مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۷، شماره ۱۱۹، صفحات ۵۷–۶۷

مولدهای الکتریکی مگنتوهیدرودینامیک و کاربرد آنها در صنایع هوافضا

احمد قنبری مطلق[۱]، سهیلا عبدالهی‌پور[۲]، سید آرش سید شمس طالقانی[۳ و *]

[۱] دانشجوی کارشناسی‌ارشد هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران
[۲] دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران
[۳] استادیار پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوی، تهران
*مسئول مکاتبات: taleghani@ari.ac.ir

◄ چکیده

مولدهای جریان الکتریکی مگنتوهیدرودینامیک (MHD) با اعمال میدان مغناطیسی بر ذره رسانای شتابدار، توان الکتریکی تولید می‌کنند. این دسته از مولدها، از یک سیال رسانا مانند پلاسما یا فلز مایع، به عنوان سیال عامل استفاده می‌کنند. در این مقاله ابتدا به معرفی روش‌های تولید پلاسما و یونیزاسیون پرداخته و سپس مکانیزم عملکرد مولدهای MHD توضیح داده شده است. در ادامه به معرفی دسته بندی‌های مختلف این نوع از مولدها براساس ساختار و سیال عامل پرداخته شده است. اما یکی از مهمترین دغدغه‌های مهندسان صنعت هوافضا طراحی دستگاه‌هایی با حداقل وزن است. مولدهای MHD بدون نیاز به قطعات صلب متحرک با وزن زیاد، قادر به تولید توان بالای الکتریکی هستند. در صنعت هوافضا از این مولدها می‌توان در پروازهای ماوراء صوت، موتور موشک، پروازهای بازگشت به جو و همچنین به عنوان منبع تامین توان الکتریکی پرتاب کننده‌های ریل الکترومغناطیسی استفاده کرد.

◄ واژگان کلیدی

مگنتوهیدرودینامیک
مولد الکتریکی
نیروی لورنتس

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۸/۰۹
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۵/۱۵

۱ مقدمه

نظریه MHD[۱] یک نظریه شاره‌ای است که به توصیف رفتار پلاسما یا به طور کلی هر سیال هادی الکتریکی در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌پردازد و این رفتار را بر حسب پارامترهای ماکروسکوپی نظیر چگالی، فشار، دما و سرعت گزارش می‌دهد. اصطلاح MHD نخستین بار توسط هانس آلفن به کار برده شد. وی به عنوان پیشگام این علم یک تقریب ریاضی برای محاسبه حرکت ذره باردار در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ارائه داد. آلفن بخاطر تلاش‌های ارزشمندش در زمینه گسترش فیزیک پلاسما، جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۷۰ دریافت کرد [۱]. یکی از روش‌های متداول تولید توان الکتریکی در مولدهای الکتریکی دینامیکی عبور یک جسم رسانا مانند سیم مسی در مقابل میدان مغناطیسی است؛ که باعث القای جریان الکتریکی در سیم می‌شود. با تکیه بر این پدیده فیزیکی، با استفاده از روش MHD توان الکتریکی تولید می‌شود. یک مولد MHD با اعمال میدان مغناطیسی بر یک ذره باردار متحرک، به طور مستقیم انرژی جنبشی آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند [۲]. ایده تولید توان الکتریکی به روش MHD اولین بار توسط فارادی مطرح شد. حداقل الزامات تولید انرژی توسط این روش آن است که سیال عامل، رسانا بوده و با تعداد لازم از الکترون‌های آزاد قابلیت هدایت الکتریکی مناسبی را داشته باشد. بسیاری از تلاش‌های تولید توان الکتریکی از طریق این نوع مولدها، در نیمه اول قرن بیستم انجام گرفت. اما از سال ۱۹۶۰ سیر تکاملی سیستم‌های این دسته از مولدهای الکتریکی آغاز شد [۳]. گرچه مشکلات تکنیکی و هزینه‌های زیاد، مانع از گسترش و تجاری سازی فناوری آنها شد [۲]. نیروگاه‌های مگنتوهیدرودینامیکی، امکان بالقوه تولید برق در مقیاس بزرگ را ارائه می‌دهند. ضمن آنکه در استفاده از این روش تاثیرات مخرب بر محیط زیست کاسته می‌شود. از طرف دیگر به کارگیری مولد MHD در یک سیکل ترکیبی با مولد دینامیکی می‌تواند به طور قابل توجهی بازده نیروگاه‌های تولید توان سوخت فسیلی را افزایش دهد [۴]. خروجی مولدهای MHD معمولا به صورت DC می‌باشد، لذا این نوع مولدها برای مصرف کننده‌های DC بسیار مناسب می‌باشند.

به دلیل نوع الزامات تعریف شده در پروژه‌های هوافضایی این دسته از مولدها توجه مهندسان هوافضا را نیز به خود معطوف کرده‌اند. به عنوان مثال جرم یک ابزار مصرفی در صنایع هوافضا بسیار حائز اهمیت است. از طرفی یکی از مهمترین مزایای مولدهای MHD نسبت به مولدهای دینامیکی، تولید توان الکتریکی بدون نیاز به قطعات صلب متحرک می‌باشد [۵]. این امر می‌تواند به نوبه خود سهم بسزایی در کاهش جرم وسایل حمل و نقل هوافضایی داشته باشد. یک چالش مهم در استفاده از روش MHD، دمای کاری بسیار بالای آن است. این موضوع باعث کاهش طول عمر عملیاتی قطعات و ایجاد محدودیت در استفاده از این روش می‌شود؛ اما از طرفی برای بسیاری از راکت‌های فضایی عمر عملیاتی کوتاه، بدون نیاز به استفاده مجدد از راکت تعریف می‌شود. بنابراین محدودیت استفاده از مولد MHD یا به طور کلی هر ابزاری مبتنی بر علم MHD در این گونه از ماموریت‌ها کمتر می‌باشد. لذا در سال‌های اخیر این روش به یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهیج برای محققان صنعت هوافضا تبدیل شده است. از این رو با پیشرفت‌های روزافزون بدست آمده در طی این سال‌ها، زمینه برای استفاده از این روش تولید توان الکتریکی، در فازهای مختلف ماموریت‌های هوافضایی با

[1] magnetohydrodynamic

کارایی هر چه بیشتر فراهم شده است.در این مقاله سعی شده است ابتدا با بیان روش‌های یونیزاسیون و تولید پلاسما و نحوه برهمکنش آن با میدان مغناطیسی، اساس کار مولد الکتریکی MHD توضیح داده شود. سپس با ارائه دسته بندی‌های مختلف این نوع مولد، مقایسه‌ای کاربردی از مکانیزم عملکرد آنها صورت پذیرد. در ادامه کاربردهای مختلف این روش تولید توان در صنایع هوافضا معرفی شده است.

۲ یونیزاسیون و تولید پلاسما

مولدهای MHD از یک سیال رسانا به عنوان سیال عامل استفاده می‌کنند. در اکثر موارد از پلاسما یا گاز یونیزه شده به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. راندمان استفاده از این دسته از مولدهای الکتریکی MHD تا حد زیادی به میزان یونیزاسیون ذرات و کیفیت پلاسمای گذرنده از کانال وابسته است. لذا شناخت نحوه تشکیل پلاسما و دستیابی به روش‌های نوین برای تولید پلاسمای قابل استفاده در دستگاه‌های صنعتی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در فیزیک کلاسیک برای مواد سه حالت جامد، مایع و گاز در نظر گرفته می‌شد. اما در بعضی موارد در فیزیک مدرن، پلاسما به عنوان حالت چهارم ماده معرفی می‌شود. در این حالت ماده با داشتن تعداد تقریبا مساوی از ذرات با بار مثبت و منفی، رسانای الکتریکی می‌باشد. در طبیعت، پلاسما محصول افزایش بسیار بالای دمای ماده است به طوری که ساختارهای مولکولی ماده، مفهوم خود را در این وضعیت از دست می‌دهند. همان طور که در شکل ۱ مشخص است اگر به یک ماده جامد حرارت دهیم ابتدا تبدیل به مایع و سپس با افزایش حرارت به گاز تبدیل می‌شود.

