várható energiatermelés, mivel ezzel csökkenthető a szükséges energiatároló mérete. Előre becsülhető DAM esetén a várható energiaár, valamint a 3. fejezetben ismertetett ütemező algoritmus alkalmazásával lokálisan elfogyasztható a megtermelt többletenergia, ezzel csökkentve a villamos hálózatra veszélyes mértékű túltermelésből adódó védelmi működések, meghibásodásokat.

Régóta használnak számításokat arra, hogy egy adott lokációon vízszintes felületre kiszámolják az egy négyzetméterre eső globális napenergiát [31], besugárzott teljesítményt (W/m^2). Azonban ezek a számítások csupán tiszta égbolt értékeit (Clear Sky Data) adják meg, és főként csak a mezőgazdaságban használták a növények termésének, betakarításának idejének meghatározásához, ahol fontos a növényt ért napos órák száma és így a növekedéshez szükséges

² forrás: <https://www.agora-energiewende.de>



4.1. ábra. Energiatútermelés hatása a villamos energia árára 2019.04.22-én. Teljes oldalas ábrában megtekinthető a Függelék fejezetben a 7. ábrán a 109. oldalon.

besugárzott energia értéke.

Ezeknek a modelleknek a kiegészítésével azonban a nap bármely időpillanatában, az év bármely napján megállapítható a nap állása alapján, hogy egy felületre mekkora a várható besugárzott szolárenergia, és ezek alapján számolható, hogy egy adott pozíciójú és tájolású napelem mennyi energiát termelhet az adott pillanatban. A következő fejezetben ennek a felhasznált matematikai és asztronómiai alapjai valamint a tényleges termelés számításához szükséges napelem, PV (Photovoltaic) modell kerülnek bemutatásra.

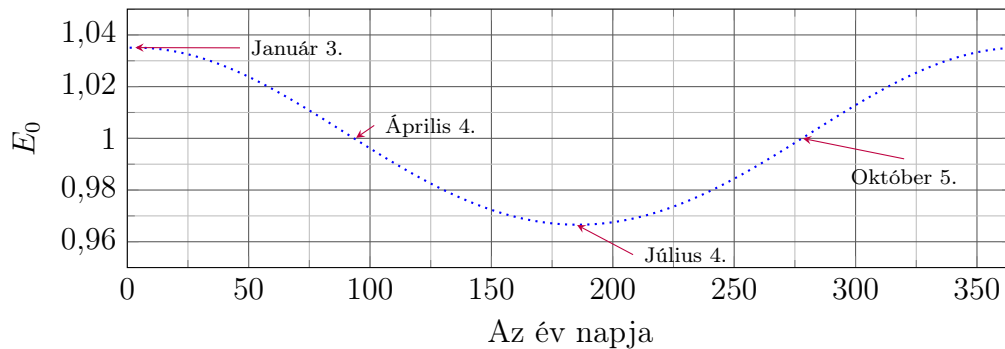
4.1. Szolárgeometria

A probléma megoldásához az első lépés a Nap mozgásának leírása az égbolton [67]. Nehezíti a feladatot, hogy habár a Föld egy év alatt kerüli meg a Napot, azonban a Föld keringési síkja és a forgástengelye közötti szög ($23,5^\circ$) miatt a Nap minden napfelkelte és naplemente között más és más pályát ír le az égbolton. Ennek köszönhető, hogy az év során a Nap pályája a Rák- és a Baktérítő között mozog, ezzel létrehozva az évszakokat. Továbbá érdemes figyelembe venni azt is, hogy a Föld pályája a Nap körül nem teljesen tökéletes kör, hanem ellipszis alakú, ami a Nap-Föld középtávolsághoz képest (r_0) $\pm 1,5\%$ -os eltérést okoz. Ezen számolásokkal és azok leírásával foglalkozik a [S5] cikk.

4. NAPENERGIÁBÓL SZÁRMAZÓ VILLAMOS ENERGIA BECSLÉSE IDŐJÁRÁSELŐREJELZÉS ALAPJÁN

Távolról közelítve a probléma leírását, az első fontos egyenlet az előbb említett ellipszis pálya miatti Nap-Föld távolság változása. Erre azért van szükség, mivel a távolsággal négyzetesen fordított arányban változik a szoláris energia nagysága az egységnyi felületen. Ennek számolásához a (4.1) egyenlet kerül alkalmazásra, ahol E_0 a relatív Nap-Föld távolság négyzete, r_0 a közepes, r pedig az éppen aktuális távolság az év d_n -edik napján 365 napos év esetén.

$$\begin{aligned}
 E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = & 1,000110 + 0,034221 \cos\left(2\pi \frac{d_n - 1}{365}\right) + \\
 & + 0,001280 \sin\left(2\pi \frac{d_n - 1}{365}\right) + 0,000719 \cos\left(4\pi \frac{d_n - 1}{365}\right) + \\
 & + 0,000077 \sin\left(4\pi \frac{d_n - 1}{365}\right)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$



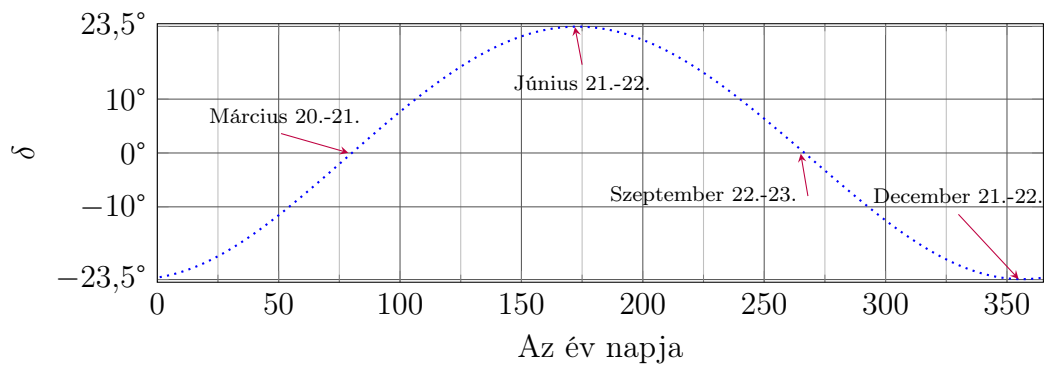
4.2. ábra. A (4.1) képlettel számolt E_0 érték a teljes évre nézve

A (4.1) egyenlet eredményét felhasználva számolható a (4.2) egyenlettel a Föld légkörének felső határát elérő szoláris energia (I_n), ahol I_0 a szoláris állandó (1367 W/m^2).

$$I_n = I_0 E_0 \tag{4.2}$$

A Nap pályája az év során nem ugyan azon szélességi kör felett halad el, hanem a két térítő között ($\pm 23,5^\circ$) vándorol. Mivel a Nap aktuális pozíciója befolyásolja a napmagasságot, és így a fénysugár beesési szögét, így fontos, hogy ezt is meghatározzuk a további számításokhoz. Erre a számításra használható a (4.3) egyenlet, ahol δ a Nap deklinációja (melyik szélességi kör felett jár) az év d_n -edik napján 365 napos év esetén.

$$\delta = \left(0,006918 - 0,399912 \cos \left(2\pi \frac{d_n - 1}{365} \right) + 0,070257 \sin \left(2\pi \frac{d_n - 1}{365} \right) - \right. \\ \left. - 0,006758 \cos \left(4\pi \frac{d_n - 1}{365} \right) + 0,000907 \sin \left(4\pi \frac{d_n - 1}{365} \right) - \right. \\ \left. - 0,002697 \cos \left(6\pi \frac{d_n - 1}{365} \right) + 0,00148 \sin \left(6\pi \frac{d_n - 1}{365} \right) \right) \frac{180^\circ}{\pi} \quad (4.3)$$



4.3. ábra. A (4.3) képlettel számolt δ értéke az év folyamán

A következő fontos hatása az ellipszis pályának, hogy a napok nem egységesen 24 órák, hanem függ attól, hogy a Föld a Nap körüli pályáján éppen hol jár. Egy teljes kör alatt a Föld távolodik és közeledik a Naphoz, és ennek következményeként a Nap délben nem mindig ugyanabban az időpontban delel. Ez azt jelenti, ha naponta ugyan abban az időpontban (például délben, óra átállítást figyelve) készítünk egy képet a Nap állásáról a teljes évben, akkor ezeket egymásra vetítve egy 8-as alakot kapunk. Ezt a jelenséget hívják analemma görbének. Ezek alapján az idő fogalmát háromféle képpen lehet definiálni:

Nemzeti idő Ez az adott országban hivatalos helyi idő, beleértve az esetleges téli-nyári időszámítást is.

Lokális idő Ez az adott hosszúsági körön vett tényleges idő, amit az UTC-0 időzónához képest lehet számolni az aktuális GPS koordináta hosszúsági koordinátája segítségével (15° -onként 1 óra). Ez azért fontos, mert egy ország keleti és nyugati pontja között is lehet akár órák különbség is a napfelkelték között. Magyarországra nézve ez körülbelül 24 perces eltérést jelent, de a helyi idő azonos.

Szoláris idő A nap pozíciójához kötött idő. Eszerint a szoláris (asztronómiai) dél esetén a Nap a legmagasabban ponton delel, azaz északi félteke esetén a Nap a déli pólus irányába mutat.

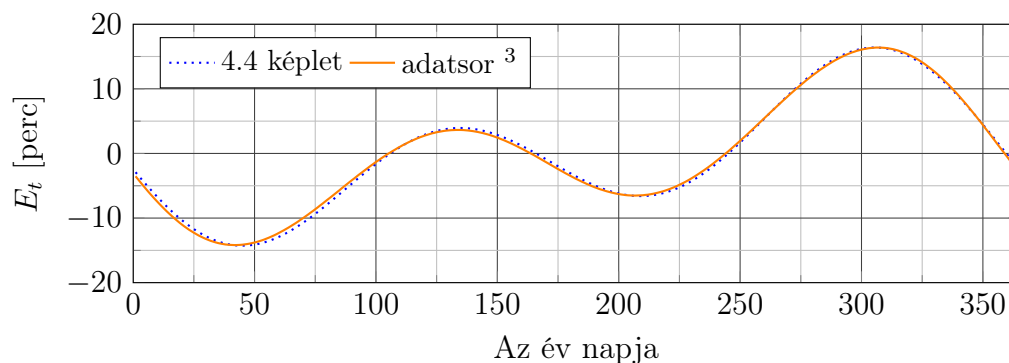
4. NAPENERGIÁBÓL SZÁRMAZÓ VILLAMOS ENERGIA BECSLÉSE IDŐJÁRÁSELŐREJELZÉS ALAPJÁN

A naperőművel való energiatermelés számolásához a szoláris időre van szükség, hiszen ez alapján lehet pontosan megmondani a Nap relatív pozícióját a helyi vízszinteshez képest. Annak a számolásához, hogy a lokális idő és a szoláris idő között mekkora az eltérés az év adott (d_n) napján használható az úgynevezett "idő egyenlete" (Equation of Time: E_t) (4.4) képletet.

$$E_t = \left[0,000075 + 0,001868 \cos \left(2\pi \frac{d_n - 1}{365} \right) - 0,032077 \sin \left(2\pi \frac{d_n - 1}{365} \right) - 0,014615 \cos \left(4\pi \frac{d_n - 1}{365} \right) - 0,04089 \sin \left(4\pi \frac{d_n - 1}{365} \right) \right] 229,18 \text{ perc} \quad (4.4)$$

A (4.4) formula végén szereplő konstans a kapott érték percre való konverziójáért felelős, amit az alábbiak szerint kapunk:

$$229,18 \text{ perc} = \frac{360^\circ}{2\pi} \frac{360^\circ}{24 \cdot 60} \cdot 16 \text{ perc} \quad (4.5)$$



4.4. ábra. Az E_t értéke a (4.4) képlettel számolva, valamint a tényleges értéke a 2018-as évben

Fontos megjegyezni, hogy az eddig ismertetett képletek, számolások az év adott napjához tartozó értékeket adják eredményül, azokat nem szükséges minden számolás előtt elvégezni. Az adott napokhoz (d_n) számolt értékeket csupán egyszer kell kiszámolni, és később akár táblázatból is újra fel lehet használni az eredményeket. Habár a képletek 365 napos évre vonatkoznak a 366 napos szökőévre is működnek. Két egymást követő nap esetén az eltérés minimális a számolt értékekben, így a szökőév esetén sem okoz nagy hibát a számolásokban ugyanazon képlet alkalmazása.

A fent ismertetett formulákkal az év napjaira számolható a Nap és a Föld egymáshoz viszonyított pozíciója. Ezek után számolható a kapott pozíció hatása az atmoszférát elérő sugárzásra, valamint a Nap pozíciójára egy adott időben a Földről nézve.

³ forrás: <http://www.powers.com/EoT.htm>

4.2. Besugárzási szög

Az atmoszféra felső rétegére kiszámolt besugárzott energia (I_n) csupán egy része jut el a földfelszínig. Az egy bizonyos mértékben visszaverődik a felszínről valamint a légkörben található részecskékről. Azonban az egységnyi felületre besugárzott energia függ a nap sugarainak a beesési szögétől is az adott felületre.

A nap sugarait a lokális vízszintes felülethez képest szükséges vizsgálni. Ilyen esetben két fontos értékkel lehet leírni a Nap aktuális pozícióját az égbolton, melyeket a 4.5. ábra (digitális formában animáció) szemléltet:

- **Nap magassági szöge:** A vízszintes felület és a nap sugarainak a beesési pontban mért hajlásszöge (α).
 - Kiegészítő szöge a függőleges egyenessel bezárt szög, a zenitszög (θ_z).
- **Nap azimut szöge:** A Nap pozíciója az észak-dél pólust összekötő egyenessel milyen szöget zár be (ψ).
 - Értéke napkeltekor negatív, szoláris idő szerinti délben nulla, utána pozitív.

4.5. ábra. A Nap pályája az égbolton, és a pozíciójához tartozó szögek

Az előzőleg említett szögek számításához először szükség van a Nap úgynevezett óraszögének az ismeretére. Ez a szög azt adja meg, hogy az aktuális geológiai pozíció hosszúsági koordinátájához képest melyik hosszúsági kör felett van a Nap. Ez a (4.6) képlettel számolható, ahol a t_{UTC} (*Universal Time Coordinated*) a globális egységes időszámítási rendszer 0 időzónájának az aktuális ideje, a ϕ_{long} pedig a GPS pozíció hosszúsági koordinátája.

$$h = 180^\circ - 15^\circ \left(t_{UTC} + \frac{E_t}{60} \right) - \phi_{long} \quad (4.6)$$

A Nap deklinációja (δ), a GPS koordináta szélességi értéke (ϕ_{lat}) és a (4.6) képlettel számolt óraszög (h) felhasználásával meghatározható a (4.7) képlet segítségével az adott időpontban az adott geológiai pozícióban lévő zenitszög koszinusza ($\cos(\theta_z)$), ami nem más, mint a lokális függőleges és a Naptól érkező fénysugarak által bezárt szög.

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) \sin(\phi_{lat}) + \cos(\delta) \cos(\phi_{lat}) \cos(h) \quad (4.7)$$

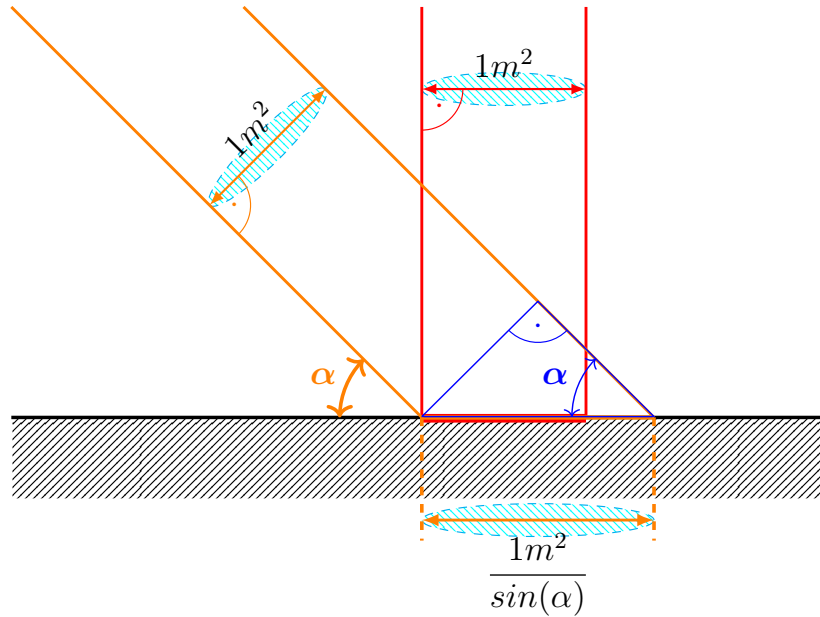
A fénysugarak vízszintes felülettel bezárt szögét a Nap magassági szögének nevezzük, jelölése α . Mivel a vízszintes sík, és a lokális zenit (függőleges) merőlegesek egymásra, így a θ_z zenitszög és az α magassági szög 90° -ra egészítik ki egymást (4.8). Ennek és az ide kapcsolódó trigonometrikus azonosság következtében igazolható a (4.9) egyenlőség.

$$\alpha + \theta_z = 90^\circ \quad (4.8)$$

$$\cos(\theta_z) = \sin(\alpha) \quad (4.9)$$

A magassági szögnek az egységnyi felületre eső teljesítmény meghatározásánál van jelentősége. Az atmoszférára eső I_n teljesítmény minden esetben a napsugarakra merőleges felületre vonatkozik. Amennyiben a magassági szög kisebb, mint 90° ez a teljesítménysűrűség csökken, mivel az nagyobb felületen oszlik el. A 4.6. ábra szemlélteti, hogy a napsugár vetülete fordítottan arányos a magassági szög szinuszával, azaz az egységnyi felületre eső teljesítmény fordítottan arányos vele.

A szemléltetett összefüggések segítségével számolható, hogy egy adott GPS pozíción egy adott időben a napsugarak milyen szögben érik a horizontális felületet, ami fontos a felületre érkező napsugárzás energiájának számításához.



4.6. ábra. Napsugár vetületének megnyúlása a magassági (α) szög függvényében

4.3. Globális napenergia besugárzás

A Nap felől érkező sugárzás mérésének nagymúltú mérés technikája van [68]. A különböző modellek felírása a Nap felől érkező, földfelszínre eljutó sugárzás nagyságának számítására különböző modellek kerültek felírásra az elmúlt évtizedekben [69]. Az egységnyi vízszintes felületre besugárzott teljesítmény (horizontális sugárzás) számításához az [70], [54] irodalomban lehet találni egyszerű képletet, mint például a (4.10) egyenlet. Ez a képlet a (4.2) egyenletben kapott besugárzott teljesítményből számol tovább, ahol a q az egységnyi vastagságú tiszta légkör áteresztő képessége ($q < 1$), T_m a Linke homályossági tényező (Linke turbidity factor) és z a fénysugár relatív úthossza a légkörben.

$$I = I_n q^{T_m z} \sin(\alpha) \quad (4.10)$$

A T_m értéke függ a levegő minőségétől, és a szárazföldi pozíciótól is. Definiáció szerint azt az arányszámot jelenti, hogy hány tiszta légkört kellene egymásra tenni ahhoz, hogy az aktuális légköri tulajdonságokat kapjuk. A 4.2. táblázatban szerepelnek a tipikus értékek a levegő és a területi elhelyezkedés alapján.

