

اینورتر امپدانی دو خروجی برای درایو دو موتور القایی کنترل شده به روش DTC در خودرو هیبرید پیل سوختی

مجید ولی زاده^۱، دانشجوی دکترا، محمدرضا فیضی^۲، استاد، ابراهیم بابایی^۳، دانشیار، مهران صباحی^۴، استادیار

۱، ۲، ۳ و ۴ - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران

m-valizadeh@tabrizu.ac.ir^۱, feyzy@tabrizu.ac.ir^۲, e-babaei@tabrizu.ac.ir^۳, sabahi@tabrizu.ac.ir^۴

چکیده: یکی از مهم ترین معیارهای خودروها پاسخ دهی با دینامیک بالا است، بنابراین از روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) برای درایو موتور القایی استفاده شده است. در این مقاله، از ترکیب باتری، ابرخازن و پیل سوختی برای تامین انرژی موتور القایی خودرو هیبرید استفاده شده است. استفاده از پیل سوختی می تواند محدودیت مسافت کوتاه طی شده به ازای یک بار شارژ نمودن باتری را حل نماید اما تغییرات زیاد ولتاژ به ازای تغییرات جریان از مشکلات پیل سوختی است که عملکرد روش DTC را مختل می نماید. در اینجا یک مدل دینامیکی جامع برای پیل سوختی ارائه شده و اثر پارامترهای مختلف مانند دما و فشار گازهای ورودی پیل سوختی ارزیابی شده است. برای خودرو هیبرید ساختاری پیشنهاد شده که قابلیت راه اندازی سرد را داشته و الگوریتم کلیدزنی آن به گونه ای است که قابلیت افزایش سرعت پاسخ دینامیکی گشتاور و کاهش رپل گشتاور را دارد. همچنین به منظور افزایش بازده و افزایش قابلیت کنترل پذیری خودرو، دو موتور القایی در خودرو استفاده شده که توسط یک اینورتر مشترک تغذیه و کنترل می شوند. در انتها عملکرد خودروی هیبرید در طی نمودن یک سیکل رانندگی استاندارد ارزیابی شده و نشان داده شده که سیستم ارائه شده از دقت و سرعت پاسخ دهی بالایی برخوردار است.

واژه های کلیدی: پیل سوختی، خودروی هیبرید، کنترل مستقیم گشتاور، اینورتر ۹ کلیدی، رپل گشتاور.

Two Output Zsource Inverter for Direct Torque Control of Two IM in Fuel Cell Hybrid Vehicle

M.Valizadeh¹, M.R. Feyzi², E.Babaei³, M. Sabahi⁴

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract: In this paper combination of battery, ultra capacitor and fuel cell are used to feed induction motor which used in hybrid vehicle. Fast dynamic response is one of the critical criteria in hybrid vehicles. So in this paper Direct Torque Control (DTC) method has been used. Fuel cell can solve some of electrical vehicle problems but large variation of fuel cell output voltage can derange DTC. In this paper an accurate fuel cell dynamic model has been extract and effect of important parameters such as temperature and pressure have been analyzed. The proposed structure for hybrid vehicle has cold start capability. Also in order to increase efficiency and controllability, two induction motors are used in vehicle which a common inverter is used to drive them. Finally hybrid vehicle has been tested in standard driving cycle which results show ability of proposed structure and control method.

Keywords: Fuel cell, Hybrid vehicle, Direct torque control, Torque ripple, Energy management.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۸/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۲/۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۳/۲۸

نام نویسنده ی مسئول : مجید ولی زاده

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده - مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

مسائل محیط زیست و امکان تمام شدن سوخت های فسیلی، تمایل به استفاده از انرژی الکتریکی در خودروها را افزایش داده است [۱]. پیل سوختی یکی از منابع تولید انرژی الکتریکی است که مستقیماً انرژی شیمیایی را به الکتریکی تبدیل می نماید، بنابراین نسبت به چرخه تولید انرژی الکتریکی از سوخت های فسیلی دارای بازده بالاتری است و تمایل برای استفاده از آن افزایش یافته است [۲].

تحلیل رفتار خودرو به نحوه مدل سازی پیل سوختی بستگی دارد. بیش تر مدل ها دارای معادلات دیفرانسیل زمانی پیچیده ای هستند که بیان کننده واکنش های درونی پیل سوختی هستند. این مدل ها برای شبیه سازی پاسخ گذرای پیل سوختی دقت بالایی دارند [۳]، اما به دلیل حجم زیاد محاسبات، برای تحلیل های آنلاین مناسب نیستند و استفاده از آن ها تاخیر سیستم درایو را بیش تر خواهد نمود.

مدل مداری پیل سوختی که از دقت و سرعت پاسخ دهی مناسبی برخوردار باشد، برای شبیه سازی خودرو هیبرید مناسب خواهد بود. توان مورد نیاز خودرو با توجه به سیکل رانندگی ممکن است تغییرات ناگهانی زیادی داشته باشد اما پیل سوختی دارای دینامیک کندی است و نمی تواند به تنهایی این تغییرات توان را پاسخ دهد. برای این منظور می توان از ترکیب پیل سوختی با باتری و ابرخازن استفاده نمود [۴]. استفاده از ابرخازن با چگالی انرژی بالا در شرایط پیک بار باعث کاهش تنش روی باتری شده و بازده را افزایش می دهد در نتیجه عمر مفید باتری افزایش یافته و می توان از باتری با ظرفیت و ابعاد کوچک تری استفاده نمود و در هزینه صرفه جویی نمود [۵].

باتری مورد استفاده در خودرو باید قابلیت هایی مانند ذخیره سازی انرژی، جریان تخلیه بالا، قابلیت شارژ سلول های خالی در شرایط ترمز و طول عمر زیادی داشته باشد. معمولاً سه نوع باتری در خودروها استفاده می شوند [۶]: ۱- باتری اسید سرب ۲- باتری هیدرات فلز نیکل (NMHB)، ۳- باتری لیتیوم یونی (Lithium Ion)

مدل متداول برای باتری، یک منبع ولتاژ است که دارای ولتاژ داخلی و یک مقاومت داخلی است. مقدار ولتاژ داخلی، مقاومت داخلی و ظرفیت باتری به SOC و دمای باتری بستگی دارد. می توان با استفاده از سیستم خنک کاری مناسب، دمای باتری را تقریباً ثابت نگه داشت و در نتیجه از بررسی اثر تغییرات دما صرف نظر نمود [۷].

مدل های مختلف ارائه شده برای باتری ها را می توان به ۴ دسته تقسیم نمود: الف- مدل های الکتروشیمیایی، ب- مدل های تحلیلی، ج- مدل های تصادفی و آماری، د- مدل های مداری الکتریکی

میزان رطوبت پیل سوختی، فشار گازهای ورودی و نحوه تثبیت مقدار آن ها بر عملکرد پیل سوختی تاثیر زیادی دارد [۸]. مناسب نبودن دمای کاری پیل سوختی می تواند باعث میعان گاز شده و عملکرد پیل سوختی را به شدت تحت تاثیر قرار دهد [۹]. با توجه به ثابت زمانی حرارتی پیل سوختی، بسیاری از طرح ها قابلیت راه اندازی

سرد خودرو را ندارند. در مقاله حاضر در شرایط راه اندازی، موتور توان مورد نیاز خود را از باتری و ابرخازن دریافت می کند و در نتیجه در شرایطی که هنوز پیل سوختی به دمای مناسب نرسیده، باز هم خودرو قابلیت کارکرد مناسب را خواهد داشت.

در مرجع [۱۰]، از یک دستگاه جانبی برای تنظیم و حفظ میزان رطوبت لایه داخلی غشاء در مقدار مطلوب استفاده شده و مقدار رطوبت تقریباً ثابت خواهد بود. در [۳] به دلیل تاثیر نهایی بسیار کوچکی که تغییرات محیطی روی مقدار پارامتر Ψ معرف وضعیت رطوبت لایه غشاء پیل سوختی دارند، برای Ψ یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. در مرجع [۲] که هدف تنها بررسی نحوه عملکرد و مدل سازی یک پیل سوختی بوده است، نشان داده شده که مقدار پارامتر Ψ به اندازه ۰/۲۶ درصد افزایش داشته است که تغییر بسیار کوچکی است. در مقاله حاضر، میزان رطوبت لایه غشاء در معادلات مدل سازی پیل سوختی لحاظ شده است اما به دلیل ایزوله بودن گازهای ورودی از هوا، از تغییرات لحظه ای رطوبت هوای محیط صرف نظر شده که باعث کاهش حجم محاسبات شده و تاثیر بسیار ناچیزی بر دقت مدل پیل سوختی دارد.

مرجع [۷] که ساختاری مانند مقاله حاضر دارد، برای مدل سازی پیل سوختی از یک مدار معادل تونن ساده استفاده کرده و از اثر خازنی صرف نظر کرده است. این مدل فقط در ناحیه کار خطی پیل سوختی دارای پاسخ قابل قبولی است و در نواحی کاهش غلظت و فعال سازی، دارای خطای بسیار زیادی است. برای درایو موتور، پیل سوختی باید بتواند در نواحی مختلف پاسخ مناسبی داشته باشد.

با توجه به هزینه، قابلیت اطمینان و وجود روش های کنترلی مناسب، در این مقاله از موتور القایی قفس سنجایی استفاده شده است. روش کنترل برداری میدان به دلیل استفاده از تبدیل دستگاه های مختصات و استفاده از کنترل کننده های PI، دارای دینامیک کندی است و برای کنترل موتور به مقدار دقیق پارامترهای مختلف موتور نیاز دارد. روش DTC بسیار سریع است و وابستگی کمی به پارامترهای موتور دارد، بنابراین برای خودرو هیبرید مناسب است [۱۱].

برای تغذیه موتور القایی در روش DTC در [۱۲، ۱۳، ۱۴] از اینورتر VSI استفاده شده و برای جلوگیری از اتصال کوتاه شدن یک پایه اینورتر باید یک زمان مرده کلیدزنی در نظر گرفته شود که باعث اعوجاج شکل موج خروجی اینورتر شده و از طرفی ولتاژ موثر خروجی را هم کاهش می دهد در نتیجه باید تعداد بیش تری از سلول ها با هم سری شوند. لذا در مقاله حاضر از اینورتر امپدانی استفاده شده که مشکل مذکور را نداشته و حتی می تواند ولتاژ را افزایش دهد.

