



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Tézisfüzetei

Gépészmérnöki Kar Doktori Tanácsa

Írta:

Veér Timót

**CSÚCSTELJESÍTMÉNY BIZTOSÍTÁSÁNAK
LEHETŐSÉGEI GÁZTURBINÁS EGYSÉGEKKEL**

Című témakörből

Amellyel a PhD fokozat elnyerésére pályázik

2001

TARTALOMJEGYZÉK

Bevezetés	3
1. Célkitűzések	5
2. Csúcserőművek fejlesztési irányai, hazai és nemzetközi előzmények, következtetések	6
2.1. Fogyasztó oldali befolyásolás	7
2.2. Energiatárolás	8
2.3. Csúcsteljesítmény termelése	9
3. A vizsgálatok során alkalmazott módszerek és eszközök	10
4. A kutatás eredményeinek összefoglalása, tézisek	11
4.1. Kondenzációs póttüzeléses gáz-gőz kombinált körfolyamat	12
4.2. Ellennyomású póttüzeléses gáz-gőz kombinált körfolyamat	13
4.3. Forróvíz-kazán elé kapcsolt gázturbina	14
4.4. Levegő tározós gázturbinás csúcserőmű	16
4.5. Erőművi körfolyamatok számítógéppel segített vizsgálata és optimalizálása	17
5. Kitekintés	18
6. A tézisek témájában nyilvánosan bemutatott munkák	19
6.1. Folyóiratcikkek:	19
6.2. Hazai és külföldi konferenciákon tartott szóbeli előadások	19
Az összefoglalóban idézett irodalom jegyzéke	21

BEVEZETÉS

A gázturbinás egységek utóbbi években végbement rohamos fejlődése egyre kedvezőbb feltételeket szab erőművi alkalmazásuknak. A világ első gázturbinás erőművének¹ üzembe helyezése óta közel hét évtized telt el, ami e gépek élettartamának és gazdaságosságának rohamos növekedését, ugyanakkor fajlagos beruházási költségük csökkenését is hozta.

A gázturbina – mint gépegység – tökéletesítése mellett észlelhető az iparág erőfeszítése bizonyos újszerű körfolyamat-koncepciók kifejlesztésére és alkalmazására. Egyre inkább terjednek el azok az erőművi megoldások, amelyek ugyancsak gázturbinán alapulnak, de a szén vagy szénhidrogének egyre hatásosabb hasznosítását teszik lehetővé. A legismertebbek közé tartoznak a gőz-gáz kombinált ciklusok (gőz-újrahevítéssel, illetve póttüzeléssel), a külső tüzelésű illetve elgázosított szén tüzelőanyagú gázturbinák, nedves-levegős gázturbinák, valamint a levegőtározós csúcserőművek.

Az utóbbi évtizedek során nemcsak a már említett műszaki lehetőségek terén, hanem a villamosenergia igény jellegében is lényeges változás volt tapasztalható. Míg Európában az '60-'80 –as években jellemző volt a nagy energia-felhasználású, viszonylag állandó teljesítményigényű nehézipar fellendülése, a '90-es években ez visszaesést mutat, és a kisebb, erősen ingadozó villamosenergia igénnyel rendelkező, nem mérésköteles fogyasztók hódítanak egyre nagyobb teret. Megnőttek továbbá a frekvenciatartással, valamint az országos rendszerek önállóságával szembeni követelmények, és szigorodtak a környezetvédelmi előírások.

Mіндеzen változások új, megoldásra váró feladatokat jelentenek az országok villamosenergia rendszerei számára. Különösen hátrányos helyzetben vannak a volt CDU VERE² tagjai, de a Nyugat-Európával való gazdasági és politikai együttműködés fokozása miatt e problémák megoldása szükséges és sürgős.

Az energetika, mint a villamos- és hőenergia termelés iparágával kapcsolatban mondható, hogy üzlet, tehát a haszon maximalizálandó. A legújszerűbb azt tekinteni, hogy

¹ Neuchatel, 1934. 3,4MWe csúcsteljesítmény biztosítására volt hivatott.

² KGST-tagországok Villamosenergia Rendszereinek Egyesülése. A mindenkori termelés és igény különbségét import/export szaldó biztosította, és gyakorlatilag hiányoztak az emisszió határértékek.

a termelési folyamatok exergia felhasználása minimalizálendő. Környezetvédelmi fórumok a CO₂ és az NO_x kibocsátás leszorításáért küzdenek joggal. Általánosan érvényes elvek ezek, de léteznek olyan helyzetek, amikor a fentiek közül egyik sem alkalmazható maradéktalanul. Nyilvánvaló ez annak, aki kötött már kényszerűségből, több szempontból is előnytelen üzletet, pl. vásárolt már drágábban gépkocsijába üzemanyagot, mert éppen rosszul becsülte meg járművének fogyasztását.

Az energiaiparban is található számtalan ilyen példát. Nyugat-Európa néhány országában gyakorlat a „zöld-kWh” szokatlanul magas átvételi ára [18]. Olyan díj ez, amelyet nem a piaci helyzet, hanem leginkább a fejlesztések költségvonzata határoz meg.

Szemléletes lehet még a csúcsergia termelés kérdése a Magyar Villamosenergia Rendszerben, (MVER). A fejlettebb államokban is kísérleti jelleggel működő, energiátároláson alapuló rendszerek³ beruházási költsége túlságosan magas, valamint a rendelkezésre álló kapacitás is csekély. A hagyományos szén gőzerőművek és gázturbinás kombinált ciklusú erőművek alkalmatlanok csúcsergia termelésre⁴ a kis teljesítmény-növelési gradiens miatt, továbbá, Magyarországon, a vízerőművek és víztározós csúcserőművek létesítése is akadályokba ütközik. A fentiek figyelembe vételével, és az energiaellátás önállóságát⁵ szem előtt tartva, a gázturbinás csúcserőművek telepítése szükséges, annak ellenére, hogy az így termelt villamosenergia fajlagos költségei sokkal magasabbak a jelenleg érvényes energiaáraknál.

