

به نام خدا



دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی برق-قدرت

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی مهندسی برق گرایش قدرت (الکترونیک قدرت)

طراحی سیستم کنترل سرعت ثابت هوشمند برای خودروهای هیبریدی سری بر
DTC مبنای

استاد راهنما

جناب آقای دکتر مهران صباحی

استاد مشاور

جناب آقای دکتر محمدباقر بنا شریفیان

پژوهشگر

ایمان آقاشاهی

زمستان ۱۳۹۳

سپاس گزاری

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان،
شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.
ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به پدر و مادرم که مهر آسمانی
شان آرام بخش آلام زمینی ام است.

تمایل دارم که مراتب قدر دانی از استاد راهنمای ارجمندم، دکتر مهران
صباحی و استاد مشاور ارجمندم، دکتر محمد باقر بنا شریفیان را به جا
بیاورم، چرا که مرا در طول انجام این پایان نامه مورد لطف و حمایت
های بی دریغ خود قرار داده اند.

نام خانوادگی: آقاشاهی	نام: ایمان
عنوان پایان نامه: طراحی سیستم کنترل سرعت ثابت هوشمند برای خودرو های هیبریدی سری بر مبنای DTC	
استاد راهنما: دکتر مهران صباحی استاد مشاور: دکتر محمد باقر بنا شریفیان	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی برق گرایش: قدرت (الکترونیک قدرت) دانشگاه: تبریز	
دانشکده: برق و کامپیوتر	تاریخ فارغ التحصیلی: زمستان ۹۳
تعداد صفحات: ۷۲	
کلید واژه: خودروی برقی، خودروی هیبرید، سیستم کنترل سرعت ثابت، موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، کنترل مدل پیش بین، کنترل مستقیم گشتاور	
<p>چکیده</p> <p>در سال های اخیر مصرف بی رویه سوخت های فسیلی باعث به وجود آمدن مشکلات متعددی از قبیل آلودگی هوا، گرم شدن کره زمین، صدمه زدن به محیط زیست و مشکلات دیگری شده است. آمارها نشان می دهد که درصد بالایی از مصرف سوخت های فسیلی توسط حمل و نقل صورت می گیرد. از طرف دیگر با توجه به اینکه خودروهای معمولی با موتور احتراق داخلی (ICE) دارای راندمان بسیار پایینی هستند، بدین ترتیب این عوامل سازندگان را به ساخت خودروهایی با سوختی پاک تشویق کرد و خودروهای برقی و هیبرید به تدریج ظهور پیدا کردند. در سال های اخیر سیستم کنترل سرعت ثابت یا همان سیستم constant speed cruise برای خودروها مطرح شده است که این امکان را به رانندگان می دهد که بدون استفاده از پدال ترمز و گاز با سرعت ثابت حرکت کنند که این سیستم باعث می شود رانندگی و سفر در مسیرهای طولانی آسان شود و به دلیل عدم استفاده از ترمز های متعدد مصرف سوخت نیز کاهش یابد. در این پایان نامه یک سیستم کنترل سرعت ثابت برای کاربرد در خودروی هیبرید از نوع سری که دارای موتور الکتریکی از نوع جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC) است طراحی و مورد بررسی قرار گرفته است. روش مورد استفاده به منظور دستیابی به هدف مورد نظر ترکیب مدل کنترل پیش بین (MPC) با روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) می باشد. در فصل آخر نتایج شبیه سازی سیستم در حالات مختلف ارائه شده و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.</p>	

فهرست مطالب

۱	مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲ بررسی منابع
۴	۱-۲ عوامل پدید آمدن خودروهای برقی و هیبرید
۵	۲-۲ کنترل سرعت ثابت
۵	۱-۲-۲ مزایای کروزر کنترل
۶	۳-۲ خودروی هیبرید سری
۹	۴-۲ کنترل مستقیم گشتاور (DTC) در ماشین های مغناطیس دائم
۹	۱-۴-۲ تحلیل کنترل مستقیم گشتاور در موتور های مغناطیس دائم
۱۰	۲-۴-۲ معادلات توصیف کننده ماشین مغناطیس دائم
۱۲	۳-۴-۲ تخمین گشتاور در قاب مرجع xy
۱۲	۴-۴-۲ معادلات شار پیوندی در قاب مرجع xy
۱۳	۵-۴-۲ PMSM با فاصله هوایی یکنواخت
۱۴	۶-۴-۲ PMSM با قطب برجسته
۱۸	۵-۲ نیروهای مخالف وارد شده بر یک خودرو
۲۰	۶-۲ موتور جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC)
۲۱	۱-۶-۲ ساختار ماشین
۲۲	۲-۶-۲ مغناطیس های دائم
۲۲	۳-۶-۲ سیم پیچی استاتور
۲۳	۴-۶-۲ مشخصات موتور
۲۶	۵-۶-۲ مدل ریاضی
۲۷	۶-۶-۲ تشخیص موقعیت
۲۸	۷-۲ بکارگیری MPC در درایو های الکتریکی
۳۰	۳ روش کنترلی پیشنهادی
۳۱	۱-۳ کنترل مستقیم گشتاور (DTC)
۳۱	۱-۱-۳ مقدمه
۳۳	۲-۱-۳ قسمت های کلی DTC