مرجع [۱۵] از مبدل امپدانی برای درایو خودرو پیل سوختی استفاده کرده و صرفاً نشان داده که مبدل امپدانی دارای عملکرد افزایش ولتاژ بوده و قادر است پاسخ مناسبی داشته باشد. برای شبیه سازی موتور از بار RL استفاده شده و در نتیجه رفتار دینامیکی موتور، تغییرات سرعت و روش کنترلی آن به هیچ وجه مورد توجه قرار

سانتی گراد)، R ثابت گازها، فشار نسبی هیدروژن، فشار نسبی اکسیژن است. ولتاژ مدار باز پیل سوختی به دما و فشار اکسیژن و هیدروژن بستگی دارد. افت ولتاژ فعال سازی در الکترودهای آند و کاتد را می توان به صورت رابطه (۳) بیان کرد:

$$V_{act} = -[\zeta_1 + \zeta_2 T + \zeta_3 T \times \ln(C_{O_2}) + \zeta_4 T \times \ln(i_{FC})] \quad (3)$$

که در آن ها ضرایبی هستند که به دما و فشار گازهای ورودی بستگی دارند اما میزان تغییرات آن ها به حدی ناچیز است که متغیر در نظر گرفتن آن ها تاثیر زیادی در جواب نهایی نخواهد داشت و در مقابل حجم محاسبات را بسیار افزایش می دهد و باعث کندتر شدن پاسخ پیل سوختی می شود. از آنجایی که سرعت پاسخ دهی یکی از معیارهای مهم در درایو خودروهای برقی و هیبرید است، در این مقاله این ضرایب ثابت در نظر گرفته شده اند. غلظت اکسیژن در سطح کاتالیزور است و جریان نقطه کار پیل سوختی است. رابطه بین نرخ مولار گازهای هیدروژن و اکسیژن با فشار آن ها به صورت زیر است:

$$K_{H_2} = \frac{q_{H_2}^{out}}{P_{H_2}} \quad (4)$$

$$K_{O_2} = \frac{q_{O_2}^{out}}{P_{O_2}} \quad (5)$$

مقدار فشار گاز با مقدار گاز درون سلول متناسب است. بنابراین رابطه بین تغییرات جزئی فشار، نرخ گازها و مقدار جریان پیل سوختی، که معرف میزان مصرف گاز است، طبق روابط زیر خواهد بود:

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_a} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - 2K_r I_{FC}) \quad (6)$$

$$\frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_c} (q_{O_2}^{in} - q_{O_2}^{out} - K_r I_{FC}) \quad (7)$$

در روابط (۶) و (۷) و به ترتیب نرخ ورودی هیدروژن و اکسیژن هستند. و K_r ضریبی است که رابطه بین میزان واکنش گاز و جریان پیل سوختی را نشان می دهد. مقدار فشار گازهای هیدروژن و اکسیژن از تبدیل لاپلاس روابط (۶) و (۷) به صورت زیر خواهد بود:

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} S} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{FC}) \quad (8)$$

$$P_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} S} (q_{O_2}^{in} - K_r I_{FC}) \quad (9)$$

$$\tau_{H_2} \triangleq \frac{V_a}{K_{H_2} RT} \quad (10)$$

$$\tau_{O_2} \triangleq \frac{V_c}{K_{O_2} RT} \quad (11)$$

نگرفته است و این در حالی است که در مقاله حاضر پیل سوختی، باتری، ابرخازن و موتور القایی مدل سازی شده و رفتار درایو موتور القایی به روش DTC مورد بررسی قرار گرفته است.

برای افزایش کنترل پذیری خودرو و کاهش هزینه ناشی از استفاده از یک موتور با توان بیش تر، می توان از دو یا چند موتور القایی با توان های کمتر استفاده کرد. در [۱۲، ۷] برای تغذیه هر موتور از یک اینورتر جداگانه استفاده شده که باعث افزایش تعداد کلیدها شده است. اما در این مقاله، از یک اینورتر مشترک برای درایو دو موتور القایی سه فاز استفاده شده و با این کار تعداد کلیدها از ۱۲ به ۹ عدد کاهش یافته است. از طرفی یکی از معایب اینورتر ۲ خروجی کاهش سطح ولتاژ خروجی است که این مسئله با استفاده از ساختار امپدانی و کنترل ST جبران شده است. در [۱۵] تنها یک حرکت شتاب گیری و یک ترمز بررسی شده که برای ارزیابی عملکرد خودرو کافی نیست اما در مقاله حاضر از سیکل رانندگی استاندارد استفاده شده است.

۲- مدل سازی منابع انرژی خودرو هیبرید

در این قسمت مدل سازی پیل سوختی، باتری و ابرخازن به گونه ای انجام شده که با وجود داشتن پاسخ سریع، دقت بالایی دارند.

۲-۱- مدل سازی پیل سوختی

پیل های سوختی انواع مختلفی دارند که از میان آن ها PEM برای وسایل نقلیه کاربرد فراوانی دارد. ولتاژ تولیدی پیل سوختی توسط افت ولتاژهای ناشی از کاهش غلظت مواد واکنش دهنده، فعال سازی در الکترودهای آند و کاتد و مقاومت اهمی کاهش می یابد. جریان کشیده شده از پیل سوختی باعث تغییر دمای پیل سوختی می شود و چون مقدار افت ولتاژهای مختلف پیل سوختی خود به دما بستگی دارند، بنابراین در مدل سازی پیل سوختی باید برای جریان، یک سیستم حلقه بسته در نظر گرفت، اما در مرجع [۳] جریان به عنوان یک متغیر مستقل در مدل سازی در نظر گرفته شده که باعث ایجاد خطا خواهد شد. در این مقاله جریان به عنوان یک پارامتر وابسته در نظر گرفته خواهد شد و در نتیجه دقت مدل سازی افزایش خواهد یافت.

ولتاژ تولیدی توسط یک پیل سوختی با رابطه زیر بیان می شود:

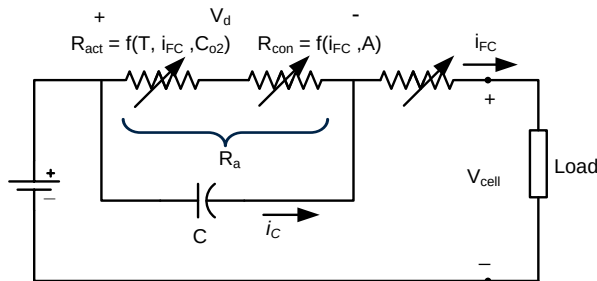
$$V_{FC} = E_{Nerst} - V_{act} - V_{con} - V_{ohm} \quad (1)$$

که در آن ولتاژ تولیدی پیل سوختی، E_{Nerst} ولتاژ مدار باز پیل سوختی در حالت بدون اتلاف، افت ولتاژ فعال سازی در الکترودهای آند و کاتد، افت ولتاژ کاهش غلظت مواد واکنش دهنده (اکسیژن و هیدروژن) و افت ولتاژ مقاومت اهمی الکترولیت و اتصال ها است. رابطه به صورت زیر است:

$$E_{Nerst} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F} (T - T_{ref}) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2}}{P_{O_2}^{0.5}} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، انرژی آزاد گیبس، F ثابت فارادی، ΔS تغییرات آنتروپی، T دمای پیل سوختی، T_{ref} دمای مرجع (۲۵ درجه

ناشی از فرآیند فعال‌سازی، کاهش غلظت و افت ولتاژ اهمی هستند. به دلیل تجمع بارهای الکتریکی در نزدیکی الکترودها، یک رفتار خازنی برای پیل سوختی مشاهده می‌شود که بیان‌کننده رفتار دینامیکی عملکرد پیل سوختی است. مدار معادل الکتریکی پیشنهادی برای پیل سوختی، در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): مدار معادل پیشنهادی برای پیل سوختی

۲-۲- مدل‌سازی باتری

معمولاً برای مدل‌سازی مدت زمان تداوم شارژ باتری از قانون Peukert استفاده می‌شود. میزان درصد خطای این روش برای بارهای متغیر بازمان تا ۱۰٪ نیز مشاهده شده است [۱۸] و این در حالی است که در درایو خودرو به دلیل تغییرات شرایط سیکل رانندگی، بار باتری متغیر با زمان است. بنابراین باید از مدل بهبودیافته‌ای استفاده شود. مدل‌های مورد استفاده برای انواع باتری‌ها را می‌توان به ۳ دسته تقسیم نمود: ۱- مدار معادل تونن ۲- مدار معادل امپدانی، ۳- مدل‌سازی بر اساس مدت زمان کارکرد (runtime)

هر یک از این مدل‌ها دارای خطاهایی هستند که به طور خلاصه در جدول (۱) بیان شده‌اند. پارامترهای مدار معادل باتری توابعی غیرخطی و چندمتغیره هستند و در نتیجه تحلیل مدل باتری بسیار پیچیده شده و پاسخ دینامیکی مدار معادل باتری ممکن است با وجود داشتن دقت مناسب، بسیار کند باشد. در اینجا از پارامترهایی که تأثیر بسیار کمی دارند صرف‌نظر شده تا دقت و سرعت، هم‌زمان حاصل شوند. بنابراین در مدل انتخاب شده از اثر دشارژ خودی به دلیل تأثیر بسیار ناچیز در طی یک دوره کوتاه‌مدت، صرف‌نظر شده و دمای باتری نیز توسط سیستم خنک‌کاری در مقداری مناسب ثابت شده است.

