

AZ MHD-GENERÁTOROK KUTATÁSÁNAK ÉS FEJLESZTÉSÉNEK JELENLEGI HELYZETE ÉS TÁVLATAI

ANTAL K. G.* és BOLLA I. F.**

[Beérkezett: 1972. június 8]

Bevezetés

A világ villamosenergia-szükséglete évente körülbelül 7%-kal emelkedik, s ezen szükséglet kielégítésére az elkövetkezendő tíz évben a villamoserőmű kapacitást kétszeresére kell növelni. A rendelkezésre álló nukleáris- és hagyományos üzemanyagok gazdaságos felhasználása és az új erőművek beruházási költségeinek csökkentése szempontjából rendkívül nagy jelentősége van azoknak a kutatásoknak, amelyek a villamosenergia előállítás új és olcsóbb módszereivel foglalkoznak.

Ebben a programban — az elmúlt években tapasztalható látszólagos visszaesés ellenére — ismét fontos szerepet kapott a mágneses hidrodinamikai úton történő villamosenergia előállítás. Ezt bizonyítja az 1971. áprilisában megtarott V. Nemzetközi MHD-Konferencia, amelyen a világ csaknem minden fejlett ipari országa képviseltette magát, és az ott megjelent kutatók és szakemberek — számos új és biztató kutatási-fejlesztési eredmény birtokában — már jóval derűlátóbban ítélték meg az MHD villamosenergia-átalakítás széles körű alkalmazásának távlatait az elkövetkezendő évekre.

A konferencián megjelent szakemberek előadások és „kerekasztal”-megbeszélések formájában sok értékes elméleti és kísérleti eredményről számoltak be a nyitott- és zártciklusú MHD-rendszerek kutatásával kapcsolatban, sőt az MHD-kutatást legintenzívebben folytató országok kutatói részletes „Status Reportok” formájában tették közzé az elkövetkezendő években megvalósítandó elképzeléseiket, amelyek már nagyteljesítményű erőművek létrehozását célozzák.

Az általános kutatási helyzetkép megítélése szempontjából éppen ezek az átfogó jellegű, az egyes elméleti és kísérleti részproblémákat egy meghatározott gazdasági-ipari koncepció keretében taglaló beszámolók lényegesek.

Az egyes konkrét generátortípusokkal kapcsolatos, a főbb kutatási irá-

* Antal Kálmán, 1204 Budapest, Vécsey lakótelep 4. ép. fsz. 3.

** Bolla István, 1073 Budapest, Kertész u. 43.

nyok kijelölését célzó megfontolásokat itt nem kívánjuk részletesen bemutatni, mivel ezzel a témakörrel az [1] tanulmány foglalkozik behatóan.

Az alábbiakban a kutatást a legnagyobb anyagi ráfordítással folytató ipari országok — Szovjetunió, Egyesült Államok, Japán, Német Szövetségi Köztársaság — koncepcióit elemezzük részletesebben, kiemelve a jelenleg legelőrehaladottabb, a közeljövőben megvalósítható nyitott ciklusú füstgáz-generátoros erőműveket, valamint a gazdaságos üzemeltetésükhöz szükséges egyéb segédberendezéseket.

1. Szovjetunió

A Szovjetunió egyike azon országoknak, amelyek céltudatos és kitartó kutatómunkával törekszenek a mágneses hidrodinamikai elven működő villamos erőművek kifejlesztésére. A szovjet szakemberek akkor is kiálltak az MHD villamosenergia-átalakítás megvalósíthatósága mellett, amikor átmenetileg úgy tűnt, hogy a módszer alkalmazása nem jár a várt előnyökkel. Így az 1968-as Varsói MHD-szimpoziumon is — ellentétben Angliával és Franciaországgal, amelyek bejelentették korábbi kísérleteik beszüntetését — határozottan kitűzött programjuk folytatása mellett foglaltak állást [2].

A varsói Nemzetközi MHD Konferencia óta a Szovjetunió üzembe helyezte az új, U-25-ös, 25 MW-os kísérleti MHD-erőművét. A kísérleti berendezés főbb jellemzőit itt nem ismertetjük, mivel azt részletesen elemzi a [3] tanulmány. Megjegyezzük azonban, hogy részben az itt szerzett tapasztalatok alapján készítették el szovjet kutatók annak a 400 MW-os villamos-teljesítményű csúcsüzemű MHD-erőműnek a terveit, amelyet a Szovjetunió Tudományos Akadémiája Magashőmérsékletű Intézetének és az U-25-ös kísérleti erőmű munkatársai terjesztettek elő [4].

A Szovjetunió európai részének villamosenergia-hálózatában, az időszakosan fellépő nagyobb terhelések fedezésére jelenleg víz- és gázturbinákat alkalmaznak, amelyek bővítése azonban jelentős beruházási költségekkel járna. Az MHD-erőművek alkalmazásával lényeges befektetési költségmegtakarítást lehet elérni, s ugyanakkor az MHD-generátorok jobb „manőverezési” képessége is előnyként tudható be.

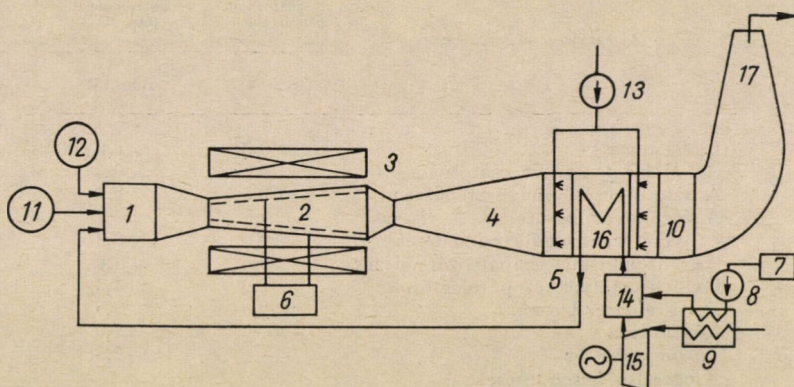
A nyitott ciklusú csúcsüzemű erőművet dúsított oxigén jelenlétében elégetett folyékony üzemanyaggal kívánják működtetni. A szakemberek véleménye szerint a legcélszerűbb a hidrogén üzemanyag alkalmazása lenne, amely elégetése után vízzé átalakulva nagymértékben lecsökkentené a légszennyeződéssel kapcsolatos problémákat.

Mint már említettük, a szovjet erőműtervezési koncepciókban alapvető szerepet játszik az erőmű üzembehelyezési idejének minimalása és az installációs költségek csökkentése.

Az MHD-villamos erőművek műszaki-gazdasági szempontból való optimalása két lépésben történhetik:

— az első lépésben a sűrűlási és hőátadási jelenségek figyelembevételével, egydimenziós áramlási modell alapján meghatározzák — állandó villamos hatásfok és 2—3-as Mach-szám mellett (ultraszonikus áramlás) — azokat az áramlási karakterisztikákat, amelyek egy megadott mágneses indukció érték mellett műszaki szempontból kivitelezhető csatornaprofil eredményeznek. Majd ezt követően megválasztják azon optimális áramlási körülményeket, amelyek az adott csatornaprofil mellett maximális hatásfokot biztosítanak.