گاز معمولا یک عایق الکتریکی است، یعنی جریان الکتریکی نمی‌تواند به راحتی از طریق آن عبور کند. حال اگر روند افزایش دما همچنان ادامه یابد، گاز تبدیل به یک رسانای الکتریکی خوب می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش دما، گاز یونیزه شده و تبدیل به پلاسما می‌شود که دارای تعداد کافی الکترون آزاد جهت ایجاد هدایت الکتریکی است [۷]. در این روش تولید پلاسما، جهت رسیدن به سطح مطلوبی از یونیزاسیون، دمای ماده تا ۹۰۰۰ کلوین افزایش داده می‌شود. پلاسمای تولید شده به این روش معمولا به عنوان پلاسمای حرارتی شناخته می‌شود. برای استفاده از این روش در فضاپیماها به عنوان منبع حرارتی از لیزر یا راکتورهای هسته ای استفاده می‌شود. گاز در این روش دمای بسیار بالایی دارد که برای کاهش دمای متوسط، عملیات گرمایش به صورت پالس تکراری پیشنهاد می‌شود [۸]. این روش با توجیه اقتصادی و علمی مناسبی همراه است. لذا بررسی میزان یونیزاسیون ترکیبات گوناگون در دمای مختلف حائز اهمیت است (شکل ۲). نتایج مطالعات نشان از این دارد که میزان رسانایی ترکیبات مختلف با افزایش فشار نیز کاهش می‌یابد (شکل ۳) [۹].

اما تولید پلاسما در دمای پایین نیز امکان دارد. محدوده دمایی این روش‌ها معمولا بالای ۲۰۰۰ کلوین می‌باشند. یکی از روش‌های تولید پلاسما در دمای پایین ، دانه دهی یا بذر پاشی[1] است. در این روش مقدار کمی فلز قلیایی به عنوان ماده بذر یونیزه کننده مانند سزیم، کربنات پتاسیم یا سدیم به درون گاز عامل مادر تزریق می‌شود [۱۰]. یونیزاسیون گاز به وسیله میدان الکترومغناطیسی رادیو فرکانسی (RF)[2] به عنوان روشی برای رسیدن به یونیزاسیون کامل بذر مطرح شده است. در این روش یک کویل القایی در دیواره مولد MHD قرار گرفته و بذر به وسیله میدان الکترومغناطیسی RF یونیزه می‌شود [۱۱]. برای تولید پلاسما در دمای پایین بدون نیاز به بذر پاشی، روش FIP[3] مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش از گازهای بی‌اثر به عنوان گاز یونیزه شونده، استفاده می‌شود [۱۲]. از دیگر روش‌های تولید پلاسمای سرد، تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا است. در این روش گاز بین دو الکترود(کاتد و آند) عبور داده می‌شود و سپس با تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا بر روی آن، پلاسما تولید می‌شود [۱۳]. البته استفاده از این روش تولید پلاسما در مولدهای MHD به جز در مواردی خاص، متداول نمی‌باشد و کاربرد آن بیشتر در سایر دستگاه‌ها و سیستم‌های مبتنی بر علم MHD است.

۳ اساس کار مولد الکتریکی MHD

اساس کار مولد MHD مانند یک مولد دینامیکی بر پایه حرکت رسانای باردار در میدان مغناطیسی می‌باشد. در مولد دینامیکی (شکل ۴الف)، یک محرک خارجی، روتور مولد الکتریکی را به حرکت در می‌آورد. به عنوان مثال گاز پرفشار به سطوح تیغه یک توربین برخورد می‌کند تا توربین متصل به روتور مولد الکتریکی به حرکت در بیاید. اما یک مولد الکتریکی MHD (شکل ۴ب). به طور مستقیم انرژی جنبشی سیال رسانای الکتریکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند [۴]. این تبدیل انرژی از طریق برهم کنش میان سیال رسانای عامل و میدان مغناطیسی اعمالی از بیرون، صورت می‌گیرد. در مولدهای MHD ذرات رسانای الکتریکی مانند پلاسما یا فلز مایع از کانالی تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی عبور داده می‌شوند. با جایگذاری الکترود در طرفین کانال، مطابق با قانون القاء فارادی، توان الکتریکی استخراج می‌شود. معادلات حاکم بر جریان در مدل MHD، معادلات ناویر استوکس است که جهت اضافه کردن منبع نیروی الکترومغناطیسی با معادلات پوآسون همراه می‌شوند. معادلات الکترومغناطیسی اصلی، معادلات ماکسول، معادله پیوستگی جریان الکتریکی و تعمیم یافته قانون اهم هستند [۱۴].

۴ دسته بندی مولدهای MHD

دو روش کلی برای دسته بندی مولدهای MHD معرفی شده است:

۱. بر اساس شکل و ساختار

۲. بر اساس سیال عامل و منبع حرارتی پیش‌بینی شده.

۱.۴ دسته بندی مولدهای MHD بر اساس شکل و ساختار

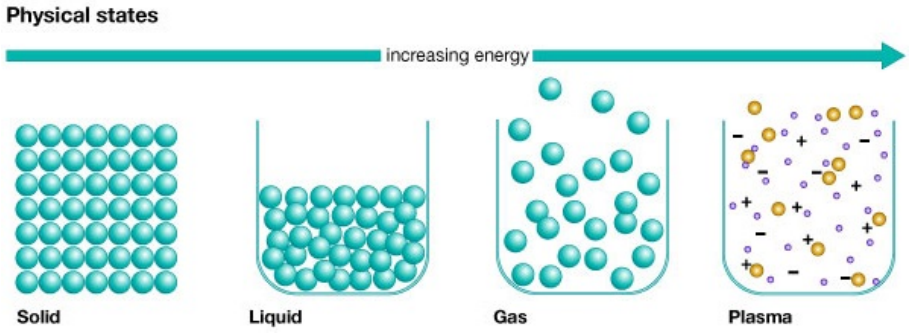
مولدهای الکتریسیته MHD از لحاظ شکل و ساختار نیز به دو دسته کلی زیر تقسیم می‌شوند:

۱. مولد هم محور (خطی)

۲. مولد دیسکی

کانال مولد MHD هم محور به صورت خطی می‌باشد به طوری که سیال عامل به یک مسیر مستقیم هم راستا با محور تقارن کانال را طی می‌کند.

[1]seed [2]Radio-Frequency [3]Frozen inert gas plasma

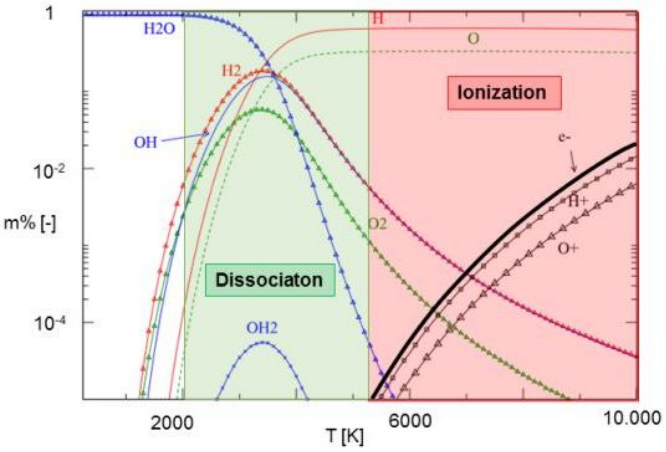


شکل ۱: نحوه تغییر فاز ماده از جامد تا پلاسما [۶]

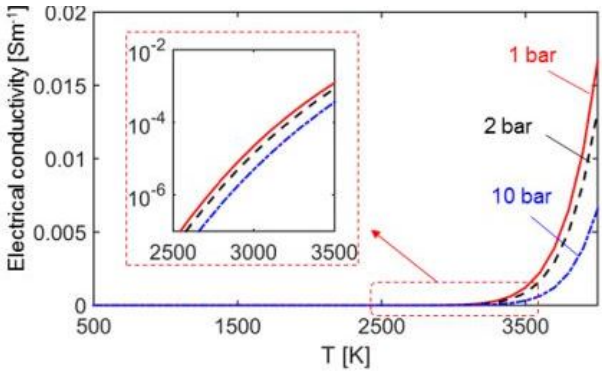
شکل ۵ ساختار یک مولد خطی را نشان می‌دهد. این مولد نمونه آزمایشگاهی است که با هدف آموزشی و پژوهشی در دانشگاه هوایی مسکو ساخته شده است [۱۵].