جدول (۱): مقایسه عملکرد روش‌های مختلف مدل‌سازی باتری

	DC	AC	گذرا	runtime
مدل تونن	ندارد	محدود	دارد	ندارد
مدل امپدانی	ندارد	دارد	محدود	ندارد
مدل runtime	دارد	ندارد	محدود	دارد

در این مقاله از مدل نشان داده‌شده در شکل (۲) استفاده شده که مزایای هر سه روش را دارا است. در این مدل R_{SD} مقاومت بیان‌کننده دشارژ خودی، C ظرفیت باتری، R_{TS} و C_{TS} پارامترهای ثابت زمانی پاسخ کوتاه‌مدت، R_{TL} و C_{TL} پارامترهای ثابت زمانی پاسخ بلندمدت و

با این وجود، در مراجع [۱۶، ۳] فشار گازهای ورودی مقادیری ثابت در نظر گرفته شده که باعث کاهش دقت مدل‌سازی پیل سوختی خواهد شد. افت ولتاژ ناشی از کاهش غلظت مواد واکنش‌دهنده (اکسیژن و هیدروژن) به صورت رابطه (۱۲) است:

$$V_{con} = -B \times \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، B ضریبی است که به ولتاژ نقطه کار بستگی دارد. J چگالی جریان سلول، چگالی جریانی که در آن حداکثر سوخت مصرف می‌شود. افت ولتاژ مقاومت اهمی الکترولیت و اتصال‌ها به صورت رابطه (۱۳) است:

$$V_{ohm} = i_{FC} (R_m + R_c) \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، مقاومت الکتریکی الکترولیت، مقاومت الکتریکی اتصالات داخل پیل در برابر حرکت الکترون است. با توجه به روابط (۱) تا (۱۳) می‌توان دریافت که عملکرد پیل سوختی به دما و فشارهای نسبی گازهای اکسیژن و هیدروژن و همچنین جریان آن بستگی دارد. مقاومت الکتریکی لایه الکترولیت به صورت رابطه (۱۴) خواهد بود که مقاومت ویژه آن به دما و چگالی جریان بستگی دارد.

$$R_m = \frac{\rho_M \times l}{A} \quad (14)$$

$$\rho_M = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \times \frac{i_{FC}}{A} + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \frac{i_{FC}}{A} \right]}{\left[\psi - 0.634 - 3 \times \frac{i_{FC}}{A} \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(T - \frac{303}{T} \right) \right]} \quad (15)$$

در دو رابطه اخیر، مقاومت ویژه لایه الکترولیت، l طول مسیر عبور جریان از الکترولیت، A سطح مقطع عبور جریان از الکترولیت، جریان پیل سوختی، T دمای پیل سوختی و ψ ضریبی است که به عواملی مانند رطوبت و فشار گازهای ورودی به پیل سوختی بستگی دارد. دما یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین عملکرد پیل سوختی است، اما در [۳] دما به عنوان یک ورودی مستقل ثابت و یا با تغییرات پله‌ای، در نظر گرفته شده است. این در حالی است که در شرایطی که میزان رطوبت کافی باشد، افزایش دما باعث بهبود عملکرد پیل سوختی می‌شود و در شرایطی که رطوبت محدود باشد، به دلیل افزایش جریان کشیده شده از پیل سوختی، افزایش دمای ایجادشده باعث بدتر شدن عملکرد پیل سوختی می‌شود. برای اینکه رفتار مدار معادل ارائه‌شده به حالت واقعی نزدیک‌تر شود، دمای پیل سوختی در این مقاله طبق رابطه (۱۶) در نظر گرفته شده است [۱۷].

$$T = T_{ic} i_{FC} + T_{it} e^{\left(\frac{i_{FC} t}{T_{it}} \right)} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) T_{ic} و T_{it} ضرایب ثابت هستند. مدار معادل پیل سوختی به صورت مجموعه‌ای از مقاومت‌ها و خازن خواهد بود که هر یک تابعی چندمتغیره هستند. مقاومت‌ها نشان‌دهنده افت ولتاژهای

۳-۱- اصول کنترل مستقیم گشتاور

در این روش از ولتاژها و جریان موتور نمونه برداری شده و با استفاده از آن‌ها مقدار سرعت، گشتاور و شار استاتور موتور تخمین زده می‌شود. مقادیر تخمین زده شده با مقادیر مرجع مقایسه شده و میزان خطای گشتاور و شار تعیین می‌شود. با توجه به جهت مورد نیاز برای تغییرات گشتاور و شار و با توجه به محل قرارگیری شار، بردار ولتاژ مناسب برای اعمال به موتور انتخاب می‌شود. برای داشتن ساختاری ساده و دقیق از جدول کلیدزنی استفاده می‌شود. و خطای شار و گشتاور به دو کنترل کننده هیستریزس اعمال شده و خروجی این کنترل کننده‌های هیستریزس برای انتخاب بردار ولتاژ مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

معمولاً اینورتر مورد استفاده از نوع منبع ولتاژی است و انتخاب پهنای باند هیستریزس روی فرکانس کلیدزنی آن تاثیر زیادی دارد. به طور کلی مقدار گشتاور بر حسب شارهای پیوندی استاتور و روتور به صورت رابطه (۲۳) به دست می‌آید [۹].

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L'_s L'_r} |\vec{\psi}'_r| |\vec{\psi}_s| \sin \gamma \quad (23)$$

در رابطه (۲۳) اندوکتانس مغناطیس کننده هسته، اندوکتانس نشتی روتور، اندوکتانس نشتی استاتور، بردار فضایی شار پیوندی روتور، و γ زاویه بین بردار فضایی شار پیوندی استاتور و روتور می‌باشد. از آنجایی که بردار فضایی شار پیوندی روتور نسبت به بردار فضایی شار پیوندی استاتور دارای تاخیر است و حرکت آن به کندی انجام می‌شود در نتیجه برای افزایش گشتاور کافی است که بردار ولتاژی انتخاب شود که زاویه بردار شار پیوندی استاتور را افزایش دهد و در این صورت طبق رابطه (۲۳) حتی با ثابت بودن اندازه بردارهای شار می‌توان گشتاور را کنترل نمود. پس با این روش کنترل مستقل گشتاور و شار امکان پذیر است.

۳-۲- کاهش ریبیل گشتاور در روش کنترل مستقیم گشتاور

یکی از مشکلات اساسی روش DTC وجود ریبیل گشتاور زیاد آن است. روش‌های مختلفی برای کاهش ریبیل شار و گشتاور وجود دارد که هر یک دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. برای رفع ایرادهای روش DTC باید توجه نمود که روش‌هایی قابل قبول هستند که مزایای روش DTC را کاهش ندهند. بنابراین روش‌های ارائه شده باید تا حد امکان دارای ساختاری ساده باشند که حجم محاسبات سیستم کنترلی را خیلی افزایش ندهند.

در سرعت‌های کم، ریبیل گشتاور باعث می‌شود که گشتاور بالاتر از مقدار مرجع قرار بگیرد و این در حالی است که در سرعت‌های بالا، ریبیل گشتاور باعث می‌شود که گشتاور پایین‌تر از گشتاور مرجع قرار بگیرد. تغییرات گشتاور موتور القایی به صورت رابطه (۲۴) خواهد بود.

R_s مقاومت اتصالات سری باتری است. مقدار پارامترهای مدار معادل باتری برحسب SOC با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۹]:

$$V_{OC}(SOC) = -1.031e^{-35SOC} + 3.685 + 0.2156SOC - 0.1178SOC^2 + 0.3201SOC^3 \quad (17)$$

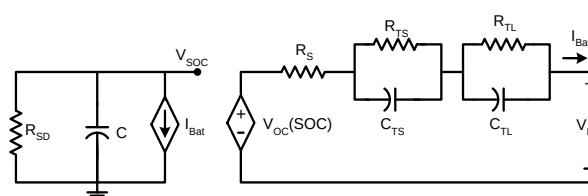
$$R_s(SOC) = 0.1562e^{-24.37SOC} + 0.07446 \quad (18)$$

$$R_{TS}(SOC) = 0.3208e^{-29.14SOC} + 0.04669 \quad (19)$$

$$C_{TS}(SOC) = -752.9e^{-13.51SOC} + 703.6 \quad (20)$$

$$R_{TL}(SOC) = 6.603e^{-155.2SOC} + 0.04984 \quad (21)$$

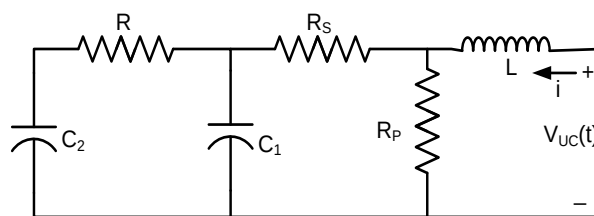
$$C_{TL}(SOC) = -6056e^{-27.12SOC} + 4475 \quad (22)$$



شکل (۲): مدل باتری

۳-۳- مدل سازی ابرخازن

در مرجع [۲۰] برای مدل سازی ابرخازن از مدل RC ساده استفاده شده است. این مدل شامل یک خازن، یک مقاومت سری و یک مقاومت موازی است. در این مقاله برای افزایش دقت عملکرد ابرخازن، مدل مورد نظر به صورت شکل (۳) بهبود یافته است. شاخه C_1 و R_s بیان کننده رفتار اصلی ابرخازن هستند. شاخه R و C_2 بیان کننده رفتار کند ابرخازن در انتهای سیکل شارژ و دشارژ هستند. مقاومت R_p برای مدل سازی دشارژ خودی است و سلف L دارای مقدار بسیار کوچکی است و محدود کننده تغییرات بسیار زیاد جریان خروجی است. در شبیه سازی‌ها از ابرخازن ۴۳۰ فاراد، ۱۶ ولت شرکت Maxwell استفاده شده است.



شکل (۳): مدل پیشنهادی ابرخازن

۳- کنترل مستقیم گشتاور

در این قسمت ابتدا اصول روش کنترل مستقیم گشتاور برای موتور القایی بیان خواهد شد، سپس با توجه به رفتار گشتاور موتور القایی، راه کارهایی برای کاهش ریبیل گشتاور پیشنهاد خواهد شد.

هنگام کاهش گشتاور از بردارهای ولتاژ صفر به جای بردارهای فعال ولتاژی که تاثیر معکوس دارند، استفاده می‌شود. شیب کاهش گشتاور طبق رابطه زیر خواهد بود:

$$S_F = -T_e \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) - \frac{3PL_m \omega_m}{4\sigma L_s L_r} |\lambda_s| |\lambda_r| \cos(\theta_s - \theta_r) \quad (28)$$

طبق رابطه (۲۸) در گشتاورهای زیاد و سرعت‌های زیاد، شیب کاهش گشتاور بیش‌تر از حالتی است که گشتاور موتور کوچک است و یا اینکه موتور در سرعت‌های پایین کار می‌کند. شیب افزایش گشتاور طبق رابطه (۲۹) به ولتاژ انتخابی برای اعمال به موتور بستگی دارد.

$$S_R = S_F + \frac{3PL_m}{4\sigma L_s L_r} |u_s| |\lambda_r| \sin(\theta_v - \theta_r) \quad (29)$$