— a második lépésben a berendezések konstrukciójának kialakítása történik, s a megfelelő költségfelmérés alapján meghatározzák egy adott



1. ábra. A tervezett szovjet 400 MW-os MHD erőmű vázlatos elrendezése

1: az égőkamra a fűvókával; 2: az MHD csatorna; 3: szupravezető mágnesrendszer; 4: diffuzor; 5: vízbefecskendező rendszer; 6: inverter; 7: cseppfolyós oxigén tartály; 8: cseppfolyós oxigén szivattyú; 9: párologtató; 10: a sózóanyag visszanyerésére szolgáló rendszer; 11: a sózóanyag bevitelére szolgáló rendszer; 12: fűtőanyagadagoló; 13: vízszivattyú; 14: keverő; 15: légkompresszor; 16: levegőelőmelegítő; 17: kémény

profilú, de változtatható csatornahosszúságú MHD-generátor által termelt villamos energia fajlagos költségeit, s ennek figyelembevételével adják meg az ideális csatornahosszúságot.

A fenti elvek alapján — szem előtt tartva a korábbi nemzetközi tapasztalatokat, valamint az U-25-ös kísérleti generátor üzemeltetési tapasztalatait — alkották meg a már említett 400 MW-os nyitott körfolyamatú, csúcsüzemű MHD-erőmű terveit.

Az erőmű MHD-egységének vázlatos képét az 1. ábrán mutatjuk be.

Az 1. ábrán vázlatosan bemutatott, 400 MW villamos teljesítményű generátor naponta két órát, illetve évente körülbelül 500 órát üzemelhet. A berendezés legnagyobb ráfordítást igénylő egysége a cseppfolyós oxigént előállító rendszer, amelyet a költségek minimalása érdekében naponta 23 órán keresztül üzemeltetnek. A rendszer az említett idő alatt termeli meg a napi 2 órás üzemeléshez szükséges cseppfolyós oxigén mennyiséget. Az erőmű hatásfoka ilyen körülmények mellett körülbelül 23%, ami 6%-kal nagyobb, mint a csupán oxigéndúsítással működő hasonló jellegű MHD-erőmű hatásfoka.

A hatásfok azonban még tovább növelhető az égéstermékek hőtartamának egy részét gőzturbinában hasznosítva. Az alábbi táblázatban egy, a szovjet szakemberek által tervezett, cseppfolyós oxigénnel működő 400 MW-os, s egy az előbbihez hasonló, de gőzturbinával kiegészített (600 MW-os) MHD-erőmű 1 kW előállított villamos energiára vonatkoztatott fajlagos beruházási költségeit foglaljuk össze.

I. táblázat

Az egységek megnevezése	MHD-erőmű gőzturbiná nélkül (400 MW)	MHD-erőmű gőzturbinával (600 MW)
	rubel/kW	rubel/kW
Égéskamra	0,3	0,2
Az MHD-generátor csatornája	0,6	0,4
A szupravezető mágnesrendszer	3,5	2,3
A sózóanyag bevitelére és vissza- nyerésére szolgáló berendezés	0,4	0,3
Az automatikus szabályozórendszer	0,6	1,0
Oxigéntartályok és párologtatók	1,9	1,3
Invertáló rendszer	8,0	7,6
Gőzturbiná	—	1,0
Turbogenerátor	—	2,5
Kiegészítő berendezések a főegységhez	—	2,0
Kémény	0,4	0,3
Üzemanyagellátó rendszer	1,2	0,8
Vízszolgáltatás	4,4	4,8
Épületek	3,7	4,8
Az alapegységekre vonatkozó összeg (az oxigénelőállító üzem kivételével)	25,0	29,3
A teljes erőműre vonatkoztatott fajlagos költség (az oxigén- előállító üzem kivételével)	30,8	35,8
Oxigénelőállító üzem	14,2	9,2
Az erőmű teljes fajlagos költségei	45,0	45,0
Hatásfok	23%	34%

Ismeretes, hogy jelenleg a nagy „manőverező” képesség és a kis beruházási költségek követelményének a gázturbinás erőművek felelnek meg a legjobban. A Szovjetunióban elterjedt GT-100-750 típusú gázturbinás erőmű fajlagos beruházási költségei például $70 \div 75$ rubel/kW, a repülőgéphajtóművekkel üzemelő csúcsüzemű erőművek beruházási költségei pedig $52 \div 55$ rubel/kW körül vannak, hatásfokuk pedig $25 \div 28\%$. A táblázatból tehát kitűnik, hogy a második változatként bemutatott gőzturbinával kombinált

csúcsüzemű 600 MW-os MHD-erőmű mind hatások, mind pedig a beruházási költségek alakulása szempontjából sikerrel veheti fel a versenyt a megfelelő hagyományos erőműtípusokkal.

A szovjet kutatási programmal kapcsolatosan megjegyezni kívánjuk, hogy a Szovjetunióban nagy intenzitással folynak az egyéb villamosenergia termeléssel kapcsolatos kutatások is. Így például továbbra is perspektivikusnak tekintik az irányítható magfúzió megvalósítására irányuló kutatási tevékenységet. Az elképzelt fúziós erőművek, valamint a jelenleg nagy számban üzemelő atomreaktoros villamos erőművek azonban elsősorban alapüzemű erőművekként jöhetnek számításba, ami indokolja az MHD-generátorok csúcsüzemű alkalmazhatóságának jelentőségét.

2. Amerikai Egyesült Államok

Néhány amerikai nagyvállalat — az Avco Everett Research Laboratory (AERL), az Edison Electric Institute, a Boston Edison Company, a New England Power Company, a New England Gas and Electric Association, a Northeast Utilities Company és a Consolidated Edison Company — együttesen tervet dolgozott ki egy nagyteljesítményű biztonsági csúcsüzemű erőmű létrehozására.

A csúcsüzemű erőmű tervezésénél egyik alapvető célként a befektetési költségek gyors visszatérülését tűzték ki, s ugyanakkor ezen generátorok tapasztalatait kívánják hasznosítani a későbbiek során megvalósítandó alapüzemű MHD-generátoraik fejlesztéséhez.

A program végrehajtásának három alapvető fázisát jelölték meg:

— *első fázis*: tervezés, modellezés, valamint az előzetes konstrukciós számítások elvégzése;

— *második fázis*: részletes konstrukciós számítások egy 50 MW névleges teljesítményű, 1 MW-os inverterrel ellátott MHD-erőmű létrehozására és üzembehelyezésére;

— *harmadik fázis*: az inverter felszerelése és üzembehelyezése, a gyors indítást és az automatikus működést biztosító berendezések üzembehelyezése, a légkompresszor és az előmelegítő rendszerek beindítása.