مولد خطی براساس نحوه به هم بستن و جایگذاری الکترودها به سه دسته کلی تقسیم می‌شود:

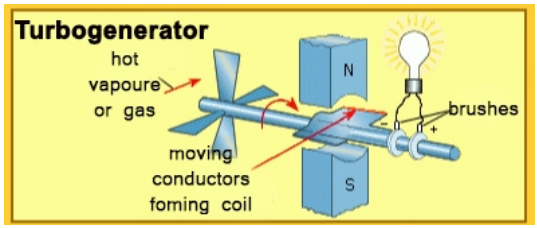
۱. مولد فارادی
۲. مولد هال
۳. مولد هال قطری (مورب)



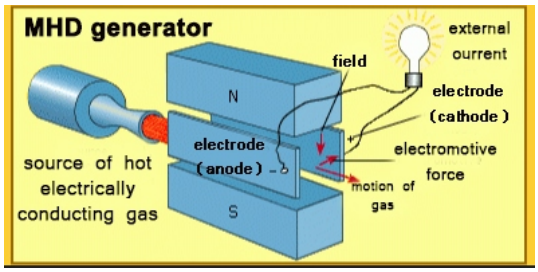
شکل ۲: یونیزاسیون در شرایط دمایی گوناگون برای ترکیبات مختلف H_2 و O_2 در فشار ۱bar [۹]



شکل ۳: رسانایی الکتریکی در فشار و دمای مختلف [۹]

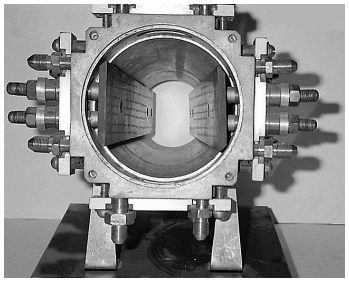


(الف) مولد دینامیکی با محرک توربین گازی

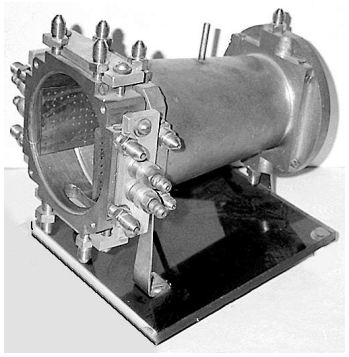


(ب) مولد MHD

شکل ۴: مقایسه مولد دینامیکی و مولد MHD [۴]



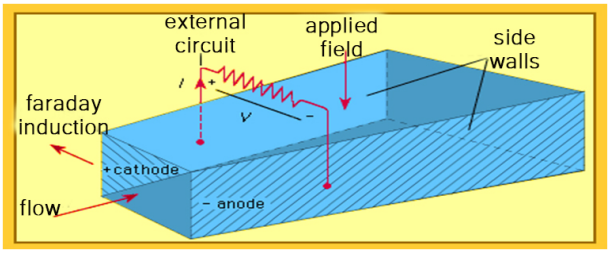
(الف) نمای جلو



(ب) نمای جانبی،

شکل ۵: مولد MHD خطی [۱۵]

ساختار اصلی یک مولد فارادی در شکل ۶ نشان داده شده است. این نوع از مولدهای MHD شامل یک کانالی به شکل گوه است که الکترودها به صورت موازی در دو طرف دیواره کانال، تعبیه شده‌اند. پلاسما به عنوان سیال عامل، توسط یک نازل شتاب می گیرد و به کانال تزریق می شود. میدان مغناطیسی قوی در سراسر کانال متناسب با سطح مقطع کانال و سرعت سیال عامل تنظیم می‌شود. در این شرایط طبق قانون القاء فارادی، یک میدان الکتریکی در جهت عمود بر هر دو جریان پلاسما و میدان مغناطیسی القا می‌شود.



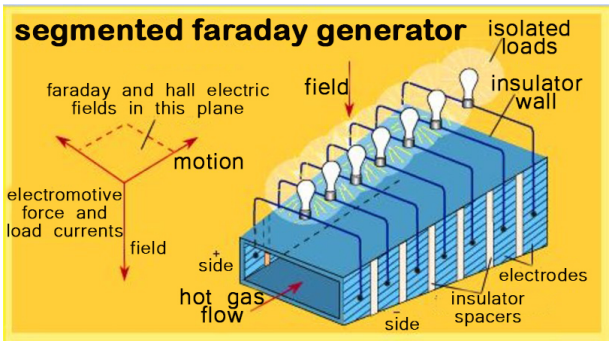
شکل ۶: کانال مولد فارادی با الکترد پیوسته [۴]

توان الکتریکی استخراجی برای با هر متر مکعب از کانال مولد فارادی متناسب با هدایت الکتریکی پلاسما، سطح مقطع کانال و سرعت جریان است. در طی روند عبور سیال از کانال دمای آن به آهستگی کاهش می‌یابد. برای مولد MHD با عملکرد خوب، هدایت الکتریکی گاز باید در حدود S/m ۱۰ تا ۵۰ (زیمنس در هر متر مکعب) و در محدوده دمائی بالاتر از حدود K ۱۸۰۰ باشد. که از طریق یک نازل گاز تا سرعت در محدوده ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بر ثانیه (در حدود ۳۳۰۰ تا ۶۶۰۰ فوت بر ثانیه) شتاب داده می‌شود.

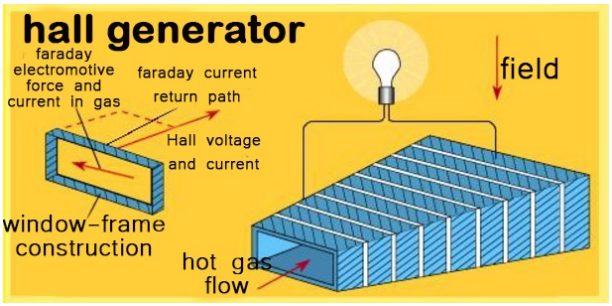
برای تولید توان با ظرفیت بالا در این دسته از مولدها، نیاز به میدان مغناطیسی بسیار قدرتمند می‌باشد. از لحاظ نظری یک سیستم MHD با هدایت گاز ۲۵ زیمنس در هر متر، میدان مغناطیسی متوسط سه تسلا و سرعت متوسط گاز ۱۰۰۰ متر بر ثانیه، توانایی تولید انرژی الکتریکی در حدود ۲۵۰ میلیون وات در هر متر مکعب از حجم کانال را دارد [۴]. در مولد فارادی جریان القایی عرضی بین الکترودها باعث به وجود آمدن اثر دیگری به نام اثر هال شده که منجر به القای یک جریان طولی در کانال می‌شود. این اثر راندمان مولد فارادی را کاهش می‌دهد. برای کاهش پیامدهای نامطلوب اثر هال کانال به قطاع‌های مختلفی تقسیم می‌شود (شکل ۷). به طوری که هر قطاع از قطاع بعدی به وسیله عایق هایی مجزا شده و هرکدام به عنوان یک واحد مولد مجزا عمل می‌کنند.

یکی از مشکلات اصلی مولد فارادی تقسیم شده، این است که جریان از هر بخش به صورت موازی استخراج می‌شود. لذا جهت تولید شار و ولتاژ متناسب با نیاز مصرف کننده، هر بخش نیاز به یک مبدل دارد که باعث پیچیدگی زیاد آن می‌شود. در پیکربندی متفاوتی از این دسته از مولدهای MHD که به عنوان مولد هال (شکل ۸) شناخته می شود، جریان القایی در هر بخش با بخش بعدی اتصال داده می‌شود. به عبارت دیگر الکترودها به صورت سری به هم متصل می‌شوند و جریان القایی در سرتاسر کانال تنها به وسیله الکترود ابتدایی و انتهایی استخراج می‌شود.

علاوه بر این همان طور که گفته شد، اثر هال باعث القای یک جریان طولی در کانال می‌شود. در مولد هال الکترودها به صورت پنجره‌ای در دور کانال بوده که با هدف استخراج این جریان طراحی شده‌اند [۱۶].

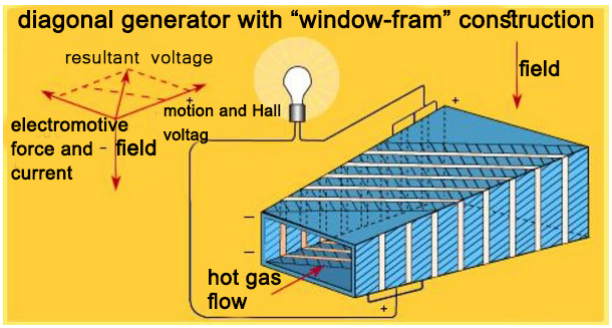


شکل ۷: مولد فارادی با تقسیم شده [۴]



شکل ۸: مولد اثر هال [۴]

پیکربندی جدیدی موسوم به مولد اثر هال قطری(شکل ۹) اخیرا مورد توجه قرار گرفته است. در این دسته از مولدها، برای ایجاد مطابقت میان نقاط هم پتانسیل و الکترودها هر قطاع به صورت مورب نسبت به محور کانال قرار می‌گیرند. خصوصیات این نوع مولدها مابین خصوصیات مولد فارادی و مولد هال است [۱۶].