۳۳	..... محاسبه گشتاور موتور..... ۳-۱-۳
۳۳	..... بردار های کلید زنی..... ۴-۱-۳
۳۴	..... بلوک دیاگرام کلی سیستم..... ۵-۱-۳
۳۵	..... جدول کلید زنی..... ۶-۱-۳
۳۶	..... کنترل مدل پیش بین (MPC)..... ۲-۲-۳
۳۸	..... مزیت های MPC..... ۱-۲-۳
۳۸	..... استراتژی MPC..... ۲-۲-۳
۳۹	..... ساختار MPC..... ۳-۲-۳
۴۰	..... اجزای MPC..... ۴-۲-۳
۴۰	..... مدل پیش بینی..... ۱-۴-۲-۳
۴۰	..... تابع هزینه..... ۲-۴-۲-۳
۴۰	..... به دست آوردن قانون کنترلی..... ۳-۴-۲-۳
۴۰	..... مدل..... ۴-۴-۲-۳
۴۱	..... مسیر مرجع..... ۵-۴-۲-۳
۴۱	..... محدودیت ها..... ۶-۴-۲-۳
۴۲	..... بکارگیری روش MPC در کنترل جریان یک اینورتر سه فاز با بار اهمی سلفی با منبع ولتاژ ثابت..... ۳-۳
۴۴	..... محاسبه تابع هزینه هر حالت..... ۱-۳-۳
۴۵	..... نتایج شبیه سازی در محیط سیمولینک..... ۲-۳-۳
۴۷	..... استفاده از روش MPC به منظور کنترل مستقیم گشتاور..... ۴-۳
۴۷	..... به دست آوردن تابع لحظه ای گشتاور..... ۱-۴-۳
۴۷	..... محاسبه جریان های مرجع..... ۲-۴-۳
۴۹	..... دستیابی به e_a و e_b و e_c ۳-۴-۳
۵۱	..... محاسبه سرعت زاویه ای..... ۴-۴-۳
۵۱	..... بدست آوردن تابع هزینه..... ۵-۴-۳
۵۲	..... روش تحریک کلید ها..... ۶-۴-۳
۵۳	..... استفاده از روش کنترلی MPC به منظور تثبیت سرعت در یک خودرو با محرک الکتریکی (ev و hev)..... ۵-۳
۵۳	..... مشخصات خودرو بررسی شده در این پژوهش..... ۱-۵-۳
۵۴	..... مدل سازی گشتاور وارده بر چرخ خودرو بر اساس شیب جاده و سرعت خودرو در محیط $simulink$ ۲-۵-۳
۵۵	..... تعیین ضرایب PI..... ۳-۵-۳

۵۵	..... ۳-۵-۱ تخمین نیروهای وارد بر خودرو
۵۷	..... ۴ بحث و نتایج
۵۸	..... ۴-۱ حالت اول
۶۱	..... ۴-۲ حالت دوم
۶۴	..... ۴-۳ حالت سوم
۶۷	..... ۴-۴ حالت چهارم
۷۰	..... ۴-۵ نتایج و پیشنهادات
۷۱	..... مراجع

