

Büky Gergely

ÁTTÖRÉSEK AZ ERŐMŰTECHNIKÁBAN

Az utóbbi évtizedekben megélt energiaválságok és energiaár-emelések sok nehézséget okoztak a gazdaságnak és a társadalomnak. De van kedvező hozadékuk is: jelentős hatásfokjavítást kényszerítettek ki. Például gépkocsik esetén könnyű észrevenni a benzinár és a fogyasztás közötti kapcsolatot, hiszen a 70-es évek olajár-emelkedése után az új gépkocsik fogyasztása látványosan, kevesebb, mint felére csökkent. A pozitív hozadék – az egyre szigorodó környezetvédelmi előírásokkal párosulva – áttörést hozott az erőművek hatásfokában is.

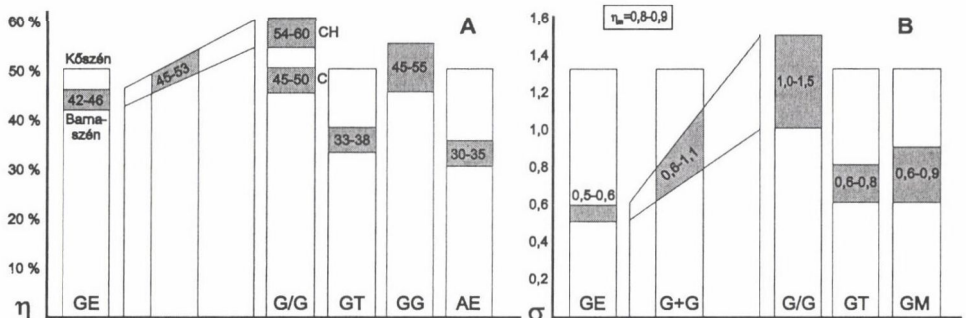
Erőművek energetikai hatékonysága

Az elmúlt évtizedekben az erőművek hatásfoka a várt tendenciáknál erőteljesebben növekedett. Jelenleg a hazai erőműrendszer átlagos hatásfoka mintegy 35 %, ami megfelel a korábbi legjobb gőzerőművek hatásfokának, az épülő kombinált gáz/gőzerőművek hatásfoka pedig már 55–60 %. A jelentős hatásfokjavulásban átütő szerepe van a gázturbinák gyors fejlődésének, és az általuk előidézett versenyhelyzetnek.

A gázturbinák (GT) a legegyszerűbb Joule-körfolyamattal, de igen magas belépő gázhőmérséklettel ($T_1=1000-1500\text{ °C}$) hűdítotk teret. Saját hatásfokuk ugyan mérsékelt ($\eta_{GT}=0,34-0,40$), de a kilépő magas hőmérsékletű gáz

($T_2=500-620\text{ °C}$) hasznosításával energetikai jellemzőik jelentősen javíthatók. A kilépő hő gőzerőműben lehet hasznosítani úgy, hogy a gázturbina és egy nagy gőzerőmű együttműködik (G+G), vagy a gázturbinához egy megfelelő nagyságú hőhasznosító gőzerőművet illesztünk (G/G). Újabbban vizsgálják a kilépő hő saját körű hasznosítását (GG) hőregenerálással, gőzbefecskendezéssel (STIG) és levegőnedvesítéssel (HAT). A kilépő hő hasznosíthatjuk hőellátásra is, ekkor kapcsolt energiatermelő fűtőgázturbinát (FGT) valósítunk meg.

A korszerű erőművek hatásfokát (a), illetve a fűtőerőművek fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelését (b) az 1. ábra mutatja. A villamosenergia-termelés hatásfoka ($\eta=E/G$) szénhidrogén-tüzelésű kombinált gáz/gőzerőművek-nél viszonylag könnyedén elérheti a 60 %-ot. A verseny a szénbázisú gőzerőművek fejlesztőit is arra sarkallja, hogy kőszénre 46–50 %, barnaszénre 42–46 % hatásfokú szuperkritikus gőzerőművet létesítsenek. Szénelgázosítás és nagy nyomású fluidtüzelés esetén több irányú próbálkozással igyekeznek szénbázison is megvalósítani a kombinált gáz/gőzerőműveket. A hatásfokversenyben az atomerőművek elmaradnak, de a szerény javulás náluk is figyelemreméltó.



