دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مکانیک

گروه مهندسی خودرو

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان

طراحی و مدل سازی سیستم انتقال قدرت خودروی هیبریدی الکتریکی با پیل سوختی

استاد راهنما

دکتر امیر حسین شامخی

نگارش

هادی خدایی

بهمن ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

چکیده

امروزه با توجه به آلودگی‌های ناشی از خودروها و محدودیت‌های سوخت فسیلی، کارخانه‌های خودروسازی گام مهمی در مقابله با این امر برداشته‌اند که از جمله آنها می توان به خودروهای هیبریدی و تکنولوژی پیل‌سوختی اشاره کرد. بازدۀ بالا، آلایندگی کم، مسافت قابل پیمایش بالا، ایمنی مطلوب و قیمت قابل رقابت با خودروهای متداول از جمله ویژگیهای حائز اهمیت برای خودروهای هیبریدی است

سیستم هیبریدی پیل‌سوختی شامل یک پیل‌سوختی، باتری و مبدل دو طرفه DC/DC است. مبدل DC/DC نقش کلیدی در تقسیم توان بین پیل‌سوختی و باتری ایفا می‌کند. در اصل پیل‌سوختی نقش منبع توان اصلی و باتری نقش منبع توان کمکی را دارد. این سیستم در محیط نرم‌افزار شبیه-سازی و در یک سیکل شهری مورد آزمایش قرار گرفته است.

ما در انجام این پروژه دو هدف را دنبال می کنیم؛ اول، رسیدن به بازدهی بالا، و دوم، نگه داشتن سطح شارژ باتری در ناحیه مناسب.

بنابراین استراتژی کنترلی به دو قسمت تبدیل می‌شود:

الف)کنترل سطح شارژ باتری

ب)کنترل بازدهی سیستم

بازدهی سیستم میتواند با کنترل تقسیم توان بین پیل‌سوختی و باتری الکتریکی بهبود یابد و مبدل می‌تواند سطح شارژ باتری را کنترل کند.DC/DCدو طرفه

گاهی نمی‌توان هر دو هدف را به طور موازی پیش برد; از این رو، کنترل سطح شارژ باتری الکتریکی به کنترل بازدهی ارجحیت دارد.

در این پایان‌نامه ۳ نوع پیل‌سوختی در کنار یک باتری مورد آزمایش قرار می‌گیرد تا تحلیل کامل‌تری حاصل شود و ارائه گردد.

واژه های کلیدی

پیل‌سوختی، خودروی هیبریدی، کنترل سطح شارژ باتری، کنترل توان، مدل‌سازی، شبیه‌سازی.

فهرست

فصل اول: مقدمه **۱**
۱-۱- خودروی پیل سوختی ۱
۱-۲- تاریخچه پیل‌سوختی ۲
۱-۳- روش‌های استحصال هیدروژن ۴
۱-۴- منحنی قطبش پیل‌سوختی ۴
۱-۵- اجزای سیستم محرکه‌ی خودروی هیبرید پیل‌سوختی ۵
۱-۵-۱- پیل‌های سوختی غشاء الکترولیت پلیمری ۶
۱-۵-۲- منابع حداکثر کننده‌ی توان و ذخیره‌ی انرژی ۷
۱-۵-۲-۱- باتری‌ها ۷
۱-۵-۲-۲- ابر خازن‌ها ۱۰
۱-۵-۳- مبدل جریان مستقیم ۱۱
۱-۵-۴- موتور الکتریکی و سیستم انتقال قدرت ۱۱
۱-۶- کارهای انجام یافته ۱۳
فصل دوم: مدل‌سازی خودروی هیبرید الکتریکی پیل‌سوختی **۱۶**
۲-۱- سیستم تولید توان پیل‌سوختی ۱۶
۲-۱-۱- مدل کمپوسور هوا ۱۸
۲-۱-۲- مدل منیفلد ۲۰
۲-۱-۲-۱- منیفلد تغذیه ۲۰
۲-۱-۲-۲-منیفلد تخلیه ۲۱
۲-۱-۳- مدل خنک کن هوا (استاتیکی) ۲۲
۲-۱-۴-مدل رطوبت‌زن (استاتیکی) ۲۲
۲-۱-۵- مدل استک پیل‌سوختی ۲۴
۲-۱-۵-۱- مدل ولتاژ پیل‌سوختی ۲۴
۲-۱-۵-۲- مدل جریان کاتد ۲۸
۲-۱-۵-۳- مدل جریان آند ۳۰
۲-۱-۵-۴-مدل هیدارسیون ۳۲
۲-۱-۶- مدل سیستم خنک‌کاری پیل سوختی ۳۳
۲-۲-مبدل جریان مستقیم ۳۴
۲-۳-باتری ۳۵
۲-۴-سیستم خودرو ۳۷
۲-۴-۱- سیکل رانندگی ۳۷
۲-۴-۲-مدل‌سازی خودرو ۳۷

۲-۵- موتور الکتریکی و سیستم انتقال قدرت ۳۸
فصل سوم: باتری و مدل‌سازی واحد مدیریت باتری ۴۰
۳-۱- سامانه باتری ۴۰
۳-۱-۱- پیش‌زمینه ۴۱
۳-۱-۲- واحد مدیریت باتری ۴۲
۳-۱-۳- هدف ۴۲
۳-۲- نظریه باتری‌ها ۴۳
۳-۲-۱- ساختار باتری‌ها ۴۳
۳-۲-۱-۱- سلول‌های اولیه و ثانویه ۴۳
۳-۲-۱-۲- ساختار سلول ۴۳
۳-۲-۱-۳-- نصب سلولها ۴۴
۳-۲-۱-۴- نسبت C ۴۵
۳-۲-۱-۵- فناوری باتری‌های $LiFePO_4$ ۴۶
۳-۲-۲- باتری‌ها در خودروی الکتریکی ۴۷
۳-۲-۲-۱- اقتصاد خودروی الکتریکی ۴۷
۳-۲-۲-۲- وزن باتری ۴۸
۳-۲-۲-۳- دما ۴۸
۳-۲-۲-۴- مصارف توان در وسیله نقلیه ۵۰
۳-۲-۳-شارژ شدن ۵۰
۳-۲-۳-۱- فناوری‌های شارژ شدن ۵۰
۳-۲-۳-۲- تاثیر شارژ بیش از حد ۵۱
۳-۲-۳-۳- ترمزگیری بازتولید کننده ۵۱
۳-۲-۴- تاثیرات محیطی و بازیافت ۵۲
۳-۳- نظریه واحد مدیریت باتری ۵۳
۳-۳-۱- وضعیت سطح شارژ باتری ۵۳
۳-۳-۱-۱- اندازه‌گیری ولتاژ ۵۳
۳-۳-۱-۲- اندازه‌گیری کولن ۵۵
۳-۳-۱-۳- راه‌حل‌های دیگر برای تخمین (SoC) ۵۵
۳-۳-۱-۴- قابلیت اطمینان (SoC) ۵۵
۳-۳-۲- تعادل سلول‌ها ۵۶
۳-۳-۲-۱- متعادل‌سازی در اتصال سلول‌ها به طور سری و موازی ۵۷
۳-۳-۲-۲- متعادل‌سازی غیرفعال سلول‌ها ۵۷
۳-۳-۲-۳- متعادل‌سازی فعال سلول‌ها ۵۸

۳-۳-۲-۴- الگوریتم متعادل‌سازی ۵۹
۳-۳-۳- وظایف ایمنی واحد مدیریت باتری (BMU) ۵۹
۳-۳-۴- ضریب اطمینان و تلرانس خطا ۶۰
۳-۳-۴-۱-بسته باتری ۶۰
۳-۳-۴-۲- واحد مدیریت باتری ۶۱
۳-۳-۴-۳- روش‌های شارژ شدن ۶۱
۳-۴-مدل‌سازی باتری ۶۲
۳-۴-۱- باتری ۶۲
۳-۴-۲- ویژگی های سلول‌ها ۶۳
۳-۴-۳- واحد مدیریت باتری ۶۳
۳-۴-۳-۱- سطح شارژ باتری ۶۴
۳-۴-۳-۲- محدودیت ها ۶۵
فصل چهارم: شبیه‌سازی و تحلیل خودروی هیبریدی الکتریکی- پیل‌سوختی ۶۶
۴-۱- شبیه سازی خودروی هیبرید الکتریکی- پیل سوختی ۶۶
۴-۱-۱- تعریف نوع عملکرد ۷۰
۴-۱-۱-۱-حالت باز تولید ۷۰
۴-۱-۱-۲-حالت خودروی الکتریکی ۷۱
۴-۱-۱-۳-حالت شارژ شدن ۷۱
۴-۱-۱-۴-حالت تخلیه شارژ ۷۱
۴-۱-۱-۵-حالت پیل سوختی ۷۲
۴-۲-توزیع توان بین پیل‌سوختی و باتری الکتریکی ۷۲
۴-۳- شبیه سازی ۷۳
۴-۴- بهینه‌سازی توان پیل‌سوختی و باتری ۷۵
فصل پنجم: نتیجه‌گیری ۸۲
مقالات ارائه شده ۸۵
منابع و مراجع ۸۶

فهرست شکل‌ها

شکل۱-۱-منحنی قطبش سلول پیل سوختی ۵
شکل۱-۲-اجزای سیستم خودروی هیبرید الکتریکی-پیل سوختی ۵
شکل ۱-۳-محدوده سطح شارژ باتری ۹
شکل ۱-۴- قسمت های مختلف موتور و سیستم انتقال قدرت در خودروی هوندا FCX Clarity ۱۲
شکل ۱-۵- تصویری از یک موتور الکتریکی و سیستم انتقال قدرت ۱۳
شکل ۲-۱- نمودار جعبه ای سیستم ۱۷
شکل ۲-۲- سیستم تغذیه واکنش‌گرها ۱۸
شکل ۲-۳- نقشه کمپرسور ۱۹
شکل ۲-۴- ولتاژ مدار باز و تلفات موجو د در پیل سوختی ۲۶
شکل ۲-۵ - جریان جرمی کاتد ۲۹
شکل ۲-۶- جریان جرمی آند ۳۱
شکل ۲-۷- شماتیک خودروی هیبرید پیل‌سوختی ۳۴
شکل۳-۱- نحوه اتصال سلول‌ها ۴۵
شکل ۳-۲- تاثیرات دما بر ظرفیت باتری لیتیوم-یون ۴۷
شکل ۳-۳- رابطه بین وزن و برد باتری ۴۸
شکل ۳-۴- انرژی آزاد شده در فناوری‌های مختلف باتری را زمانی که فرار گرمایی رخ می-دهد، نشان می‌دهد ۴۹
شکا ۳-۵- منحنی تخلیه شارژ برای سلول ۱۰(Ah) $\mathrm{liFeP}O_4$ ۵۴
شکل ۳-۶- شکل سمت چپ ولتاژ مدار باز و شکل سمت راست ولتاژ مدار بسته بارگذاری شده را نشان می‌دهد ۵۴
شکل ۳-۷- مثالی از عدم تعادل در باتری. سمت چپ عدم تعادل در حالت تمام شارژ و سمت راست عدم تعادل در حالت تخلیه شارژ. ۵۶
شکل ۳-۸- مدار متعادل‌سازی غیر فعال ۵۷
شکل۳-۹- مثالی از متعادل‌سازی غیرفعال ۵۷
شکل ۳-۱۰-مثالی از متعادل‌سازی فعال ۵۸
شکل ۳-۱۱- مدار متعادل‌سازی فعال ۵۸
شکل ۳-۱۲- مدل‌سازی واحد مدیریت باتری ۶۴
شکل ۳-۱۳- مدل‌سازی واحد مدیریت باتری ۶۴
شکل ۳-۱۴- حالت گذار ارائه شده توسط پوپ ۶۵
شکل ۴-۱- شماتیکی از سیستم خودروی هیبرید الکتریکی- پیل سوختی در محیط نرم‌افزار ۶۷

شکل ۴-۲- شبیه‌سازی سامانه مدیریت توان ۶۸
شکل ۴-۳- شبیه‌سازی دینامیک خودرو ۷۰
شکل ۴-۴- حالت های عملکردی خودروی هیبریدی ۷۱
شکل ۴-۵- با ورودی سرعت و شتاب بیانگر گشتاور و توان برای باتری، پیل سوختی و موتور می‌باشد ۷۳
شکل ۴-۶- منحنی های شدت جریان و ولتاژ برای پیل سوختی و باتری و منحنی SOC و شدت جریان مبدل مستقیم ۷۴
شکل ۴-۷-سیکل استاندارد رانندگی US.06 ۷۵
شکل ۴-۸- منحنی شتاب برای پیل سوختی ۱۰۰ کیلوواتی ۷۶
شکل ۴-۹- منحنی شدت جریان برای پیل سوختی ۱۰۰ کیلوواتی ۷۶
شکل ۴-۱۰- منحنی توان برای پیل سوختی ۱۰۰ کیلوواتی، باتری ۲۵ کیلوواتی و موتور ۷۷
شکل ۴-۱۱- منحنی سطح شارژ باتری برای پیل سوختی ۱۰۰ کیلوواتی و باتری ۲۵ کیلوواتی ۷۷
شکل ۴-۱۲- منحنی شدت جریان برای پیل سوختی ۷۰ کیلوواتی و باتری ۲۵ کیلوواتی ۷۸
شکل ۴-۱۳- منحنی توان باتری برای پیل سوختی ۷۰ کیلوواتی و باتری ۲۵ کیلوواتی ۷۸
شکل ۴-۱۴- منحنی سطح شارژ باتری برای پیل سوختی ۷۰ کیلوواتی و باتری ۲۵ کیلوواتی ۷۹
شکل ۴-۱۵- منحنی ولتاژ پیل سوختی و باتری برای پیل‌سوختی۷۰ کیلوواتی و باتری ۲۵ کیلوواتی ۷۹
شکل ۴-۱۶- منحنی شدت جریان برای پیل سوختی۵۰کیلوواتی و باتری ۲۵ کیلوواتی ۸۰
شکل ۴-۱۷- منحنی توان برای پیل سوختی ۵۰کیلوواتی، باتری ۲۵ کیلوواتی و موتور ۸۰
شکل ۴-۱۸- منحنی سطح شارژ باتری برای پیل سوختی ۵۰ کیلوواتی و باتری ۲۵ کیلوواتی ۸۱
شکل ۵-۱-منحنی سطح شارژ باتری برای پیل سوختی‌های مختلف ۸۳

فهرست جداول

جدول۳-۱- مشخصات باتری ها ۴۶
جدول۳-۲- مشخصات باتری ۶۲
جدول۳-۳- ویژگی‌های سلول‌های به کار رفته شده ۶۳
جدول ۴-۱- پارامترهای استفاده شده در پیل سوختی ۶۷
جدول ۴-۲- مشخصات دینامیکی خودرو ۶۹
جدول ۴-۳- حالت عملکردی با توجه به سطح شارژ باتری و قدرت موتور ۷۲
جدول ۵-۱- مقایسه نتایج پیل‌سوختی ۸۴

فصل اول

مقدمه

۱-۱- خودروی پیل سوختی

پیل‌های سوختی فناوری جدیدی برای تولید انرژی هستند که بدون ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی، از ترکیب مستقیم بین سوخت و اکسیدکننده، انرژی الکتریکی با بازدهی بالا تولید می‌کنند. تولید مستقیم الکتریسیته جایگزینی برای چرخه کارنو جهت تبدیل انرژی شیمیایی حاصل از سوخت به انرژی گرمایی و مکانیکی و در نهایت الکتریسیته می‌باشد که اتلاف انرژی را به حداقل ممکن می‌رساند.

خودروی پیل سوختی یا خودروی الکتریکی پیل سوختی[1]نوعی خودروی هیدروژنی است که از یک پیل سوختی برای ایجاد الکتریسیته و به کار انداختن موتور الکتریکی استفاده می‌کند. الکتریسیته‌ی ایجاد شده برای حرکت موتور از ترکیب هیدروژن و اکسیژن هوا در پیل‌سوختی به دست می‌آید. در اصل یک پیل‌سوختی هیدروژنی مانند یک باتری عمل کرده و الکتریسیته تولید می‌کند، اما به جای آن که مانند باتری دوباره شارژ شود بایستی مخزن آن را با هیدروژن پر کرد. تمام پیل‌های سوختی از سه بخش تشکیل شده‌اند: الکترولیت، آند و کاتد. واکنش کلی در پیل‌سوختی به صورت زیر است:

آند: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$

کاتد: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

واکنش کلی: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O +$ گرما

۱-۲- تاریخچه پیل‌سوختی

اگر چه پیل‌سوختی به تازگی به عنوان یکی از راهکارهای تولید انرژی الکتریکی مطرح شده است ولی تاریخچه آن به قرن نوزدهم و کار دانشمند انگلیسی سرویلیام گرو[2] برمی‌گردد. او اولین پیل‌سوختی را در سال ۱۸۳۹ با سرمشق گرفتن از واکنش الکترولیز آب، طی واکنش معکوس و در حضور کاتالیست پلاتین ساخت.

واژه "پیل‌سوختی" در سال ۱۸۸۹ توسط لودویک مند[3] و چارلز لنجر[4] به کار گرفته شد. آنها نوعی پیل‌سوختی که هوا و سوخت ذغال‌سنگ را مصرف می‌کرد، ساختند. تلاش‌های متعددی در اوایل قرن بیستم در جهت توسعه پیل‌سوختی انجام شد که به دلیل عدم درک علمی مسئله هیچ یک موفقیت-آمیز نبود. علاقه به استفاده از پیل‌سوختی با کشف سوخت‌های فسیلی ارزان و رواج موتورهای بخار کمرنگ گردید. در آن دوره به علت عدم نگرانی درباره سوخت‌های فسیلی، نیازی به توسعه پیل-سوختی دیده نمی‌شد؛ از این جهت فواصل زمانی بین تحقیقات انجام گرفته روی پیل‌سوختی بسیار زیاد می‌بود.

فصلی دیگر از تاریخچه تحقیقات پیل‌سوختی توسط فرانسیس بیکن[5] از دانشگاه کمبریج انجام شد. او در سال ۱۹۳۲ بر روی ماشین ساخته شده توسط مند و لنجر اصلاحات بسیاری انجام داد. این اصلاحات شامل جایگزینی کاتالیست گران‌قیمت پلاتین با نیکل و همچنین استفاده از هیدروکسیدپتاسیم قلیایی به جای اسید سولفوریک به دلیل مزیت عدم خورندگی آن می‌باشد. این اختراع که اولین پیل‌سوختی قلیایی بود، "Bacon Cell" نامیده شد. او ۲۷ سال تحقیقات خود را

[1]. Fuel cell Electric Vehicle (FCEV)
[2] Sir william grove
[3] Ludwig mond
[4] Charles langer
[5] Francis bacon

ادامه داد تا توانست یک پیل‌سوختی کامل و کارا ارائه نماید. بیکن در سال ۱۹۵۹ پیل‌سوختی با توان ۵ کیلووات را تولید نمود که می‌توانست نیروی محرکه یک دستگاه جوشکاری را تامین نماید.

تحقیقات جدید در این عرصه از اوایل دهه ۶۰ میلادی با اوج گیری فعالیت‌های مربوط به تسخیر فضا توسط انسان آغاز شد. مرکز تحقیقات ناسا در پی تامین نیرو جهت پروازهای فضایی با سرنشین بود. ناسا پس از رد گزینه‌های موجود نظیر باتری (به علت سنگینی)، انرژی خورشیدی(به علت گران بودن) و انرژی هسته‌ای (به علت ریسک بالا) پیل‌سوختی را انتخاب نمود.

تحقیقات در این زمینه به ساخت پیل‌سوختی پلیمری توسط شرکت جنرال الکتریک منجر شد. ایالات متحده فنآوری پیل سوختی را در برنامه فضایی جمینی[1] استفاده نمود که اولین کاربرد تجاری پیل-سوختی بود.

پرت[2] و ویتنی[3] دو سازنده موتور هواپیما پیل‌سوختی قلیایی بیکن را به منظور کاهش وزن و افزایش طول عمر اصلاح نموده و آن را در برنامه فضایی آپولو به کار بردند. در هر دو پروژه پیل‌سوختی به عنوان منبع انرژی الکتریکی برای فضاپیما استفاده شدند. اما در پروژه آپولو پیل‌های سوختی برای فضانوردان آب آشامیدنی نیز تولید میکرد. پس از کاربرد پیلهای سوختی در این پروژه‌ها، دولت‌ها و شرکت‌ها به این فنآوری جدید به عنوان منبع مناسبی برای تولید انرژی پاک در آینده توجه روزافزونی نشان دادند.

از سال ۱۹۷۰ فنآوری پیل‌سوختی برای سیستم‌های زمینی توسعه یافت. تحریم نفتی از سال۱۹۷۳-۱۹۷۹ موجب تشدید تلاش دولت‌مردان امریکا و محققین در توسعه این فنآوری به جهت قطع وابستگی به واردات نفتی‌گشت.

در طول دهه ۸۰ تلاش محققین بر تهیه مواد مورد نیاز، انتخاب سوخت مناسب و کاهش هزینه استوار بود. همچنین اولین محصول تجاری جهت تامین نیرو محرکه خودرو در سال۱۹۹۳ توسط شرکت بالارد[4] ارائه شد. گزارش کامل کارهای انجام گرفته از سال ۱۹۹۳ به بعد در بخش (۱-۶) آمده است.

تا سال ۲۰۰۹ وسایل نقلیه‌ی موتوری بیشترین مصرف بنزین در آمریکا را داشته‌اند و بیش از ۶۰٪ از مونوکسید کربن و ۲۰٪ از گازهای گلخانه‌ای در این کشور را تولید کرده‌اند. در نقطه‌ی مقابل، وسیله‌ی نقلیه با سوخت هیدروژن آلاینده‌های کمی منتشر می‌کند و عمدتاً آب و گرما تولید می‌کند؛ اگرچه تولید و استحصال هیدروژن انتشار آلاینده‌ها را در پی دارد؛ اما یک راه برای جلوگیری از این پدیده تولید هیدروژن با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است.

[1] Gemini
[2] Prett
[3] Witney
[4] ballard

۱-۳- روش‌های استحصال هیدروژن

برای استحصال هیدروژن روش‌های صنعتی مختلفی وجود دارد. چند روش مهم عبارتند از:

الف) رفرمینگ بخار آب[۱]:

امروزه اصلی‌ترین تکنولوژی، تولید مستقیم هیدروژن از هیدورکربن‌ها است که رفرمینگ نامیده می‌شود. در حال حاضر سوخت‌های فسیلی منبع اصلی برای استحصال هیدروژن هستند. برای مثال هیدروژن را می‌توان از گاز طبیعی[۲] با راندمان حدود ۸۰٪ بدست آورد.

ب) الکترولیز آب[۳]:

این روش را می‌توان در دستگاه‌های الکترولیز ساده با ولتاژهای پایین اجرا کرد اما در مقیاس صنعتی از سیستم‌های فشار بالا و در دمای بالا برای بهبود راندمان استفاده می‌شود؛ برای مثال فرآیندهای آزمایشگاهی شامل الکترولیز در دمای $800^{\circ}c$ هستند؛ بنابراین بخش عمده‌ای از انرژی مورد نیاز برای استحصال هیدروژن به جای الکتریسیته، گرما است.

ج) تجزیه‌ی شیمیایی آب در اثر حرارت[۴]:

آب در دماهای حدود $2500^{\circ}c$ به طور خودجوش شروع به تجزیه می‌کند که این فرآیند تجزیه‌ی شیمیایی در اثر حرارت نامیده می‌شود و روشی دیگر برای به دست آوردن هیدروژن می‌باشد. البته لازم به ذکر است که باید از کاتالیست‌هایی استفاده شود که این واکنش در دماهای پایین‌تری اتفاق بیفتد زیرا در غیر این صورت تجهیزات و لوله‌های مورد استفاده در فرآیند، قابلیت تحمل این دما را ندارند.

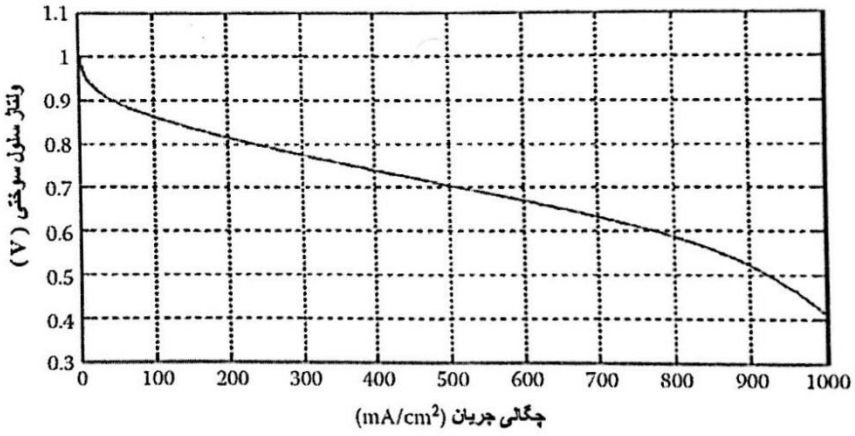
۱-۴- منحنی قطبش[۵] پیل‌سوختی

تغییرات جریان الکتریکی که از پیل‌سوختی کشیده می‌شود بر ولتاژ آن تأثیر می‌گذارد. هرچه جریان بیشتری کشیده شود، ولتاژ ترمینال پیل بیشتر افت می‌کند و بالعکس. این خصوصیت در منحنی قطبش نمایان می‌شود. در شکل (۱-۱) یک منحنی قطبش مربوط به یک پیل‌سوختی خاص نشان داده شده است. در این نمودار ولتاژ پیل براساس چگالی جریان نشان داده می‌شود. هنگامی که جریان کشیده شده از پیل صفر می‌باشد. ولتاژ ترمینال پیل برابر با ولتاژ مدار باز یا ولتاژ نرنست[۶] است. در

---

1. Steam Reforming
2. Natural gas
3. Water Electrolysis
4. Water Thermolysis
5. Polarization curve
6. Nernst

فصل دوم در بخش مربوط به مدل ولتاژ پیل‌سوختی، در مورد چگالی جریان و ولتاژ مدار باز توضیح داده می‌شود.



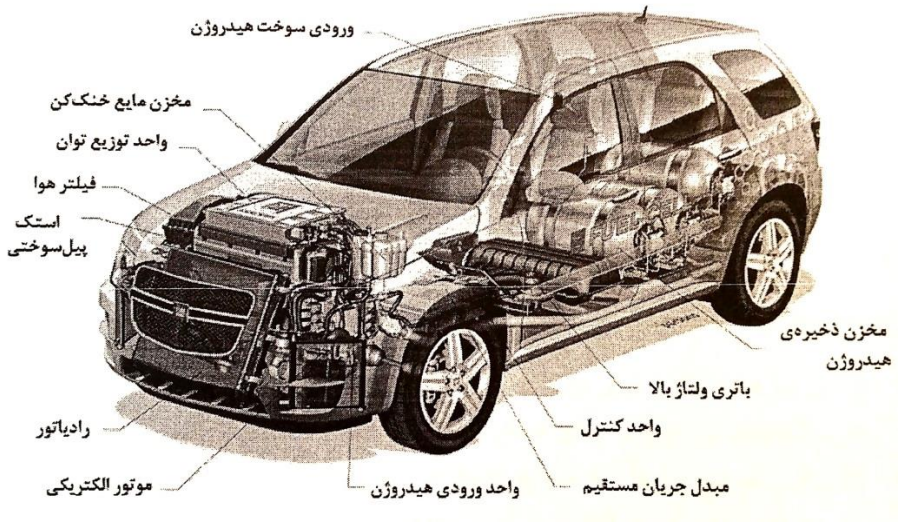
شکل۱-۱-منحنی قطبش سلول پیل سوختی[۱]

۱-۵- اجزای سیستم محرکه‌ی خودروی هیبرید پیل‌سوختی

مهم‌ترین اجزای سیستم محرکه‌ی یک خودروی هیبرید پیل‌سوختی عبارتند از:

- پیل‌سوختی پلیمر الکترولیت
- منبع کمکی (باتری یا ابر خازن[1])
- مبدل جریان مستقیم[2]
- موتور الکتریکی و سیستم انتقال قدرت

[1]. Ultra capacitor
[2]. DC-DC converter



شکل۱-۲-اجزای سیستم خودروی هیبرید الکتریکی-پیل سوختی[۲]

در شکل (۱-۲) نمایی از یک خودروی هیبرید با سیستم تولید توان پیل‌سوختی نمایش داده شه است. قسمت‌های مختلف این خودرو از قبیل استک پیل‌سوختی، باتری، مبدل جریان مستقیم، موتور الکتریکی و مخزن فشار بالای ذخیره هیدروژن در این شکل مشاهده می‌شوند.

۱-۵-۱- پیل‌های سوختی غشاء الکترولیت پلیمری[۱]

پیل‌های سوختی انواع مختلف دارند، مانند پیل‌های سوختی غشاء الکترولیت پلیمری، پیل‌های متانول مستقیم، پیل‌های اسید فسفریک، پیل های کربنات مذاب، پیل‌های اکسید جامد و پیل‌های سوختی بازیاب. پیل‌های سوختی الکترولیت پلیمر از یک غشاء پلیمری جامد به عنوان الکترولیت استفاده می‌کنند. این پلیمر هنگامی که از آب اشباع می‌شود، پروتون‌ها را از خود عبور می‌دهد اما جلوی الکترون‌ها را می‌گیرد. پیل‌های سوختی پلیمر الکترولیت برای خودروها بهترین منبع تولید توان هستند و بسیاری معتقدند که در آینده جای موتورهای احتراق داخلی بنزینی و دیزلی را خواهند گرفت. این پیل‌ها به آن علت در کاربردهای خودرویی مورد توجه هستند که دمای عملکردی پایین و زمان راه‌اندازی[۲] کوتاهی دارند. علاوه بر آن راندمان حدود ۴۰٪ تا ۶۰٪ دارند و می‌توانند خروجی خود را با توجه به تقاضای بار روی خودرو تغییر دهند. امروزه این پیل‌ها توسعه یافته‌اند و توانی برابر با یک وات تا دو کیلووات دارند[۶۱].

پیل‌های سوختی پلیمر الکترولیت مزیت‌هایی نسبت به دیگر انواع پیل‌های سوختی مانند پیل‌های سوختی اکسید جامد[۳]دارند.

از مزایای این پیل‌ها می‌توان به موار زیر اشاره کرد:

[1]. Polymer Electrolyte Membrane (PEM)
[2]. Start up
[3]. Solid Oxide fuel cell (SOFC)

- الکترولیت در این پیل‌ها جامد است که باعث می‌شود خوردگی آن کمتر شود.
- دمای کارکرد پایین است (۲۵°c تا ۹۰°c) [۳]
- زمان راه‌اندازی کوتاه است
- این گونه پیل‌ها راحت‌تر درزگیری و آب‌بندی می‌شوند.
- سبک‌تر هستند و از لحاظ اندازه فشرده‌تر و کوچک‌تر هستند.

که این ویژگی‌ها آن‌ها را برای کاربردهای خودرویی بسیار ایده‌ال می‌سازد.

اما برخی معایب آن‌ها عبارتند از:

- از این پیل‌ها نمی‌توان برای تولید همزمان توان و گرما[1] مانند آنچه در پیل‌های اکسید جامد داریم استفاده کرد چرا که دمای عملکردی پیل‌های پلیمر الکترولیت پایین است.
- الکترولیت در این پیل‌ها باید همواره توسط آب اشباع شود در غیر این صورت هم شاهد افت توان خواهیم بود و هم به الکترولیت آسیب جدی می‌رسد.
- دارای کاتالیست‌های گران قیمت هستند.
- این‌گونه پیل‌ها به ناخالصی‌های موجود در سوخت حساس هستند.

۱-۵-۲- منابع حداکثر کننده‌ی توان و ذخیره‌ی انرژی[2]

چند گونه از منابع انرژی که برای خودروهای هیبرید پیل‌سوختی استفاده می‌شود عبارتند از:

- باتری‌های شیمیایی[3]
- ابرخازن‌ها و سوپرخازن‌ها[4]

۱-۵-۲-۱- باتری‌ها

باتری‌ها دستگاه‌هایی الکتروشیمیایی هستند که در هنگام شارژ شدن انرژی الکتریکی را به انرژی شیمیایی و در هنگام دشارژ (خالی) شدن انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. یک

[1]. Cogeneration
[2]. Peaking Power Sources and Energy Storages
[3]. Chemical Batteries
[4]. Super capacitors

باتری از چندین سلول[1] تشکیل شده که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. یک سلول یک واحد مستقل و کامل است که تمامی ویژگی‌های الکتروشیمیایی را داراست [۴].

اساساً یک سلول باتری شامل ۳ عنصر اولیه می‌باشد:

- دو الکترود (مثبت و منفی) که درون الکترولیت قرار گرفته‌اند.
- الکترولیت

برای استفاده از منابع ذخیره انرژی در کاربردهای خودرویی باید به برخی از الزامات آن ها نظیر انرژی ویژه[2]، توان ویژه[3]، بازده، نگهداری، مدیریت، هزینه، سازگاری با محیط زیست و امنیت توجه نمود.

برای مثال برای کاربرد در خودروی الکتریکی[4] انرژی ویژه مهمترین پارامتر است زیرا برد خودرو به آن بستگی مستقیم دارد. از طرفی در خودروهای هیبریدی انرژی ویژه از اهمیت کمتر برخوردار است و توان ویژه مهم‌ترین مشخصه است چرا که تمام انرژی توسط پیل‌سوختی تأمین می‌شود و از باتری به عنوان منبع توان اضافی برای تضمین عملکرد خودرو به خصوص در شتاب‌گیری، شیب‌پیمایی و ترمزگیری بازیاب بهره گرفته می‌شود.

سازندگان باتری معمولاً باتری را با ظرفیت آن (آمپر-ساعت) معرفی می‌کنند که این ظرفیت با یک عدد بیان می‌شود که عبارت است از آمپر ساعتی که از باتری در حال تخلیه شارژ بدست می‌آید در صورتی که باتری در ابتدا کاملاً شارژ باشد و این تخلیه بار تا زمانی که ولتاژ ترمینال به ولتاژ قطع[5] برسد صورت گیرد. باید خاطر نشان کرد که یک باطری معمولاً در نرخ جریان‌های تخلیه مختلف، آمپر ساعت‌های مختلفی دارد و عموماً، ظرفیت با بزرگ‌تر شدن در نرخ جریان‌های تخلیه، کاهش می‌یابد. معمولاً باتری‌سازان عدد آمپر ساعت را همراه با نرخ جریان بیان می‌کنند. برای مثال، یک باتری با برچسب ۱۰۰Ah در نرخ C/5 دارای ظرفیت ۱۰۰Ah در نرخ تخلیه شارژ 5-h می‌باشد. (جریان تخلیه شارژ = 100/5 = 20 A).

پارامتر مهم دیگر در باتری سطح شارژ[6] آن است. سطح شارژ عبارت است از نسبت ظرفیت باقی‌مانده به ظرفیت تمام شارژ. با این تعریف، یک باتری کاملاً پر، سطح شارژی برابر با ۱۰۰٪ و یک باتری کاملاً خالی سطح شارژی برابر با ۰٪ دارد.

- **محدوده سطح شارژ باتری**

---

1. Cell
2. Specific energy
3. Specific power
4. Electic Vehicle (EV)
5. Cut off
6. State of charge (SOC)

عمر باتری همواره محدودیت‌هایی را برای انرژی در دسترس آن باعث می‌شود. هنگامی که سطح شارژ باتری نزدیک به صفر است و باتری تقریباً خالیست، تعداد سیکل‌های شارژ و تخلیه بسیار کاهش می‌یابد [۴].

برای سطح شارژ سه حالت مهم وجود دارد که در طراحی مدنظر قرار می‌گیرند و عبارتند از:

- بیشینه‌ی سطح شارژ که عموماً ۱۰۰٪ در نظر گرفته می‌شود.
- سطح شارژ مطلوب

شکل ۱-۳-محدوده سطح شارژ باتری

در شکل (۱-۳) کمینه‌ی سطح شارژ ۵۰٪ است و سطح شارژ مطلوب ۷۵٪ می‌باشد. محدوده‌ی مطلوب سطح شارژ شامل چند درصد بالاتر و پایین‌تر از سطح مطلوب است و بازه‌ی آن بستگی به توانایی سیستم کنترلی و سیکل رانندگی دارد. در سطح شارژهای بالاتر از محدوده‌ی مطلوب باتری هرگز توسط کنترلر شارژ نمی‌شود و این محدوده به ترمزگیری بازیاب اختصاص داده می‌شود. در سطح شارژهای بین محدوده‌ی مطلوب و محدوده‌ی غیر مجاز باتری یا می‌تواند تا محدوده‌ی مطلوب شارژ گردد یا این که تا سطح شارژ ۵۰٪ تخلیه شده و سپس شارژ گردد. در این محدوده باتری به کمک پیل‌سوختی می‌آید تا توان مورد نیاز موتور الکتریکی را تأمین کند.

- **انواع باتری‌ها:**

باتری‌هایی که می‌توان از آن‌ها در خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی استفاده کرد عبارتند از:

- باتری سرب – اسید[1]

[1]. Lead – acid

- باتری‌های با پایه نیکل از جمله نیکل آهن، نیکل کادمیوم و نیکل هیدرید فلزی[1]
- باتری‌های با پایه لیتیوم مانند لیتیوم – پلیمر[2] و لیتیوم – یون[3]

اما باتری‌های با پایه‌ی لیتیوم بهترین گزینه برای خودروهای هیبرید هستند.

لیتیوم سبک‌ترین فلز است و از نقطه نظر الکتروشیمیایی خصوصیات بسیار جالبی دارد. در واقع این فلز اجازه‌ی یک ولتاژ ترمودینامیکی بسیار بالا را می‌دهد که حاصل آن انرژی ویژه و توان ویژه بسیار بالاست.

- **باتری لیتیوم – یون:**

از اولین آگهی در مورد باتری لیتیوم – یون در سال ۱۹۹۱ تاکنون، یک جهش شگرف در حوزه‌ی تکنولوژی این گونه باتری‌ها ایجاد شده است و به آن‌ها به عنوان بهترین باتری قابل شارژ مجدد در آینده نگریسته می‌شود. استفاده از باتری‌های لیتیوم – یون در خودروهای الکتریکی با موفقیت‌های بسیار روبرو بوده است [۵]. اگرچه هنوز این باتری‌ها در مرحله توسعه هستند اما برای کاربرد خودرویی کاملاً قابل قبول می‌باشند.

۱-۵-۲-۲- ابر خازن‌ها

در خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی، پروفیل شارژ و تخلیه شارژ منبع ذخیره انرژی مرتباً تغییر می‌کند. توان متوسطی که از منبع ذخیره‌ی انرژی درخواست می‌شود بسیار کمتر از توان ماکزیمم برای شتاب‌گیری و شیب‌پیمایی در یک بازه‌ی زمانی نسبتاً کوتاه است. نسبت توان ماکزیمم به توان متوسط حتی می‌تواند به بیشتر از ۱۰/۱ برسد. در طراحی یک خودروی هیبرید الکتریکی، ظرفیت توان ماکزیمم منبع انرژی بسیار مهم‌تر از ظرفیت انرژی آن است. براساس تکنولوژی حاضر در باتری‌ها، طراحی باید به گونه‌ای باشد که یک تعادل بین انرژی ویژه، توان ویژه و سیکل عمر باتری بوجود آورد. دشواری‌های موجود در هم‌زمان بدست آوردن مقادیر بالا برای انرژی ویژه، توان ویژه و عمر باتری منجر به شد که پیشنهادهایی ارائه شود که منبع انرژی در خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی، به صورت هیبریدی از منبع انرژی و منبع توان باشد. منابع انرژی، عمدتاً باتری‌ها و پیل‌های سوختی، انرژی ویژه‌ی بالایی دارند اما منابع توان، توان ویژه‌ی بالایی دارند. منابع توان می‌توانند توسط منبع انرژی هنگامی که شیب‌پیمایی و شتاب‌گیری وجود ندارد و یا با ترمزگیری بازیاب شارژ شوند. منبع توانی که بسیار مور توجه قرار گرفته است، ابر خازن است.

- **ویژگی‌های ابرخازن‌ها:**

---

1. Ni – MH
2. Li – P
3. Li - I

ویژگی ابرخازن در مقایسه با باتری، توان ویژه‌ی بسیار بالاتر اما انرژی ویژه‌ی بسیار کمتر است. انرژی ویژه‌ی آن در بازه‌ی چند وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد. در حالی که توان ویژه‌ی آن می‌تواند به مقدار ۳ کیلووات بر کیلوگرم برسد که از هرگونه‌ی باتری بسیار بیشتر است. به علت کم بودن چگالی انرژی ویژه و وابستگی ولتاژ ترمینال به سطح شارژ، استفاده از ابر خازن به تنهایی، در خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی به عنوان منبع انرژی مشکل است. اما استفاده‌ی هم‌زمان از باتری و ابرخازن به صورت هیبرید برای سیستم ذخیره‌ی انرژی بسیار کمک کننده است؛ نیاز به انرژی ویژه و توان ویژه به صورت جدا مورد بررسی قرار گرفته، لذا می‌توان باتری را به گونه‌ای طراحی کرد که برای انرژی ویژه و سیکل عمر بهینه شده باشد در حالی که توجه ناچیزی به توان ویژه شود. علاوه بر آن، جریان بالای کشیده شده از باتری و جریان بالای شارژ کننده‌ی باتری توسط ترمز بازیاب کمینه شده و انرژی در دسترس و عمر باتری به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

یک تفاوت عمده‌ی دیگر بین باتری و ابرخازن این است که انرژی در باتری به صورت شیمیایی ذخیره می‌شود در حالی که در ابرخازن بدون تغییر و به صورت الکتریکی ذخیره می‌گردد.

۱-۵-۳- مبدل جریان مستقیم

یک مبدل جریان مستقیم یک مدار الکتریکی است که یک منبع جریان مستقیم را از یک ولتاژ به سطح دیگری از ولتاژ تبدیل می‌کند. علت استفاده از این مبدل در خودروی پیل‌سوختی آن است که ولتاژ خروجی پیل‌سوختی با تغییر جریان کشیده شده از آن تغییر می‌کند. بنابراین برای این که تغییرات ولتاژ در یک محدوده‌ی خاص تغییر کند، از این مبدل استفاده می‌شود. جریان خروجی از مبدل، موتور الکتریکی را تغذیه می‌کند.

۱-۵-۴- موتور الکتریکی و سیستم انتقال قدرت

موتور الکتریکی یک دستگاه الکترومکانیکی است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. اکثر موتورهای الکتریکی از برهم‌کنش میدان‌های مغناطیسی و رساناهای حامل جریان، تولید نیرو می‌کنند. عکس این فرآیند، تولید انرژی الکتریکی از انرژی مکانیکی، توسط ژنراتورها صورت می‌گیرد. برخی از موتورهای الکتریکی می‌توانند به عنوان ژنراتور نیز استفاده شوند؛ برای مثال، موتور رانشی[1] در خودرو هر دو عمل را انجام می‌دهند.

تقریباً تمام موتورها براساس خاصیت مغناطیسی کار می‌کنند. در این موتورها میدان‌های مغناطیسی در روتور و استاتور شکل می‌گیرد. استاتور هسته خارجی و ثابت موتور است و روتور هسته داخلی و متحرک است که به محور خروجی متصل شده و با توجه به میدان تولید شده توسط استاتور، گشتاور تولید می‌کند. از میدان‌های مغناطیسی به وجود آمده، نیرو پدید می‌آید و در نتیجه گشتاوری روی

[1]. Traction motor

محور موتور حاصل می‌شود. یک، یا هر دوی این میدان‌ها باید با دوران موتور تغییر کند. این کار توسط روشن و خاموش کردن قطب‌ها در زمان مناسب یا تغییر در قدرت قطب انجام می‌شود.

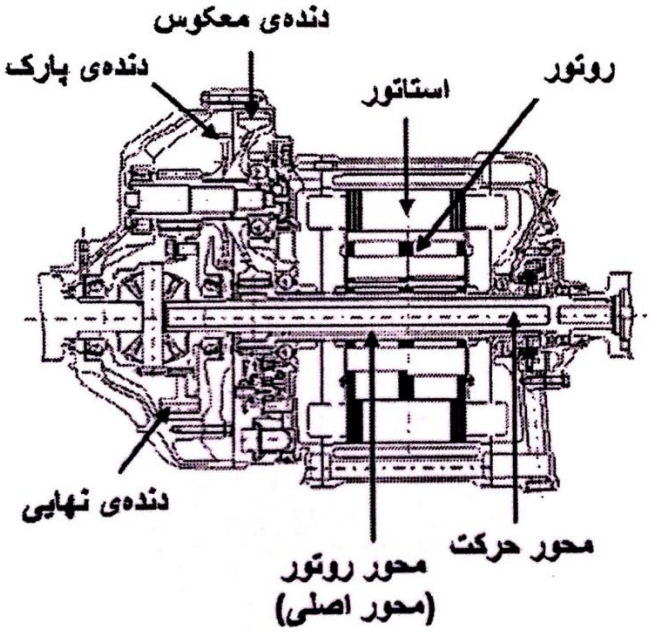
دو گونه ی اصلی از موتورها، موتورهای جریان مستقیم[۱] و موتورهای جریان متناوب[۲] هستند که همان گونه که از نام آن ها پیداست موتورهای جریان مستقیم برای کار کردن با برق جریان مستقیم طراحی شده اند در حالی که موتورهای جریان متناوب با منبع با جریان متناوب به کار می افتند.

از نظر نوع روتور مورد استفاده در موتورها، موتورهای جریان متناوب به دو صورت طبقه بندی می شوند:

موتور سنکرون یا هم زمان[۳] که در آن روتور دقیقاً با سرعت میدان دوار می چرخد. در این نوع موتورها میدان الکتریکی روتور به وسیله یک منبع خارجی تأمین می شود.

موتور آسنکرون[۴] یا القایی که در آن میدان الکتریکی روتور از القای میدان استاتور پدید می آید.

در شکل های (۱-۴) و (۱-۵) یک موتور الکتریکی به همراه سیستم انتقال قدرت که به آن متصل است، مشاهده می شود. به این شکل از متصل شدن موتور و جعبه دنده، پیکربندی هم محور[۵] می گویند؛ زیرا راستای محور روتور و محور حرکت یکی است.



[1]. Direct Current (DC) motors
[2]. Alternating Current (AC) motors
[3]. Synchronous motor
[4]. Asynchronous motor
[5]. Coaxial configuration