تبدیل مستقیم انرژی (V)*

مبدل مگنتوهیدرودینامیک

Magnetohydrodynamics Power Generator

(MHD)

نوشتهٔ :

تقی ابتکار PhD

دانشیار دانشکدهٔ فنی

چکیده :

در ژنراتور MHD گازهای یونیزه شده احتراق از کانالی عبور داده میشود و مستقیماً در اثر وجود میدان مغناطیسی خارج جریان برق تولید میشود. بنابراین برخلاف سیستم های معمولی تبدیل انرژی قطعات ژنراتور MHD بدون حرکت بوده بنابراین از این نظر مزیت بسیار دارد . ژنراتور MHD دارای بازده حرارتی نزدیک به ۶۰ درصد میباشد و درظرفهای مرکب واحد تولید انرژی درنیروگاهها ممکن است بکار برده شود .

ژنراتور MHD امروزه بشکل صنعتی در نیروگاههای موجود در اروپای غربی ومخصوصاً اتحاد جماهیر شوروی بکار برده شده و درآینده با توجه به کمبود انرژی یک وسیله بسیار مؤثر دربالا بردن بازده حرارتی نیروگاهها خواهد بود .

۱ـ تعریف سیستم و تاریخچه آن :

در ژنراتور (MHD) مانند سایر مبدل های تبدیل مستقیم انرژی ـ حرارت مستقیماً به نیروی برق تبدیل میشود ـ مبدل مگنتوهیدرودینامیک (MHD) مبتنی براصل ساده زیر است :

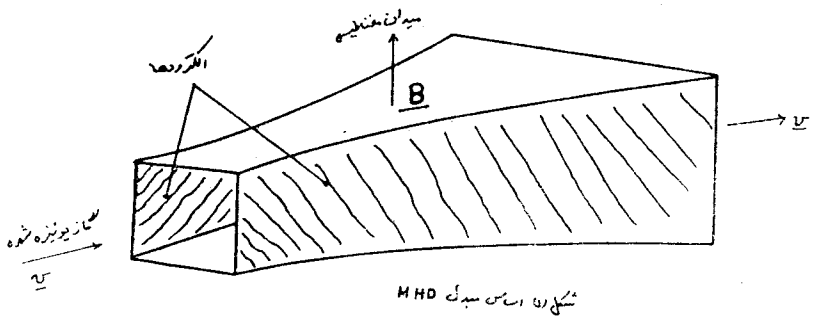
درصورتیکه یکجسم رسانا باسرعت $\underline{v}$ درداخل یک میدان مغناطیسی با اندوکسیون $\underline{B}$ حرکت

---

* این مقاله دنباله سلسله مقالات تبدیل مستقیم انرژی است که قبلا دراین نشریه بچاپ رسیده است .

کند تولید یک میدان الکتریکی می‌نماید برابر با $\underline{v} \times \underline{B}$ - این پدیده درسال ۱۸۳۲ بتوسط فاراده کشف گردید . درمبدل MHD جسم رسانای متحرك عبارتست از :

گاز یونیزه شده که مطابق شکل (۱) از داخل میدان مغناطیسی B با سرعت $\underline{v}$ عبور می کند .



شکل (۱) اساس مبدل MHD

درمقام مقایسه با توربوژنراتورهای معمولی لااقل دومزیت می‌توان برای MHD ذکر نمود :

الف - سیستم MHD فاقد قسمتهای متحرك است و بنابراین مسائل خستگی‌های مکانیکی قطعات دراین سیستم مطرح نخواهد بود درمقابل البته سیال‌عامل سیستم MHD درمقایسه باتوربوژنراتورها دارای درجه حرارت بالاتری خواهد بود .