۴- انتخاب ساختار مبدل

ولتاژ ابرخازن معمولاً دارای تغییرات زیادی است و در نتیجه برای عدم تاثیر منفی این تغییرات بر عملکرد اینورتر تغذیه‌کننده موتور الکتریکی، از یک مبدل dc/dc برای تثبیت نمودن ولتاژ ابرخازن از دید لینک dc اقدام می‌نمایند. برای پیاده‌سازی DTC معمولاً از اینورترهای منبع ولتاژی (VSI) استفاده می‌شود اما این اینورترها کاهنده ولتاژ هستند و از آنجایی که ولتاژ هر سلول پیل سوختی مقداری کم‌تر از ۱ ولت است، در صورت استفاده از VSI باید تعداد زیادی از سلول‌ها را با هم سری نمود. در این شرایط حداکثر توان هر سلول توسط ضعیف‌ترین سلول محدود می‌شود بنابراین باید طرحی ارائه شود که به تعداد سلول سری کم‌تری نیاز داشته باشد. هم‌چنین به ازای ولتاژهای بیش‌تر از ۳ ولت، الکترولیت آلی مورد استفاده در ابرخازن تجزیه می‌شود بنابراین حداکثر ولتاژ یک سلول ابرخازن مقداری محدود است و برای تولید یک ولتاژ زیاد لازم است که تعداد زیادی از سلول‌های ابرخازن نیز با هم سری شوند. به دلیل توزیع آماری احتمال متفاوت بودن مقادیر پارامترهای سلول‌های ابرخازن مانند ظرفیت، مقاومت داخلی، نرخ دشارژ خودی و ولتاژ هر سلول وجود دارد. این مسائل بر عملکرد ابرخازن و طول عمر مفید آن تاثیر زیادی خواهد داشت. ابرخازن‌ها می‌توانند چند صد هزار بار شارژ و دشارژ شوند زیرا در الکترودهای آن‌ها واکنش‌های شیمیایی اتفاق نمی‌افتد اما طول عمر ابرخازن‌ها در اثر افزایش دما و افزایش ولتاژ به شدت کاهش می‌یابد. به ازای ولتاژهایی که برای ابرخازن قابل‌تحمل محسوب نمی‌شوند، واکنش‌های فرسایش و تجزیه بیش‌تر خواهد شد. اگر ظرفیت ابرخازن به حدی کاهش یابد که کم‌تر از ۸۰٪ ظرفیت اولیه خود شود و یا اینکه مقدار مقاومت داخلی و یا نرخ دشارژ خودی ۲ برابر شوند، در این صورت ابرخازن باید تعویض شود [۲۱].

در این مقاله برای رفع مشکلات اینورتر VSI از اینورتر امپدانس استفاده شده که قابلیت افزایش ولتاژ dc را داشته و مشکلات مربوط به روشن شدن هم‌زمان کلیدهای یک پایه را ندارد. اینورتر منبع

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} p \varphi_n \Delta i_{qs} + \frac{T_e}{\varphi_n} \Delta \varphi \quad (24)$$

در رابطه (۲۴) میزان تغییرات گشتاور، p تعداد زوج قطب موتور، مقدار شار نامی موتور است. مدت زمان لازم برای رسیدن گشتاور به حد بالای باند هیستریزس به صورت رابطه (۲۵) است.

$$t_U = \frac{\sigma L_s}{\frac{3}{2} p \varphi_n (V_{qi} - e_s)} T_{eu} \quad (25)$$

در رابطه (۲۵) مدت زمان رسیدن گشتاور به حد بالای باند هیستریزس، حد بالای گشتاور، اندوکتانس ناشی کل موتور، مولفه محور q ولتاژ موتور، نیروی ضد محرکه موتور که طبق رابطه (۲۶) بیان می‌شود.

$$e_s = \omega_s \varphi_n \quad (26)$$

در رابطه (۲۶) ω_s سرعت زاویه‌ای شار استاتور است. مدت زمان اعمال بردار ولتاژ فعال برای افزایش گشتاور تا رسیدن به حد بالای باند هیستریزس به سرعت زاویه‌ای شار استاتور و زاویه بین بردار ولتاژ و شار بستگی دارد. در رابطه (۲۵) اگر بردار ولتاژی انتخاب شود که مولفه محور q آن کوچک‌تر از نیروی ضد محرکه باشد، در این صورت بردار ولتاژ به جای افزایش گشتاور باعث کاهش گشتاور شده و در نتیجه ریپل گشتاور افزایش خواهد یافت. اگر بزرگ‌تر از زمان نمونه‌برداری باشد، بردار ولتاژ انتخاب‌شده باید برای تمام مدت زمان نمونه‌برداری DTC به موتور اعمال شود و اگر کوچک‌تر باشد، برای مدت زمان باقی‌مانده بردار ولتاژ صفر اعمال خواهد شد. مدت زمانی که طول می‌کشد تا گشتاور به حد پایین باند هیستریزس گشتاور برسد، طبق رابطه (۲۷) است.

$$t_L = -\frac{\sigma L_s}{\frac{3}{2} p \varphi_n e_s} T_{el} \quad (27)$$

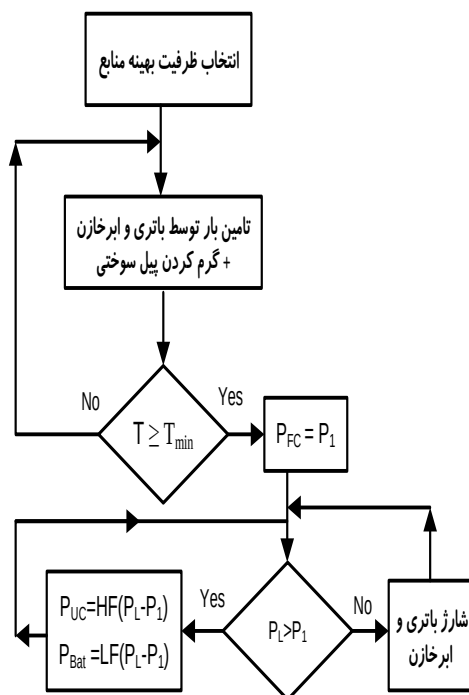
در رابطه (۲۷) مدت زمان لازم برای رسیدن به حد پایین باند هیستریزس، حد پایین گشتاور است. اگر زمان بزرگ‌تر از مدت زمان نمونه‌برداری DTC باشد، بردار ولتاژ صفر برای تمام مدت زمان نمونه‌برداری به موتور اعمال می‌شود و در غیر این صورت در مدت زمان باقی‌مانده بردارهای ولتاژ فعال به موتور اعمال می‌شوند.

شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که هنگامی که شار از یک مقطع وارد مقطع بعدی می‌شود، ریپل شار و گشتاور تا حدی افزایش می‌یابد. در واقع شرایط موتور تغییر کرده اما در لحظات اولیه هنوز بردارهای ولتاژ قبلی به موتور اعمال می‌شوند. از طرفی شرایط و میزان تاثیر بردارهای ولتاژ در نقاط مختلف یک مقطع نیز متفاوت است. نواحی شار در این مقاله ۱۲ قسمت در نظر گرفته شده است تا بردارهای ولتاژ با دقت بهتری انتخاب شوند.

شیب منحنی تغییرات گشتاور تاثیر بسیار زیادی بر مقدار ریپل گشتاور دارد. برای کاهش ریپل گشتاور و کاهش فرکانس کلیدزنی، در

در هنگام راه اندازی، باید دمای پیل سوختی به مقدار مناسبی برسد و این فرآیند تاحدی زمان بر است. برای راه اندازی سریع خودرو ابتدا از انرژی ابرخازن و باتری با هم استفاده می شود. پس از مدتی که پیل سوختی به دمای مناسب رسید، بار توسط پیل سوختی تامین می شود. نحوه مشارکت منابع در تامین توان مورد نیاز بار در شکل (۵) نشان داده شده است.

مدل خودرو می تواند از دید پیشرو یا پسرو بررسی شود. در مدل پسرو سیکل رانندگی به عنوان ورودی است و در هر لحظه مقدار سرعت خودرو مشخص است و مدل پسرو مقدار نیرو و گشتاور مورد نیاز خودرو را تعیین می کند. مدل پسرو به نوعی مدل حالت ماندگار است و زمان شبیه سازی آن به دلیل عدم نیاز به استفاده از گام های بسیار کوچک، تا حدی سریع است. مدل پیشرو خودرو به سیکل رانندگی واقعی نزدیک تر است. در اینجا یک مدل راننده (محرک) برای تولید دستورات شتاب گیری و ترمز گرفتن استفاده می شود. مدل پیشرو شامل جزئیات بیش تری نسبت به مدل پسرو است بنابراین اندازه گام های شبیه سازی باید کوچک تر باشد و در نتیجه زمان بر هستند.



شکل (۵): بلوک دیاگرام کنترلی منابع

در این مقاله برای بررسی عملکرد خودرو در طی نمودن سیکل رانندگی استاندارد از مدل پسرو استفاده شده است. و برای ارزیابی عملکرد سیستم درایو از ترکیب هر دو روش استفاده شده است. نحوه وارد شدن بردارهای نیرو به خودرو در هنگام حرکت در شکل (۶) نشان داده شده است.

امپدانی می تواند به صورت یک مبدل کاهنده-افزاینده کار کند. مبدل های VSI دارای ۸ حالت کاری هستند که ۶ حالت مربوط به انتقال توان بوده و دو حالت صفر دارند. اما در مبدل امپدانی به غیر از ۸ حالت بیان شده برای VSI حالت دیگری وجود دارد که کلیدهای اینورتر به صورت هم زمان روشن شده که به آن Shoot (ST) Through گفته می شود. این حالت باید در مدت حالت صفر رخ دهد تا اثر نامطلوبی بر عملکرد مبدل نداشته باشد. در مبدل امپدانی مقداری از زمان حالت صفر به حالت ST اختصاص داده می شود. مقدار ولتاژ پیک فاز خروجی اینورتر عبارت است از:

$$\hat{V}_{ac} = M \times B \times \frac{V_0}{2} \quad (30)$$

در رابطه (۳۰) M شاخص مدولاسیون، V_0 مقدار ولتاژ پیل سوختی و B ضریب تقویت ولتاژ مبدل امپدانی است.

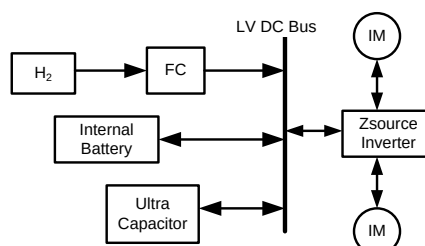
$$B = \frac{1}{1 - 2\frac{T_0}{T}} \geq 1 \quad (31)$$

در رابطه (۳۱)، T مدت زمان یک دوره تناوب کلیدزنی و T_0 مدت زمان ST است. مقدار متوسط ولتاژ سلف در یک دوره کلیدزنی در حالت دائمی باید صفر باشد حداقل مقدار توسط شاخص مدولاسیون محدود می شود.