Ezt a tervet [5] egy szélesebb körű MHD-kutatási programba kívánják beilleszteni, egy lényegesen nagyobb teljesítményű alapüzemű, széntüzelésű MHD-erőmű létrehozása érdekében. Az elképzelések szerint az 50 MW-os névleges kimenő teljesítménnyel rendelkező kísérleti erőmű prototípusa lehet egy csúcsüzemű-biztonsági MHD-egységnek, s ugyanakkor a nagyobb teljesítményű alapüzemű erőművek megalkotásához is igen értékes tapasztalatokkal szolgálhat.

Az alábbiakban tájékoztatóképpen megadjuk a tervezett csúcsüzemű erőműre vonatkozó fontosabb paramétereket. A táblázat két egymástól csak

kismértékben eltérő erőműtervezetet ismertet. A második változat paramétereinek meghatározása során már figyelembe vették a legutóbbi nagyméretű laboratóriumi kísérletek eredményeit is.

II. táblázat

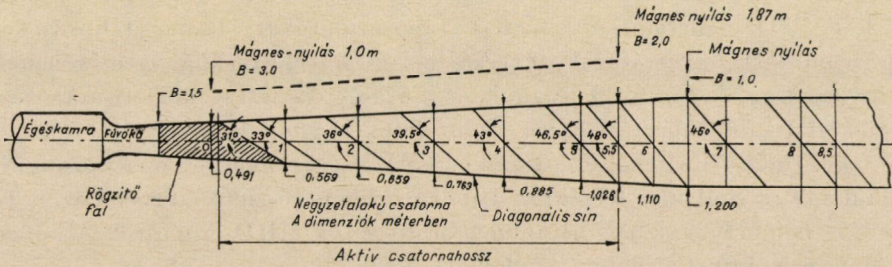
Üzemi paraméterek	I. változat	II. változat
Üzemanyagfelhasználás	80 kg/sec	80 kg/sec
Oxidálószer tárolási kapacitás (üzemóra)	8 óra	20 óra (III. fázisban)
Az égéskamrában uralkodó nyomás (max)	10 atm	10 atm
Visszanyerési nyomás (min)	1,25 atm	1,25 atm
Nettó villamos kimenő teljesítmény (max)	50 MW	50 MW
Bruttó villamos kimenő teljesítmény (max)	55 MW	61 MW
N ₂ /O ₂ arány	0	1
Üzemanyag	# 2 olaj	# 6 olaj
Levegőelőmelegítés (III. fázisban)	—	900 °K
Szóóanyag (súlyszázalék)	1	1
Hall-paraméter (max)	1,3	3,4
Az áramlás lassulása (max)	5%	5%
Aktív csatornahossz	5,5 m	5,5 m
Mágneses térerősség (max)	2 T	3 T

A táblázatban közölt paraméterekkel jellemzett MHD-generátor üzemét ugyanazon kimenő teljesítmény esetében, különböző feltételek mellett vizsgálták. A generátorral biztosítható maximális üzemi feszültség értéke a számítások szerint 16 kV, a maximálisan kicsatolható áramerősség pedig 9 kA, amely két érték azonban nem vehető ki egyidejűleg.

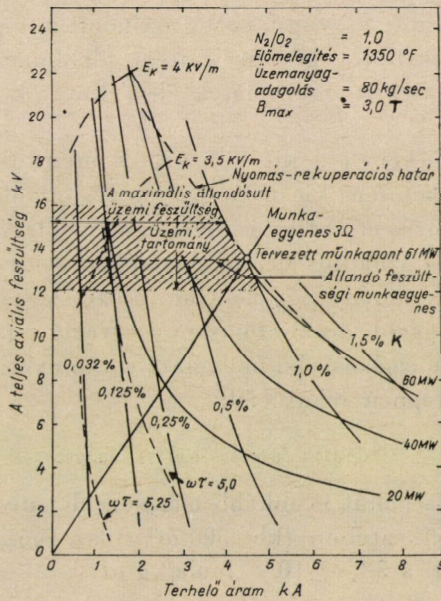
A 61 MW-os generátor volt-ámpér karakterisztikájának számításait az AERL szakemberei végezték el [6—11], figyelembe véve a II. táblázatban megadott paramétereket, s feltételezve, hogy a villamos vezetőképesség, valamint a Hall-paraméter nyomásfüggése ismert, a négyszögletes keresztmetszetű MHD-csatorna pedig a 2. ábrán látható geometriával rendelkezik.

A számítások eredményeként kapott volt—ámpér karakterisztikákat a 3. ábrán mutatjuk be. Ugyanitt láthatók a konstans axiális villamos térerősségeknek és a különböző konstans Hall-paramétereknek megfelelő feszültség—áram görbék.

A 61 MW-os kimenő teljesítménynek megfelelő, tervezett munkapontban a maximális axiális villamos térerősség értéke 3 kV/m. Az ábrából látható, hogy a 3,5, illetve 4 kV/m térerősségeknél a villamos tér viszonylag lassan növekszik az áram csökkentésével. A tervezett munkapontban a Hall-paraméter ($\omega\tau$) maximális értéke 3,4. Megjegyezzük még, hogy a kimenő teljesít-



2. ábra. Az AERL szakemberei által tervezett 61 MW-os MHD-generátor csatornája



3. ábra. A 61 MW-os csúcsüzemű MHD-erőmű tervezett V—A karakterisztikája

mény csökkenésével a Hall-paraméter növekszik (lásd az $\omega\tau = 5$, illetve 5,25 értékeknek megfelelő görbéket).

A 3 ohmos terhelés mellett a generátor üzemi viszonyokra történő fel-futtatása, illetve leállítása a sózóanyag koncentráció fokozatos növelésével, illetve csökkentésével biztosítható, elkerülve ily módon a fel- és lefutási szakaszokban a túlfeszültség kialakulását. Ugyanilyen módon a sózással stationer üzemben is változtatható a generátor kimenő teljesítménye.

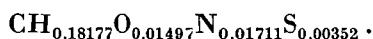
Mint már említettük, a fentiekben ismertetett 50 MW-os csúcsüzemű kísérleti MHD-generátoron szerzett tapasztalatokat a nagyteljesítményű alapüzemű MHD-generátorok tervezésénél és létrehozásánál is messzemenőleg hasznosítani kívánják. Ugyanakkor ma már részletes elméleti számítások és gyakorlati megvalósítást ígérő elképzelések is vannak, amelyek a $300 \div 800$ MW teljesítmény-tartományban működő MHD-erőművekre vonatkoznak. Így például a Westinghouse Research Laboratories is részletes tervet közölt [12] egy $775 \div 800$ MW villamos kimenő teljesítményű MHD-erőműről. A koncepció lényege a következőkben foglalható össze:

- munkaközegként a szén égéstermékét kívánják hasznosítani;
- a munkaközeg sózását a korábban alkalmazott kálium helyett a kisebb ionizációs potenciálú ($3,89 \text{ eV}$) céziummal oldják meg;
- a sózás igen kis súlyszázalékban történik;
- az oxigéndúsításos vagy tiszta oxigénben való égetés helyett az erőműben csak mérsékelt levegőelőmelegítést alkalmaznak.