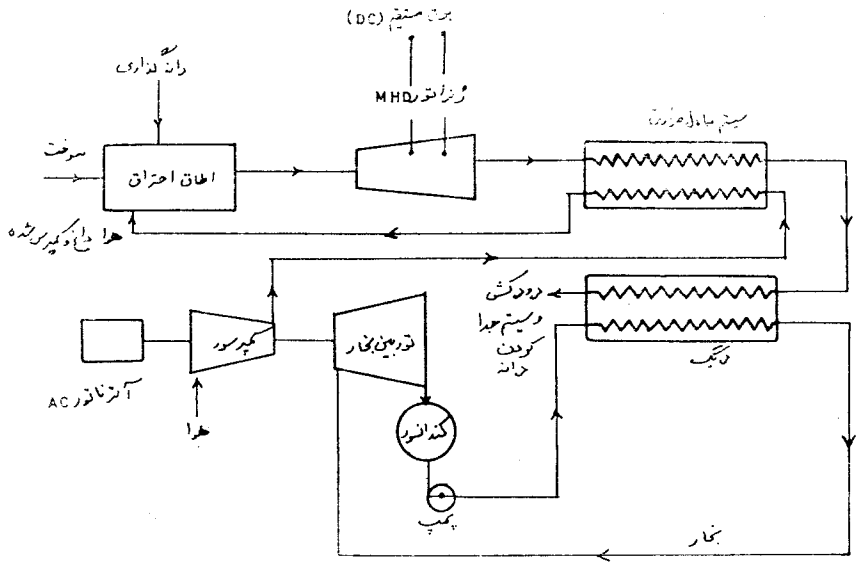
ب - مانند هرماشین حرارتی بالا بودن درجه حرارت سیال عامل دستگاه MHD سبب زیاد شدن بازده سیستم میشود . درجه حرارت سیال عامل درسیستم MHD باید آنقدر بالا باشد که گاز بصورت‌یونیزه درآید (درحدود $3000^{\circ}K$ یا بالاتر) دراین‌وضعیت کار انتخاب جنس فلز الکترودها وعایق ها یک مسئله خواهد بود . یک مسئله دیگر در کاربرد ژنراتور MHD این‌است که برق تولیدی‌معمولاً بصورت مستقیم است و البته سیستم‌هائی نیز طراحی شده است که درآنها این نقص نیز رفع شده است .

۲- سیستم ژنراتور MHD :

درشکل ۲ یک سیستم ژنراتور MHD که در نیروگاه حرارتی همراه توربین بخار بکار رفته نشان داده شده - سوخت مصرفی دراین سیستم ممکن است از انواع سوختهای فسیل باشد (جامدمثل زغال‌سنگ مایع مثل انواع نفت‌ها و یا گازی مثل گاز طبیعی) هوای مصرفی دراطاق احتراق قبلاً گرم شده تا بتوان دراطاق احتراق درجه حرارتی نزدیک $4000^{\circ}K$ بدست آورد جهت یونیزه کردن سیال عامل این درجه حرارت لازم است .

برای بالا بردن دانسیته الکترونی پلاسمای تولیدی درآن دانه گذاری (Seeding) می کنند و آن عبارتست از یونیزه کردن فازی مثل پتاسیم که در $4000^{\circ}K$ یونیزه میشود و اضافه کردن الکترون‌های آزاد

شده در داخل فضای احتراق به سیال عامل . سیال مزبور پس عبور از ژنراتور MHD مستقیماً تولید نیروی برق نموده و مطابق شکل جهت گرم کردن هوای مصرفی اطاق احتراق به یک مبدل حرارتی میرود پس از عبور ازاین مبدل‌حرارتی سیال هنوز باندازه کافی داغ است وممکن است ازآن در سیستم های‌معمولی حرارتی جهت تولید انرژی استفاده نمود . دراین شکل گاز داغ وارد کوره شده و آب‌را در دیگ تبخیر نموده و تولید بخار داغ می‌نماید . بخار مزبور درتوربین بخار معمولی بکار میرود - بازده این سیکل مرکب در حدود ۶۰ تا ۵۵ درصد است . درحالی که توربین بخار معمولی فقط ۴۰ درصد بازده دارد .



شکل (۲) سیستم ترکیب مبدل MHD با توربین بخار

۳- انواع ژنراتورهای MHD :

انواع مختلف ژنراتورهای MHD بتوسط قانون عمومی یافته اهم پیش‌بینی‌میشود . بتوسط رابطه اهم دانسیته جریان برق $\underline{j}$ بربردار میدان الکتریک $\underline{E}$ و میدان القائی $\underline{v} \times \underline{B}$ مربوط میشود :

$$\underline{E} + \underline{v} \times \underline{B} - \frac{1}{n_e e}\,\underline{j} \times \underline{B} + \frac{\nabla P_e}{e n_e} - \frac{\underline{j}}{\sigma} = 0 \qquad (1)$$

دراین رابطه :

