

M

MAGNETOHIDRODINAMIČKI GENERATORI, uređaji za pretvorbu kinetičke i potencijalne energije djelatne tvari u električnu energiju međusobnim djelovanjem djelatne tvari i magnetskog polja.

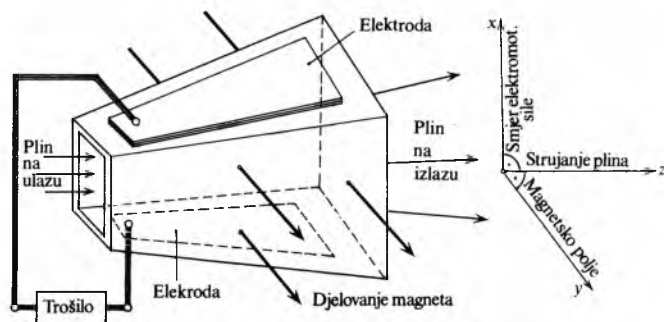
Rad magnetohidrodinamičkog generatora osniva se na djelovanju sile na vodič kojim protječe električna struja kad se nalazi u magnetskom polju (v. *Električni strojevi*, TE 4, str. 154). To se djelovanje iskorištava u električnim generatorima i motorima u kojima su vodiči u krutom stanju (bakar, aluminij). Još u prošlom stoljeću ustanovljeno je djelovanje takve sile na tekuće i plinovite vodiče. To je iskorišteno za otpuhivanje električnog luka koji se pojavljuje pri prekidanju struje (v. *Električni sklopni aparati*, TE 4, str. 115) i za pumpanje električki vodljivih tekućina (npr. za cirkulaciju rastaljenog natrija u brzim oplodnim reaktorima). B. Karlowitz (1930) pokušao je iskoristiti tu pojavu za proizvodnju električne struje provodeći vrući plin kroz magnetsko polje. Učinak je izostao jer je električna vodljivost plina bila suviše mala. Tek poslije drugoga svjetskog rata, kad su započela istraživanja kontrolirane nuklearne fuzije primjenom plazme (plazma je ionizirani plin), pokrenuta su i istraživanja magnetohidrodinamičke konverzije energije. Proučavanje pojava u plazmi pokazalo je da postoji velika sličnost s pojavama u hidrodinamici (v. *Mehanika fluida*). Magnetsko polje potrebno je za pretvorbu energije plazme u električnu energiju, ali i za ograničenje djelovanja plazme na okolinu. Odatle je i nastao naziv magnetohidrodinamika i magnetohidrodinamički generatori.

Pri pretvorbi oblika energije samo se dio upotrijebljene energije pretvara u električnu energiju (v. *Elektrane*, TE 3, str. 547). U termičkim procesima (v. *Termodinamika*) postiže se to bolje iskorištenje što je veća razlika temperatura između kojih se odvija taj proces. Izlazna temperatura praktički je određena temperaturom okoline, pa se poboljšanje iskorištenja ostvaruje povišenjem ulazne temperature. U termoelektranama ulazna je temperatura ograničena svojstvima konstrukcijskih materijala (u termoelektranama s parnim turbinama do 560 °C za feritne čelike, do 650 °C za austenitne čelike, u termoelektranama s plinskim turbinama do 700 °C), pa se u najpovoljnijim prilikama postiže iskorištenje nešto veće od 40%. Da se ostvari ionizacija plinova, što je preduvjet za pretvorbu energije u magnetohidrodinamičkom generatoru, potrebna je temperatura viša od 2000 °C, pa se u takvu termičkom procesu može postići znatno bolje iskorištenje energije nego u termoelektranama. Zbog toga je poraslo zanimanje za istraživanje magnetohidrodinamičkih generatora i izrađeno je više idejnih projekata i pokusnih postrojenja.

Proces u magnetohidrodinamičkom generatoru. U električnom generatoru (v. *Električni strojevi*, TE 4, str. 154) bakreni ili aluminijski vodič giba se u magnetskom polju i u njemu se inducira elektromotorna sila (v. *Elektrotehnika*, TE 5, str. 128).

Ako se na krajeve vodiča priključi otpornik, poteći će električna struja. U magnetohidrodinamičkom generatoru bakreni vodič nadomješten je električki vodljivim ioniziranim plinom (plazmom) koji struji. Da bi se olakšala termička ionizacija, dodaju se vrućem plinu elementi koji se lako ioniziraju. To su alkalijski elementi, od kojih cezij ima najmanji ionizacijski potencijal. Budući da je cezij skup, računa se s upotrebom kalija koji nakon cezija ima najmanju vrijednost ionizacijskog potencijala. Dodavanjem kalija (cijepljenje kalijem) pospješuje se ionizacija, pa se postiže električna vodljivost ~ 10 S/m, što je dovoljno za proces u magnetohidrodinamičkom generatoru.

Proces u magnetohidrodinamičkom generatoru odvija se u kanalu (sl. 1). Ionizirani plin ulazi na užem dijelu kanala, u njemu djelomično expandira i izlazi na proširenom dijelu. Okomito na smjer strujanja ioniziranog plina djeluje magnetsko polje stalne jakosti, a okomito na smjer magnetskog polja smještene su elektrode na koje se spajaju električna trošila. Smjer strujanja plina, smjer magnetskog polja i spojnice elektroda čine prostorni pravokutni koordinatni sustav. Magnetsko polje djeluje silom na ione i elektrone, u ioniziranom plinu, preko induciranog električnog polja jakosti $\vec{v} \times \vec{B}$, gdje je \vec{v} brzina plina, a \vec{B} magnetska indukcija u plinskom kanalu.