A jelen munkával a szerző néhány gázturbinás csúcsteljesítmény előállítására alkalmas berendezés elemzésére és összehasonlítására vállalkozik. Az egyes technológiák értékelése előtt egyrészt részletes termodinamikai és üzemviteli vizsgálatokat, másrészt az ezeket kiegészítő gazdasági elemzéseket végeztem.

A fentebb említett gazdaságosságot tágabb értelemben célszerű itt használni. A termodinamikai elemzésekben használatos hatásfok jellegű mennyiség a rendszer vagy egy alegység „jószágát” fejezi ki, de emellett érdemes viszont figyelembe venni, hogy az erőművi berendezés egy nagyobb rendszer alegysége, amellyel kölcsönhatásban van. Továbbá, maga a megrendelő/fogyasztó is szabhat olyan feltételrendszereket, amelyek

³ Elem, szupravezető mágnes, lendkerék, szuperkapacitor, stb.

⁴ Gőzös erőművek forgótartalék-üzeme változó költségeinél fogva gazdaságtalan lenne.

⁵ Jelenleg az import-export akár 5-10% -ot is eléri egyes napszakokban, lásd OVT Közl.

igény oldalról (biztonság, tartalék, széles üzemi tartomány), vagy beruházás oldalról döntően befolyásolják a megfelelő műszaki megoldás kiválasztását. Ez természetesen arra enged következtetni, hogy az erőművek esetében az energiamérlegből számítható *hatásfok*, és a pénzügyi mérlegből kifejezhető *gazdaságosság* között nem áll fent egyértelmű függvénykapcsolat.

A kutatások során leginkább a csúcsigényeket ellátó erőművek vizsgálatára összpontosítottam. Az egyes konstrukciók kiválasztásánál a magyarországi energiapolitika, árrendszer, illetve gazdasági háttérből indultam ki. Ennek ellenére szem előtt tartottam, hogy az eredményeket és az ezekből levont következtetéseket ne csak egy sajátos esetként lehessen értelmezni.

1. CÉLKITŰZÉSEK

A hazai szakirodalom⁶ tanulmányozása során kiderül, hogy annak ellenére, hogy a nyugat-európai villamosenergia-rendszerekhez való csatlakozás előírja az egyes tagországok villamosenergia-rendszereinek virtuális önállóságát, a Magyar VER nem rendelkezik megfelelő primer tartalék kapacitással. Nem kielégítő továbbá a csúcsenergia termelésének biztonsága és gazdaságossága az egységek összetételét illetően. Az export/import teljes mértékű kiiktatása nem cél, amellet, hogy gyakorlatilag nem megvalósítható, de nem lehet a frekvenciatartás egyedüli módja.

Munkám során hő és villamos csúcsteljesítmény előállítására alkalmas technológiák üzemviteli és gazdasági elemzését kívánom bemutatni. A modellek és a módszertan kidolgozásánál messzemenően szem előtt tartottam, hogy az eredmények és következtetések konkrétak, de ugyanakkor általánosíthatóak legyenek.

Feltett szándékom, hogy a vizsgálatok eredményei és az ezekből levonható következtetések kompromisszumot képezzenek a csak irányadó, de túl általános, valamint a mennyiségileg helyes, de egyedi eredmények közt.

Szükségesnek látom itt a csúcsteljesítmény tágabb értelmezését: a csúcserőmű nem (csak) a napi igények lokális maximumait, hanem általában azt a hányadot hivatott fedezni,

⁶ MVM közlemények, 1989.-2000. évfolyamok

amely a mindenkori pillanatnyi fogyasztás, valamint a terhelés előre jelzett (és megtermelhető) szintje közötti különbségeként megjelenik⁷.

A fent említett célkitűzés eléréséhez a következő kérdések vizsgálata válik célszerűvé:

- A csúcserőművi technológiák áttekintése, a Magyar VER és energiapolitika jellegzetességeinek figyelembe vételével,
- A gázturbinák alkalmazásának feltételei csúcserőművekben,
- Kondenzációs póttüzeléses gáz-gőz kombinált körfolyamat,
- Ellennyomású póttüzeléses gáz-gőz kombinált körfolyamat,
- Forróvíz-kazán elé kapcsolt gázturbinás fűtőmű üzemviteli elemzése,
- A levegőtárolós energiatárolás csúcserőművi alkalmazásának lehetőségei,
- A korábban tárgyalt technológiák gazdasági elemzése, összehasonlítása,

Az erőművi munkafolyamatok vizsgálata során alkalmazott számítógépes modellezés további problémákat vetett fel. A témakörrel kapcsolatban vizsgált kérdések:

- Erőművi munkafolyamatok többparaméteres optimalizálásának lehetőségei és korlátai.

2. CSÚCSERŐMŰVEK FEJLESZTÉSI IRÁNYAI, HAZAI ÉS NEMZETKÖZI ELŐZMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A jelen fejezetben egy rövid áttekintést kívánok adni arról, hogyan alakult a csúcserőenergia iránti igény a közelmúltban Magyarországon. Ezek után összefoglalom a lehetséges, illetve a Magyarország szempontjából szóba jöhető lehetőségeket, ezek legfontosabb előnyeit és hátrányait.

A villamos-energia szolgáltatók számára mindig problémát jelentett a teljesítmény kereslet és kínálatának kiegyensúlyozása a frekvencia ingadozásának elkerülése végett.