۵- مدیریت انرژی منابع و ساختار مبدل پیشنهادی

خودرو مورد نظر دارای پیل سوختی است و به نوعی یک خودرو هیبرید سری محسوب می شود. به دلیل بازده بالای پیل سوختی نسبت به موتور احتراق داخلی، بازده خودرو ارائه شده بیش تر از خودرو هیبرید سری متداول خواهد بود. همان طور که قبلاً بیان شد، برای کاهش تنش ولتاژ دو سر ابرخازن از یک مبدل dc/dc و یک مبدل امپدانی استفاده شده است. در نتیجه نیازی به مدارهای متعادل ساز برای ابرخازن وجود نداشته و باز هم بازده افزایش خواهد یافت.

خودرو مورد نظر دارای پیل سوختی، ابرخازن و باتری داخلی است. باتری داخلی توسط انرژی مازاد پیل سوختی و یا انرژی حاصله از فرآیند ترمز خودرو شارژ می شود. ساختار اتصال منابع خودرو پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): ساختار منابع خودرو هیبرید پیشنهادی

ST با استفاده از توان تولیدی پیل سوختی، ابرخازن را شارژ نماید و توان خروجی پیل سوختی را تثبیت نماید.

با تغییرات شرایط مسیر حرکت خودرو، میزان توان مورد نیاز موتورها و در نتیجه توان کشیده شده از لینک dc تغییر خواهد نمود و با تغییرات توان کشیده شده از پیل سوختی، ولتاژ آن نیز به شدت تغییر می‌کند در این شرایط بازده موتورهای القایی کاهش می‌یابد و از آنجایی که گشتاور موتور القایی با توان دوم ولتاژ متناسب است، گشتاور تولیدی خودرو به شدت کاهش می‌یابد از طرفی تغییرات شدید ولتاژ لینک dc باعث ایجاد تنش ولتاژ دو سر کلیدهای نیمه‌هادی می‌شود. برای رفع این مشکلات در ساختار پیشنهادی سعی شده که با وجود تغییرات توان مورد نیاز بار، توان و جریان کشیده شده از پیل سوختی ثابت باشد. اگر ولتاژ خروجی پیل سوختی ثابت باشد، توان و جریان آن نیز ثابت خواهند بود. ولتاژ باتری در یک مدت زمان کوتاه دارای تغییرات بسیار کمی است و می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت. در ساختار ارائه‌شده، به جای یکی از خازن‌های شبکه امپدانی، یک باتری قرار داده شده است. با انتخاب یک مقداری برای درصد ST، ولتاژ خروجی پیل سوختی هم ثابت خواهد ماند.

$$V_{FC} = \frac{1-2D_0}{1-D_0} V_{Bat} \quad (34)$$

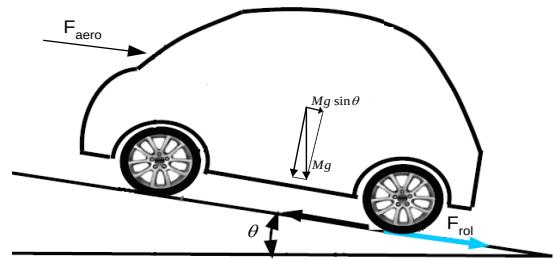
در رابطه (۳۴) نسبت مدت‌زمان ST به یک دوره کلیدزنی است. رابطه بین ولتاژ ورودی اینورتر و ولتاژ خروجی پیل سوختی و رابطه بین ولتاژ ورودی اینورتر و ولتاژ باتری به صورت زیر هستند:

$$V_i = \frac{1}{1-2D_0} V_{FC} = BV_{FC} \quad (35)$$

$$V_i = \frac{1}{1-D_0} V_{Bat} \quad (36)$$

استفاده از دو موتور القایی کوچک‌تر به جای یک موتور القایی بزرگ باعث افزایش کنترل‌پذیری و بازده خودرو می‌شود. موتورهای مورد استفاده در هنگام طی نمودن مسیرهای مستقیم باید سرعت یکسانی داشته باشند و فقط در هنگام طی نمودن پیچ‌های مسیر حرکت، سرعت متفاوتی دارند و نسبت سرعت چرخش موتورها متناسب با فاصله هر چرخ از مرکز دایره پیچ است. بنابراین شرایط کاری آن‌ها بسیار شبیه هم بوده و می‌توان با استفاده از یک اینورتر ۹ کلیدی که دارای ۲ خروجی سه‌فاز است، آن‌ها را کنترل نمود. در هر پایه این اینورتر که در شکل (۷) نشان داده شده، ۳ کلید وجود دارد که باید در هر لحظه حداقل ۲ تا از این کلیدها وصل باشند تا وضعیت ولتاژ موتورها مشخص باشد در غیر این صورت، ترمینال موتور شناور شده و پیش‌بینی وضعیت و رفتار موتور مشکل شده و کیفیت عملکرد آن نیز

نام‌گذاری شده‌اند و برای درایو موتور IM2 نیز ۶ بردار ولتاژ فعال وجود دارد. این بردارها به ترتیب V_7 تا V_{12} نام‌گذاری شده‌اند.



شکل (۶): نیروهای وارده بر خودرو

نیروهای مقاوم در برابر حرکت، نیروی ناشی از مقاومت هوا و اصطکاک است و با توجه به شرایط شیب مسیر، نیروی گرانش می‌تواند باعث افزایش سرعت حرکت شود و یا اینکه به عنوان یک نیروی مقاوم در برابر حرکت قرار گیرد. مقادیر پارامترهای مهم در مدل‌سازی نیروهای وارده به خودرو در جدول (۲) بیان شده‌اند. در سرعت‌های بالا، نیروی مقاومت هوا یکی از مهم‌ترین اجزای گشتاور بار است اما در سرعت‌های بسیار کم، اصطکاک تاثیر زیادی خواهد داشت.

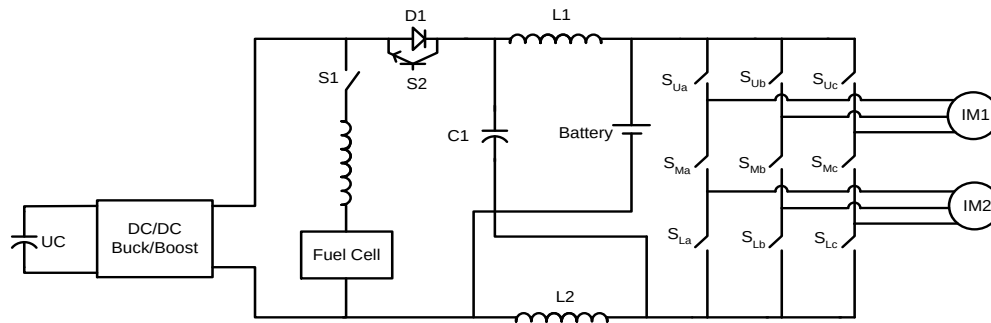
$$F_L = F_{aero} + F_{rol} + F_g \quad (32)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 + C_{rr} Mg \cos \theta + Mg \sin \theta \quad (33)$$

جدول (۲): پارامترهای خودرو

750 kg	M	جرم خودرو
0.44	C_d	ضریب کشش
2.66 m ²	A	سطح جلویی خودرو
0.25 m	r	شعاع چرخ خودرو
0.0075	C_{rr}	ضریب مقاومت چرخش
9.81 m/s ²	g	شتاب گرانش
1.17 kg/m ³	ρ	چگالی هوا

ساختار مبدل پیشنهادی این مقاله در شکل (۷) نشان داده شده است. در این ساختار از یک مبدل dc/dc افزایشده/کاهنده برای اتصال ابرخازن به لینک dc استفاده شده است. کلید S1 هنگامی وصل می‌شود که دمای پیل سوختی به مقدار مطلوب رسیده باشد. دیود D1 وظیفه انتقال انرژی ابرخازن به موتور را در شرایط راه‌اندازی سرد و هم‌چنین شرایطی که توان مورد نیاز بار بیش‌تر از توان تولیدی پیل سوختی است را فراهم می‌کند. این دیود در هنگام شرایط ST به دلیل بیش‌تر بودن ولتاژ کانداز آن از قطع است. کلید S2 وظیفه انتقال انرژی برگشتی در حالت ترمز را برای شارژ ابرخازن به عهده دارد. سلف قرار داده‌شده در خروجی پیل سوختی برای پیوسته نمودن و کاهش ریبیل جریان خروجی پیل سوختی است. طرح مذکور قادر است در مدت‌زمان کاهش خواهد یافت. برای درایو موتور IM1 که در خروجی بالا قرار گرفته، ۶ بردار ولتاژ فعال وجود دارد. این بردارها به ترتیب V_1 تا V_6

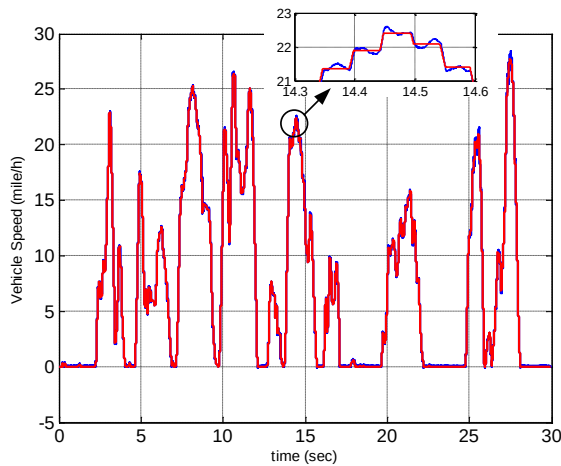


شکل (۷): ساختار مبدل پیشنهادی برای خودرو هیبرید پیل سوختی

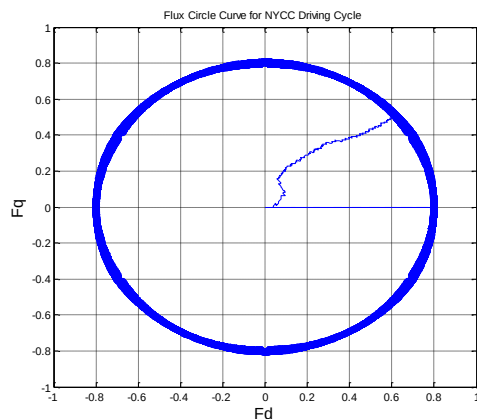
جدول (۳): وضعیت کلیدها برای انتخاب بردارهای فعال