دانسیته تعداد الکترون	n_e
فشار الکترون	P_e
کنداکتیویته (هدایت الکتریکی)	σ

درحالیکه با یک تئوری ساده می‌توان ثابت کرد که :

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e \nu_e} \qquad (2)$$

که درآن e بار الکترونی و m_e جرم آن و ν_e فرکانس برخورد الکترونها است (اثبات رابطه (۲) برعهده دانشجویان است) ، رابطه شماره (۱) در واقع همان معادله مقدار حرکت الکترونها است . دراین رابطه با تقریب کافی ممکن است از عبارت ∇P_e صرفنظر کرد . و درصورتی که فرض کنیم :

$$\underline{E}^* = \underline{E} + \underline{v} \times \underline{B} \qquad (3)$$

بسهولت میتوان از رابطه (۱) دانسیته جریان $\underline{j}$ را پیدا کرد (اثبات برعهده دانشجویان است) .

$$\underline{j} = \frac{\sigma}{1 + \omega_e^2 \tau_e^2} \left[\underline{E}^* + \tau_e \underline{\omega}_e \times \underline{E}^* + \omega_e \tau_e \left(\underline{\omega}_e \tau_e \times \underline{E}^* \right) \right] \qquad (4)$$

که درآن :

$$\omega_e = \frac{e \underline{B}}{m_e}$$

که همان فرکانس سیکلترون الکترونها است :

و

$$\tau_e = \frac{1}{\nu_e}$$

که همان زمان برخورد الکترونهاست .

عبارت $\omega_e \tau_e$ که یک عدد بدون بعد است به پارامتر (Hall) مشهور است .

پارامتر هال را متداولاً به β نشان می‌دهند .

$$\beta = \omega_e \tau_e \qquad (5)$$

اگر محورهای مختصات طوری انتخاب شود که محور z درامتداد میدان مغناطیسی باشد معادله (٤) سه ـ معادله جبری زیر را نتیجه می‌دهد :

$$\begin{cases} j_x = \dfrac{\sigma}{1+\beta^2} \left(\underline{E}_x^* - \beta E_y^* \right) \\ j_y = \dfrac{\sigma}{1+\beta^2} \left(E_y^* + \beta E_x^* \right) \\ j_z = \sigma E_z^* \end{cases} \qquad (6)$$

اینک به بیان مفهوم فیزیکی این معادلات مبادرت میشود :

اگر $\underline{E}^*$ درامتداد محور x ها باشد :

$$\begin{cases} j_x = \dfrac{\sigma}{1+\beta^2} E^* \\ j_y = \dfrac{\sigma}{1+\beta^2} \beta E^* \end{cases} \qquad (7)$$

از معادله اول بخوبی پیداست که j_x کوچکتر است از σE^* یعنی اثر میدان مغناطیسی عبارتست از تقلیل شدت جریان در امتداد میدان الکتریکی .

ازطرف دیگر بموجب رابطه دوم دستگاه معادلات (۷) یک شدت جریان (j_y) درجهت عمود برمیدانهای الکتریکی و مغناطیسی وجود خواهد داشت . این جریان به‌جریان هال (Hall) مشهور است درشکل (۳) بیان هندسی این بحث ارائه شده است . θ عبارت است از زاویه بین جریان کلی $\underline{j}$ و میدان الکتریکی و تانژانت آن با کمک روابط (۷) عبارتست از :

$$\tan\theta = \frac{j_y}{j_x} = \beta$$

وهمچنین :

$$\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}}$$

و :

$$|j| = \sqrt{j_x^2 + j_y^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{1+\beta^2}} E^* = \sigma E^* \cos\theta = \underline{j}\big|_{B=0} \cos\theta \qquad (8)$$

