مقاله

ژنراتورهای مگنتوهیدرودینامیک و چالش‌های استفادهٔ از آنها برای کاهش هزینهٔ تولید برق

محمد پورجعفرقلی*
دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک
دانشگاه کاشان
mpourjafargholi@gmail.com

قنبرعلی شیخزاده
دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه کاشان
sheikhz@kashanu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۱۹

چکیده

از چند دههٔ پیش تاکنون، تقاضا برای برق به اندازهٔ هشداردهنده‌ای بیشتر از میزان برق تولیدی افزایش یافته است. روش‌های فعلی تولید برق چندان کارآمد نیست و حتی ممکن است برای همگام‌شدن با افزایش میزان تقاضا، کافی یا مناسب نباشد. از جمله روش‌های نوین تبدیل انرژی، تولید انرژی الکتریکی از انرژی جنبشی پلاسما (گاز یونیزه‌شده) در ژنراتورهای مگنتوهیدرودینامیک یا ام. اچ. دی. می‌باشد. در این مقاله، با بررسی مطالعات انجام‌شده در این حوزه، ضمن معرفی ژنراتورهای هیدرودینامیک مغناطیسی، چالش‌های استفاده از آنها برای کاهش هزینهٔ تولید برق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این ژنراتورها، با جریان‌یافتن پلاسما در راستای عمود بر یک میدان مغناطیسی، مطابق پدیده‌ای به نام فارادی، میدانی الکتریکی در جهت عمود بر دو جهت بردار جریان سیال و بردار میدان مغناطیسی القا می‌شود. تنها تفاوت بین ژنراتورهای ام. اچ. دی. و چرخنده، استفاده از پلاسما به‌جای قطعات متحرک است. مزیت اصلی ژنرتورهای ام. اچ. دی. نیز وزن نسبتاً اندک آنها در مقایسه با ژنراتورهای متعارف است که موجب استقبال از آنها در صنایع هوایی و دریایی شده است. بازدهٔ عملی تولید برق با استفاده از این ژنراتورها کمتر از ۶۰ درصد نیست. از اینرو، اهمیت تولید برق با این روش در آینده بیشتر مشخص خواهد بود.

واژگان کلیدی: فارادی، ژنراتور هیدرودینامیک مغناطیسی، پلاسما، جریان مستقیم، میدان مغناطیسی القایی

۱. مقدمه

طی سال‌های اخیر، مشکل یافتن فناوری‌های مناسب به‌منظور تولید انرژی ارزان، استاندارد و سازگار با محیط، منجر به پیشرفت فناوری‌ها شده است. هرچند بیشتر انرژی‌ها قابلیت تبدیل به برق را دارند، اما تغییر شکل‌های

میانی زیاد، منجر به محدودیت‌هایی در بازده می‌شود. معمولاً نقطهٔ بحرانی در تبدیل انرژی، ترکیب انرژی گرمایی و مکانیکی سیستم تبدیل می‌باشد که دمای ماکزیمم مربوطه را محدود می‌کند. برای جلوگیری از محدودیت‌های مکانیکی، به‌نظر می‌رسد تبدیل مستقیم انرژی گرمایی به انرژی الکتریکی امکان‌پذیر باشد.

۲. تبدیل مستقیم انرژی

مراد از تبدیل مستقیم انرژی، تبدیل نوعی انرژی (مثل گرمایی) به نوع دیگری از انرژی (مثل الکتریکی) بدون وجود قطعات متحرک است. پنج شیوهٔ مرسوم تبدیل مستقیم انرژی عبارت است از:

۱. فتوالکتریک[۱]
۲. ترموالکتریک[۲]
۳. ترمیونیک[۳]
۴. پیل سوختی[۴]
۵. مگنتوهیدرودینامیک[۵]

در ادامه هر یک از روش‌های پنج‌گانهٔ فوق به اجمال تشریح می‌شوند.

۲-۱. فتوالکتریک

در سال ۱۸۸۷ م، هانریش هرتز در حین انجام آزمایشی متوجه شد که تاباندن نور با طول موج‌های کوتاه مانند امواج فرابنفش به کلاهک فلزی الکتروسکوپی که دارای بار الکتریکی منفی است، سبب تخلیهٔ الکتریکی آن می‌شود. وی با انجام آزمایش‌های متعدد نشان داد که تخلیهٔ الکتروسکوپ به‌دلیل جداشدن الکترون از سطح کلاهک فلزی آن است. این پدیده را فتوالکتریک می‌نامند.

۲-۲. ترموالکتریک

مولدهای ترموالکتریک ابزارهای حالت جامدند که گرما را به الکتریسیته مبدل می‌کنند. برعکس موتورهای حرارتی معمول، مولدهای ترموالکتریک اجزای متحرک ندارند و کاملاً بی‌صدا می‌باشند. در مقایسه با موتورهای حرارتی معمول، این مولدها بازده کمتری دارند، اما برای کاربردهای کوچکتر مولدهای ترموالکتریک به‌دلیل حجم کم و ارزان و قابل اندازه‌گیری بودن مفیدتر خواهند بود [۱].

۲-۳. ترمیونیک (گرمایونی)

گسیل گرمایونی به جریان‌یافتن حامل‌های بار الکتریکی بر اثر گرما از یک سطح یا از روی یک سد انرژی پتانسیل گفته می‌شود. این پدیده بدین دلیل رخ می‌دهد که انرژی داده‌شده به حامل‌ها از پتانسیل اتصال‌دهنده‌شان بیشتر می‌شود. حامل‌های بار می‌توانند الکترون‌ها یا یون‌ها باشند که در منابع قدیمی‌تر به آنها گرمایون گفته می‌شود. پس از گسیل گرمایون‌ها، در منطقه‌ای که حامل جدا شده است، بار الکتریکی پدید می‌آید که اندازهٔ آن هم‌اندازهٔ بار الکتریکی جداشده اما با علامت مخالف خواهد بود.

۲-۴. پیل سوختی

پیل سوختی یک مبدل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی است که بدون ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی، از ترکیب مستقیم بین سوخت و اکسیدکننده، انرژی الکتریکی با بازدهی بالا تولید می‌کند. این تبدیل، مستقیم بوده و بازدهٔ بالایی دارد. یکی از معروف‌ترین پیل‌های سوختی، پیل سوختی هیدروژنی است که در آن از عکس الکترولیز آب استفاده می‌شود. به‌عبارت دیگر از واکنش بین هیدروژن و اکسیژن؛ آب، حرارت و الکتریسیته تولید می‌شود. در پیل‌های سوختی، هر سلول از سه بخش آند، کاتد و الکترولیت و غشاء تشکیل شده است.

۲-۵. هیدرودینامیک مغناطیسی

ام. اچ. دی. همان مطالعهٔ دینامیک سیالات رسانای الکتریسیته همچون پلاسما، فلزات مذاب و آب نمک در معرض میدان مغناطیسی است و بین آثار متقابل جریان سیال و میدان مغناطیسی ارتباط ایجاد می‌کند. در الکترومغناطیس کلاسیک، میدان مغناطیسی به‌صورت میدان حاصل از بار الکتریکی در حال حرکت در اطراف آن

تعریف می‌شود. به بیان ساده‌تر، میدان مغناطیسی حاصل تأثیر دو میدان الکتریکی بر روی هم است که منجر به ایجاد یک میدان مغناطیسی می‌شود. میدان مغناطیسی از تک‌بارها، سیم‌های حامل جریان، جهت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی (آهن‌رباهای دائمی)، جریان سیال رسانا (میدان مغناطیسی زمین) ایجاد می‌شود.

۱-۵-۲. عدد رینولدز مغناطیسی

در مگنتوهیدرودینامیک، عدد رینولدز مغناطیسی عددی بدون‌بعد است که به‌صورت نسبت آثار وزش[۶] (حرکت افقی توده‌ای از سیال در اثر تغییر دما) مغناطیسی به انتشار[۷] مغناطیسی تعریف و با رابطهٔ ۱ تعریف می‌شود.

$$R_m = \frac{UL}{\eta} \qquad (۱)$$

در این رابطه U معرف سرعت جریان، L طول جریان و نهایتاً η ضریب پخش مغناطیسی است. بسته به مقدار عدد رینولدز مغناطیسی، میدان مغناطیسی دو گونه رفتار خواهد داشت: برای $R_M << 1$، وزش نسبتاً بی‌اهمیت است، بنابراین میدان مغناطیسی تمایل به‌سمت یک حالت صرفاً پخش دارد و غیریکنواختی‌هایی در میدان و در نتیجه در جریان سیال به‌وجود می‌آیند. این حالت به شرایط مرزی بیشتری برای جریان تعیین نیاز دارد. اما برای $R_M >> 1$، پخش در طول L نسبتاً بی‌اهمیت می‌باشد. خطوط مغناطیسی میدان تمایل دارند در پلاسما ثابت بمانند و همراه جریان پلاسما حرکت کنند. خطوط شار میدان مغناطیسی با جریان سیال به‌صورت افقی حرکت می‌کنند[۸] تا گرادیان‌ها در مناطقی با مقیاس طولی به اندازهٔ کافی کوتاه متمرکز شوند تا پخش و وزش بتوانند به تعادل برسند. عدد رینولدز مغناطیسی ترکیبی از مقادیری است که رفتار دینامیکی پلاسما را نشان می‌دهد. این عدد مشابه عدد رینولدز در مکانیک سیالات معمولی است که برای تعیین آرام یا آشفته‌بودن جریان سیال از آن استفاده می‌شود.