	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆
S _{Ua}	1	1	0	0	0	1
S _{Ub}	0	1	1	1	0	0
S _{Uc}	0	0	0	1	1	1
S _{Ma}	*	*	1	1	1	*
S _{Mb}	1	*	*	*	1	1
S _{Mc}	1	1	1	*	*	*
S _{La}	*	*	1	1	1	*
S _{Lb}	1	*	*	*	1	1
S _{Lc}	1	1	1	*	*	*
	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀	V ₁₁	V ₁₂
S _{Ua}	1	1	*	*	*	1
S _{Ub}	*	1	1	1	*	*
S _{Uc}	*	*	*	1	1	1
S _{Ma}	1	1	*	*	*	1
S _{Mb}	*	1	1	1	*	*
S _{Mc}	*	*	*	1	1	1
S _{La}	0	0	1	1	1	0
S _{Lb}	1	0	0	0	1	1
S _{Lc}	1	1	1	0	0	0

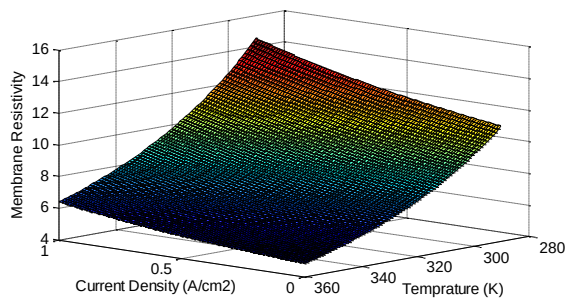
برای کنترل موتورهای به روش DTC بردار ولتاژ اعمالی به موتور با توجه به میزان خطای شار، گشتاور و ناحیه‌ای که شار در آن قرار دارد، انتخاب می‌شود. معمولاً به دلیل وجود ۶ بردار ولتاژ فعال برای هر موتور ناحیه قرارگیری شار به ۶ قسمت ۶۰ درجه‌ای تقسیم می‌شود که ناحیه اول از ۳۰- درجه تا ۳۰+ درجه است. در این حالت، رفتار بردار V₁ در نیمه بالا و پایین ناحیه اول کاملاً متفاوت است و ممکن است باعث افزایش خطا شود. بنابراین در این مقاله از ۱۲ ناحیه ۳۰ درجه‌ای استفاده شده که کیفیت روش DTC را بهبود می‌دهد. وضعیت کلیدهای ۹ گانه در هنگام انتخاب بردارهای فعال ۱۲ گانه در جدول (۳) نشان داده شده است. وضعیت "1" برای وصل کلید، "0" برای قطع کلید و حالت "*" شرایطی است که کلید مورد نظر می‌تواند هر یک از وضعیت‌های قطع یا وصل را داشته باشد. با انتخاب یکی از بردارهای ولتاژ فعال برای اعمال به موتور IM1 تعداد بردارهای قابل انتخاب برای اعمال به موتور IM2 بسیار محدود می‌شود. بنابراین برداری انتخاب می‌شود که نزدیک‌ترین رفتار را به ولتاژ بهینه داشته باشد. بردارهایی که قابلیت انتخاب شدن را دارند، در جدول (۴) بیان شده‌اند.



شکل (۸): منحنی سرعت خودرو به همراه سیکل NYCCDS



شکل (۹): منحنی دایره‌ای شار برای سیکل رانندگی استاندارد NYCCDS



شکل (۱۰): منحنی تغییرات مقاومت ویژه لایه الکترولیت

منحنی تغییرات ولتاژ یک سلول پیل سوختی بر حسب جریان آن که به منحنی پلاریزاسیون معروف است، برای پیل سوختی شبیه‌سازی شده و در شکل (۱۱) نشان داده شده است. افزایش دما باعث افزایش ولتاژ خروجی پیل سوختی شده و حتی مقدار توان ماکزیمم قابل‌دسترس توسط پیل سوختی را هم افزایش داده است. البته باید دقت نمود که در عمل برای ایجاد این شرایط لازم است که میزان رطوبت لایه غشاء با تغییرات دما ثابت نگه داشته شود.

جدول (۴): بردارهای ولتاژ قابل انتخاب

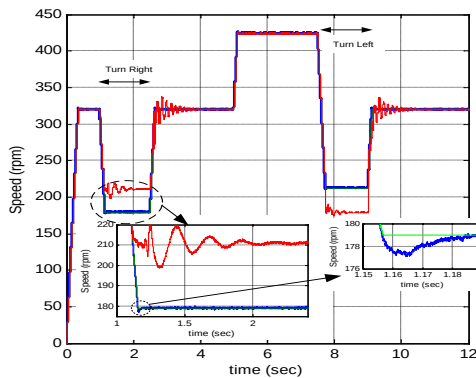
can select Selected	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}
V_1	✓	-	-	-	-	-
V_2	✓	✓	✓	-	-	-
V_3	-	-	✓	-	-	-
V_4	-	-	✓	✓	✓	-
V_5	-	-	-	-	✓	-
V_6	✓	-	-	-	✓	✓
can select Selected	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
V_7	✓	✓	-	-	-	✓
V_8	-	✓	-	-	-	-
V_9	-	✓	✓	✓	-	-
V_{10}	-	-	-	✓	-	-
V_{11}	-	-	-	✓	✓	✓
V_{12}	-	-	-	-	-	✓

۶- نتایج و بحث

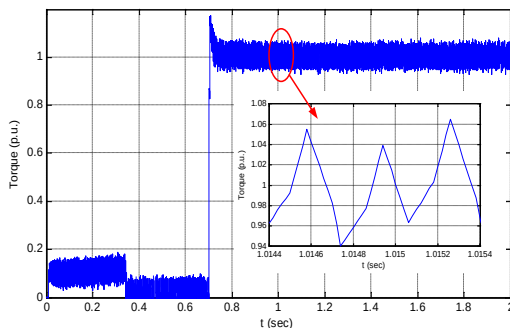
به منظور ارزیابی کیفیت عملکرد خودرو هیبرید، سیکل رانندگی استاندارد (NYCCDS (New York City Cycle Driving Schedule مورد بررسی قرار گرفته است. در صورتی که خودرو بتواند با یک دینامیک مناسب منحنی حرکتی سیکل استاندارد را دنبال نماید، نشان‌دهنده قابلیت مناسب سیستم کنترل و درایو آن است. این سیکل رانندگی که معروف به سیکل رانندگی شهری نیویورک است، دارای مسافت ۱/۱۸ مایل است. سرعت متوسط این آزمایش ۷/۱ مایل بر ساعت بوده و حداکثر سرعت آن ۲۷/۷ مایل بر ساعت است. مدت زمان انجام آزمایش ۵۹۸ ثانیه است. برای خودرو شبیه‌سازی شده قطر چرخ‌ها ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن قابلیت پاسخ دینامیکی سریع سیستم درایو، سیکل تغییرات سرعت NYCCDS در مدت ۳۰ ثانیه انجام شده که نشان می‌دهد روش درایو اعمال‌شده حتی برای تغییراتی با ۲۰ برابر سرعت تغییرات سیکل NYCCDS هم به خوبی عمل خواهد نمود. نتیجه شبیه‌سازی تغییرات سرعت خودرو در طی نمودن سیکل NYCCDS در شکل (۸) نشان داده شده است.

منحنی دایره‌ای شار موتور القایی که نشان‌دهنده رفتار حالت گذرا و حالت دائمی موتور در شرایط کاری مختلف است، در شکل (۹) رسم شده است. مشاهده می‌شود که سیستم درایو پاسخ دینامیکی سریعی داشته و رپیل حالت دائمی آن نیز بسیار کم است. برای بررسی رفتار پیل سوختی، منحنی تغییرات مقاومت ویژه لایه الکترولیت بر حسب دما و چگالی جریان در شکل (۱۰) نشان داده شده است. چنان که این شکل نشان می‌دهد، با افزایش دما مقاومت کاهش می‌یابد اما با افزایش چگالی جریان، مقاومت نیز افزایش می‌یابد. از طرفی باید توجه نمود که افزایش جریان خود باعث افزایش دما خواهد شد بنابراین دیده می‌شود که رفتار پیل سوختی غیرخطی است.

ولتاژی به موتور اعمال شده که شیب تغییرات گشتاور کوچک باشد. در نتیجه ریبیل پاسخ گشتاور طبق شکل (۱۴) کاهش یافته است.



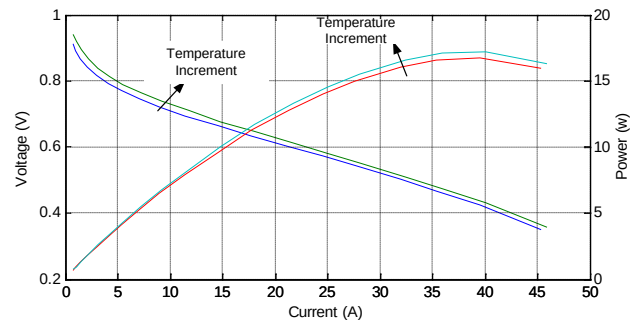
شکل (۱۲): منحنی تغییرات سرعت موتورهای خودرو در هنگام پیچ



شکل (۱۳): پاسخ پله گشتاور با استفاده از DTC کلاسیک

برای ارزیابی سرعت پاسخ پله گشتاور، شکل (۱۴) با تاکید بر لحظه تغییر گشتاور مجدداً در شکل (۱۵) رسم شده است. مدت زمان لازم برای رسیدن گشتاور به مقدار نامی خود ۵ میلی ثانیه است. به دلیل انتخاب بردارهای ولتاژ با مقدار کوچکتر، ریبیل گشتاور کاهش یافته اما در مقابل سرعت پاسخ هم کاهش داشته است. برای بهبود ریبیل گشتاور و افزایش سرعت پاسخ گشتاور، سیستم کنترلی DTC برای انتخاب بردار ولتاژ مناسب بهبود یافته است به این صورت که در حالت گذرا اولویت اصلی داشتن پاسخ سریع بوده و در حالت ماندگار اولویت اصلی کاهش ریبیل خواهد بود. نتیجه حاصل از طرح بهبود یافته برای گشتاور در شکل (۱۶) رسم شده است که نتیجه آن کاهش زمان بالا آمدن گشتاور به اندازه ۱ میلی ثانیه بوده و در حالت ماندگار نیز ریبیل گشتاور حدود ۲/۵٪ باقی مانده است. دیاگرام روش DTC بهبود یافته برای تفکیک شرایط کاری گذرا و حالت ماندگار در شکل (۱۷) رسم شده است.

برای ارزیابی بهتر عملکرد روش پیشنهادی، پاسخ پله گشتاور حاصله با نتایج چند مرجع در جدول (۵) مقایسه شده و مشاهده می شود که طرح پیشنهادی با استفاده از ساختاری با حجم محاسبات کم، توانسته ریبیل گشتاور را کاهش داده و سرعت پاسخ مناسبی داشته باشد.