A fentiekben felsorolt megoldásoktól a kutatók az alábbi előnyöket várják:

A szén égéstermékében a kis H/C arány miatt (kb. 0,18) a keletkező OH-mennyiség meglehetősen kicsi, és így kevés alkálihidroxid keletkezik, amely igen fontos a sózás hatékonysága szempontjából. A két említett tényező lényegesen növelheti a villamos vezetőképességet — az előbbi a rugalmatlan és ionizációt nem eredményező elektronütközések számának csökkenése, az utóbbi pedig a nagyobb alkáliatom-koncentráció miatt (4. ábra).

A füstgázt a szén elgázosítási folyamata során nyerik, s a kapott füstgáz-összetétel következőképpen írható fel:

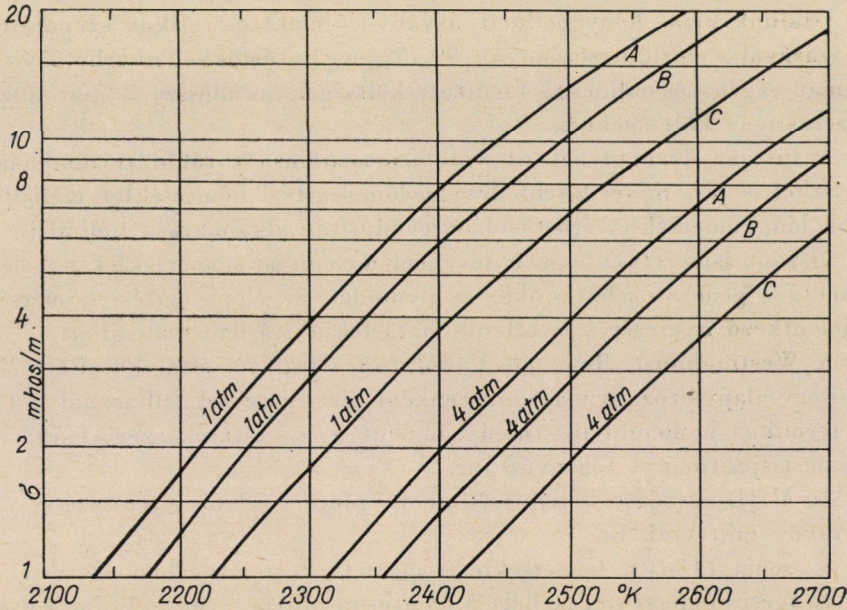


A füstgáz alkalmazása annál is inkább előnyösebb, mivel a részecskék nagy fajlagos felülete következtében (kb. $500 \text{ m}^2/\text{g}$) az égési sebesség növekszik, s így a fűtőérték eléri a $33,5 \times 10^6 \text{ Joule/kg}$ -ot.

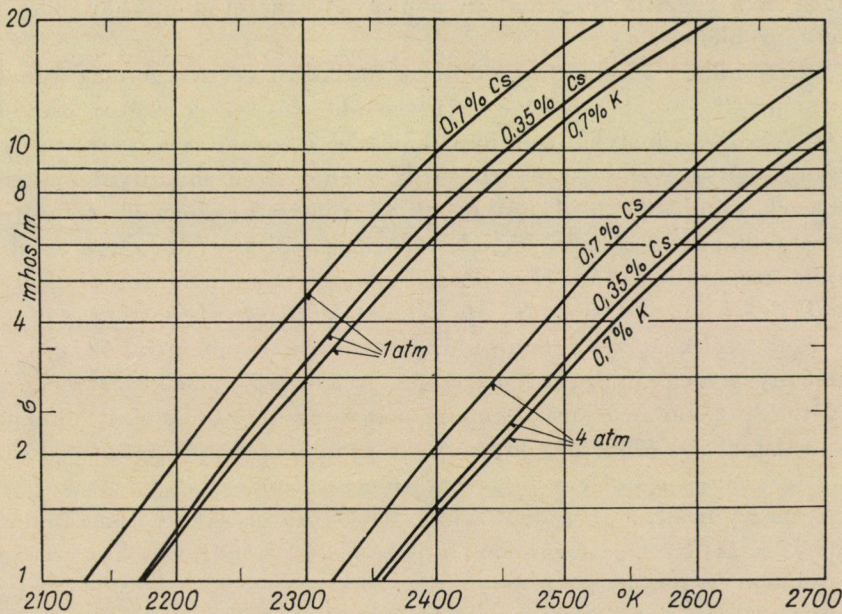
Fontosnak tekinthető a sózóanyag megválasztása is. Mint már említettük, a cézium sózóanyagként való alkalmazása növeli a munkagáz elektron-sűrűségét.

A mérések szerint adott hőmérsékleten és nyomáson, valamint meghatározott súlyszázaléknyi sózóanyag esetében a cézium körülbelül 50%-kal nagyobb vezetőképességet eredményez, mint a kálium (5. ábra). Megemlítjük, hogy a sózóanyag koncentráció és a vezetőképesség között nem túl magas sózási arány esetén megközelítőleg négyzetgyökös összefüggés tapasztalható.

A cézium alkalmazásával elérhető nagyobb vezetőképesség egyben azt is jelenti, hogy csökkenthető a sózás mértéke, ezzel a sózóanyagfelhasználás csökkentéséből származó költségmegtakarítás mellett csökkennek a visszanyerési költségek is.



4. ábra. A vezetőképesség változása a hőmérséklet függvényében 0,35 súlyszázalék Cs sózóanyag alkalmazásakor különböző H/C arányok mellett.
 A – füstgáz és nedves levegő $H/C = 0,182$; B – nedves szén és nedves levegő $H/C = 0,724$;
 C – földgáz és nedves levegő $H/C = 3,899$



5. ábra. A vezetőképesség változása a hőmérséklet függvényében különböző súlyszázalékban száraz karbonátok formájában bevitt Cs és K esetében

Utalunk arra, hogy pollucit ásvány és elektrosztatikus szeparátor alkalmazásával a cézium sózóanyag 99,75%-os hatásfokkal nyerhető vissza a folyamat végén. A pollucitra fordított költségek mindössze 2%-át teszik ki az üzemanyag költségeknek.

A füstgáz üzemanyagként való felhasználása további termodinamikai előnyökkel is jár, mivel kisebb levegőelőmelegítési hőmérséklet mellett magasabb láng hőmérséklet érhető el oxigéndúsítás alkalmazása nélkül is. Másrészt viszont ismeretes, hogy a levegőelőmelegítési hőmérséklet növelésével növelhető a generátor hatásfoka, és ily módon az előmelegítési hőmérsékletben jelentkező nyereség közvetlenül hatásfokjavításban realizálható.

A Westinghouse Research Laboratories kutatói által készített MHD-erőműterv alapváltozata másodpercenként 500 kg szenet felhasználva 1488,5 MW termikus bemenő teljesítmény mellett a számítások szerint 793,5 MW villamos teljesítményt fog nyújtani.