⁷ Ez a hányad lehet akár negatív is úgy villamosenergia mint hőenergia esetén,.

A világ iparilag fejlett országaiban már a '70 –es évek végén, – a volt-szocialista országokban a '90 –es évek elején – időszerűvé vált a villamos-energia ipar struktúrájának újragondolása. Egyrészt nagy iramban nőtt az üzembe helyezett alaperőművek száma⁸, ugyanakkor egyre komolyabbak lettek a frekvenciatartással szemben támasztott követelmények. Előtérbe került a menettartás valamint az egyes rendszerek önállóságának kérdése [1][2][3].

A '70-'80 –as évek erőművi struktúrájára a gazdaságilag előnyös, nagy méretű, többségében fosszilis vagy atomenergiával üzemeltetett gőzös erőművek voltak jellemzőek [4][5][6]. Ezek általában a méretezési üzemállapot közelében üzemelnek, és menettartásra, valamint villamos csúcsigények fedezésére nagyon korlátozott mértékben alkalmasak.

Amennyiben az egyes villamos-energia rendszerek pillanatnyi teljesítmény hiány-többlete belterjesen oldandó meg, a következő lehetőségek állnak az üzemeltetők számára:

- 1) A teljesítmény-igény fogyasztó oldali befolyásolása,
- 2) Energiatárolás, és ezzel egy időben a termelési görbe „simítása”,
- 3) Villamos teljesítmény termelése a pillanatnyi igényeknek megfelelően.

2.1. Fogyasztó oldali befolyásolás

A hiány problémájának kezelése a kínálat–kereslet tervezésével, (Demand Side Management), a nemzetgazdaság szempontjából a csúcskapacitás probléma legelőnyösebb megoldási módja. Nem igényel többlet beruházást, hátránya viszont, hogy nem oldja meg a tartaléktartást és rugalmatlan. Egyedüli megoldásként nem javasolható, és gyakorlatilag sehol sem alkalmazzák kizárólagosan.

Az Országos Villamos Teherelosztó közleményei szerint [7], [8] az utóbbi évtizedekben kimutatható, hogy a nehézipar százalékos részesedése a csúcsidőszak teljesítményigényéből fokozatosan csökken. Magyarországon is főleg azok az iparágak jelentik a problémát, amelyek teljesítményigénye széles határok között, és gyorsan ingadozik⁹, lásd még [8]. Ezek esetében az igények fogyasztó oldali befolyásolásától nem remélhető nagy változás.

⁸ Főleg nagy szén és atomenergia bázisú gőzerőművi blokkok.

⁹ Lakosság, irodai munka, kis felhasználású iparágak, városi személyforgalom.

Olyan országok, ahol a vasúti forgalom nagy geodetikus szintkülönbségek közt valósul meg, alkalmazzák az éjjeli felvontatást, majd reggeli visszatermelést a hálózatba. Magyarországon, a vasúti forgalmon belül megvalósítható (korlátozott mértékben) a fent említett elv, a teherforgalom és az ingázási csúcsforgalom időbeni eltolásával.

Hasonló hatású a nagy energiafelhasználású iparágak teljesítmény-fogyasztásának termelése, bányászat, kohászat, stb.

2.2. Energiatárolás

Az energiátárolás, és az ezzel összefüggő teljesítménygörbe simítása, (Load-leveling), lenne Magyarország számára a leggazdaságosabb. Ily módon lehetne a meglévő kapacitás kihasználásával, a villamos völgyidőszakban megtermelt energia egy részét tárolni, majd a csúcsigények megjelenésekor a hálózat rendelkezésére bocsátani.

A következő kiforrott technológiák állnak rendelkezésre:

- víztározós erőművek,
- levegőtározós csúcserőművek,
- kinetikus energia tárolásán alapuló egységek: lendkerék,
- elektromágneses elven alapuló energiátárolás: elem, SMES, kapacitor.

Víztározós erőmű építéséhez elengedhetetlen a geodetikus szintkülönbség. Ezzel a technológiával Magyarországon nagyon csekély kapacitás építhető, és sajnos ez is kihasználatlan. A jelen munka szempontjából tehát érdektelenné válik.

A levegőtározós csúcserőművi egységek nem igényelnek semmilyen különleges természeti adottságot, bár lényegesen csökkenthetőek a beruházási költségigények, amennyiben föld alatti üreget sóban képezzük ki, vagy meglévő üregek kerülnek hasznosításra. Ezzel a technológiával a későbbiek során részletesen foglalkozunk. Előnyei a viszonylag gyors indíthatóság, rugalmas menettartás, hátrányai a hosszú építési időtartam és a nagy beruházási költségigény [9].

A fenti felsorolásban következők, a kinetikus illetve elektromágneses energiátároláson alapuló egységek közös jellegzetessége a viszonylag kis beépíthető kapacitás [10]. Ezek leginkább olyan alkalmazások esetén előnyösek, mint szünetmentes tápok, vészkapacitás, gyakori, nagyon rövid időtartamú jelentős teljesítmény-igény esetén.

2.3. Csúcsteljesítmény termelése

A csúcsgények fellépésekor a felmerülő kapacitáshiányt gyorsan indítható, – esetleg forgótartalékként üzemelő – egységek hivatottak fedezni. Világszerte a legnépszerűbb megoldásnak tekinthető. Nagy előnye a korábbiakkal szemben, hogy viszonylag önálló, független a rendszer egészének a menetrendétől.