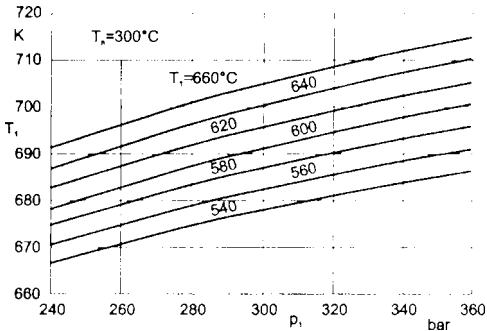
1. ábra • Korszerű erőművek hatásfoka (a), illetve fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelése (b) GE gőzerőmű, GT gázturbina, G+G gázturbina és gőzerőmű együttműködése, G/G kombinált gáz/gőzerőmű, GG gázturbina sajátkörű hőhasznosítással, AE atomerőmű, GM gázmotor

Kapcsolt energiatermelés esetén a mennyiségi hatások az alkalmazott megoldástól alig függ, kisebb mértékben csak a tüzelőanyag befolyásolja ($\eta_m = (E+Q)/G$) A fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelés ($\sigma = E/Q$) viszont az egyes erőműmegoldásoknál erőteljesen eltér, pl. a kombinált gáz/gőzerőműveknél értékük 2–3-szorosa a korszerű gőzerőművének.

Hőálló anyagok szerepe a hatások javításában

Az erőművek elért hatásfokjavításában meghatározó szerepe van az alkalmazható szerkezeti anyagoknak. Általában az anyagtudományi kutatás, konkrétan pedig az erőművi anyagok fejlesztésére irányuló technikai globalizáció mind a gőzerőművek, mind a gázturbinák fejlesztésének egyik alapvető hajtóereje.

A gőzerőművek belépő oldalán a hatásfoknövelés első számú eszköze a kezdőjellemzők növelése. A szuperkritikus újrabehevítésű gőzerőművekben jelenleg szobajövő nyomás- (p_1) és hőmérséklet-növelés (t_1) mellett a hőközlés termodinamikai átlaghőmérsékletének (T_1) növekedését a 2. ábra mutatja.



2. ábra • Szuperkritikus gőzparaméterek hatása a hőközlés termodinamikai átlaghőmérsékletére

A kezdőjellemzők növelésének előfeltétele megfelelő hőálló acélok rendelkezésre állása. A gőzerőművekhez választékot nyújtó hőálló szerkezeti anyagokat négy csoportba sorolhatjuk. Az első csoportot az eddig széles körben alkalmazott, alacsony ötvözetű ferrites acélok alkotják. Ezek kedvező megmunkálási (kovácsolhatóság, hegeszthetőség stb.) és üzemi (hőátadási, hőátágulási stb.) tulajdonságokkal

rendelkeznek, de a megkívánt 100 MPa igénybevétel esetén csak 520–540°C hőmérsékletig alkalmazhatók, azaz ezekkel nem valósíthatók meg a kombinált gáz/gőzerőművekkel szemben versenyképes nagyhőmérsékletű szuperkritikus gőzerőművek. Új acélként jelentek meg az erőműépítésben a 9–12 % króm-tartalmú, ferrites-martenzites szerkezetű acélok. Ezeket az acélokat az Egyesült Államokban, Japánban és az európai országokban (COST 501 program) fejlesztették ki. Ezen belül külön csoportot képeznek a volfrámmal is ötvözött W-acélok. Ezek az acélok gyorsan és széles körben terjednek, s biztosítják a gőzerőművek jelentős nyomás- és hőmérséklet-növelését, illetve a hatásfok számottevő javítását. A hőmérséklet további növelését az ausztenites acélok teszik lehetővé. Kedvező szilárdsági jellemzőik ellenére eddig lassan terjedtek nemcsak magasabb árú, hanem kedvezőtlenebb, jelenleg javítandó technológiai és üzemi jellemzőik miatt. A jövőben gőzerőművek esetén is gondolkodni a gázturbináknál általánosan alkalmazott Ni-bázisú szuperötvözetek bevetésére. Ezek a hőmérséklet további igen jelentős növelését tennék lehetővé, de alkalmazásukat gőzerőművekben fékezi a szükségese nagy mennyiség.

