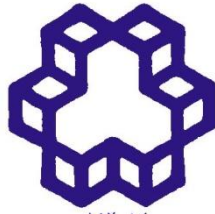


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

طراحی بهینه و آنالیز یک موتور PM بدون جاروبک DC شارمحوری برای خودروی الکتریکی

توسط:

سید مهدی جعفری شیاده

استاد راهنما:

دکتر محمد اردبیلی

زمستان ۹۱

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه خانم / آقای: سید مهدی جعفری شیاده

را با عنوان: طراحی بهینه و آنالیز یک موتور PM بدون جاروبک DC شارمحموری برای خودروی الکتریکی

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی / کارشناسی ارشد تأیید می کند.

امضاء	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	اعضای هیئت داوران
	دانشیار	دکتر محمد اردبیلی	۱- استاد راهنما
			۲- استاد مشاور
			۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر کریم عباسزاده	۴- استاد ممتحن
	استاد	دکتر ابوالفضل واحدی	۵- استاد ممتحن
	دانشیار	دکتر کریم عباسزاده	۶- نماینده تحصیلات تکمیلی

تقديم

تقديم به مادرم

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از تمام کسانی که در طول انجام پروژه مرا یاری کردند تشکر کنم. در ابتدا مخصوصاً از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر اردبیلی که با الطاف و راهنمایی‌هایشان آرامش‌بخش این راه بوده‌اند تشکر می‌کنم. از آقایان مهندس محمد عربلو و مهندس محمد کوچکیان بدلیل روزهای خوبی که گذرانیدیم تشکر می‌کنم. از آقایان مهندس رحیم دلاوری، مهندس عباس نظری، مهندس جواد شهیری، مهندس مهراز امینی، مهندس هادی پورکیا، و مهندس علی احمدیان تشکر می‌کنم. از خانوم مهندس شکیبا خردمند بدلیل کمک‌هایشان در کدنویسی و بهینه‌سازی و از آقای مهندس سامان قلی پور بدلیل کمک‌هایشان در کدنویسی تشکر می‌کنم. از آقای دکتر ویژنگ فی بدلیل راهنمایی‌هایشان در شبیه‌سازی تشکر می‌کنم.

چکیده

در این پایان نامه یک موتور شار محوری بدون جاروبک dc برای استفاده درایو مستقیم در یک خودروی برقی درون شهری طراحی شده است. یک مدل دینامیک ساده از خودرو برای بدست آوردن گشتاور خروجی مطلوب در نظر گرفته شده است و با توجه به فرض قرار گرفتن چهار موتور در چهار چرخ خودرو، گشتاور ۲۵ نیوتن متر و توان ۳,۴ کیلووات برای هر موتور در نظر گرفته شده است. از آنجا که طراحی بهینه برای کاهش گشتاور دندانه‌ای انجام شده است و ترکیب قطب و شیار و نسبت قوس قطب به گام قطب مهم‌ترین تاثیر را بر گشتاور دندانه‌ای دارند، در نتیجه بروی حالت‌های مختلف تعداد قطب و شیار و نوع سیم‌پیچی و تاثیرشان بر گشتاور دندانه‌ای، نیروهای نامقارن وارد شده بر روتور، گشتاور خروجی، تحمل خطا، و شکل موج نیروی ضد محرکه القایی برای عملکرد بدون جاروبک dc بحث شده است و در انتها ساختار استاتور چندتکه‌ای با ۱۰ قطب ۱۲ شیار و عرض دندانه نابرابر انتخاب گردیده است. در طراحی اولیه برای این ساختار، نسبت قوس قطب به گام قطب برابر ۰,۷ کمترین گشتاور دندانه‌ای را در پی خواهد داشت. در صورت افزایش قوس قطب به گام قطب برای داشتن نیروی ضد محرکه القایی دوزنقه‌ای‌تر و عملکرد بدون جاروبک dc بهتر، دیده می‌شود که گشتاور دندانه‌ای تا ۲,۱۵ نیوتن‌متر افزایش می‌یابد. از جایابی بهینه شیار مجازی بروی دندانه‌هایی که کوئل بدور آنها پیچیده نشده است استفاده شده است تا گشتاور دندانه‌ای به مقدار ۰,۹۸ نیوتن‌متر کاهش یابد بدون آنکه کاهش گشتاور خروجی را در پی داشته باشد. ماشین نهایی پس از اعمال شیار مجازی بهینه دارای گشتاور خروجی با رپیل کوچک قابل قبولی می‌باشد.