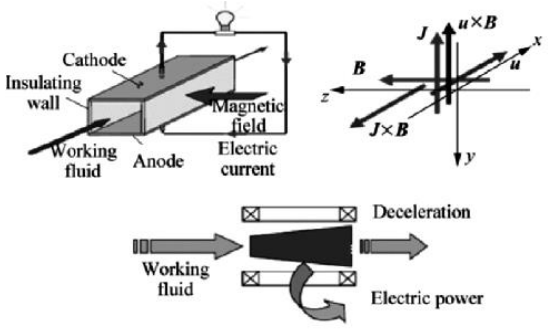
۳. ژنراتور ام .اچ. دی.

فرایند تبدیل ام. اچ. دی. در سال ۱۸۹۳ م توسط مایکل فارادی تشریح شد؛ زیرا در آن زمان دانشمندان به این واقعیت پی برده بودند که می‌توان گازها را به‌وسیلهٔ یونیزاسیون به موادی رسانا تبدیل کرد. طبق اثر فارادی، اگر یک سیال رسانا درون یک میدان مغناطیسی حرکت کند، در آن رسانا جریان الکتریکی برقرار می‌شود. ژنراتور مورد استفاده در این فرایند، ژنراتور ام. اچ. دی. نامیده می‌شود. شرط اساسی انتخاب سیال، رسانایی الکتریکی و قابلیت یونیزه‌شدن است که به فلزات مذاب، گازهای یونیزه شدهٔ داغ (پلاسما[۹]) و یا الکترولیت‌های قوی محدود می‌شود. فلزات مایع همچون جیوه، پتاسیم و سدیم رسانایی بالایی دارند، اما کار با آنها مشکل است [۲]. گازها نیز معمولاً در شرایط معمولی رسانای الکتریسیته نیستند.

ژنراتور ام. اچ. دی. فلز مایع می‌تواند به‌راحتی توان الکتریکی متناوب را مستقیماً تولید کند و توان تولیدی آن از ژنراتور ام. اچ. دی. گاز بیشتر است. اما ژنراتور ام. اچ. دی. گاز یونیزه، راحت‌تر به سرعت‌های بالا در کانال دست می‌یابد، پس ولتاژ مستقیم نسبتاً بالایی تولید می‌کند و نسبت به ژنراتور ام. اچ. دی. فلز مایع بازده بیشتری دارد. بنابراین در حال حاضر از ژنراتور ام. اچ. دی. گاز یونیزه استفاده می‌شود [۳].

ژنراتور ام. اچ. دی. مشابه موتور موشک است که با آهن‌ربای بزرگی احاطه شده است و هیچ‌گونه قطعهٔ متحرکی ندارد و رساناهای واقعی با گاز یونیزه‌شده (پلاسما) جایگزین شده‌اند (شکل ۱). بنابراین، این ژنراتور بازدهی بسیار بالایی دارد. البته این ژنراتور تنها بخشی از انرژی دریافتی از احتراق سوخت را به توان الکتریکی تبدیل کرده و مابقی را به محیط بازمی‌گرداند. به‌همین دلیل بازده حرارتی آن با افزایش دمای ورودی و کاهش دمای خروجی افزایش می‌یابد. ژنراتورهای ام. اچ. دی. در یک چرخهٔ هیدرودینامیک مغناطیسی در نقش یک ماشین الکتریکی ظاهر می‌شوند. بدین معنا که می‌توان از انرژی حاصل از

حرکت خطی ذرات پلاسمای متحرک (ایجادشده به‌وسیلهٔ میدان الکترومغناطیسی) برای تولید جریان مستقیم استفاده کرد و برعکس، می‌توان از جریان مستقیم برای شتاب‌دادن ذرات پلاسما استفاده نمود.



شکل ۱. نمایی شماتیک از ژنراتور ام. اچ. دی. [٤]

دانستن این مطلب مهم است که ژنراتورها تولید جریان الکتریکی می‌کنند، نه بار الکتریکی که در سیم‌های سیم‌پیچی‌اش وجود دارد. این نکته تا حدودی مشابه یک پمپ آب است که ایجاد جریان آب می‌کند، اما خود آب را تولید نمی‌کند.

ساساً ژنراتورهای ام. اچ. دی. در سه حالت مختلف قابل استفاده‌اند:

۱. سیستم چرخه باز

۲. سیستم چرخه بسته با فلز مایع به‌عنوان سیال عامل

۳. سیستم چرخه بسته با سیالات گازی

سیستم چرخه باز شامل یک ژنراتور ام. اچ. دی. و یک کمپرسور هوا با دمای بالاست. بازده حرارتی نیز معمولاً در حدود ۸۳ درصد است. سیال عامل توربین گاز در واحد صنعتی، هوای تمیز گرم‌شده توسط گاز خروجی از ژنراتور ام. اچ. دی. است. چنین چرخه‌هایی به آب خنک‌کننده برای تقطیر بخار و پس‌دادن گرما احتیاج ندارند. گاز عامل کانال را با دمای حدود ۱۰۳۳ درجهٔ سانتی‌گراد ترک می‌کند. در ادامه، گرمای آن صرف پیش‌گرم کردن هوای احتراقی می‌شود و تهیهٔ بخار در یک ژنراتور بخار انجام می‌شود تا قدرت اضافی در واحد توربین بخار تولید کند.

بنابراین سیستم به یک چرخهٔ مرکب تبدیل می‌شود و بازده کلی آن به ۶۳ درصد می‌رسد. سیستم چرخه بسته اما از دو نوع ژنراتور ام. اچ. دی. با ظرفیت رسانایی گوناگون استفاده می‌شود. در نوع اول با قابلیت رسانایی الکتریکی، سیال عامل حاصل از یونیزاسیون یک گاز بذردار و نوع دوم با فلز مایع می‌باشد. گاز متراکم توسط یک منبع خارجی در یک مبدل حرارتی گرم و در ژنراتور ام. اچ. دی. منبسط می‌شود. علاوه بر افت فشار و دما، گرمای گاز توسط یک خنک‌کننده گرفته می‌شود و دوباره متراکم و برای گرم‌شدن مجدد برگشت داده می‌شود. ژنراتور ام. اچ. دی. با چرخهٔ بسته به‌دل‌ی‌ل دم‌ا‌ی‌ع‌م‌ل‌ی پ‌ای‌ی‌ن‌ت‌ر اجازهٔ انتخاب وسیع‌تری از مواد را می‌دهد، اما از یک سیستم با چرخه باز بازده حرارتی بالاتری دارد. در جدول ۱ مشخصات این دو سیستم با یکدیگر مقایسه شده است.

باید توجه داشت که گازهای خروجی در چرخه باز وارد اتمسفر می‌شود، اما در چرخه بسته دوباره وارد چرخه شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌علت دمای بسیار بالا و بیم مخاطرات ناشی از تنش‌های حرارتی، مکانیکی، خوردگی و از دست رفتن خاصیت مواد در این ژنراتورها، برای زمان بهره‌برداری محدودیت‌هایی وجود دارد [۵].

نوع سوخت و ژنراتور مانند فارادی، هال یا دیسکی را نیز می‌توان مطابق کاربرد سیستم انتخاب کرد. همچنین، راکتور هسته‌ای نیز به‌عنوان یک منبع حرارتی مناسب برای ترکیب با ژنراتور ام. اچ. دی. چرخه بسته توان تولید هزاران مگاوات برق را دارد.