فهرست اشکال

۷	..... شکل ۱-۲: پیکربندی HEV سری
۹	..... شکل ۲-۲: پیکربندی خودروی هیبرید سری از نوع hub motor
۱۰	..... شکل ۳-۲: شار پیوندی استاتور و روتور در قاب های مرجع متفاوت
۱۶	..... شکل ۴-۲: گشتاور با فرض $|\varphi_s| = \varphi_f$: δ
۱۶	..... شکل ۵-۲: گشتاور با فرض $|\varphi_s| = 0.7\varphi_f$: δ
۱۷	..... شکل ۶-۲: گشتاور با فرض $|\varphi_s| = 1.5\varphi_f$: δ
۱۷	..... شکل ۷-۲: گشتاور با فرض $|\varphi_s| = 2\varphi_f$: δ
۱۸	..... شکل ۸-۲: مدل خودرو
۲۱	..... شکل ۹-۲: موتور BLDC با روتور چهار قطب و استاتور دوازده شیار
۲۳	..... شکل ۱۰-۲: موتور BLDC با شش شیار و چهار قطب
۲۴	..... شکل ۱۱-۲: ولتاژ ولتاژ ضد محرکه موتور شش و دوازده شیاره
۲۵	..... شکل ۱۲-۲: شکل موج جریان ها و ولتاژهای ولتاژ ضد محرکه برای موتور BLDC با جریان ۱۲۰ درجه
۲۶	..... شکل ۱۳-۲: شماتیک اینورتر سه فاز موتور BLDC با IGBT
۲۸	..... شکل ۱۴-۲: دیاگرام کلی درایو BLDC
۳۴	..... شکل ۱-۳: بردارها و حالت های کلید زنی مختلف
۳۵	..... شکل ۲-۳: طرح شماتیک DTC
۳۹	..... شکل ۳-۳: ساختار MPC
۴۲	..... شکل ۴-۳: مدار معادل مدار سه فاز به منظور کنترل جریان
۴۵	..... شکل ۵-۳: جریان های مرجع
۴۶	..... شکل ۶-۳: جریان های سه فاز و ولتاژ های خط به خط
۴۶	..... شکل ۷-۳: جریان های سه فاز و ولتاژ های خط در فاصله زمانی کوتاه
۴۸	..... شکل ۸-۳: سیگنال های حسگر های اثر هال به همراه ولتاژ ضد محرکه هر فاز
۵۰	..... شکل ۹-۳: شکل موج های ولتاژ ضد محرکه سه فاز استاتور

- شکل ۳-۱۰: کنترل کننده سرعت شکل ۵۳
- شکل ۳-۱۱: بلوک دیاگرام کلی سیستم شکل ۵۶
- شکل ۴-۱: تابع شیب جاده شکل ۵۸
- شکل ۴-۲: نمودار گشتاور مخالف وارد شده به هر موتور شکل ۵۸
- شکل ۴-۳: نمودار سرعت خودرو شکل ۵۹
- شکل ۴-۴: پیک جریان های اندازه گیری شده شکل ۵۹
- شکل ۴-۵: جریان های اندازه گیری شده در بازه زمانی کوتاه شکل ۶۰
- شکل ۴-۶: نمودار وضعیت شارژ باطری بر حسب زمان شکل ۶۰
- شکل ۴-۷: گشتاور مرجع و خروجی موتور شکل ۶۱
- شکل ۴-۸: تابع شیب جاده شکل ۶۱
- شکل ۴-۹: نمودار گشتاور مخالف وارد شده به هر موتور شکل ۶۲
- شکل ۴-۱۰: نمودار سرعت خودرو شکل ۶۲
- شکل ۴-۱۱: پیک جریان های اندازه گیری شده شکل ۶۳
- شکل ۴-۱۲: جریان های اندازه گیری شده در بازه زمانی کوتاه شکل ۶۳
- شکل ۴-۱۳: گشتاور مرجع و خروجی موتور شکل ۶۴
- شکل ۴-۱۴: نمودار وضعیت شارژ باطری بر حسب زمان شکل ۶۴
- شکل ۴-۱۵: تابع شیب جاده شکل ۶۵
- شکل ۴-۱۶: نمودار گشتاور مخالف وارد شده به هر موتور شکل ۶۵
- شکل ۴-۱۷: سرعت خودرو شکل ۶۵
- شکل ۴-۱۸: پیک جریان های اندازه گیری شده شکل ۶۶
- شکل ۴-۱۹: جریان های اندازه گیری شده در بازه زمانی کوتاه شکل ۶۶
- شکل ۴-۲۰: گشتاور مرجع و خروجی موتور شکل ۶۶
- شکل ۴-۲۱: نمودار وضعیت شارژ باطری بر حسب زمان شکل ۶۷
- شکل ۴-۲۲: تابع شیب جاده شکل ۶۷
- شکل ۴-۲۳: نمودار گشتاور مخالف وارد شده به هر موتور شکل ۶۸
- شکل ۴-۲۴: سرعت خودرو شکل ۶۸
- شکل ۴-۲۵: پیک جریان های اندازه گیری شده شکل ۶۸
- شکل ۴-۲۶: جریان های اندازه گیری شده در بازه زمانی کوتاه شکل ۶۹
- شکل ۴-۲۷: گشتاور مرجع و خروجی موتور شکل ۶۹
- شکل ۴-۲۸: نمودار وضعیت شارژ باطری بر حسب زمان شکل ۶۹