کلید واژه: موتور آهنربای دائم شار محوری، سیم‌پیچ متمرکز با شیار کسری، بدون جاروبک dc، گشتاور دندانه‌ای، شیار مجازی

۱	۱ - فصل اول مقدمه
۱	۱-۱- خودروهای الکتریکی
۲	۱-۱-۱- خودروهای تمام الکتریکی
۲	۱-۱-۲- خودروهای هیبرید شارژ شونده
۳	۱-۱-۳- خودروهای هیبریدی
۳	۱-۱-۴- خودروهای هیبریدی با سیستم چرخ طیار
۴	۱-۱-۵- خودروهای پیل سوختی
۶	۲-۱- ماشین آهنربای دائم
۶	۱-۲-۱- موتور آهنربا دائم با تغذیه ولتاژ دوزنقه ای (BLDC)
۶	۲-۲-۱- مقایسه BLDC و BLAC
۸	۳-۲-۱- خصوصیات موتور BLDC
۱۰	۴-۲-۱- مشخصات حالت ماندگار موتور
۱۱	۵-۲-۱- کار در سرعت های بالا
۱۳	۶-۲-۱- درایو مستقیم
۱۳	۷-۲-۱- عملکرد موتور آهنربا دائم BLDC
۱۶	۳-۱- مواد مغناطیس دائم
۱۸	۴-۱- انواع ماشین PM برحسب قرار گرفتن PM
۱۹	۵-۱- موتور شارمحوری
۲۰	۱-۵-۱- ساختار تک وجهی
۲۱	۲-۵-۱- ساختار دو وجهی با روتور بیرونی بدون شیار
۲۳	۳-۵-۱- ساختار دو وجهی با روتور بیرونی شیاردار (نوع NN)
۲۵	۴-۵-۱- ساختار دو وجهی با روتور درونی بدون شیار
۲۵	۵-۵-۱- ساختار دو وجهی با روتور درونی شیاردار
۲۶	۶-۵-۱- ساختار چندوجهی
۲۸	۶-۱- شیاردار یا بدون شیار
۲۸	۷-۱- سیم پیچی متمرکز غیر همپوشان
۳۱	۸-۱- توپولوژی آرمیچر چندتکه ای (SAT)
۳۴	۲ - فصل دوم گشتاور دندانه ای

۳۴	۱-۲- مقدمه
۳۵	۲-۲- روش های کاهش گشتاور دندانه ای برای ماشین شارمحوری
۳۵	۱-۲-۲- نسبت تعداد شیارهای استاتور به تعداد قطب های روتور
۳۶	۲-۲-۲- شیار ها و دندانه های مجازی
۳۷	۳-۲-۲- نسبت قوس قطب به گام قطب
۳۸	۴-۲-۲- اریب کردن آهنرباهای روتور
۳۸	۳-۲- مدل کردن تحلیلی گشتاور دندانه ای
۴۲	۳- فصل سوم مشخصات ماشین آهنربا دائم SAT
۴۲	۱-۳- سرعت - گشتاور خودروی برقی
۴۳	۱-۱-۳- نیروی کشش آیرودینامیکی
۴۴	۲-۱-۳- مقاومت غلطشی
۴۵	۲-۳- ترکیب های قطب و شیار
۵۱	۳-۳- ضریب سیم پیچی
۵۲	۴-۳- طول آهنربا
۵۲	۵-۳- ضخامت آهن نگهدارنده
۵۳	۶-۳- تکه استاتور
۵۵	۷-۳- تعداد دور
۵۶	۸-۳- تلفات و بازدهی
۵۶	۱-۸-۳- تلفات مسی
۵۶	۲-۸-۳- تلفات آهنی
۵۷	۳-۸-۳- بازدهی
۵۸	۴- فصل چهارم طراحی نهایی
۵۸	۱-۴- تعیین تعداد قطب و شیار و ساختار استاتور
۷۱	۲-۴- ماشین نهایی
۷۸	۳-۴- محاسبه تلفات
۷۹	۱-۳-۴- تلفات استاتور
۷۹	۲-۳-۴- تلفات روتور
۸۰	۴-۴- افزایش نسبت قوس قطب به گام قطب

۸۳	۵-۴- الگوریتم انبوه ذرات.....
۸۳	۴-۵-۱- ایده کلی الگوریتم انبوه ذرات
۸۶	۴-۵-۲- الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات(PSO)
۸۸	۴-۵-۳- پارامترهای PSO.....
۹۳	۴-۶- جایابی بهینه برای اعمال شیار مجازی در سیم پیچی تک لایه
۹۶	۵- فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۹۶	۵-۱- نتیجه گیری.....
۹۷	۵-۲- پیشنهادات
۹۸	مراجع.....