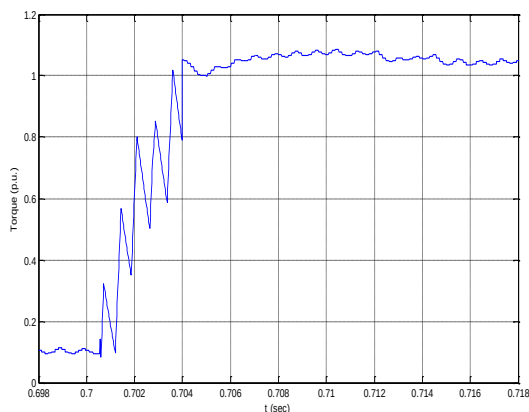
شکل (۱۱): تاثیر تغییرات دما بر منحنی پلازیاسیون پیل سوختی

در این قسمت قابلیت عملکرد اینورتر در اعمال پالس مناسب به موتورهای برای گردش خودرو به چپ و راست بررسی می شود. همان طور که بیان شد قطر چرخ های خودرو ۵۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. منحنی سرعتی که خودرو باید آن را طی نماید به این شرح است که ابتدا خودرو راه اندازی می شود و تا سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت که معادل ۳۲۰ دور در دقیقه است سرعت می گیرد سپس خودرو می خواهد به سمت راست گردش کند. شعاع پیچ ۸ متر است و فاصله بین دو چرخ خودرو ۱/۵ متر است. طبق رابطه (۳۷) نسبت سرعت ها محاسبه می شود.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (37)$$

برای امنیت بهتر خودرو سرعت هر دو چرخ کاهش یافته به نحوی که سرعت چرخ سمت چپ خودرو به (۲۱۲ دور در دقیقه) ۲۰ km/h کاهش یافته و طبق رابطه (۳۷) سرعت چرخ سمت راست باید ۱۶/۸۴ یا (۱۷۹ دور در دقیقه) باشد. پس از اتمام طی نمودن پیچ، سرعت خودرو دوباره به ۳۰ km/h رسیده و در ادامه خودرو تا ۴۰ km/h سرعت گرفته است. سپس خودرو به سمت چپ گردش کرده و در این حالت نیز شعاع پیچ ۸ متر در نظر گرفته شده است. بنابراین سرعت موتور سمت چپ باید ۱۷۹ دور در دقیقه و موتور سمت راست ۲۱۲ دور در دقیقه باشد. سپس سرعت خودرو دوباره به ۳۰ km/h رسیده است. شکل (۱۲) نحوه تغییرات سرعت دو موتور سمت چپ و راست خودرو را نشان می دهد. موتور سمت راست به خروجی شماره یک اینورتر و موتور سمت چپ به خروجی دوم اینورتر وصل شده اند. در واقع علت بیش تر بودن ریبیل سرعت موتور سمت چپ نسبت به موتور سمت راست، محدودیت انتخاب بردارهای ولتاژ برای درایو موتور وصل شده به خروجی دوم است.

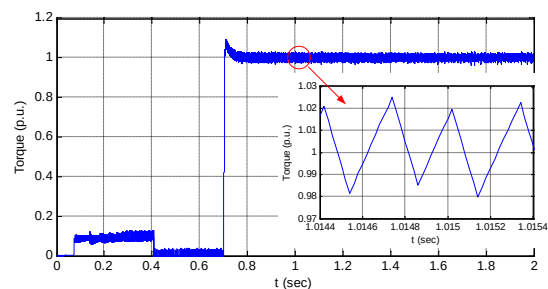
به منظور ارزیابی میزان ریبیل گشتاور و سرعت پاسخ دینامیکی گشتاور موتور القایی مورد استفاده در خودرو، منحنی پاسخ پله گشتاور در حالت استفاده از DTC کلاسیک برای کنترل خودرو در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در این حالت ریبیل گشتاور حدود ۷٪ بوده که مقدار قابل توجهی است. برای کاهش ریبیل گشتاور با استفاده از تعریف نواحی ۱۲ گانه برای شار و با توجه به روابط (۲۸) و (۲۹) بردارهای



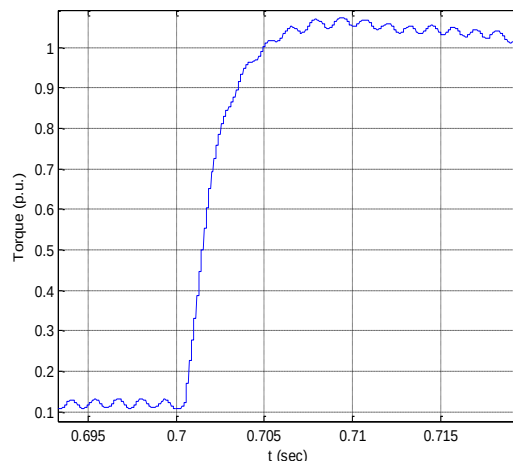
شکل (۱۶): پاسخ پله گشتاور با استفاده از روش DTC تکمیلی

جدول (۵): مقایسه پاسخ گشتاور طرح پیشنهادی با مراجع

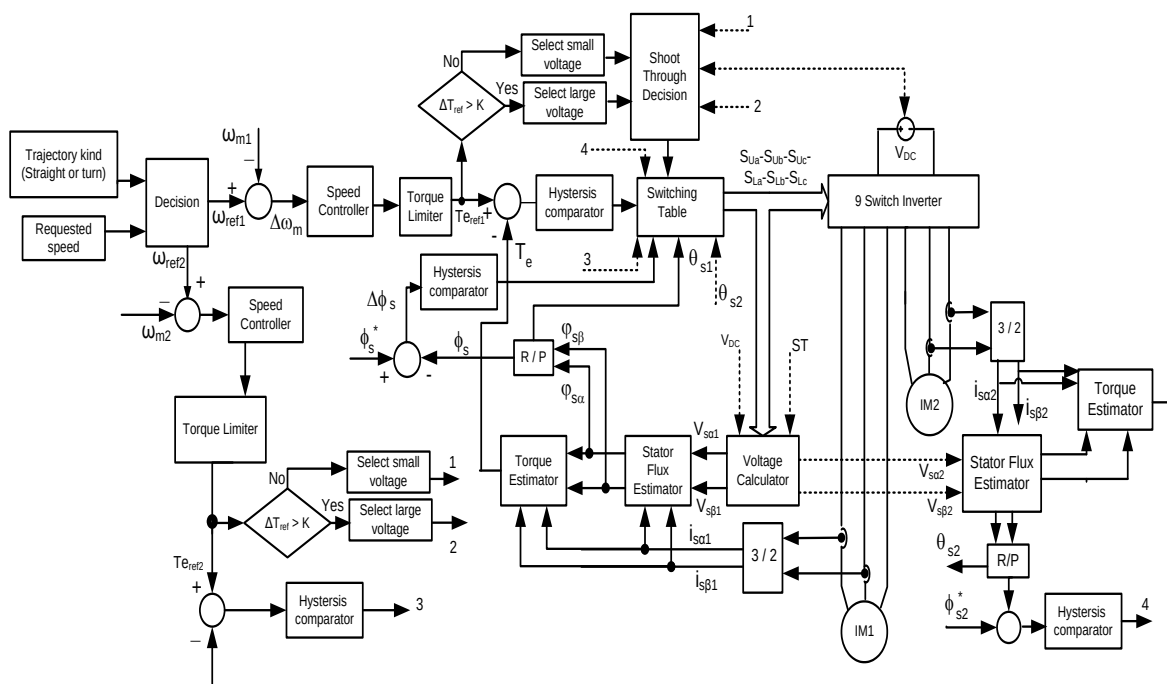
مدت زمان پاسخ گشتاور	ریپل گشتاور	منبع انرژی ورودی	مراجع
0.1 sec	%۴	dc ایده آل	[۲۲]
0.0055 sec	%۳/۴	dc ایده آل	[۱۴]
0.0035 sec	%۳/۵	dc ایده آل طرح DTC+FOC	[۱۱]
0.005 sec	%۲/۵	FC+UC+Bat	طرح مقاله
0.004 sec	%۲/۵	FC+UC+Bat	طرح بهبود یافته



شکل (۱۴): پاسخ پله گشتاور با استفاده از روش کاهش ریپل



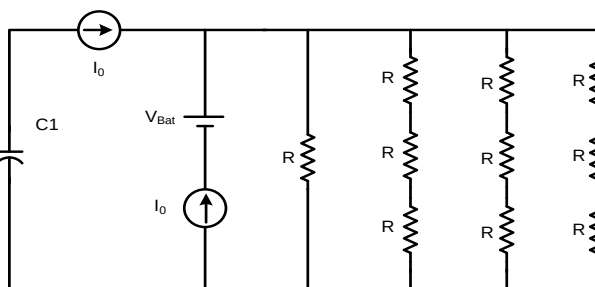
شکل (۱۵): سرعت پاسخ پله گشتاور با استفاده از روش کاهش ریپل



شکل (۱۷): دیاگرام روش DTC بهبود یافته پیشنهادی

کلید هر پایه روشن باشند، بنابراین ولتاژ قابل تحمل کلید جدید نیز مانند کلیدهای مورد استفاده در ساختار اینورتر است اما جریان هر کلید اینورتر در حالت قبلی یک سوم جریان ماکزیمم در حالت ST بوده و در ساختار جدید، کلید اضافه شده باید قابلیت تحمل ۵۰٪ جریان ماکزیمم را داشته باشد. با این وجود حد جریان قابل تحمل برای هر یک از ۹ کلید اینورتر نیز نصف شده است. بنابراین استفاده از یک کلید در ورودی اینورتر برای استفاده در حالت ST می تواند تلفات را کاهش دهد.

به منظور جمع بندی شرایط حالت های مختلف ST، مقادیر تلفات هدایت، تلفات کلیدزنی، ولتاژی که هر کلید باید تحمل کند و حداکثر جریان هر کلید برای حالت های مختلف ST در جدول (۶) بیان شده اند. نتایج نشان می دهد که با اضافه نمودن یک کلید در ورودی اینورتر، تلفات حالت هدایت کاهش چشمگیری دارد و این در شرایطی است که تلفات کلیدزنی تقریباً مشابه حالت های دیگر است. حداکثر جریان عبوری از ۹ کلید اینورتر نیز نسبت به حالت ST ایجاد شده توسط سه پایه نصف شده است. بنابراین هزینه کلیدهای اینورتر کاهش یافته است در مقابل یک کلید به ساختار اضافه شده است. برای ارزیابی دقیق اقتصادی طرح لازم است که در حالت عملی طول عمر مفید مبدل در نظر گرفته شود و بررسی شود که هزینه مقدار انرژی صرفه جویی شده به دلیل کاهش تلفات و کاهش هزینه هر یک از ۹ کلید اینورتر به دلیل کاهش مقدار جریانی که باید تحمل کنند، در مقابل هزینه اضافه شده ناشی از کلید جدید چه میزان صرفه جویی اقتصادی خواهد داشت.