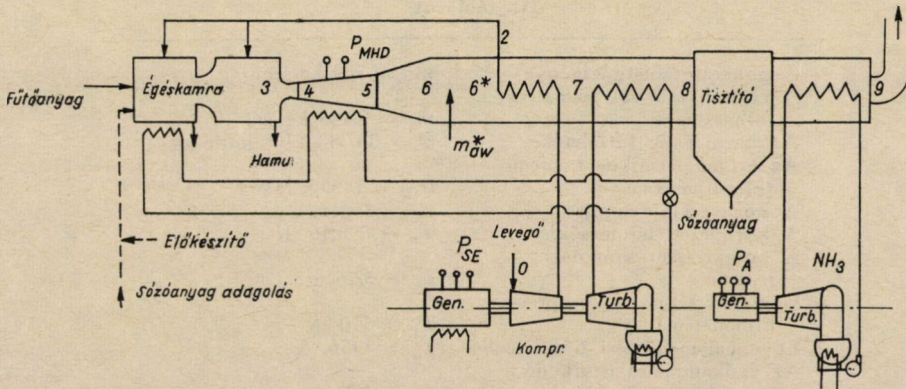
Az MHD-egység és a teljes villamos erőmű vázlatos elrendezését a 6. és 7. ábrákon mutatjuk be.

A szenet 1156 °K hőmérsékletre előmelegített levegőben égetik el, s ez 2680 °K égési hőmérséklet mellett 5,25 atm-ra állítja be az égőkamra nyomását. A cézium sózóanyagot a folyamat végén elektrosztatikus szeparátorok segítségével választják ki az 540 °K, véghőmérsékletű füstgázból. A csatornahemenetnél a gáz hőmérséklete 2200 °K, a csatornakimeneten pedig 2000 °K hőmérséklet uralkodik. Az alkalmazandó hőkicserélők pontos típusát a tervben még nem rögzítik, ez azonban a megvalósítás stádiumában nem jelent lényeges problémát.

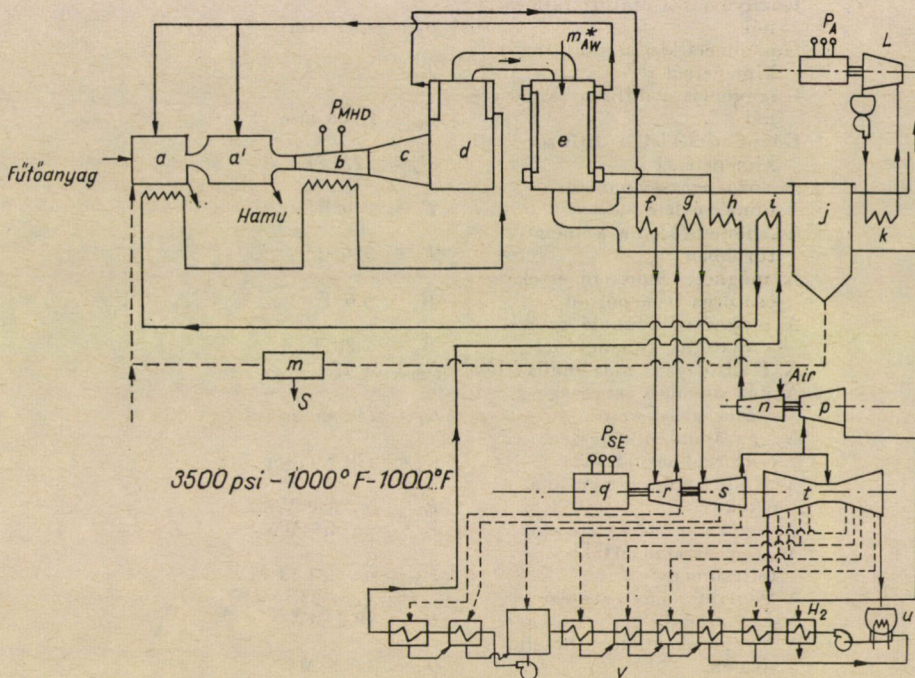
Az erőműben alkalmazott villamos átalakító veszteségeit az átalakított teljesítmény 2%-ára becsülik. Ez, figyelembe véve a generátor összteljesítményét, 7,7 MW, amelyből azonban 3,53 MW a számítások szerint egy gőzgenerátor segítségével visszanyerhető. Így tehát az átalakítóval kapcsolatos veszteségek mindössze 0,28%-át teszik ki a termikus bemenő teljesítménynek. A munkagáz hőmennyiségének jobb hasznosítása érdekében az elektrosztatikus szeparátor után egy Rankine-körfolyamatú ammóniagenerátort iktatnak be. A megoldásra váró részfeladatok között elsősorban a csatornaveszteségek csökkentése, valamint az élettartam szempontjából igen fontos szigetelőanyag megválasztást emeljük ki. A jelenleg rendelkezésre álló kísérleti adatok birtokában a stronciumcirkonát és az alumíniumoxid alkalmazása látszik a legmegfelelőbb megoldásnak. A probléma fontosságára való tekintettel e téren még jelenleg is több kutatóintézet folytat vizsgálatokat.

A nagyteljesítményű alapüzemű MHD-erőműveket jellemző alapvető paraméterek áttekintése szempontjából célszerűnek látjuk a konkrét számítási eredmények bemutatását is.

A táblázatban bemutatott erőműváltozaton kívül a csatornaparaméterek, az égéskamrahőmérséklet, s a levegőelőmelegítési hőmérséklet kismértékű



6. ábra. A Westinghouse Research Laboratories kutatói által tervezett 793 5 MW teljesítményű erőmű MHD-egysége.



7. ábra. A 793,5 MW teljesítményű villamos erőmű MHD-egységének és kiegészítő egységeinek vázlatos elrendezése.

aa': égőkamra; b: generátor (MHD); c: diffuzor; d: tárolókamra és hőszugárzó; e: magas hőmérsékletű levegőelőmelegítő; f: konvekciós gőzfejlesztő; g: gőzújrahevítő; h: alacsony hőmérsékletű léghevítő; i: hővesztéscsökkenő; j: elektrosztatikus tisztító; k: NH₃-melegítő; l: NH₃-turbógenerátor; m: szóanyagadagoló; n: kompresszor; p: hajtóturbina; q: váltakozó-áramú generátor; r: nagyteljesítményű turbina; s: közepes teljesítményű turbina; t: kisteljesítményű turbina; u: kondenzátor; v: hőcsatoló rendszer