Könnyen belátható, hogy az ebbe a kategóriába tartozó erőművi konstrukciókra különleges feltételrendszerek érvényesek, mint rövid indítási idő, kedvező megtérülési feltételek, rugalmas szabályozás, maximális rendelkezésre-állás. A jelenleg legelterjedtebb megoldások:

- forgótartalék,
- vízerőmű,
- gázturbinás erőmű,

A forgótartalék gazdaságilag legelőnytelenebb megoldás, mert bár az illető egység üresjáratú terhelésnek megfelelő fogyasztásával és költségeivel számolhatunk, a profit illetve az üzemeltetési költség aránya nagyon alacsony. Abban az esetben fontolandó meg, amikor a tüzelőanyag ára rendkívül alacsony, és a berendezés leírásra került, de még élettartam tartalékkal rendelkezik.

Vízerőmű építése Magyarországon lehetséges lenne a Duna, illetve a Tisza folyón. A Bős-Nagymaros beruházás megkezdődött, majd különböző okok miatt várhatóan hosszú időre abbamaradt. Az említett egység kb. 500MW nagyon jól szabályozható, csúcserőműként is használható kapacitást jelentett volna a Magyar VER számára. A Tisza folyón a terep előnytelensége miatt duzzasztógát építése kérdéses.

A vízerőmű magas beruházási költségein túl, viszonylag alacsony üzemeltetési költséggel, és nagyon magas éves kihasználással rendelkezik. További egységek létesítését Magyarországon nem tervezik.

A gázturbina a víz(tározós) erőmű mellett a világon a leginkább elterjedt csúcsteljesítményt előállító erőművi berendezés. Előnyei mindenekelőtt a viszonylag alacsony beruházási költség, rövid építési időtartam, magas rendelkezésre-állási szint és jó hatásfok. Hátránya viszont, hogy amennyiben gyakori indításokkal kell számolni, az

üzemórák száma rendkívül lecsökken. Ennek következtében a villamos-energia árába beépülő állandó-költségek megnőnek [11].

Kevésbé elterjedt megoldások:

- póttüzeléses gáz-gőz kombinált-ciklusú (fűtő)erőmű,
- levegőtározós csúcserőmű.

A póttüzeléses kombinált-ciklusú csúcserőmű lényege, hogy az alaperőműként bevált kombinált ciklusú erőmű hőhasznosító kazánjába póttüzelés lehetőségét építjük be. Ezáltal a villamos völgyidőszakban gazdaságosan működő konstrukció a villamos csúcs-igények idején többlet teljesítmény termelésére képes a többlet hő-bevitel következtében. A növekmény teljesítményre vetítve a gázturbinánál magasabb beruházási költséggel kell számolni, viszont a jobb hatásfok és lényegesen hosszabb élettartam alacsonyabb fajlagos energia költséget eredményez.

A levegőtározós csúcserőmű lényegileg azonos elven működik mint a hagyományos nyíltciklusú gázturbina, azzal a különbséggel, hogy az kompresszió és expanzió időben szétválasztott. Egy nagy méretű földalatti üreg tárolja a kompresszió során előállított sűrített levegőt. Alapvetően két előnye van: a) visszahűtés alkalmazható a sűrítés során, így az izoterma felé eltolt kompresszió fajlagos munkaszükséglete lényegesen kisebb lesz, b) a sűrített levegő előállítása éjjel történik, sokkal alacsonyabb költség mellett, mind az azonos teljesítményt termelő – nappali csúcsidőszakban üzemelő – gázturbinához viszonyítva.

Az utóbbi technológiák elemzésével a későbbiek során részletesen foglalkozunk.

3. A VIZSGÁLATOK SORÁN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK ÉS ESZKÖZÖK

Vizsgálataim során abból indultam ki, hogy a csúcserőművi konstrukciók esetén nem pusztán termodinamikai jóságuk, hanem más peremfeltételek figyelembe vétele is elengedhetetlenül szükséges. A csúcsteljesítményt előállítására tervezett egységek esetén az igények ellátásának biztonsága és a tartaléktartás mellett a megtérülésük illetve az előállított villamos-energia fajlagos költsége az elsődlegesen fontos szempontrendszer.

Részletes irodalomkutatást végeztem, annak feltérképezésére, hogy nemzetközi viszonylatban milyen csúcserőművi technológiák irányában folynak kutatások. A hazai

szakirodalom áttekintése, a Magyarországon az utóbbi években történt, illetve a közeljövőben aktuális beruházásokról adott hasznos támpontokat.

Következő lépésként kiválasztottam a kitűzött célnak megfelelő és nem utolsó sorban a hazai gazdasági és energetikai peremfeltételekbe beilleszkedő technológiákat. Vizsgálataim során a számítások bonyolultsága miatt egyedül elképzelhető munkamódszerként a számítógépes szimulációt tekintettem. A modellezéshez a nemzetközi és belföldi szakirodalom szolgáltatott támpontokat.

A modellek megalkotása és tesztelése után a választott erőművi konstrukciók hőtechnikai, üzemviteli és gazdasági elemzése következett. Az egyes megoldás értékelésekor több szempontrendszer is érvényesítettem, mint beruházás megvalósíthatósága, technológiai színvonal, beruházási költség, valamint a már említett termelt villamos-energiára vetített fajlagos költség.

Egy kereskedelemben kapható nagy teljesítményű programcsomag¹⁰ segítségével lehetségessé vált nagyszámú számítások elvégzése, akár fokozott bonyolultságú munkafolyamatok esetén is.

Az említett software továbbfejlesztése után¹¹ alkalmassá vált nagy hatékonyságú adatbázis generálásra, illetve egy- vagy többparaméteres optimalizálásra is összetett célfüggvény szerint.

4. A KUTATÁS EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA, TÉZISEK

Jelen értekezésben tárgyaltak legfontosabb eredményei a következő területek köré csoportosíthatók:

- Kondenzációs póttüzeléses gáz-gőz kombinált körfolyamat,
- Ellennyomású póttüzeléses gáz-gőz kombinált körfolyamat,
- Forróvíz kazán és gázturbina együttműködése,
- Levegőtározós gázturbinás csúcserőművi egység,
- Erőművi körfolyamatok numerikus modellezése és optimalizálása.