Az alkalmazott szerkezeti anyagok tartam-szilárdsága és a választható gőzjellemzők között szoros kapcsolat áll fenn, ami lehetőséget nyit arra, hogy adott szerkezeti anyaghoz meghatározzuk az optimális kezdőjellemzőket. Hőállóbb acéloknál a kezdőnyomás és a kezdőhőmérséklet egyaránt növelhető, de növelésüket a tartam-szilárdság hőmérséklet függvényében eltérő meredeksége erősen befolyásolja. Ferrites és 9–12 % Cr-tartalmú acélok tartam-szilárdsága meredeken csökken a hőmérséklettel, ezeknél a nyomást célszerűbb növelni, mint hőmérsékletet. Ausztenites acéloknál, még inkább Ni-bázisú ötvözeteknél a laposabb tartam-szilárdság-görbék miatt viszont a kezdőhőmérséklet növelése kerül előtérbe.

A gőzerőművek kilépő oldalán a kondenzációs jellemzők javításához növelni kell a gőzturbinák kiömlő keresztmetszetét. A gőzturbiná utolsó lapátjainak szilárdsági igénybevétele elsősorban a forgásból ered, az anyag sűrűségével arányos centrifugális erő húzó hatásából adódik. Az acéllapátok megengedhető hossza

1000–1200 mm, a kisebb sűrűségű titánötvezetekkel viszont 1400 mm-es lapáthossz is elérhető. A titánötvezet a kilépő keresztmetszet 30–60 %-os növelését, mintegy 15 m² megvalósítást teszi lehetővé, s ez jelentős szerepet játszik nagyteljesítményű gőzerőmű-egységeknél a jó hatásfok eléréséhez szükséges alacsony kondenzátornyomás tartásában.

A nagy hőmérsékletű gázturbinák lapátanyagaként kobalt- és nikkelbázisú szuperötvezeteket alkalmaznak. A gázturbinalapátok első generációját a hagyományos öntvények (Conventional Cast – CC), a statisztikusan kristályosodó polikristallitok képezték. Szilárdságnövelés, korrózióval és oxidációval szembeni ellenálló képesség fokozása érdekében különböző ötvezőelemeket vittek be. A szuperötvezetek tartamzilárdságát lényegesen javították a kristályhatárok csökkentésével. Ennek egyik módja az irányított dermedés (Directional Solidification – DS), amely a lapáthossz irányában szünteti meg a kristályhatárokat. Másik út a homogén szerkezetet biztosító egykristály (Single-Crystal – SC), ha egyetlen kristály nagysága az érintett lapát méretével megegyezik, illetve annál nagyobb. Tartamzilárdságuk növelése mellett a szuperötvezetek fejlesztésének fontos feladata oxidációs ellenállásuk növelése és hőtágulási együtthatójuk csökkentése.

A fémcsatlólapátokhoz képest jelentős hőmérsékletnövelést tennék lehetővé a nagyzilárdságú keramikus anyagok (Oxide Dispersion Strengthend – ODS). Gyártásukkal és alkalmazásukkal kapcsolatban tapasztalatok még nem állnak rendelkezésre, ezek az anyagok a jövő lehetőségét jelenthetik.

Korszerű megoldások: hatékonyak és egyszerűek

A technikai globalizáció eredményeként számos korszerű megoldás alakult ki gőzerőművek, gázturbinák, gáz/gőzerőművek, atomerőművek stb. területén. A korszerű megoldások egyik közös jellemzője, hogy a kívánt célt hatékonyan, jó hatásfokkal, biztonságosan és környezetbarát módon valósítják meg. Másrészt a rendszerek és a berendezések egyszerűsítése is alapvető követelményként jelenik meg. A technikai globalizáció eredményének tekinthető az is, hogy a különböző cégek korszerű

termékei számos közös vonást mutatnak, illetve az egyes energetikai berendezések azonos irányban fejlődnek. A következőkben néhány korszerű erőműmegoldásra utalunk.