III. táblázat

A generátor füstgázigénye	$m_g = 500 \text{ kg/sec}$
A céziumkarbonát szóóanyag-felhasználás	$m_s = 2,145 \text{ kg/sec}$
Az üzemanyag fűtőértéke	$\Theta = 33,543 \times 10^6 \text{ joule/kg}$
Az erőmű termikus bemenő teljesítménye	$Q_{th} = 1488,5 \text{ MW}$
A környezeti nyomás	$p_0 = 1 \text{ atm}$
A környezeti hőmérséklet	$T_0 = 298,16 \text{ }^\circ\text{K}$
A kompresszor kimeneti nyomása	$p_1 = 5,76 \text{ atm}$
Gázhőmérséklet a kompresszor kimeneténél	$T_1 = 510 \text{ }^\circ\text{K}$
Levegőelőmelegítési hőmérséklet	$T_2 = 1156 \text{ }^\circ\text{K}$
Az égőkamrában uralkodó nyomás	$p_3 = 5,25 \text{ atm}$
Az égőkamrában uralkodó hőmérséklet	$T_3 = 2680 \text{ }^\circ\text{K}$
Gáznyomás az MHD-csatorna-bemenetnél	$p_4 = 3,54 \text{ atm}$
Gázhőmérséklet a csatorna-bemenetnél	$T_4 = 2549 \text{ }^\circ\text{K}$
Gáznyomás a csatornakimenetnél	$p_5 = 0,85 \text{ atm}$
Gázhőmérséklet a csatorna-kimenetnél	$T_5 = 2145 \text{ }^\circ\text{K}$
Gáznyomás a diffuzor kimeneténél	$p_6 = 1,088 \text{ atm}$
Gázhőmérséklet a diffuzor kimeneténél	$T_6 = 2221 \text{ }^\circ\text{K}$
A szóóanyag-szeparátor hőmérséklete	$T_8 = 540 \text{ }^\circ\text{K}$
Gázhőmérséklet a kéménytorokban	$T_9 = 380 \text{ }^\circ\text{K}$
A mágneses indukció értéke a csatorna bemenetnél	$B_4 = 6,6 \text{ T}$
A mágneses indukció értéke a csatorna kimeneténél	$B_5 = 2,88 \text{ T}$
A Hall-tényező maximális értéke	$\beta_{max} = 4,1$
A gáz áramlási sebessége a csatornabemenetnél	$u_4 = 750 \text{ m/sec}$
A gáz áramlási sebessége a csatornakimenetnél	$u_5 = 579,9 \text{ m/sec}$
A Hall-térerősség maximális értéke	$E_{max} = 2650 \text{ V/m}$
Az égőkamra hőveszteségei	$\lambda_1 Q_{th} = 74,4 \text{ MW}$
Az egyenáramú MHD-teljesítmény	$P_{MHD} = 384,63 \text{ MW}$
A generátor hővesztesége	$\lambda_2 P_{MHD} = 23,1 \text{ MW}$
A kompresszor teljesítménye	$P_c = 98,2 \text{ MW}$
A levegőnek átadott hőteljesítmény	$Q_a = 325,6 \text{ MW}$
A vízmelegítőnek átadott hőteljesítmény	$Q_B = 948 \text{ MW}$
Sugárzási veszteségek	$Q_R = 4,7 \text{ MW}$
A hidrogénes hőkicsérélőkől nyerhető hőteljesítmény	$Q_c = 6 \text{ MW}$
A gőzfejlesztésre fordítható teljesítmény	$Q_s = 1046,8 \text{ MW}$

III. táblázat folytatása

A gőzturbinás erőműrészleg hatásfoka	$\eta_s = 0,465$
A gőzturbina kimenő teljesítménye	$P_t = 487,2 \text{ MW}$
A villamos generátor hatásfoka	$\eta_g = 0,985$
A nettó turbinatelsítmény	$P_t - P_c = 389 \text{ MW}$
A gőzerőmű villamos teljesítménye	$P_{sE} = 383,3 \text{ MW}$
Az ammónia körfolyamat során nyert teljesítmény	$P_A = 25,6 \text{ MW}$
A teljes villamos teljesítmény	$P_{MHD} + P_{sE} + P_A = 793,5 \text{ MW}$
Az erőmű teljes hatásfoka	$\eta = P/Q_{IH} = 0,5331$
Az effektív hatásfok az inverterveszteségek figyelembevételével	$\eta' = 0,5303$

Megjegyzés: A táblázatban szereplő indexek azonosíthatók a 6. és 7. ábrák jelzéseivel.

változtatásával még további öt esetet vizsgáltak meg. Az adott paraméter-változtatások mellett a hatásfokban lényeges változás nem következik be, alkalmazásuk viszont lehetővé teszi az egyszerűbb konstrukciós kivitelezést.

A villamos erőművek tervezése és kivitelezése során világszerte, s így természetesen az Egyesült Államokban is, nagy figyelmet fordítanak az erőmű által okozott levegőszennyezés és a környezetbe kijutó hőmennyiség minimálására. A környezet termikus felmelegítése (a hűtővizet keresztül) szempontjából az MHD-villamos erőművek kedvezőbb képet mutatnak, mint a hagyományos hőerőművek, mivel a nagyobb hatásfok következtében az előbbi erőműtípusnál 1 MW villamos teljesítményre 0,71 MW környezetbe jutó hőmennyiség esik, míg a hagyományos erőműveknél minden MW villamos energia megtermelése 1,26 MW hűtővíznek átadott hőmennyiséggel jár. Ami a levegő égéstermékekkel való szennyezését illeti, főleg az SO₂ és NO jelent problémát. Az amerikai szakemberek szerint jó elégetési hatásfok és nagy hatásfokú szeparátorok alkalmazásával azonban elérhető, hogy 1000 kg munkagázra mindössze 12 g légszennyező anyag jusson.

3. Japán

A tokiói Society of Electric Cooperative Research kutatói ugyancsak széles körű vizsgálatokat folytatnak annak érdekében, hogy az elkövetkezendő években Japánban megvalósítható legyen egy nyitott ciklusú gőzturbinával kombinált MHD-erőmű komplexum.

Japán műszaki-gazdasági feltételeit és az üzemanyagbeszerzési lehetőségeket figyelembe véve az említett intézetben egy olyan MHD-körfolyamat optimalizációs lehetőségét vizsgálták meg, amelynél üzemanyagként nyersolaj

kerülne felhasználásra [13]. Az erőmű tervezett villamos kimenő teljesítménye 1000 MW. A munkagáz megfelelő vezetőképességének biztosítására az égőkamrába káliumszulfátot adagolnak oly módon, hogy a tiszta kálium koncentráció elérje az 1 súlyszázalékot.

A sózóanyag visszanyerése az amerikai elképzelésekhez hasonlóan elektrosztatikus szeparátorokkal történik, amelyek visszanyerési hatásfoka igen jó (99,8%). Nagy figyelmet fordítanak továbbá a levegőelőmelegítés problémájának megoldására. A megfelelő léghőmérséklet biztosítására három különböző típusú, sorosan kapcsolt levegőelőmelegítő rendszer szolgál. A levegő viszonylag igen magas (1800 °K) véghőmérsékletét egy speciális eső-kvarchomokos előmelegítő rendszer biztosítja [14].

A japán szakemberek előzetes gazdasági számításokat végezve arra a következtetésre jutottak, hogy az erőmű költségeinek szempontjából nagyon lényeges a szupravezető mágnes optimális méretezése, mivel ez tenné ki az MHD-erőműrészeg alapvető installációs költséghányadát. Ezért az optimalizálási feladatnál kritériumként a maximális termikus hatásfokot és a minimális szupravezető mágnes installációs költségeit vették figyelembe.