۱ - مقدمه

۱-۱ مقدمه

ماشین‌های الکتریکی به عنوان ارکان اصلی صنعت شناخته می‌شوند که از زمان ظهور تا به امروز تغییرات و پیشرفت‌های بسیاری داشته‌اند. از انواع مختلف ماشین‌های الکتریکی موتورهای مغناطیس دائم به دلیل خصوصیات منحصر به فرد در خودروهای برقی و هیبرید به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. تاکنون روش‌های کنترلی متعددی برای انواع ماشین‌های الکتریکی ارائه شده است که در ابتدا روش‌های ابتدایی مانند افزودن مقاومت به مدار روتور برای موتورهای جریان متناوب و یا روش وارد لئونارد برای موتورهای جریان مستقیم مطرح شد که علاوه بر عملکرد ضعیف و دقت پایین باعث کاهش بازده انرژی سیستم می‌شدند. بعداً با ظهور نیمه‌هادی‌ها و مبدل‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت کنترل ماشین‌های الکتریکی به سرعت پیشرفت کرد و تاکنون روش‌های کنترلی مختلفی بر مبنای مبدل‌های الکترونیک قدرت که از مهمترین آنها روش کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور هستند برای ماشین‌های الکتریکی ارائه و به کار گرفته شده است. در این پایان‌نامه یک روش کنترلی جدید برای کنترل گشتاور و سرعت یک موتور جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC¹) بر مبنای کنترل مدل پیش‌بین به منظور کاربرد در خودروی برقی یا هیبرید سری با قابلیت بازگشت انرژی ارائه شده است.

¹ Brushless Dc

۲- بررسی منابع

۱-۲ عوامل پدید آمدن خودروهای برقی و هیبرید

براساس تخمین دپارتمان حمل و نقل ایالات متحده آمریکا حدود ۸۰۰ میلیون خودرو در جهان وجود دارد. در سال ۲۰۰۹ کشور چین با تولید و فروش به ترتیب ۱۳/۷۹ و ۱۳/۶۴ میلیون خودرو از ایالات متحده آمریکا پیشی گرفت و به بزرگترین تولیدکننده خودرو و بازار خودرو در جهان تبدیل شد. با افزایش شهرنشینی، پیشرفت صنعت و جهانی شدن تمایل به افزایش سریع تعداد خودروهای شخصی اجتناب ناپذیر است. به دلیل اینکه حمل و نقل وابسته به سوخت های فسیلی است، مسائل و مشکلات مربوط به این موضوع قابل چشم پوشی نیست. نه تنها منابع سوختی در جهان محدود است بلکه آلودگی های ناشی از احتراق سوخت های فسیلی باعث تغییر آب و هوا، کیفیت پایین هوای شهرهای های بزرگ و تضاد سیاسی شده است. از این رو سیستم انرژی جهانی و مشکلات زیست محیطی پدیدار شده است، که می تواند به توسعه زیاد حمل و نقل عمومی نسبت داده شود.

مشکل اول مواجه بودن جهان با مسائل جدی تعرضه و تقاضا انرژی است. در جهان در هر روز تقریباً ۸۵ میلیون بشکه مواد سوختی مصرف می شود اما فقط ۱۳۰۰ میلیارد بشکه سوخته اندوخته وجود دارد. با حساب این نرخ مصرف کنونی، ذخیره سوخت جهان تا ۴۲ سال آینده به پایان می رسد. در میان سوخت هایی که در جهان مصرف می شود، ۶۰٪ مربوط به صنعت حمل و نقل است. با توجه به این آمار کاهش مصرف سوخت در بخش حمل و نقل عمومی برای حل مشکلات انرژی و محیطی ضروری به نظر می رسد.