فهرست شکل ها

- شکل (۱-۱) خودروی لیف ۳
- شکل (۲-۱) نسبت خودروهای مورد استفاده در نروژ تا سال ۲۰۵۰ ۵
- شکل (۳-۱) نمای درونی خودروی تمام الکتریکی از سایت شرکت فورد ۵
- شکل (۴-۱) مقایسه ساختاری خودروها ۵
- شکل (۵-۱) نمایش شکل موج ها در ماشین BLDC و BLAC ۷
- شکل (۶-۱) شکل موج ایده آل یک ماشین bldc ۹
- شکل (۷-۱) یک مدار موتور bldc ۱۰
- شکل (۸-۱) شکل موج های جریان ۱۱
- شکل (۹-۱) شکل موج های نیروی ضد محرکه القایی و جریان استاتور موتور bldc در (a) حالت ایده آل (b) حالت کار در سرعت پایین (c) سرعت بالا ۱۲
- شکل (۱۰-۱) شکل موج های نیروی ضد محرکه القایی و جریان استاتور موتور bldc در سرعت بالا (a) حالت کموتاسیون معمولی (b) حالت کموتاسیون به روش پیشفازی ۱۲
- شکل (۱۱-۱) درایو مستقیم موتور الکتریکی ۱۳
- شکل (۱۲-۱) عملکرد موتور BLDC تحریک فاز a ۱۴
- شکل (۱۳-۱) عملکرد موتور BLDC تحریک فاز b ۱۴
- شکل (۱۴-۱) منحنی مغناطیس زدایی برای آهنرباهای دائم ۱۷
- شکل (۱۵-۱) ماشین PM سطحی با روتور داخلی ۱۸
- شکل (۱۶-۱) موتور شارمحوری ۱۹
- شکل (۱۷-۱) ماشین شارمحوری تک وجهی ۲۰
- شکل (۱۸-۱) ساختار ماشین TORUS شارمحوری بدون شیار ۲۱
- شکل (۱۹-۱) ساختار استاتور و روتور ماشین TORUS-NS ۲۲
- شکل (۲۰-۱) جهت شار در ماشین TORUS-NS ۲۲
- شکل (۲۱-۱) ماشین TORUS شار محوری شیاردار ۲۳
- شکل (۲۲-۱) ساختار اتصال پشت به پشت مورد استفاده در ماشین های آهنربا دائم بدون شیار و شیار دار (نوع NN) ۲۴
- شکل (۲۳-۱) الف) مسیر شار ماشین TORUS شیاردار نوع NN ب) مسیر شار ماشین TORUS شیاردار نوع NS ۲۴
- شکل (۲۴-۱) ماشین دووجهی با روتور درونی بدون شیار ۲۵
- شکل (۲۵-۱) ساختار دو وجهی با روتور درونی شیاردار ۲۶
- شکل (۲۶-۱) شمای دو بعدی جهت شار و ساختار ماشین های روتور درونی الف) بدون شیار ب) شیاردار ۲۶
- شکل (۲۷-۱) ساختار چند وجهی بدون شیار ۲۷
- شکل (۲۸-۱) ماشین چندوجهی شیاردار الف) از نوع NS ب) از نوع NN ۲۷
- شکل (۲۹-۱) سیم پیچی همپوشان الف) توزیع شده، ب) متمرکز ۳۰
- شکل (۳۰-۱) سیم پیچی غیرهمپوشان الف) تمام دندانها پیچیده شده، ب) یکی در میان دندانها پیچیده شده ۳۰