شکل ۹: مولد اثر هال قطری [۴]

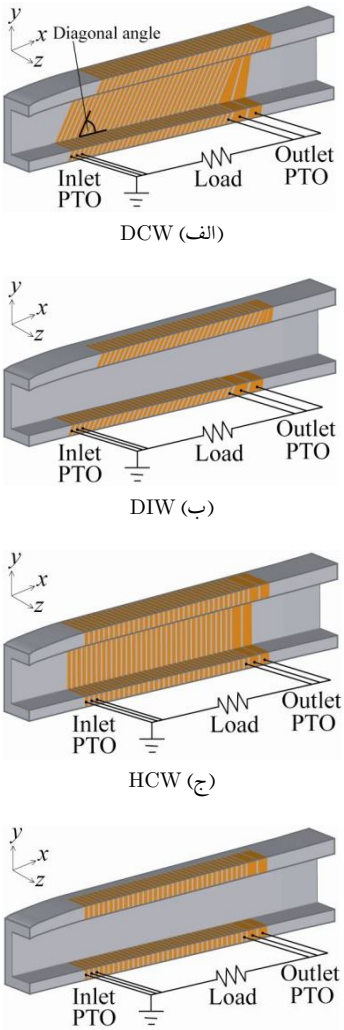
با درنظر گرفتن این سه دسته اصلی از مولدهای خطی(فارادی، هال و هال قطری)، نمونه‌های دیگری از مولدهای MHD معرفی می‌شوند به طوری که این نمونه‌ها از لحاظ ساختاری ترکیبی از این سه دسته کلی می‌باشند.

ازجلمه آنها می‌توان به موار زیر اشاره کرد (شکل ۱۰):

۱. DCW[۱]
۲. DIW[۲]
۳. HCW[۳]

[1]Diagonal Conducting Wall [2]Diagonal Insulating Wall [3]Hall Conducting Wall

۴. HIW[1]

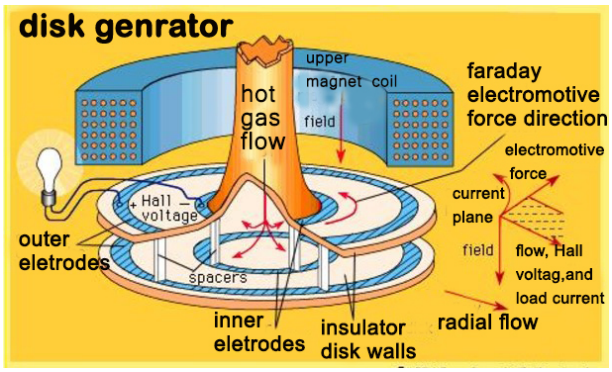


شکل ۱۰: مولدهای MHD خطی با ساختار ترکیبی [۱۷]

DCW مولدی است قطری با الکترودهای پنجره‌ای که الکترودها توسط عایق‌هایی که در دیواره جایگذاری شده اند از هم جدا می‌شوند. DIW مولد MHD دیگری است که الکترودها به صورت جفت در بالا و پایین کانال جایگذاری شده‌اند و از بیرون به صورت الکتریکی به هم متصل شده‌اند. مولدهای HCW و HIW مولدهای اثر هال هستند که چینش و اتصال الکترودهای آنها بر همین مبنا می‌باشد [۱۷].

مولدهای دیسکی در حال حاضر، کارآمدترین مولد MHD هستند. در یک مولد دیسکی، سیال هادی از طریق یک مجرا به مرکز دیسک جریان یافته و از اطراف لبه‌ها خارج می‌شود. میدان تحریک مغناطیسی توسط آهنربای دائمی یا الکترومغناطیسی دایره‌ای شکل، اعمال می‌شود. جهت استخراج توان الکتریکی، کاتد و آند در مرکز و لبه بیرونی دیسک تعبیه می‌شوند. در این حالت جریان ناشی از اثر هال بین الکترودهای حلقوی در نزدیکی مرکز و لبه بیرونی دیسک، جریان می یابد(شکل ۱۱ و ۱۲).

مزیت مولد دیسکی این است که به دلیل آن که سیال در دیسک پردازش می شود، میدان مغناطیسی می‌تواند به سیال نزدیک‌تر باشد و بدین ترتیب میدان مغناطیسی کارآمدتر خواهد بوده. بنابراین در صورت استفاده از آهنربای ثابت، آهنرباهای کوچکتری مورد نیاز خواهند بود و در صورت استفاده از آهنربای الکترومغناطیسی نیز توان بسیار کمتری مصرف می‌شود [۱۸].



شکل ۱۱: مولد دیسکی [۴]

شکل ۱۲: اجزا یک مولد دیسکی [۱۵]

۲.۴ دسته بندی مولدهای MHD بر اساس سیال عامل و منبع حرارتی پیش‌بینی شده

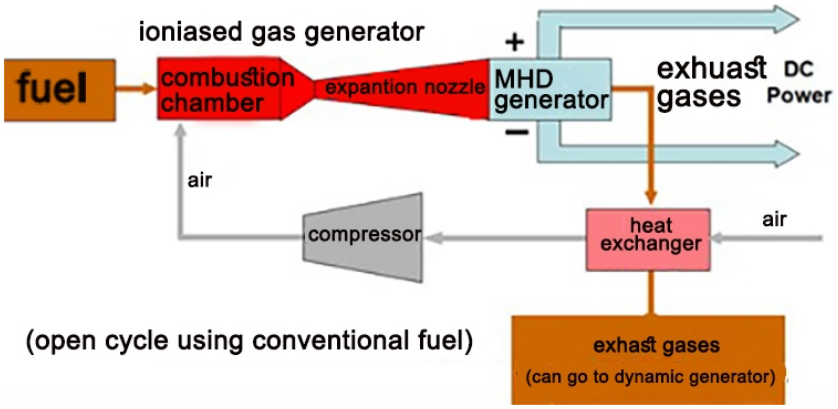
مولدهای MHD بر اساس سیال عامل و منبع حرارتی پیش‌ـبینی شده به دو دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند.

۱. چرخه باز

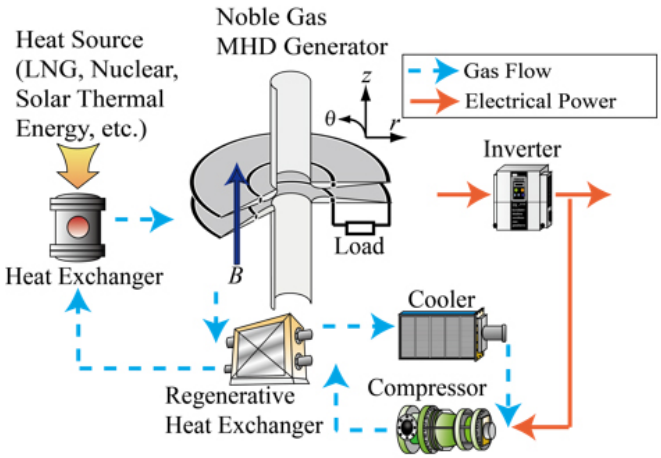
۲. چرخه بسته

مولدهای MHD می‌توانند در یک چرخه باز با احتراق سوخت فسیلی کار کنند. در این چرخه محصولات احتراق به عنوان گاز عامل مولد کار می‌کند (شکل ۱۳). برای افزایش بازده نیروگاه‌های تولید توان، ایده ترکیب این سیستم با مولد توربین بخار مطرح شده است. در ساده‌ترین فرم آن گاز خروجی دما بالا از محفظه احتراق ابتدا از کانال MHD می‌گذرد و سپس گاز خروجی از کانال برای به حرکت درآوردن توربین استفاده می‌شود. با استفاده ترکیبی از این دو مولد، بازده نیروگاه می‌تواند تا حدود ۶۰ درصد افزایش یابد. این در حالی است که حداکثر بازده نیروگاه‌های دینامیکی (توربو ژنراتوری) در حدود ۴۰ درصد است. راندمان عملیاتی بیشتر منجر به استفاده موثرتر از منابع طبیعی، کاهش آلودگی‌های حرارتی و زیست محیطی و همچنین کاهش هزینه های سوخت می‌شود [۱۶].