Sl. 1. Plinski kanal magnetohidrodinamičkog generatora

Naboj koji se skuplja na elektrodama slabi induciranu polje, pa zbog toga u plinu vlada oslabljeno polje. Spajanjem trošila na elektrode smanjit će se to slabljenje polja. Rezultantno polje u plinu koji struji iznosi

$$\vec{E}' = \vec{E} - \vec{v} \times \vec{B}, \quad (1)$$

gdje je \vec{E} jakost električnog polja u kanalu. Komponente su električnog polja, prema oznakama smjerova u koordinatnom sustavu na sl. 1,

$$E'_x = E_x - vB \quad (2a)$$

$$E'_z = E_z. \quad (2b)$$

Već prema položaju i izvedbi elektroda može postojati i električno polje u smjeru strujanja plina, pa se pojavljuje i razlika potencijala među elektrodama. Polje koje stvaraju elektrode djeluje na elektrone i ione u plinu, koji se giblju u smjeru koje odgovara kombiniranom djelovanju strujanja i električnog polja, a magnetsko polje zavija putanju nabijenih čestica. Brzina čestica proporcionalna je jakosti električnog polja elektroda, pa je

$$\vec{v} = \mu \vec{E} = \mu(\vec{E}' - \vec{v} \times \vec{B}), \quad (3)$$

gdje je μ pokretljivost elektrona, odnosno iona. Pokretljivost čestica ($\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) povećanje je brzine po jedinici jakosti električnog polja (V/m) koje uzrokuje to kretanje. Budući da je pokretljivost elektrona znatno veća od pokretljivosti iona, može se zanemariti doprinos iona struji među elektrodama. Gustoća struje elektrona proporcionalna je brzini elektrona, pa je

$$\vec{J} = -ne\vec{v}, \quad (4)$$

gdje je n broj elektrona u jedinici volumena, e naboj elektrona ($1,602 \cdot 10^{-19}$ As), dok je brzina \vec{v} određena relacijom (3). Komponente su gustoće struje elektrona

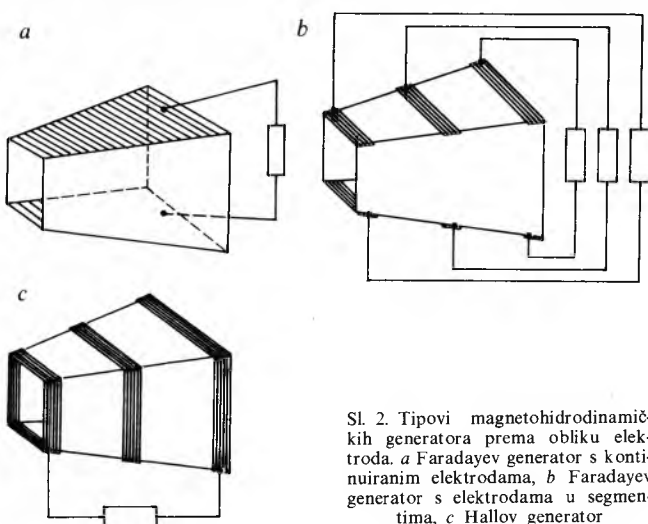
$$J_x = \frac{\kappa_0}{1 + \beta^2} (E'_x + \beta E'_z) \quad (5a)$$

$$J_z = \frac{\kappa_0}{1 + \beta^2} (E'_z - \beta E'_x), \quad (5b)$$

gdje je $\kappa_0 = ne\mu$ statička električna vodljivost plina, a $\beta = \mu B$ konstanta kojom je karakterizirana električna vodljivost plina. Kad je pokretljivost elektrona mala, konstanta β ima malu vrijednost, a vodljivost plina približava se statičkoj vodljivosti. Ionizirani plin u magnetohidrodinamičkom generatoru ponaša se kao anizotropni materijal, jer mu je električna vodljivost ovisna o smjeru djelovanja polja. Elektroni, zbog svoje velike pokretljivosti, nastoje se gibati po zavojnicama oko magnetskih silnica. Takvo gibanje elektrona djeluje kao povećanje otpora električnoj struji, odnosno kao smanjenje vodljivosti plina. Konstanta β određena je relacijom

$$\beta = \mu B = \frac{e}{m_0} \tau B, \quad (6)$$

gdje je m_0 masa elektrona u mirovanju ($9,109 \cdot 10^{-31}$ kg), a τ vrijeme proleta elektrona između dva sudara ($\sim 10^{-12}$ s). Vrijeme proleta određeno je omjerom slobodnog puta elektrona Λ između dva sudara s atomima plina ($\sim 10^{-7}$ s) i brzine elektrona ($\sim 10^5$ m/s). Ako je magnetska indukcija $B = 6$ T, dobiva se da je $\beta \approx 1$. Tada vektori električnog polja i gustoće struje zatvaraju kut od 45° . Karakteristična konstanta β ovisi i o tlaku plina, pa je to veća što je tlak plina manji. Uz manji tlak



Sl. 2. Tipovi magnetohidrodinamičkih generatora prema obliku elektroda. a Faradayev generator s kontinuiranim elektrodama, b Faradayev generator s elektrodama u segmentima, c Hallov generator

plina, naime, dulje je vrijeme preleta, jer je slobodni put elektrona dulji. Što je veća karakteristična konstanta, to je veći kut između vektora električnog polja i gustoće elektrona. Zakretanje vektora struje od vektora polja jest Hallov efekt, a on ima znatnu ulogu u magnetohidrodinamičkim generatorima.