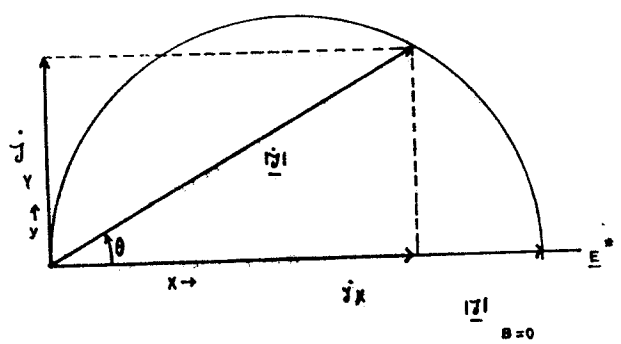
ازطرفی مؤلفه E^* درجهت $\underline{j}$ عبارتست از $E^* \cos\theta$ که آنرا با E^*_{11} (یعنی مؤلفه موازی $\underline{E}^*$ با $\underline{j}$) نشان می‌دهند

$$E^* \cos\theta = E^*_{11}$$

پس بموجب این روابط :

$$j = \sigma E^*_{11} \qquad (9)$$

رابطه (۹) به قضیه تونک Tonk مشهور است . اینک به ذکر سه نوع مولد MHD مبادرت میشود :



شکل ۳ نمایش هندسی مؤلفه‌های جریان

الف ـ ژنراتور با الکترود مداوم

این ژنراتور در واقع همان است که درشکل (۱) مورد بحث قرار گرفت . فرض کنیم محور x در جهت حرکت سیال (v) و محور z درامتداد $\underline{B}$ باشد باین ترتیب محور y الکترودها را قطع خواهد کرد و درجهت میدان الکتریکی ایجاد شده خواهد بود ، از طرفی اختلاف پتانسیل الکترودها را طوری درنظر می گیریم که میدان الکتریکی داخل کانال مشتق شده از این اختلاف پتانسیل برابر باشد با $E_y=kvB$ که درآن k عبارتست از عدد ثابتی که بنام فاکتور بار مشهور است :

$$k=\frac{\text{ولتاژ خط}}{\text{ولتاژ مدار باز}}$$

ضمناً اگر $k=1$ باشد مدار باز است و اگر $k=0$ باشد مدار با اتصال کوتاه خواهد بود و $k>1$ وضع پمپ و یا سیستم شتاب دهنده MHD است و درمورد ژنراتور MHD معمولاً بین ۰ و ۱ است .

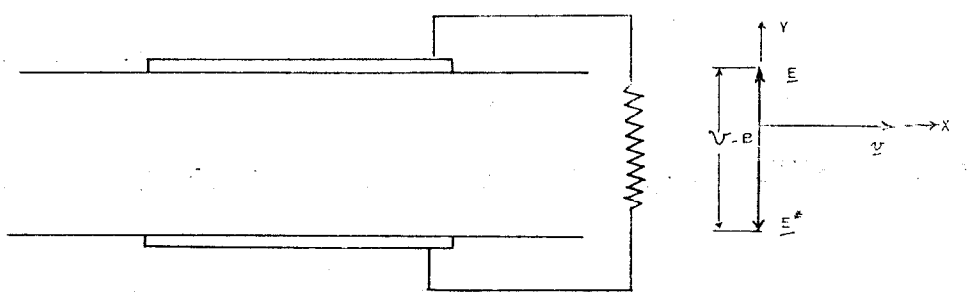
با توجه به شکل شماره ٤ داریم :

$$E_x=E_x^*=0 \quad و \quad E_y=kvB \quad و \quad E_y^*=-(1-k)vB$$

و بنابراین معادلات (٦) تصاویر x و y را مطابق روابط زیر نتیجه می‌دهد :

$$j_x=\frac{\beta\sigma}{1+\beta^2}(1-k)vB$$

$$j_y=\frac{-\sigma}{1+\beta^2}(1-k)vB$$



شکل (۴) ژنراتور با الکترودهای مداوم

با توجه به روابط فوق دانسیته قدرت که با P نشان داده میشود عبارتست از :

$$P=-E_xj_x-E_yj_y=\frac{\sigma k(1-k)}{1+\beta^2}v^2B^2 \qquad (10)$$

بنابراین رابطه دانسیته قدرت با زیاد شدن β (که ازیک بزرگتراست) بسرعت تنزل مینماید درفشار آتمسفریک

و درجه حرارت $3000^{\circ}K$ برای گازهای نتیجه احتراق و میدان مغناطیسی ۲.۰۰۰ گوس β تقریباً برابر واحد است ازطرفی ممکن است درمورد گاز آرگون که درآن دانه گذاری شده β حتی تا ۲۵ نیز برسد مسلم است که دراین شرایط سیستم ژنراتور MHD با الکترودهای مداوم مورد قبول نخواهد بود .