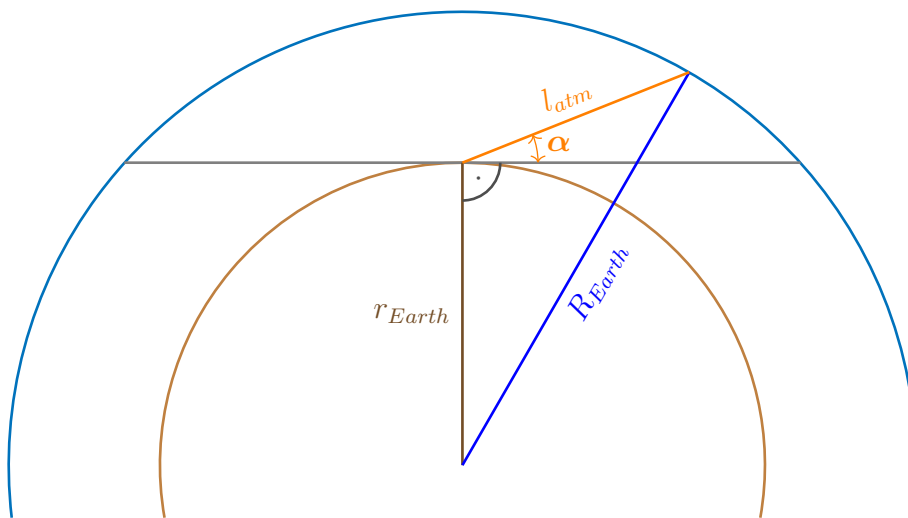
Tipikusan a z értékét a magassági szög szinuszának a reciprokával közelítik [71], [54]. Ez azonban napkeltekor és napnyugtakor végtelen értéket ad, ami nem a valós érték. A 4.7. ábra szemlélteti a napsugár tényleges úthosszát a légkörben a magassági szög (α) függvényében.

A 4.7. ábra segítségével felírható koszinusz tétel alkalmazásával a keresett l_{atm} hossza a (4.11) egyenlet, amit rendezve egy másodfokú egyenlet adódik (4.12) aminek a pozitív gyöke a keresett hosszérték.

4. NAPENERGIÁBÓL SZÁRMAZÓ VILLAMOS ENERGIA BECSLÉSE IDŐJÁRÁSELŐREJELZÉS ALAPJÁN

4.2. táblázat. Homályossági tényező értékei a levegő minősége és a területi elhelyezkedés alapján

	kontinentális	tengeri
Sarkvidéki hideg levegő	2,0-3,0	2,5-3,5
Mérsékelt sarkvidéki hideg levegő	3,0-3,5	3,0-4,0
Mérsékelt trópusi meleg levegő	3,5-4,5	4,0-4,5
Trópusi meleg levegő	4,0-5,0	4,5-5,0



4.7. ábra. Napsugár úthossza az atmoszférában (l_{atm}) a magassági szög (α) függvényében

$$R_{Earth}^2 = r_{Earth}^2 + l_{atm}^2 - 2 \cdot l_{atm} \cdot r_{Earth} \cdot \cos(\alpha + 90^\circ) \quad (4.11)$$

$$l_{atm}^2 - 2 r_{Earth} l_{atm} \cos(\alpha + 90^\circ) + (r_{Earth}^2 - R_{Earth}^2) = 0 \quad (4.12)$$

A napsugár relatív úthossza megkapható a számolt l_{atm} és az atmoszféra vastagságának ($R_{Earth} - r_{Earth}$) hányadosaként (4.13).

$$z = \frac{l_{atm}}{R_{Earth} - r_{Earth}} \quad (4.13)$$

A (4.10) képlettel ismerttetett besugárzásmódellem nem veszi figyelembe az aktuális geológiai pozícióból adódó különbségeket valamint a felhőzetet. Ennek figyelembevételéhez egy német besugárzásmódellet választottam alapul [70], [72], [73] (4.14)-(4.15), ahol az A_d , B_d , a_d , b_d lokális állandók, N pedig a felhőzet aktuális mértékével arányos.

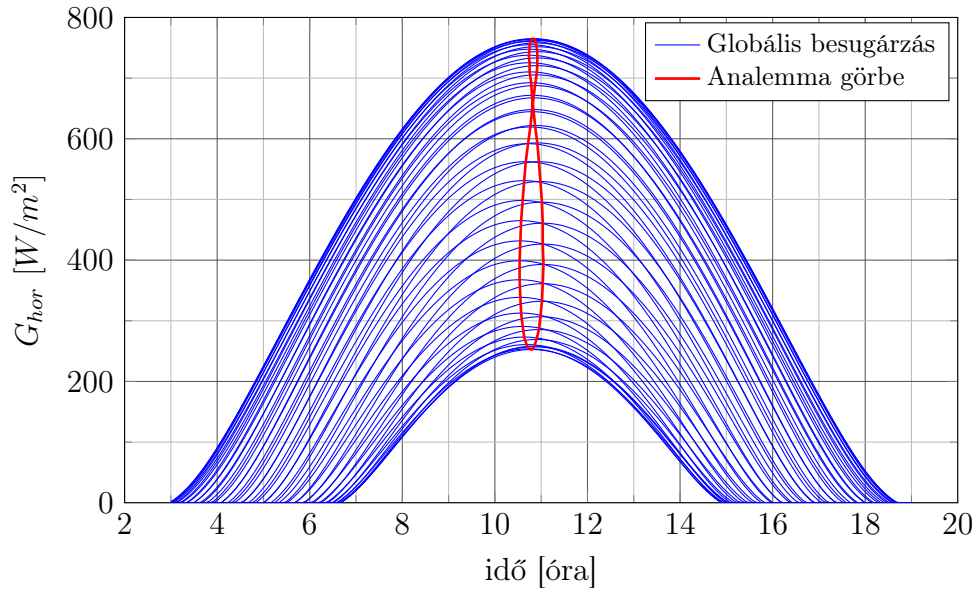
$$G_{hor} = I_n \sin(\alpha) A_d e^{-B_d T_m z} (1 - a_d N^{b_d}) \quad (4.14)$$

$$S_{hor} = I_n \sin(\alpha) A_d q^{T_m z} (1 - N^{b_d}) \quad (4.15)$$

A modell azt a szemléletet követi, miszerint a vízszintes felületre érkező globális besugárzott teljesítmény (G_{hor}) egy, a Nap térszögéből érkező direkt besugárzott teljesítményből (S_{hor}) és egy, a légkörben található részecskék által szétszórt diffúz besugárzott teljesítményből (D_{hor}) áll. A német besugárzás modell a globális besugárzott teljesítményre (4.14) és a direkt besugárzott teljesítményre (4.15) ad összefüggést. A diffúz sugárzás számolható a kettő különbségéből (4.16).

$$D_{hor} = G_{hor} - S_{hor} \quad (4.16)$$

A 4.8. ábra szemlélteti az év során az egységnyi horizontális felületre érkező besugárzott teljesítményt és annak változását Veszprémben. A diagramm 52 görbét tartalmaz (hetente egy **kék görbe**) valamint az egyes görbéken a maximum értékek **piros görbe** összekötését, ami a magassági szög maximumértékei, azaz az asztronómiai dél. Ez a görbe az analemma görbe, amit a (4.4) egyenletben számolt, ellipszis keringési pálya miatt mérhető időeltolódás okoz.

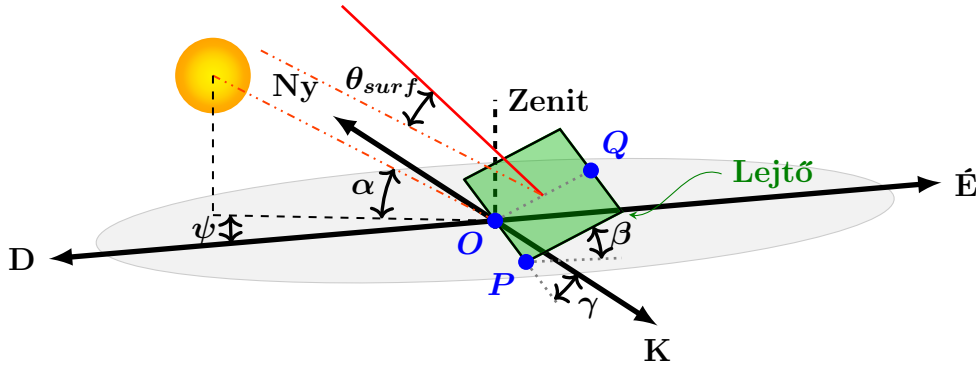


4.8. ábra. A (4.14)-(4.16) képletek alapján számolt globálisugárzás értéke egységnyi felületre Veszprémben egy teljes évben heti felbontásban és az analemagörbe az asztronómiai dél értékek alapján

A besugárzott teljesítmény értékét napelem termelésének becslésére lehet felhasználni. Azonban egy napelem tipikusan nem vízszintesen kerül elhelyezésre, hanem a tető síkjában, vagy földre telepítve számolt és előre meghatározott síkban. Ezt a síkot a dőlésszöggel (β), azaz a vízszintessel bezárt

szöggel és az orientációval (γ), azaz az észak-dél irányvonalától való eltéréssel lehet jellemezni. Ezt szemlélteti a 4.9. ábra.

A nem vízszintes elhelyezés befolyásolja a napsugarak beesési szögét a napelem síkjára, és ezzel más lesz az energiasűrűsége ennek a síknak, mint az azonos pozíción a vízszintes felületnek. A tényleges besugárzott teljesítmény számításához szükség van a napsugarak beesési szögének számolására a napelem síkjára nézve.



4.9. ábra. Az egyenesek és szögek kapcsolatai a β dőlésszöggel és γ orientációval rendelkező síkon, lejtőn

A 4.9. ábra alapján látható, hogy a OPQ lejtőre eső napsugárzás beesési szögének (α_{surf}) számolásához a sík normálvektorának és a napsugár egyenesének a hajlásszögét szükséges kiszámolni (θ_{surf}). Mivel a normálvektor a síkkal 90° -t zár be, így a beesési szög számolható a $\alpha_{surf} = 90^\circ - \theta_{surf}$ képlettel. Először a nap sugarainak az egyenesét szükséges felírni. Ez az irányvektor a 4.9. ábrán a Nap és az O pont pozíciójából írható fel, amit képlettel a (4.17) lehet leírni.

$$\vec{OS} = [\cos(\alpha) \cdot \cos(\psi), \cos(\alpha) \cdot \sin(\psi), \sin(\alpha)]^T \quad (4.17)$$

A következő az OPQ sík egy normálvektorának a felírása. Egy ilyen normálvektort szemléltet a 4.9. ábrán a piros vonal. A lejtő egy normálvektora felírható a (4.18) képleten látható alakban.

$$\vec{n} = [\cos(\nu) \cdot \cos(\gamma), \cos(\nu) \cdot \sin(\gamma), \sin(\nu)]^T \quad (4.18)$$

Ezek segítségével számolható a két egyenes (vektor) hajlásszöge, azaz a θ_{surf} értéke. Ennek a szögnek a számolására használható a (4.19) egyenletben szereplő formula, ahol α szög a nap magassági szöge, a ψ szög a Nap azimut-szöge, a ν szög a β kiegészítőszöge ($\nu = 90^\circ - \beta$) valamint a γ szög a lejtő orientációja.

$$\begin{aligned}
 \theta_{surf} &= \arccos \left(\cos(\alpha) \cos(\psi) \cos(\nu) \cos(\gamma) + \right. \\
 &\quad \left. + \cos(\alpha) \sin(\psi) \cos(\nu) \sin(\gamma) + \sin(\alpha) \sin(\nu) \right) = \\
 &= \arccos \left(\cos(\alpha) \cos(\nu) \left(\cos(\psi) \cos(\gamma) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \sin(\psi) \sin(\gamma) \right) + \sin(\alpha) \sin(\nu) \right) \quad (4.19)
 \end{aligned}$$

A lejtőre jutó besugárzott teljesítmény direkt sugárzás értékét (S_{pv}) a horizontális felületre érkező teljesítményből a (4.20) képlettel lehet számolni. A képlet magyarázható azzal, hogy az S_{hor} (4.15) számolásánál a beesési szög (α magassági szög) szinuszával kell szorozni. Lejtő esetén ez a beesési szög az α_{surf} . Ebből következik, hogy a merőleges besugárzáshoz képest ennek az α_{surf} szögnek a szinuszával kell számolni. Tehát a kiszámolt S_{hor} értéket osztani kell a magassági szög szinuszával és szorozni a beesési szög szinuszával a lejtőre nézve.

$$S_{pv} = S \frac{\sin(\alpha_{surf})}{\sin(\alpha)} \quad (4.20)$$

A diffúz sugárzás a lejtő dőlésszögétől (β) függ. Horizontális felület esetén a diffúz sugárzás a teljes égboltról, félgömbről érkezik a felületre. Belátható, hogy a dőlésszög növelésével ez a felület a félgömbön csökken, hiszen egy része a napelem hátulját világítja meg. Függőleges állásban ($\beta = 90^\circ$) már csak az égbolt feléről jut el a diffúz sugárzás a napelem felületére. Ennek a diffúz sugárzásértéknek a számítására az [31] irodalomban az alábbi, izotrop modellen alapuló (4.21) képlet található.

$$D_{pv} = D \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (4.21)$$

A lejtőre kiszámolt direkt (S_{pv}) és diffúz (D_{pv}) sugárzásértékek kiszámítása után a két értéket összeadva megkapjuk az adott pillanatban a globálsugárzás értékét (G_{pv}).

$$G_{pv} = S_{pv} + D_{pv}. \quad (4.22)$$

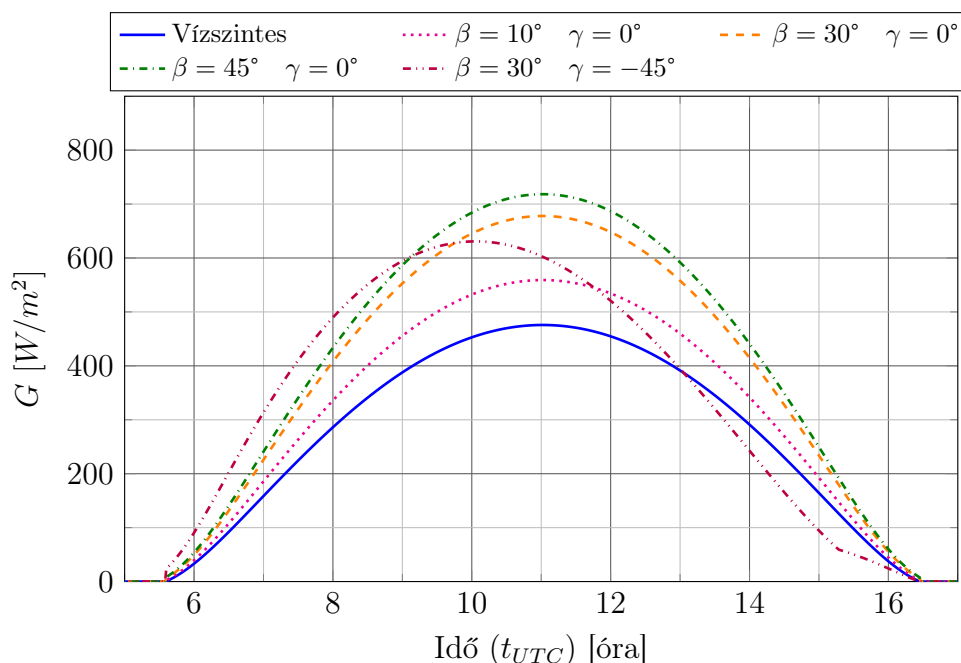
A fejezetben bemutatott képletekkel és módszerekkel számítható az adott tájolású lejtőre jutó sugárzás. Mivel a napelemek is síkként foghatóak fel, így ismerve a dőlésszögét és orientáltságát a telepített napelemeknek számolható az őket érő teljesítmény egységnyi felületre. A napelemek adatlapja (hatásfok, hatásfok romlás, felület nagysága) és a telepítési adatok (dőlésszög, orientáció, panelek száma, GPS koordináták) alapján pedig becsülhető, egy megfelelő napelem modell alapján, a megtermelhető teljesítmény és energia mértéke.

Ismertetésre került egy módszer a horizontális felületre érkező globálsugárzás számításához, valamint, ebből tovább számolva, egy meghatározott tájo-

lású lejtőre érkező globálsugárzás számítására. A dolgozat további részében a lejtőre jutó sugárzás alapján lesznek számolva a teljesítmény értékek ((4.14)-(4.16) és (4.20)-(4.22) egyenletek), mivel ez alapján becsülhető egy adott paraméterekkel telepített PV erőmű várható energiatermelése.

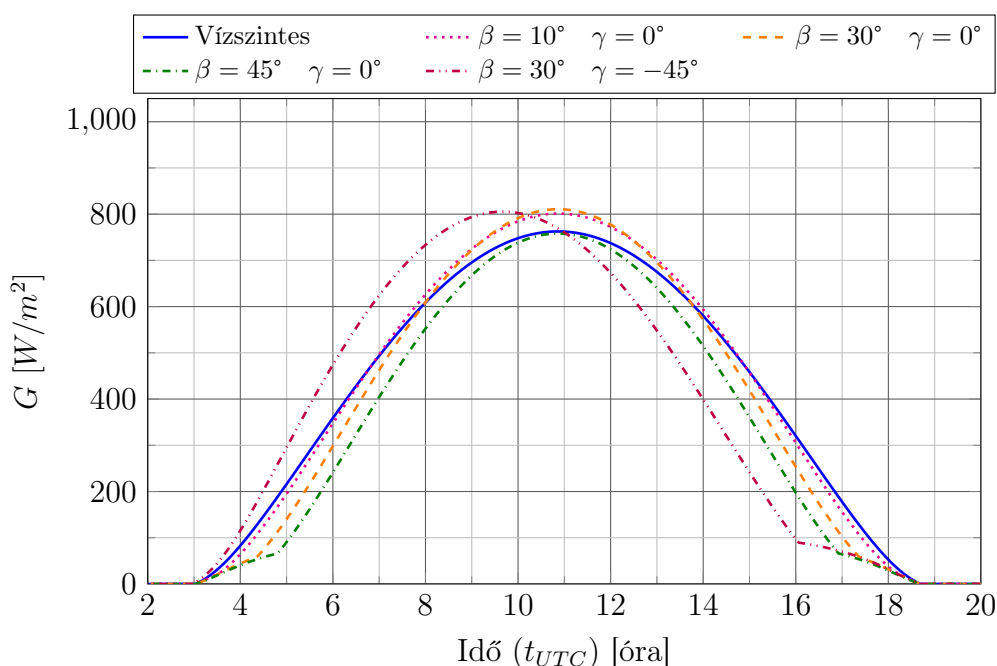
4.3.1. Szolárgeometria modell verifikálása

Az előző fejezetben bemutatott szolárgeometria modellt szükséges megvizsgálni, hogy az egyes paraméterek változtatására a modell kimenetei hogyan változnak. A verifikáláshoz két különböző napra lett számolva a bemutatott modell ((4.20)-(4.22) egyenletek) alapján a várható besugárzott teljesítmény különböző meredekség (dőlésszög) és orientáció mellett.



4.10. ábra. Számolt globál sugárzás értéke Veszprémben március 1-én különböző tájolásokkal

A 4.10. ábrán látható, hogy március 1-én milyen besugárzott teljesítmény várható Veszprémbe különböző tájolású felületeken. Az ábra jól szemlélteti, hogy márciusban nagyobb dőlésszög esetén (β) az egységnyi felületre érkező besugárzott teljesítmény nagyobb, mint a vízszintes felületre érkező (kék folytonos vonal) globál sugárzás. Közvetlenül a földre telepített, állványra szerelt napelemek esetén az orientáció (γ) tipikusan 0° , azaz dél felé állítják be, mivel ebben az esetben lehet a legnagyobb csúcsteljesítményt elérni a termelésben. Azonban háztetőre szerelt napelemek esetén a dőlésszöget és az orientációt a háztető síkja fogja meghatározni. Az utolsó görbe (lila pont-pont-vonal, $\beta = 30^\circ, \gamma = -45^\circ$) esetén a lejtő 45° -kal el van fordítva kelet felé. Jól látható, hogy ebben az esetben a görbe maximuma, azaz a legnagyobb besugárzott teljesítmény nem délben van, hanem korábbi időpont felé tolódik el.