Prema izvedbama elektroda predlažu se tri izvedbe magnetohidrodinamičkih generatora: a) Faradayev generator, u kojem plin struji okomito na magnetsko polje, a struja se oduzima s kontinuiranih elektroda postavljenih uzduž stijenki kanala (sl. 2a), b) Faradayev generator s elektrodama u segmentima sa svrhom da se eliminiira Hallov efekt (sl. 2b) i c) Hallov generator, koji iskorištava samo Hallov efekt u kojem se struja oduzima s krajnjih aksijalno pomaknutih elektroda (sl. 2c).

Faradayev generator s kontinuiranim elektrodama ima kratko spojen napon koji se pojavljuje zbog Hallova efekta. Zbog toga je $E_z = E'_z = 0$. Korisna snaga po jedinici volumena kanala iznosi

$$P = J_x E_x = \delta(1 - \delta) \frac{\kappa_0}{1 + \beta^2} v^2 B^2, \quad (7)$$

gdje je δ omjer između napona među elektrodama (U) i napona praznog hoda (U_0) koji se dobiva iz relacije

$$\delta = \frac{U}{U_0} = \frac{E_x}{vB} = \frac{R_t}{R_u + R_t}, \quad (8)$$

u kojoj je R_t otpor opterećenja, a R_u unutrašnji otpor generatora. Vidi se znatan utjecaj karakteristične konstante β . S povećanjem β naglo se smanjuje korisna snaga. Najveća se korisna snaga postiže kad je otpor opterećenja jednak unutrašnjem otporu ($R_t = R_u$), pa maksimalna snaga iznosi

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \frac{\kappa_0}{1 + \beta^2} v^2 B^2. \quad (9)$$

Faradayev generator s elektrodama u segmentima ima otpornike opterećenja priključene na parove nasuprot postavljenih elektroda. One su međusobno izolirane da se spriječi djelovanje Hallova efekta. Zbog toga nema ni struje u smjeru osi z ($J_z = 0$). Korisna snaga iznosi

$$P = J_x E_x = \delta(1 - \delta) \kappa_0 v^2 B^2, \quad (10)$$

a gubici

$$P_{\text{gub}} = J_x E'_x = (1 - \delta)^2 \kappa_0 v^2 B^2. \quad (11)$$

Najveća korisna snaga dobiva se kad je $R_t = R_u$, pa iznosi

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \kappa_0 v^2 B^2. \quad (12)$$

Kad karakteristična konstanta β ima malu vrijednost, praktički nema razlike između dvaju tipova Faradayevih generatora. S povećanjem vrijednosti β pojavljuje se razlika, jer tada generator sa segmentima daje veću snagu. Oba tipa generatora imaju jednake stupnjeve korisnosti, koji su jednaki omjeru napona prema relaciji (8).

Pri gradnji magnetohidrodinamičkih generatora žele se postići sljedeće vrijednosti: magnetska indukcija $B = 6$ T, brzina plinova $v = 950$ m/s i statička vodljivost $\kappa_0 = 10$ S/m. Uz te vrijednosti postiže se maksimalna gustoća snage od 80 MW/m³. Proračuni, osim toga, pokazuju da se optimum postiže uz omjer napona od $0,75$, što odgovara snazi od 60 MW/m³. To znači da je za snagu od 600 MW potreban kanal obujma od 10 m³. Današnji sinhroni generatori s bakrenim vodičima hlađenim vodom znatno bolje iskorištavaju aktivni bakar. Postiže se, naime, gustoća snage od ~ 800 MW/m³.

Hallov generator ima segmente kao elektrode, a opterećenje je spojeno između prvog i posljednjeg segmenta. Ostali su segmenti kratko spojeni. U takvu generatoru samo poprečna struja koči strujanje plazme, a snaga se oduzima od aksijalne struje. Hallov generator nema transverzalne komponente električnog polja ($E_x = 0$). Osim toga, u praznom hodu nema aksijalne struje, pa je

$$J_z = 0; \quad E_z' = -\beta v B = E_z. \quad (13)$$

Kad je generator opterećen, komponenta je polja

$$E_z = E_z' = -\delta \beta v B, \quad (14)$$

a komponente gustoće struje iznose:

$$J_x = \frac{1 + \delta \beta^2}{1 + \beta^2} \kappa_0 v B \quad (15a)$$

$$J_z = \frac{\beta}{1 + \beta^2} (1 - \delta) \kappa_0 v B. \quad (15b)$$

Korisna je snaga

$$P = J_z E_z = \frac{\beta^2}{1 + \beta^2} \delta (1 - \delta) \kappa_0 v^2 B^2, \quad (16)$$

a snaga dovedena u kanal

$$P_{ul} = J_x v B = \frac{1 + \delta \beta^2}{1 + \beta^2} \kappa_0 v^2 B^2. \quad (17)$$

Stupanj korisnosti određen je omjerom P i P_{ul} . Hallov generator ima povoljan stupanj korisnosti kad je velika vrijednost karakteristične konstante β . Takvu vrijednost β imaju plinovi u zatvorenom ciklusu kad se kao djelatni medij upotrebljava neki plemeniti plin (helij, argon, neon) cijepljen cezijem.