Szuperkritikus szénbázisú gőzerőművek

A gázturbinák térhődítésével korszerű gőzerőművet csak szénbázisra terveznek. Fejlesztésükre amerikai, japán és európai cégek nemzetközi kutatási programot hoztak létre. Az összefogás elsősorban 300 bar-nál nagyobb nyomású, 600°C-nál nagyobb hőmérsékletű újrahevítéses erőműblokkok szerkezeti anyagainak és technológiájának, kapcsolásának és berendezéseinek fejlesztésére irányult.

A szuperkritikus erőmű gőztermelő berendezése kényszeráramlású, általában toronykazanban elrendezve. A kényszeráramlású kazán fix pontját képezi a vízleválasztó. A túlhevítő és az újrahevítő egyaránt több szakaszra oszlik, a szakaszok csöveit gyűjtőcsövek fogják össze, strangokra osztva. Az egymást követő strangok – a hőmérséklet-kiegyenlítés érdekében – változva helyezkednek el. A fűtőfelületek általában ellenáramúak, de a túlhevítő és az újrahevítő utolsó fokozata egyenáramú, ami a magas hőmérséklet és hőterhelés hatását kiegyenlíti.

A nagyteljesítményű egységek szénportüzelésűek. Az NO_x-szegény égők a levegő primer/szekunder/tercier bevezetésével és füstgázvisszavezetéssel viszonylag kevés nitrogén-oxidot termelnek, de a szelektív katalitikus leválasztó (SCR) ezt még tovább csökkenti. Villamos porleválasztó és (rendszerint nedves) füstgáz-kéntelenítő már szükséges tartozéka a széntüzelésű gőzerőműnek. Nedveskéntelenítés során a füstgázokat alacsony hőmérsékletre hűtik le, ami jó a hatásfok szempontjából. Kéntelenítés után a lehűlt füstgázokat többnyire a hűtőtornyon keresztül vezetik ki, amelynek lényegesen nagyobb a felhajtó ereje, mint a jó hatásfokú kazánhoz kapcsolódó kéménynek.

A nagy nedvességtartalom miatt a barnaszéntüzelésű erőműegységek hatásfoka mintegy 5 %-kal, illetve relatíve 10 %-kal kisebb, mint a kőszén-erőműveké. Ez a különbség potenciális hatásfokjavítást is jelent, ha a szén nedvességtartalmát vízként még a tüzelés előtt eltávolítjuk. Korábban a szén az őrlés érdekében szárították, pl. tüztéri gázzal a nedvességtartalmat

elgőzölögtették, s a gőz a füstgázokban távozott, tehát a szén (alsó) fűtőértékét hasznosították. Jelenleg azt vizsgálják, hogy a szén víztartalma milyen mechanikus és termikus eljárásokkal távolítható el, és hogyan akadályozható meg, hogy gőzként a kazánba kerüljön. Víz eltávolítása a barnaszénből lényegében az égéshő hasznosítása irányába mutató lépést jelent, ami barnaszéntüzelésű gőzerőművek jelentős hatásfokjavítását eredményezi.

Nagyhőmérsékletű gázturbinák

A gázturbinák hatásfokjavítása szempontjából leglényegesebb a belépő gázhőmérséklet (T_1) növelése, amit több hatás együttesen eredményez. Az alapot a turbinalapát-anyagokban megengedhető hőmérséklet (T_u) emelése jelenti, ha a hagyományos szuperötvözetek (CC) helyett irányított kristályosodású (DS) és egykristályú (SC) ötvözeteket alkalmaznak. Az utóbbi évtizedekben a szuperötvözetek javításával a lapátanyagok hőmérséklete 750°C-ról mintegy 950°C-ra, azaz 200°C értékkel növekedett. Jelentős, több mint 300°C hőmérsékletkülönbség áthidalását teszi lehetővé a hatásos lapáthűtés, amelyet a légűtés javításával és a gőzhűtés bevezetésével érnek el. A belépő gáz és a lapát hőmérséklete közötti különbséget tovább növeli a lapátok keramikus bevonata. A belépő gázhőmérsékletet tehát jelenleg már 1300–1500°C szint között nő.