¹⁰ Enter Software Inc. által gyártott GateCycle, és segédprogramjai.

¹¹ Excel 97 for Windows –ban írt makró alapú programok.

Mindegyik tézist rövid bevezetés előzi meg, aminek célja az eredmények értékelésének a megkönnyítése. A tézis szövegét folyamatos sorszám és dőlt betűs szedés emeli ki. Ezt magyarázatok és hozzáfűzések követhetik.

Szögletes zárójelk jelzik az értekezés azon fejezetét, melynek eredményeit a tézis tartalmazza, valamint a publikációt, amelyben az eredmények a nyilvánosság előtt is be lettek mutatva.

4.1. Kondenzációs póttüzeléses gáz-gőz kombinált körfolyamat

A gáz-gőz kombinált körfolyamat dinamikus fejlődő erőművi technológia. Mérsékelt beruházási költségigénnyel, építési időtartammal és kiemelkedően jó hatásfokkal rendelkezik. A jelen kutatás szempontjából érdekes csúcsergia termelést viszont hosszú indítási időtartam miatt nem tudja megvalósítani.

A hőhasznosító kazánban történő időszakos póttüzeléssel a villamos csúcsigények idején többlet villamos teljesítmény termelhető. Így, a zsinórüzemben nagyon kedvező paraméterek mellett működő erőmű csúcskapacitásként is üzemelhetne.

Az alábbiakban a póttüzelés véghőmérsékletének a 650°C –os értéket szabtuk meg¹².

Az irodalom, pl. Kehlhofer [12] foglalkozik a póttüzelés véghőmérsékletének hatásával különböző erőművi elrendezésekre. Más szerzők is, Javed, Fülöp, Buschmann, [13][14][15], részletes elemzéseket közölnek a póttüzelés mértékének a hő- és villamosenergia mennyiségére gyakorolt hatásáról, de nem találtam utalást a csatornaégők helyének megválasztásáról.

Vizsgálataim során változtattam a gázturbina méretét és kilépő füstgázának hőmérsékletét, a napi indítások számát, a póttüzelés véghőmérsékletét valamint a póttüzelést lehetővé tevő csatornaégők helyét a hőhasznosító kazánban.

1./ Számításokkal bizonyítottam, hogy a póttüzelés kezdetének hőmérséklete döntően befolyásolja a rendszer egészének üzemvitelét; a rendszer túlterhelhetősége fordítottan arányos, míg a rendszer összhatásfoka, illetve a növekmény-teljesítmény előállításának

¹² Ez a határ fölött a hőtechnikai előnyök nem kompenzálják az anyagköltségeket.

hatásfoka egyenesen arányos a póttüzelés kezdetének füstgáz-hőmérsékletével. [§5.5], [P5], [P8];

Megállapítható, hogy a teljesítmény-többség „mennyisége” és előállításának „hatásfoka” más-más helyen a legnagyobb. Kizárólag hőtechnikai megfontolásokat véve alapul tehát, optimális csatornaégő hely nem értelmezhető. Gazdasági elemzések hivatottak eldönteni a legelőnyösebb megoldást.

A leginkább népszerű csúcserőművi technológiával – nyíltciklusú gázturbinás egységgel – való összehasonlítást a termodinamikai elemzésen túlmenően gazdasági szempontok szerint is el kell végezni.

2./ Elméleti megfontolásokra és számítási eredményekre alapozva igazoltam, hogy a póttüzelés megfelelően megválasztott paramétereivel, a póttüzelés segítségével egy kondenzációs gáz-gőz kombinált munkafolyamatú egységből termelhető növekmény teljesítmény kedvezőbb üzemviteli és gazdasági feltételek mellett alkalmas villamos csúcserőmű termelésére, mint egy azonos teljesítményű gázturbinás egység. [§5.6], [P1]

Az egyes vizsgált esetekre az éves fajlagos költségeket, valamint a termelt villamos energia fajlagos költségeit fejeztük ki.

A számításokat az irodalomban [21] található modelltől kiindulva végeztem el.

4.2. Ellennyomású póttüzeléses gáz-gőz kombinált körfolyamat

Az Ajkai Erőmű közeljövőben esedékes leállítása kapcsán, tanulmányoztuk egy olyan fűtőerőmű konstrukció megvalósíthatóságát, amely az Ajkai Timföldgyár Rt. villamos-energia és két nyomásszintű gőz igényét, valamint Ajka város távfűtését látná el [16]. A hőigények csúcsteljesítménye $\approx 170\text{MW}$, míg az átlag hőigények $\approx 90\text{MW}$.

Ezekre a többszörösen összetett, egymástól független és széles határok között változó igényszintek ellátására a leginkább egy – a legnagyobb hőigényekre méretezett – kombinált ciklusú, fűtőturbinás gáz-gőz erőmű felelne meg.

Javaslatunk szerint egy csökkentett beruházási költség igényű változat lehetne a két, iker gázturbinás ($2 \times 25\text{MWe}$), kétszeres póttüzeléses, kétnyomású hőhasznosító kazános

blokk, gőzturbina nélkül. A méretezés a minimális igényekre történik, az ennél nagyobb hőteljesítmény kiadása póttüzeléssel fedezhető.

Üzemzavari leálláskor a működő egység rendelkezik az előírt vésztartalék-kapacitással.

Amennyiben póttüzelés nélküli kombinált-ciklusú egységgel szeretnénk a fenti igényszinteket biztosítani három, iker blokk létesítése szükséges. A gázturbinák teljesítménye 3x48MWe, a darabszámot a szükséges tartaléktartás indokolja.