Kanal i strujanje u kanalu. Magnetohidrodinamički generator u osnovi je termički stroj, kao što je npr. plinska turbina. Razlika je u prijenosu djelovanja sile. U turbini se djelovanje sile prenosi na osovinu, a od nje na generator, a u magnetohidrodinamičkom generatoru sile djeluju neposredno na plin čim se ostvari protjecanje struje. Termodinamički odnosi, međutim, potpuno su analogni. Gubici zbog trenja s lopaticama turbine analogni su gubicima zbog struje u unutrašnjem otporu generatora. Strujanjem kroz kanal smanjuje se entalpija plina, jer se unutrašnja kalorička energija plina pretvara u električnu energiju. To se isto događa s plinom koji struji kroz plinsku turbinu, samo što se pri tom unutrašnja energija plina pretvara u mehaničku energiju koja okreće turbinski rotor.

Kinetička energija plina stvara se na račun promjene tlaka, viskoznog trenja i elektromagnetskih sila. Točno određivanje promjena stanja plina u kanalu vrlo je zamršeno, a rezultati su nepregledni. Zbog toga, da se prikaže princip djelovanja generatora, računa se s promjenljivošću veličina samo u smjeru osi kanala, s adijabatskim promjenama stanja i s idealnim plinom kao djelatnom tvari. Brzina se plina prikazuje s obzirom na brzinu zvuka u plinu, koja je određena relacijom

$$a = \sqrt{\frac{p}{\rho}}, \quad (18)$$

gdje je γ omjer specifičnih toplina uz konstantni tlak (c_p) i uz konstantni volumen (c_v) a ρ gustoća i p tlak plina. Omjer brzine plina i brzine zvuka u plinu naziva se Machov broj ($Ma = v/a$). Analiza tako pojednostavnjenog strujanja plina daje omjer Machovih brojeva uzduž kanala

$$\frac{Ma}{Ma_0} = \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}, \quad (19)$$

gdje vrijednosti s indeksom nula vrijede za ulazni presjek kanala. Iz prihvaćenih omjera Machovih brojeva dobivaju se promjene tlakova uzduž kanala, a odatle je poznato stanje plina u svakom presjeku i potrebna promjena presjeka uzduž kanala. Tek točna analiza stanja omogućuje ispravno određivanje presjeka kanala.

Karakteristična duljina interakcije u kanalu određena je relacijom

$$L_i = \frac{1}{1 - \delta} \frac{p_0}{\kappa v B^2}. \quad (20)$$

Ta duljina ovisi o tlaku na ulazu u kanal (p_0). Ako je npr. omjer napona $\delta = 0,5$, tlak na ulazu $p_0 = 0,5$ MPa, električna vodljivost $\kappa = 10$ S/m, brzina strujanja 750 m/s i magnetska indukcija 6 T, duljina interakcije iznosi 3,7 m kolika je približno i duljina kanala.

Ne postoji potpuno rješenje za određivanje stanja plina u kanalu ni za dimenzioniranje kanala. Pri tom se mora uzeti u obzir ograničenost temperatura zbog termičkog djelovanja na materijale kanala, trenje na stijenka, moguće gubitke zbog vrtložnih struja na ulazu u zonu magnetskog polja i na izlazu iz nje, pad napona na elektrodama itd. Zbog svega toga podaci o tehničkom rješenju često su nepotpuni i nepouzdana.

Izbor ulaznog tlaka i maksimalne temperature ima osnovno značenje na karakteristike uređaja. Na taj izbor utječu dijelovi uređaja izvan kanala kao npr. plamenik, predgrijač zraka, izmjenjivači topline itd. Tako npr. za ulazni tlak od 0,5 MPa i kanal duljine 3,7 m potrebna je ulazna temperatura od 2200 °C. Povećanjem tlaka smanjuje se električna vodljivost, a povećava se potrebna duljina kanala što stvara veće poteškoće s elektrodama, veće gubitke zbog trenja i veću eroziju stijenki kanala. Za otvoreni ciklus optimalni ulazni tlak odgovara Machovu broju 0,8, a za zatvoreni ciklus 0,4–0,8. Povoljno je da presjek kanala bude što veći, jer je tada njegova površina manja s obzirom na obujam. Tada se mogu očekivati manji gubici zbog odvođa topline kroz plašt. Smatra se da je donja granična snaga magnetohidrodinamičkog generatora 500 MW, jer se računa da bi tada mogao biti ekonomičan.