[1]Hall Insulating Wall



شکل ۱۳: پیکربندی مفهومی از مولد الکتریکی MHD چرخه باز [۱۹]

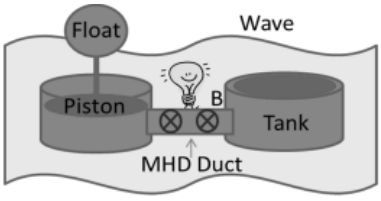


شکل ۱۴: پیکربندی مفهومی از مولد الکتریکی MHD چرخه بسته [۲۰]

از طرف دیگر در مولدهای الکتریکی MHD چرخه بسته (CCMHD)[1]، سیال عامل مورد بازیابی قرار می‌گیرد. در این روش با بذر پاشی به داخل گاز مادر، خاصیت رسانایی در سیال عامل القا می‌شود. در مولدهای الکتریکی CCMHD متداول، تحت روش بذر پاشی پلاسمایی، مقدار کمی فلز قلیایی به عنوان ماده بذر یونیزه کننده، مانند سزیم، کربنات پتاسیم یا سدیم به درون گاز عامل مادر تزریق می‌شود. پلاسما تحت تاثیر یونیزاسیون بذر پاشیده شده تولید می‌شود. افزودن روش RF به مولد CCMHD می‌تواند به یونیزاسیون کامل بذر کمک و از بی‌ثباتی یونیزاسیون (که باعث کاهش کارایی مولد می‌شود) جلوگیری کند. علاوه بر این، جهت افزایش کارایی مولد، دانه‌های بذر باید به صورت یکنواخت و دقیق در گاز مادر تزریق شده و پس از خروج از مجرای مولد، دانه‌های بذر از گاز مادر حذف شده و بازیافت شود. اما اخیرا در بعضی تحقیقات، ایده مولدهای CCMHD بدون بذر پاشی مطرح شده است. در روش بدون بذر پلاسما با یونیزاسیون گاز مادر که یک گاز خنثی است، تولید می‌شود و مانند حالت قبل در انتهای فرآیند گاز بازیابی می‌شود [۱۱].

در نمونه‌ای از مولدهای CCMHD، از فلزات مایع به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. از مهمترین خصوصیت فلزات مایع، رسانایی بالای آنهاست. رسانایی در این مایعات، وابستگی کمی به دما دارد به طوری که می‌توان گفت مستقل از دما است.

در بعضی مراجع از این مولدها با عنوان LMMHD[2] نیز یاد می‌شود. این روش به عنوان راه حلی برای دستیابی به سیالی با رسانایی بالای الکتریکی و مستقل از دما در فناوری پلاسما– MHD با هدف حذف روش‌هایی همچون افزایش دما و دانه دهی در حال گسترش است. اخیرا مولد LMMHD در کاربردهای تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است. اما در حال حاضر یکی از کاربردهایی که برای این روش در نظر گرفته شده، استخراج مستقیم انرژی الکتریکی از امواج قوی اقیانوس همراه با حرکت رفت و برگشتی با دوره طولانی است. شکل ۱۵ یک مولد LMMHD را نشان می‌دهد که از یک پیستون برای به جریان درآوردن فلز مایع در کانال مولد الکتریکی MHD مابین دو تانک، استفاده می‌کند. یک شناور به پیستون متصل است که با برخورد امواج دریا به شناور پیستون به حرکت در می‌آید [۲۱].



شکل ۱۵: مولد LMMHD انرژی موج [۲۱]

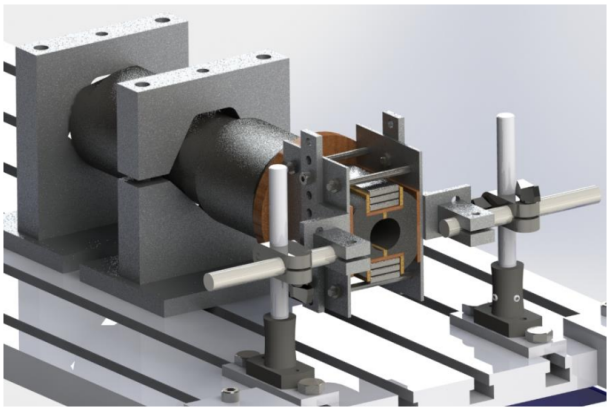
[1]CLOSED-CYCLE magnetohydrodynamic [2]liquid metal MHD

۵ کاربرد مولد الکتریکی MHD در صنایع هوافضا

استفاده از مولدهای MHD تا دهه ۹۰ در نیروگاهای تولید برق شهری به طور گسترده مورد بحث قرار گرفت. با این وجود چالش‌های فنی و مشکلات اقتصادی مانع از تجاری سازی این نوع نیروگاه‌ها شد. اما این چالش‌های فنی در پروژه‌های هوافضایی با توجه به نوع الزامات تعریف شده کمرنگ تر می‌باشد. از طرفی نیز مزایای این روش همچون وزن کم و پتانسیل تولید توان بسیار بالا، این روش را در صنایع هوافضا بسیار مورد توجه قرار داده است.

۱.۵ کاربرد در موتور موشک سوخت جامد

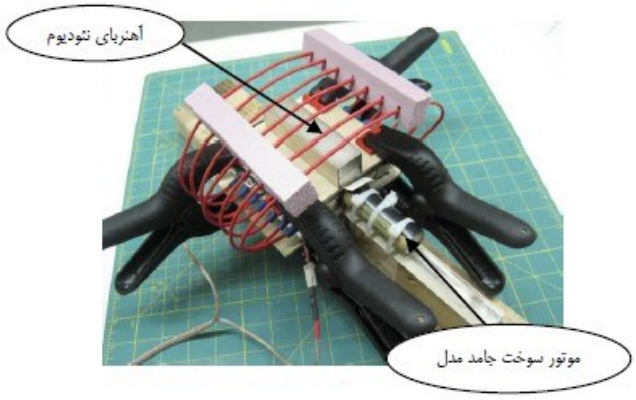
یکی از کاربردهای مولد MHD در صنایع هوافضا، استفاده از آنها جهت تامین توان مورد نیاز موشک‌ها است. جهت دستیابی به این هدف، مولد MHD به قسمت انتهایی نازل وصل می‌شود. با توجه به اینکه گاز خروجی از نازل دمای بسیار بالایی دارد از آن به عنوان گاز عامل مولد استفاده می‌شود. از طرفی نیز با توجه به این که بسیاری از موشک‌ها عمر عملیاتی کوتاهی دارند، این روش نیازمند بکارگیری موادی پیچیده با مقاومت دمایی بالا و تکنولوژی پیشرفته نیست. لذا استفاده از این روش تولید توان در موشک‌ها، توجیه اقتصادی مناسبی نیز دارد. در شکل ۱۶ موتور موشک سوخت جامدی در ابعاد کوچک نشان داده شده که به وسیله مولد MHD در قسمت نازل تجهیز شده است.



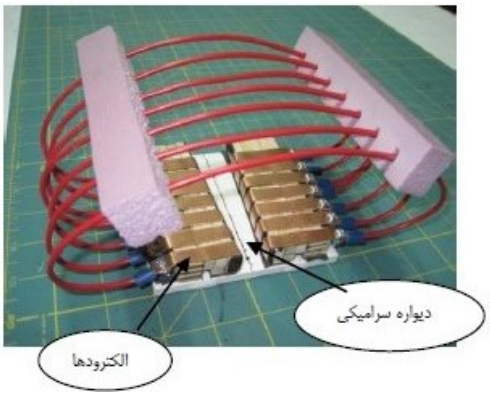
شکل ۱۶: موتور موشک سوخت جامدی مجهز به مولد MHD [۲۲]

در مطالعات عددی انجام شده توسط یوری و همکاران [۲۲] به عنوان سوخت از انواع مختلف کامپوزیت‌ها با تکیه بر اکسیدکننده‌های متفاوت استفاده شده است. آزمایشاتی با هدف تست کارایی سیستم با تغییر تنظیمات الکترودها در حضور میدان مغناطیس ثابت صورت گرفته و بر پایه نتایج آزمایشات تجربی، یک مدل شبیه سازی عددی با توجه به محصولات احتراق و ابعاد مولد MHD توسعه داده شده است.