مشکل دوم، روبرو شدن جهان با مشکلات آلودگی هواست. دوده های ناشی از احتراق سوخت های فسیلی باعث افزایش غلظت دی اکسیدکربن^۲ در اتمسفر زمین می شود. افزایش غلظت دی اکسیدکربن باعث بالا رفتن دمای سطح زمین می شود، که منجر به افزایش دمای سراسری و شرایط وخیم آب و هوایی در بیشتر قسمت های کره زمین می شود. گرمای مداوم در کره زمین باعث بالا رفتن سطح دریاهای و ناپایداری اکوسیستم می شود. خودروهای دیزلی و بنزینی در میان عوامل اصلی

^۲ CO₂

انتشار دی اکسیدکربن وجود دارند. به علاوه، آلودگی های دیگری ناشی از خودروهای با سوخت فسیلی وجود دارد، که شامل: کربن منو اکسید^۳ و نیتروژن اکسید^۴ ناشی از احتراق بنزین؛ هیدروکربن ها^۵ ناشی از تبخیر سوخت؛ و سولفوراکسید و مواد ریز ناشی از احتراق خودروهای دیزلی می شود. این گازهای منتشر شده باعث آلودگی هوا و تاثیر منفی بر سلامتی انسان ها و حیوان ها می شود.

بنابراین، حمل و نقل عمومی در آینده می بایست آزادی بیشتر، حمل و نقل پایدار، رشد اقتصادی سازگار با محیط زیست و پیشرفت جامعه را به همراه داشته باشد. به منظور دستیابی به این مهم خودروهای الکتریکی با منبع انرژی پاک، امن و هوشمند ضروری به نظر می رسد [۱].

۲-۲ کنترل سرعت ثابت^۶

این سیستم، در واقع ابزاری برای ثابت نگه داشتن سرعت خودرو حین رانندگی در سطح جاده‌ها، بزرگراه‌ها، یا اتوبان‌هاست. به طور مثال، اگر راننده بخواهد سرعت را روی ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت ثابت نگه دارد، با فعال سازی کروز کنترل به راحتی می‌تواند این کار را انجام دهد. اساس این ابزار به گونه‌ای است که خودرو به صورت اتوماتیک می‌تواند سرعت خودرو را تحت هر شرایطی از رانندگی ثابت نگه دارد. لازم به یادآوری است، زمانی که این ابزار را فعال می‌کنید و سرعت خودرو روی عدد خاصی ثابت شده است، این سرعت، در مسیرهای سربالایی، سرازیری، یا هنگام وزش باد مخالف تغییر نخواهد کرد [۲]

۱-۲-۲ مزایای کروز کنترل

۱- آسایش بیشتر به هنگام رانندگی خصوصاً در مسافتهای طولانی و در اتوبانها به دلیل عدم استفاده از پدال گاز.

۲- کاهش مصرف سوخت به میزان قابل توجه.

³ Co

⁴ No و No₂ و No_x

⁵ vosc

⁶ constant speed cruise

۳- عدم تخطی از سرعت مجاز در جاده ها که گاهی به صورت نا خود آگاه اتفاق می افتد.

۴- آسانتر شدن رانندگی.