- شکل (۱-۳۱) الف) سیم پیچی دو لایه ب) سیم پیچی یک لایه ۳۱
- شکل (۱-۳۲) ماشین Torus شیاردار نوع NS ب) ماشین Torus شیاردار نوع NN ۳۲
- شکل (۱-۳۳) بدست آوردن توپولوژی SAT ۳۳
- شکل (۱-۳۴) توپولوژی SAT ۳۳
- شکل (۲-۱) شیار مجازی (سمت راست) دندان مجازی (سمت چپ) ۳۶
- شکل (۲-۲) تاثیر قوس قطب بر گشتاور دندان ای ۳۷
- شکل (۳-۲) اجزای شار فاصله هوایی در دهانه شیار ۳۹
- شکل (۱-۳) منحنی گشتاور سرعت معمول یک موتور ۴۳
- شکل (۲-۳) ماشین با ۵ جفت قطب و ۹ شیار ۴۸
- شکل (۳-۳) ماشین با ۵ جفت قطب و ۹ شیار الف) بردار mmf هر کوئل ب) بردار mmf فاز ۴۸
- شکل (۴-۳) ماشین با ۵ جفت قطب و ۱۲ شیار ۴۹
- شکل (۵-۳) ماشین با ۵ جفت قطب و ۱۲ شیار الف) بردار mmf هر کوئل ب) بردار mmf فاز ۴۹
- شکل (۶-۳) نیروهای وارده بر دو قسمت روبروی یکدیگر ۵۰
- شکل (۷-۳) گشتاور نامطلوب وارد بر نگهدارنده ۵۰
- شکل (۸-۳) اختلاف نیروهای وارده در حالت "دوم" ۵۱
- شکل (۹-۳) ضخامت آهن نگهدارنده ۵۳
- شکل (۱۰-۳) تکه استاتور ۵۵
- شکل (۱-۴) ماشین شار محور با سیم پیچ دو لایه و ۱۰ قطب ۱۲ شیار ۵۹
- شکل (۲-۴) ماشین شار محور با سیم پیچ تک لایه و ۱۰ قطب ۱۲ شیار ۵۹
- شکل (۳-۴) ماشین شار محور با سیم پیچ تک لایه، دندان نابر و ۱۰ قطب ۱۲ شیار ۶۰
- شکل (۴-۴) چگالی شار فاصله هوایی نزدیک قطب های استاتور بدست آمده از تحلیلی و 3-D FE برای ۱۰ قطب ۱۲ شیار ۶۱
- شکل (۵-۴) چگالی شار فاصله هوایی نزدیک قطب های استاتور بدست آمده از تحلیلی و 3-D FE برای ۱۰ قطب ۱۲ شیار با دندان نابر ۶۲
- شکل (۶-۴) چگالی شار فاصله هوایی نزدیک قطب های استاتور بدست آمده از تحلیلی و 3-D FE برای ۱۰ قطب ۱۵ شیار ۶۲
- شکل (۷-۴) شکل موج های شار پیوندی برای یک دور از یک کوئل بدست آمده بصورت تحلیلی ۶۳
- شکل (۸-۴) شکل موج های شار پیوندی بدست آمده از 3-D FE ۶۳
- شکل (۹-۴) شکل موج های back-EMF فاز تحلیلی ۶۴
- شکل (۱۰-۴) شکل موج های back-EMF فاز بدست آمده از 3-D FE ۶۴
- شکل (۱۱-۴) شکل موج نیروی ضد محرکه القایی فاز برای حالت ۲ جفت قطب ۶ شیار با دندان نابر ۶۶
- شکل (۱۲-۴) شکل موج نیروی ضد محرکه القایی فاز برای حالت ۴ جفت قطب ۶ شیار با دندان نابر ۶۶
- شکل (۱۳-۴) شکل موج نیروی ضد محرکه القایی فاز برای حالت ۵ جفت قطب ۱۲ شیار با دندان نابر ۶۷
- شکل (۱۴-۴) شکل موج نیروی ضد محرکه القایی فاز برای حالت ۷ جفت قطب ۱۲ شیار با دندان نابر ۶۷
- شکل (۱۵-۴) شکل موج نیروی ضد محرکه القایی فاز برای حالت ۸ جفت قطب ۱۸ شیار با دندان نابر ۶۷
- شکل (۱۶-۴) ماکزیمم گشتاور دندان ای برای نسبت قوس قطب به گام قطب مختلف بدست آمده از مدل تحلیلی ۶۹
- شکل (۱۷-۴) شکل موج گشتاور دندان ای برای ماشین ده قطب ۱۲ شیار $ar = 0.7$ ، ناشی از مدل تحلیلی و FE ۷۰

- شکل (۱۸-۴) شکل موج گشتاور دندانه ای برای ماشین ده قطب ۱۲ شیار با دندانه نابرابر $ar = 0.7$ ناشی از مدل تحلیلی و FE ۷۰
- شکل (۱۹-۴) شکل موج گشتاور دندانه ای برای ماشین ده قطب ۱۲ شیار با دندانه نابرابر $ar = 0.8$ ناشی از مدل تحلیلی و FE ۷۱
- شکل (۲۰-۴) اضافه بار تا دو برابر جریان نامی و تاثیر آن بر گشتاور برای ds های مختلف ۷۳
- شکل (۲۱-۴) شکل ماشین ۷۳
- شکل (۲۲-۴) توزیع چگالی شار سه بعدی در حالت بی باری ۷۴
- شکل (۲۳-۴) توزیع چگالی شار سه بعدی در حالت بارداری ۷۴
- شکل (۲۴-۴) چگالی شار در حالت بی باری در وسط تکه استاتور صفحه XY ۷۵
- شکل (۲۵-۴) چگالی شار در حالت بارداری در وسط تکه استاتور صفحه XY ۷۵
- شکل (۲۶-۴) چگالی شار در حالت بی باری در شعاع متوسط از تکه استاتور در صفحه XY ۷۶
- شکل (۲۷-۴) چگالی شار در حالت بارداری در شعاع متوسط از تکه استاتور در صفحه XY ۷۶
- شکل (۲۸-۴) چگالی شار در حالت بی باری در فاصله هوایی نزدیک قطب استاتور در شعاع متوسط ($r=75 \text{ mm}$) ۷۷
- شکل (۲۹-۴) چگالی شار در حالت بارداری در فاصله هوایی نزدیک قطب استاتور در شعاع متوسط ($r=75 \text{ mm}$) ۷۷
- شکل (۳۰-۴) گشتاور خروجی به ازای جریان فاز ۳۴ آمپر ۷۸
- شکل (۳۱-۴) تلفات هسته استاتور در سرعت های مختلف ۷۹
- شکل (۳۲-۴) تلفات هسته روتور در سرعت های مختلف ۸۰
- شکل (۳۳-۴) تاثیر نسبت قوس قطب بر گام قطب بر نیروی ضد محرکه القایی بدست آمده از روابط تحلیلی ۸۱
- شکل (۳۴-۴) نیروی ضد محرکه القایی به ازای $ar = 0.8$ ۸۱
- شکل (۳۵-۴) گشتاور خروجی ماشین نهایی با $ar = 0.8$ ۸۱
- شکل (۳۶-۴) گشتاور دندانه ای برای ماشین با $ar = 0.8$ و زاویه اریب برابر با $2\pi/30$ ۸۲
- شکل (۳۷-۴) اعمال دو شیار مجازی با فاصله یکسان برای دندانه بدون کوپل ۸۳
- شکل (۳۸-۴) یک گروه از ماهی ها که خطر یک شکارچی را پشت سر می گذارد ۸۴
- شکل (۳۹-۴) چند مثال از الگوهای موجود در طبیعت ۸۵
- شکل (۴۰-۴) اشکال مختلف همسایگی ۹۲
- شکل (۴۱-۴) گشتاور دندانه ای پس از اعمال شیار مجازی ۹۳
- شکل (۴۲-۴) چگالی شار در حالت بی باری ۹۴
- شکل (۴۳-۴) چگالی شار فاصله هوایی نزدیک قطب استاتور در شعاع متوسط ۹۴
- شکل (۴۴-۴) گشتاور خروجی با نسبت قوس قطب به گام قطب برابر با ۰.۸، و اعمال شیار مجازی ۹۵