۱-۳. اثر هال[۱۰]

این پدیده نخستین‌بار، در سال ۱۸۷۹ م، توسط ادوین هال[۱۱] کشف شد. اثر هال از حرکت ذرات باردار در دو میدان توام الکتریکی و مغناطیسی ناشی می‌شود. وقتی یک جریان الکتریکی در طول یک رسانا برقرار باشد، برهمکنش حامل‌های بار و میدان مغناطیسی سبب می‌شود که یک اختلاف پتانسیل الکتریکی به‌تدریج در راستای عمود بر

میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی در رسانا به‌وجود می‌آید. ضریب هال با استفاده از رابطهٔ ۲ تعریف می‌شود:

$$R_H = \frac{E_y}{j_x B} \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه E_y میدان الکتریکی القایی، j چگالی جریان الکترون‌های حامل و B میدان مغناطیسی است. اندازهٔ این ضریب به نوع، تعداد و خواص حامل‌های بار تشکیل‌دهندهٔ جریان بستگی دارد. مقدار پارامتر هال با شدت میدان مغاطیسی افزایش می‌یابد. اگر مقدار پارامتر هال کم باشد، حرکت الکترون‌ها بین دو برخورد با ذرات سنگین (خنثی یا یون) تقریباً خطی است. اما اگر مقدار پارامتر هال زیاد باشد، انحنای حرکت الکترون‌ها زیاد خواهد بود. یکی از ویژگی‌های بسیار مهم اثر هال این است که بین حامل‌های مثبت که در یک جهت و حامل‌های منفی که در جهت دیگر حرکت می‌کنند، تفاوت می‌گذارد. اثر هال نخستین برهان واقعی بود که اثبات می‌کرد جریان الکتریکی در فلزات به‌وسیلهٔ الکترون‌های در حال حرکت ایجاد می‌شود نه پروتون‌ها. جریان از حرکت تعداد زیادی حامل‌های بار تشکیل می‌شود که معمولاً ترکیبی از الکترون‌ها و یون‌ها هستند. وقتی چنین میدانی وجود نداشته باشد، بارها تقریباً به‌صورت مستقیم حرکت می‌کنند. اما وقتی یک میدان مغناطیسیِ عمود اعمال شود، مسیر آنها منحرف می‌شود و روی یکی از سطوح ماده تجمع می‌کنند. نتیجهٔ این امر برجای ماندن بارهای مساوی اما با علامت مخالف در سطح دیگر خواهد بود؛ یعنی همان‌جایی که کمبود حامل بار وجود دارد. بدین‌ترتیب یک توزیع نامتقارن از چگالی بار در سطح عنصر هال به‌وجود می‌آید که جهت آن عمود بر میدان مغناطیسی و جهت حرکت حامل‌های بار است. جداشدن بارها یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کند که با ادامهٔ مهاجرت بارها مخالفت خواهد کرد. بنابراین یک اختلاف پتانسیل ثابت تا زمانی‌که جریان ادامه داشته باشد به‌وجود خواهد آمد.

جدول ۱. خلاصهٔ مشخصات دو سیستم ام. اچ. دی.

ردیف	نوع سیستم	سیال عامل	دما (سانتی‌گراد)	آهن‌رباهای ابررسانای جریان مستقیم	ظرفیت پالایشگاه
۱	مدار باز	محصول احتراق دانه‌دارشده با پتاسیم[۱۲]	۲۵۰۰	۴ تا ۶ تسلا	حدود ۱۰۰ مگاوات
۲	مدار بسته	هلیم دانه‌دارشده با سزیم[۱۳]	۱۴۰۰	۴ تا ۶ تسلا	بیش از ۲۰۰ مگاوات

۲-۳. لغزش یون

در صورت اعمال یک میدان مغناطیسی، الکترون‌ها در جهت اعمال این میدان تحت تأثیر قرار خواهند گرفت و لزوماً با میدان الکتریکی موازی نخواهند بود. چون پارامتر هال برای یون‌ها کوچکتر از پارامتر هال برای الکترون‌هاست، به‌علت جرم یونی بالاتر، جریان یونی چندان تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار نمی‌گیرد. با افزایش میدان مغناطیسی، جریان الکترون تا رسیدن به مرتبهٔ یکسان با جریان یونی کاهش می‌یابد. این پدیده لغزش یون نامیده می‌شود. توجه به این نکته لازم است که اثر هال ناشی از برخورد بین الکترون‌ها و ذرات خنثی و لغزش یون نتیجه برخورد بین یون‌ها و ذرات خنثی است. پارامتر هال و لغزش یون، هر دو در قانون اهم تعمیم‌یافته ظاهر می‌شوند. اگر در جریان یونیزه‌شده، تعداد برخوردها بین یون‌ها و ذرات خنثی کوچک فرض شود، جریان الکتریکی تنها به‌وسیلهٔ الکترون‌ها حمل می‌شود. بنابراین می‌توان از لغزش یون‌ها صرف‌نظر کرد و برعکس.

۳-۳. انواع ژنراتورهای ام. اچ. دی.

از نظر نحوهٔ اتصال الکترودها با بار خارجی می‌توان آنها را به انواع مختلفی دسته‌بندی کرد [۶]:

۱. ژنراتور فارادی با الکترود پیوسته

۲. ژنراتور فارادی با الکترود ناپیوسته

۳. ژنراتور هال

۴. ژنراتور اتصال سری یا متقاطع با الکترود ناپیوسته

در شکل ۲، بخش الف، ساختمان ژنراتور فارادی با الکترود پیوسته نمایش داده شده است. این ژنراتور ساده‌ترین نوع ژنراتور ام. اچ. دی. است و یک بار خارجی به آن وصل می‌شود. الکترودهای هم‌پتانسیل سبب می‌شود میدان درون سیال عمود بر جریان پلاسما باشد. مؤلفهٔ محوری جریان مسیر طولانی‌تری را در کانال طی می‌کند که باعث ایجاد تلفات اهمی و در نتیجه کاهش مؤلفهٔ جریان عرضی می‌شود.

در ژنراتور فارادی با الکترود ناپیوسته اما با اتصال هر کدام از الکترودهای تیغه‌ای به یک بار خارجی می‌توان از تلفات اهمی در ژنراتور با الکترود پیوسته جلوگیری کرد. در این‌گونه از ژنراتور هر کدام از مدارها دارای اختلاف پتانسیل مختلفی به‌صورت جداگانه هستند (شکل ۲، قسمت ب).

در ژنراتور هال، وقتی پارامتر هال خیلی بزرگ شود، ولتاژ هال از فارادی بزرگتر می‌شود و به‌همین دلیل ژنراتور هال برای به‌کار گرفتن جریان الکتریکی هال طراحی می‌شود. در این نوع ژنراتور، الکترودهای تیغه‌ای دو به دو با هم اتصال کوتاه شده و بار خارجی به الکترودهای ابتدایی و انتهایی وصل می‌شود. تولید قدرت در این نوع ژنراتور ام. اچ. دی. به‌وسیلهٔ میدان الکتریکی و جریان الکتریکی محوری می‌باشد (شکل ۲، قسمت ج).

در ژنراتور اتصال سری یا متقاطع با الکترود ناپیوسته الکترودها به‌صورت مورب دو به دو به هم متصل شده و سپس بار به الکترود ابتدایی و انتهایی طرفین متصل شده است (شکل ۲، قسمت د). همچنین می‌توان تعداد بارهای بیشتری را به‌همین صورت به کانال وصل نمود. البته وجود بارهای خارجی زیاد می‌تواند سبب پیچیدگی شود که با محدودکردن بار به یک یا چند عدد می‌توان این مشکل را برطرف کرد. این موضوع به این علت امکان‌پذیر است که مؤلفه‌های X و Y میدان الکتریکی، میدان برایندی را به‌وجود می‌آورند که با جریان الکتریکی زاویه می‌سازد. از اینرو لازم است که دیواره‌های کانال را در جهت میدان الکتریکی برایند عایق‌بندی شود [۵].

٤-۳. پارامترهای مؤثر بر میزان تولید ژنراتورهای ام. اچ. دی.

در ژنراتور ام. اچ. دی. مقاومت داخلی گاز پلاسما به نام R_2 و مقاومت مدار مصرف خارجی R_1 نامگذاری می‌شود (شکل ۳). با وجود اختلاف پتانسیل بین دو الکترود، جریان ژنراتور از رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} \qquad (۳)$$

همچنین اختلاف پتانسیل بین دو الکترود با استنفاده از رابطهٔ ۴ به‌دست می‌آید:

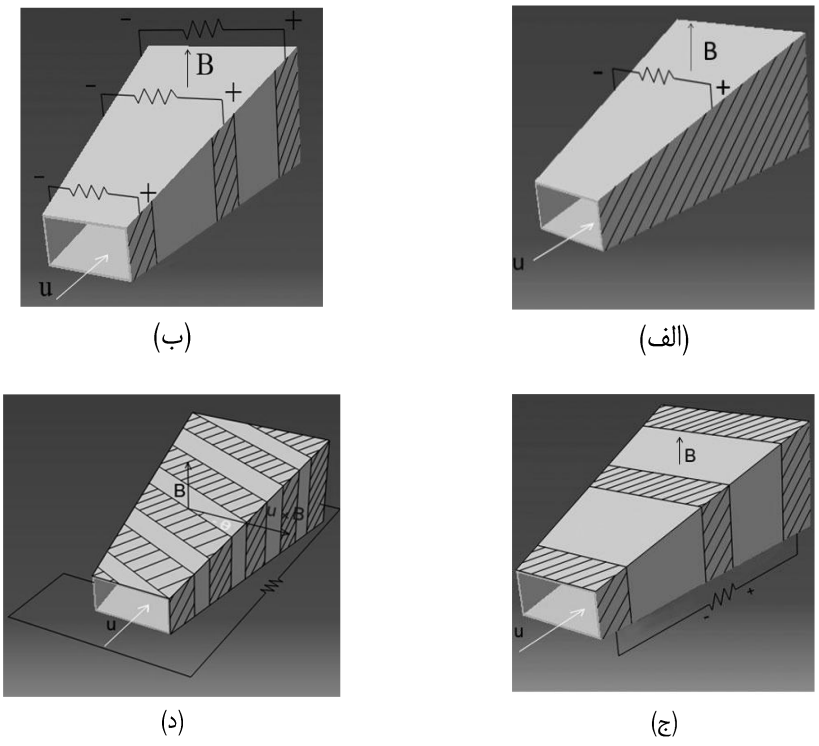
$$U = V B d \qquad (۴)$$

به‌طوری‌که در این رابطه d فاصلهٔ بین دو الکترود، v سرعت متوسط پلاسما در طول مسیر و B نیز چگالی شار مغناطیسی است. مقاومت R_2 طبق رابطهٔ ۵ به رسانایی الکتریکی پلاسما (n)، عرض الکترودها (b) و طول الکترود (l) بستگی دارد:

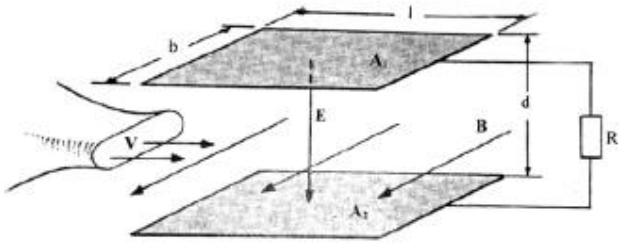
$$R_2 = \frac{d}{nbl} \qquad (۵)$$

۱-۴-۳. مساحت و فاصلهٔ الکترودها

طبق رابطهٔ ۵ مقدار مقاومت داخلی گاز پلاسما با فاصلهٔ بین دو الکترود (البته فاصله بهینه) و افزایش مساحت الکترودها می‌توان مقاومت داخلی پلاسما را کاهش داد. با کاهش مقاومت R_2 مقدار جریان خروجی افزایش می‌یابد.



شکل ۲. دسته‌بندی ژنراتورهای ام. اچ. دی. از نظر نحوهٔ اتصال الکترودها با بار خارجی [٦]؛ الف) ژنراتور فارادی با الکترود پیوسته، ب) ژنراتور فارادی با الکترود ناپیوسته، ج) ژنراتور هال، د) ژنراتور اتصال سری یا متقاطع با الکترود ناپیوسته



شکل ۳. آرایش یک مبدل مگنتوهیدرودینامیک [٦]

۲-٤-۳. سرعت گاز یونیزه

مطابق رابطهٔ ۴ با افزایش سرعت متوسط پلاسما، میزان ولتاژ بین دو الکترود و در نتیجه میزان جریان حاصله در یک مدار خارجی افزایش می‌یابد. انرژی اولیهٔ ژنراتورهای ام. اچ. دی. از نوع حرارتی ست، که می‌تواند توسط فرایند احتراق در اتاق احتراق و یا توسط واکنش‌های هسته‌ای در راکتور هسته‌ای تولید شود. در این ژنراتور گام نخست پس از تولید پلاسما تبدیل انرژی حرکتی گرمایی تصادفی آن به انرژی حرکتی مستقیم می‌باشد. این عمل با انبساط پلاسما از راه یک نازل به داخل خلأ صورت می‌پذیرد. سرعت پلاسما در دهانهٔ خروجی نازل برحسب متر بر ثانیه، با فرض آنکه دما در اتاق احتراق معادل T_1 و دمای کاهش یافته در دهانه خروجی نازل برابر T_2 باشد، مطابق رابطهٔ ۶ محاسبه می‌شود:

$$V = \sqrt{2Ct\,(T_1 - T_2)} \qquad (۶)$$

به‌طوری‌که در این رابطه C_t معرف گرمای ویژهٔ پلاسما برحسب ژول بر کلوین است. همچنین T_1 و T_2 برحسب

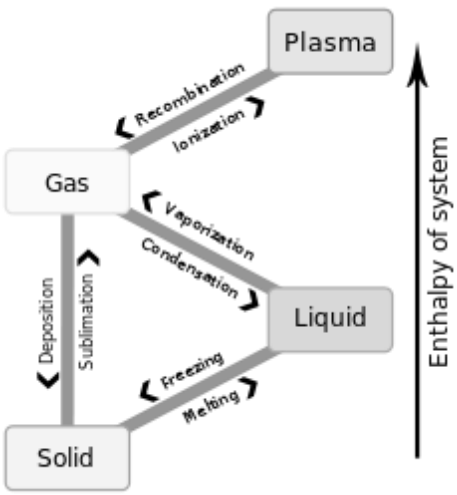
کلوین می‌باشند. با توجه به رابطهٔ ۶ با ایجاد درجه حرارت‌های بالا در اتاق احتراق سرعت‌های بالایی برای گاز یونیزه شده حاصل می‌شود.

۳-٤-۳. چگالی میدان مغناطیسی

طبق رابطهٔ $\varphi = B.A$ اگر مقدار چگالی میدان مغناطیسی افزایش یابد، مقدار فوران یا شار افزایش یافته است. به این ترتیب، اختلاف پتانسیل بین دو الکترود افزایش یافته و در نتیجه مقدار جریان نیز افزایش می‌یابد. برای افزایش چگالی میدان مغناطیسی پیشنهاد می‌شود از سیم‌پیچ‌های ابررسانا استفاده شود.

۴. پلاسما

در سال ۱۸۷۹ م، سر ویلیام کروکس، فیزیک‌دان انگلیسی، هنگام بررسی ویژگی‌های ماده در تخلیهٔ الکتریکی پیشنهاد کرد نوع خاص گاز به‌عنوان حالت چهارم ماده نامگذاری شود. پلاسما یکی از چهار فاز اصلی ماده است (شکل ۴).



شکل ٤. چهار فاز اصلی ماده

واژهٔ پلاسما به گاز یونیزه‌شده‌ای اطلاق می‌شود که همه یا بخش قابل توجهی از اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست داده و به یون‌های مثبت تبدیل شده باشند و یا اینکه تعداد الکترون‌های آزاد آن تقریباً برابر با تعداد یون‌های مثبت آن باشد. پلاسما مجموعه‌ای از یون‌ها، الکترون‌ها و اتم‌های خنثای جدا از هم و تقریباً در حال تعادل مکانیکی - الکتریکی می‌باشد. هرچه پلاسما بیشتر یونیزه شود، میزان رسانایی جریان آن هم بیشتر می‌شود. برای یونیزاسیون بیشتر می‌توان دو کار انجام داد:

۱. اگر محدودیت عملی نداشته باشیم، می‌توانیم دمای مخزن را به اندازهٔ کافی بالا ببریم تا درجهٔ یونیزه‌شدن پلاسما بیشتر شود.
۲. افزودن مقداری ناخالصی با پتانسیل یونیزاسیون کم مانند بخار فلزات قلیایی باعث ازدیاد رسانایی الکتریکی پلاسما می‌شود [۷].

پلاسماها معمولاً بسیار داغ هستند، از اینرو نمی‌توان پلاسما را تولید و در ظرف‌های معمولی نگه‌داری کرد. پلاسما را با استفاده از میدان مغناطیسی می‌توان در محدوده‌ای از فضا حبس کرد. خورشید نمونه‌ای از حالت پلاسماست. در واقع بیشتر مادهٔ جهان به شکل پلاسماست. پلاسما حالت‌های خاصی را در مقابل مغناطیس نشان می‌دهد. این رفتارها کاملاً برعکس رفتار گازها در مقابل میدان مغناطیسی است؛ زیرا گازها به‌سبب خنثی بودنشان از لحاظ بار الکتریکی، توانایی عکس‌العمل در مقابل مغناطیس و میدان وابسته به آن را ندارند.

۱-٤. گازهای ضعیف یونیزه‌شده و کاملاً یونیزه شده

پلاسما یا گازهای یونیزه‌شده به دو گروه ضعیف یونیزه‌شده و کاملاً یونیزه‌شده تقسیم می‌شوند. گازهای ضعیف یونیزه‌شده، نوعی پلاسما هستند که دارای پتانسیل بالا برای بهینه‌سازی جریان هوا در پرواز فراصوت[۱۴] می‌باشند. سطح رسانایی این نوع پلاسما پایین است، اما تا حد زیادی می‌تواند ویژگی‌های جریان هوای فراصوت را تحت تأثیر قرار دهد. خواص گازهای ضعیف یونیزه‌شده آنها را به موضوع جالبی برای تحقیق و پژوهش دربارهٔ برنامه‌های کاربردی نیروی محرکه و ائرودینامیکی تبدیل کرده است [۸].