4.11. ábra. Számolt globál sugárzás értéke Veszprémben július 1-én különböző tájolásokkal

A 4.11. ábrán a július 1-én várható besugárzott teljesítmény figyelhető meg szintén több különböző tájolású felületen. Az előző, 4.10. ábrához képest nagy különbség, hogy mivel nyári hónapról van szó, így itt a napmagasság jóval nagyobb dél környékén (70° körüli), így a β szögnek minimális hatása van csak a termelésre. Sőt, látható, hogy habár a csúcserték megegyezik a vízszintes felület besugárzási görbéjével $\beta = 45^\circ$ esetén (zöld pont-vonal), azonban a várható besugárzott energia a nap folyamán kisebb lesz, mivel a reggeli és esti órákban kisebb az besugárzott energia értéke. Továbbá az is megfigyelhető, hogy a görbe elején és végén egy-egy kisebb meredekségű szakasz van, a kettő között pedig gyorsan változik a besugárzott teljesítmény értéke. Ennek oka, hogy nyáron, a tavaszi és téli napéjegyenlőség közötti időszakban a napkelte és a napnyugta között bezárt szög nagyobb mint 180° , azaz túl nagy β esetén napkelte után és napnyugta előtt a nap nem a lejtő felületét süti, és csak a diffúz sugárzás éri a lejtő felső felszínét.

Az ismertetett, globálsugárzást számító modell a fenti ábrák alapján hihető eredményeket ad, megfelelő paraméterezéssel alkalmas a napelem cellákra érkező besugárzott teljesítmény becslésére.

A fejezetben bemutatott eredmények alapján elmondható, hogy a globálsugárzáshoz prezentált formulák és az azok segítségével felépített modell megfelelően működik, mivel a lejtőre érkező sugárzás, a lejtő tájolásának változtatásával, az elvártak szerint változik. Az eredmények további és pontosabb tesztelése a következő részben ismertetett (4.4. fejezet) napelem modell segítségével kerülnek prezentálásra.

4.4. Hőmérsékletfüggő PV modell

A lejtőre érkező globálsugárzás ismeretében lehet becsülni a napelemekre (PV panel) besugárzott teljesítményt, ami alapján, megfelelő PV panel modell felírásával előre jelezhető a megtermelhető energia nagysága az adott napelem parkban. Azonban problémát jelent, hogy a PV panelek adatlapjában feltüntetett értékek, főként a hatásfok, csak az adott kondíciók (Test Condition) mellett érvényes. Ilyen fontos kondíció a panel hőmérséklete, mivel a hőmérsékletének növekedésével a hatásfoka romlik. Ennek a fő oka a PN átmenet negatív hőmérsékleti együtthatója ($\sim -2\text{ mV/K}$), amik sorbakötve a napelem panelek kapocsfeszültségét adják.

A méréseket tipikusan 25°C -on végzik el, és az adatlapok szerint általában az említett hatásfok $-0,4\%/K$ körüli értékkel változik. Mivel a *Kelvin* és a *Celsius* léptéke azonos, így ez a hatásfokromlás számolható $^\circ\text{C}$ -ban vett hőmérsékletek alapján is. Nem ritka eset, hogy nyáron, mikor a Nap magassági szöge nagy a PV panel hőmérséklete (60°C) – (80°C) körüli értéket is elérhet, ami a laborban végzett mérés során kapott hatásfokban (-14%) – (-22%)-os változást is okozhat. Ez azt jelenti, hogy ha az adatlap szerint 25°C hőmérsékleten a panel hatásfoka 20% , akkor ez lecsökken ($17,2\%$) – ($15,6\%$)-ra. Az ebben a fejezetben bemutatásra kerülő hőmérséklet függő PV modellel alapja az [S6] cikk.

A modell felírása során fontos a 2.2. fejezetben ismertetett modellezési lépéseket betartva meghatározni a rendszer felírásához szükséges szabályokat. Először érdemes megvizsgálni, hogy a PV panel által megtermelt teljesítmény (P_{pv}) milyen paramétereiktől is függ. Ez a (4.23) formulán látható. A panel teljesítménye függ a besugárzott teljesítménytől (G_{pv}), ami az előző fejezetben ismertetettek alapján függ a felhőzet mértékétől (N), és a PV panelek síkjának a tájolásától (β és γ). Továbbá függ a teljesítmény a PV panelek felületének nagyságától (A_{pv}) és azok hatásfokától (η_{pv}), ami az előzőekben leírtak alapján erőteljesen függ a panelek aktuális hőmérsékletétől (T_{pv}).

$$P_{pv} = G_{pv}(N, \beta, \gamma) \cdot A_{pv} \cdot \eta_{pv}(T_{pv}) \quad (4.23)$$

A besugárzott teljesítmény számolható az előző fejezetben bemutatott egyenletekkel és összefüggésekkel. A PV panelek felülete állandó, és adatlapból kiolvasható. A hatásfok számolásához viszont fontos tudni a panel hőmérsékletének megváltozását az aktuális értékek mellett. Ennek a megváltozása (ΔT_{pv}) szintén több változótól függ, amit egy másik függvénnyel tudunk leírni, jelölés szerint f_T -vel (4.24). Ebben a függvényben megjelenik a panel és a levegő közti hőátadási tényező (α_{air}) értéke.

$$\Delta T_{pv} = f_T(G_{pv}, T_{air}, \eta_{pv}, \alpha_{air}, T_{pv}) \quad (4.24)$$

A levegő hőmérséklete mérhető vagy előrejelzésből előre becsülhető. Azonban a hatásfok folyamatosan változik, mivel a besugárzott teljesítménnyel a panel hőmérséklete is változni fog. Ennek számolásához használható a (4.25) formula, ahol T_{TC} az adatlapban szereplő hőmérséklet, aminél a méréseket vé-

gezték (Test Condition), η_{coef} a hatásfok változása a panel hőmérsékletének megváltozására és η_{nom} az adatlapon szereplő hatásfok a T_{TC} hőmérsékleten.

$$\eta_{pv} = [1 + (T_{pv} - T_{TC}) \cdot \eta_{coef}] \cdot \eta_{nom} \quad (4.25)$$

Az aktuális hatásfok számításához szükséges még a PV panel és a levegő közötti hőátadási tényező ismerete. A panelre érkező besugárzott teljesítmény egy része melegíti azt, de a termodinamikai törvények miatt a környezete, azaz a levegő irányába leadásra kerül ez a hő, amíg el nem éri az egyensúlyi pontot. Ennek a hőleadásnak a mértéke függ a képletben látható az α_{air} változótól. Ez a hőátadási tényező a légmozgással, azaz a szélesebséggel változik. Ennek közelítésére használható az általánosan, görbeillesztés alapján javasolt (4.26) formula, ahol $\Delta\alpha$ a minimum és a maximum hőátadás közötti különbség, v_{wind} a szél sebessége m/s -ban, a_w korrekciós tényező és α_0 a hőátadási tényező légáramlás nélkül.

$$\alpha_{air} = \Delta\alpha \cdot \left(1 - e^{-\frac{v_{wind}}{a_w}}\right) + \alpha_0 \quad (4.26)$$

Ezek alapján felírható a PV panel dinamikája a hőmérsékletre nézve, ami a (4.27) egyenletben látható.

$$\dot{T}_{pv} = (T_{air} - T_{pv}) \cdot \alpha_{air} \cdot \frac{2 \cdot A_{pv}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} + \frac{1 - \eta_{pv} - \eta_{ref}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} \cdot A_{pv} \cdot G_{pv} \quad (4.27)$$

A (4.27) egyenletben szerepel a (4.25) formulával kifejezett hatásfok, amit a számolásnál be kell helyettesíteni. Mivel a (4.25) nem konstans érték, így látható, hogy behelyettesítés után egy nemlineáris modellel kell számolni. Azonban, mivel diszkrét idejű a számoláshoz használt modell, így az éppen aktuális hőmérséklettel szükséges számolni, amivel a napelem hatásfoka konstansként helyettesíthető be a (4.27) egyenletbe.

A $c_{pv} \cdot m_{pv}$ szorzat értéke a PV panel hőkapacitása, ami az egyes, panelt felépítő részegységek hőkapacitásának az összege. Ennek számolásához a panel gyártása során felhasznált anyagok (üveg, alumínium, szilícium, műanyag) súlya (m) került lemérésre, és az anyag fajlagos hőkapacitásával (c) lett kiszámolva a részegység hőkapacitása. Ezeket összegezve kapjuk a teljes PV panel hőkapacitását (4.28).

$$c_{pv} \cdot m_{pv} = c_{glass} \cdot m_{glass} + c_{Al} \cdot m_{Al} + c_{Si} \cdot m_{Si} + c_{plastic} \cdot m_{plastic} \quad (4.28)$$

A (4.27) differenciálegyenlet rendezéssel állapotter modell alakra hozható (2.2), ahol az állapot vektor és a bemeneti vektor a (4.29) képletben látható formában néz ki.

$$\mathbf{x} = [T_{pv}], \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} T_{air} \\ G_{pv} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

A rendezés után az állapotegyenlet a (4.30) formában szemléltethető. Ez alapján az állapot mátrix és a bemeneti mátrix meghatározható (4.31).

$$\dot{T}_{pv} = \begin{bmatrix} -\alpha_{air} \cdot \frac{2 \cdot A_{pv}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} \end{bmatrix} \cdot [T_{pv}] + \begin{bmatrix} \alpha_{air} \cdot \frac{2 \cdot A_{pv}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} & \frac{1 - \eta_{pv} - \eta_{ref}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} \cdot A_{pv} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{air} \\ G_{pv} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\alpha_{air} \cdot \frac{2 \cdot A_{pv}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \alpha_{air} \cdot \frac{2 \cdot A_{pv}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} & \frac{1 - \eta_{pv} - \eta_{ref}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} \cdot A_{pv} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Termelési és fogyasztási adatok tipikusan 15 perces felbontásban érhetőek el. A becslés során is elég ennek az időléptéknek a használata, azonban ehhez az előbb ismertetett folytonos idejű modellt diszkrétizálni kell, ahol a mintavételezési idő az említett 15 perc ($\tau_s = 900s$). A folytonos idejű állapottér modell diszkrétizált paraméteres mátrixai a (4.32) és a (4.33) egyenleteken láthatók.

$$\Phi = e^{\mathbf{A} \cdot \tau_s} = \begin{bmatrix} e^{-\alpha_{air} \cdot \frac{2 \cdot A_{pv}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} \cdot \tau_s} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$\Gamma = \mathbf{A}^{-1} \cdot (e^{\mathbf{A} \cdot \tau_s} - \mathbf{I}) \cdot \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 - e^{-\alpha_{air} \cdot \frac{2 \cdot A_{pv}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} \cdot \tau_s} & \frac{1 - \eta_{pv} - \eta_{ref}}{\alpha_{air} \cdot 2} \cdot \left(1 - e^{-\alpha_{air} \cdot \frac{2 \cdot A_{pv}}{c_{pv} \cdot m_{pv}} \cdot \tau_s} \right) \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

A bemutatásra került, hőmérséklet függő PV modell képes a besugárzott teljesítmény (lejtőre jutó globálsugárzás), és a környezeti adatok (hőmérséklet, szél, felhőzet) alapján számolni egy adott tájolású (orientáció és dőlésszög) PV erőmű termelését a telepítési adatok ismeretében. Megfelelő időjárás előrejelzési adatok felhasználásával becsülhető a várható termelés az adott időszakra.

4.4.1. Időjárás előrejelzési adatok

Az előző fejezetben a felhőzetről nem esett szó, pedig a besugárzott teljesítmény számolásánál a képletek tartalmazzák azt. Ennek oka, hogy az N értékét nehéz egyértelműen meghatározni. A képletben az N a $[0; 1]$ intervallumon vehet fel értéket. Derült időben 0, felhős időben, felhőzettől függően, közelít 1-hez. Azonban az átmenet a két érték között nem teljesen egyértelmű. Egy időjárás előrejelzés esetén nem ezen az intervallumon definiálják a felhőzetet, hanem különböző ikonokkal szemléltetik annak várható nagyságát, esetleg típusát.

Belátható, hogy a felhő magasságának és típusának nagy jelentősége van az N értékének meghatározásánál. Egy összefüggő fátyolfelhőnek kisebb hatása van a globál sugárzásra, mint egy átvonuló gomolyfelhőnek. Ebből is látszik, hogy nem csak az összefüggőség számít, hanem a felhőzet vastagsága is, azonban egy bizonyos vastagság után már kisebb mértékben változik besugárzott teljesítmény. A PV panelek várható teljesítményének becsléséhez időjárás előrejelzési adatok kerültek felhasználásra, amihez szükséges az ott szereplő felhőzetet átszámolni az említett intervallumra.

Az időjárás előrejelzések által felhőzet típusokhoz használt piktogramoknak megfelelő, adat gyűjtésnél használt számértékek:

0	derült
1	enyhén felhős
2	felhős
3	felhős, kevés csapadékkal
4	felhős, sok csapadékkal
5	felhős, zivatarral

Mivel a 4-es és 5-ös felhőzet között már nem sok különbség van a felhőzet vastagságában, és így a besugárzott teljesítményben sem, ezért 4-es értéktől már $N = 1$ értékkel lehet számolni. Az ez alatti felhőzet N -re történő átszámolásához az alábbi, (4.34) összefüggés lett alkalmazva, ahol f_c konvertáló függvény közelíti a modellezéshez szükséges értéket, *cloud* az előrejelzés alapján meghatározott felhőzet száma és a *threshold* az az érték, amitől már $N = 1$ értékkel számol a modell. Jelenlegi számolások esetén *threshold* = 4 érték lett beállítva.

$$N = \begin{cases} f_c(\text{cloud}), & \text{ha } \text{cloud} < \text{threshold} \\ 1, & \text{ha } \text{cloud} \geq \text{threshold} \end{cases} \quad (4.34)$$

Az f_c függvényhez egy koszinuszos képlet került alkalmazásra, mivel a felhőzet nem lineárisan hat a besugárzott teljesítményre, és főként a direkt sugárzásra van hatással. Ezt a képletet szemlélteti az alábbi, (4.35) egyenlet.

$$f_c := -0,5 \cdot \cos\left(\frac{\text{cloud}}{\text{threshold}} \cdot \pi\right) + 0,5 \quad (4.35)$$

Az időjárás előrejelzés adatok a <https://www.wetterzentrale.de> oldalról kerültek legyűjtésre 2019.09.20.-2019.09.24. között. Az oldal választásának oka, hogy Magyarország területére is található előrejelzés, valamint több előrejelzési modell alapján is megtekinthető a következő napokra kalkulált időjárás.

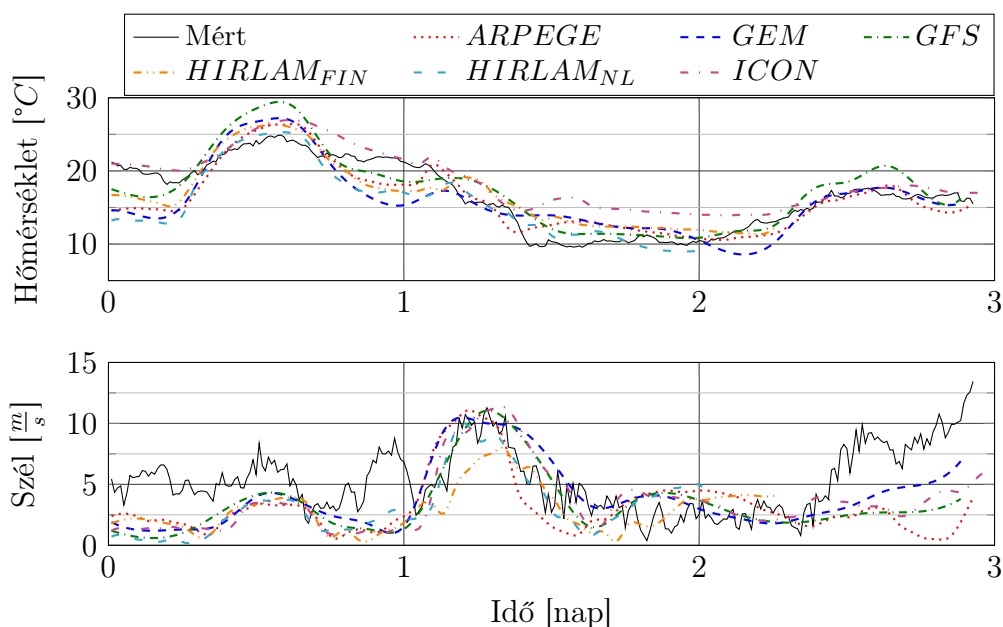
4. NAPENERGIÁBÓL SZÁRMAZÓ VILLAMOS ENERGIA BECSLÉSE IDŐJÁRÁSELŐREJELZÉS ALAPJÁN

Az adatgyűjtés során hat különböző modell előrejelzési adatai kerültek gyűjtésre:

- **GFS** (Global Forecast System)[74]: 3 napos előrejelzés 3 órás felbontásban
- **ICON** (Icosahedral Nonhydrostatic)[75]: 3 napos előrejelzés 1 órás felbontásban
- **ARPEGE** (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle)[76]: 3 napos előrejelzés 1 órás felbontásban
- **GEM** (Global Environmental Multiscale)[77][78]: 3 napos előrejelzés 3 órás felbontásban
- **HIRLAM** (High Resolution Limited Area Model)[79][80]: 2 napos előrejelzés 1 órás felbontásban
 - **HIRLAM_{FIN}**: Finnország, FMI
 - **HIRLAM_{NL}**: Hollandia, KNMI

Az előrejelzések és a modellek ellenőrzéséhez, összehasonlításához a valós adatokkal egy budapesti naperőműről kaptam termelési és időjárás adatokat a kihelyezett időjárásállomásról.

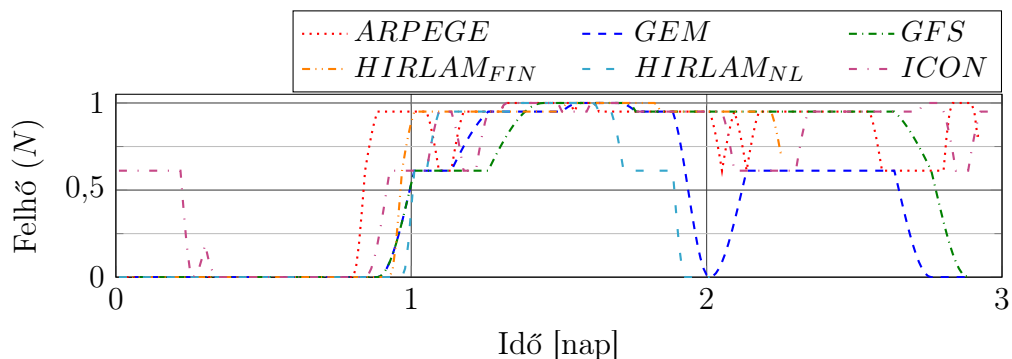
A 4.12. ábra a mért és a 2019.09.21-i előrejelzések által becsült hőmérséklet és szél értékeket ábrázolja. Látható, hogy eltérések a valós és az előre jelzett értékek között inkább a szélesebbnél van, azonban a nagyobb változásokat, csúcsokat jól követik dinamikában az előre jelzett értékek.



4.12. ábra. A mért és az előrejelzett hőmérséklet és szélesebbég hat időjárás előrejelző modell esetén Budapestre nézve 2019.09.21-én

A felhőzet esetén sajnos mért érték nincs, de a 4.13. ábra a (4.34) függvénnyel számolt N értéket ábrázolja az említett időszakra. Szemmel látható,

hogy az eltérés két modell által adott előrejelzés között itt nagyobb, mint a hőmérséklet és a szélsébség esetén.