فهرست جداول

۱۸	جدول (۱-۱) مقایسه آهنرباهای دائم
۴۳	جدول (۱-۳) مشخصات ماشین مورد نیاز
۴۶	جدول (۲-۳) ترکیب های ممکن قطب و شیار
۴۶	جدول (۳-۳) زوایای مورد نظر برای حالت "اول"
۴۷	جدول (۴-۳) زوایای مورد نظر برای حالت "دوم" با ۵ جفت قطب و ۱۲ شیار
۶۰	جدول (۱-۴) اطلاعات مربوط به ماشین ها
۶۵	جدول (۲-۴) ترکیب قطب شیار مورد نظر
۷۰	جدول (۳-۴) مقایسه ماکزیمم گشتاور دندانه ای ناشی از مدل تحلیلی و FEA
۷۲	جدول (۴-۴) تغییرات گشتاور دندانه ای بر حسب نسبت قطر داخلی به قطر خارجی و ضخامت آهنربا
۷۸	جدول (۵-۴) تلفات مسی ماشین

۱ - فصل اول مقدمه

۱-۱ - خودروهای الکتریکی

دیوید سالومون^۱ در سال ۱۸۷۰ خودرویی با یک موتور برقی کوچک و باتری‌های ذخیره‌کننده بسیار سنگین را اختراع کرد که البته سرعت آن و نیز محدوده آن بسیار ضعیف است. سال‌ها پس از او، دکتر فردیناند پورشه^۲ اولین خودرویش را با نام خودروی برقی *Lohner* در سن ۲۳ سالگی اختراع کرد. این اولین خودرو با محرک چرخ جلو در دنیا بود. خودروی دوم او یک خودروی هیبرید بود که از یک موتور احتراق داخلی برای گرداندن ژنراتوری استفاده می‌شد که توان را برای موتورهای الکتریکی درون چرخ خودرو تامین می‌کرد.

خودروهای گازوئیلی مهم‌ترین عامل آلودگی هوا در محیط‌های شهری می‌باشند. در همین راستا اکثر کشورها در حال تعریف کردن استانداردها و راهکارهای جدید می‌باشند، از جمله کشور انگلستان که در سال ۲۰۰۷ تصویب کرد که می‌بایست تا سال ۲۰۵۰ به هشتاد درصد کاهش در تولید گازهای گلخانه‌ای دست پیدا کند. برای رعایت استانداردهای زیست‌محیطی و نیز کاهش وابستگی به منابع نفتی، استفاده از خودروهای برقی رو به افزایش است [۲، ۱]. اکثر شرکت‌های بزرگ خودروسازی مانند فورد، نیسان، شورلت، تویوتا، هوندا، هیوندای و غیره شروع به معرفی و بهبود خودروهای برقی کرده‌اند. خودروهای برقی از موتورهای برقی برای به حرکت درآوردن چرخ‌ها استفاده می‌کنند. آنها قسمتی و یا تمام توان مورد نیازشان را از باتری‌های بزرگ قابل شارژ دریافت می‌کنند. حدود ۸۰ درصد از انرژی ذخیره شده در باتری‌های خودروی برقی برای راندن چرخ‌ها استفاده می‌شوند، درحالی‌که موتور احتراق داخلی تنها حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد بازدهی دارد و بیش‌تر انرژی آن بصورت گرما تلف می‌شود. مسافتی که یک خودروی برقی می‌تواند بین شارژ کردن‌های مجدد بپیماید را محدوده آن می‌گویند.