بیشتر گازها در دمای بیش از ۲۰۰۰۰ کلوین و در شرایط تعادل کاملاً یونیزه می‌شوند. گازهای خاص را می‌توان در دمای پایین‌تر و البته شرایط غیرتعادلی مانند فشار پائین، به‌طور کامل یونیزه کرد. برعکس، یک گاز ممکن است در دماهای بسیار پایین‌تر بطور ناقص یونیزه شده باشد [۹]. با افزایش دمای گاز، میزان حرکت مولکول‌ها، اتم‌ها، یون‌ها، و الکترون‌ها در گاز نیز افزایش یافته و در نتیجه برخورد بین این ذرات نیز زیاد می‌شود. فرکانس و فراوانی این برخوردها نشان می‌دهد که آیا یک گاز به‌طور کامل یونیزه شده و یا جزئی یونیزه شده است. وقتی فرکانس متوسط برخورد یون‌ها در یک گاز بسیار بزرگتر از فرکانس متوسط برخورد اتم‌های خنثی باشد؛ یعنی کاملاً یونیزه شده است. برعکس، اگر فرکانس متوسط برخورد یون‌ها بسیار کوچکتر از فرکانس متوسط برخورد اتم‌های خنثی باشد؛ یعنی به‌طور ضعیف و جزئی یونیزه شده است [۹].

مزیت گازهای ضعیف یونیزه‌شده، آسان‌بودن نگه‌داری آنهاست؛ چون در دماهای پایین‌تر از گازهای کاملاً یونیزه‌شده می‌توانند پایدار بمانند. این موضوع به‌علت پایین بودن نسبی دماها (کمتر از ۲۲۰۰ کلوین) برای دستکاری جریان در یک سیستم پیشرانش هوایی جالب است در حالی‌که گازهای کاملاً یونیزه‌شده تحمل چنین حالتی را ندارند. استفاده از فرایندهای ام. اچ. دی. برای تبدیل انرژی مستلزم آن است که جریان سیال عامل در آن فرایندها، رسانایی الکتریکی کافی (حداقل به‌صورت محلی) را داشته باشد. یونیزاسیون جریان سیال عامل در موتورهای شیمیایی، تحت شرایط عملکرد عادی، بعید است؛ چون دمای هوای ورودی و محصولات احتراق، برای یونیزاسیون مفید و قابل اندازه‌گیری بیش از حد کوچک می‌باشد.

۲-۴. ساخت پلاسما

پلاسما را می‌توان با یکی از روش‌های زیر تولید کرد:

۱. یونیزه‌کردن گاز معمولی بر اثر تخلیه الکتریکی. هر اتم گاز از هسته با بار مثبت تشکیل شده است که ابری از الکترون‌ها با بار منفی آن را احاطه کرده‌اند. بار الکتریکی خالص اتم صفر است. وقتی میدان الکتریکی به گاز اعمال شود، تعدادی از الکترون‌ها از اتم‌ها کنده می‌شوند. هر اتمی که این عمل برای آن رخ دهد به‌صورت یون مثبت درمی‌آید. الکترون‌های کنده شده، که بارشان منفی است، آزادانه در محیط حرکت می‌کنند. در طبیعت، پلاسما بدین طریق در تیرهای آذرخش به‌وجود می‌آید.

۲. گرم‌کردن یک گاز تا دماهای بسیار زیاد. پلاسما در فرایندی به نام یونیزاسیون حرارتی تولید می‌شود که در آن دمای گاز فوق‌العاده بالا می‌رود. با افزایش دمای گاز، انرژی همهٔ ذرات آن زیاد می‌شود. ذره‌های داغ به هر سو می‌روند و با هم برخورد می‌کنند. اگر بتوان دما را به اندازهٔ کافی بالا برد، برخورد الکترون‌ها به اندازه‌ای شدید خواهد بود که سبب کنده‌شدن الکترون‌ها از هسته‌های اتم می‌شود و حالت یونش کامل را به‌وجود می‌آورد. دمای لازم برای رسیدن به این نوع یونش گازی را برحسب هزاران درجهٔ سلسیوس اندازه می‌گیرند. دمای گاز را می‌توان با بذردار کردن آن با یک فلز قلیایی، مانند نیترات پتاسیم، به‌طور قابل توجهی‌کاهش داد. این فلز قلیایی در دمای پایین‌تر به آسانی یونیزه می‌شود. در این مدل، گاز به‌طور پیوسته با نیترات پتاسیم بذردار شده و گازی با رسانایی الکتریکی در دماهای پایین‌تر تولید می‌شود. به‌عنوان مثال، یونش حرارتی گازها معمولاً در حوالی ۴۰۰۰ کلوین یا بیشتر رخ می‌دهد. در حالی‌که هوای بذردار در ۲۵۰۰ کلوین و آرگون بذردار در دمای ۲۰۰۰ درجه کلوین به حد کافی رسانا می‌شوند.

۳. استفاده از لیزر. اولین مسئلهٔ تولید پلاسما، یافتن راهی است که مقدار بسیار زیادی انرژی به ماده داده شود. به‌کمک لیزر می‌توان مقدار بسیار زیادی انرژی را در حجم بسیار کوچکی متمرکز کرد. ماده‌ای که باید گرم شود، به‌صورت ساچمه درآورده می‌شود، سپس آن را داخل اتاقکی می‌اندازند. از این طریق مقدار بسیار زیادی انرژی به ساچمه داده می‌شود. این انرژی به سرعت، ساچمه را

تبخیر می‌کند و در مدت زمان بسیار کوتاهی، پلاسمایی بسیار داغ و بسیار چگال تشکیل می‌شود. از این راه دماهای بالاتر از یک میلیون کلوین نیز تولید می‌شود.

۱-۲-٤. بار پسماند

همان‌گونه که گفته شد، یکی از روش‌های باردار کردن، یونیزاسیون حرارتی می‌باشد. در این روش، هر دمایی یک تعادل یونیزاسیون دارد که در آن نرخ یونیزه کردن برابر نرخ الکترون‌گیری یون‌ها می‌باشد. نرخ یونیزاسیون، زمانی به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد که انرژی مخصوص ۱۰ برابر انرژی یونیزاسیون باشد، اما با افزایش دما نرخ یونیزاسیون کاهش می‌یابد. بنابراین تجمع یون‌ها با افزایش دما رفته‌رفته افزایش می‌یابد. بنابراین وقتی نرخ یونیزاسیون و نرخ جفت‌گیری یون‌ها و الکترون‌ها، یکی نباشد، مقداری بار درسیال باقی می‌ماند که به بار پسماند معروف هستند [۱۰].

۵. ابررساناها

برای پی‌بردن به دلیل رسانش می‌توان ساختمان مواد رسانا را مورد توجه قرار داد. از جمله مواد رسانای بسیار معروف فلزات هستند. ویژگی عمدهٔ فلزات از نظر خصوصیت الکتریکی این است که این مواد دارای الکترون آزاد هستند. این الکترون‌ها را اصطلاحاً حاملین بار می‌گویند. وقتی اتم‌های منزوی برای تشکیل جسم جامد فلزی با هم ترکیب می‌شوند، الکترون‌های لایهٔ خارجی اتم، مقید به اتم‌های منفرد باقی نمی‌مانند، بلکه آزادانه در سرتاسر حجم جسم جامد حرکت می‌کنند. زمانی‌که در جسمی جابه‌جایی بارالکتریکی صورت می‌گیرد، می‌گویند از جسم جریان الکتریکی می‌گذرد. بنابراین اگر فلزی را در مسیر جریان الکتریکی قرار دهیم، این جریان توسط الکترون‌های آزاد منتقل می‌شود و از اینرو خاصیت رسانایی بیشتر متوجه حاملین بار و سرعت آنهاست. با توجه به تبدیل مستقیم انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی، ژنراتورهای ام. اچ. دی. بازدهی بیشتری دارند. تلفات انرژی از حرارتی به مکانیکی و سپس به الکتریکی به‌شدت کاهش می‌یابد. بنابراین، این ژنراتورها اهمیت قابل توجهی داشته و پتانسیل استفاده برای تولید انرژی الکتریکی بیشتر با بازدهی بزرگتر را دارند. می‌توان امیدوار بود با پیشرفت علم خوردگی و آهن‌رباهای ابررسانا، امکان تجاری‌سازی ژنراتور ام. اچ. دی. فراهم شود. با توجه به استفادهٔ بسیار بهتر سوخت در این حالت، چشم‌انداز خوبی از صرفه‌جویی میلیاردها دلار در مصرف سوخت وجو دارد. انتظار می‌رود تا پایان سال ۲۰۲۰ م، بازدهی هزینهٔ تولید برق با روش ام. اچ. دی. حل شود، در غیر این‌صورت، این روش فقط در حد مقالات و اقدامات اولیه باقی خواهد ماند.