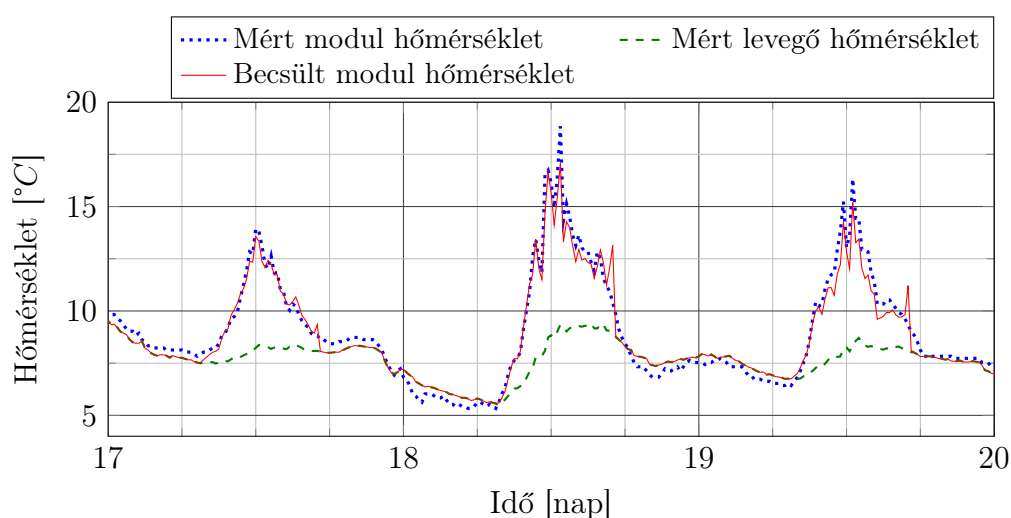
4.13. ábra. Az előrejelzett felhőzet alapján számolt N értéke hat időjárás előrejelző modell esetén Budapestre nézve 2019.09.21-én

Az ismertett időjárás előrejelzések láthatóan pontosan meg tudják állapítani a várható hőmérsékletet. A szélsébség terén már nagyobb eltérések mutatkoznak, de nagyobb változások esetén viszonylag pontosan kalkulálnak. Sajnos a felhőzet előrejelzésében nagy eltérések mutatkoznak a modellek tekintetében és ez nagyban befolyásolja a napelemek termelését, azaz a modell segítségével becsült energiatermelést is.

4.4.2. Hőmérsékletfüggő PV modell verifikálás

A napelem modell verifikálása során a modell a mért valós értékek alapján számolja a megtermelt energia mennyiségét. A modell paraméterezését a valós naperőmű telepítési adatai és adatlapján szereplő értékek figyelembevételével végeztem el (tájolás, felület, hatásfok, stb.). A szimulációknál az előzőekben bemutatott hőmérsékletfüggő napelem modellt alkalmaztam, aminek a bemenete az időjárásállomás által mért horizontális globálsugárzás, szélesség és környezeti hőmérséklet.

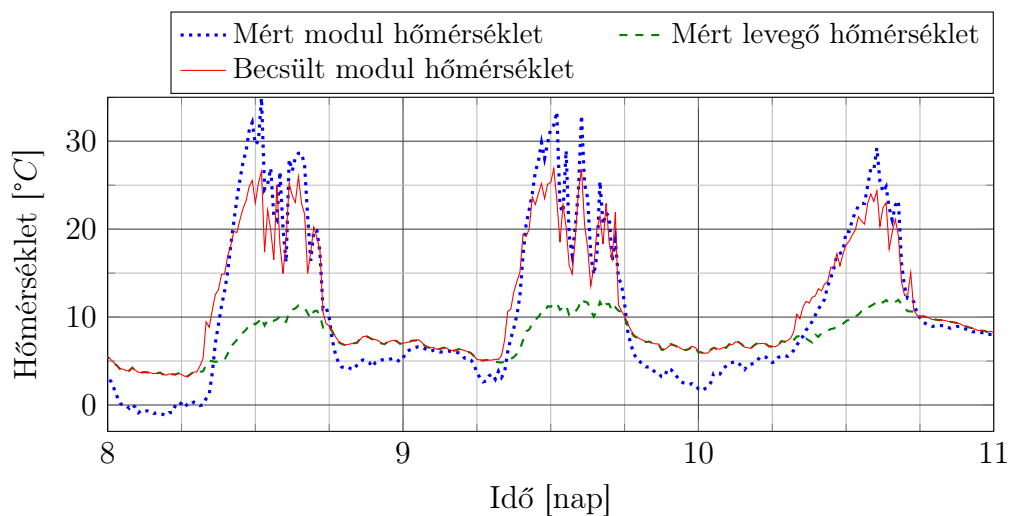
A 4.14. ábrán a mért PV modul és környezeti hőmérséklet látható a modell által becsült hőmérséklettel felhős időben. Jól látszik, hogy a mért és a becsült panelhőmérséklet jól korrelál egymással.



4.14. ábra. Napelem modul mért és becsült hőmérséklete mért időjárási bemenetek használatával felhős időben

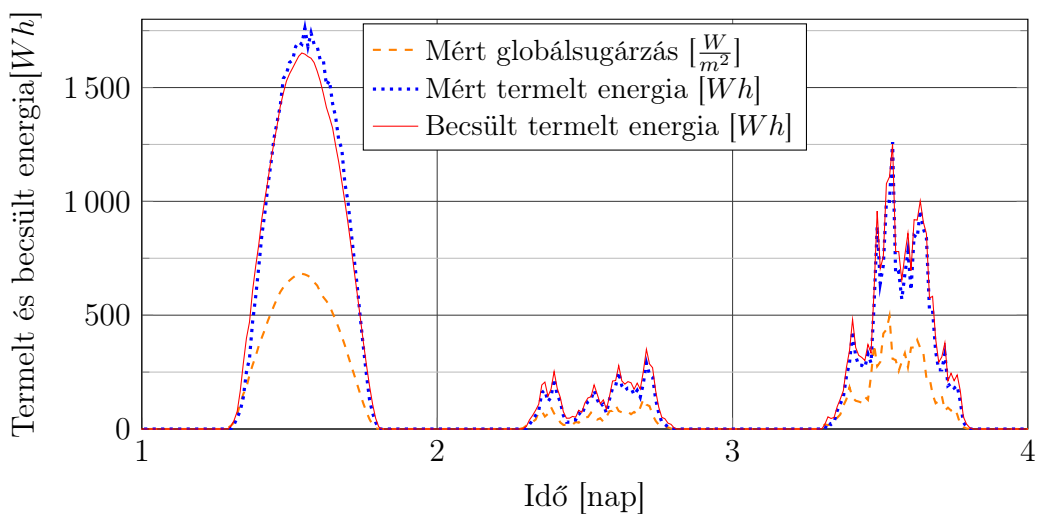
A következő, 4.15. ábrán egy naposabb időszakban mért értékek alapján kapott hőmérsékletek láthatók. Itt megfigyelhető, hogy nagyobb eltérések is vannak az alacsonyabb és a magasabb hőmérsékletek esetében. Azonban, ha megvizsgálva az éjjeli órákat észrevehető, hogy a panel mért hőmérséklete néhány 5°C-kal alacsonyabb, mint a környezet hőmérséklete, ami nem lehetséges. Közepes hőmérséklet tartományon (5°C – 20°C) a mért és a becsült hőmérséklet alig tér el, míg ennél magasabb hőmérsékleten a mért modulhőmérséklet magasabb mint a kalkulált. Az éjszakai alacsonyabb hőmérsékletből arra lehet következtetni, hogy a modul hőmérsékletének mérésére egy nem megfelelően kalibrált eszközt használnak, ami a 10°C – 20°C közti tartományon méri közelítően a valós értéket.

A 4.16. ábrán a mért értékek mint bemenetek segítségével a megtermelt energia került becslésre és összehasonlításra a mért termelési értékekkel. Jól látható, hogy minimális eltérés az első, derült napon a csúcstermelésnél van, de a modell által becsült termelt energia a felhősebb második és harmadik napon is jól követi a ténylegesen termelt energia görbáját. A derült időben az eltérés adódhat a időjárás állomás globálsugárzás mérőjének pontatlanságából,



4.15. ábra. Napelem modul mért és becsült hőmérséklete mért időjárási bemenetek használatával enyhén felhős időben

öregedéséből. Sajnos pontos adatot nem tudtunk kapni a kihelyezett időjárás állomás típusáról, így pontosságáról sem, már évek óta működött a mérések elvégzésekor.



4.16. ábra. Napelem modul mért és becsült termelése mért időjárási bemenetek használatával

A verifikálás során bemutatott eredményeken látszódik, hogy a mért horizontális globálsugárzás, hőmérséklet és szélesebbég adatok felhasználásával a hőmérséklet függő PV modell megfelelően teljesít. Az eltérések oka a mért és a becsült panelhőmérsékletben feltehetően a nem megfelelően kalibrált és így pontatlan hőmérséklet mérésnek tudható be.

4.4.3. Hőmérsékletfüggő PV modell validálás

A verifikálás során látható volt, hogy valós, mért bemenetekkel a PV modell képes közel a ténylegesen termelt energiát megbecsülni. A modell validálása során az időjárás előrejelzések adatainak használatával becsli meg a PV modell a várható termelés mértékét, és ez került összehasonlításra a tényleges termelési értékekkel.

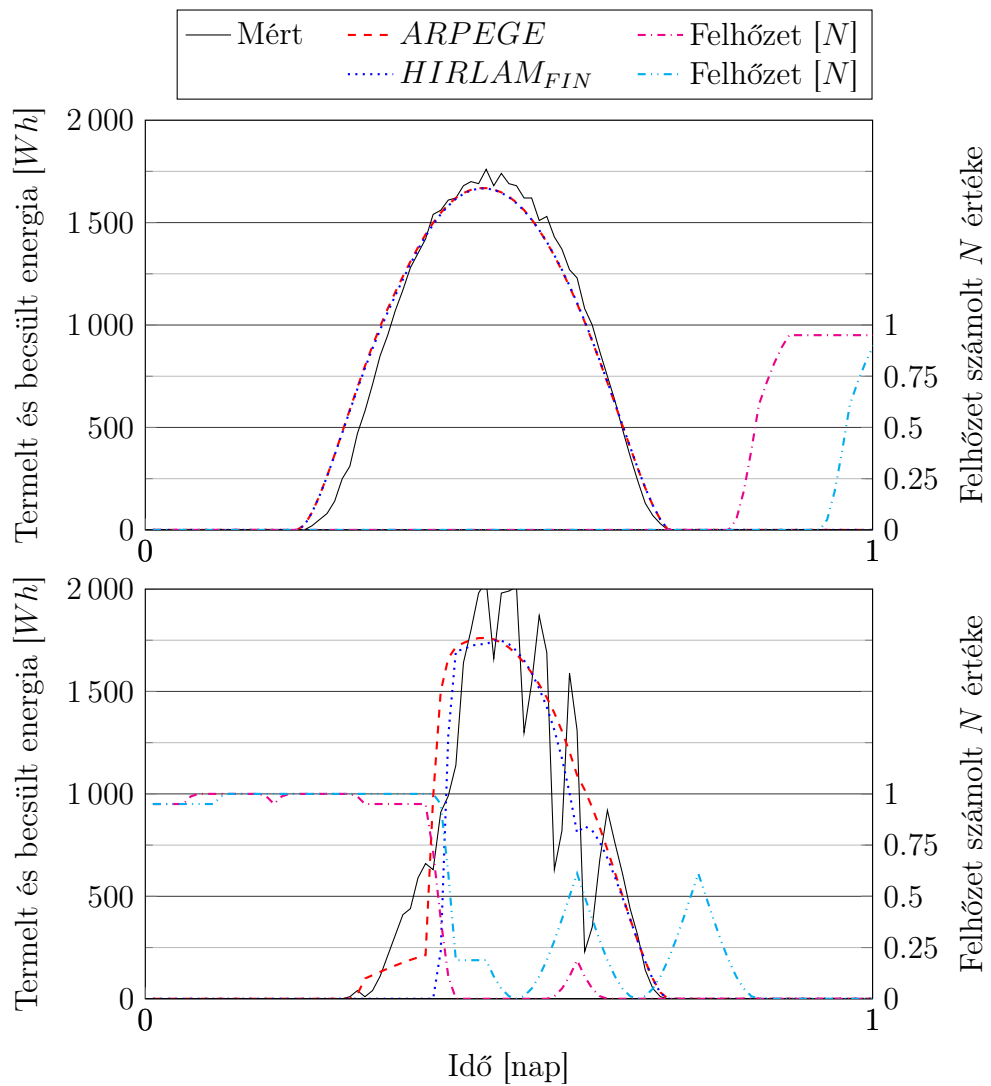
A verifikálás és a validálás között a nagy különbség, hogy mivel verifikálásnál mért adatok a bemenetek, így ott az ismertetett, globálsugárzást számoló összefüggések nem kerültek alkalmazásra, azaz a felhőzetet sem kellett figyelembe venni, hiszen azt a mért globálsugárzás tartalmazta. Validálásnál viszont teljesen az előrejelzés adataira hagyatkozva történik a becslés, azaz tükrözi a modell részegységeinek (PV modell, szorálgeometria, globálsugárzás, felhőzet konvertálás, előrejelzési modell) jóságát is.

A 4.17. ábra szemlélteti egy napos (felső) és egy részben felhős (alsó) napra a becsült termelést két időjárás előrejelzés alapján és a mért termelést, valamint a becsült felhőzet alapján kalkulált N értékét. Említésre került már, hogy az előrejelzések két vagy három napra kalkulálják a várható időjárást, azonban számítások mindig csak az előrejelzés első napjára lettek elvégezve, hiszen ez pontosabb az előrejelzett napok tekintetében. Kivehető, hogy a felső ábrán, napos időben napkelte után a becsült érték kicsit magasabb, mint a tényleges, azonban napnyugtakor a becsült érték követi ténylegesen termelt értéket. Ennek oka valószínűsíthetően az, hogy kelet felől egy tereptárgy (például fa vagy épület) részben árnyékol, és így kisebb a besugárzott teljesítmény. Az ilyen tereptárgyakra a modell jelenlegi verziója nincs felkészítve, így ezeket nem is veszi figyelembe számításokor.

Az alsó ábra viszont ilyen szempontból érdekesebb, hiszen ott egyértelműen látszik, hogy délelőtt felhős volt az idő, ami délután kitisztult és csak felhő átvonulások csökkentik időnként a termelés mértékét. A délelőtti órákban az ARPEGE modell az, ami jobban követi a valós termelést, mivel az előrejelzés során a felhőzetet már ebben az időben ritkábbnak jelezte. A délutáni órákra elmondható, hogy a valós termelési görbén átlagolva az értékeket közel a modell alapján becsült értékeket adná. Sajnos időjárás előrejelzés modellek órára pontosan sem tudják a jelenleg előre kiszámolni a pontos felhőzetet, az ismertetett PV termelés becsülő modell pedig negyed órás felbontással számol.

Az öt napon át hat különböző időjárás előrejelzések alapján gyűjtött becsült időjárási adatokkal futtatott termelés becslések összehasonlítását a mért termeléssel a 4.3. táblázat tartalmazza. Itt is fontos megjegyezni, hogy minden esetben csak az első napra kalkulált előrejelzésekkel futtattam a becsléseket, hogy a két és három napos előrejelzések is összehasonlíthatóak legyenek egymással, valamint minél előbbre jelzik az időjárást, annál pontatlanabb az előrejelzés.

A 4.3. táblázatban az egyes sorok a különböző időjárás előrejelző modellek eredményeinek eltérését mutatják a ténylegesen termelt értéktől a teljes napra nézve Wh -ban és %-ban. Az első öt oszlop az öt nap amikhez az előrejelzések tartoznak, a hatodik oszlop az eltérések átlaga, az utolsó oszlop pedig az eltérések abszolútértékének az átlaga.



4.17. ábra. Napelem modul mért és becsült termelése ARPEGE és HIRLAM_{FIN} időjárási előrejelzések által számolt bemenetek használatával napos (felső) és szakaszosan felhős (alsó) időben

4.3. táblázat. Időjárás előrejelzések alapján becsült és ténylegesen termelt energia összehasonlításának eredményei

	Nap 1 napos	Nap 2 napos	Nap 3 felhős	Nap 4 kicsit felhős	Nap 5 kicsit felhős	Átlag	Abszolút átlag
ARPEGE	-5 737,4 Wh	1 027,3 Wh	-963,8 Wh	2 935,9 Wh	1 220,6 Wh	-303,5 Wh	2 377,0 Wh
	-12,27 %	2,15 %	-16,94 %	14,17 %	3,31 %	-1,92 %	9,77 %
GEM	656,8 Wh	878,2 Wh	4 114,4 Wh	14 930,0 Wh	-8 938,7 Wh	2 328,1 Wh	5 903,6 Wh
	1,40 %	1,83 %	72,31 %	72,05 %	-24,26 %	24,67 %	34,37 %
GFS	1 931,9 Wh	711,9 Wh	-3 501,0 Wh	-13 813,0 Wh	-22 365,0 Wh	-7 407,0 Wh	8 464,6 Wh
	4,13 %	1,49 %	-61,53 %	-66,60 %	-60,69 %	-36,64 %	38,89 %
HIRLAM _{FIN}	1 606,2 Wh	880,9 Wh	-1 031,4 Wh	-10 432,0 Wh	-4 165,5 Wh	-2 628,4 Wh	3 623,2 Wh
	3,43 %	1,84 %	-18,13 %	-50,35 %	-11,30 %	-14,90 %	17,01 %
HIRLAM _{NL}	-2 248,6 Wh	1 082,0 Wh	-4 117,4 Wh	11 222,0 Wh	-2 117,6 Wh	764,1 Wh	4 157,5 Wh
	-4,81 %	2,26 %	-72,36 %	54,16 %	-5,75 %	-5,30 %	27,87 %
ICON	-28 650,0 Wh	579,3 Wh	1 195,5 Wh	-13 910,0 Wh	-6 746,9 Wh	-9 506,4 Wh	10 216,3 Wh
	-61,27 %	1,21 %	21,01 %	-67,13 %	-18,31 %	-24,90 %	33,79

Látható, hogy az első két napon derült idő volt, ahol az eltérések pár százalékos értéket mutatnak, kivéve az első napon az ARPEGE és az ICON esetében. Erre a napra ezek az előrejelző modellek kalkuláltak felhőzetet is, így nagy eltérést mutatnak a tényleges termeléstől. Az utolsó három nap felhős volt. Ezeken a napokon az ARPEGE egyenletesen jól teljesített, de a többi modell előrejelzésénél is található elvétve jól teljesítő becslés.

Megnézve a hatodik oszlopot látható, hogy az ARPEGE teljesített a legjobban, mindössze -1,92% eltéréssel az öt nap alatt. Ezt követi a HIRLAM_{NL} előrejelzés -5,3%-kal. Ez az oszlop akkor szemlélteti a kapott eredmények jóságát, ha arra vagyunk kíváncsiak, hogy egy adott időszakban mennyi energiát fogunk megtermelni, de annak eloszlása nem fontos, például szaldó elszámolás esetén.

Az utolsó oszlop adatai az eltérések abszolútértékeinek az átlaga szerepel. Látható, hogy itt is az ARPEGE teljesített a legjobban és a HIRLAM_{FIN} követi. Ez az oszlop akkor fontos, ha a szolgáltatónak előre le kell adni a napközben termelt energia ütemtervét, és az attól való eltérés alapján számíthat fel egyéb költségeket.

A táblázat alapján elmondható, hogy az időjáráselőrejelző modell függvényében pontosan meghatározható a várható megtermelt energia a bemutatott hőmérséklet függő PV modellel. Sajnos a pontosságot nagyban befolyásolja felhőzet, ami a jelenleg használt időjáráselőrejelzéseknél az egyik legnehezebben meghatározható változója az időjárásnak.

Az itt bemutatott, az időjárás előrejelzési adatok felhasználásával végzett validálás megfelelő eredményt mutat bizonyos időjárás előrejelzések esetén. Sajnos pontos előrejelzést a felhőzetre nehéz találni, és ez nagy befolyással van a becsült energiatermelés jóségára is.

4.5. Összefoglalás

A 4. fejezetben egy, a PV erőművek energia termelésének becsléséhez szükséges számításokat és modellt ismertettem. Az irodalomban megtalálható szoláargeometria (4.1. fejezet) és a Nap magassági szögének (4.2. fejezet) számításainak a bemutatása után ismertetésre került egy, a horizontális felületre érkező globálsugárzás számítási módszer (4.3. fejezet). Prezentáltam egy saját módszert a lejtőre érkező napsugarak hajlásszögének számítására, ami a lejtő síkjának egy normálvektorának és a napsugarak irányvektorának hajlásszögén alapszik ((4.19) formula). Az így kapott eredményeket verifikáltam (4.3.1. fejezet).