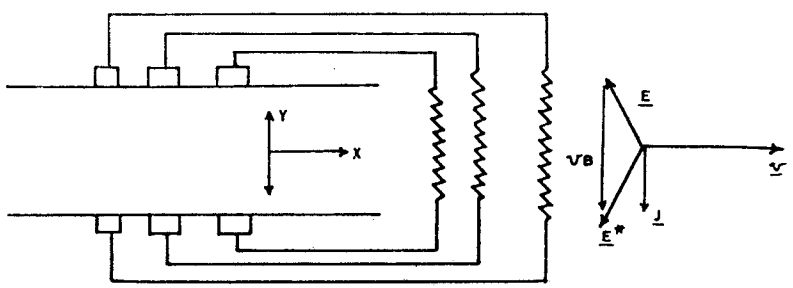
رابطه ۱۰ را ممکن است بشکل زیر نیز نوشت :

$$P = \frac{n_e m_e v^2 k(1-k)}{\tau_e} \quad \frac{\beta^2}{1+\beta^2} \qquad (11)$$

چون β متناسب با میدان مغناطیسی B است بموجب معادله (۱۱) برای مقادیر ثابت τ_e قدرت برای مقادیر B کوچک بسرعت رو به افزونی است و بمجرد اینکه B بزرگ شود دیگر P بآن سرعت زیاد نمیشود وبیک مجانب نزدیک می‌شود بطوریکه زیاد شدن میدان مغناطیسی B تأثیر زیادی در بالا رفتن قدرت تولیدی ژنراتور MHD نخواهد داشت .

ب ـ ژنراتور با الکترودهای تقسیم شده

برای بالا بردن قدرت ژنراتور MHD درمقادیر زیاد β پیشنهاد شده‌است که‌الکترودها را به‌قطعات تقسیم کنند ودرفضای بین‌قطعات‌الکترود عایق قرار دهند مطابق شکل(۵) دراینحال هرقطعه ازالکترودهای مقابل هم بیک مدار خارجی مربوط میشود ودیاگرام برداری‌های دانسیته جریان وسرعت و شدت میدانهای الکتریکی درشکل ۵ برای اینحالت بخصوص ترسیم شده است .



شکل (۵) ژنراتور با الکترودهای تقسیم شده

دراینحال $j_x = 0$

و بنابراین بموجب رابطه‌های (۶) $E_x^* - \beta E_y^* = 0$

و چون مانندحالت قبل وضع پتانسیل الکترودها طوری‌است که $E_y = kvB$ پس تصویر y رابطه (۳) میشود .

$$E_y^* = -(1-k)vB$$

و تصویر x رابطه مزبور میشود :

$$E_x^* = E_x = \beta E_y^*$$

پس

$$E_x^* = E_x = -(1-k)\beta vB$$

و رابطه دوم معادلات ۶ میشود :

$$j_y = -\sigma(1-k)vB$$

و دانسیته قدرت میشود :

$$P = E_y j_y = (kvB)[-\sigma(1-k)vB]$$

یا :

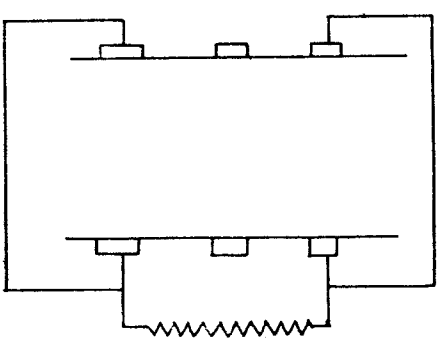
$$P = -\sigma k(1-k)v^2B^2 \qquad (10)$$

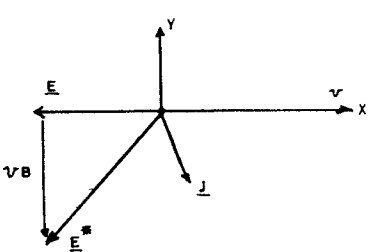
رابطه (۱۰) نشان می‌دهد که در ژنراتور با الکترود تقسیم شده درمقایسه با ژنراتور ساده قدرت بازیادشدن B بمراتب از حالت قبل بیشتر میشود .