از جمله بهترین گزینه‌ها برای کاهشه زمینه، کشف موادی است که مقاومت کمتری دارند. اما در برخی از مواد وقتی که به یک دمای خاص برسیم، تغییری در حالت ماده به‌وجود می‌آید که به آن ابررسانایی می‌گویند. در این حالت مقاومت الکتریکی از بین می‌رود، به‌طوری‌که جریانی که در یک حلقه ابررسانا تولید می‌شود تا صد هزار سال بدون تغییر باقی می‌ماند. خاصیت ابررسانایی به سه عامل دما، شدت جریان عبوری و میدان مغناطیسی وابسته است. آهن‌رباهای مورد استفاده می‌تواند الکترومغناطیسی یا ابررسانا باشد. آهن‌رباهای ابررسانا در ژنراتورهای ام. اچ. دی. بزرگتر، برای از بین بردن تلفات پارازیتی بزرگ استفاده می‌شوند. این ژنراتور به‌گونه‌ای ساخته شده است که در دمای بسیار بالا و بدون قطعات متحرک، عمل کند. چون دمای پلاسما بالا، به‌طور معمول بیش از ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، کانال حاوی پلاسما باید از مواد نارسانا ساخته شود تا قادر به تحمل این دمای بالا باشد. الکترودها علاوه بر مقاومت در برابر حرارت، رسانا باشند. به‌دلیل دماهای بالا، برای به تأخیر انداختن اکسیداسیون، دیواره‌های نارسانای کانال باید از یک مادهٔ بسیار مقاوم در برابر حرارت مانند اکسید ایتریوم و یا دی اکسید زیرکونیوم[۱۵] ساخته شوند.

۱-۵. اثر مایسنر

وقتی یک ابررسانا در یک میدان مغناطیسی ضعیف خارجی قرار می‌گیرد، میدان فقط به مقدار ناچیز در داخل ابررسانا نفوذ می‌کند که به آن عمق نفوذ لندن[۱۶] می‌گویندکه با گذشت زمان این مقدار به صفر می‌رسد. به این پدیده اثر مایسنر می‌گویند. همین پدیده ابررساناها را به دو نوع تقسیم می‌کند:

نوع ۱: در ابررساناهای نوع ۱ اگر میدان مغناطیسی از یک حد آستانه بیشتر شود، ابرسانایی ناگهان از بین می‌رود. بسته به شکل هندسی نمونه، ممکن است حالت‌های میانی هم ایجاد شوند که در آن ناحیه‌های عادی (که در آنها میدان وجود دارد) و ناحیه‌های ابرسانا (که میدان درون‌شان صفر است) همزمان وجود داشته باشند.

نوع ۲: در ابررساناهای نوع ۲ اگر میدان مغناطیسی از حد بیشتر شود، حالت مخلوطی ایجاد می‌شود که در آن شار مغناطیسی روبه افزایشی از ماده می‌گذرد، اما مقاومت ماده، اگر جریان خیلی زیاد نباشد، همچنان صفر باقی می‌ماند. در حد دوم از میدان مغناطیسی ابررسانایی از بین می‌رود. بیشتر ابررساناهایی که عنصر ساده هستند (به‌جز نیوبیوم، تکنسیوم، وانادیوم و نانولوله‌های کربنی) نوع ۱ هستند، و تقریباً همهٔ ابررساناهای ناخالص و ترکیبی نوع ۲ هستند. ابررساناهای نوع ۱، در مجاورت با میدان مغناطیسی خارجی، میدان را دفع می‌کنند. در حالی‌که در ابررساناهای نوع ۲، دیده می‌شود که آنها بار میدان مغناطیسی خارجی را از خود عبور می‌دهند و آنها را دفع نمی‌کنند. سیم‌پیچ‌های بزرگ ابررسانا، که از مواد ابررسانای متعارف مانند آلیاژ نیوبیوم تیتانیوم ساخته شده‌اند، برای تولید میدان‌های مغناطیسی بسیار قوی مناسب و قابل استفاده است.

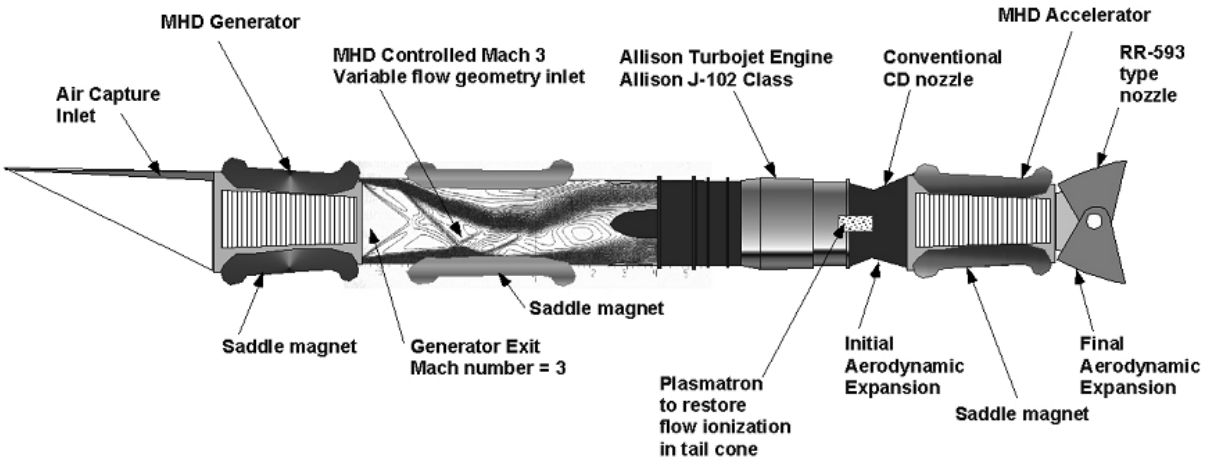
۷. تلاش‌های عملی استفاده از ام. اچ. دی.

نخستین تلاش شناخته‌شده برای توسعهٔ ژنراتور ام. اچ. دی. در حدود سال ۱۹۳۸ م در آزمایشگاه تحقیقاتی وستینگهاوس[۱۷] ایالات متحدهٔ امریکا انجام شد. اولین نیروگاه بخار - ام. اچ. دی.؛ یعنی واحد عملیاتی ۷۵ مگاواتی U-25 در اوائل دههٔ ۱۹۷۰ در اتحاد جماهیر شوروی سابق به بهره‌برداری رسید، که ۲۵ مگاوات آن با استفاده از تجهیزات ام. اچ. دی. تولید می‌شد که پیشرفت ثمربخشی بود. این کارخانه آزمایشی برای نخستین‌بار در تیروچیراپالی[۱۸] توسط بارک[۱۹] راه‌اندازی شد. برنامهٔ پنج‌ساله در فوریهٔ ۱۹۷۵ که شامل ۲۲ حوزهٔ علوم کاربردی و فناوری در ارتباط با تولید انرژی ام. اچ. دی. بود به امضاء رسید. برنامه‌های ژاپن در اواخر دههٔ ۱۹۸۰ متمرکز بر ام. اچ. دی. چرخه بسته بود. در سال ۱۹۸۶ م، هوگو کارل مسرل[۲۰]، استاد دانشگاه سیدنی، روی ام. اچ. دی. با سوخت زغال سنگ تحقیق کرد.

برای کنترل پرواز، تجهیزات ناوبری، به‌علاوه دستگاه‌های کنترل جریان ائرودینامیکی با استفاده از رسوب انرژی (مانند فعال‌کننده‌های[۲۱] پلاسمای سرد[۲۲] یا شتاب‌دهندهٔ ام. اچ. دی.)، برق باید داخل هواپیما تولید شود. در هواپیماهای نظامی، همچنین، ممکن است نیاز به تولید برق برای تغذیهٔ سلاح انرژی مانند لیزر کلاس مگاوات یا پرتو مایکروویو باشد.