A 4.4. fejezetben leírásra került egy saját, a napelem hőmérsékletét is figyelembe vevő, besugárzott teljesítmény, környezeti hőmérséklet és szélesebség alapján energiatermelést számoló PV modell. A termelés előre becsléséhez röviden ismertettem a használt időjáráselőrejelzési modelleket (4.4.1. fejezet), ahol javasoltam egy, az időjárás előrejelzéseknél használt felhőzet jelölésének N -re konvertálását végző függvényt ((4.34)-(4.35) egyenletek).

Az általam javasolt PV modell mért adatokkal történő verifikálását (4.4.2. fejezet) és időjárás előrejelzés adatokkal történő validálását (4.4.3. fejezet) elvégeztem. Az összefoglaló táblázatban (4.3. táblázat) szereplő adatok szemléltetik, hogy napos időben az eltérés minimális, amennyiben az előrejelzésben is derült idő szerepelt. Felhős idő esetén az aktuális pontos termelés becslése a jelenlegi előrejelzések alapján nem megoldható, azonban a napi várható termelés kellő pontossággal becsülhető az előrejelzésben szereplő felhőzet függvényében.

5. fejezet

Elért eredmények

5.1. Új tudományos eredmények

Az értekezésben bemutatott módszerek és eredmények alapján a saját munka és elért eredmények összefoglalása az alábbiakban olvasható.

I.1 tézis *Az általam javasolt és megvalósított heurisztikus modell prediktív irányításon alapuló ütemező algoritmus képes egyszerű dinamikával rendelkező rendszer költségoptimális ütemezésére gyorsan futtatható számítások mellett.* [S2], [S1]

A 3.1. fejezetben a modellezési szabályokat figyelembe véve megvalósítottam egy egyszerű dinamikával leírható hűtőgép állapotter reprezentációját. Az így kapott modellhez a 3.3.1. és 3.3.2. fejezetben bemutattam a hűtőgép modellhez költségoptimális ütemezési eljárásokat, ahol az általam megfogalmazott heurisztikák felhasználásával elkészítettem és alkalmaztam egy modell prediktív irányításon alapuló heurisztikus ütemező algoritmust. Az elért eredményeim szemléltetik, hogy egy általános célú MPC (Matlab, MPT toolbox) algoritmushoz képest futási időben nagyságrendekkel jobb eredményeket produkál a kifejlesztett algoritmusom a heurisztikáknak köszönhetően, továbbá a költség terén is kisebb költséget képes elérni.

További előnye, hogy a heurisztikus szabályaimnak köszönhetően a ciklusidő csökkent, így az előrelátás (horizont mérete) sokkal nagyobb is lehet a prezentált algoritmusom használata esetén. Ennek köszönhetően változó energiaárakkal rendelkező piac (DAM) mellett is képes az algoritmusom a költségoptimális szabályozásra megfelelő rendszermodell használatával.

I.2 tézis *Az általam bemutatott heurisztikus modell prediktív irányításon alapuló algoritmust kiegészítve adaptív funkcióval megvalósítottam egy olyan algoritmust, ami a működés közben változó rendszerparaméter esetén is a költségoptimális ütemezést biztosítja. [S3], [S4]*

A 3.3.3. fejezetben hűtőgépre bemutatott működése a heurisztikus ütemező algoritmusomnak megváltozott hőkapacitás mellett felvetette a problémát, hogy habár az egyszerű, heurisztikával rendelkező algoritmusom képes az előírt korlátok között üzemeltetni a hűtőgépet, azonban a hőkapacitás megnövekedésével nem lesz költségoptimális ez az ütemezés. Ezen probléma megoldására kiegészítettem az algoritmust egy adaptív résszel, ami detektálja a megváltozást a rendszer dinamikájának, és a dinamikai tulajdonságait figyelembe véve a rendszernek megbecsüli az éppen aktuális hőkapacitását a rendszernek. Az így kapott, hőkapacitásra nézve adaptivitással kiegészített, adaptív heurisztikus modell prediktív irányításon alapuló ütemező algoritmusom képes az időnként megváltozó hőkapacitás mellett is a működési költség optimalizálására.

A 3.3.4. fejezetben fagyasztóláda modelljének segítségével teszteltem az ütemező algoritmusom adaptív verziójának megfelelő működését egy hasonló dinamikával rendelkező rendszeren. A kapott eredményeim szemléltetik, hogy az algoritmusom az adaptív ütemezésnek köszönhetően 5 perces kapcsolási időkkal is jobb eredményt ért el, mint az 1 másodperces léptékű hagyományos hisztérezises *on/off* szabályzó. Továbbá az adaptív verziója az algoritmusomnak a nem adaptív verzióval szemben is képes további költséget megtakarítani.

II. tézis *Az általam megalkotott hőmérséklet függő, szolárgeometriai elveken alapuló PV panel modell alapján előre becsülhető a várható energiatermelés megfelelően pontos időjárás előrejelzés használata esetén. [S5], [S6]*

A 4.1., 4.2. és 4.3. fejezetekben bemutatott irodalomból származó és általam javasolt számítások használatával felépítettem egy modellt, ami egy tetszőleges lokalizáción képes meghatározni egy adott nap folyamán a Nap pozícióját az égbolton. Ezt felhasználva a modellem képes a vízszintes felületre és egy ettől eltérő, adott paraméterű síkra a globálsugárzásból eredő szoláris energiát meghatározni egységnyi felületre. A modell validálását elvégeztem, az eredményeket bemutattam.

A 4.4. fejezetben ismertett hőmérséklet függő PV modell használatával mért időjárási (hőmérséklet, szél, globálsugárzás) és termelési adatokkal a modell verifikálását elvégeztem. A PV modellem segítségével megfelelő időjárási előrejelzések alapján előre becsülhető egy PV erőmű várható termelése. A modell tesztelését elvégeztem több időjárási előrejelzési modell adatait használva és a kapott eredmények alapján a modellem működőképessé.

5.2. Alkalmazási területek

Heurisztikus MPC algoritmus Felhasználható, a már leírtaknak megfelelően, a működés során elfogyasztott energia árának csökkentésére előre ismert energiaárak (DAM) mellett. Az algoritmus nem csak a dolgozatban bemutatott berendezésekre (hűtőgép, fagyasztóláda) működik, hanem a háztartásban

is megtalálható egyéb egyszerű dinamikával rendelkező berendezésekre is (légkondicionáló, villanybojler, hőszivattyús fűtés).

Hőmérsékletfüggő PV modell A paraméterek változtatásával előre megállapítható, hogy egy adott paraméterekkel rendelkező erőmű az év során mennyi energiát fog várhatóan termelni az előző évek időjárásának figyelembe vételével. Továbbá alkalmazható egy telepítés előtt álló erőmű esetén az egyes paraméterek megválasztása (optimális dőlésszög, termelés éves eloszlásának számítása) során.

Energia menedzsment Az ismertetett módszerek kombinálásával segíthető egy mikrogrid hálózat energia managementjének a tervezése sziget üzemű működtetés esetén. Segítség lehet az energiatároló egységek méretezésében (kapacitás, teljesítmény) a várható megtermelt energia, és a fogyasztók várható fogyasztási értékei alapján.

5.3. Továbbfejlesztési lehetőségek

A dolgozatban ismertetett eredményeim nem a kutatási tevékenység végét jelentik, azokat az alábbi kutatási irányokban tudom tovább folytatni:

Heurisztikus MPC algoritmus A dolgozatban említett, de még nem ismertetett berendezések modellezése, és a heurisztikák kiterjesztése, átgondolása, továbbfejlesztése az algoritmus gyors és univerzális működése céljából. Több eszköz egyszerre történő párhuzamos ütemezése a heurisztikus MPC algoritmussal a villamos hálózat tehermentesítésére és a több berendezés egyszerre történő bekacsapoláskor tapasztalható rövid csúcsfogyasztások elkerülése miatt.

Több, egy lokális részhálózaton (mikrogriden) lévő eszközt összekapcsolni, és egyszerre vezérelni, így a megújuló energiaforrások által lokálisan megtermelt többlet energiát elfogyasztani, minimalizálni annak betáplálását a nagy- vagy középvezetési hálózat irányába.

Hőmérsékletfüggő PV modell További, PV erőmű termelését befolyásoló időjárási adatok figyelembevétele (csapadék, köd, szélirány) a modell bemene-ténél, amik javítják a modellt, és így a becslés pontosságát.

Tereptárgyak (fa, épület) és telepítési paraméterek (sортávolság, dőlésszög) figyelembevétele a termelés becslésénél.

Energia menedzsment A becsült termelési és mért fogyasztási adatok alapján a szükséges tárolókapacitás és teljesítmény méretezésének becslése a kivitelezéshez.

Energia management készítése az ismert rendszer és az időjárási előrejelzések figyelembe vételével a megtermelt megújuló energia elfogyasztására.

5.4. Saját publikációk

- [S1] **R. Bálint**, A. Magyar és K. M. Hangos, “Cost-optimal model predictive scheduling of home appliances”, *IFAC-PapersOnLine*, 50. évf., 1. sz., 3344–3349. old., 2017.
- [S2] **R. Bálint** és A. Magyar, “Refrigerator optimal scheduling to minimise the cost of operation”, *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 44. évf., 2. sz., 99–104. old., 2016.
- [S3] **R. Bálint**, K. M. Hangos és A. Magyar, “Optimal scheduling of a household refrigerator using adaptive model predictive technique”, *Power Electronics (Ee), 2017 International Symposium*, IEEE, 2017, 1–6. old.
- [S4] **R. Bálint**, A. Fodor, K. M. Hangos és A. Magyar, “Cost-optimal model predictive scheduling of freezers”, *Control Engineering Practice*, 80. évf., 61–69. old., 2018 (IF: 3,232).
- [S5] **R. Bálint**, A. Fodor, I. Szalkai, Z. Szalkai és A. Magyar, “Modeling and calculation of the global solar irradiance on slopes”, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 47. évf., 1. sz., 57–63. old., 2019.
- [S6] **R. Bálint**, A. Fodor és A. Magyar, “Model-based power generation estimation of solar panels using weather forecast for microgrid application”, *Acta Polytechnica Hungarica*, 16. évf., 7. sz., 149–165. old., 2019 (IF: 1,286).

5.5. Tézisekhez nem kapcsolódó publikációk

- [E1] A. Fodor, **R. Bálint**, A. Magyar és G. Szederkényi, “Stability and Parameter Sensitivity Analyses of an Induction Motor”, *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 42. évf., 109–113. old., 2014.
- [E2] **R. Bálint** és I. Vassányi, szerk., *XXXIII. OTDK Informatika Tudományi Szekció*. Pannon Egyetem Műszaki Informatikai Kar, 2017.
- [E3] I. Szalkai és **R. Bálint**, “A másod- és harmadfokú egyenletek nomogramjai”, *Haladvány Kiadvány*, 2017. évf., 1–16. old., 2017.
- [E4] R. Nagy, **R. Bálint**, I. Nagy, P. Csuti, F. Szabó és A. Fodor, “Fényforrások szinképi teljesítmény eloszlásának változása a bemeneti feszültség függvényében”, *ENELKO 2019 SzámOkt 2019*, 2019, 69–72. old.

Jelölésjegyzék

\mathbf{A}	:	folytonos idejű állapotmátrix
A_d	:	pozíciófüggő konstans
a_d	:	pozíciófüggő konstans
\mathbf{A}_{off}	:	folytonos idejű állapotmátrix kikapcsolt állapotban
\mathbf{A}_{on}	:	folytonos idejű állapotmátrix bekapcsolt állapotban
A_{pv}	$[m^2]$:	PV panelek teljes felülete
a_w	:	szél hatását befolyásoló konstans
\mathbf{B}	:	folytonos idejű bemenetmátrix
b_d	:	pozíciófüggő konstans
B_d	:	pozíciófüggő konstans
\mathbf{B}_{off}	:	folytonos idejű bemenetmátrix kikapcsolt állapotban
\mathbf{B}_{on}	:	folytonos idejű bemenetmátrix bekapcsolt állapotban
\mathbf{C}	:	folytonos idejű kimenetmátrix
C_a	$\left[\frac{kJ}{^\circ C}\right]$:	hűtő belső légterének a hőkapacitása
C_a^{max}	$\left[\frac{kJ}{^\circ C}\right]$:	hűtő belső légterének a maximális hőkapacitása
C_a^{min}	$\left[\frac{kJ}{^\circ C}\right]$:	hűtő belső légterének a minimális hőkapacitása
c_{Al}	$\left[\frac{kJ}{^\circ C \cdot kg}\right]$:	PV panel alumínium szerkezetének fajlagos hőkapacitása
c_{glass}	$\left[\frac{kJ}{^\circ C \cdot kg}\right]$:	PV panel üvegének fajlagos hőkapacitása
$c_{plastic}$	$\left[\frac{kJ}{^\circ C \cdot kg}\right]$:	PV panel műanyag szerkezetének fajlagos hőkapacitása
c_{pv}	$\left[\frac{kJ}{^\circ C \cdot kg}\right]$:	PV panel fajlagos hőkapacitása
c_{Si}	$\left[\frac{kJ}{^\circ C \cdot kg}\right]$:	PV panel félvezető részének fajlagos hőkapacitása
C_w	$\left[\frac{kJ}{^\circ C}\right]$:	hűtött hátfal hőkapacitása
D_{hor}	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$:	diffúz szolár besugárzás
d_n	:	a 365 napos év n -edik napja

D_{pv}	$[\frac{W}{m^2}]$:	diffúz szolár besugárzás a PV panel síkjára
E_0	:	relatív Nap-Föld távolság reciproknégyzete
E_t	[perc]:	equation of time értéke
f	:	konstans bemenet vagy zavarás MPT-t használva
$f_c(\text{cloud})$	:	előrejelzett felhőzetből N értéket számoló függvény
G_{hor}	$[\frac{W}{m^2}]$:	globális szolár besugárzás
G_{pv}	$[\frac{W}{m^2}]$:	globális szolár besugárzás a PV panel síkjára
h	[°]:	Nap óraszöge
H	[óra]:	előretálás (horizont) mérete órában ($\tau_s \cdot n_h$)
I_0	$[\frac{W}{m^2}]$:	szoláris állandó
I_n	$[\frac{W}{m^2}]$:	korrigált szoláris állandó
K_c	$[\frac{kW}{^\circ C}]$:	hővezetés a környezet és a hűtő közeg között
K_o	$[\frac{kW}{^\circ C}]$:	hővezetés a belső levegő és a környezet között
K_w	$[\frac{kW}{^\circ C}]$:	hővezetés a belső levegő és a hűtött hátfal között
K_x	$[\frac{kW}{^\circ C}]$:	hővezetés a környezet és a hűtött fal között
l_{atm}	[m]:	fény úthossza az atmoszférában
m_{Al}	[kg]:	PV panel szerkezetének súlya
m_{glass}	[kg]:	PV panel üvegének súlya
$m_{plastic}$	[kg]:	PV panel műanyag szerkezetének súlya
m_{pv}	[kg]:	PV panel súlya
m_{Si}	[kg]:	PV panel félvezető részének súlya
N	:	felhőzet paraméter
n_h	:	előrelátás mérete mintavételi időben nézve
$p(t)$	$[\frac{€}{kWh}]$:	energiaár időfüggvénye
P_{pv}	[kW]:	PV panelek villamos teljesítménye
q	:	tiszta égbolt fényáteresztő képessége
Q_u	:	u bemenetvektor büntetésmátrixa MPT megoldó esetén
Q_x	:	x állapotvektor büntetésmátrixa MPT megoldó esetén
r	[AU]:	aktuális Nap-Föld távolság
r_0	[AU]:	Nap-Föld középtávolság
R_c	[Ω]:	K_c reciprokával ekvivalens ellenállásérték
r_{Earth}	[m]:	Föld felszín sugarának a középértéke
R_{Earth}	[m]:	Föld atmoszférával vett sugarának a középértéke

R_o	[Ω]: K_o reciprokával ekvivalens ellenállásérték
R_w	[Ω]: K_w reciprokával ekvivalens ellenállásérték
R_x	[Ω]: K_x reciprokával ekvivalens ellenállásérték
S	: bináris állapotkapcsoló
S_{hor}	[$\frac{W}{m^2}$]: direkt szolár besugárzás
S_{pv}	[$\frac{W}{m^2}$]: direkt szolár besugárzás a PV panel síkjára
T_a	[$^{\circ}C$]: belső levegő hőmérséklete
T_a^{max}	[$^{\circ}C$]: belső levegő maximum hőmérséklete
T_a^{min}	[$^{\circ}C$]: belső levegő minimum hőmérséklete
T_m	: homályossági tényező
T_o	[$^{\circ}C$]: környezet hőmérséklete
T_{pv}	[$^{\circ}C$]: PV panelek hőmérséklete
T_{TC}	[$^{\circ}C$]: PV panel hőmérséklete az értékek mérése során (Test Condition)
t_{UTC}	: idő UTC 0 időzóna szerint
T_w	[$^{\circ}C$]: hűtött hátfal hőmérséklete
T_w^{max}	[$^{\circ}C$]: hűtött hátfal maximum hőmérséklete
T_w^{min}	[$^{\circ}C$]: hűtött hátfal minimum hőmérséklete
\mathbf{u}	: bemenetvektor
U_a	[V]: feszültség megfelelője a belső levegő hőmérsékletnek
U_c	[V]: feszültség megfelelője a hűtött hátfal minimum hőmérsékletének
\mathbf{u}_k	: bemenetvektor értéke a k -adik pillanatban diszkrét rendszer esetén
U_o	[V]: feszültség megfelelője a környezet hőmérsékletnek
U_w	[V]: feszültség megfelelője a hűtött hátfal hőmérsékletnek
v_{wind}	[$\frac{m}{s}$]: szélsébség
\mathbf{x}	: állapotvektor
\mathbf{x}_k	: állapotvektor értéke a k -adik pillanatban diszkrét rendszer esetén
z	: fény relatív úthossza az atmoszférában

JELÖLÉSJEGYZÉK

α	[°]: Nap magassági szöge
α_0	: levegő és PV panel közti hőátadási tényező szélcsendben
α_{air}	: PV panel és levegő közti hőátadás
α_{surf}	[°]: Nap magassági szöge a PV panel síkjához képest
β	[°]: PV panel síkjának a dőlésszöge
γ	[°]: PV panel síkjának az azimut szöge
Γ_{off}	: diszkrét idejű bemenetmátrix kikapcsolt állapotban
Γ_{on}	: diszkrét idejű bemenetmátrix bekapcsolt állapotban
δ	[°]: Nap deklinációja
η_{coef}	: PV panel hatásfokváltozása a hőmérséklet megváltozására
η_{pv}	: PV panelek hatásfoka
η_{refl}	: PV panel reflexiója
η_{nom}	: PV panel hatásfoka az adatlapon a mérések során
Θ_{surf}	[°]: Nap zenitszöge a PV panel síkjához képest
Θ_z	[°]: Nap zenitszöge
Σ	: állapotter modell
Σ_{off}	: állapotter modell kikapcsolt esetben
Σ_{on}	: állapotter modell bekapcsolt esetben
τ_s	[s]: mintavételezési idő
Φ_{off}	: diszkrét idejű állapotmátrix kikapcsolt állapotban
Φ_{on}	: diszkrét idejű állapotmátrix bekapcsolt állapotban
Φ_{lat}	[°]: szélességi koordináta
Φ_{long}	[°]: hosszúsági koordináta
ψ	[°]: Nap azimutszöge

Rövidítésjegyzék

ARPEGE:	Action de Recherche Petite Echelle Grange Echelle model
AU:	Astronomical Unit
B&B:	Branch and Bound
DAM:	Day-Ahead Market
DSM:	Demand Side Management
DSO:	Distribution System Operator
DT-LTI:	Discrete Time Linear Time Invariant
GEM:	Global Environmental Multiscale model
GFS:	Global Forecast System
HIRLAM:	High Resolution Limited Area Model
ICON:	Icosahedral Nonhydrostatic model
LTI:	Linear Time Invariant
MCU:	Micro-Controller Unit
MPC:	Model Predictive Control
MPT:	Multi-Parametric Toolbox
PV:	Photovoltaic
PVPP:	Photovoltaic Power Plant
PWA:	Piecewise Affin
RES:	Renewable Energy Sources
TSO:	Transmission System Operator
VPP:	Virtual Power Plant