A japán kombinált MHD-erőmű hatásfoka várhatóan közel lesz az Egyesült Államok által nyilvánosságra hozott kb. 800 MW villamos teljesítményű erőművéhez. Megjegyezzük azonban, hogy a japán MHD-erőmű alapparaméterei lényegesen eltérnek az említett amerikai tervben szereplő paraméterektől. A két erőműkonceptió összehasonlíthatósága érdekében a IV. táblázatban összefoglaljuk az 1000 MW-os gőzturbinával kombinált, nyitott ciklusú MHD-erőmű főbb jellemzőit két különböző indukciójú szupravezető mágnes alkalmazása esetén.

A kiszámított paraméterek alapján megvalósítandó kombinált MHD-erőmű gazdaságossági mutatóit részletesen analizálva megállapítható, hogy annak befektetési költségei 168,3 dollár/kW, a hagyományos gőzerőművekre jellemző 93,3 dollár/kW értékkel szemben. Ugyanakkor az áramtermelés költségei is valamivel meghaladják a gőzerőművekben termelt villamos energia árát — 0,76 cent/kWh a tervezett MHD-erőműben, szemben a 0,66 cent/kWh költséggel, amely a hagyományos gőzerőműveknél jelentkezik. A teljes költségfelmérés során az is kiderült, hogy a szupravezető mágnes installációs költségei nem játszanak olyan lényeges szerepet a teljes befektetési költségekhez viszonyítva, mint azt a szakemberek kezdetben feltételezték. Így annak ellenére, hogy az ilyen kombinált erőművek hatásfoka jóval meghaladja a hagyományos erőművét, még további műszaki jellegű fejlesztőmunkára van szükség a befektetési költségek csökkentése érdekében. Természetesen további lehetőségként megvizsgálandó még egy olyan koncepció is, ahol az optimális tervezés kritériumaként a minimális installációs és áramelőállítási költségek szerepelnek, ellentétben az itt alkalmazott, a maximális termikus hatásfokkal és minimális szupravezető mágnes méretekkel.

IV. táblázat

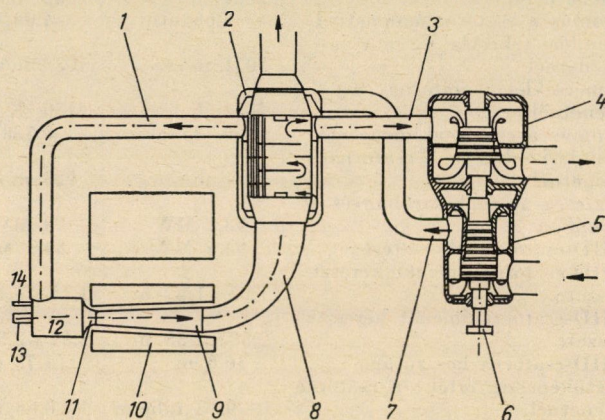
A generátor füstgázigénye		750 kg/sec
A termikus bemenő teljesítmény		1995,2 MW
A levegőelőmelegítési hőmérséklet		1800 °K
A mágneses indukció	5 T	6 T
Mach-szám	1,1	1,1
Egyenáramú MHD villamos kimenő teljesítmény	700 MW	750 MW
Az égéskamrában uralkodó hőmérséklet	2887 °K	2894 °K
Az égéskamrában uralkodó nyomás	7,2 atm	8 atm
Gázhőmérséklet az MHD-csatorna-bemenetnél	2627 °K	2632 °K
Gáznyomás a csatornabemenetnél	3,68 atm	4,08 atm
Gázáramlási sebesség a csatornabemenetnél	1031 m/sec	1033 m/sec
Gázhőmérséklet a csatornakimenetnél	2174 °K	2150 °K
Gáznyomás a csatornakimenetnél	0,737 atm	0,738 atm
Az áramlási sebesség a csatornakimenetnél	931 m/sec	925 m/sec
Hővesztés az égőkamrában és a fűvókában	98,8 MW	99 MW
Az MHD-csatorna hővesztése	94,5 MW	84,1 MW
Az MHD-csatornabemenet keresztmetszete	1,22 × 1,22 m	1,15 × 1,15 m
Az MHD-csatornakimenet keresztmetszete	2,58 × 2,58 m	2,57 × 2,57 m
Az MHD-csatorna hosszúsága	16,6 m	14,78 m
A vezetőképesség értéke a csatornabemenetnél	9,13 mho/m	8,68 mho/m
A vezetőképesség értéke a csatornakimenetnél	1,91 mho/m	1,6 mho/m
Áramsűrűség a bemenetnél	0,74 A/cm ²	0,82 A/cm ²
Áramsűrűség a kimenetnél	0,14 A/cm ²	0,14 A/cm ²
Kimenő feszültség a csatornabemenetnél	5040 V	5780 V
Kimenő feszültség a csatornakimenetnél	9640 V	11540 V
A teljes Hall-térerősség	40,6 V/cm	56 V/cm
Közepes teljesítménysűrűség	12,1 MW/m ³	16,2 MW/m ³
Kompresszorteljesítmény	187,4 MW	200,2 MW
A gőzerőmű hatásfoka	40,44%	40,38%
A turbógenerátor kimenő teljesítménye	354,3 MW	326,3 MW
A teljes váltakozóáramú teljesítmény	1040,3 MW	1061,3 MW
Az erőmű teljes hatásfoka	52,14%	53,19%

4. Német Szövetségi Köztársaság

Az NSZK az elkövetkezendő évtizedekben jelentkező áramigényének több mint felét nukleáris erőművekkel kívánja biztosítani. A nukleáris erőművek azonban csak alapüzemű terhelés esetén üzemeltethetők gazdaságosan. A közép- és csúcsterhelésű igények kielégítésében viszont a szakemberek

nagy jövőt jósolnak a mágneses hidrodinamikai úton történő energiaátalakításnak.

A korábbiakban már rámutattunk arra, hogy az MHD-generátorok hatásfok szempontjából akkor lehetnek versenyképesek az egyéb generátortípusokkal, ha a veszteségi hőt sorosan kapcsolt segédberendezésekben — gőz-, vagy gázturbinákban — hasznosítják. Ilyen megfontolások alapján a jülichi Institut für Technische Physik munkatársai több olyan MHD-erőmű változatot vizsgáltak meg, amelyeknél csak a segédberendezésekben volt eltérés [15].



8. ábra. A jülichi Institut für Technische Physik munkatársai által tervezett gázturbinával sorosan kapcsolt MHD-generátor vázlatos elrendezése

1: a forró levegőt szállító cső; 2: hőcserélő; 3: turbinabemenet; 4: turbina; 5: kompresszor; 6: az indítómotor csatlakozása; 7: nagynyomású csővezeték; 8: diffuzor; 9: MHD-csatorna; 10: mágnes; 11: fúvóka; 12: égőkamra; 13: tüzelőanyag; 14: sózóanyag

A vizsgálatok eredményei alapján a szakemberek úgy ítélik meg, hogy a Német Szövetségi Köztársaságban a különböző terhelési tartományokban a gázturbinával sorosan kapcsolt MHD-generátoros erőművek alkalmazásának van jövője. A 8. ábrán egy, az említett intézetben kidolgozott 50 MW villamos teljesítményű, gázturbinával sorba kapcsolt MHD-generátor vázlatos elrendezését mutatjuk be.