هنگامی‌که موتور مورد استفاده در هواپیما، رم‌جت و یا اسکرم‌جت[۲۳] باشد تولید مؤثر قدرت برق داخل هواپیما به‌خصوص در سرعت‌های فراصوت، دشواری ویژه‌ای دارد. در واقع، رم جت‌ها و اسکرم‌جت‌ها با نبود کمپرسور مکانیکی و محور دوار مرتبط با آن مشخص می‌شوند. نبود ماشین‌آلات چرخشی، تولید برق با استفاده از یک ژنراتور معمولی را مشکل ساز می‌کند. یکی از جایگزین‌ها، که به‌تازگی توجه زیادی را به‌خود جلب کرده، ژنراتور ام. اچ. دی. است. ژنراتور ام. اچ. دی. با استخراج انرژی از جریان هوا به‌واسطهٔ نیروی لورنتز تولید قدرت می‌کند. چون در حال حاضر تنها در صورتی جریان، توان جریان‌یافتن دارد که هوا به‌طور قابل توجهی یونیزه شده باشد و چون دمای هوا در اطراف هواپیما یا در داخل موتور برای ایجاد خود یونیزاسیونی به اندازهٔ کافی بالا نیست، یکی از مشکلات

اصلی در ارتباط با ژنراتور ام. اچ. دی. چگونگی یونیزه‌کردن مؤثر هوا می‌باشد. از جمله روش‌هایی که می‌توان هوا را یونیزه کرد، اختلاط آن با یک دانه (مانند سزیم و یا پتاسیم) می‌باشد. یک جایگزین برای دانه‌های قلیایی به‌عنوان وسیله‌ای برای یونیزه‌کردن جریان، پرتوهای الکترون می‌باشد. مطالعات اولیه نشان می‌دهد که پرتوهای الکترونی می‌توانند یک ضریب رسانایی حرارتی بالاتر از آنچه با بذر قلیایی به‌دست آمده، تولید کنند. به‌علاوه، چون به هیچ جرم اضافی برای تزریق در جریان هوا نیاز وجود ندارد، ژنراتور ام. اچ. دی. با پرتو الکترونی یونیزه‌شده را می‌توان در حالت پیوسته و در سراسر پرواز برای تولید برق مورد نیاز برای فعال‌کردن کنترل‌کننده‌های پرواز و ابزارآلات داخل وسیلهٔ پروازی استفاده کرد [۱۱]. وسائل نقلیهٔ هوایی مانند شاتل فضایی، هم سوخت و هم اکسیدکننده را با خود حمل می‌کنند. اگر یک اکسیدکنندهٔ قوی خارجی (مانند جو زمین) استفاده شود، نیاز به حمل اکسیدکننده روی وسیله حذف می‌شود و وسائل نقلیهٔ پرتاب آینده، با کسری از کل مصرف سوخت، می‌توانند بار بزرگتری در مدار حمل کنند. عدم نیاز به حمل یک اکسیدکننده روی وسیلهٔ نقلیه، منجر به کاهش وزن کلی وسیله در جهش اولیه هنگام پرتاب[۲۴] و در نتیجه کاهش جرم کلی مولد نیروی محرکه مورد نیاز و همچنین، کاهش هزینهٔ حمل محموله‌های خاص در مدار یا دورتر از آن می‌شود. یکی از مولدهای نیروی محرکه در حال کاوش، ژنراتور ام. اچ. دی. با انرژی کنارگذر می‌باشد (شکل ۵) که با یک توربوجت یا توربوفن در دسترس، کوپل شده است [۱۲]. پیش‌بینی می‌شود که این موتور، در یک مسیر جریان تکی، بدون حالت گذرا، در برخاست بتواند به ماخ ۷ دست پیدا کند.



شکل ۵. تعمیم محدودهٔ عملکرد موتور جت تا ماخ ۷

۸. مروری بر فعالیت‌های انجام‌شده

خلیلی و جعفریان جریان هیدرودینامیک مغناطیسی فروصوت در ژنراتور ام. اچ. دی. را شبیه‌سازی کرده و اثر آن را بر بازده و توان الکتریکی سیکل ترکیبی سه گانه بررسی کردند [۱۳]. آنها کانال فارادی دوبعدی مقطع ثابت را با الکترودهای گسسته به‌عنوان ژنراتور ام. اچ. دی. در نظر گرفتند و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، جریان هیدرودینامیک مغناطیسی ایده‌آل با عدد رینولدز مغناطیسی پایین را شبیه‌سازی کردند. سیکل ترکیبی سه‌گانهٔ پیشنهادی آنها شامل سیکل باز ژنراتور ام. اچ. دی. به‌عنوان مولد بالادستی، سیکل توربین گاز به‌عنوان سیکل میانی و چرخهٔ توربین بخار به‌عنوان سیکل پایین دستی بود. آنها همچنین با نرم‌افزار متلب یک کد برای روابط

ترمودینامیکی حاکم بر سیکل ترکیبی سه‌گانه نوشته و عملکرد سیکل بر پایه ژنراتور ام. اچ. دی. را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج آنها نشان داد که برای ژنراتور ام. اچ. دی. مقطع ثابت فروصوت، حالت بهینه در ماخ ۰/۳ تا ۰/۴در شدت میدان مغناطیسی ۴ تا ۶ تسلا اتفاق می‌افتد؛ و نسبت استخراج آنتالپی آن نیز در ماخ ۰/۳ و شدت میدان مغناطیسی ۶ تسلا به ۲۲/۳۱۲ درصد می‌رسد که بازده سیکل ترکیبی سه‌گانه را به ۵۹/۶۳ درصد می‌رساند.

موراکامی و همکاران رفتار پلاسما و عملکرد یک ژنراتور ام. اچ. دی. را بررسی کردند [۱۴]. آنها از یک ژنراتور دیسکی شکل با جریان شعاعی و دارای واگرایی کوچک استفاده کردند. آنها در این مطالعه، از هلیم و آرگون دانه‌دار شده با سزیم استفاده کرده و نتایج آنها را با هم مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که عملکرد مناسب هلیم - سزیم، پارامتر هال را دو برابر (یعنی ۳/۷) می‌کند. اما در مقایسه با ژنراتور آرگون – سزیم، رسانایی الکتریکی را به یک‌چهارم کاهش می‌دهد. دمای الکترون پلاسمای هلیم - سزیم، در محدوده گسترده‌ای از کسر دانه، بیش از ۴۰۰۰ کلوین نمی‌شود، که نشان می‌دهد پلاسما به طور کامل یونیزه شده است. آیتال استخراج بهینهٔ برق در یک ژنراتور ام. اچ. دی. با عرض کانال ثابت، میدان مغناطیسی یکنواخت و رسانایی الکتریکی ثابت را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و با اتصال یک حل‌کنندهٔ جریان اویلر به یک کد بهینه‌سازی شده، عبارات پیشنهاد شده توسط نئورینگر[۲۵] را به‌صورت عددی، استخراج کرد [۱۵]. وی برای این منظور، ژنراتوری با هندسه، میدان مغناطیسی و رسانایی الکتریکی دلخواه را در نظر گرفته و تحلیل نئورینگر را برای پیش‌بینی متغیرهای دینامیکی سیال، استخراج کرده و نیروی بهینه و افت ولتاژ در بار[۲۶] خارجی مطابق با نیروی بهینه استخراج شده را مورد استفاده قرار داد. نتایج نشان داد که در یک کانال یکنواخت ام. اچ. دی. با رسانایی ثابت، بیشتر نیروی تحویل شده به بار خارجی، در نزدیکی پایانه‌ها اتفاق می‌افتد. او با استفاده از این روش نشان داد که با یک توزیع رسانایی الکتریکی متفاوت می‌توان توزیع چگالی نیروی محوری یکنواخت‌تری به‌دست آورد. بنابراین، تحلیل پیشگفته، ابزار مفیدی در طراحی و تجزیه و تحلیل ژنراتورهای ام. اچ. دی. می‌باشد.

تورو تاکاهاشی و همکاران عملکرد تعدادی ژنراتور ام. اچ. دی. سه‌بعدی در مقیاس کوچک را به‌صورت عددی، بررسی و با هم مقایسه کردند [۱۶]. این ژنراتورها شامل دیوارهٔ قطری رسانا[۲۷]، دیوارهٔ قطری عایق[۲۸]، دیوارهٔ هال رسانا[۲۹]، دیوارهٔ هال عایق[۳۰] و ژنراتور فارادی با حالات مختلف الکترودها و سیستم‌های اتصال بار بودند. این ژنراتورها به‌وسیلهٔ موتور اسکرم جت رانده می‌شدند. نتایج آنها نشان داد که حداکثر توان خروجی در ژنراتور DCW به‌دست می‌آید. الکترودهای سمت دیواره‌ها در ژنراتورهای DCW و HCW در مقایسه با ژنراتورهای DIW و HIW، تلفات ولتاژ الکترود را کاهش می‌دهند. قدرت خروجی استخراج‌شده به‌وسیلهٔ ژنراتورهای فارادی و DCW با هم قابل مقایسه هستند. با این‌حال، ژنراتور فارادی، نیاز به یک بار و یک اینورتر برای هر جفت الکترود، دارد، به‌طوری‌که پیچیدگی مدارهای خارجی و افزایش هزینه، ممکن است سبب ایجاد مشکل شود. بنابراین آنها نتیجه گرفتند که ژنراتور DCW برای آزمایش موتور اسکرم‌جت که با ژنراتور های ام. اچ. دی. رانده می‌شود، مناسب می‌باشد. هوانگ و همکاران جریان سه‌بعدی کاملاً توسعه‌یافته در ژنراتور ام. اچ. دی. را به‌صورت عددی شبیه‌سازی کردند که این ژنراتور با یک مدار مقاومت بیرونی کوپل شده بود [۱۷]. آنها به‌جای فرض ژنراتور ام. اچ. دی. به‌عنوان یک منبع ولتاژ ثابت یا منبع جریان ثابت، از یک روش تکراری ساده و مؤثر استفاده کردند و با موفقیت، تعامل بین ژنراتور و مدار بیرونی را به‌گونه‌ای شبیه‌سازی کردند که با دقت کافی تعیین‌شده توسط کاربر، از قانون اهم و قانون کیرشهف تبعیت کند. هدف آنها ارائه دانشی جامع از ویژگی‌های ژنراتورهای ام. اچ. دی. با محیط تراکم‌ناپذیر شامل واریانس‌ها و اختلافات فضایی

سرعت و متغیرهای الکترومغناطیسی بود. آنها در محاسبات، دو پارامتر بدون‌بعد مهم؛ یعنی عدد رینولدز و عدد هارتمن را با دقت بررسی کردند که تحت تأثیر سرعت و متغیرهای الکترومغناطیسی هستند. به‌طور کلی، عدد هارتمن، متناسب با میدان مغناطیسی اعمال‌شده بوده و روی متغیرهای مورد مطالعه، آثار منفی دارد، اما عدد رینولدز مطابق با فشار رانده‌شده بوده و آثار متضادی دارد. این دو پارامتر، همچنین روی نتایج معادلات تحت شرایط مرزی ویژه اثر گذاشته و پلی بین متغیرهای بدون‌بعد و بابعد هستند که تفسیرهای فیزیکی واقعی دارند.