خودروهای برقی به چند بخش تقسیم می‌شوند:

¹ Sir David Salomon

² Dr. Ferdinand Porsche

۱-۱-۱- خودروهای تمام الکتریکی

خودروهایی که در آن‌ها باتری تنها منبع توان است. اکثر مدل‌های معمول آن محدوده‌ای بین ۱۳۰ تا ۱۹۰ کیلومتر دارند. این خودروها معمولاً از باتری‌های لیتیم یون استفاده می‌کنند. این باتری‌ها دارای چگالی توان مخصوص ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ وات بر کیلوگرم و چگالی انرژی مخصوص حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ وات-ساعت بر کیلوگرم (۵۴۰ تا ۹۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم) و البته هزینه بالاتر در مقایسه با دیگر باتری‌ها می‌باشند. باتری‌های لیتیم یون با توجه به ابعاد و توان مورد نیاز در هواپیماهای فضایی، خودروهای برقی، لپ‌تاپ‌ها و گوشی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین باتری‌های نیکل متال هیدرید نیز بسیار پرکاربرد هستند، البته آنها دارای چگالی توان حدود ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ وات بر کیلوگرم و چگالی انرژی ۶۰ تا ۱۲۰ وات-ساعت بر کیلوگرم و قیمت پایین‌تر نسبت به باتری‌های لیتیم یون می‌باشند. از جمله کاربردهای آنها استفاده در وسایل ارتباطی و نیز انواع زیادی از خودروهای هیبریدی شارژ شونده می‌باشد.

۱-۱-۲- خودروهای هیبرید شارژ شونده

خودروهایی هستند که می‌توانند بصورت الکتریکی و یا با سوخت فسیلی کار کنند. آنها معمولاً باتری کوچکتري دارند که معمولاً به تنهایی محدوده‌ای بین ۱۵ تا ۶۰ کیلومتر را برای خودرو میسر می‌سازد، اما رنج کلی آنها حدوداً برابر با یک خودروی گازوئیلی است.

هر دو خودروی برقی تمام الکتریکی و خودروی هیبرید شارژ شونده از طریق وصل کردن آنها به شبکه برق شارژ می‌شوند. فرآیند شارژ شدن خودروها معمولاً چند ساعت طول می‌کشد که البته می‌تواند در شب انجام شود که معمولاً شارژ لازم برای استفاده در طول روز را تامین می‌کند.

بعنوان مثال شکل (۱-۱) خودروی شرکت نیسان با نام لیف^۱ را نشان می‌دهد که یک خودروی برقی تمام الکتریکی است و در حال شارژ شدن در یک ایستگاه شارژ عمومی در خیابانی در آمستردام هلند می‌باشد. این خودرو محدوده‌ای برابر با ۱۷۵ کیلومتر و مصرف انرژی برابر با ۶۷۵ کیلوژول بر کیلومتر دارد. از دسامبر ۲۰۱۰ تا اکتبر ۲۰۱۲ شرکت نیسان ۴۲۷۰۰ مورد از خودروی لیف را فروخته است که آن را به پرفروش‌ترین خودروی برقی دنیا تبدیل کرده است. بیشترین فروش آن مربوط به کشورهای ژاپن، آمریکا، نروژ، انگلستان، و هلند می‌باشد.

^۱ Nissan Leaf electric car



شکل (۱-۱) خودروی لیف

۱-۱-۳- خودروهای هیبریدی

خودروهایی مانند تویوتا پریوس^۱ بر خلاف خودروی برگ به پریز وصل نمی‌شوند، و در واقع یک باتری بسیار کوچکتر دارند که به هنگام رانندگی شارژ می‌شوند. خودروهای هیبریدی می‌توانند چند کیلومتر را در حالت الکتریکی طی کنند. برای مثال در توقف‌ها انرژی جنبشی چرخ‌ها از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به باتری منتقل شده و در آن ذخیره می‌گردد تا در مواقع مورد نیاز مانند سربالایی‌ها و یا نیاز به کارکرد با تان بالا به چرخ‌ها منتقل شود.

۱-۱-۴- خودروهای هیبریدی با سیستم چرخ طیار

خودروهایی هستند که در آنها از سیستم چرخ طیار برای ذخیره کردن انرژی استفاده می‌کنند [۴]. سیستم چرخ طیار یک سیستم ذخیره کننده‌ی انرژی جنبشی است که انرژی را در یک چرخ طیار گردان ذخیره می‌کند و

^۱ Toyota Prius

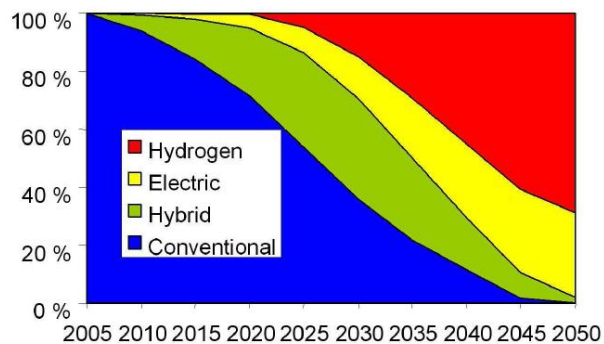
مقدار این انرژی ذخیره شده به اینرسی، سرعت چرخش و شکل آن وابسته است. در هنگام شارژ سرعت چرخ طیار زیاد می‌شود تا انرژی جنبشی را بصورت حرکت دورانی خودش ذخیره کند. انرژی جنبشی سپس در حالت *standby* نگاه داشته می‌شود. در حالت تخلیه، سرعت چرخ طیار کاسته می‌شود تا انرژی را به چرخ‌ها منتقل کند.