Materijali za oblaganje stijenki kanala moraju podnositi visoke temperature, ne smiju biti električki vodljivi, moraju biti otporni prema eroziji i oksidaciji, te moraju zadržati stano-vitu čvrstoću na visokim temperaturama i moraju biti otporni prema temperaturnim udarima. U tabl. 1 nalaze se podaci o materijalima koji se predviđaju za kanale. Većina materijala nisu prikladni za obradu, svi su krhki i nemaju dovoljnu vlačnu čvrstoću, a osim toga svi su skupi. Neki od njih još se komercijalno ne proizvode.

Ako se radi o generatorima vrlo velikih snaga, izvedba je kanala pogodnija, jer se tada može predvidjeti hlađenje stijenki.

Djelatni medij. Visoko zagrijani zrak ili plinovi izgaranja fosilnih goriva mogu se upotrijebiti kao djelatna tvar u magnetohidrodinamičkim generatorima. Nedostatak im je što imaju nisku električnu vodljivost. Ona je ovisna o tlaku. Pri temperaturi

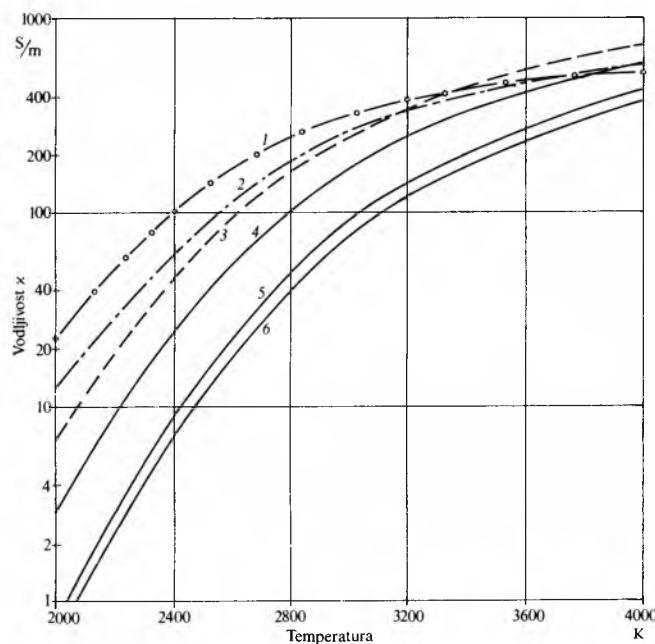
Tablica 1
VISOKOTEMPERATURNI MATERIJALI ZA MAGNETOHIDRODINAMIČKE GENERATORE

Materijal	falište °C	Gustoća g/cm ³	Otpornost prema oksidaciji	Otpornost prema temperaturnim udarima	Toplinska vodljivost W m ⁻¹ °C ⁻¹	Električna vodljivost S/m	Dozvoljena pogonska temperatura
Al ₂ O ₃	2030	3,96	odličan	umjeren	7,25 (1800 °C)	1 · 10 ⁻⁴ (1100 °C)	1950 °C
ZrO ₂	2650	5,56	odličan	dobar	2,43 (1400 °C)	0,3 (1200 °C)	2300 °C
ThO ₂	3330	9,64	odličan	slab	2,51 (1400 °C)	7 · 10 ⁻³ (1200 °C)	2400 °C
BaZrO ₃	2700	2,25	odličan	—	—	—	—
ZrC	3510	6,7	slab	dobar	20,5 (20 °C)	1,6 · 10 ⁶ (20 °C)	2240 °C
HfC	3910	12,2	slab	dobar	—	0,9 · 10 ⁶ (20 °C)	2240 °C
Grafit	3700 sublimira	1,8	slab	odličan	55 (1200 °C)	200 (20 °C)	2700 °C
BN	3000 sublimira	2,25	dobar	odličan	150 (1000 °C)	8 · 10 ⁻³ (1000 °C)	2980 °C

od 2000 °C vodljivost se smanjuje s porastom tlaka (prema zakonu $1/p^{0.5}$), a pri temperaturi od 5500 °C prema zakonu $1/p^{0.3}$. Zrak pri normalnom tlaku od 0,1 MPa ima vrlo malu vodljivost, pa je neupotrebljiv kao djelatna tvar. Tek uz znatno manje tlakove, npr. 10^{-5} MPa, mogao bi se zrak upotrijebiti kao djelatna tvar.

Vodljivost plinova znatno se povećava, kako je već spomenuto, cijepljenjem alkalijskim elementima. Cijepljenjem se plina u njega unosi materijal koji lako ionizira, pa se tako dobiju elektroni potrebni za vođenje struje. Oslobođeni elektroni sudaraju se s ionima, elektronima i atomima plina, pa to smanjuje njihovu pokretljivost, a time i električnu vodljivost. Kad je gustoća elektrona prevelika, postaje dominantan međusobni utjecaj elektrona, pa se vodljivost više ne povećava s povećanjem cjepiva. Zbog toga dodatak cjepiva ne smije biti prevelik.

Na sl. 3 vidi se utjecaj cijepljenja na vodljivost plinova izgaranja i plemenitih plinova.