۹. نتیجه‌گیری

امروزه تولید برق با تلفات بسیاری همراه است. حتی در نیروگاه‌های گازی مدرن هم بین ۳۵ تا ۴۰ درصد انرژی تولیدشده توسط گاز به‌صورت حرارت و گرما به محیط زیست منتقل و هدر می‌رود. باوجود پیچیدگی، با تحقیقات در حال پیشرفت درباره ژنراتورهای ام. اچ. دی.، در آینده ساخت دستگاه‌هایی برای استفاده در سطح تجاری امکان‌پذیر خواهد شد. چون این ژنراتورها، هیچ قطعهٔ متحرکی ندارند، بنابراین افت انرژی کاهش می‌یابد. همچنین شوک و لرزش ناشی از قطعات متحرک ایجاد نمی‌گردد که این امر باعث می‌شود تا تعمیرات، نگه‌داری و سرویس ژنراتور ام. اچ. دی. در مقایسه با سایر سیستم‌های تولید برق بسیار کم‌هزینه باشد. چون رسانایی پلاسما بسیار بالاست، بعد از اینکه گاز پلاسما از ژنراتور ام. اچ. دی. عبور می‌کند، هنوز به‌حد کافی داغ است که آب را برای راندن توربین بخار جهت تولید برق اضافی، بجوشاند. ژنراتورهای معمولی با سوخت زغال سنگ، حداکثر به بازده ۳۵ درصد می‌رسند. ژنراتورهای ام. اچ. دی. پتانسیل رسیدن به بازده ۵۰ تا ۶۰ درصد را دارند. این بازده بالاتر، به‌علت گردش دوباره انرژی گاز پلاسمای داغ در توربین‌های استاندارد بخار می‌باشد. باوجود مزایای زیاد ژنراتورهای ام. اچ .دی.، هنوز مشکلات و چالش‌هایی برای تجاری‌سازی آنها وجود دارد که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود.

۱. وجود جریان معکوس (اتصال کوتاه) الکترون‌ها در سرتاسر سیال رسانا در نزدیکی دور دست‌ترین نواحی میدان مغناطیسی

۲. نیاز به آهن‌رباهای بسیار بزرگ که هزینه بزرگی دارد.

۳. دماهای کار بالا: با توجه به قرارگرفتن سطح فلز در معرض گرمای شدید ژنراتور ممکن است مشکلات بیشتر شده و موجب خوردگی فلزات و الکترودها شود.

۴. استفاده از سیم‌پیچ‌های ابررسانا برای تولید میدان مغناطیسی خارجی.

۵. به‌دلیل پیچیدگی‌های فنی که مواد بتوانند دمای بالا را تحمل کنند و روش‌های یونیزاسیون، این ژنراتور را خارج از استفاده تجاری نگه داشته‌اند.

۶. ژنراتورهای ام. اچ. دی. تنها هنگامی بازده خوبی خواهند داشت که حجم‌شان از حد خاصی بیشتر باشد. چون بهترین رسانایی ویژه‌ای که می‌توان از گاز انتظار داشت، پنج مرتبه از رسانایی ویژه مس کمتر است، حجم پلاسمای ژنراتور ام. اچ. دی. باید بسیار بزرگتر از حجم قطعات متحرک ژنراتورهای متداول باشد. در نتیجه میدان مغناطیسی هم باید در حجم بزرگتری ایجاد شود، این کار معمولاً مشکل است.

۱۰. مآخذ

[1] Jeffrey, S.G. "Small Thermoelectric Generators." *The Electrochemical Society Interface (The Electrochemical Society)* 1754, 2008,

[2] Kayukavou, N. "open-cycle magnetohydro- dynamic electrical power generation: a review." 2004.

[3] Khartchenco, N.V., *Advanced energy systems*, Taylor & Francis. 1997.

[4] Yiwen, L.I., LI. Yinghong, L.U. Haoyu, Z. Tao, Z. Bailing, C. Feng, Z. Xiaohu. "Preliminary Experimental Investigation on MHD Power Generation Using Seeded Supersonic Argon Flow as Working Fluid." *Chinese Journal of Aeronautics* 24 (2011), pp. 701-708.

[۵] علیزاده پهلوانی، محمدرضا. "بررسی ساختار تولید انرژی الکتریکی به روش مگنتو هیدرودینامیک وفرصت ها و تنگناهای پیشروی آن"، *چهارمین کنفرانس نیروگاه‌های برق*، پژهشگاه نیرو، بهمن ۱۳۹۰.

[۶] رجبی، علیرضا، رضا صداقتی، عظیم نوبخت. "فناوری تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی جنبشی پلاسما"، *کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در مهندسی*، ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اسفند ۱۳۹۱.

[۷] سید مسعود، مقدس تفرشی، *منابع تولید انرژی الکتریکی در قرن بیست‌ویکم*، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ دوم، ۱۳۸۶.

[8] Macheret, S.O. "Introduction: Weakly Ionized Plasmas for Propulsion Applications." *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 5, September-October 2008.

[9] Mitchner, M., C.H. Kruger, Jr., *Partially Ionized Gases*, John Wiley & Sons, 1973.

[10] Pinus, R. "Development of an inductive magnetohydrodynamic generator." 2nd edition, 2009.

[11] Parent, B. "Weakly-ionized Air Flow Lab." Dept. of Aerospace Engineering, Pusan National University.

[12] Benyo, T.L.,"Analtyical and computational investigations of a magneto hydrodynamics (MHD) energy-bypass system for supersonic gas turbine engines to enable hypersonic flight." A dissertation submitted to Kent State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, August, 2013.

[۱۳] خلیلی، صوفیا، علی جعفریان. "شبیه‌سازی عددی جریان در ژنراتور هیدرودینامیک مغناطیسی و بررسی اثر آن بر تولید همزمان حرارت و توان الکتریکی در سیکل ترکیبی سه گانه"، سومین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، اسفند ۱۳۹۲.

[14] Murakami, T., H. Yamasaki. "Plasma-Fluid Behavior of a Less Divergent Disk Magneto hydrodynamic Generator Using Helium–Cesium." IEEE transactions on plasma science, Vol. 32, No. 4, 2004, pp. 1752-1759.

[15] Aithal, S.M. "Analysis of optimum power extraction in a MHD generator with spatially varying electrical conductivity." *Int. Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, Issue 8, 2008, pp. 1107-1112.

[16] Takahashi, T. ,T. Fujino, M. Ishikawa. "Comparison of Generator Performance of Small-Scale MHD Generators with Different Electrode Dispositions and Load Connection Systems." *Journal of International Council on Electrical Engineering* Vol. 4, No.3, 2014, pp.192-198.

[17] Huang, Z.Y., Y.J. Liu, Z.Y. Wang, J. Cai. "Three-dimensional simulations of MHD generator coupling with outer resistance circuit." *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 54, May 2015, pp. 1-18.

پی‌نوشت

1. photoelectric
2. Thermoelectric
3. Thermionic
4. Fuel cell
5. MagnetoHydroDynamics-MHD
6. advection
7. diffusion
8. advected
9. Plasma
۱۰. hall effect
۱۱. Edwin Hall
12. Working fluid-potassium seed combustion product
13. Working fluid-cesium seeded helium
14. hypersonic
15. yttrium oxide or zirconium dioxide
16. London penetration depth
17. Westing House
18. Tiruchirapalli
19. BARC
20. Hugo Karl Messerle
21. actuators
22. Dielectric Barrier Discharge-DBD
23. scramjet (supersonic combusting ramjet)
24. Lift off
25. Neuringer
26. Load
27. Diagonal Conducting Wall-DCW
28. Diagonal Insulating Wall-DIW
29. Hall Conducting Wall-HCW
30. Hall Insulating Wall-HIW