گروه تحقیقاتی JP Aerospace که سازمانی مستقل در رابطه با برنامه‌های هوافضایی می‌باشد، آزمایش‌های تجربی خلاقانه‌ای در زمینه مولدهای MHD با تاکید بر کاربرد هوافضایی آنها، طراحی کرده است. در این آزمایشات از موتور سوخت جامد مدل به عنوان منبع تولید پلاسما استفاده شده است. بدنه کانال مولد نیز از جنس سرامیک بوده و آهنرباهای نئودیم بلوکی شکل به عنوان منبع میدان مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



(الف) نمای بیرونی مولد به همراه موتور



(ب) نمای داخلی مولد هال

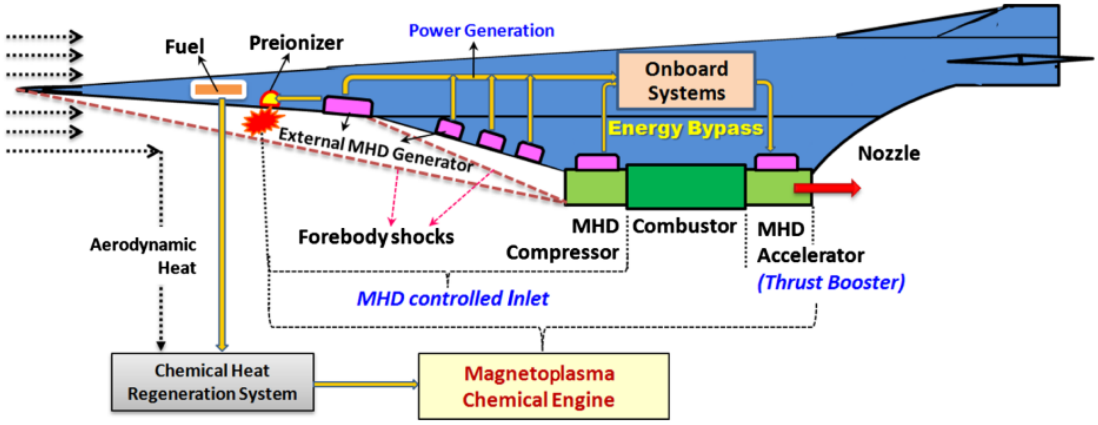
شکل ۱۷: کانال مولد اثر هال گروه تحقیقاتی JP Aerospace [۲۳]

۲.۵ کاربرد در هواپیماهای ماوراء صوت

نسل بعدی اکتشاف فضایی نیازمند کلاس متفاوتی از وسایل نقلیه پروازی می‌باشند؛ که مقرون به صرفه بوده و به طور کامل قابلیت استفاده مجدد را داشته باشند. ایده هواپیمای ماوراء صوت هدایت شونده همچون AJAX (شکل ۱۸) با این هدف پیشنهاد شده است. با توجه به قابلیت هدایت شوندگی و همچنین بازگشت به جو، این ایده نیز مطرح می‌شود که از آنها می‌توان برای سفر از هر نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر از کره زمین در کوتاه‌ترین فاصله زمانی استفاده کرد.

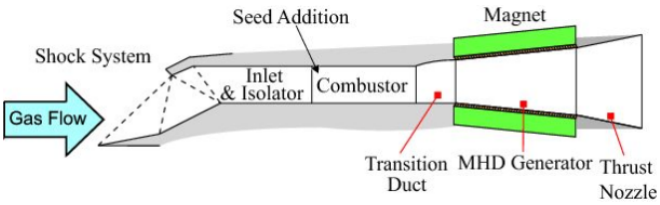
این دسته از وسایل نقلیه هوافضایی مجهز به مجموعه‌ای از سیستم‌های پیشرفته مبتنی بر علم MHD همچون کنترل جریان فعال و کنترل شوک در ورودی موتور به وسیله MHD، مولد الکتریکی MHD، کمپروسور MHD، سیستم تقویت پیشرانه MHD و ... خواهند بود [۲۴]. موتور در نظر گرفته شده برای این هواپیماها در ارتفاع بالا اسکرمجت[1] بوده که مولد MHD به عنوان واحد تولید توان الکتریکی به پایین دست محفظه احتراق این نوع موتور متصل می‌شود. در موتورهای اسکرمجت هیچ قطعه چرخشی مانند توربین وجود ندارد، بنابراین تولید توان الکتریکی از روش‌های معمول همچون چرخش روتور در میدان الکترومغناطیسی امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین لازم است مولد تولید توان جدیدی معرفی شود؛ و با توجه به اینکه مولد مورد نظر باید بر روی هواپیما نصب شود، باید سبک بوده و همچنین قابلیت و

[1] Scramjet



شکل ۱۸: طرح مفهومی هواپیمای مافوق صوت AJAX [۲۴]

ظرفیت تولید توان بالا را داشته باشد. مولدهای MHD این مزیت را دارند که بدون استفاده از قطعات چرخشی توان الکتریکی بالایی را تولید کنند. در یک برنامه مطالعاتی با نام سیستم توان الکتریکی وسایل نقلیه ماوراء صوت (HVEPS)[1]، که از سال ۲۰۰۱ آغاز شد موتورهای اسکرمجت که تولید توان الکتریکی در آنها به وسیله مولدهای MHD صورت می‌گرفت در طی ۵ سال مورد مطالعه قرار داده شد [۲۵، ۲۶]. در شکل ۱۹ موتور اسکرمجت مجهز به مولد MHD دیده می‌شود که مولد در قسمت انتهایی موتور اضافه شده و از محصولات احتراق خروجی از اگزوز موتور به عنوان گاز عامل برای تولید توان در مولد استفاده می‌شود.

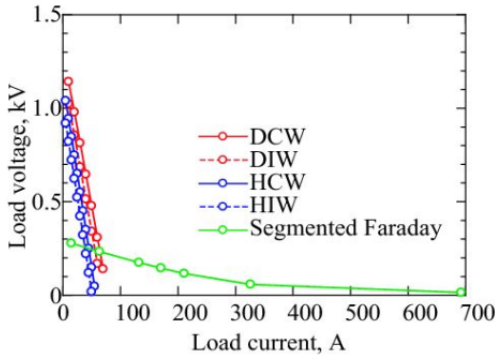


شکل ۱۹: موتور اسکرمجت مولد MHD [۲۵]

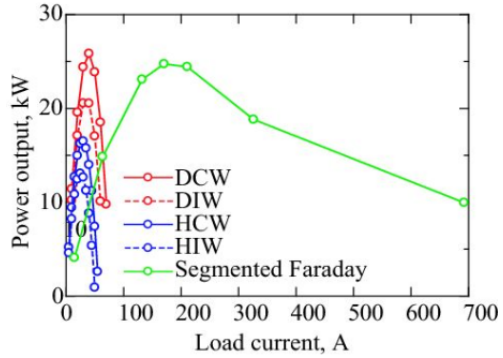
مطالعات تجربی و شبیه سازی‌های عددی گوناگونی با هدف ارتقا کارایی مولدهای MHD در موتور اسکرمجت صورت گرفته است. تورو و همکاران [۱۷] انواع مولدهای MHD از جمله مولد فارادی، DCW، DIW، HCW، HIW، با در نظر گرفتن استفاده از آنها در موتور اسکرمجت را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که الکترودهای به کار برده شده در دیواره مولدهای DCW و HCW در مقایسه با HIW و DIW افت ولتاژ کمتری را تجربه می‌کنند.

شکل ۲۰ نحوه تغییرات ولتاژ به جریان را در مولدهای مختلف، مقایسه می‌کند. در یک جریان خاص، مولد DCW بیشترین ولتاژ خروجی را دارد. از طرفی مولد فارادی با الکترود تقسیم شده، توانایی تولید بیشترین جریان را دارد.

با در نظر گرفتن میانگین کمتر از واحد پارامتر اثرِ هال، مولدهای HIW و HCW توان الکتریکی کمتری نسبت به سایر مولدها تولید می‌کنند. توان تولیدی در مولد فارادی قابل مقایسه با توان تولیدی توسط DCW است (شکل ۲۱)؛ اما از آنجایی که هر الکترود مولد فارادی نیاز به مبدل الکتریکی دارد، پیچیدگی مدار و همچنین هزینه‌ها افزایش می‌یابد. در پایان استفاده از مدل DCW به عنوان مولد توان الکتریکی در موتور اسکرمجت مناسب ارزیابی شده است [۱۷].