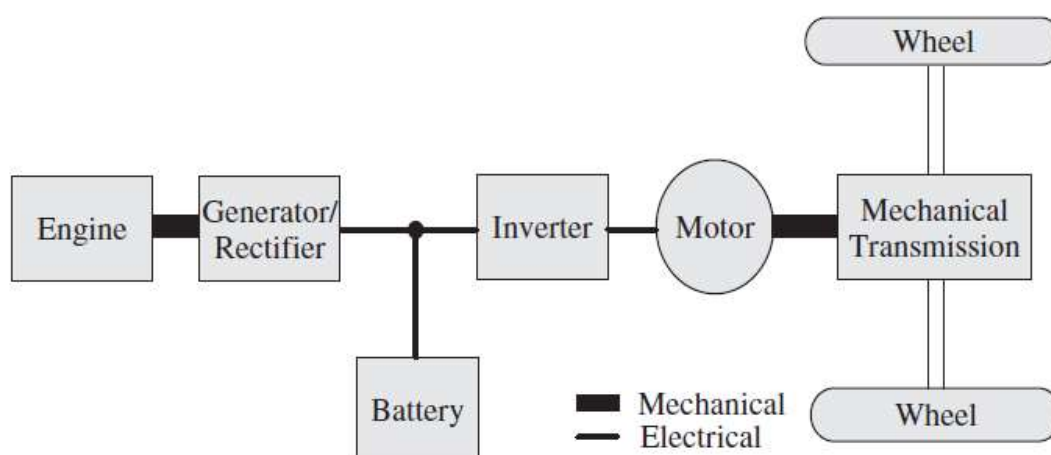
۳-۲ خودروی هیبرید سری^۷

شکل ۱-۲ پیکربندی خودروی هیبرید سری را نشان می دهد. در این نوع خودروی هیبرید، موتور احتراق داخلی (ICE^۸) مبدل اصلی انرژی است که انرژی سوخت را به توان مکانیکی خروجی تبدیل می کند. توان مکانیکی خروجی ICE سپس توسط ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. موتور الکتریکی محرک نهایی را توسط توان تولید شده توسط ژنراتور یا انرژی باتری ایجاد می کند. موتور الکتریکی می تواند انرژی را به طور مستقیم از موتور، یا از طریق باتری یا هر دو دریافت کند. وقتی موتور از چرخ ها جدا باشد، سرعت موتور می تواند به طور مستقل از سرعت خودرو کنترل شود. این ویژگی باعث فقط کنترل موتور را ساده نمی کند، بلکه نتیجه مهمتر این است که موتور می تواند در سرعت بهینه کار کند و در نتیجه بازده سوخت بالاتر می رود. در خودروی برقی هیبرید (HEV^۹) سری نیاز به سیستم معمول تبدیل سرعت (گیربکس) نیست. براساس شرایط کاری خودرو، جزئیات نیرو محرکه در HEV سری می تواند با ترکیب های مختلفی کار کنند.

⁷ Series HEV

⁸ Internal combustion engine

⁹ Hybrid electric vehicle



شکل ۱-۲: پیکربندی HEV سری [۳]

باتری تامین کننده توان^{۱۰}: موقعی که باتری انرژی کافی دارد و تقاضای قدرت پایین است، مجموعه موتور احتراق داخلی/ژنراتور (I/G^{۱۱}) خاموش می شود، و موتور الکتریکی فقط با باتری تغذیه می شود. قدرت ترکیبی^{۱۲}: در هنگام تقاضای توان بالا، مجموعه I/G روشن می شود و باتری نیز موتور الکتریکی را تغذیه می کند.

موتور تامین کننده توان^{۱۳}: در طول مسیر بزرگراه و تقاضای توان نسبتاً زیاد، مجموعه I/G روشن می شود. باتری در حالت شارژ کامل یا شارژ خالی باشد. این بدلیل آن است که وضعیت شارژ باتری (SOC^{۱۴}) در مقدار بالا قرار دارد اما تقاضای توان خودرو از خاموش شدن ICE جلوگیری می کند، یا ممکن است برای خاموش کردن ICE کافی نباشد.

¹⁰ Battery alone

¹¹ ICE/GENERATOR

¹² Combined power

¹³ Engine alone

¹⁴ State of charge

شکاف قدرت^{۱۵}: موقعی که I/G روش می شود، تقاضای قدرت خودرو پایین تر از توان بهینه ICE باشد، و SOC باطری پایین باشد، سپس بخشی از توان ICE به منظور شارژ باطری استفاده می شود.

شارژ در حالت ساکن^{۱۶}: باطری از طریق I/G شارژ می شود در حالی که خودرو در حالت توقف قرار دارد.

ترمز ژنراتوری^{۱۷}: موتور الکتریکی به عنوان ژنراتور برای تبدیل انرژی جنبشی خودرو به انرژی الکتریکی و شارژ باطری عمل می کند.

یک HEV سری می تواند شبیه به خودروهای معمولی پیکربندی شود، که موتور الکتریکی مانند شکل ۱-۲ در جای موتور احتراقی قرار گیرد. انتخابهای دیگری هم وجود دارد، مانند حالتی که موتورها در داخل چرخ قرار می گیرد. در این حالت، همانگونه که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، چهار موتور الکتریکی وجود دارد که، هرکدام داخل یک چرخ قرار گرفته است.