A tervek szerint az erőművet 7500 kcal/m^3 fűtőértékű földgázzal fogják működtetni, s az égéskamrában uralkodó hőmérséklet növelése érdekében mérsékelt oxigéndúsítást alkalmaznak.

Az V. táblázatban összefoglaljuk a tervezett erőmű lényegesebb paramétereit.

A megvalósítás szempontjából a gazdaságossági kérdések is alapvető szerepet játszanak. A csúcsüzemű erőművekben termelt villamos energia előállítási költségei nagymértékben függenek attól, hogy az erőmű évente hány óráig van üzemben. A számítások szerint a fenti változat évi 200 üzem-

V. táblázat

N ₂ /O ₂ arány	2
Levegőelőmelegítési hőmérséklet	1123 °K
Az égéskamra hőmérséklete	2930 °K
Gázhőmérséklet a diffuzor után	2265 °K
A levegő hőmérséklete a turbina bemeneténél	1123 °K
Az égéskamrában uralkodó nyomás	18,4 atm
A nyomás a diffuzor után	1,6 atm
A légturbina hatásfoka	28%
A teljes erőmű hatásfoka	38,6%

órás működtetés mellett már ugyanolyan gazdaságos, mint a hagyományos gázturbinák, s évi 1000 óra üzemidő elérése esetén már kb. 10÷15%-kal olcsóbb.

Igen nagy előnye még a fenti MHD-rendszernek az, hogy amíg a gázturbinás generátorok 1÷2 perc alatt futtathatók fel teljes teljesítményükre, addig az oxigéndúsításos, légturbinás MHD-rendszer felfutási ideje néhány sec.

Az említett erőműkonceptió mellett az NSZK-ban igen intenzív kutatómunka folyik az összhatófok és a befektetési költségek minimalizálása szempontjából egyáltalán nem elhanyagolható szerepet betöltő segédberendezések optimális kialakítása érdekében is.

Összefoglalás

Megállapítható, hogy jelenleg a fejlesztési és kutatási szempontból egyaránt legelőrehaladottabb típusnak, a nyitott ciklusú füstgáz MHD-generátoroknak nagyteljesítményű erőművekként való megvalósítására az elkövetkező években megvan a reális lehetőség.

A gazdaságos alkalmazáshoz azonban a legjobban kifejlesztett változatok esetében is még igen intenzív és széles körű kutatómunkára van szükség, amelyben a korábbiakhoz hasonlóan — mind elméleti, mind kísérleti téren — komoly szerep juthat a kisebb anyagi lehetőségekkel rendelkező országok kutatóinak és kutatócsoportjainak is.

IRODALOM

1. BITÓ J. F.—SZENDY K.: Az MHD-generátorokkal kapcsolatos kutatások főbb irányvonalai, *Acta Techn. Hung.* (közlés alatt)
2. SZENDY K.: Az MHD-generátorokra vonatkozó kutatások eredményei az 1968. évi Varsói Szimpózium tükrében, *Energiaipari Szakirodalmi Tájékoztató*, Budapest 1969
3. Opütnaja promüslennaja usztanovka sz MGD-generatorom mocsnosztju 25 MW, VII. Mirovaja Energeticseszaja Konferencija Szekc. C4, Dokl. 72

4. SHEIDLIN, A. E.—SHUMYATSKII, B. YA.—KOVASYUK, V. I.—SHELKOV, E. M.—STOLYAR L. P.: Estimation of Efficiency of MHD Peaking Power Plants, *V. Int. Conf. of MHD-Electr. Pow. Gen.*, 1 (1971)
5. KANTOROWITZ, A. R.—ROSA, R. J.—IRWING, W.: Review of the 50 MW Experimental Power Plant Program at AERL, *ibid.*
6. TENO J.—BROGAN T. R.—PETTY S. W.: Studies with a Hall Configuration MHD Generator, Presented at the 10th. *Symposium on Engineering Aspects of MHD, MIT*, March 1969
7. MATTSON, A.—BROGAN T. R.: Self-Excited MHD Generators, Presented at the *International Symposium on MHD Electrical Power Generation*, Salzburg, Austria, July 1966
8. LOUIS J. F.—LOTHROP J.—BROGAN T. R.: Studies of Fluid Mechanics using a Large, Combustion Driven MHD Generator, *AERL Research Report 145* March 1963
9. TENO J.—BROGAN, T. R.—DINANNO, L. R.: Hall Configuration MHD Generator Studies, Presented at the *International Symposium on MHD Electrical Power Generation*, Salzburg, Austria, July 1966
10. TENO, J.—LIU, C.—BROGAN, T. R.: Boundary Layers in MHD Generators, Presented at the *10th Symposium on the Engineering Aspects of MHD, MIT*, March 1969
11. FROST, L. S.: Conductivity of Seeded Atmospheric Pressure Plasmas, *J. Appl. Phys.*, 32 (1961)
12. WAY, S.: MHD Power Plant for Early Realization, *V. Int. Conf. of MHD-Electr. Pow. Gen.*, Vol. 1 Munich 1971
13. MORI, Y.: Cycle and Efficiency of Large Scale Open-Cycle MHD Power Plants, *ibid.*
14. NAKAMURA, N.—NARITA, Y.—TAIRA, T.: Studies of Falling Particles Regenerator, *ibid.*
15. BOHN, TH.—NOACK, G.: A Special Open Cycle MHD Power Plant Concept and its Aspects for the Use in Different Load Regions, *ibid.*

The Present Situation and the Perspectives of MHD Generator Research and Development.

The paper reviews the present situation of research on electrical power generation by magneto-hydrodynamics (MHD). The perspective R and D concepts of the countries where MHD research is most intensive are analyzed, emphasizing the presently most advanced themes which can be realized in the near future: the open-cycle smoke gas generator power stations, including the ancillary equipment needed for their economic operation. In the light of the data presented at the Vth International MHD Conference the concrete power station projects are compared.

Derzeitiger Stand und die Perspektiven der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der MHD-Generatoren. Die Arbeit gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Forschungen im Zusammenhang mit der Erzeugung von elektrischer Energie auf magneto-hydrodynamischem Wege (MHD). Die perspektivischen Konzepte für Forschung und Entwicklung in den Ländern, die am intensivsten MHD-Forschung betrieben, werden eingehend analysiert, wobei die derzeit am weitesten fortgeschrittenen, in naher Zukunft realisierbaren Kraftwerke mit Rauchgasgeneratoren mit offenem Zyklus, sowie die zu ihrem wirtschaftlichen Betrieb erforderlichen sonstigen Hilfseinrichtungen hervorgehoben werden. Anhand der auf der V. Internationalen MHD-Konferenz veröffentlichten Angaben werden die bekanntgegebenen konkreten Kraftwerksvorhaben miteinander verglichen.