ج ـ ژنراتور هال

در ژنراتور MHD هال نیز الکترودها تقسیم شده می‌باشند مطابق شکل ۶ اگر الکترودهای متقابل بصورت اتصال کوتاه بهم مربوط شوند یک میدان الکتریک درجهت جریان سیال عامل تشکیل خواهد شد .

مطابق شکل ۷ بار خارجی ممکن است دربین الکترودهای محل ورود به کانال و محل خروج از آن گذاشته شود دراینحال دربار مربوطه قدرت الکتریکی وجود خواهد داشت .





شکل (۷) ژنراتور هال

دراین‌حالت $E_y^* = -vB$ و $E_y = 0$ اختلاف پتانسیل مدار باز βE_y^* است .

بنابراین با بکار بردن تعریف k اختلاف پتانسیل خط میشود :

$$E_x = -k\beta vB \qquad (11)$$

پس دانسیته‌های جریان از رابطه (٦) نتیجه میشود :

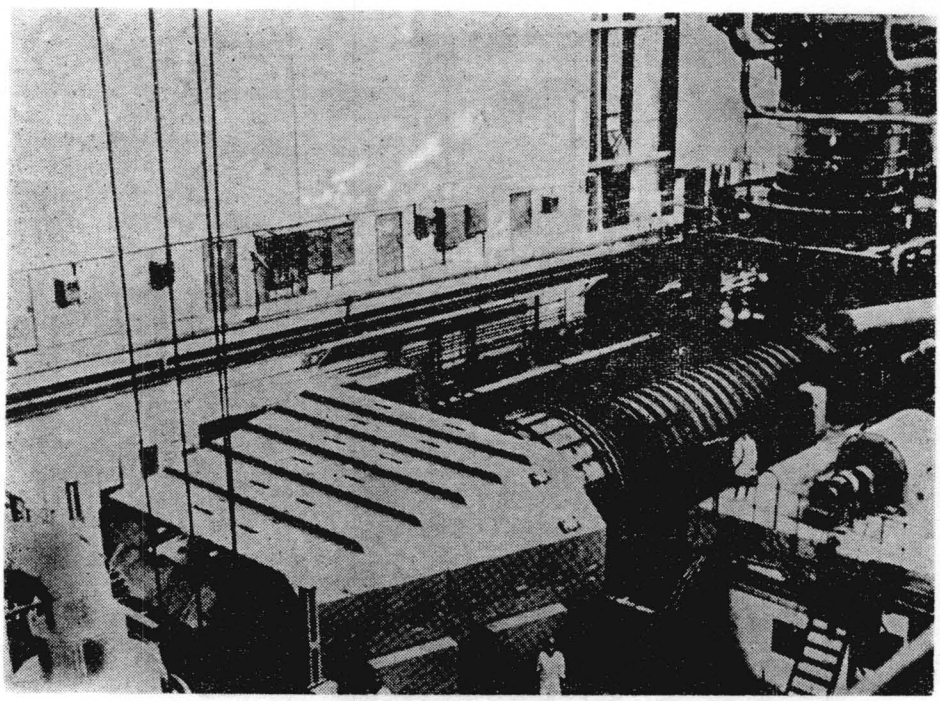
$$j_x = \frac{\sigma\beta}{1+\beta^2}(1-k)vB \qquad (12)$$

$$j_y = \frac{-\sigma}{1+\beta^2}(1+k\beta^2)vB \qquad (13)$$

دانسیته قدرت میشود :

$$P = E_x j_x = \frac{\sigma\beta^2}{1+\beta^2} k(1-k)v^2B^2 \qquad (14)$$

رابطه(١٤) نشان‌می‌دهد که برای β های بزرگ قدرت ژنراتور هال برابراست باقدرت‌ژنراتور با الکترودهای تقسیم شده یعنی‌رابطه (١٠). ضمناً در β های کوچک مسلماً ژنراتور هال طرح خوبی نخواهد بود .