3./ Számításokkal alátámasztottam, hogy ellennyomású gáz-gőz kombinált körfolyamatú egységek esetén kétszeres póttüzelés helyének és mértékének célszerű megválasztásával a csúcs-hőteljesítmény igények ellátását messzemenően gazdaságosabbá teszi, egy az ugyanerre az igényszintre méretezett póttüzelés nélküli kombinált ciklusú erőműnél. [§6.6], [P7], [P10]

A póttüzeléses egységek éves kihasználása sokkal jobb azáltal, hogy ipari gőztermelő ciklusban a fogyasztási csúcsok időtartamára lehetőség nyílik a névleges gőzmennyiség felett jelentős hőteljesítmény egyidejű, vagy nyomásszintek szerint differenciált kiadására.

Továbbá, a kapcsoltan termelt hő- valamint villamos energia fajlagos tüzelőanyag felhasználása is alacsonyabb az üzemév túlnyomó részében. Kivétel ez alól a maximális póttüzeléshez közeli üzemállapotok, a vészleállítás és a téli maximális hőigények időszaka.

4.3. Forróvíz-kazán elé kapcsolt gázturbina

A hő- és villamosenergia kapcsolt termelésével költségek takaríthatók meg, továbbá tüzelőanyag fogyasztást és ezzel egyidejűleg a károsanyag kibocsátást is csökkenteni lehet. Nem utolsó sorban pedig a máskülönben nagyon szerény profitot jelentő távhőszolgáltatás is egyre inkább gazdaságossá tehető.

Egy, a Magyarországon is nagy számban található forróvíz-kazán típust¹³ tekintve igazolható, hogy a fogyasztói hőigények szélesebb tartományban változnak, mint azt a kazán fedezni tudná. A forróvíz-kazán elé kapcsolt gázturbina egyrészt kapcsoltan

¹³ A szovjet gyártmányú PTVM-50.

termelhetne az év túlnyomó részében hőt és villamos-energiát, továbbá kiszélesítené a korábbi egység üzemi tartományát.

A forróvíz kazánból és a kazán elé kapcsolt gázturbinából álló fűtőerőművek területén előzményként tekinthetőek Fülöp [19], ABB [20] munkák. Az említett irodalom tanulmányozása után, egy konkrét hazai forróvíz-kazán lehetséges gázturbinás bővítésének hőtechnikai, gazdasági és üzemviteli vizsgálata során:

4./ Meghatároztam és igazoltam egy vízcsöves kazán és az elé kapcsolt gázturbinából álló fűtőerőművi egység üzemviteli és gazdasági előnyeit a hagyományos, forróvíz kazános fűtőerőművi egységgel szemben. [§7.4], [P2], [P6]

Megadtam továbbá azt a becsült éves profitot is amelyet a villamosenergia termeléséből eredő többlet bevétel illetve költségelmaradás eredményez. Figyelembe vettem a beruházási költség megtérülését – kamatokkal együtt – a becsült élettartamon¹⁴ belül.

A gázturbina után kapcsolt vízcsöves kazán értelmezhető úgy is, mint egy póttüzeléses ellennyomású kombinált körfolyamat. Tekintve, hogy a kazán-konstrukció magasabb póttüzeléssel elért hőközlési átlaghőmérsékletet valósít meg, elmondható, hogy ebben az esetben a rendszer hatásfokának romlása a póttüzelés növekvő mértékével nem szükségszerű. Ennek vizsgálata indokolt.

5./ Bizonyítottam, hogy ellennyomású gőz-gáz kombinált körfolyamat esetén amennyiben a póttüzeléssel közölt hő átlaghőmérséklete magasabb a gázturbinába bevitt hő átlaghőmérsékleténél a berendezés eredő hatásfoka javul. [§7.4],

¹⁴ Vizsgálatainkhoz a 10, 15, 20 valamint 25éves élettartammal kalkuláltunk, ekkor a becsült éves profit 36,6-72,1 MFT/év.

4.4. Levegő tározós gázturbinás csúcserőmű

A levegőtározós energiatárolás elve és ipari alkalmazása nagy múlttal rendelkezik¹⁵, és a gázturbinás technológia fejlődésével a '70 -es évek második felében már az első levegőtározós, csúcserőmű megépítésére¹⁶ is sor került.

A levegőtározós gázturbinás erőmű lényege az időben szétválasztott kompresszió és expanzió közzé illesztett energiatárolás. Azáltal, hogy így kisebb és olcsóbb energiaigényű sűrítés valósítható meg, olyan csúcserőmű egységet kaphatunk, amely jól szabályozható, gyorsan indítható és a gázturbinához viszonyítva alacsonyabb költségű csúcserőmű előállítására alkalmas.

Az utóbbi két évtized alatt viszonylag kevés további erőmű épült ezzel a technológiával. A gázturbinák technológiai fejlődése, valamint a fosszilis tüzelőanyagok és a csúcserőmű árának növekedése viszont a jövőben egyre gazdaságosabbá teheti ezt az erőmű típust.

Fontosnak tekintetem ennek a csúcserőművi technológiának a részletesebb elemzését. Különböző tározó típusokat (állandó nyomású illetve állandó térfogatú), menetrendet (1 indítás x 4űh/nap, 2 indítás x 2űh/nap), valamint a csúszó-nyomásos és a lépcsősen fojtott szabályozási eseteket elemeztem.

6./ Megadtam azokat a tervezési és üzemviteli szempontokat, amelyek kiindulópontként szolgálhatnak egy levegőtározós gázturbinás csúcserőművi egység tervezésekor. [§8.4], [P3], [P13]

Az egyes részegységek illesztése és az üzemviteli számítások elvégzése mellett összehasonlítottam a levegő tározós és a hagyományos gázturbinás csúcserőművi egységekkel termelt villamos teljesítmény fajlagos költségét.