یک سیستم چرخ طیار معمولاً از موتور - ژنراتور، محفظه‌ی خلا، ادوات الکترونیک قدرت، و چرخ طیار تشکیل شده است، که موتور - ژنراتور عنصر اصلی برای سه حالت کاری شارژ، *standby* و تخلیه می‌باشد. هم-چنین در سیستم شبکه‌های قدرت از چرخ‌های طیار برای کاستن تاثیرات منفی پیوستن تولیدهای پراکنده (*DG*) به شبکه و آرام کردن تغییرات توان و تنظیم کردن سطح آن استفاده می‌شود.

۱-۱-۵- خودروهای پیل سوختی

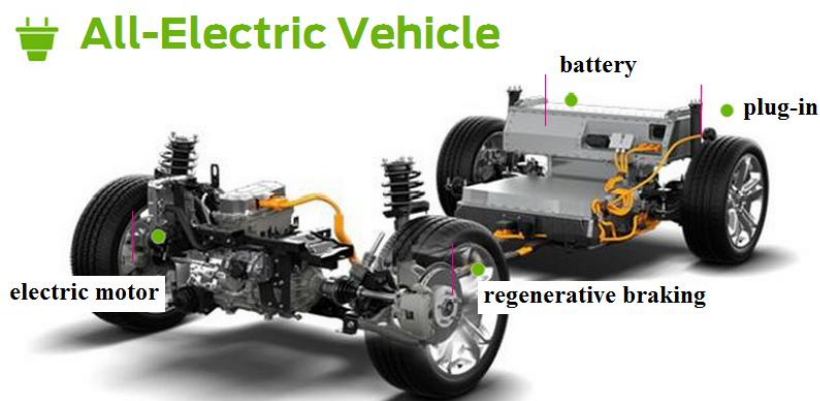
خودروهایی هستند که الکتریسیته مورد نظرشان را از سوخت‌هایی مانند هیدروژن بدست می‌آورند و نیازی به وصل شدن به شبکه برق برای شارژ مجدد را ندارند، بلکه باک آنها می‌بایست به مانند خودروهای گازوئیلی پر شود. یکی از مشکلات هیدروژن بعنوان سوخت آن است که هزینه‌ی هنگفتی برای ایجاد زیرساخت‌های لازم برای توزیع آن نیاز است.

نروژ کشوری است که دارای منابع فراوان سوخت‌های فسیلی و پتانسیل‌های بالقوه منابع انرژی تجدیدپذیر است. قدرت تولید ثابت هیدروژن، پتانسیل بالقوه زیاد انرژی بادی در این کشور برای تولید تجدیدپذیر هیدروژن، و مهارت‌های صنعتی لازم در رابطه با الکتروشیمی و نفت باعث شده تا نروژ پتانسیل تبدیل شدن به کشوری پیشرو در تامین هیدروژن و توسعه‌ی فناوری‌های زیرساختی مربوطه را داشته باشد. نفوذ خودروهای هیدروژنی در این کشور از سال ۲۰۱۰ شروع شده و می‌بایست تا سال ۲۰۵۰ به ۷۰ درصد برسد. در ابتدا زیرساخت‌های اولیه در مراکز پرجمعیت ایجاد می‌شود. در این راستا اسلو بعنوان اولین مرکز در سال ۲۰۱۰ انتخاب شد و پس از آن استاونگر، گرلند، برگن و تروندهیم تا سال ۲۰۲۰ بعنوان مراکز پرجمعیت برای احداث زیرساخت‌های هیدروژنی در نظر گرفته شدند. شکل (۱-۲) نسبت خودروهای مورد استفاده در نروژ تا سال ۲۰۵۰ را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱) نسبت خودروهای مورد استفاده در نروژ تا سال ۲۰۵۰

شکل (۳-۱) نمای درونی خودروی برقی و شکل (۴-۱) مقایسه ساختاری خودروها را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱) نمای درونی خودروی تمام الکتریکی از سایت شرکت فورد [۵]

Electric Vehicle Comparison Chart

POWERTRAIN TYPE	Gasoline	Hybrid	Plug-in Hybrid	Battery
GAS ENGINE	█	█	█	█
ELECTRIC MOTOR	█	█	█	█
NIMH BATTERY	█	█	█	█
LITHIUM BATTERY	█	█	█	█
EMISSIONS	█	█	█	█
FILLS UP	█	█	█	█
PLUGS IN	█	█	█	█

شکل (۴-۱) مقایسه ساختاری خودروها [۵]