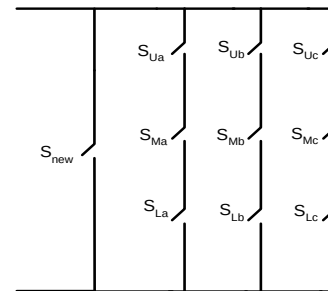
شکل (۱۹): مدل مقاومتی کلیدها در هنگام ST

جدول (۶): مقایسه روش های مختلف ایجاد ST

نحوه ST	تلفات هدایت	تلفات کلیدزنی	V_{switch}	I_{switch}
یک پایه	$12 RI_0^2$	$2I_0 V_i$	V_i	$3(2I_0) + 4(2I_n) + 2(I_n)$
دو پایه	$6RI_0^2$	$2I_0 V_i$	V_i	$6(I_0) + 2(2I_n) + 1(I_n)$
سه پایه	$4RI_0^2$	$2I_0 V_i$	V_i	$9(\frac{2}{3}I_0)$
جدید	$2RI_0^2$	$2I_0 V_i$	V_i	$9(\frac{1}{3}I_0) + 1(I_0)$

۷- نتیجه گیری

در این مقاله مدل سازی پیل سوختی، باتری و ابرخازن ارائه شد و با مدیریت توان دریافتی از منابع، علاوه بر پاسخ دهی به تغییرات توان مورد



شکل (۱۸): کلیدهای اینورتر به همراه کلید جدید

در اینورتر ۹ کلیدی در هر لحظه، در هر پایه حداقل ۲ کلید روشن هستند و تنها با تغییر حالت یک کلید در هر پایه، امکان ایجاد ST وجود دارد. بنابراین اگر ST تنها توسط یک پایه انجام شود، تلفات ST شامل تلفات کلیدزنی یک کلید و هدایت ۳ کلید خواهد بود.

مقدار تلفات هدایت کلیدها در حالت ST با یک پایه، با توجه به مدل مقاومتی کلیدها در هنگام هدایت که در شکل (۱۹) نشان داده شده، مساوی $12RI_0^2$ خواهد بود. در این شرایط علاوه بر وجود تلفات هدایت بسیار زیاد، مقدار ولتاژ قابل تحمل هر کلید نیز باید به اندازه ولتاژ dc ورودی باشد و جریان قابل تحمل هر کلید نیز حداقل مساوی باشد. جریان سلفها در هنگام ST مقدار قبلی خود را حفظ می کنند بنابراین مانند یک منبع جریان با مقداری برابر با جریان سلف در لحظه قبل از بروز ST رفتار می کنند. در حالتی که ST توسط هر سه پایه انجام شود، مقدار تلفات هدایت کلیدهای اینورتر امپدانسی ۹ کلیدی به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$P_{Loss} = \frac{1}{3} \times 3R \times (2I_0)^2 = 4RI_0^2 \quad (38)$$

تحلیل ها نشان می دهد که انجام ST با استفاده از سه پایه اینورتر باعث می شود که تلفات حالت هدایت یک سوم شود. اما بدیهی است که در این حالت سه کلید تغییر حالت داده اند یعنی تلفات کلیدزنی باید به ازای ۳ کلید محاسبه شود. برای محاسبه تلفات کلیدزنی، مدت زمان وصل شدن کلیدها در شرایط مختلف تقریباً یکسان است و جریان هر کلید در لحظه وصل شدن کامل، مقداری فراجهدش دارد و چون این شرایط همواره وجود دارد و هدف از این قسمت مقایسه عملکرد حالت های مختلف است، اثر فراجهدش ها لحاظ نشده است. در حالت انجام ST با یک پایه، تلفات کلیدزنی تقریباً مساوی است. از طرفی برای انجام ST با سه کلید نیز چون جریان هر کلید یک سوم شده است بنابراین در مجموع، در این حالت نیز مقدار تلفات کلیدزنی همان $2I_0 V_i$ خواهد بود. اگر طبق شکل (۱۸) یک کلید در ورودی اینورتر قرار داده شود، تلفات حالت هدایت کلیدها در هنگام ST طبق رابطه (۳۹) خواهد بود:

$$P_{Loss_{New}} = \left[\left(\frac{1}{3} \times 3R \right) \parallel R \right] \times (2I_0)^2 = 2RI_0^2 \quad (39)$$

در این شرایط، تلفات نسبت به حالت قبل ۵۰٪ کاهش خواهد یافت. از آنجایی که در اینورتر ۹ کلیدی در هر لحظه باید حداقل ۲ کلید از ۳

- [11] S. Vaezzadeh and E. Jalali, "Combined vector control and direct torque control method for high performance induction motor drives," *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 3095–3101, 2007.
- [12] H. Yoo, S. K. Sul, Y. Park and J. Jeong, "System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 44, No. 1, pp. 108–114, 2008.
- [13] A. Jidin, N. R. N. Idris, A. H. M. Yatim, T. Sutikno and M. E. Elbuluk, "An optimized switching strategy for quick dynamic torque control in DTC-hysteresis-based induction machines," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 8, pp. 3391–3400, 2011.
- [14] S. A. Zaid, O. A. Mahgoub and K. A. El-Metwally, "Implementation of a new fast direct torque control algorithm for induction motor drives," *IET Electr. Power*, Vol. 4, No. 5, pp. 305–313, 2010.
- [15] F. Z. Peng, M. Shen and K. Holland, "Application of Z-source inverter for traction drive of fuel cell—battery hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 22, pp. 1054 – 1061, 2007.
- [16] A. Beicha, "Modeling and simulation of proton exchange membrane FC systems," *Journal of Power Sources*, Vol. 205, pp. 335 – 339, 2012.
- [17] M. Valizadeh, M. R. Feyzi, E. Babaei and M. Sabahi, "Dynamic modeling of modular fuel cell for MPPT and torque ripple reduction in direct torque control of induction motor," Accepted in *Turkish Journal of Electrical and Computer Science*, 2013.
- [18] D. Rakhmatov, S. Vruthula and D. A. Wallach, "A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer," *IEEE Trans. VLSI System*, Vol. 11, No. 6, pp. 1019–1030, 2003.
- [19] M. Chen and G. A. R. Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 2, pp. 504–511, 2006.
- [20] M. Pagano and L. Piegari, "Hybrid electrochemical power sources for onboard applications," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 22, pp. 450–455, 2007.
- [21] D. Linzen, S. Buller, E. Karden and R. W. Doncker, "Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 41, No. 5, pp. 1135–1141, 2005.
- [22] M. Vasudevan and R. Arumugam, "Development of torque and flux ripple minimization algorithm for direct torque control of induction motor drive," *Springer-Verlag Electrical Engineering*, Vol. 89, pp. 41–51, 2006.

نیاز موتور الکتریکی خودرو، قابلیت راه اندازی سرد خودرو نیز فراهم شد. برای کاهش اثرات نامطلوب ناشی از روشن و خاموش شدن های مکرر پیل سوختی، توان پیل سوختی در یک مقدار مناسب در تمام طول مدت کار خودرو تثبیت شد و تغییرات فرکانس بالای بار توسط ابرخازن پاسخ داده شد. سیستم کنترلی DTC با دقت مناسبی منحنی سیکل رانندگی استاندارد NYCCDS را دنبال نمود. همچنین برای کاهش اثر نامطلوب افت ولتاژ ابرخازن و پیل سوختی در صورت تغییر بار، از اینورتر امپدانی استفاده شد. اینورتر امپدانی ۹ کلیدی با داشتن دو خروجی سه فاز توانست دو موتور القایی را در طی نمودن مسیرهای مستقیم با سرعت یکسانی کنترل نماید و در طی نمودن پیچ های مسیر حرکت، تغییر سرعت مناسب را بین آن ها ایجاد نماید. ساختار کنترلی پیشنهادی توانست ریبیل گشتاور را کاهش داده و سرعت پاسخ دهی را نیز بهبود دهد. همچنین شرایط کلیدها و میزان تلفات برای حالت های مختلف ST بررسی شد و ساختار پیشنهادی باعث کاهش تلفات هدایت کلیدها در مدت ST شد.

مراجع

- [1] J. Faiz, M. B. B. Sharifian, A. Keyhani and A. B. Proca, "Sensorless direct torque control of induction motors used in electric vehicle," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 18, No. 1, pp. 1–10, 2003.
- [2] M. T. Outeiro, R. Chibante, A. S. Carvalho and A. T. Almeida, "A parameter optimized model of a Proton Exchange Membrane fuel cell including temperature effects," *Journal of Power Sources*, Vol. 185, pp. 952–960, 2008.
- [3] J. Jia, Q. Li, Y. Wang, Y. T. Cham and M. Han, "Modeling and dynamic characteristic simulation of a proton exchange membrane fuel cell," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 24, No. 1, pp. 283–291, 2009.
- [4] M. Amrhein and P. T. Krein, "Dynamic simulation for analysis of hybrid electric vehicle system and subsystem interactions, including power electronics," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol. 54, No. 3, pp. 825–836, 2005.
- [5] L. Zubietta and R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications," *IEEE Trans. Industrial Application*, Vol. 36, No. 1, pp. 199–205, 2000.
- [6] M. Salman, M. Chang and J. Chen, "Predictive energy management strategies for hybrid vehicles," *IEEE VPPC*, Chicago, IL, pp. 21–25, 2005.
- [7] E. Schaltz, A. Khaligh and P. O. Rasmussen, "Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 8, pp. 3882–3891, 2009.
- [8] A. Y. Karnik, J. Sun, A. G. Stefanopoulou and J. H. Buckland, "Humidity and pressure regulation in a PEM fuel cell using a gain-scheduled static feedback controller," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 283–297, 2009.
- [9] H. Yokokawa, H. Tu and B. Iwanschitz, "Fundamental mechanisms limiting solid oxide fuel cell durability," *Journal of Power Sources*, Vol. 182, pp. 400–412, 2008.
- [10] C. A. R. Paja, A. Romero, R. Giral, E. V. Idiarte and L. M. Salamero, "Fuzzy-based modelling technique for PEMFC electrical power generation systems emulation," *IET Power Electron.*, Vol. 2, No. 3, pp. 241–255, 2009.