Ábrák jegyzéke

1.1.	Villamos energiaátviteli rendszer vázlatos rajza	5
1.2.	MAVIR által becsült és a mért valós naperőmű termelés	8
2.1.	Folytonos idejű rendszer és annak bemeneti és kimeneti jelei . . .	12
2.2.	Kapcsolat a folytonos és a diszkrét idejű rendszerek között . . .	15
2.3.	Model prediktív irányítás	22
2.4.	Model prediktív irányítás algoritmusának működése	23
3.1.	Hűtőgép sematikus felépítése a főbb részegységek feltüntetésével	26
3.2.	Hűtőgép működésének felírása áramköri elemekkel villamos áramkörrel való modellezéshez.	30
3.3.	Energiaárak változása DAM esetén egy hétre.	34
3.4.	Cilusok futási ideje és kombinációk száma az egyes iterációkban $n_h = 13$ esetén	37
3.5.	Ciklusok futási ideje egyes iterációkban MPT toolbox (kék pontozott) és saját heurisztikus <i>B&B</i> (piros szaggatott) algoritmus esetén	42
3.6.	A T_a és T_w hőmérsékletek és az óránkénti villamos energia ár a heurisztikus MPC algoritmus alkalmazásával	43
3.7.	. . . . .	45
3.8.	. . . . .	47
3.9.	. . . . .	52
3.10.	Mért és modell által számolt hőmérsékletek a 3.8 táblázatban szereplő paraméterek használatával	54
3.11.	A K_o és C_a paraméterekre vonatkozó szintgörbék	55
3.12.	. . . . .	56
3.13.	. . . . .	58
4.1.	Energiatúltermelés hatása a villamos energia árára 2019.04.22-én. Teljes oldalas ábrában megtekinthető a Függelék fejezetben a 7. ábrán a 109. oldalon.	63
4.2.	A (4.1) képlettel számolt E_0 érték a teljes évre nézve	64
4.3.	A (4.3) képlettel számolt δ értéke az év folyamán	65
4.4.	Az E_t értéke a (4.4) képlettel számolva, valamint a tényleges értéke a 2018-as évben	66
4.5.	A Nap pályája az égbolton, és a pozíciójához tartozó szögek . . .	67

4.6.	Napsugár vetületének megnyúlása a magassági (α) szög függvényében	69
4.7.	Napsugár úthossza az atmoszférában (l_{atm}) a magassági szög (α) függvényében	70
4.8.	A (4.14)-(4.16) képletek alapján számolt globálsugárzás értéke egységnyi felületre Veszprémben egy teljes évben heti felbontásban és az analemmagörbe az asztronómiai dél értékek alapján	71
4.9.	Az egyenesek és szögek kapcsolatai a β dőlésszöggel és γ orientációval rendelkező síkon, lejtőn	72
4.10.	Számolt globál sugárzás értéke Veszprémben március 1-én különböző tájolásokkal	74
4.11.	Számolt globál sugárzás értéke Veszprémben július 1-én különböző tájolásokkal	75
4.12.	A mért és az előrejelzett hőmérséklet és szélsősebesség hat időjárás előrejelző modell esetén Budapestre nézve 2019.09.21-én	80
4.13.	Az előrejelzett felhőzet alapján számolt N értéke hat időjárás előrejelző modell esetén Budapestre nézve 2019.09.21-én	81
4.14.	Napelem modul mért és becsült hőmérséklete mért időjárás bemenetek használatával felhős időben	82
4.15.	Napelem modul mért és becsült hőmérséklete mért időjárás bemenetek használatával enyhén felhős időben	83
4.16.	Napelem modul mért és becsült termelése mért időjárás bemenetek használatával	83
4.17.	Napelem modul mért és becsült termelése ARPEGE és HIRLAM _{FIN} időjárás előrejelzések által számolt bemenetek használatával napos (felső) és szakaszosan felhős (alsó) időben	85
1.	2017_05_01	103
2.	2017_10_29	104
3.	2017_12_24	105
4.	2018_01_01	106
5.	2018_05_01	107
6.	2019_01_01	108
7.	2019_04_22	109
8.	2019_06_08	110
9.	2019_12_08	111
10.	2020_02_16	112

Táblázatok jegyzéke

3.1.	A horizont méretének hatása a futási időre nézve	37
3.2.	Algoritmus futási ideje 24 órás és 4 órás horizont esetén	44
3.3.	Működési költségek és ütemezéshez szükséges idő különböző horizontméretek (H) mellett	44
3.4.	MPT és heurisztikus B&B ütemező algoritmusok futási idejének és a kapott költségek összehasonlítása $H = 1$ óra esetén egy napra	45
3.5.	Üzemeltetési költség megtakarítás különböző algoritmusok alapján [66]	46
3.6.	A rendszer \tilde{C}_a hőkapacitás változásának a hatása az üzemeltetési költségre [€/kW]-ban $H = 2$ óra esetén	48
3.7.	Aktuális C_a becslésének ideje intervallum felezés használatával .	50
3.8.	Becsült fagyasztólada paraméterek	54
3.9.	Szimulációs idő másodpercben a hét napjaira különböző horizontméret használata mellett, valamint az utolsó sorban, hogy az adott napon hányszor emelkedik az energia ára	56
3.10.	Költségek heurisztikus MPC és normál hiszterézises szabályozás esetén állandó $C_a = C_a^{min}$ mellett	57
3.11.	Napi üzemeltetési költségek [€/kW]-ban $H = 2$ óra esetén nem adaptív és adaptív MPC használatával.	58
4.1.	Magyarország naperőműveinek teljesítménye MW-ban 2007-től az IRENA statisztikai alapján	62
4.2.	Homályossági tényező értékei a levegő minősége és a területi elhelyezkedés alapján	70
4.3.	Időjárás előrejelzések alapján becült és ténylegesen termelt energia összehasonlításának eredményei	86

Függelék

Bojler dinamika

A bojler energiamérlegén alapuló egyenlet:

$$C_{water} \cdot \frac{dT_{water}}{dt} = K_{heat} \cdot (T_{heat} - T_{water}) \cdot S + K_o \cdot (T_o - T_{water}) \quad (5.1)$$

A (5.1) egyenlet rendezve T_{water} víz hőmérsékletre:

$$\frac{dT_{water}}{dt} = \frac{-K_{heat} \cdot S - K_o}{C_{water}} \cdot T_{water} + \frac{K_{heat} \cdot T_{heat}}{C_{water}} \cdot S + \frac{K_o}{C_{water}} \cdot T_o \quad (5.2)$$

A (5.2) alapján bekapcsolt esetben a (5.3) és kikapcsolt esetben a (5.4) egyenletek írják le a bojler dinamikáját.

$$[\dot{T}_{water}] = \left[-\frac{K_{heat} + K_o}{C_{water}} \right] \cdot [T_{water}] + \left[\frac{K_{heat} \cdot T_{heat}}{C_{water}} \quad \frac{K_o}{C_{water}} \right] \cdot \begin{bmatrix} S \\ T_o \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$[\dot{T}_{water}] = \left[-\frac{K_o}{C_{water}} \right] \cdot [T_{water}] + \left[0 \quad \frac{K_o}{C_{water}} \right] \cdot \begin{bmatrix} S \\ T_o \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

A fentiek alapján látható, hogy a bojlerben tárolt víz hőmérsékletének megváltozása függ annak aktuális T_{water} hőmérsékletétől, a fűtőszál T_{heat} hőmérsékletétől és a T_o környezeti hőmérséklettől. A megváltozás mértéke ezen hőmérsékletek viszonyától függ mind pozitív (T_{water} nő), mind negatív irányban (T_{water} csökken), azaz a dinamika sebessége előjelfüggetlen.

Ezek alapján kijelenthető, hogy a 3. fejezetben ismertetett MPC alapú heurisztikus ütemező algoritmus módosítás nélkül alkalmazható elektromos bojlerre, amennyiben a fenti modellben szereplő (T_{water} , T_{heat} , T_o) hőmérsékleteket -1-gyel megszorozzuk. Ezzel a módszerrel a bojler vizének megfelelő hőmérsékleten tartását egyszerűen lehet konvertálni "hűtési" problémára, mivel így a dinamika iránya megegyezik egy hűtőgép dinamikájának.

Bojler működési elvárások példa

- A víz hőmérséklete legyen,
 - 60°C és
 - 70°C között

- minimális működési költség mellett,
- ahol a környezeti hőmérséklet 25°C ,
- és a fűtőszál hőmérséklete üzem közben 80°C .

Bojler algoritmushoz módosított működési korlátok példa

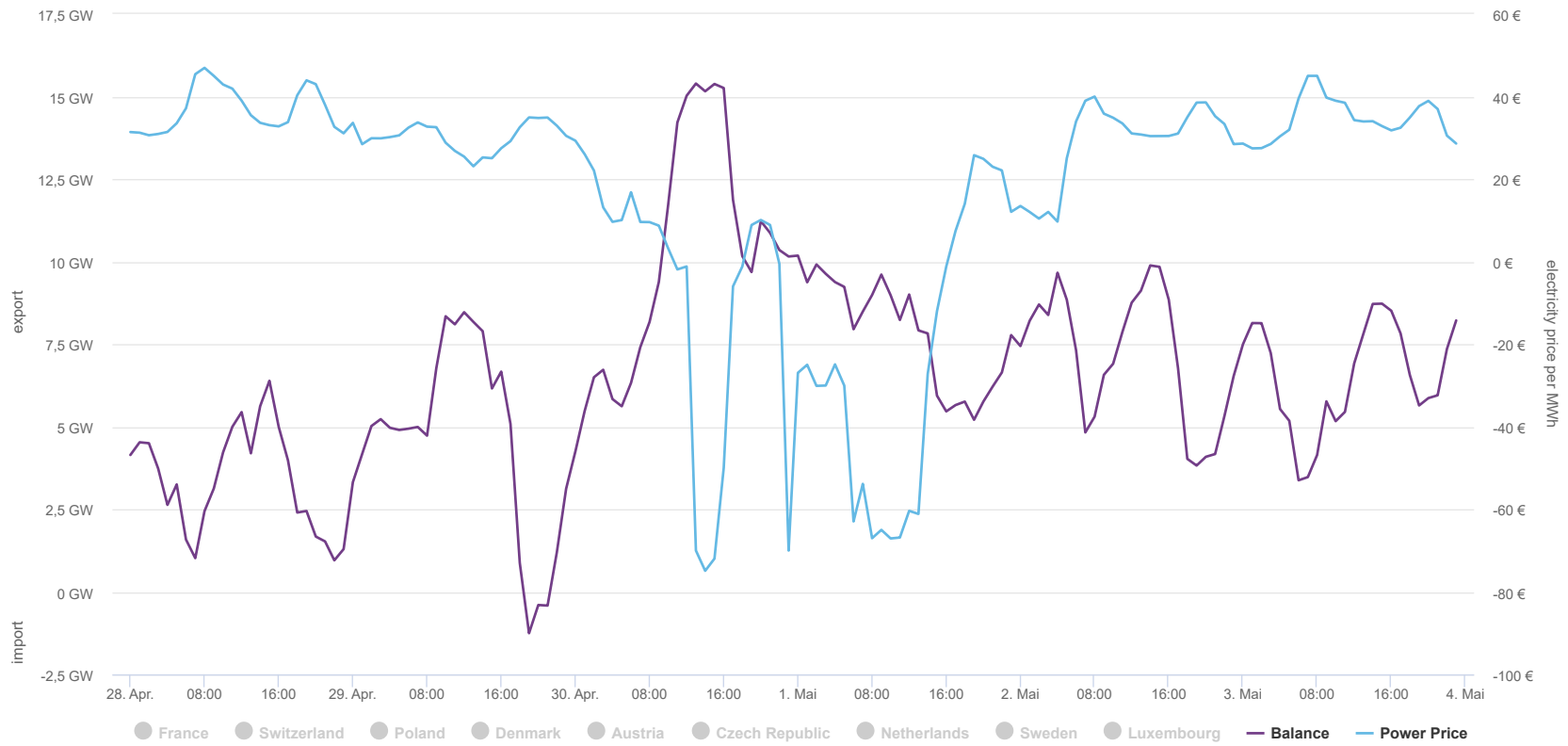
- A víz hőmérséklete legyen,
 - -60°C és
 - -70°C között
- minimális működési költség mellett,
- ahol a környezeti hőmérséklet -25°C ,
- és a fűtőszál hőmérséklete üzem közben -80°C .

Kínai absztrakt (抽象)

注重环境意识是现代社会的的一个重要趋势。今天，我们正努力将绿色能源（太阳能、风能和水电）优先于化石能源，以减少我们的碳足迹。太阳是我们最大的可用能源之一，它所释放的能量既可以用作热能（如太阳能集热器），也可以转化为电能。上述两种溶液产生的能量直接取决于太阳辐射。随着可持续发展在世界范围内变得越来越重要，预测光伏发电厂（PVPP, Photovoltaic Power Plants）的能源产量将变得越来越必要。

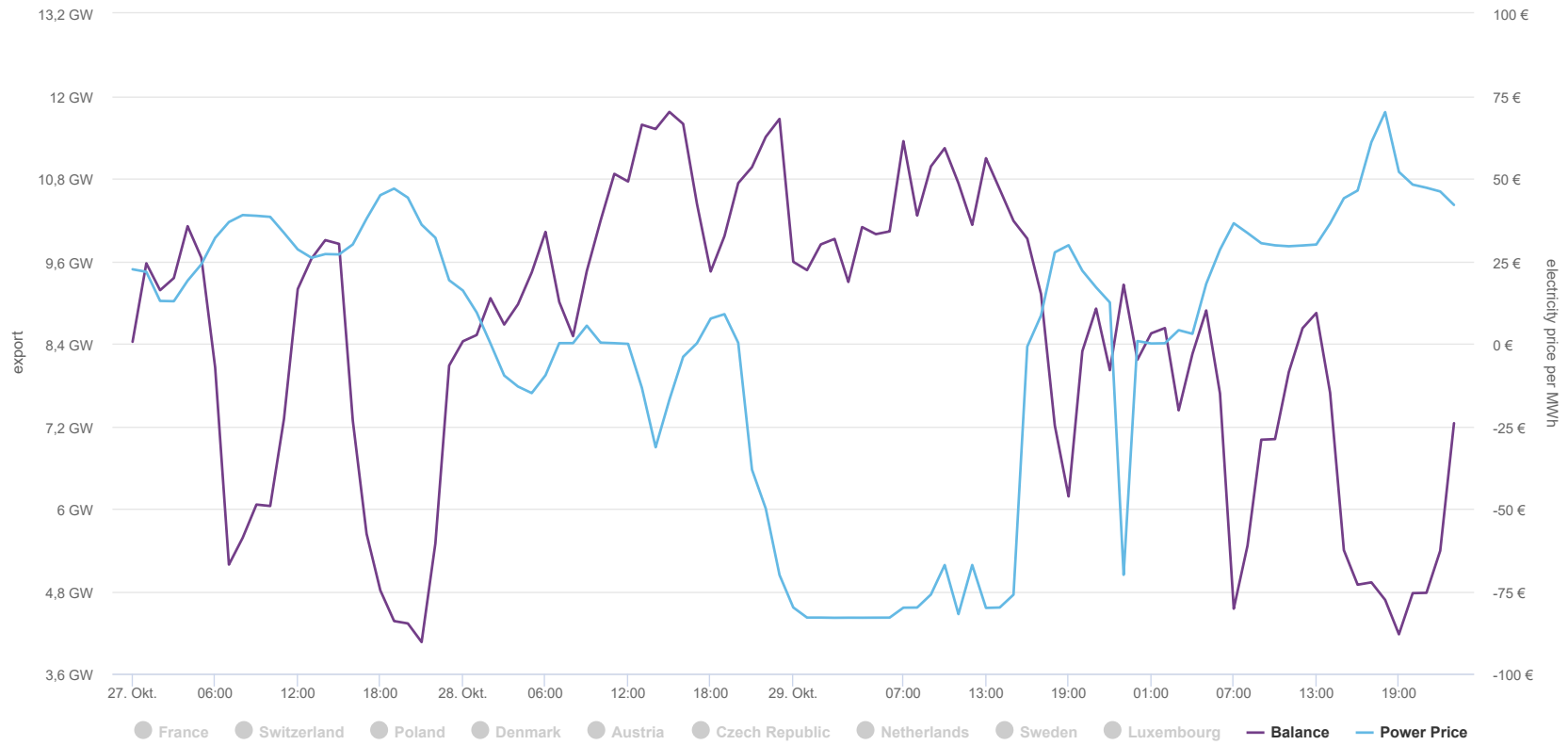
本文将讨论可用于处理生产波动（由于可再生能源的普及）的模型和算法，尤其是光伏发电厂。这些模型和算法可用于管理和调度能源社区消耗和生产的能源。

Negatív energiaár ábrák



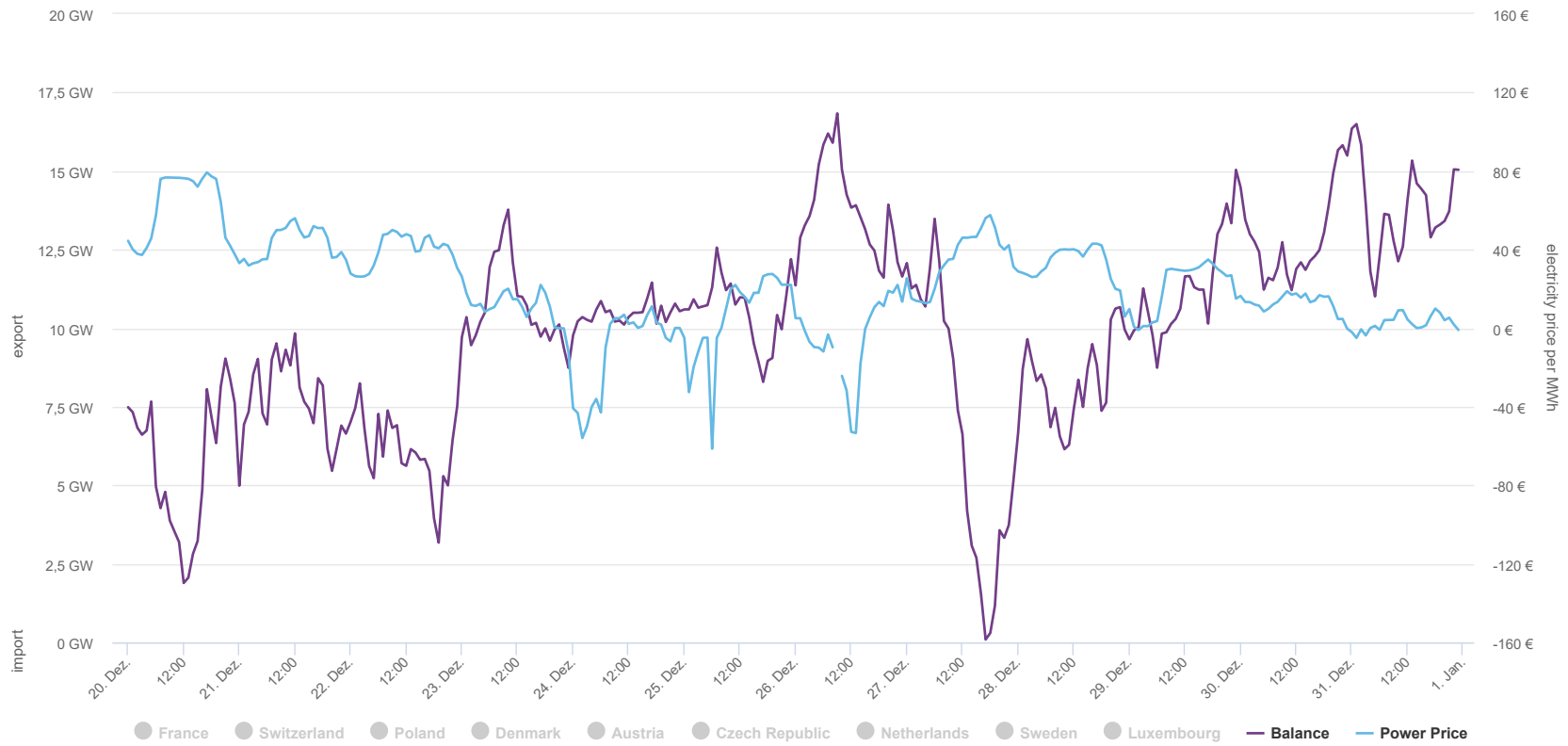
Agora Energiewende; Current to: 20.02.2020, 17:30