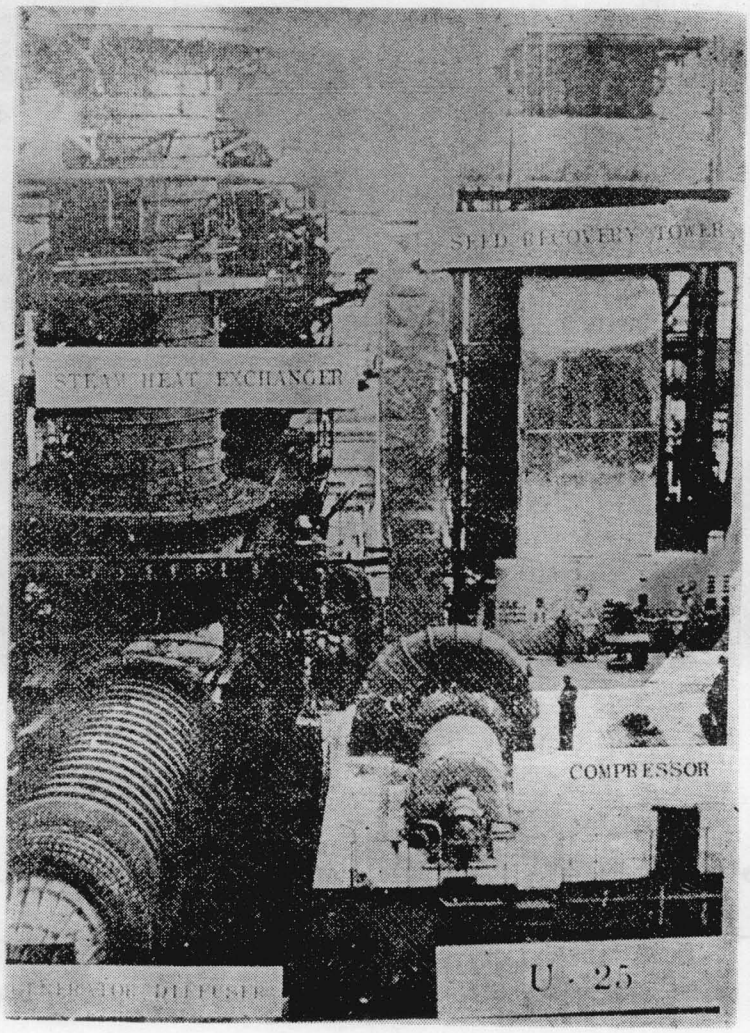
شکل (٧)

٤ـ نتیجه :

بکار بردن ژنراتور تبدیل مستقیم انرژی MHD درنیروگاههای حرارتی معمولی بازده سیستم را تا ٦٠ درصد بالا می‌برد بنابراین با این‌طریق ممکن است مقدار قابل توجهی درمصرف سوخت بازاء تولید kwHr معین صرفه‌جوئی شود . ژنراتورهای با الکترود تقسیم شده و هال (Hall) درطرح‌های صنعتی مزایائی دارند و ازاین نظر بیشتر مورد توجه هستند .

درمقیاس صنعتی در کشورهای اروپائی مخصوصاً شوروی وآلمان فعالیت های زیادی درطرح و گسترش ژنراتورهای MHD انجام شده . امریکا و ژاپن از این نظر درمرحله بعد قرار دارند ، انگلستان و فرانسه و کانادا نیز دراین پروژه‌ها بیکار ننشسته‌اند .

درشوروی طرح U—۲۵ شکل های ۷ و ۸ توفیق زیادی دربرداشته و ژنراتور MHD دراین طرح قدرتی قریب ۲۵ مگاوات تولید می کند ـ جنبه های اقتصادی کاربرد ژنراتور MHD و مقایسه آن با سایر وسائل تولید انرژی وحتی نیروگاه اتمی آنقدر وسیع است که درخور مقاله مجزاست ـ درکشور ما نیروگاههای حرارتی اغلب در وضع اقتصادی نیستند حتی ازطرحهای مرکب وسائل معمولی تولید انرژی نیز تا این زمان هنوز خبری نیست، دیر یا زود لازم است علاوه برمطالعات درجنبه های نیروگاه اتمی درحدود اقتصادی کردن نیروگاههای معمولی اقداماتی صورت گیرد ژنراتور MHD همواره دربالا بردن بازده نیروگاه حرارتی نقش اساسی دارد .



شکل (۸)

منابع

Magnetohydrodynamics Power Generation Hsuan Yeh, University of Pennsylvania Program II, 1966.

Kantrowitz, Stekly and Hatch, a Model of M.H.D. Type Superconducting Magnet, Proceeding of Symposium on M.H.D. Power Generation, Salzburg Austria, 1966.

Mechanical Engineering Nov. 1967.

Mechanical Engineering May, 1972.