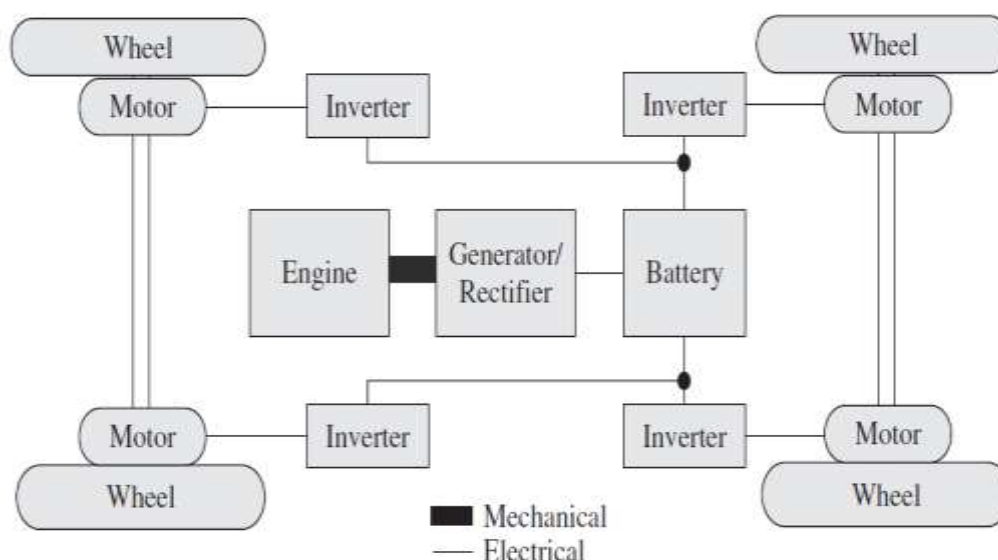
به دلیل حذف گیربکس و انتقال قدرت، بازده سیستم خودرو می تواند افزایش رضایت بخشی داشته باشد. خودرو نیز قابلیت چهار چرخ محرک (AWD^{۱۸}) را دارد. اما به هر حال، کنترل مستقل چهار چرخ مسئله پیچیده ای است [۳].

¹⁵ Power split

¹⁶ Stationary charging

¹⁷ Regenerative braking

¹⁸ All wheels drive



شکل ۲-۲: پیکربندی خودروی هیبرید سری از نوع hub motor

۴-۲ کنترل مستقیم گشتاور (DTC^{19}) در ماشین های مغناطیس دائم

در ابتدا در سال ۱۹۹۶ کنترل مستقیم گشتاور برای کاربرد در موتورهای مغناطیس دائم مطرح شد که برای تخمین گشتاور از معادله کوانترژی استفاده می کرد که این گشتاور شامل سه مولفه گشتار بود. سپس با تولید جریان مرجع کنترل گشتاور صورت پذیرفت و اثبات شد که گشتاور دقیقا با جریان متناسب نیست و اجرای روش کنترل جریان باعث افزایش ریپل گشتاور و افزایش تلفات مسی می شود و همچنین شامل محدودیت هایی است. در انتها با استفاده از پردازشگر سیگنال دیجیتال (DSP^{20}) نتایج بدست آمد و مشخص شد کنترل مستقیم گشتاور می تواند پاسخ مناسبی بدهد و نسبت گشتاور به تلفات مسی را افزایش دهد [۴].

۱-۴-۲ تحلیل کنترل مستقیم گشتاور در موتور های مغناطیس دائم

در سال ۱۹۹۷ به صورت ریاضی اثبات شد که افزایش گشتاور الکترومغناطیسی در موتور مغناطیس دائم وابسته به افزایش زاویه بین شار استاتور و روتور است و بنابراین پاسخ سریع گشتاور می تواند با

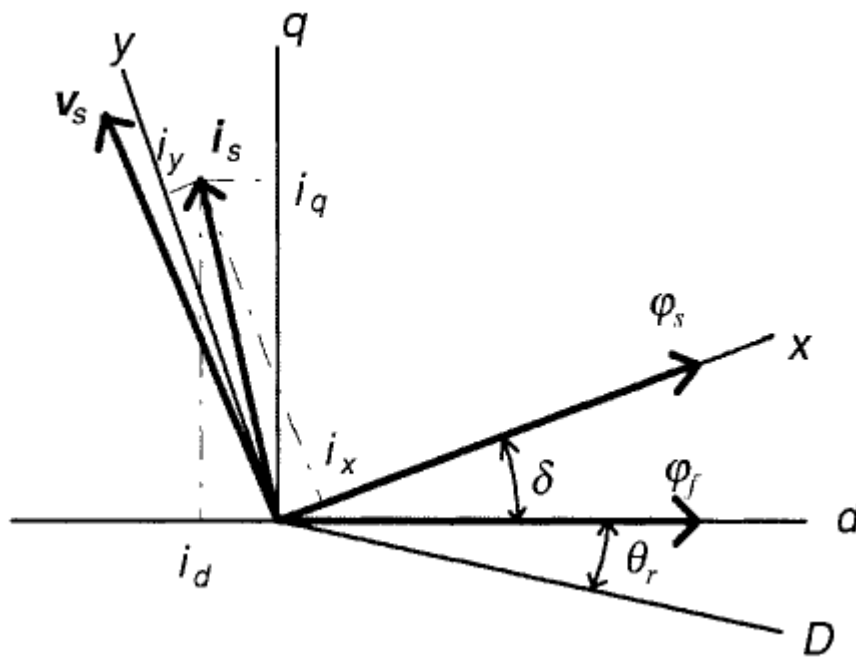
¹⁹ Direct Torque Control

²⁰ Digital signal processor

تنظیم سرعت چرخش شار استاتور تنظیم می شود. همچنین اثبات شد که بردارهای ولتاژ صفر نباید استفاده شوند، و شار پیوندی استاتور می بایست منطبق با موقعیت روتور تغییر زاویه دهد [۵].