Sl. 3. Vodljivost cijepljenih plinova. 1 argon + 0,1% Cs, 2 neon + 0,1% Cs, 3 helij + 2% Cs, 4 plinovi izgaranja + 4% Cs, 5 plinovi izgaranja + 4% K, 6 plinovi izgaranja + 2% K

Otvoreni i zatvoreni ciklus. Predviđa se da će se u otvorenom ciklusu upotrebljavati plinovi izgaranja cijepljeni kalijem. Nakon iskorištenja energije plinova izgaranja oni će se odvoditi u okolinu kao iz današnjih parnih kotlova. U zatvorenom ciklusu plin (helij, argon, neon) nakon hlađenja vraćat će se na ponovno zagrijavanje. Takav zatvoreni ciklus pogodan je za iskorištavanje topline iz nuklearnih reaktora.

Elektrode služe za odvod struje iz plina, pa je potrebno da elektroni i ioni dođu u neposredni dodir s elektrodama. Materijal elektroda mora biti otporan prema eroziji i koroziji, i to na visokim temperaturama i u plinu koji je kemijski aktivan jer sadrži alkalijske elemente. Materijal za elektrode mora, osim toga, biti sposoban da na katodi emitira elektrone, da bude dobar toplinski i električni vodič. Kao materijal za elektrode u prvom redu dolazi u obzir grafit, pa volfram i tantal, te njihove legure, bakar, nerđajući čelik, silicij-karbid, cirkonij-oksidi i cirkonij-borid. Grafit i volfram mogu emitirati elektrone termoionskom emisijom, dok ostali materijali moraju imati presvlaku od alkalijskih metala da bi se omogućila emisija elektrona. Kad je osigurana dovoljna emisija elektrona, katodni i anodni pad napona mogu iznositi i manje od 10 V, a kad to nije osigurano, pad napona može doseći i 100 V.

Plin koji struji u kanalu velikom brzinom ima malu brzinu u blizini stijenke i elektroda, a praktički se ne giba neposredno uz stijenke i elektrode. Temperatura je graničnog sloja plina

niska, a pogotovo kad su elektrode i stijenke hladene. Taj sloj ima zbog toga i malu vodljivost, pa i povećani pad napona i gubitke. To znatno otežava rad magnetohidrodinamičkih generatora. Posebne poteškoće pojavljuju se zbog rasipnih struja među segmentima elektroda, pa ti dijelovi stijenki moraju biti izolirani.

Magneti. Upotreba supravodljivih magneta eliminira poteškoće koje su se pojavile pri upotrebi običnih magneta. Ta je poteškoća ugrozila izvedbu magnetohidrodinamičkih generatora zbog velikog potroška energije za održavanje jakih magnetskih polja. Supravodljivim magnetima moguće je postići magnetsku indukciju i do 6 T, i to u velikom prostoru kanala. Prvi veliki supravodljivi magnet proizveden je u Avco Everett Research Laboratory (1967). Njime je ostvarena magnetska indukcija od 4 T u prostoru promjera 300 mm i duljine 1140 mm. Ukupna težina magneta iznosi 7260 kg. Namot je od Nb-Zr žice uložene u bakrene trake ($1,0 \times 12,7$ mm). Magnet se hladi tekućim helijem temperature 4,2 K uz koju se postiže supravodljivo stanje magnetskog namota.

Stanje razvoja. Pokusi s visokotemperaturnim, cijepljenim plinovima pokazali su dobro podudarnost s teorijskim postavkama. Poteškoće su se pojavile u održavanju homogenosti plina u kanalu, zbog lošeg kontakta s elektrodama, loše izolacije među segmentima elektroda, gubitaka na elektrodama. Materijali još nisu dovoljno pouzdani. Većina pokusa nisu uspjeli zbog toga što materijali nisu izdržali temperaturne udare, koroziju i eroziju. Postignuti stupanj djelovanja u tim pokusima bio je malen. Pokusi su najčešće bili vrlo kratki, nekoliko sekunda ili tek nekoliko minuta. Pokazalo se da je cirkonij-borid najbolji materijal za elektrode, ali su i tantal i nerđajući čelik dali povoljne rezultate i s obzirom na pad napona na elektrodama. Izvršeno je nekoliko pokusa s tekućim metalom u magnetohidrodinamičkim generatorima. Prvi rezultati pokazuju da se može dogoditi da prevlada takav tip generatora.

Razvijaju se, osim toga, plamenici u kojima mogu izgarati kruta i tekuća goriva uz postizanje dovoljno visokih temperatura. Da se povisi temperatura izgaranja, gorivu se dovodi zrak obogaćen kisikom (do 50% kisika), što se pokazalo ekonomično.

Do 1971. god. najdulje je bilo u pogonu (200 sati) postrojenje U-02 u SSSR. Taj je generator imao termičku snagu od 5 MW pri protoku plina od 1 kg/s, a kao gorivo upotrebljen je zemni plin. Zrak je bio obogaćen kisikom (omjer kisika i dušika je 1), a prije dovođenja gorivu zrak je predgrijan na temperaturu od 1400 °C. Postignuta je gustoća snage od $1,32 \text{ MW/m}^3$, s temperaturom plina od 2900 °C na ulazu uz tlak od 0,12 MPa. Machov broj je iznosio 0,8. Elektrode su izvedene kombinirano od cirkonij-oksida i silicij-karbida sa 52 para segmenata. Kanal je bio dug 3 m, a magnetska indukcija od 1,7 T. Plinovi izgaranja bili su cijepljeni cezij-karbonatom.