7./ Részletes számításokkal igazoltam, hogy a levegőtározós gázturbinás egységek előnyösebb üzemviteli és gazdasági feltételek mellett teszik lehetővé a villamos

¹⁵ Legelőször a Striberg bányában hasznosították (Svédország, 1910), [17].

¹⁶ Huntorf, Németország, 1978. –ban helyezték üzembe, kiadott teljesítménye 290MWe, [17].

csúcsteljesítmény termelését a hagyományos nyíltciklusú gázturbinás egységekhez viszonyítva. [§8.6], [P13]

4.5. Erőművi körfolyamatok számítógéppel segített vizsgálata és optimalizálása

A kutatások során felmerült az igény a kifejezetten időigényes paraméter-vizsgálat illetve optimalizálás¹⁷ automatizálása iránt. Bizonyos rutinszerű feladatok, mint algoritmus szerinti adatmódosítás és adatmozgatás, számítások lefuttatásának automatikus vezérlése, összehasonlítás és döntéshozatal, valamint a gazdasági modellt leíró algoritmus programozhatóak.

Erre a célra illesztő programok készültek a Kalorikus Gépek Tanszéken, amelyek lehetővé tették a modellezett erőművi körfolyamatok paraméter-vizsgálatát illetve optimalizálását. Annak ellenére, hogy mind a matematikai, mind pedig a számítástechnikai és logikai háttér hibáit ki tudtuk küszöbölni, használatuk során az optimalizálás kérdésénél bizonyos problémákat észleltünk.

8./ Bizonyítottam, hogy fokozott bonyolultságú¹⁸ körfolyamatok esetén a rendszerek numerikus optimalizálásának fordított problémája¹⁹ nem általánosan alkalmazható. A kapott eredmények pontossága nem befolyásolható, és megengedhetetlen nagy relatív hibák fordulnak elő. [§9.5], [P9]

A rendszerre előírt tűrések csökkentésének a számítások konvergencia szab határt²⁰. Megadtam a probléma előfordulási feltételeit és javaslatokat tettem a kiküszöbölésére.

9./ Kiterjedt paramétervizsgálat segítségével kimutattam, hogy a célfüggvény egyes paraméterek szerinti gradiensei meghatározóak a szélsőérték keresésnél előírható

¹⁷ Itt főként a két vagy több paraméter, illetve összetett célfüggvény szerint történő optimalizálás.

¹⁸ Bár ezt a határt meghatározni lehetetlen, a szabályozó jellegű elemek számára irányelvként tekinthető a 10. Ezek a gázturbina, gőzturbina, gőzfejlesztő, kondenzátor, gáztalanító, kompresszor, stb.)

¹⁹ Amely során egy paraméter-rendszer azon értékét keressük, amelyre egy adott célfüggvény(rendszer) szélsőértéket vesz fel.

²⁰ A tűrés csökkentésével a számításhoz szükséges idő növekszik hatványosan.

minimális tűrés értékére, minek eredményeképpen az inverz probléma esetén döntően befolyásolják a végeredmény pontosságát. [§9.5], [P9]

5. KITEKINTÉS

A jelen munka kiegészítéseként az itt tárgyalt csúcserőművi technológiák részletesebb elemzését, valamint újabbak vizsgálatát tervezem. Ezen célok közül néhány:

- Cheng-ciklusban működő póttüzeléses gáz-gőz kombinált körfolyamat üzemviteli és gazdasági elemzése.
- A gőzturbina üzemszerű túlterhelésének gazdasági és üzemviteli elemzése; mindenek előtt a turbina előtti hőmérséklet emelése illetve víz/gőz befecskendezés.
- Vizsgálni szeretném a Rankine körfolyamat nyomásszintjei számának, illetve az újrahevítés hatását a póttüzeléses kombinált-ciklusú erőmű egészére.
- Fűtőerőmű üzemviszonyainak elemzése, amikor az erőmű a mindenkori alap-, illetve csúcserőművel kapcsolatban hőt is termel.
- Levegő tározós gázturbinás csúcserőművek esetében új kapcsolási változatok és menetrendek elemzése.
- Mennyiségi szabályozás kérdései levegő tározós gázturbinás egységeknél.
- A vizsgálat céljából megalkotott modellek felépítésénél a számítógéppel segített, költségorientált optimalizálás nyújtotta előnyök alkalmazása.
- A gazdasági elemzések finomítása, valamint a megtérülés számításához a karbantartási kiesések és az élettartam becslésének pontosítása.

6. A TÉZISEK TÉMÁJÁBAN NYILVÁNOSAN BEMUTATOTT MUNKÁK

6.1. Folyóiratcikkek:

- P1.–Thermo-economic Analysis of Peak-Power Plants using Supplementary Fired Combined-Cycles, Penninger A., Czinkóczy B., Veér T., International Journal for Applied Thermodynamics, Centre for Applied Thermodynamics, Istanbul, 2000. (Felkérés cikk benyújtására, elbírálás alatt);
- P2.–PTVM-50 típusú forróvíz-kazán gázturbinás bővítése, Czinkóczy B., Könczöl S., Veér T., Energiagazdálkodás, 41. évfolyam, pp. 14-17, 8/2000;
- P3.–Moderne Spitzenlast-kraftwerk-anlage mit Pressluft-energiespeicherung einer Leistung von 500 MW, Penninger A., Czinkóczy B., Veér T., Periodica Polytechnica, Ser. Mech., Vol 43., pp 19-28, 1999;
- P4.–A póttüzeléses kombinált ciklusú erőmű mint lehetséges csúcserőművi célra, Czinkóczy B., Veér T., Energiagazdálkodás, 40. évfolyam, pp. 14-18, 11/1999;
- P5.–Gázturbinás alkalmazások levegőtárolós csúcserőművi célokra, Czinkóczy B., Veér T., Energiagazdálkodás, 39. évfolyam, pp. 440-444, 10/1998;