A hőmérséklet növelésével a gázturbinák úgy váltak korszerű berendezésekké (csúcstechnikává), hogy megtartva a Joule-körfolyamatot, felépítésű egyszerű maradt. Az egyszerűsítést célozza, hogy a nagyhőmérsékleten dolgozó turbinának csak 3–5 hűtött lapátsora van. A hideg levegőt szállító kompresszor viszont ugyanolyan nyomásviszony mellett 15–25 lapátsort tartalmaz. Az erőművi gázturbinák egyszerűsítését eredményezi a korábbi nagyméretű, külön épített silóégők elhagyása, s helyettük körgyűrűs, a környezetvédelmi előírásokat maradéktalanul kielégítő égők alkalmazása.

Az egyszerű felépítés megtartása érdekében eddig kerültek az izotermikus folyamatokat közelítő többfokozatú expanziót, illetve kompressziót. De kivételként lehet olyan példát is említeni, amikor a kétfokozatú expanziót soros tüzeléssel valósították meg úgy, hogy az össze-

függő, egynek tűnő égő két különböző nyomású része között egy lapátsor működik.

Szénhidrogén gáz/gőzerőművek

A szénhidrogén-tüzelésű gáz/gőzerőművekben a korszerű gázturбина magas kilépő hőmérsékletű gázaival gőzt termelnek, ami egy gőzturbinában hasznosítható. Jelenleg hatékonyak a háromnyomású gőztermelés és újrahevítés tekinthető. Szinte ökölszabály, hogy az utánkapcsolt gőzerőmű a kombinált erőműegység villamos teljesítményét és hatásfokát mintegy 50 %-kal emeli.

A gáz- és gőzkörfolyamat kombinációja, illetve a háromnyomású gőztermelés természetesen bonyolítja a kombinált gáz/gőzerőművek felépítését. Érthető törekvés, hogy ezt az – esetenként csak látszólag – bonyolult kapcsolást egyszerűsítsék. A több egyszerűsítést tartalmaz. Az egytengelyes kivételben a gázturбина és a háromházas gőzturбина egyetlen tengelyre kerül, s az erőműegység egy villamos generátorral rendelkezik. Szükség esetén a gőzturбина be- és kikapcsolható egy nagyteljesítményű, oldható és szinkronizáló tengelykapcsolóval. Egyszerűsíti és olcsóbbítja a kialakítást a földszintes elrendezés, mert a turbinák és a generátor állványai elmaradnak. A földszintes elrendezés feltétele, hogy a gáz- és gőzturbinák axiális kiömlésűek legyenek.

A kombinált gáz/gőzerőműveket széles körben hőszolgáltató egységként alkalmazzák. A nagy belépő hőmérsékletű és alacsony hőmérsékletű fűtési hő kiadó egységek hőkiadó rendszerének felépítése általában nagyon egyszerű. Nagy fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelés esetén ugyanis az egyszerűbb hőkiadás miatti veszteségek súlyát sokat veszít jelentőségéből.

Passzív biztonsági rendszerű atomreaktorok

Az atomerőművek a gazdasági versenyben jelenleg elmaradnak a földgázüzemű gáz/gőzerőművektől, a társadalom pedig fél a nukleáris balesetektől és ellenáll az atomerőművek építésének. A társadalom támogatása csak olyan új generációs atomreaktorokkal nyerhető meg, amelyek biztonságosságát a közvélemény elfogadja.

A biztonságnövelés irányában tett jelentős lépés a passzív (inherens) biztonsági rendszerű reaktorok kifejlesztése. A passzív biztonsági rendszer lényege, hogy a reaktor méretezési üzemzavarai során külső energia bevezetés és emberi beavatkozás nélkül, csupán a természetes folyamatok (gravitáció, felhajtó erő stb.) biztosítják az utólagosan termelt hő elszállítását.

A passzív biztonságú reaktorokat, valóságos technikai globalizáció keretében fejlesztették ki. Az USA-ban ilyen a nyomottvízes passzív AP600 és az egyszerűsített elgőzölögtető SBWR reaktor. Európában a passzív nyomottvízes EPR és 1000 MW-os passzív elgőzölögtető reaktort alakították ki. Japán szintén kidolgozta a passzív és egyszerűsített könnyűvízes reaktorok terveit.

IRODALOM:

Büki G.: *Energetika*. Műegyetemi Kiadó Bp, 1997.

Büki G.: *Energiaátalakítás, gáz- és gőzerőművek*. Akadémiai Kiadó Budapest, 2000.