Osim toga bilo je izgrađeno više manjih postrojenja (SR Njemačka, SAD, Poljska, Japan) koja su bila u pogonu vrlo kratko.

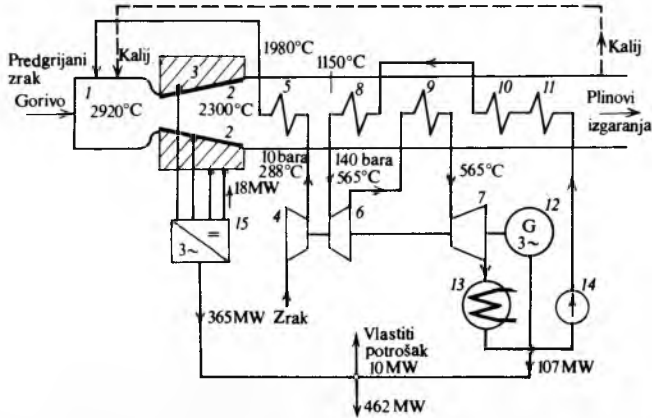
U SSSR se gradi postrojenje U-25 koje bi trebalo pokazati da je moguć pogon i od nekoliko tisuća sati. To postrojenje bi imalo termičku snagu od 300 MW i električnu snagu od 25 MW. Gorivo će biti zemni plin, a zrak obogaćen kisikom (omjer kisika i dušika je 2/3) s predgrijavanjem na 1500 °C. Kanal će biti dug 5 m, a gustoća snage 12 MW/m^3 . Ulazna temperatura plinova izgaranja iznositi će 2900 °C, a tlak 0,27 MPa. Machov broj iznosio bi 0,8. Elektrode će biti od bakra, a magnetska indukcija iznositi će 2 T. Cjepivo će biti kalij-karbonat.

Mnogo se očekuje od toga postrojenja, jer bi to bilo prvo postrojenje koje bi trajno radilo.

Budući da se u magnetohidrodinamičkom generatoru može iskoristiti energija ioniziranih plinova do temperature ~ 1900 °C, jer plinovi na nižim temperaturama nisu više ionizirani, moraju se tako ohlađeni plinovi još energetski iskoristiti, što se postiže upotrebom tih plinova za zagrijavanje i isparivanje vode. Tako dobivena vodena para služi za pogon parne turbine. Prema tome, dio entalpije plinova izgaranja iskorištava se u magneto-

hidrodinamičkom generatoru, a dio u konvencionalnom postrojenju s parnom turbinom.

Na sl. 4 je shema jedne od mogućih izvedaba postrojenja otvorena tipa. Gorivo s predgrijanim zrakom i kalijem kao cjepivom dovodi se u komore za izgaranje, iz koje plinovi izgaranja struje u kanal magnetohidrodinamičkog generatora. Djelomično ohlađeni plinovi struje nakon izlaska iz kanala kroz predgrijač zraka, kroz pregrijač i međupregrijač pare, te, konačno, kroz isparivač i zagrijač vode, a na kraju se kroz dimnjak odvede u okolinu. Para proizvedena pomoću plinova služi za pogon parne turbine. Kompresor upija potrebni zrak iz okoline i tlači ga kroz predgrijač zraka u komoru izgaranja.



Sl. 4. Moguća izvedba magnetohidrodinamičkog generatora otvorenog ciklusa s fosilnim gorivom. 1 komora izgaranja, 2 elektrode, 3 uzbudni namot, 4 kompresor, 5 predgrijač zraka, 6 visokotlačna turbina, 7 niskotlačna turbina, 8 međupregrijač pare, 9 pregrijač, 10 isparivač, 11 zagrijač vode, 12 generator, 13 kondenzator, 14 pojna pumpa, 15 pretvarač

Kompresor tjera parnu turbinu, pa se dio snage proizvedene u turbini troši na to. Kanal magnetohidrodinamičkog generatora, kvadratična presjeka, u obliku sapnice, imao bi duljinu ~20 m, sa stranicama od 0,9 m na ulazu i 1,8 m na izlazu. U magnetohidrodinamičkom generatoru proizvodi se istosmjerna struja, pa je potreban uređaj za pretvorbu u trofaznu izmjeničnu struju.

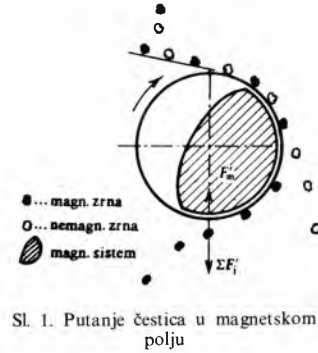
LIT.: R. A. Combe, Magnetohydrodynamic generation of electric power. Chapman and Hall, London 1964. — G. W. Sutton, A. Sherman, Engineering magnetohydrodynamic. McGraw-Hill, New York 1965. — G. J. Womack, MHD power generation. Chapman and Hall, London 1969. — H. Požar, Osnove energetike, drugi svezak. Školska knjiga, Zagreb 1978.