1. ábra. 2017_05_01



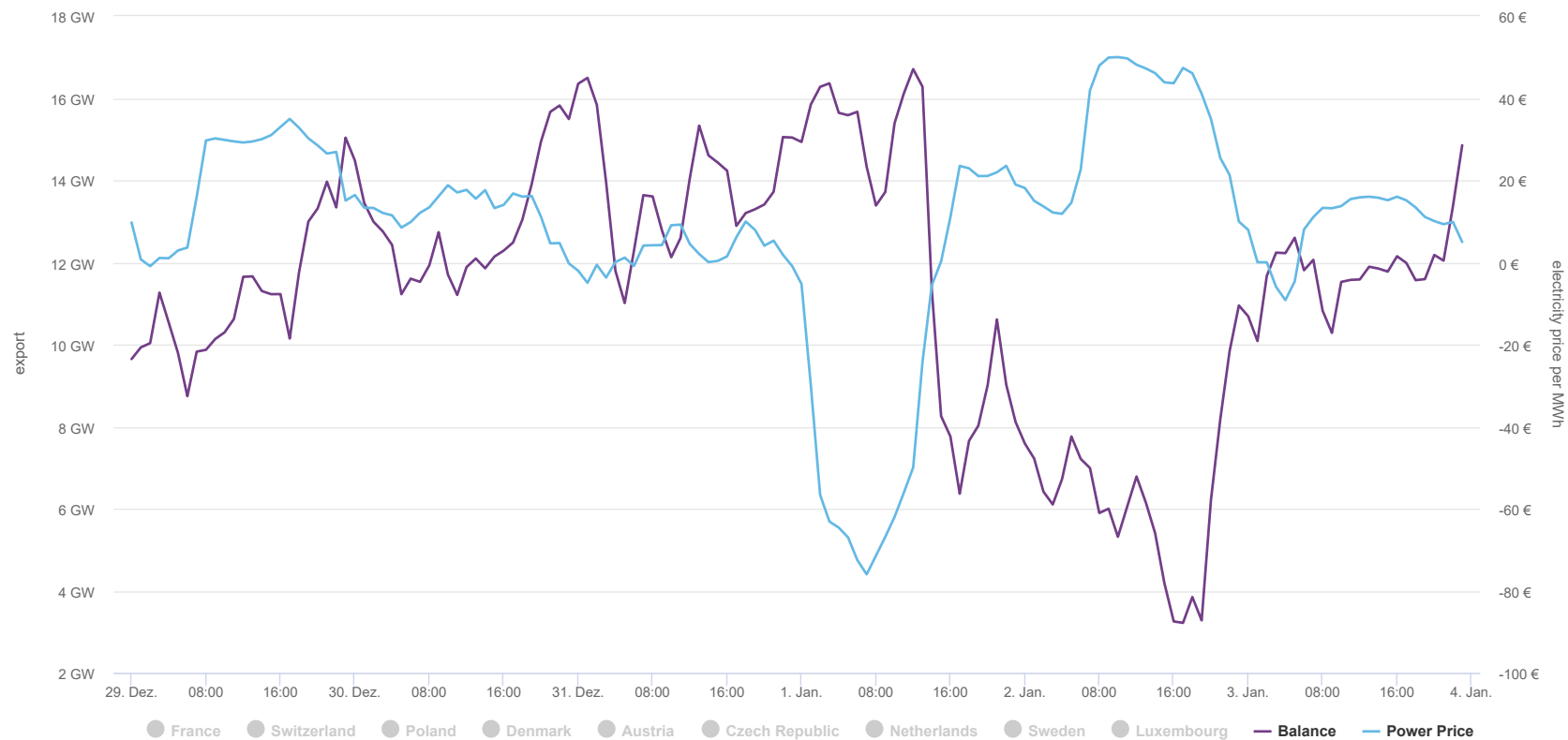
Agora Energiewende; Current to: 20.02.2020, 17:20

2. ábra. 2017_10_29



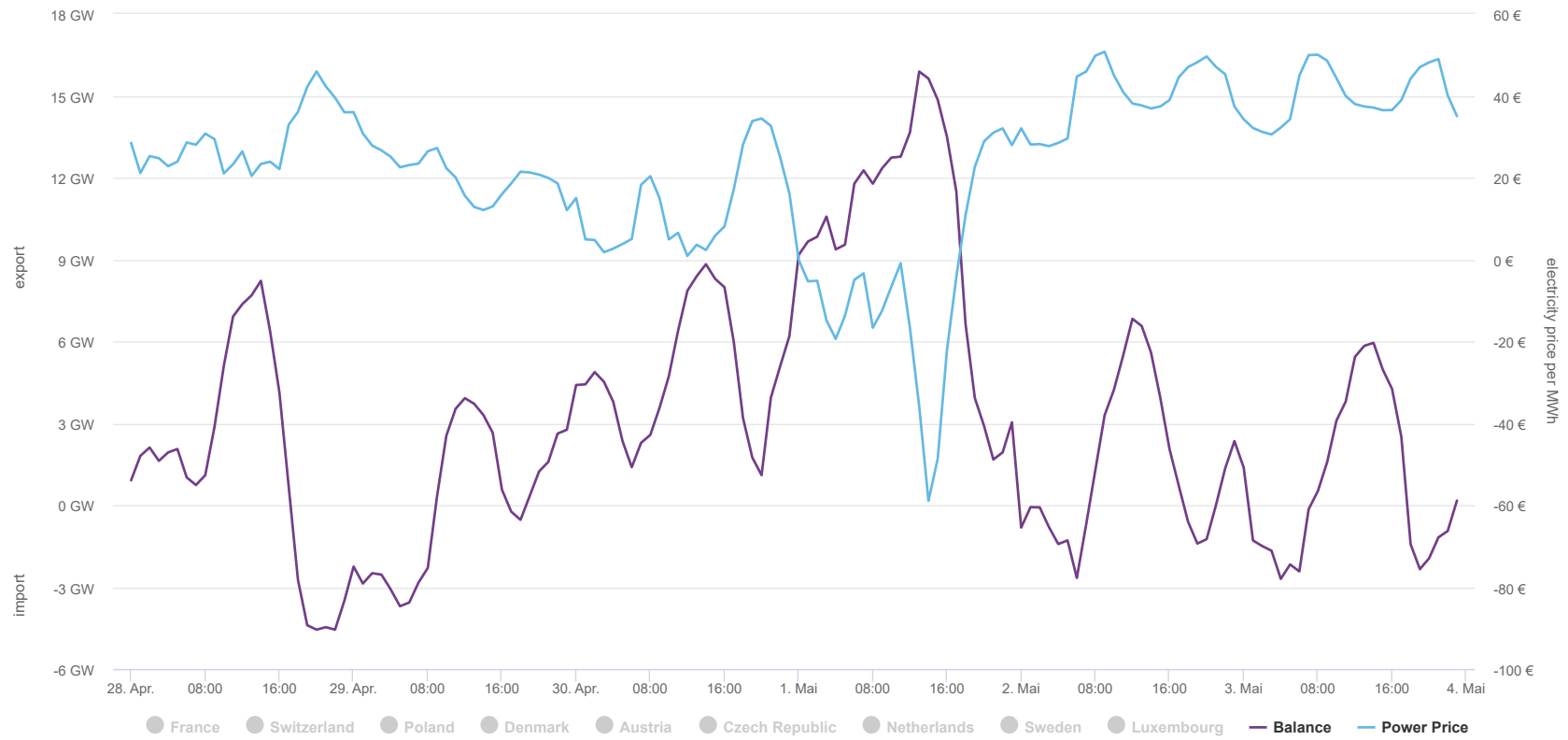
Agora Energiewende; Current to: 20.02.2020, 17:20

3. ábra. 2017_12_24



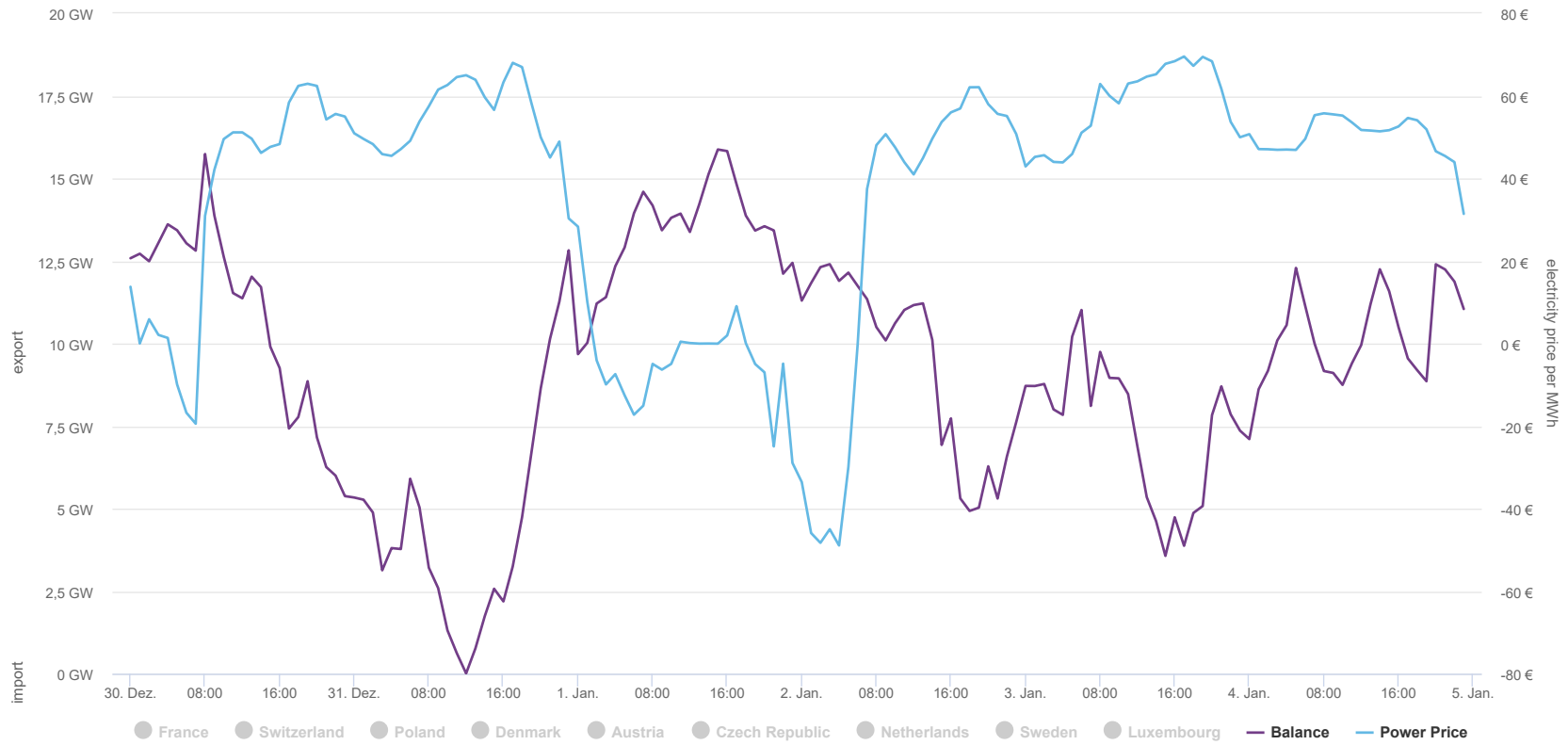
Agora Energiewende; Current to: 20.02.2020, 18:10

4. ábra. 2018_01_01



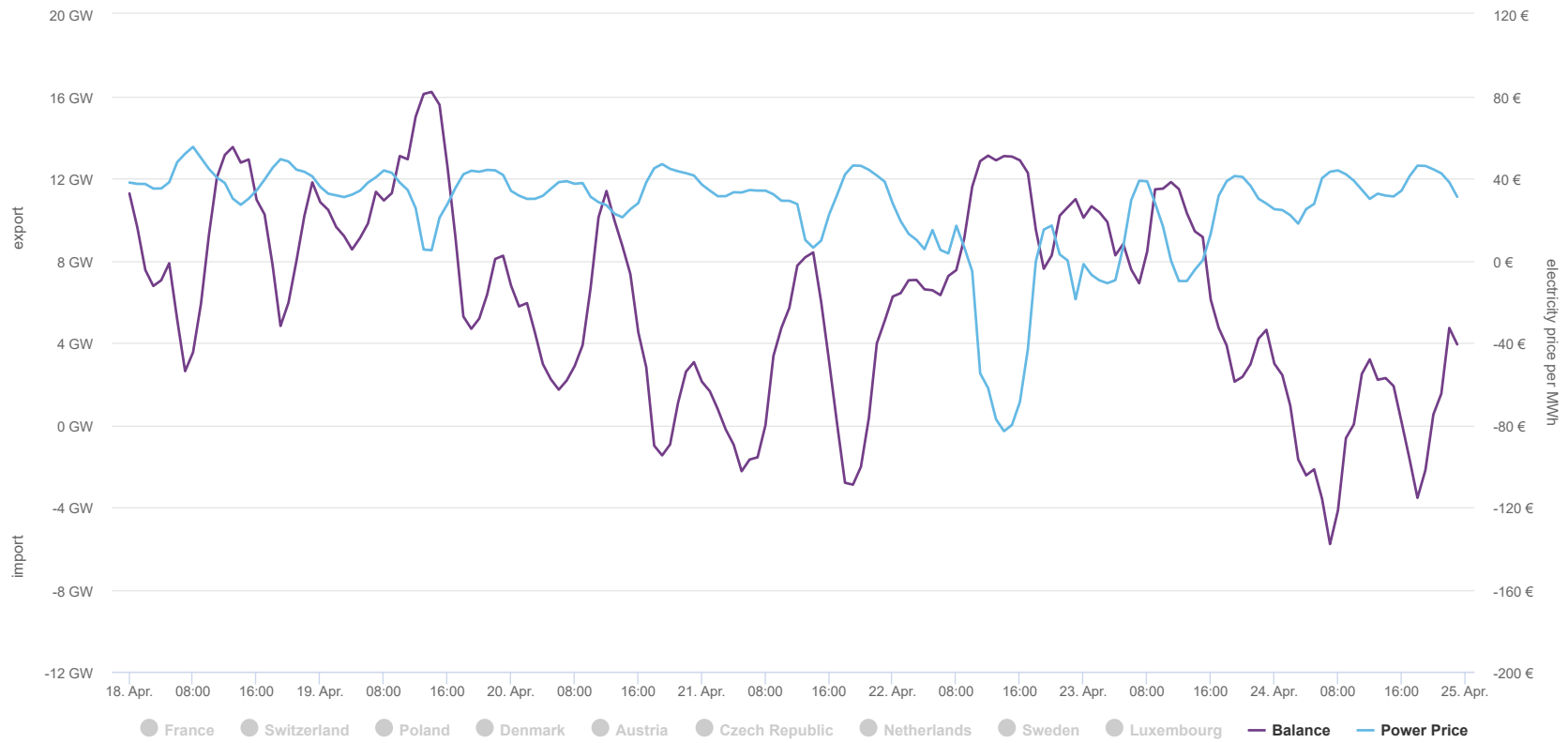
Agora Energiewende; Current to: 20.02.2020, 17:30

5. ábra. 2018_05_01



Agora Energiewende; Current to: 20.02.2020, 17:30

6. ábra. 2019_01_01



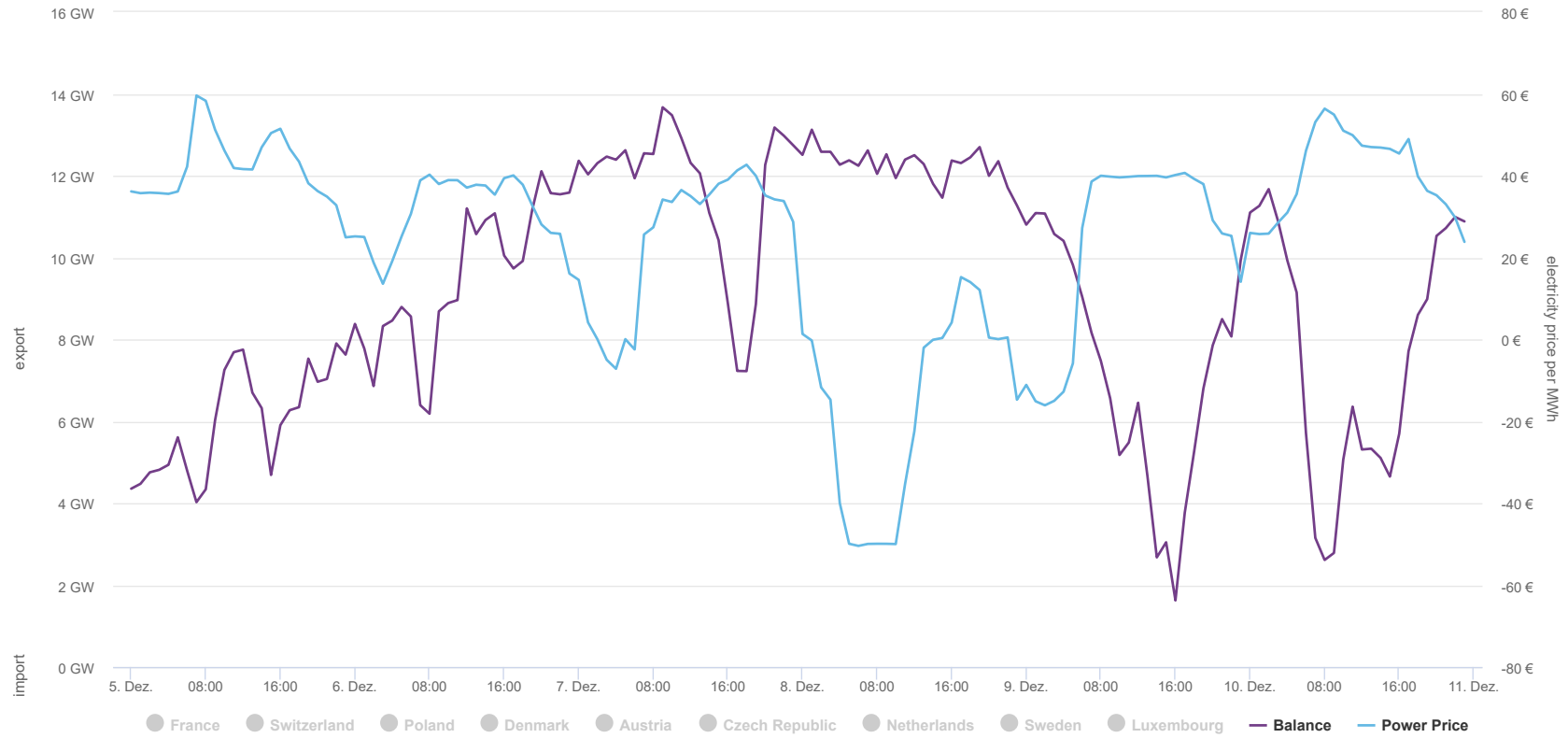
Agora Energiewende; Current to: 20.02.2020, 17:30