6.2. Hazai és külföldi konferenciákon tartott szóbeli előadások (nyomtatásban mint proceeding jelentek meg):

- P6.–PTVM-50 típusú forróvíz-kazán gázturbinás bővítése, üzemviteli és gazdasági elemzés, Dr. Czinkóczy B., Könczöl S., Veér T., 16. Távhő Konferencia, Siófok-Balatonszéplak, Hungary, 2000 szeptember,
- P7.–Változatok elemzése az Ajkai Timföldgyár energiaellátására és Ajka város távfűtésére, Dr. Czinkóczy B., Veér T., 16. Távhő Konferencia, Siófok-Balatonszéplak, Hungary, 2000 szeptember,
- P8.–Combined Cycles with Supplementary Firing as Peak-power Generating Facilities, Dr. Penninger A., Dr. Czinkóczy B., Veér T., ECOS 2000, *International Conference on Energy and Process Systems*, Proceedings pp. 481.-489., Enschede, (The Netherlands), July 2000,

- P9.–Tools for Analysis and Optimisation of Plant Cycles for Peak-Power Generation, Dr. Czinkóczy B., Veér T., MicroCAD 2000, Miskolc, Hungary, February 2000, pp. 33-39, 2000;
- P10.–Alternatives for Energy, Steam and District-heating Supply Facilities for Ajkai Timföldgyár and Town Ajka, Dr. Czinkóczy B., Veér T., *Gépészet 2000 Conference*, T. U. Budapest, Hungary, 2000, pp. 113-118, 2000;
- P11.–Gázturbinás csúcserőművi technológiák, áttekintés, Veér T., Gépipari Tudományos Egyesület, Szóbeli előadás, Február 1999;
- P12.–Gas Turbines for Peak-Power Plant Application of Compressed Air Energy Storage, Dr. Penninger A., Dr. Czinkóczy B., Veér T., *Gasturbinen in Energietechnischen Anlagen*, Proceedings pp. 255-259, Leverkusen, November 1998;
- P13.–Moderne, 500MW Spitzenlastkraftwerk-anlage mit Pressluft-energiespeicherung, Dr. Penninger A., Dr. Czinkóczy B., Veér T., *XXX. Kraftwerkstechnisches Kolloquium*, Proceedings II. pp. 132-141, Dresden, Oktober 1998;

AZ ÖSSZEFOGLALÓBAN IDÉZETT IRODALOM JEGYZÉKE

- [1] EPRI/PEPCO/DOE, Hard Rock Cavern CAES project Status Report, Compressed Air Energy Storage Symposium Proceedings, 1979 January;
- [2] Gaul, G., Westinghouse CAES Program Status Report, 55th Annual American Power Conference, Chicago, Vol. 55-2, 1993;
- [3] Schainker, R.-B., Mehta, B., Pollack, R., Overview of CAES Technology, 55th Annual American Power Conference, Chicago, Vol. 55-2, 1993;
- [4] Vollmer, H., Primärenergieverbrauch in Osteuropa, VGB Kraftwerkstechnik, 79. Jahrgang, 2/1999;
- [5] Vollmer, H., Primärenergieverbrauch in Westeuropa, VGB Kraftwerkstechnik, 79. Jahrgang, 1/1999;
- [6] Nagy Z., Simig P., A közcélú erőművek primer-energia felhasználása, MVM Közleményei, 3/1999;
- [7] OVT Közleményei, MVM Közleményei, 2/1999;
- [8] Energiafelügyelet, Közlemények, MVM Tröszt Közleményei, 4/1989;
- [9] Weber O., Das Luftspeicher-Gasturbinenkraftwerk Huntorf der NWK AG., BBC AG. Mannheim, 1975;
- [10] Masada E., Industrial Application of Energy Storage Technologies, SZTAKI, Budapest, 2000 szeptember;
- [11] Jordal K., Torisson T. Linder U., The Impact of the Blade Materials on Long-term Gas Turbine Profitability, ECOS 2000, Enschede, 2000 July;
- [12] Kehlhofer R. H., Combined-cycle gas and steam turbine power plants, Fairmont Press, 1991;
- [13] Javed A. S. , Availability analysis of three different types of combined cycle power plants, PhD Thesis, Göteborg T. H., 1993;
- [14] Fülöp Z., Kenndaten für kombinierten Gasturbinen-Dampf-Kraftwerken, Gaswärme International, Heft 10, 1993 Oktober;
- [15] Buschmann M., Kombi-kraftwerke für die Energieversorgung von Produktionsbetrieben, VGB Kraftwerkstechnik, 72. Jahrgang, 2/1992;
- [16] Czinkóczy B., Jelentés az Ajkai Timföld Kft energiaellátásáról és Ajka város távfűtéséről, BME Kalorikus Gépek Tanszék, 1998;

- [17] Veér T., Evaluation and Analysis of a Gas Turbine Power Plant with Compressed Air Energy Storage, Diploma Thesis, ETH Zurich, 1997;
- [18] Kaltschmitt M., Neubarth J., A megújuló energiák helyzete és felhasználásának feltételei Németországban, Megújuló energiák Magyarországon Tudományos Konferencia, 2000 szeptember;
- [19] Fülöp Z., Penninger A., Gázturbina hulladékhőjének hasznosítása forróvíz kazánban, Cogen-Turbo, 1991;
- [20] ABB Stal, Experience with Gas Turbine Cogeneration, ABB Technical Reports, 1991;
- [21] Büki G., Energetika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1998.