T. Bosanac

MAGNETSKA SEPARACIJA, postupak za odvajanje magnetičnih od nemagnetičnih tvari, jedna od metoda za oplemenjivanje mineralnih sirovina. Najčešće se primjenjuje za oplemenjivanje magnetitkih ruda željeza, rjeđe za oplemenjivanje ruda mangana, a potrebna je u regeneraciji suspenzija s magnetičnim suspenzoidima u koncentracijskim postupcima u teškim sredinama (v. *Gravitacijska koncentracija*, TE 6, str. 265). Ponekad se upotrebljava i za izdvajanje željeznih primjesa iz različitih materijala, npr. iz kremenog pijeska, keramičkih sirovina, ugljena, pa i namirnica.

Postupak se temelji na djelovanju mehaničkih sila magnetskog polja na mineralne čestice koje se razlikuju prema susceptibilnosti i permeabilnosti (v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 52, i *Elektrotehnika*, TE 5, str. 125). Na sl. 1 prikazane su rezultantne putanje čestica u magnetskom polju na primjeru jednostavnog bubnjastog magnetskog separatora. Mehaničke sile F'_m magnetskog polja koje djeluje na magnetične čestice moraju biti veće od zbroja sila $\Sigma F'_i$ koje djeluju u suprotnom smjeru (gravitacijska i centrifugalna sila, sila trenja i prijanjanja), dok sile F''_m od djelovanja magnetskog polja na nemagnetične čestice moraju biti manje od sila $\Sigma F'_i$.

Za magnetsku separaciju upotrebljavaju se samo nehomogena magnetska polja, jer se samo u njima pojavljuju translatorne sile. U homogenom polju magnetična čestica praktično ostaje nepokretna: u čestici se, doduše, silnice zgušnjavaju pa nastoje da je usmjere ili u smjeru silnica ili okomito na njih, ali se ne pojavljuje rezultantna magnetska vlačna sila koja bi česticu pokrenula u bilo kojem smjeru (sl. 2a). U nehomogenom polju vlačne su sile jače u smjeru većeg zgušnjavanja silnica, pa će i čestica biti privučena u tom smjeru (sl. 2b). Specijalan je slučaj nehomogenog polja konvergentno polje u kojem će zrno biti snažno privučeno u smjeru konvergencije silnica (sl. 2c).



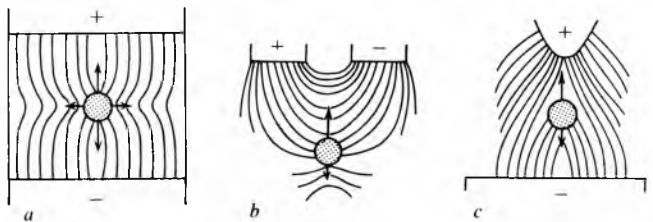
Označi li se jakost magnetskog polja sa H , nehomogenost se polja može prikazati izrazom dH/dx , koji pokazuje koliko se brzo mijenja jakost u smjeru x . To je *gradijent magnetskog polja* i označuje se sa $\text{grad } H$. Magnetomotorna je sila F_m koja djeluje na česticu u nehomogenom polju.

$$F_m = \mu_0 \kappa_s H \text{ grad } HV \quad (1)$$

gdje je μ_0 permeabilnost ($= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$), κ_s magnetska volumenska susceptibilnost (bez dimenzija), a V volumen čestice. Iz (1) proizlazi da će čestica biti privučena u smjeru koncentracije (zgušnjavanja) magnetskog polja kad je $\kappa_s > 0$, dok će čestica sa $\kappa_s < 0$ biti izbačena iz polja. Vrijednosti za $\kappa_s > 0$ odgovaraju tvarima s veoma izraženim magnetskim svojstvima, tzv. *paramagnetičnim* i *feromagnetičnim* tvarima, a vrijednosti za $\kappa_s < 0$ tvarima sa slabio izraženim magnetskim svojstvima, tzv. *dijamagnetičnim tvarima*. Reducira li se sila f_m na jedinicu mase, dobiva se izraz

$$f_m = \mu_0 \chi H \text{ grad } H, \quad (2)$$

gdje je χ masena susceptibilnost (u m^3/kg), a produkt $\mu_0 H \text{ grad } H$ naziva se *specifičnom magnetskom silom polja*.



Sl. 2. Čestice u magnetskom polju. a čestica u homogenom polju, b čestica u nehomogenom polju, c čestica u konvergentnom polju

Klasifikacija minerala prema magnetskim svojstvima u tehnološkoj praksi oplemenjivanja razlikuje se od one u fizici (v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 52). Kad se promatra magnetska separacija, minerali se mogu svrstati u četiri grupe: a) veoma magnetični minerali, sa $\chi > 35 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$, koji se mogu preraditi u separatorima sa slabim magnetskim poljem (H do $1,2 \cdot 10^5 \text{ A/m}$); u tu grupu spadaju, npr., magnetit Fe_2O_3 , maghemit $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, franklinit $(\text{Zn}, \text{Mn})\text{Fe}_2\text{O}_4$, pirotin FeS ; b) srednjomagnetični minerali, sa $\chi = 7,5 \cdot 35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$, koji se mogu preraditi u separatorima s poljem od $H = 2,4 \cdot \dots \cdot 4,8 \cdot 10^5 \text{ A/m}$; u tu grupu mogu se ubrojiti martit i magnetit iz oksidacijskih zona ležišta; c) slabomagnetični minerali, sa