7. ábra. 2019_04_22



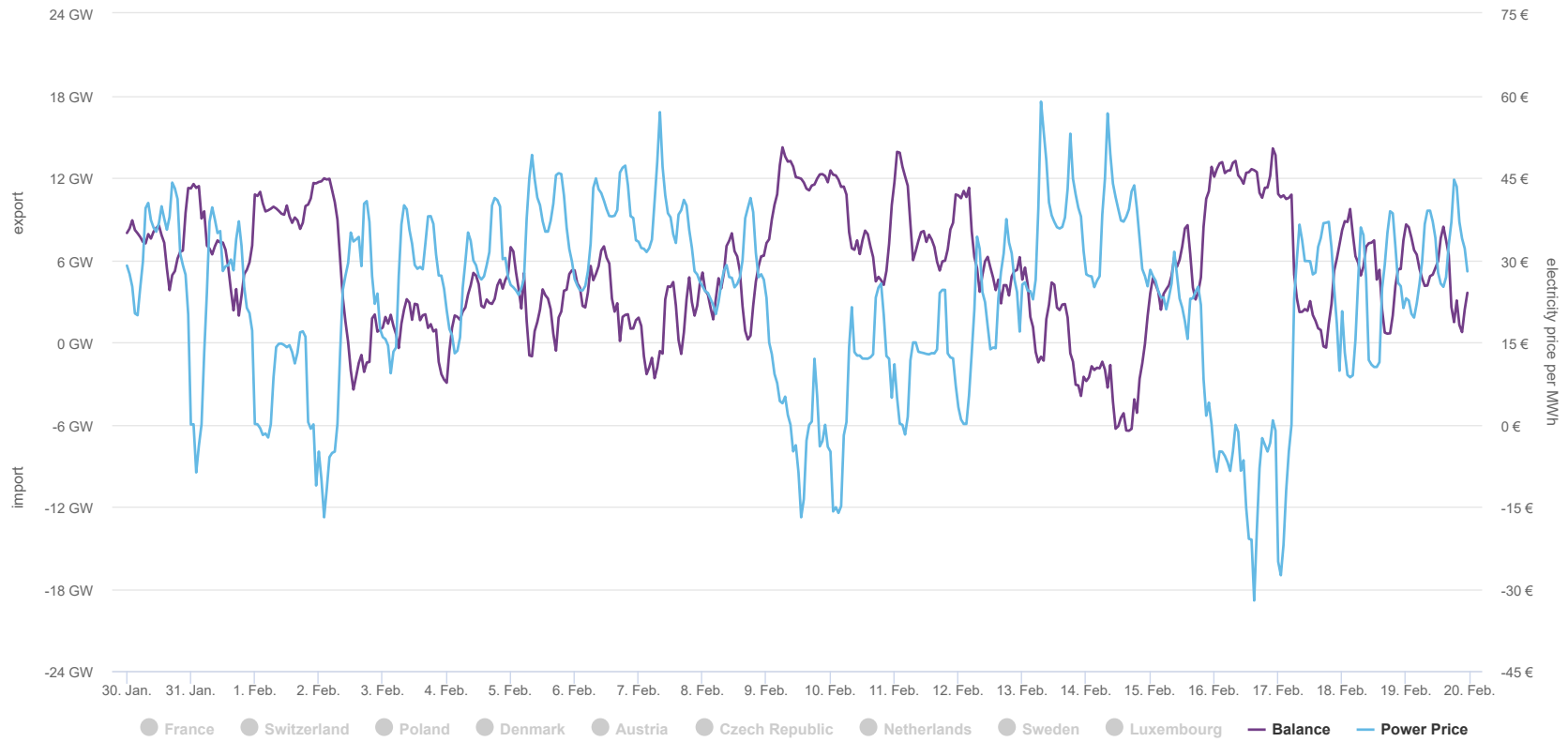
Agora Energiewende; Current to: 20.02.2020, 17:30

8. ábra. 2019_06_08



Agora Energiewende; Current to: 20.02.2020, 17:30

9. ábra. 2019_12_08



Agora Energiewende; Current to: 20.02.2020, 17:30

10. ábra. 2020_02_16

Irodalomjegyzék

- [S1] **R. Bálint**, A. Magyar és K. M. Hangos, “Cost-optimal model predictive scheduling of home appliances”, *IFAC-PapersOnLine*, 50. évf., 1. sz., 3344–3349. old., 2017.
- [S2] **R. Bálint** és A. Magyar, “Refrigerator optimal scheduling to minimise the cost of operation”, *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 44. évf., 2. sz., 99–104. old., 2016.
- [S3] **R. Bálint**, K. M. Hangos és A. Magyar, “Optimal scheduling of a household refrigerator using adaptive model predictive technique”, *Power Electronics (Ee), 2017 International Symposium*, IEEE, 2017, 1–6. old.
- [S4] **R. Bálint**, A. Fodor, K. M. Hangos és A. Magyar, “Cost-optimal model predictive scheduling of freezers”, *Control Engineering Practice*, 80. évf., 61–69. old., 2018 (**IF**: 3,232).
- [S5] **R. Bálint**, A. Fodor, I. Szalkai, Z. Szalkai és A. Magyar, “Modeling and calculation of the global solar irradiance on slopes”, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 47. évf., 1. sz., 57–63. old., 2019.
- [S6] **R. Bálint**, A. Fodor és A. Magyar, “Model-based power generation estimation of solar panels using weather forecast for microgrid application”, *Acta Polytechnica Hungarica*, 16. évf., 7. sz., 149–165. old., 2019 (**IF**: 1,286).
- [1] C. Joe-Wong, S. Sen, S. Ha és M. Chiang, “Optimized day-ahead pricing for smart grids with device-specific scheduling flexibility”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30. évf., 6. sz., 1075–1085. old., 2012.
- [2] R. Huisman, C. Huurman és R. Mahieu, “Hourly electricity prices in day-ahead markets”, *Energy Economics*, 29. évf., 2. sz., 240–248. old., 2007.
- [3] M. Tianhu, B. Jumpei és I. Yumiko, “Analysis of microgrid contributing to hour-ahead market operation through marginal day-ahead market price-based demand response”, *Energy Procedia*, 118. évf., 119–127. old., 2017.
- [4] B.-Y. Kim, K.-K. Oh és H.-S. Ahn, “Coordination and control for energy distribution in distributed grid networks: Theory and application to power dispatch problem”, *Control Engineering Practice*, 43. évf., 21–38. old., 2015.

- [5] K. Shimomachi, R. Hara, H. Kita, M. Noritake, H. Hoshi és K. Hirose, “Development of energy management system for dc microgrid for office building:-day ahead operation scheduling considering weather scenarios”, *2014 Power Systems Computation Conference*, IEEE, 2014, 1–6. old.
- [6] A.-H. Mohsenian-Rad és A. Leon-Garcia, “Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments”, *IEEE transactions on Smart Grid*, 1. évf., 2. sz., 120–133. old., 2010.
- [7] P. Du és N. Lu, “Appliance commitment for household load scheduling”, *IEEE transactions on Smart Grid*, 2. évf., 2. sz., 411–419. old., 2011.
- [8] P. Báez-González, J Alejandro, M. A. R. Carlini és C. Bordons, “Day-ahead economic optimization of energy use in an olive mill”, *Control Engineering Practice*, 54. évf., 91–103. old., 2016.
- [9] K. C. Sou, J. Weimer, H. Sandberg és K. H. Johansson, “Scheduling smart home appliances using mixed integer linear programming”, *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, IEEE, 2011, 5144–5149. old.
- [10] M. A. A. Pedrasa, T. D. Spooner és I. F. MacGill, “Coordinated scheduling of residential distributed energy resources to optimize smart home energy services”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1. évf., 2. sz., 134–143. old., 2010.
- [11] D. Setlhaolo és X. Xia, “Optimal scheduling of household appliances incorporating appliance coordination”, *Energy Procedia*, 61. évf., 1. sz., 198–202. old., 2014.
- [12] A. Leva, L. Piroddi, M. Di Felice, A. Boer és R. Paganini, “Adaptive relay-based control of household freezers with on–off actuators”, *Control Engineering Practice*, 18. évf., 1. sz., 94–102. old., 2010.
- [13] J. Ma, S. J. Qin és T. Salsbury, “Application of economic MPC to the energy and demand minimization of a commercial building”, *Journal of Process Control*, 24. évf., 8. sz., 1282–1291. old., 2014.
- [14] E. Rodrigues, R Godina, E Pouresmaeil, J. Ferreira és J. Catalão, “Domestic appliances energy optimization with model predictive control”, *Energy Conversion and Management*, 142. évf., 402–413. old., 2017.
- [15] R. Pedersen, J. Schwensen, B. Biegel, T. Green és J. Stoustrup, “Improving demand response potential of a supermarket refrigeration system: A food temperature estimation approach”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25. évf., 3. sz., 855–863. old., 2016.
- [16] M. S. Elliott és B. P. Rasmussen, “Decentralized model predictive control of a multi-evaporator air conditioning system”, *Control Engineering Practice*, 21. évf., 12. sz., 1665–1677. old., 2013.
- [17] A. Di Giorgio, F. Liberati és S. Canale, “Electric vehicles charging control in a smart grid: A model predictive control approach”, *Control Engineering Practice*, 22. évf., 147–162. old., 2014.

- [18] F. Sossan, V. Lakshmanan, G. T. Costanzo, M. Marinelli, P. J. Douglass és H. Bindner, “Grey-box modelling of a household refrigeration unit using time series data in application to demand side management”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 5. évf., 1–12. old., 2016.
- [19] T. Schné, S. Jaskó és G. Simon, “Dynamic Modeling and Identification of a Domestic Refrigerator”, *FUTURE INTERNET TECHNOLOGIES*, 45. old., 2014.
- [20] V. Kaczmarczyk, P. Fiedler, Z. Bradac, L. Franek és J. Pasek, “Simulator for optimal scheduling of domestic appliances”, *IFAC-PapersOnLine*, 48. évf., 4. sz., 95–100. old., 2015.
- [21] K. Vinther, “Data-driven control of refrigeration systems”, dissz., Ph. D. thesis, Videnbasen for Aalborg UniversitetVBN, Aalborg . . . , 2014.
- [22] J.-C. Laurent, G. Desaulniers, R. P. Malhame és F. Soumis, “A column generation method for optimal load management via control of electric water heaters”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 10. évf., 3. sz., 1389–1400. old., 1995.
- [23] T. Tudorache és L. Kreindler, “Design of a solar tracker system for PV power plants”, *Acta Polytechnica Hungarica*, 7. évf., 1. sz., 23–39. old., 2010.
- [24] R. H. Inman, H. T. Pedro és C. F. Coimbra, “Solar forecasting methods for renewable energy integration”, *Progress in energy and combustion science*, 39. évf., 6. sz., 535–576. old., 2013.
- [25] T. D. Brock, “Calculating solar radiation for ecological studies”, *Ecological modelling*, 14. évf., 1-2. sz., 1–19. old., 1981.
- [26] H. Kanchev, D. Lu, F. Colas, V. Lazarov és B. Francois, “Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications”, *IEEE transactions on industrial electronics*, 58. évf., 10. sz., 4583–4592. old., 2011.
- [27] D. Pudjianto, C. Ramsay és G. Strbac, “Virtual power plant and system integration of distributed energy resources”, *IET Renewable power generation*, 1. évf., 1. sz., 10–16. old., 2007.
- [28] R. Rigo-Mariani, B. Sareni és X. Roboam, “A fast optimization strategy for power dispatching in a microgrid with storage”, *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 2013, 7902–7907. old.
- [29] B. C. Csáji, A. Kovács és J. Váncza, “Prediction and robust control of energy flow in renewable energy systems”, *IFAC Proceedings Volumes*, 47. évf., 3. sz., 3663–3669. old., 2014.
- [30] A. Kovács, R. Bátai, B. C. Csáji, P. Dudás, B. Háy, G. Pedone, T. Révész és J. Váncza, “Intelligent control for energy-positive street lighting”, *Energy*, 114. évf., 40–51. old., 2016.
- [31] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*. Elsevier, 2012.

- [32] S. V. Szokolay, “Solar geometry”, PLEA, 1996.
- [33] J. Braun és J. Mitchell, “Solar geometry for fixed and tracking surfaces”, *Solar energy*, 31. évf., 5. sz., 439–444. old., 1983.
- [34] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, Y.-J. Su és tsai., “Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK”, *Proceedings of the world congress on Engineering and computer science*, San Francisco, USA, 2008. köt., 2008, 1–6. old.
- [35] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli és A. Masmoudi, “Matlab/simulink based modeling of photovoltaic cell”, *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2. évf., 2. sz., 213–218. old., 2012.
- [36] S. Kichou, S. Silvestre, G. Nofuentes, M. Torres-Ramírez, A. Chouder és D. Guasch, “Characterization of degradation and evaluation of model parameters of amorphous silicon photovoltaic modules under outdoor long term exposure”, *Energy*, 96. évf., 231–241. old., 2016.
- [37] J. Tonui és Y Tripanagnostopoulos, “Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements”, *Solar energy*, 81. évf., 4. sz., 498–511. old., 2007.
- [38] A. Tiwari és M. Sodha, “Performance evaluation of solar PV/T system: an experimental validation”, *Solar energy*, 80. évf., 7. sz., 751–759. old., 2006.
- [39] F. Z. Zerhouni, M. Zerhouni, M. Zegrar, M. T. Benmessaoud, A. B. Stambouli és A. Midoun, “Proposed methods to increase the output efficiency of a photovoltaic (PV) system”, *Acta polytechnica hungarica*, 7. évf., 2. sz., 55–70. old., 2010.
- [40] H. A. Zondag, de D. d. Vries, W. Van Helden, van R. C. Zolingen és A. Van Steenhoven, “The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector”, *Solar energy*, 72. évf., 2. sz., 113–128. old., 2002.
- [41] R. E. Bird és C. Riordan, “Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth’s surface for cloudless atmospheres”, *Journal of climate and applied meteorology*, 25. évf., 1. sz., 87–97. old., 1986.
- [42] M. Danandeh és tsai., “Solar irradiance estimation models and optimum tilt angle approaches: A comparative study”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92. évf., 319–330. old., 2018.
- [43] D. H. Li, T. Chau és K. K. Wan, “A review of the CIE general sky classification approaches”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31. évf., 563–574. old., 2014.
- [44] E. Akarlan, F. O. Hocaoglu és R. Edizkan, “Novel short term solar irradiance forecasting models”, *Renewable Energy*, 123. évf., 58–66. old., 2018.
- [45] T. Chow, “Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model”, *Solar Energy*, 75. évf., 2. sz., 143–152. old., 2003.

- [46] A. Jones és C. Underwood, “A thermal model for photovoltaic systems”, *Solar energy*, 70. évf., 4. sz., 349–359. old., 2001.
- [47] M. Mattei, G. Notton, C. Cristofari, M. Muselli és P. Poggi, “Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance”, *Renewable energy*, 31. évf., 4. sz., 553–567. old., 2006.
- [48] M. A. García és J. Balenzategui, “Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on nominal operation cell temperature calculations”, *Renewable energy*, 29. évf., 12. sz., 1997–2010. old., 2004.
- [49] D. H. Li, N. T. Chau és K. K. Wan, “Predicting daylight illuminance and solar irradiance on vertical surfaces based on classified standard skies”, *Energy*, 53. évf., 252–258. old., 2013.
- [50] B. Y. Liu és R. C. Jordan, “The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation”, *Solar energy*, 4. évf., 3. sz., 1–19. old., 1960.
- [51] J. Ekström, M. Koivisto, J. Millar, I. Mellin és M. Lehtonen, “A statistical approach for hourly photovoltaic power generation modeling with generation locations without measured data”, *Solar Energy*, 132. évf., 173–187. old., 2016.
- [52] D. H. Li, S. Lou, J. C. Lam és R. H. Wu, “Determining solar irradiance on inclined planes from classified CIE (International Commission on Illumination) standard skies”, *Energy*, 101. évf., 462–470. old., 2016.
- [53] J. A. Ruiz-Arias és C. A. Gueymard, “Worldwide inter-comparison of clear-sky solar radiation models: Consensus-based review of direct and global irradiance components simulated at the earth surface”, *Solar Energy*, 168. évf., 10–29. old., 2018.
- [54] M. J. Reno, C. W. Hansen és J. S. Stein, “Global horizontal irradiance clear sky models: Implementation and analysis”, *SANDIA report SAND2012-2389*, 2012.
- [55] K. Hangos, J. Bokor és G. Szederkényi, *Computer controlled systems*. Veszprémi Egyetemi Kiadó, 2002.
- [56] J. Árpád, *Villamosságtan: 5. Lineáris, invariáns hálózatok*. Veszprémi Egyetem, 1991.
- [57] K. Hangos és I. Cameron, *Process modelling and analysis*, I., szerk. Academic Press, London, 2001, 1–543. old.
- [58] F. Christophersen, *Optimal control of constrained piecewise affine systems*. Springer, 2007, 359. köt.
- [59] J. Xu és L. Xie, *Control and estimation of piecewise affine systems*. Elsevier, 2014.
- [60] K. Hangos és G. Szederkényi, *Dinamikus rendszerek paramétereinek becslése*, 1999.

- [61] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright és P. E. Wright, “Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions”, *SIAM Journal on optimization*, 9. évf., 1. sz., 112–147. old., 1998.
- [62] E. F. Camacho és C. B. Alba, *Model predictive control*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [63] Z. Xu, R. Diao, S. Lu, J. Lian és Y. Zhang, “Modeling of electric water heaters for demand response: A baseline PDE model”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5. évf., 5. sz., 2203–2210. old., 2014.
- [64] S. Jaskó, T. Schné és G. Simon, “Adaptive Model-based Control for Cost-aware Household Appliances”, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 6. évf., 3. sz., 547–558. old., 2018.
- [65] M. Herceg, M. Kvasnica, C. Jones és M. Morari, “Multi-parametric toolbox 3.0”, *Proceedings of the European control conference*, 2013.
- [66] T. Schné, S. Jaskó és G. Simon, “Embeddable adaptive model predictive refrigerator control for cost-efficient and sustainable operation”, *Journal of cleaner production*, 190. évf., 496–507. old., 2018.
- [67] J. A. Duffie, W. A. Beckman és N. Blair, *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. John Wiley & Sons, 2020.
- [68] F. Vignola, J. Michalsky és T. Stoffel, *Solar and infrared radiation measurements*. CRC press, 2016.
- [69] R. E. Bird és R. L. Hulstrom, “Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces”, Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA), techn. jel., 1981.
- [70] J. Davies és D. McKay, “Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces”, *Solar Energy*, 43. évf., 3. sz., 153–168. old., 1989.
- [71] S. Becker, “Calculation of direct solar and diffuse radiation in Israel”, *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21. évf., 12. sz., 1561–1576. old., 2001.
- [72] F. Kasten, “Parametrisierung der Globalstrahlung durch Bedeckungsgrad und Trübungsfaktor”, *Annalen der Meteorologie Neue*, 20. évf., 49–50. old., 1984.
- [73] F. Kasten, “Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen und Atmosphäre”, *VDI Berichte*, 721. évf., 131–158. old., 1989.
- [74] M. Kanamitsu, “Description of the NMC global data assimilation and forecast system”, *Weather and Forecasting*, 4. évf., 3. sz., 335–342. old., 1989.

- [75] G. Zängl, D. Reinert, P. Rípodas és M. Baldauf, “The ICON (ICO-sahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141. évf., 687. sz., 563–579. old., 2015.
- [76] M. Déqué, C. Drevet, A. Braun és D. Cariolle, “The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling”, *Climate Dynamics*, 10. évf., 4-5. sz., 249–266. old., 1994.
- [77] J. Côté, S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch és A. Staniforth, “The operational CMC–MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part I: Design considerations and formulation”, *Monthly Weather Review*, 126. évf., 6. sz., 1373–1395. old., 1998.
- [78] J. Côté, J.-G. Desmarais, S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch és A. Staniforth, “The operational CMC–MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part II: Results”, *Monthly Weather Review*, 126. évf., 6. sz., 1397–1418. old., 1998.
- [79] P. Undén, L. Rontu, H. Jarvinen, P. Lynch, F. J. Calvo Sánchez, G. Cats, J. Cuxart, K. Eerola, C. Fortelius, J. A. García-Moya és tsai, “HIRLAM-5 scientific documentation”, 2002.
- [80] P. Lynch és X.-Y. Huang, “Initialization of the HIRLAM model using a digital filter”, *Monthly Weather Review*, 120. évf., 6. sz., 1019–1034. old., 1992.