۲-۴-۲ معادلات توصیف کننده ماشین مغناطیس دائم

بردار شار پیوندی استاتور φ_s و بردار شار مغناطیس دائم φ_f می توانند در قاب های مرجع شار روتور (dq)، شار استاتور (xy) و ثابت (dq) تصویر شود، همانگونه که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: شار پیوندی استاتور و روتور در قاب های مرجع متفاوت [۵]

زاویه بین شار استاتور و روتور δ است موقعی که از مقاومت استاتور صرف نظر شود. در حالت ماندگار، δ با توجه مقدار گشتاور بار مقدار ثابتی دارد، و شار استاتور و روتور با سرعت سنکرون می چرخند.

در حالت گذرا، δ تغییر می کند و شار استاتور و روتور با سرعت متفاوتی می چرخند. اگر ثابت زمانی الکتریکی خیلی کوچکتر از ثابت زمانی مکانیکی باشد، سرعت چرخش شار استاتور می تواند نسبت به شار روتور به آسانی تغییر کند. می توان اثبات کرد که افزایش در گشتاور می تواند با کنترل δ یا سرعت چرخش شار استاتور کنترل شود.

شار پیوندی استاتور، ولتاژ و معادلات گشتاور الکترومغناطیسی در قاب مرجع dq به صورت زیر توصیف می شود:

$$\begin{aligned}\varphi_d &= L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q &= L_q i_q \\ v_d &= R_s i_d + p\varphi_d + \omega_r \varphi_q \\ v_q &= R_s i_q + p\varphi_q + \omega_r \varphi_d \\ T &= \frac{3}{2} p(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)\end{aligned}\tag{۱-۲}$$

L_d ، L_q ، φ_f به ترتیب ثابت ولتاژ ضد محرکه^{۲۱} و اندوکتانس استاتور در قاب مرجع روتور هستند، موقعی که ولتاژ ضد محرکه و تغییرات اندوکتانس های استاتور سینوسی هستند. در غیر این صورت، این ها کمیت های پایه ای این متغیر ها هستند. توسط تبدیل در روابط (۲-۲) و (۳-۲)، (۱-۲) می تواند به قاب مرجع xy تبدیل شود.

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_d \\ F_q \end{pmatrix}\tag{۲-۲}$$

و تبدیل برعکس به صورت زیر:

$$\begin{pmatrix} F_d \\ F_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix}\tag{۳-۲}$$

²¹ Back electromotive force voltage

۳-۴-۲ تخمین گشتاور در قاب مرجع xy

از شکل ۳-۲ می توان دریافت که:

$$\sin \delta = \frac{\varphi_q}{|\varphi_s|} \quad (۴-۲)$$

$$\cos \delta = \frac{\varphi_d}{|\varphi_s|}$$

که $|\varphi_s|$ دامنه شار استاتور را نشان می دهد. با جایگزین کردن روابط (۴-۲) و (۳-۲) در (۱-۲) رابطه گشتاور به صورت زیر حاصل می شود.

$$T = \frac{3}{2} p [\varphi_d (i_x \sin \delta + i_y \cos \delta) - \varphi_q (i_x \cos \delta - i_y \sin \delta)] \quad (۵-۲)$$

$$= \frac{3}{2} p \left[i_x \frac{\varphi_d \varphi_q}{|\varphi_s|} + i_y \frac{\varphi_d^2}{|\varphi_s|} - i_x \frac{\varphi_d \varphi_q}{|\varphi_s|} + i_y \frac{\varphi_d^2}{|\varphi_s|} \right] = \frac{3}{2} p |\varphi_s| i_y$$

معادله (۵-۲) بدین معنی است که گشتاور رابطه مستقیم با مولفه محور y جریان استاتور دارد اگر دامنه شار استاتور ثابت باشد.

۴-۴-۲ معادلات شار پیوندی در قاب مرجع xy

معادله (۱-۲) می تواند به فرم ماتریس بازنویسی شود:

$$\begin{pmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varphi_f \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۶-۲)$$

با جایگزینی (۶-۲) در (۳-۲):

$$\begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varphi_f \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۷-۲)$$