۲-۱- ماشین آهنربای دائم

توسعه‌ی ماشین‌های سنکرون آهنربای دائم از زمان اختراع مواد مغناطیس دائم با کیفیت بالای نئودیموم-آهن-بور^۱ در سال ۱۹۸۳ شروع گشته است. ماشین‌های آهنربای دائم بدون جاروبک بدلیل تحریک آهنربای دائم بازدهی بالایی داشته و بطور گسترده در کاربردهای مختلف خانگی و صنعتی در حال استفاده می‌باشند. ماشین‌های آهنربای دائم بدون جاروبک به دو دسته ماشین آهنربای دائم بدون جاروبک با جریان مستقیم (bldc) و ماشین آهنربای دائم بدون جاروبک با جریان متناوب (blac) که به آن pmsm نیز می‌گویند تقسیم می‌گردد. در ماشین bldc علاقه داریم تا شکل موج نیروی ضد محرکه القایی دوزنقه‌ای باشد و جریان کنترل می‌گردد تا شکل موجی مستطیلی داشته باشد. در ماشین blac شکل موج نیروی ضد محرکه القایی سینوسی مطلوب است و جریان کنترل می‌گردد تا شکل موج سینوسی داشته باشد.

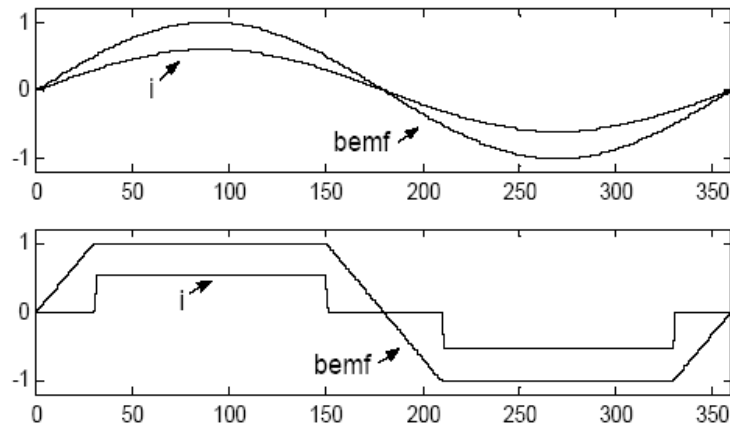
۱-۲-۱- موتور آهنربای دائم با تغذیه ولتاژ دوزنقه‌ای (BLDC)

در این نوع موتور توزیع سیم‌پیچی فازهای استاتور بصورت دوزنقه‌ای بوده و ولتاژ اعمالی به فازها نیز بصورت دوزنقه‌ای یا مربعی می‌باشد. در این ساختار نیازی به دانستن مقدار لحظه‌ای موقعیت روتور نبوده و می‌توان از سه سنسور وضعیت از نوع اثر هال که در فواصل ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند استفاده نمود. محاسبات و عمل کنترلی در این موتور نسبت به نوع سینوسی بسیار ساده‌تر می‌باشد. در چگالی شار و ابعاد یکسان برای هر دو نوع موتور دوزنقه‌ای و سینوسی، نوع دوزنقه‌ای بمقدار ۱۵٪ گشتاور بیش‌تری تولید می‌کند. اما از طرف دیگر بدلیل همپوشانی کموتاسیون فازها، ریپل گشتاور در این نوع موتور بیش‌تر از نوع سینوسی می‌باشد.

۱-۲-۲- مقایسه BLDC و BLAC

شکل موج جریان و نیروی ضد محرکه القایی دو ماشین در شکل (۱-۵) نشان داده شده است

^۱ NdFeB



شکل (۵-۱) نمایش شکل موج‌ها در ماشین BLDC و BLAC

ویژگی‌های شناخته شده موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک عبارتند از:

۱- توزیع یکنواخت (مستطیلی) شار آهنربا در فاصله هوایی.

۲- شکل موج جریان مربعی.

۳- سیم‌پیچی استاتور متمرکز.

در حالیکه ویژگی‌های شناخته شده موتورهای موج سینوسی (جریان متناوب بدون جاروبک) عبارتند از:

۱- توزیع شار فاصله هوایی به صورت سینوسی یا شبه سینوسی.

۲- شکل موج جریان سینوسی یا شبه سینوسی.

۳- توزیع شبه سینوسی هادی‌های استاتور با سیم‌پیچی استاتور گام کوتاه و توزیع شده یا متحدالمرکز.

زمانی که گشتاور بالا، سیستم راه‌انداز ساده و کنترل دقیق موقعیت مورد نظر باشد، ماشین جریان مستقیم بدون جاروبک انتخاب بهتری است. گشتاور یکنواخت و نویز شنیداری پایین‌تر از خصوصیات ماشین جریان متناوب با توزیع سینوسی نیرو محرکه مغناطیسی یا بعبارتی (PMSM) می‌باشد.

از دیدگاه گشتاور تولیدی نوع BLDC دارای چگالی گشتاور بیشتری نسبت به نوع PMSM می‌باشد.

علت آن است که با فرض اینکه جریانهای $I_{pmsm-peak}$ و $I_{bldc-peak}$ مقدار ماکزیمم جریانهای استاتور ماشین-های PMSM و BLDC باشند، مقدار موثر جریان‌های مذکور به صورت زیر خواهند بود: