دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه قدرت

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق - قدرت

عنوان

دیفرانسیل الکتریکی برای یک خودروی برقی با چهار موتور درایو مستقل

استادان راهنما

دکتر محمدباقر بناءشریفیان

دکتر مهران صباحی

پژوهشگر

مریم موذن

شهریور ۹۰

تقدیم‌به:

پدر و مادر عزیزم
آنان که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان
سرمایه‌های جاودانی زندگی من است.

تقدیر و تشکر

برخود لازم می‌دانم تا از اساتید گرانقدرم جناب آقای دکتر محمدباقر بناءشریفیان و جناب آقای دکتر مهران صباحی که زحمت راهنمایی بنده را بر عهده داشتند و جناب آقای دکتر محمدرضا فیضی که داوری پایان‌نامه اینجانب را تقبل نمودند، کمال تشکر را داشته باشم.

مریم موذن

شهریور ۹۰

تبریز، ایران

نام خانوادگی: موذن **نام:** مریم

عنوان پایان‌نامه: دیفرانسیل الکتریکی برای یک خودروی برقی با چهار موتور درایو مستقل

استاد راهنمای اول: دکتر محمدباقر بناءشریفیان

استاد راهنمای دوم: دکتر مهران صباحی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق قدرت **گرایش:** ماشین های الکتریکی و درایو

دانشگاه: تبریز **دانشکده:** مهندسی برق و کامپیوتر **تاریخ فارغ‌التحصیلی:**۹۰/۶/۸ **تعداد صفحه:** ۸۲

کلید واژه‌ها: دیفرانسیل الکتریکی، خودروی برقی، سنکرون‌سازی، Fictitious Master

چکیده:

توسعه‌ی خودروهای موتور احتراق داخلی، خصوصاً اتومبیل‌ها، یکی از بزرگترین یافته‌های تکنولوژی مدرن است. اتومبیل‌ها سهم عمده‌ای در رشد جوامع پیشرفته، به‌علت برآورده کردن نیازهای مربوط به حمل و نقل سریع و آسان، داشته‌اند.

با این وجود، تعداد زیاد اتومبیل‌های مورد استفاده در جهان موجب به‌وجود آمدن مشکلات جدی برای محیط زیست و زندگی مردم شده است. مشکلات مربوط به آلودگی هوا، گرم شدن کره زمین و تقلیل سریع منابع نفتی، امروزه از بزرگترین مسائل نگران‌کننده به‌شمار می‌روند.

در دهه‌های اخیر، تحقیقات و فعالیت‌های زیادی به‌منظور توسعه‌ی حمل و نقل با بازده بالا، تمیز و ایمن صورت گرفته است و خودروهای برقی جهت جایگزینی با خودروهای قدیمی که از موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌کنند، پیشنهاد شده‌اند.

استفاده از دیفرانسیل الکتریکی در خودروی برقی مزایای زیادی را به‌همراه خواهد داشت. دیفرانسیل الکتریکی مزیت جایگزینی تبدیل‌ها و دیفرانسیل‌های مکانیکی سنگین، کم بازده و گاهی لق را با موتورهای الکتریکی کوچک‌تر و سبک‌تر که به‌طور مستقیم به چرخ‌ها کوپل می شوند، داراست. همچنین این موتورها می‌توانند به‌طور مستقل از هم کنترل شوند که مزایای زیادی را به‌دنبال خواهد داشت.

تاکنون دیفرانسیل‌های الکتریکی مختلفی برای کاربرد خودروی برقی با درایو دو یا چهار چرخ پیشنهاد شده‌اند. با وجود مزایای گسترده که استفاده از دیفرانسیل الکتریکی به‌همراه دارد، اما مشکلاتی دارد که به‌کارگیری آن را محدود کرده است.

در این پایان‌نامه یک سیستم دیفرانسیل الکتریکی برای یک خودروی برقی با چهار موتور درایو مستقل پیشنهاد شده است. دیفرانسیل الکتریکی پیشنهادی ساده بوده و مشکلات دیفرانسیل‌های الکتریکی قبلی را ندارد. این دیفرانسیل الکتریکی برای خودروی برقی با قابلیت هدایت دو چرخ و چهار چرخ توسعه یافته است.

برای محاسبه سرعت چرخ‌ها به‌هنگام دور زدن از معادله Ackerman استفاده شده است. برای سنکرون‌سازی چرخ‌ها نیز تکنیک سنکرون‌سازی Fictitious Master مورداستفاده قرار گرفته است. سیستم پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده و عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که دیفرانسیل الکتریکی پیشنهادی به‌خوبی توانسته به‌هنگام حرکت مستقیم، دور زدن، شتاب‌گیری و کاهش شتاب خودرو و همچنین بروز اغتشاش در چرخ‌ها عمل نماید.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: بررسی منابع

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ تاریخچه خودروهای برقی ۳

۱-۳ انواع خودروهای برقی ۵

۱-٤ دیفرانسیل مکانیکی خودرو ٦

۱-۵ دیفرانسیل الکتریکی ۷

۱-٦ مزیت‌های EV با حضور ED ۸

۱-۷ روش‌های مختلف سنکرون‌سازی ۱۱

۱-۷-۱ Master – Slave ۱۲

۱-۷-۲ تکنیک Cross Coupling ۱۳

۱-۷-۳ روش کنترل Bi- Axial Cross- Coupled ۱٤

۱-۷-٤ Electronic Virtual Line Shafting ۱۵

۱-۷-۵ استراتژی Relative Coupling ۱٦

۱-۸ نمونه‌هایی از ED ها در خودروی برقی ۱۷

فصل دوم: مواد و روش‌ها

۲-۱ دیفرانسیل الکتریکی پیشنهادی ۲۲

۲-۲ محاسبه‌ی سرعت چرخ‌ها با استفاده از قانون Ackerman ۲۳

۲-۲-۱ محاسبه‌ی سرعت چرخ‌ها برای حالت4WD/2WS ۲۳

۲-۲-۲ محاسبه‌ی سرعت چرخ‌ها برای حالت 4WD/4WS ۲۷

۲-۳ مدل دینامیکی سیستم ۳۰

۲-٤ استراتژی سنکرون‌سازی ۳۱

۲-۵ کنترل موتورهای القایی ۳۷

۲-٦ نحوه‌ی به‌دست آوردن مسیر حرکت خودرو ۳۸

فصل سوم: نتایج و بحث

۳-۱ شبیه‌سازی دیفرانسیل الکتریکی پیشنهادی ٤٤

۳-۲ بررسی عملکرد سیستم به‌هنگام دور زدن خودرو ٤٥
۳-۲-۱ بررسی عملکرد سیستم به‌هنگام دور زدن در حالت 4WD/2WS ٤٦
۳-۲-۲ بررسی عملکرد سیستم به‌هنگام دور زدن در حالت 4WD/2WS ٥۳
۳-۳ بررسی عملکرد سیستم به‌هنگام شتاب‌گیری و کاهش شتاب خودرو ٥۸
۳-٤ بررسی عملکرد سیستم به‌هنگام بروز اغتشاش در چرخ‌های خودرو ٦۳
۳-٤-۱ بررسی عملکرد سیستم به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ شماره ۱ ٦۳
۳-٤-۲ بررسی عملکرد سیستم به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ شماره ۲ ٦۹

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

٤-۱ نتیجه‌گیری ۷٥
٤-۲ پیشنهادات ۷٦

اختصارات

٥-۱ اختصارات ۷۸

مراجع

٦-۱ مراجع ۸۰

فهرست شکل‌ها

شکل صفحه

فصل اول: بررسی منابع

شکل ۱-۱: اولین خودروی برقی که سرعتی بالغ بر یک مایل بر دقیقه (۶۰ mph) دارد ٤

شکل ۱-۲: یک طرح ساده از یک دیفرانسیل مکانیکی ۷

شکل ۱-۳: ساختار Master-Slave برای یک سیستم دو موتوره ۱۳

شکل ۱-٤: ساختار طرح کنترل Cross Coupling ۱٤

شکل ۱-۵: ساختار روش کنترل Bi- axial Cross- Coupled ۱۵

شکل ۱-٦: ساختار Electronic Virtual Line Shafting ۱٦

شکل ۱-۷: (الف) طرح Relative Coupling Strategy برای یک سیستم دو موتوره (ب) بلوک سرعت نسبی ۱۷

فصل دوم: مواد و روش‌ها

شکل ۲-۱: طریقه‌ی دور زدن خودرو در حالت 2WS طبق قانون بازوهای موازی ۲٤

شکل ۲-۲: طریقه‌ی دور زدن خودرو در حالت 2WS طبق قانون Ackerman ۲٤

شکل ۲-۳: طریقه‌ی دور زدن خودرو در حالت 4WS طبق قانون Ackerman ۲۷

شکل ۲-٤: بلوک دیاگرام تکنیک سنکرون‌سازی Fictitious Master برای دیفرانسیل الکتریکی در کاربرد خودروی برقی با قابلیت 4WD برمبنای سرعت زاویه‌ای خودرو ۳۲

شکل ۲-۵: بلوک دیاگرام تکنیک سنکرون‌سازی Fictitious Master برای دیفرانسیل الکتریکی در کاربرد خودروی برقی با قابلیت 4WD برمبنای سرعت خطی خودرو ۳٦

شکل ۲-٦: (الف) مدار جداساز جریان در قاب مرجع روتور شکل (ب) کنترلرهای جریان dc با کنترلر برداری جریان غیرمستقیم ۳۷

شکل ۲-۷: مسیر حرکت خوررو در حالت 2WS ۳۸

شکل ۲-۸: مسیر حرکت خوررو در حالت 4WS ٤۱

فصل سوم: نتایج و بحث

شکل ۳-۱: سرعت خطی خودرو در وضعیت 2WS ٤٦

شکل ۳-۲: زاویه‌ی فرمان خودرو در وضعیت 2WS ٤۷

شکل ۳-۳: زاویه‌ی انحراف چرخ‌های جلوی خودرو در وضعیت 2WS ٤۷

شکل ۳-٤: سرعت زاویه‌ای چرخ ۱ در وضعیت 2WS ٤۸

شکل ۳-۵: سرعت زاویه‌ای چرخ ۲ در وضعیت 2WS ٤٨
شکل ۳-٦: سرعت زاویه‌ای چرخ ۳ در وضعیت 2WS ٤٩
شکل ۳-۷: سرعت زاویه‌ای چرخ ٤ در وضعیت 2WS ٤٩
شکل ۳-۸: سرعت زاویه‌ای چرخ‌های خودرو در وضعیت 2WS ٤٩
شکل ۳-۹: گشتاور تولیدی توسط موتور ۱ در وضعیت 2WS ٥١
شکل ۳-۱۰: گشتاور تولیدی توسط موتور ۲ در وضعیت 2WS ٥١
شکل ۳-۱۱: گشتاور تولیدی توسط موتور ۳ در وضعیت 2WS ٥١
شکل ۳-۱۲: گشتاور تولیدی توسط موتور ٤ در وضعیت 2WS ٥٢
شکل ۳-۱۳: منحنی مسیر حرکت خودرو در وضعیت 2WS ٥٢
شکل ۳-۱٤: سرعت خطی خودرو در وضعیت 4WS ٥٣
شکل ۳-۱٥: زاویه‌ی فرمان خودرو در وضعیت 4WS ٥٣
شکل ۳-۱٦: زاویه‌ی انحراف چرخ‌های خودرو در وضعیت 4WS ٥٤
شکل ۳-۱۷: سرعت زاویه‌ای چرخ ۱ در وضعیت 4WS ٥٤
شکل ۳-۱۸: سرعت زاویه‌ای چرخ ۲ در وضعیت 4WS ٥٥
شکل ۳-۱۹: سرعت زاویه‌ای چرخ ۳ در وضعیت 4WS ٥٥
شکل ۳-۲۰: سرعت زاویه‌ای چرخ ٤ در وضعیت 4WS ٥٥
شکل ۳-۲۱: سرعت زاویه‌ای چرخ‌های خودرو در وضعیت 4WS ٥٦
شکل ۳-۲۲: گشتاور تولیدی توسط موتور ۱ در وضعیت 4WS ٥٦
شکل ۳-۲۳: گشتاور تولیدی توسط موتور ۲ در وضعیت 4WS ٥٧
شکل ۳-۲٤: گشتاور تولیدی توسط موتور ۳ در وضعیت 4WS ٥٧
شکل ۳-۲٥: گشتاور تولیدی توسط موتور ٤ در وضعیت 4WS ٥٧
شکل ۳-۲٦: منحنی مسیر حرکت خودرو در وضعیت 4WS ٥٨
شکل ۳-۲۷: سرعت خطی خودرو به‌هنگام تغییر سرعت مرجع ٥٩
شکل ۳-۲۸: سرعت زاویه‌ای چرخ ۱ به‌هنگام تغییر سرعت مرجع ٥٩
شکل ۳-۲۹: سرعت زاویه‌ای چرخ ۲ به‌هنگام تغییر سرعت مرجع ٦٠
شکل ۳-۳۰: سرعت زاویه‌ای چرخ ۳ به‌هنگام تغییر سرعت مرجع ٦٠
شکل ۳-۳۱: سرعت زاویه‌ای چرخ ٤ به‌هنگام تغییر سرعت مرجع ٦١
شکل ۳-۳۲: سرعت زاویه‌ای چرخ‌های خودرو به‌هنگام تغییر سرعت مرجع ٦١
شکل ۳-۳۳: گشتاور تولیدی توسط موتور ۱ به‌هنگام تغییر سرعت مرجع ٦٢

شکل ۳-۳٤: گشتاور تولیدی توسط موتور ۲ به‌هنگام تغییر سرعت مرجع ٦۲
شکل ۳-۳۵: گشتاور تولیدی توسط موتور ۳ به‌هنگام تغییر سرعت مرجع ٦۲
شکل ۳-۳٦: گشتاور تولیدی توسط موتور ٤ به‌هنگام تغییر سرعت مرجع ٦۳
شکل ۳-۳۷: سرعت خطی خودرو به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ ۱ ٦٤
شکل ۳-۳۸: گشتاور اغتشاش اعمالی به موتور ۱ ٦٤
شکل ۳-۳۹: سرعت زاویه‌ای چرخ ۱ به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ ۱ ٦۵
شکل ۳-٤۰: سرعت زاویه‌ای چرخ ۲ به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ ۱ ٦۵
شکل ۳-٤۱: سرعت زاویه‌ای چرخ ۳ به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ ۱ ٦٦
شکل ۳-٤۲: سرعت زاویه‌ای چرخ ٤ به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ ۱ ٦٦
شکل ۳-٤۳: سرعت زاویه‌ای چرخ‌های خودرو به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ ۱ ٦۷
شکل ۳-٤٤: گشتاور تولیدی توسط موتور ۱ به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ ۱ ٦۷
شکل ۳-٤۵: گشتاور تولیدی توسط موتور ۲ به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ ۱ ٦۷
شکل ۳-٤٦: گشتاور تولیدی توسط موتور ۳ به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ ۱ ٦۸
شکل ۳-٤۷: گشتاور تولیدی توسط موتور ٤ به‌هنگام بروز اغتشاش مثبت در چرخ ۱ ٦۸
شکل ۳-٤۸: سرعت خطی خودرو به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ ۲ ٦۹
شکل ۳-٤۹: گشتاور اغتشاش اعمالی به موتور ۲ ٦۹
شکل ۳-۵۰: سرعت زاویه‌ای چرخ ۱ به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ ۲ ۷۰
شکل ۳-۵۱: سرعت زاویه‌ای چرخ ۲ به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ ۲ ۷۰
شکل ۳-۵۲: سرعت زاویه‌ای چرخ ۳ به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ ۲ ۷۱
شکل ۳-۵۳: سرعت زاویه‌ای چرخ ٤ به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ ۲ ۷۱
شکل ۳-۵٤: سرعت زاویه‌ای چرخ‌های خودرو به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ ۲ ۷۲
شکل ۳-۵۵: گشتاور تولیدی توسط موتور ۱ به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ ۲ ۷۲
شکل ۳-۵٦: گشتاور تولیدی توسط موتور ۲ به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ ۲ ۷۲
شکل ۳-۵۷: گشتاور تولیدی توسط موتور ۳ به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ ۲ ۷۳
شکل ۳-۵۸: گشتاور تولیدی توسط موتور ٤ به‌هنگام بروز اغتشاش منفی در چرخ ۲ ۷۳

فهرست جداول

جدول صفحه

فصل اول: بررسی منابع

{بدون جدول}

فصل دوم: مواد و روش‌ها

{بدون جدول}

فصل سوم: نتایج و بحث

جدول ۳-۱: پارامترهای موتور القایی ٤٤

جدول ۳-۲: ضرایب کنترلر IFOC ٤٥

جدول ۳-۳: سایر پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده ٤٥

فصل اول

بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

توسعه‌ی خودروهای موتور احتراق داخلی (ICV[1])، خصوصاً اتومبیل‌ها، یکی از بزرگترین یافته‌های تکنولوژی مدرن است. اتومبیل‌ها سهم عمده‌ای در رشد جوامع پیشرفته، به‌علت برآورده کردن نیازهای مربوط به حمل و نقل سریع و آسان، داشته‌اند. در واقع توسعه‌ی صنعت خودروسازی، برخلاف صنایع دیگر، جامعه‌ی بشری را از یک وضعیت ابتدایی به یک جامعه‌ی صنعتی توسعه‌یافته تبدیل کرده است. صنعت خودروسازی و دیگر صنایعی که در خدمت آن هستند، پایه‌های اقتصاد جهان را تشکیل می‌دهند و سهم بزرگی از جمعیت کارگران را به‌کار می‌گیرند.

با این وجود، تعداد زیاد اتومبیل‌های مورد استفاده درجهان موجب به‌وجود آمدن مشکلات جدی برای محیط زیست و زندگی مردم شده است. مشکلات مربوط به آلودگی هوا، گرم شدن کره‌ی زمین و تقلیل سریع منابع نفتی، امروزه از بزرگترین مسائل نگران‌کننده به‌شمار می‌روند.

در دهه‌های اخیر، تحقیقات و فعالیت‌های زیادی به‌منظور توسعه‌ی حمل و نقل با بازده بالا، تمیز و ایمن صورت گرفته است و خودروهای برقی (EV[2]) جهت جایگزینی با خودروهای قدیمی که از موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌کنند پیشنهاد شده‌اند [۱].

EV ها از المان‌های ذخیره‌ساز انرژی مانند باتری‌ها جهت تولید انرژی الکتریکی استفاده کرده و از موتور الکتریکی برای تبدیل آن به‌شکل مکانیکی استفاده می‌کنند تا توان مورد نیاز برای حرکت خودرو را تولید کنند. از نقطه‌نظر مهندسی کنترل نیز خودروهای برقی مزیت‌های بسیاری دارند که از جایگزین شدن موتورهای الکتریکی به‌جای موتور احتراق داخلی در این خودروها ناشی می‌شود. بنابراین روش‌های پیشرفته‌ی کنترل خودروهای برقی مورد توجه قرار گرفته است.

کاربردهای چند موتوره یک حوزه بسیار جذاب در کاربردهای صنعتی می‌باشد که جایگزین کوپل مکانیکی قدیمی شده است. جایگزینی دیفرانسیل مکانیکی (MD[3])، که در خودروهای قدیمی مورد استفاده قرار می‌گرفت، با دیفرانسیل الکتریکی (ED[4]) مزیت‌هایی را در طراحی خودرو در ارتباط با مفهوم چند موتوره در بر خواهد داشت.

[1] Internal Combustion engine Vehicle
[2] Electric Vehicle
[3] Mechanical Differential
[4] Electric Differential

ED مزیت جایگزینی تبدیل‌ها و دیفرانسیل‌های مکانیکی سنگین و گاهی لق را با موتورهای الکتریکی کوچک‌تر و سبک‌تر که به‌طور مستقیم به چرخ‌ها کوپل می‌شوند، داراست. همچنین این موتورها می‌توانند به‌طور مستقل از هم کنترل شوند که مزایای زیادی را به‌دنبال خواهد داشت.

با وجود مزیت‌های قابل ملاحظه، ED مشکلاتی دارد که به‌کارگیری آن را محدود کرده است. Fictitious Master یک روش سنکرون‌سازی ساده است که استفاده از آن در ساختار ED مشکلات مربوط به پیچیدگی‌های آن را مرتفع می‌کند.

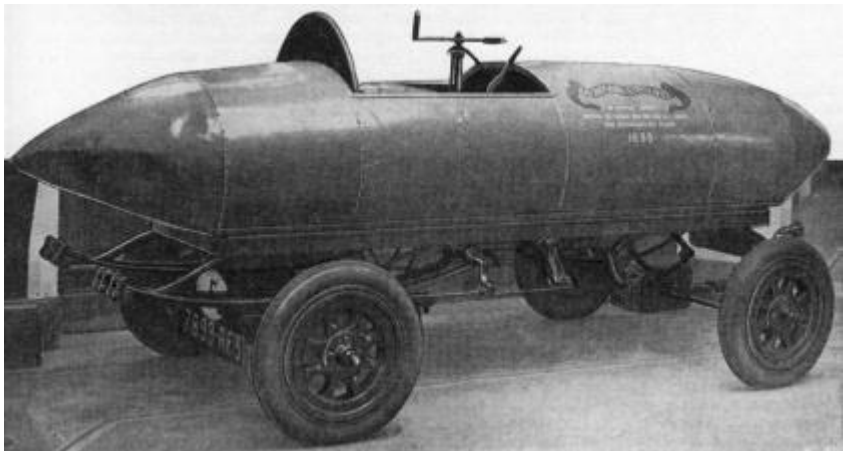
در این پایان‌نامه یک سیستم دیفرانسیل الکتریکی برای یک خودروی برقی با چهار موتور درایو مستقل پیشنهاد شده است. در فصل اول ابتدا تاریخچه‌ی مختصری از خودروهای برقی بیان شده است. سپس مقایسه‌ای بین خودروهای برقی قدیمی و جدید صورت گرفته است. نحوه‌ی عملکرد دیفرانسیل مکانیکی و دیفرانسیل الکتریکی توضیح داده شده و مزایای استفاده از دیفرانسیل الکتریکی در خودروهای برقی بیان شده است. پس از آن نیز روش‌های کنترلی که تاکنون در ED ها برای کاربرد خودروی برقی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به‌صورت اجمالی مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل دوم به معرفی روش کنترل پیشنهادی برای دیفرانسیل الکتریکی مورد نظر اختصاص یافته است. در ابتدا توضیحاتی در مورد معادله Ackerman بیان شده است. سپس روش سنکرون‌سازی Fictitious Master توضیح داده شده و به سیستم دیفرانسیل الکتریکی خودروی برقی با درایو چهار چرخ اعمال شده و معادله دینامیکی سیستم مورد نظر به‌دست آمده است. در فصل سوم نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به‌دست آمده است.

۱-۲ تاریخچه خودروهای برقی

خودروهای برقی اولیه، دهه‌ی ۱۸۳۰، از باتری‌های غیرقابل شارژ استفاده می‌کردند. حدود نیم قرن طول کشید تا باتری‌ها برای استفاده در خودروهای برقی تجاری به میزان کافی توسعه یابند. در انتهای قرن نوزدهم، با تولید انبوه باتری‌های قابل شارژ، خودروهای برقی به‌طور نسبتاً گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. با این وجود احتمال برقی شدن خودروهای شخصی نسبت به سایر خودروها مانند تاکسی‌ها بیشتر بود. می‌توان گفت اگر کارایی مدنظر بود، خودروهای برقی به رقبای

ماشین بخار و احتراق داخلی‌شان ترجیح داده می‌شدند. شکل (۱-۱) اولین خودروی برقی را نشان می‌دهد که سرعتی بالغ بر یک مایل بر دقیقه (۶۰ mph) داشت.



شکل ۱-۱: اولین خودروی برقی که سرعتی بالغ بر یک مایل بر دقیقه (۶۰ mph) داشت

در شروع قرن بیستم به‌نظر می‌رسید که خودروهای برقی در آینده‌ی حمل و نقل جاده‌ای یک رقیب قدرتمند برای سایر وسایل نقلیه باشند. خودروی برقی به‌طور نسبی قابل اطمینان بود و به‌طور لحظه‌ای روشن می‌شد، درحالی‌که خودروهای موتور احتراق داخلی در آن زمان غیرقابل اطمینان بودند، بوی بدی داشته و برای روشن شدن نیاز به هندل زدن داشتند. رقیب اصلی دیگر، خودروهای ماشین بخار بودند که بازده گرمایی موتورهایشان به‌طور نسبی پایین بود.

در ۱۹۲۰، چند صدهزار خودروی برقی به‌عنوان van، تاکسی، خودروی شخصی و اتوبوس تولید شده بود. به هرحال، با وجود نوید خودروهای برقی اولیه، یک‌باره مواد نفتی ارزان‌قیمت به‌طور گسترده در دسترس قرار گرفت و با اختراع self starter برای ICV در سال ۱۹۱۱ مشکل استارت موتورهای احتراق داخلی حل شد. بنابراین موتور احتراق داخلی گزینه‌ی جذاب‌تری برای تولید حرکت در خودروها شد و بازار اصلی برای باتری‌های قابل شارژ، استارت موتورهای احتراق داخلی گردید.

در اواخر قرن بیستم تغییراتی به‌وجود آمد که دوباره می‌توانست خودروهای برقی را مورد توجه قرار دهد. اولاً نگرانی‌ها درباره‌ی محیط زیست افزایش یافت. با انتشار سرتاسری گاز دی‌اکسید کربن و همچنین صدور محلی دودهای اگزوز خودروها در شهرهای پرجمعیت وضعیت نامطلوبی برای

زندگی پدید آمد. ثانیاً تکنیک‌های طراحی خودرو توسعه یافت و باتری‌های قابل شارژ، موتورها و کنترلرها بهبود یافتند [۲].

در واقع، مسائل مربوط به محیط زیست و بحران انرژی می‌تواند یک فاکتور تصمیم‌گیری مهم در پذیرفتن خودروهای برقی برای کاربردهای شهری باشد. هرچند که خودروهای برقی ضرورتاً همه‌ی مقدار انرژی مورد استفاده را کاهش نمی‌دهند، اما توان تولیدی توسط موتورهای احتراق داخلی را که روی خودروها نصب می‌شوند حذف کرده و مسئله را به نیروگاه‌ها انتقال می‌دهند؛ که می‌تواند تنوع گسترده‌ای از سوخت‌ها را مورد استفاده قرار دهد و گازهای خروجی به‌صورت مناسبی مدیریت شود. همچنین کل یا بخشی از انرژی مورد نیاز می‌تواند از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی‌های آبی، بادی، جزر و مد و... به‌دست آید که خروجی گازهای آلاینده‌ی صفر را نوید می‌دهد [۲].

۱-۳ انواع خودروهای برقی

مسائل مربوط به محیط زیست و کمبود انرژی از جمله دلایلی است که توجه زیادی را به خودروهای برقی معطوف کرده است [۳، ٤]. امروزه EV ها اساساً به دو روش توسعه یافته‌اند [۵، ٦]. روش اول توسعه‌ی EV با استفاده از موتورهای با سرعت بالا می‌باشد و روش دوم توسعه‌ی EV با استفاده از موتورهای گشتاور بالاست. در روش اول (سیستم درایو یگانه) توان موتور سرعت بالا از طریق کلاچ، دنده‌های کاهنده، جعبه‌دنده‌های دیفرانسیلی و سایر بخش‌های مکانیکی به چرخ‌های محرک انتقال می‌یابد [٦، ۷]. در این حالت تلفات انرژی در بخش‌های مکانیکی نه تنها سرعت ماکزیمم موتور را محدود می‌کند، بلکه بازده کل EV را نیز کاهش می‌دهد. در این حالت برای کنترل سرعت چرخ‌های چپ و راست به‌هنگام دور زدن از دیفرانسیل مکانیکی استفاده می‌شود.

در روش دوم (سیستم درایو چندگانه) EV به‌طور مستقیم با موتورهای گشتاور بالا رانده می‌شود و کلاچ، دنده‌های کاهنده و جعبه‌دنده‌های دیفرانسیلی حذف می‌شود. بنابراین اگر موتورها طراحی مناسبی داشته باشند، بازده کل می‌تواند به‌میزان قابل توجهی، حتی تا نزدیکی بازده موتورها، افزایش یابد. در این وضعیت موتورها قابلیت کنترل مستقل را دارند.

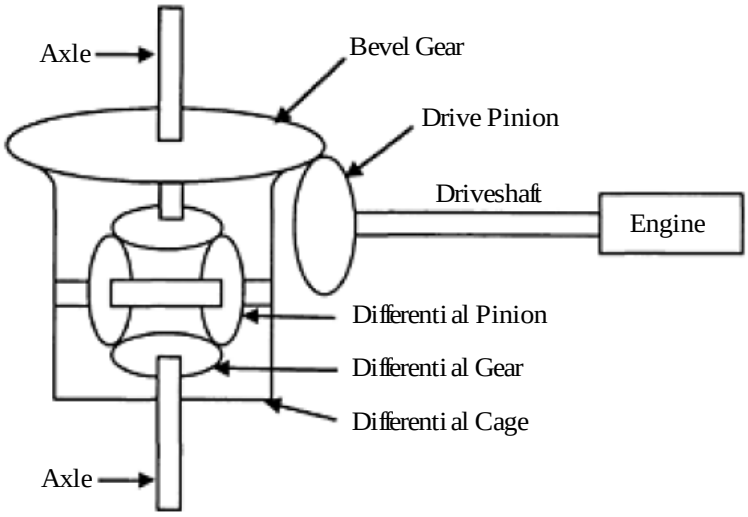
در سیستم درایو چندگانه، کنترلرهای موتورها باید طوری طراحی شوند که علاوه‌بر تنظیم مناسب سرعت موتورها در حرکت مستقیم، نقش یک دیفرانسیل الکتریکی را به‌هنگام دور زدن ایفا کنند. به‌عبارت دیگر، آن‌ها باید عملکردی مشابه با دیفرانسیل مکانیکی همانندشان را نیز انجام دهند. نقطه ضعف روش دوم این است که سیستم کنترل سرعت EV بسیار پیچیده‌تر و مشکل‌تر می‌شود، چون چرخ‌های محرک باید دقیقاً مطابق با قوانین EV حرکت کنند [۸، ۹]. اگر قوانین دور زدن به‌طور دقیق دنبال نشوند، EV نمی‌تواند به‌هنگام دور زدن به‌آسانی به حرکت خود ادامه دهد و حتی امکان واژگونی وجود دارد. درحقیقت می‌توان گفت سیستم کنترل پیچیده از اصلی‌ترین مشکلات این روش است [۱۰، ۱۱].

۱-٤ دیفرانسیل مکانیکی خودرو

در این بخش مکانیزم عملکرد یک دیفرانسیل مکانیکی ساده مورد استفاده در خودروهای قدیمی توضیح داده می‌شود [۱۲]. دیفرانسیل مکانیکی خودرو یک مکانیزم از حرکت دیفرانسیلی چرخ‌ها را روی محور عقب فراهم می‌کند. وقتی که خودرو یک پیچ را دور می‌زند، چرخ عقبی که در منحنی بیرونی قرار دارد باید سریع‌تر از چرخ درونی بچرخد، چون این چرخ (چرخ بیرونی) باید مسافت بیشتری را طی کند. نوع دنده‌ی مورد استفاده در یک دیفرانسیل مکانیکی خودرو به‌عنوان چرخ‌دنده‌ی سیاره‌ای (Planetary gear) شناخته می‌شود؛ به‌طوری‌که یک سری از دنده‌ها در یک رفتار هماهنگ با هم عمل می‌کنند. یک طرح ساده از یک دیفرانسیل مکانیکی اتومبیل در شکل (۱-۲) آمده است. به‌منظور سادگی، دندانه‌های چرخ‌دنده‌ها در شکل نشان داده نشده است.

میل‌لنگ (driveshaft) متصل به موتور (engine) چرخ‌دنده‌ی جناحی (pinion) را حرکت می‌دهد که به چرخ‌دنده‌ی مخروطی (bevel gear) متصل شده است. چرخ‌دنده‌ی مخروطی به قفسه‌ی (cage) دیفرانسیل متصل است که محور چرخ را می‌چرخاند. قفسه تنها به یکی از محورهای چرخ‌ها متصل شده است؛ محور دیگر تنها به وسیله‌ی چرخ‌دنده‌ی جناحی دیفرانسیل اتصال یافته است. چرخ‌دنده‌ی جناحی دیفرانسیل اتصال‌دهنده‌ی دنده‌های دیفرانسیل، در مدتی که سرعت دو چرخ روی محور یکسان است نمی‌چرخد. اما اگر یکی از چرخ‌ها به‌خاطر دور زدن نسبت به دیگری آرام‌تر بچرخد، چرخ‌دنده‌ی جناحی دیفرانسیل شروع به چرخیدن می‌کند تا سرعت بالاتری را روی چرخ

دیگر تولید کند. دیفرانسیل مکانیکی توصیف شده در این بخش، یک دیفرانسیل مکانیکی ساده است که برای انتقال گشتاور کامل در شرایطی مانند روی یخ مناسب نمی‌باشد.



شکل ۱-۲: یک طرح ساده از یک دیفرانسیل مکانیکی

۱-۵ دیفرانسیل الکتریکی

همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، در خودروهای برقی با درایو یگانه به‌علت حضور ادوات مکانیکی پیچیده و کم بازده، مشکلاتی وجود دارد که مزایای EV را محدود می‌کند. بنابراین استفاده از دیفرانسیل الکتریکی در خودروهای برقی پیشنهاد می‌شود (درایو چندگانه). استفاده از یک دیفرانسیل الکتریکی مزایایی را در طراحی خودرو در راستای مفهوم چند موتوره در برخواهد داشت. ED مزیت جایگزینی تبدیل‌ها و دیفرانسیل‌های مکانیکی سنگین و گاهی لق را با موتورهای الکتریکی کوچک‌تر و سبک‌تر که به‌طور مستقیم (توسط یک دنده ثابت یا یک موتور داخل چرخ) به چرخ‌ها کوپل می‌شوند، داراست. امروزه ED ها برای خودروهای با دو یا چهار چرخ محرک پیشنهاد می‌شوند.

یک دیفرانسیل الکتریکی دارای مشخصات زیر است [۱۳]:

۱) لینک مکانیکی بین چرخ‌های محرک وجود ندارد.

۲) نیروی کشش به هر موتور توسط کنترلر سرعت به‌طور مستقل اعمال می‌شود.

۳) به‌هنگام دور زدن، کنترلر سرعت توان کمتری را به چرخ‌های داخلی اعمال خواهد کرد.

٤) زمانی که چرخ‌های خودرو به‌طور مستقیم حرکت می‌کنند، ED نقش یک قفل دیفرانسیلی را ایفا می‌کند.

باید توجه کرد که ED باید برای دو مسئله‌ی زیر راه‌حل ارائه دهد: مسئله اول محاسبه سرعت چرخ‌ها به‌عنوان تابعی از زاویه‌ی چرخش و مسئله دوم سنکرون کردن چرخ‌ها. معمولاً روابط مربوط به سرعت چرخ‌های بیرونی و درونی به‌هنگام دور زدن با استفاده از قانون Ackerman به‌دست می‌آید. با استفاده از این قانون، اختلاف سرعت نسبی بین چرخ‌ها با توجه به مقدار زاویه‌ی چرخش محاسبه می‌شود. این قانون در فصل دوم به تفصیل بیان خواهد شد.

در رابطه با مسئله‌ی سنکرون‌سازی موتورها هم معمولاً یکی از ساختارهای سنکرون‌سازی مانند Master-Slave، Cross Coupling، مد لغزشی، کنترل فازی و ... جهت کنترل سرعت نسبی در طول خط سیر، در ساختار ED اعمال می‌شود [١٤، ١٥]. این مسئله نیز در ادامه‌ی همین فصل توضیح داده خواهد شد.

١-٦ مزیت‌های EV با حضور ED

در سال‌های اخیر، نگرانی‌های بحران انرژی و حفاظت از محیط زیست موجب شده است که کارخانه‌داران بزرگ و تعداد زیادی از محققین تلاش زیادی را جهت توسعه‌ی خودروهای برقی با آلودگی کم و بازده بالا برای جایگزینی خودروهای قدیمی موتورهای احتراق داخلی به‌کار گیرند. EV ها از المان‌های ذخیره‌ساز انرژی مانند باتری‌ها جهت تولید انرژی الکتریکی استفاده کرده و از موتورهای الکتریکی برای تبدیل آن به‌شکل مکانیکی استفاده می‌کنند تا توان مورد نیاز برای حرکت خودرو را تولید کنند. بنابراین این خودروها آلودگی کمتری ایجاد کرده و همچنین در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌کنند.

علاوه‌برآن‌که خودروهای برقی برای حل مسائل انرژی و حفاظت از محیط زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند، این خودروها مزیت‌های بسیاری را در مقایسه با همتای موتور احتراق داخلی خود ارائه می‌دهند [١٦].

عمده مزایای خودروهای برقی از به‌کارگیری موتورهای الکتریکی ناشی می‌شود. استفاده از دیفرانسیل الکتریکی در خودروهای برقی این مزیت‌ها را چند برابر کرده است. بخشی از مزایای خودروهای برقی و به‌کارگیری دیفرانسیل الکتریکی در آنها در این بخش بیان شده است.

خودروی برقی از نکته نظر کنترل مزیت‌های بسیار دارد و یک گزینه‌ی مناسب و جالب‌توجه برای اعمال تکنیک کنترل حرکت پیشرفته است. استفاده از موتورهای الکتریکی در خودروهای برقی برای تولید توان حرکتی آن‌ها، مزیت‌ها و قابلیت‌هایی را به‌همراه دارد که در این‌جا به بخشی از آن‌ها اشاره می‌شود [۱۷].

- موتورهای الکتریکی می‌توانند پاسخ گشتاور سریع و دقیق تولید کنند.

شاید بزرگترین مزیت خودروهای برقی در تولید گشتاور سریع و دقیق توسط موتورهای الکتریکی باشد. پاسخ گشتاور موتورهای الکتریکی در حدود چند میلی ثانیه است که ده تا صد برابر سریع‌تر از موتور احتراق داخلی یا سیستم ترمز هیدرولیکی می‌باشد. این ویژگی امکان کنترل فیدبک را به‌وجود می‌آورد. درنتیجه پیاده‌سازی سیستم ضد قفل (ABS[1]) به‌طور عالی ممکن خواهد شد. علاوه‌براین، سیستم ABS و سیستم کنترل کشش (TCS[2]) می‌توانند مجتمع شوند؛ چون یک موتور الکتریکی می‌تواند هم گشتاور شتاب‌گیری و هم گشتاور کاهش شتاب را تولید کند.

- گشتاور موتورهای الکتریکی می‌تواند به‌آسانی اندازه‌گیری شده یا تخمین زده شود.

در مقایسه با موتور احتراق داخلی یا ترمز هیدرولیکی، گشتاور ترمزی یا حرکتی تولید شده توسط یک موتور الکتریکی بسیار دقیق‌تر به‌دست می‌آید. درحقیقت می‌توان از جریان موتور به گشتاور آن پی‌برد. بنابراین یک رویتگر نیروی رانش ساده می‌تواند طراحی شود و به‌آسانی می‌توان نیروی ترمزکننده و جلوبرنده را بین تایر و سطح جاده به‌صورت زمان – حقیقی تخمین زد. درنتیجه موتور با استفاده از این ویژگی می‌تواند به‌عنوان تخمین‌گر شرایط جاده نیز به‌کار رود حتی دادن اخطار به راننده ممکن خواهد شد.

- بیش از یک موتور می‌تواند روی هر خودرو سوار شود که می‌توانند به‌طور مستقل از هم کنترل شوند.

[1] Antilock Braking System
[2] Traction Control System