شکل ۲۰: منحنی ولتاژ به جریان در مولدهای مختلف [۱۷]



شکل ۲۱: منحنی توان خروجی به جریان در مولدهای مختلف [۱۷]

در پروازهای ماوراء صوت به دلیل سرعت بسیار بالای پروازی، شوک بسیار قوی روی بدنه جسم پرنده تشکیل می‌شود (شکل ۱۸). جریان هوا در گذر از شوک شدیدا گرم می‌شود و پتانسیل تشکیل پلاسما در این شرایط دمایی افزایش می‌یابد. لذا در این رژیم جریان پروازی جهت تولید توان الکتریکی به روش MHD لزوما نیاز به استفاده از جریان سیال خروجی از موتور نیست. از هوای گذرنده بر روی بدنه هواپیما که به دلیل گذر از شوک دمای قابل توجهی دارد، می‌توان به روش MHD توان الکتریکی استخراج

[1] HypersonicVehicle Electric Power System

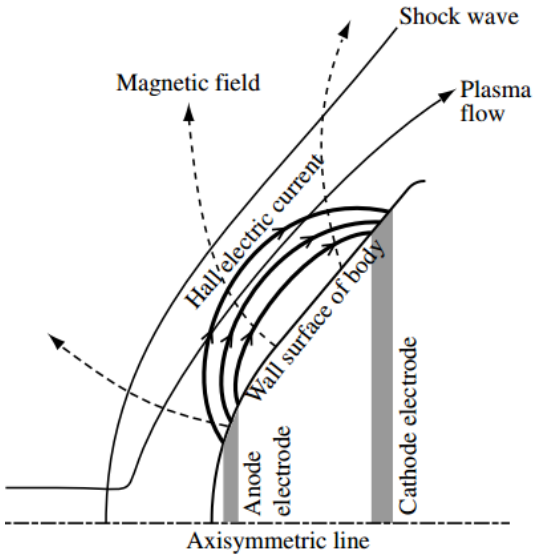
کرد. البته برای یونیزاسیون هرچه بهتر جریان هوای پشت شوک از روش‌هایی همچون دانه دهی یا قوس الکتریکی نیز استفاده می‌شود.

از توان خروجی مولد MHD می‌توان در جهت کاهش مقاومت‌های آیرودینامیکی، فرونشاندن گرمایش آیرودینامیکی و کنترل جریان اطراف هواپیما و موتور استفاده کرد. طبق برآوردهای انجام شده توسط برنامه HVEPS توان تولیدی توسط مولد باید بیشتر از ۱۰ کیلووات باشد تا بتواند کلیه سیستم‌های مورد نیاز یک هواپیمای هایپرسونیک را پشتیبانی کند [۲۷].

۳.۵ کابرد در کپسول فضایی حین بازگشت به جو

یکی دیگر از کابردهای مولد MHD تولید توان مورد نیاز یک کپسول فضایی حین بازگشت به جو است. با توجه به آنکه کپسول‌های فضایی با سرعت بسیار بالایی وارد جو می‌شوند، در این حین موج شوک بسیار شدیدی را تجربه می‌کنند. با توجه به شرایط حرارتی پشت شوک سطح کپسول پوشیده از پلاسما خواهد شد. لذا با اعمال میدان مغناطیسی مناسب به این جریانِ پلاسمای شتاب‌دار، توان الکتریکی استخراج می‌شود (شکل ۲۲). توان تولید شده از این روش را می‌توان در سیستم کنترل پرواز با هدف بهینه کردن مسیر بازگشت به جو به وسیله انجام مانورهای خاص استفاده کرد.

اخیرا تاکایاسوبا و موتو [۲۸] با انجام یک شبیه سازی دو بعدی کارایی مولد MHD اثر هال را در ارتفاع‌های مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج عددی نشان می دهد که عملکرد مولد در طول مسیر پرواز به شدت تغییر می کند. در ارتفاع‌های بالا مولد می‌تواند توانی در سطح زیر مگاوات تا حدود مگاوات تولید کند؛ در حالی که در ارتفاع‌های پایین مانند ۵۲ کیلومتری به دلیل تضعیف شوک و در نتیجه پایین آمدن دمای پلاسما و کاهش رسانایی، مولد MHD کارایی خود را از دست می‌دهد.



شکل ۲۲: پیکربندی ژنراتور MHD اثر هال در دماغه کپسول فضایی [۲۸]

۴.۵ کابرد در پرتاب کننده‌های ریل الکترومغناطیسی

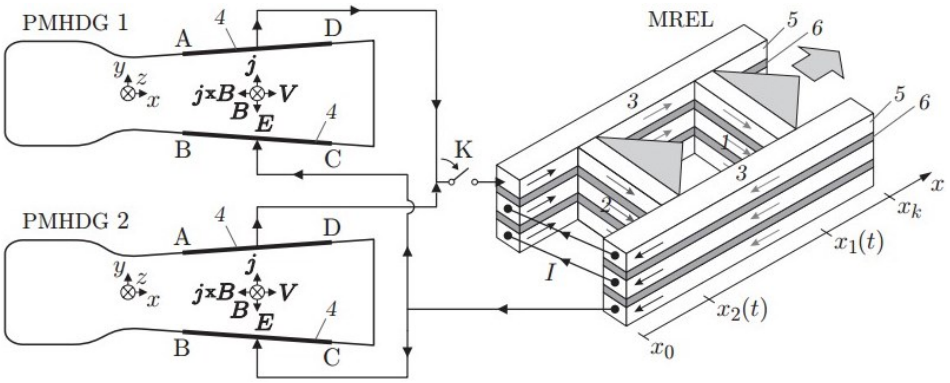
در حال حاضر تعداد زیادی از آزمایشگاه‌ها در پروژه‌های بزرگ تحقیقاتی مشغول به کار بر روی توسعه پرتاب کننده‌های ریل الکترومغناطیسی برای سرعت بخشیدن به پرتابه‌هایی با وزن مشخص هستند. این پرتاب‌کننده‌ها می‌توانند اجسامی با جرم ۰/۱ تا ۲۰ کیلوگرم را تا سرعت ۲/۵ کیلومتر بر ثانیه پرتاب کنند. در مطالعات انجام شده توانایی این روش برای نرخ پرتاب بین ۳۰ تا ۷۵۰ پرتابه در ثانیه گزارش شده است. اجرای این پروژه‌ها نیاز به یک منبع انرژی الکتریکی از ده‌ها تا صدها مگاژول است. در بیشتر مطالعات آزمایشگاهی منتشر شده، خازن‌ها به عنوان یک منبع انرژی استفاده می شوند. اما خازن‌ها متناسب با وزن و اندازه، ظرفیت ذخیره انرژی محدودی دارند. لذا عملا نمی‌توان از آنها به عنوان یک منبع انرژی برای پرتاب کننده‌های ریل الکترومغناطیسی در مقیاس بزرگ استفاده کرد. اما یک مولد الکتریکی MHD پالسی (PMHDG)[1] قدرتمند که سیال کاری آن توسط یک موتور سوخت جامد تامین می‌شود می‌تواند الزاملات این پروژه را برآورده کند. شکل ۲۳ پیکربندی یک پرتاب‌کننده ریل الکترمغناطیسی را نشان می‌دهد که انرژی الکتریکی مورد نیاز آن توسط دو مولد MHD که به طور موازی به هم وصل شده‌اند، تامین می‌شود [۲۹].

۶ نتیجه‌گیری

در ابتدای مطرح شدن ایده مولد MHD، موانع مختلفی مانع از به کار گیری این ایده در مصارف صنعتی و تجاری سازی آن شد. با پیشرفت علم و رفع موانع علمی و فنی، این روش تولید توان الکتریکی، توجهات بسیاری را به خود جلب کرد. این دسته از مولدها، از یک سیال رسانا مانند پلاسما یا فلز مایع، به عنوان سیال عامل استفاده می‌کنند. از مهمترین عواملی که در راندمان مولد MHD تاثیر بسزایی دارد، رسانایی سیال عامل آن است. استفاده از پلاسما یا گاز یونیزه شده به عنوان سیال عامل بسیار متداول‌تر می‌باشد. ایجاد خاصیت رسانایی در یک گاز به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. مانند افزایش دمای گاز تا تبدیل آن به پلاسما، دانه دهی به وسیله مواد قلیایی با پتانسیل یونیزاسیون بالا، تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا، یونیزاسیون به روش RF و ... . هریک از این موارد بنا بر نوع الزامات، محدودیت‌ها و تکنولوژی در دسترس مورد استفاده قرار می‌گیرند. ایده استفاده از فلزات مایع به عنوان سیال عامل مولد نیز اخیرا مورد توجه قرار گرفته است. این مایعات دارای خاصیت رسانایی الکتریکی بالایی هستند و رسانایی در آنها تقریبا مستقل از دما است.

مولدهای MHD از لحاظ ساختار و همچنین سیال کاری به دسته‌های مختلفی تقسیم بندی می‌شوند. طی مطالعات انجام شده مشخص شد که با بکارگیری همزمان این دسته از مولدها به همراه مولدهای دینامیکی(توربو ژنراتوری)، می‌توان راندمان کلی نیروگاه‌های تولید توان الکتریکی را تا ۶۰ درصد افزایش داد. روش MHD جهت تامین انرژی الکتریکی وسایل پرنده (هواگردها و فضاگردها) در شرایط خاصی، راه حل‌های مناسب ارائه می‌دهد. مولدهای MHD این مزیت را دارند که بدون استفاده از قطعات چرخشی توان الکتریکی بالایی را تولید کنند. مکانیزم تولید انرژی در این روش، عبور پلاسما با سرعت بالا، از یک کانال تحت تاثیر میدای مغناطیس می‌باشد. برای استخراج الکتریسیته القایی، از الکترودهای بکار رفته در اطراف کانال استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای این روش، استفاده از آنها در هواپیماهای ماوراء

[1] pulsed MHD generators



شکل ۲۳: ساختار پرتاب کنندههای ریل الکترمغناطیسی [۲۸]

صوتِ مجهز به موتور اسکرمجت می‌باشد. این نوع از موتورها پیشرانه‌هایی بدون قطعات چرخشی هستند. در مطالعات انجام شده، به منظور تولید توان الکتریکی در موتورهای اسکرمجت، مولد MHD از نوع DCW پیشنهاد شده است. با اضافه شدن یک مولد MHD به موتور موشک و با استفاده از محصولات احتراق به عنوان گاز عامل، انرژی الکتریکی مورد نیاز موشک را می‌توان تامین کرد. مطالعاتی نیز جهت استفاده از این روش، با هدف تولید توان الکتریکی در کپسول های فضایی حین مسیر بازگشت به زمین انجام شده است. از توان الکتریکی تولید شده می‌توان جهت بهینه سازی مسیر بازگشت توسط انجام مانورهای مناسب استفاده کرد. با توجه به پتانسیل بسیار بالای مولد MHD جهت تولید توان در مقیاس بزرگ ایده استفاده از آن به عنوان مولد انرژی الکتریی مورد نیاز پرتاب کننده‌های ریل الکترومغناطیسی مطرح می‌شود.

مراجع

[1] Hannes Alfven, February 01, 2017, www.britannica.com/biography/Hannes-Alfven

[2] Hyoungkeun Kim, E. David Huckaby, C. Rigel Woodside, Eric D. Zeuthe, Danylo B. Oryshchyn, Investigation of photoionization in the exhaust jet of a highvelocity oxy-fuel system toward application to MHD power generation, 48th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference Denver, Colorado, June 5-9, 2017

[3] Uderico Spadavecchia, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Tsukasa Aso, and Nob. Harada, 2-Dimensional Numerical Simulation on MHD Hall Accelerator Connections for Advance Propulsion Using the CIP Method, 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, San Jose, CA, July 14 – 17, 2013

[4] William D. Jackson and G. Ralph Strohl, magnetohydrodynamic power generator, March 21 2016, www.britannica.com/technology/magnetohydrodynamic-power-generator

[5] C. Rigel Woodside, Retrospective and Prospective Aspects of MHD Power Generation, MHD Workshop, 2014, doi: https://www.netl.doe.gov/events/conference-proceedings/2014/mhd-workshop

[6] Bruce Sween Liley and Michael C. Kelley, plasma, October 19 2017, https://www.britannica.com/science/plasma-state-of-matter

[7] Shalom Eliezer, Yaffa Eliezer, The Fourth State of Matter: An Introduction to Plasma Science, IOP, London, UK, 2001

[8] Matsumoto, M., Murakami, and Okuno, Y., Numerical Study on Feasibility of Pulsed-Heat-Source High-Temperature Inert Gas MHD Electrical Power Generation, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., Vol. 51, No. 173, pp. 164-169, 2008

[9] James Braun, Bayindir H. Saracogluy, Thierry E. Magin, Mono-dimensional analysis of the MagnetoHydrodynamic effect in Rotating Detonation Combustors, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, California, USA, 4-8 January 2016

[10] Mahendra Singh Sodha, Sweta Srivastava, Nonequillibrium Effective Conductivity of a Seeded Noble Gas Flowing in a Magnetic Field, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 45, NO. 3, pp.441-445, MARCH 2017

[11] M. Tanaka, Y. Hitotsubashi, and Y. Okuno, Fundamental Study of Radio-Frequency Preionization for Seed-Free Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation, AIAA, JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, online Publication, Publication Date (online), 2017

[12] Rikiya Takahashi , Takayasu Fujino, Numerical Simulation of Frozen Inert Gas Plasma Magnetohydrodynamic Generator with Collisional-Radiative Model,AIAA 14th International Energy Conversion Engineering Conference, Salt Lake City, UT , 25-27 July, 2016.

[13] Rasool Erfani , Hossein Zare-Behtash , Craig Hale , Konstantinos Kontis, Development of DBD plasma actuators: The double encapsulated electrode, Elsevier jou., Volume 109, Pages 132-143, April–May 2015,

[14] Sufia Khalili, Ali Jafarian Dehkordi, Mohammad Hossein Giahi, Investigating the effect of channel angle of a subsonic MHD (Magneto-Hydro-Dynamic) generator on optimum efficiency of a triple combined cycle, Energy, pp. 543-555, 2015

[15] Experimental MHD facility, 2001, www.ihed.ras.ru/mg/MHD.htm

[16] Jackson, William D. , Magnetohydrodynamic Power Generator, AccessScience, McGraw-Hill Education, 2014, DOI: https://doi.org/10.1036/1097-8542.399400

Pulsed MHD Generators, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, Volume 45, Issue 7, PP. 1208 - 1212, 2017

[17] Toru Takahashi, Takayasu Fujino & Motoo 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, pp.192-198, 2014

[18] Daiki Ichinokiyama, Takayasu Fujino, Numerical Analysis of Non-equilibrium Disk Magnetohydrodynamic Generator with Swirl Vanes, AIAA 14th International Energy Conversion Engineering Conference ,Salt Lake City, UT, 25-27 July, 2016

[19] R. Poonthamil1, S. Prakash & Dr. S. Anand Kumar Varma, Enhancement of Power Generation in Thermal Power Plant Using MHD System, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Volume 13, Issue 5 Ver.II, PP 142-146, Sep. - Oct. 2016

[20] Takayasu FUJINO, Advanced Energy and Aerospace Technologies using Magnetohydrodynamics, Mechanical Engineering Congress, Japan, 13-16/9, 2015

[21] L. Hu, H. Kobayashi, Y. Okuno, Performance of a Liquid Metal MHD Power Generation System for Various External Forces, AIAA Propulsion and Energy Forum 12th International Energy Conversion Engineering Conference, Cleveland, OH, US, July 28-30, 2014

[22] Yuriy Metsker1 and Johannes Kugele, Analysis of MHD Generators for Use with Solid Rocket Motors, 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference , July 25-27, 2016

[23] JP Aerospace, hall effectMHD test, December 27th, 2011, jpaerospace.com/blog

[24] R. Balasubramanian, K. Anandhanarayanan, R. Krishnamurthy, Debasis Chakraborty, Magnetohydrodynamic Flow Control of a Hypersonic Cruise Vehicle Based on AJAX Concept, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, Vol. 53, No. 4, July-August 2016

[25] J. T. Lineberry, L. L. Begg, J. H. Castro and R. J. Litchford, Scramjet Driven MHD Power Demonstration - HVEPS Program, 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, San Francisco, USA, June 05 – 08, 2006.

[26] J. T. Lineberry, L. L. Begg, J. H. Castro and R. J. Litchford, Scramjet Driven MHD Power Demonstration - HVEPS Program Overview, 14th AIAA/AHI International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Canberra, Australia, 06- 09 November 2006

[27] Yoshihiko Tamada, Naoyuki Niwa, Toru Takahashi, Takayasu Fujino, Motoo Ishikawa, Influence of Cross-sectional Shape on Generator Performance and Electromagnetic Fluid Phenomena of DCW-MHD enerators for Hypersonic Airplanes ,44th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, San Diego, CA, June 24-27, 2013.

[28] Takayasu Fujino, Motoo Ishikawa, Performance Characteristics of Onboard Hall-Type Magnetohydrodynamic Generator During Earth Reentry Flight, JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol. 31, No. 2,PP. 737-749, March–April 2015

[29] Anton G. Afonin, Vladimir G. Butov, Sergey V. Sinyaev, Viktor A. Solonenko, Gennady A. Shvetsov, Sergey V. Stankevich, Rail Electromagnetic Launchers Powered by