

تشخیص و آشکارسازی خطای اتصال باز در مبدل DC/AC مبتنی بر IGBT به کار گرفته شده در خودروی الکتریکی

سیدسعید موسوی^۱، استادیار؛ اسداله کاظمی^۲، استادیار؛ حسام اکبری کشتلی^۳، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل - s.moosavi@ausmt.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - مؤسسه آموزش عالی کاوش - asadollahk@yahoo.com

۳- دانشکده مهندسی برق - مؤسسه آموزش عالی کاوش - ha0748@gmail.com

چکیده: امروزه مبدل‌های الکترونیک قدرت نقش بسیار مهم و غیرقابل انکاری در سیستم پیش‌رانش خودروهای الکتریکی ایفا می‌کنند. یکی از انواع مبدل‌ها، اینورتر منبع ولتاژ می‌باشد که کاربرد بسیار زیادی در درایو موتور الکتریکی دارد. در خودروهای برقی، به دلیل محیط پرتنش که با اغتشاش نیز همراه است، اینورترها همواره در معرض خرابی قرار دارند که گاهی اوقات باعث بروز خسارات جبران‌ناپذیری می‌شود. از این رو شناسایی و تشخیص خطا در اینورترها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و سبب افزایش ایمنی سیستم خواهد شد. این مقاله، به آشکارسازی خطای اتصال باز در اینورتر منبع ولتاژ مبتنی بر IGBT پرداخته است. نوع خطاهایی که مورد بررسی قرار خواهند گرفت از نوع خطای تک و چندگانه IGBT می‌باشد. به منظور استخراج شاخص خطا، یک الگوی شناسایی خطای اتصال باز در این کار معرفی شده است و نتایج به دست آمده، رضایت بخش بوده است. در ادامه برای آشکارسازی و کلاس‌بندی خطا، از الگوریتم شبکه عصبی پرسپترون چندلایه استفاده شده است. سیستم مورد مطالعه در حالت استاتیک با ۵ سطح گشتاور و ۵ سطح سرعت مختلف در حالت ایستای مورد بررسی قرار گرفته است که تمامی حالات خطا، به کمک الگوریتم شبکه عصبی، با موفقیت مورد شناسایی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: مبدل الکترونیک قدرت، اینورتر منبع ولتاژ، آشکارسازی و تشخیص خطا، خودروی هیبریدی- الکتریکی، خطای اتصال باز، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه.

Open Phases Fault Diagnosis of IGBT-based DC-AC Inverter of Electric Vehicle

S. S. Moosavi¹, Assistant Professor; A. Kazemi², Assistant Professor; H. Akbari³, MSc Student

1- Faculty of Electrical Engineering, Amol University of special modern technologies, Email: s.moosavi@ausmt.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Kavosh institute of higher education, Email: asadollahk@yahoo.com

3- Faculty of Electrical Engineering, Kavosh institute of higher education, Email: ha0748@gmail.com

Abstract: Nowadays, the power electronic converters play a crucial and undeniable role on electric vehicles propulsion system. One type of this converters are voltage source inverter (VSI) that use a lot in electric motor drives. In electric vehicles, due to the tense environment that is also associated with turbulence, Inverters are always at risk of failure that occasionally caused to irreparable damages. This paper focuses on diagnosis and detection of open phases fault on IGBT based VSI inverter. In order to extract the fault index, an open-circuit fault detection model presented in this work and the results obtained have been satisfactory. In continue, for fault diagnosis and classification, it is used a multilayer perceptron artificial neural network (MPANN) algorithm. The system is investigated under 5 different torque and speed level in static state, that all fault conditions have been identified successfully with the help of MPANN.

Keywords: Power electronic converter, voltage source inverter, fault diagnosis and detection, hybrid-electric vehicle, open phase fault, multilayer perceptron artificial neural network.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲

نام نویسنده مسئول: سیدسعید موسوی

نشانی نویسنده مسئول: مازندران، آمل، نیش ابادر ۳۵، دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل.

۱. مقدمه

امروزه الکترونیک قدرت نقش مهمی در درایور موتورهای الکتریکی، مبدل‌های به‌کارگرفته شده برای ارتباط میان منابع انرژی تجدیدپذیر به مصرف‌کننده، سیستم‌های انتقال قدرت (سیستم‌های HVDC) و وسایل نقلیه برقی و هیبریدی و بسیاری از کاربردهای دیگر ایفا می‌کند؛ بنابراین قابلیت اطمینان در الکترونیک قدرت بیش از پیش حیاتی شده و نیازمند توجه و تحقیق بیشتری است [۱-۷]. بر طبق یک بررسی، در بین خطاهایی که در نیمه‌هادی‌ها رخ می‌دهد، خطا در اتصالات لحیم‌کاری در دستگاه‌های قدرت تا ۳۴٪ درصد از خطاهای کل سیستم الکترونیک قدرت را به خود اختصاص می‌دهد [۲]. بررسی دیگری نشان داده است که حدود ۳۸٪ خطاها در درایورهای AC با سرعت متغیر رخ می‌دهد [۳]. از نظر پیچیدگی خطا، انواع خطاها در اینورترها را می‌توان به صورت خطاهای تکی و خطاهای چندگانه طبقه‌بندی کرد. شناسایی و تشخیص خطاهای چندگانه، یک فرایند پیچیده‌تر نسبت به شناسایی خطای تکی می‌باشد. همچنین انواع خطا از نظر جنس خطا را می‌توان به دو دسته خطاهای اتصال کوتاه و خطاهای اتصال باز تقسیم کرد. زمانی که خطای اتصال کوتاه در سیستم رخ می‌دهد، جریان سیستم به ۵ تا ۶ برابر مقدار نامی می‌رسد که سیستم‌های حفاظتی و کنترلی قادر به تشخیص و شناسایی این افزایش جریان هستند و سیستم را نسبت به این خطا ایزوله می‌کنند. اما در مورد خطای اتصال باز شرایط این چنین نبوده و تغییرات جریان در سیستم بسیار کم می‌باشد که شناسایی و تشخیص این خطا را غیرممکن می‌کند [۸].

خطای اتصال باز به دو دسته قطع فرمان گیت و قطع پایه IGBT تقسیم می‌شود. که در این میان سهم عمده مربوط به خطای قطع پایه IGBT می‌باشد. به همین دلیل، از میان طرح‌های پژوهشی و مقالات موجود، بیشتر محققان بر روی شناسایی و تشخیص این نوع خطا، تمرکز کرده‌اند. مرجع [۹] به منظور شناسایی و خطای اتصال باز یک اینورتر سه فاز، از تبدیل موجک استفاده کرده است. اینورتر مورد استفاده از نوع VSI^۲ بوده که به یک موتور القایی متصل است. طرح کنترلی این اینورتر از نوع کنترل مستقیم گشتاور یا DTC^۳ می‌باشد و از جریان سه‌فاز برای آنالیز وضعیت و شناسایی خطا در حالت گذرای موتور القایی استفاده کرده است. این مرجع تنها شرایطی را مورد بررسی قرار داد که در آن تنها یک IGBT دچار خطا شده است و اشاره‌ای به خطاهای چندگانه نکرده است. مرجع [۱۰] یک روش مبتنی بر داده برای تشخیص خطای اتصال باز IGBT در اینورتر یک موتور القایی با کنترل برداری ارائه کرده است. در این روش، استخراج وضعیت سیستم و تشخیص خطا، از طریق آنالیز جریان سه‌فاز اینورتر به دست آمده است. از SVM^۴ به منظور ایزوله کردن خطا استفاده شده است. این مرجع خطاها را در گروه‌های چند تایی دسته‌بندی کرده است که این عمل اجازه تشخیص و شناسایی مکان خطا را به کاربر نمی‌دهد و کنترل خطا را با مشکل همراه می‌سازد. یک استراتژی شناسایی و تشخیص خطا برای اینورترهای چندلایه آبشاری در مرجع

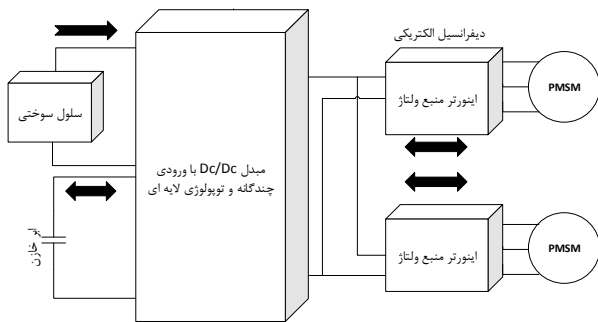
[۱۱] پیشنهاد شده است که شامل دو بخش می‌باشد. بخش اول شامل آزمایش سیگنال‌های ولتاژ و جریان خروجی از اینورتر است. هنگام وقوع خطای اتصال باز در سوئیچ ترانزیستور، شکل موج ولتاژ خروجی به منظور استخراج ویژگی خطا مورد آنالیز قرار می‌گیرد. بخش دوم شامل استخراج و طبقه‌بندی ویژگی سیگنال‌های خطا است، که از روش SVM-FFTRPCA استفاده کرده است. از FFT^۵ برای استخراج ویژگی سیگنال‌ها، از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی نسبی (RPCA^۶) برای بهینه‌سازی و کاهش بُعد داده‌ها و نهایتاً از روش SVM به منظور طبقه‌بندی داده‌ها استفاده شده است. این مرجع سیستم مورد مطالعه را با یک بار اهمی مورد بررسی قرار داده است، در صورتی که در سیستم‌های قدرت و شبکه‌های توزیع، مصرف‌کننده اغلب از نوع اهمی-سلفی می‌باشند. یک روش برای تشخیص خطای اتصال باز در اینورتر ۵ فاز در مرجع [۱۲] ارائه شده است. اینورتر مورد استفاده از نوع VSI می‌باشد و بر اساس SVPWM^۷ مدوله شده است. باین حال، روش مورد استفاده مستقل از نوع مدولاسیون مبدل است. خطای مورد مطالعه از نوع خطاهای تک‌گانه و چندگانه و قطع یک فاز در اینورتر می‌باشد. روش مورد استفاده بر اساس اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال اینورتر و مقایسه آن با ولتاژ خروجی به دست آمده از مدل تحلیلی است. اندازه‌گیری نیازمند یک سیکل از ولتاژ خروجی به منظور تشخیص خطا و شناسایی مکان آن می‌باشد. در این مرجع نیز از بار اهمی خالص به عنوان مصرف‌کننده استفاده شده است. همچنین معیار تشخیص خطا، ولتاژ سیستم می‌باشد. از آنجایی که تغییرات شکل موج ولتاژ در شرایط تغییر بار بسیار کم است، در هنگام طبقه‌بندی خطا مشکل ایجاد کرده و عدم طبقه‌بندی درست را به همراه دارد.

در این مقاله، شناسایی و تشخیص خطای اتصال باز IGBT در مبدل DC/AC به‌کارگرفته شده در خودرو هیبریدی مورد مطالعه قرار گرفته است. خودروی هیبریدی مورد نظر دارای پیکربندی مبدل DC/DC با ورودی چندگانه همراه با دیفرانسیل الکتریکی می‌باشد. اینورتر مورد نظر از نوع منبع ولتاژ بوده و در درایو کنترل برداری موتور PMSM^۸ به‌کار گرفته شده است. روش مورد استفاده برای تشخیص خطا، ترکیبی از تبدیل فوریه و شبکه عصبی چند لایه است. تمامی حالت‌های خطای اتصال باز که انتظار می‌رود در شرایط عملیاتی به وقوع بپیوندد، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

سایر بخش‌های مقاله به صورت زیر طبقه‌بندی شده است. بخش ۲، ساختار خودرو هیبریدی، بخش ۳، تشخیص خطای اتصال باز، بخش ۴، معرفی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، بخش ۵، نتایج مطالعه و در بخش ۶، جمع‌بندی آورده شده است.

۲. ساختار خودروی هیبریدی

با توجه به چشم‌انداز انرژی، سهم سوخت مصرفی نفت در بخش حمل و نقل از ۴۰٪ در سال ۲۰۰۸ به ۵۴٪ افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر، پیش‌بینی‌های انجام شده از سوی آژانس بین‌المللی انرژی بیانگر



شکل ۱: پیکربندی خودرو هیبریدی مورد مطالعه

در روش کنترل برداری، سعی بر آن است که شار روتور همواره روی محور D قرار داشته باشد. با توجه به وجود آهن‌ریا روی روتور، شار روتور همواره وجود داشته و دقیقاً هم‌راستای محور D است. لذا در صورت عدم نیاز به کاهش شار تولید شده توسط PM، مؤلفه تولید شار جریان استاتور (i_{ds}^*) باید صفر شود تا گشتاور کاهش نیابد. رابطه گشتاور در PMSM به صورت زیر است [۲۳-۲۵]:

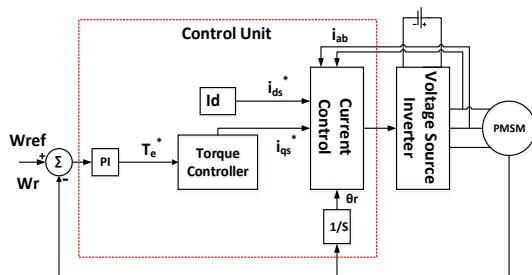
$$T_e = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} [\lambda_m^r \times i_{qs}^r + (L_{ds} - L_{qs}) \times i_{qs} \times i_{ds}] \quad (1)$$

در ناحیه گشتاور ثابت، با صفر قراردادن جریان مرجع استاتور در راستای محور D و استفاده از کنترلر مناسب، i_{ds} صفر خواهد شد و در نتیجه رابطه به صورت زیر درمی‌آید:

$$T_e = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} \times \lambda_m^r \times i_{qs}^r = K_t \times i_{qs}^r \quad (2)$$

$$\lambda_{ds}^r = \lambda_m^r \quad (3)$$

که در آن: T_e ، گشتاور الکتریکی؛ λ_m^r ، λ_m^r ، شار مغناطیس‌کنندگی؛ i_{qs}^r ، جریان روتور در راستای محور Q؛ L_{ds} ، L_{qs} ، اندوکتانس‌های محور D-Q؛ i_{ds} ، i_{qs} ، جریان استاتور در راستای محور D-Q؛ P، تعداد جفت قطب؛ λ_m^r ، شار پیوندی در راستای محور D استاتور است. طرح کنترل برداری مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: طرح کنترل برداری مورد استفاده

در این کنترل برداری، از جریان‌های فاز موتور جهت کنترل اینورتر نمونه برداری شده است. با استفاده از سرعت موتور و مقایسه آن با سرعت مرجع، گشتاور محاسبه می‌شود. با مقایسه گشتاور به دست آمده با مقدار مرجع، مقدار I_q به دست می‌آید. مقادیر I_d و I_q به دست آمده به همراه زاویه چرخش روتور وارد دستگاه مختصات dq-abc می‌شوند و جریان abc مرجع را تولید می‌کنند. با مقایسه جریان مرجع با مقدار جریان سه

افزایش قیمت نفت در بالاترین نرخ ممکن می‌باشد. بنابراین، فناوری‌های مربوط به کاهش مصرف سوخت در بخش حمل و نقل، مانند: خودروهای برقی، خودروهای هیبرید برقی و خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه جایگاه خود را در بین وسایل نقلیه دیگر بیشتر نموده و به یکی از امیدوارکننده‌ترین موارد در جهت کاهش سوخت فسیلی در بخش حمل‌ونقل تبدیل شده است [۱۳].

۲-۱- معرفی سیستم مورد مطالعه

خودروی هیبریدی مورد نظر از سلول سوختی به عنوان منبع اولیه انرژی و فراخازن به عنوان منبع ثانویه انرژی بهره می‌برد. پیکربندی این خودرو از نوع مبدل با ورودی چندگانه می‌باشد. توپولوژی مبدل الکترونیک قدرت DC/DC آن از نوع مبدل لایه‌ای است. استفاده از مبدل DC/DC با ورودی چندگانه هزینه، و حجم سیستم را در قسمت تولید انرژی کاهش می‌دهد. همچنین توپولوژی لایه‌ای مبدل نیز باعث کاهش ریپل خروجی جریان و ولتاژ می‌شود که به طور مستقیم بر روی طول عمر منابع انرژی تأثیر گذار بوده و در نتیجه باعث افزایش طول عمر این تجهیزات می‌گردد. همچنین اندازه عناصر غیرفعال نظیر سلف را که اصلی‌ترین نگرانی در طراحی مبدل‌های DC/DC است را کاهش می‌دهد و به این گونه حجم و وزن مبدل نیز کاهش می‌یابد. در این مبدل، سلول سوختی با مبدل DC/DC یک طرفه و فراخازن با مبدل DC/DC دوطرفه به شین DC متصل شده‌اند [۱۹-۱۴].

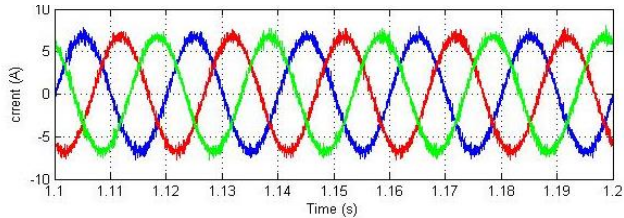
در بخش درایو حرکتی از دو مبدل DC/AC که هر کدام به طور جداگانه به موتور الکتریکی متصل شده‌اند، استفاده شده است. به این ترکیب، دیفرانسیل الکتریکی گفته می‌شود که نسل آینده سیستم دیفرانسیل خودروهای الکتریکی و هیبریدی را تشکیل می‌دهد. استفاده از دیفرانسیل الکتریکی در خودرو به جای دیفرانسیل کلاسیک و سنتی نتیجه در حذف گیربکس، دنده و محور قرار گرفته میان موتور و چرخ‌ها دارد که باعث حذف سیستم مکانیکی خودرو شده و در نتیجه اجزای سیستم محرکه خودرو کاهش می‌یابد. بنابراین کنترل آن ساده‌تر، راندمان بیشتر، قابلیت اطمینان افزایش و حجم و وزن خودرو بهینه می‌شود [۲۰، ۲۱].

در این طرح دو موتور الکتریکی از نوع موتور سنکرون با آهنربای مغناطیسی که به طور مستقیم به چرخ‌های عقب متصل شده‌اند و توسط اینورترهای جداگانه، راه‌اندازی و کنترل می‌شوند و گشتاور مورد نیاز خودرو را تأمین می‌کنند. [۲۲]

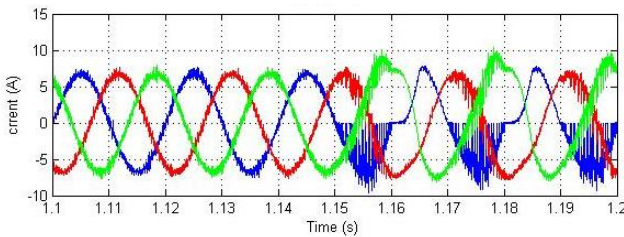
۲-۲- درایو کنترل برداری با موتور PMSM:

کنترل برداری که از نوع کنترل میدان (FOC) می‌باشد، یک روش کنترل است که در موتور AC سنکرون و القایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش کنترل برداری بر این اساس شکل گرفته است که ابتدا مدل سه‌فاز موتور را به مدل دو سیم‌پیچ عمود برهم تبدیل کرده و سعی می‌کند جریان دو سیم‌پیچ را کنترل کند.

گرفته است. در این مقاله سیستم مورد نظر دارای ۲ حالت سالم و خطا می‌باشد. از جریان سه فاز موتور الکتریکی و تبدیل فوریه (FFT) آن برای استخراج ویژگی‌های سیستم استفاده شده است. شکل موج جریان سه فاز در شرایط سالم و خطا در دو حالت استاتیک در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است.

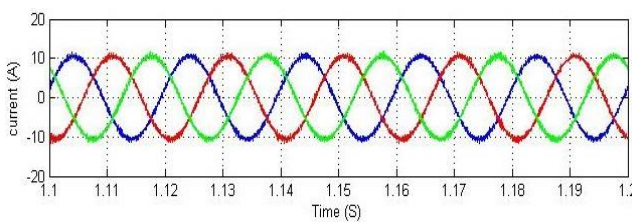


الف) جریان سه فاز در حالت سالم

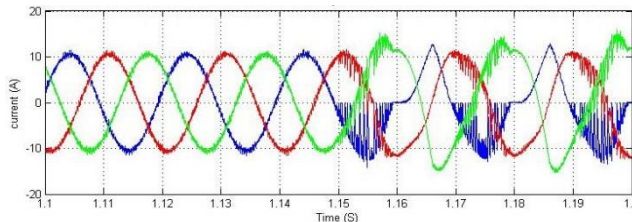


ب) جریان سه فاز در حالت خطا (کلید S1 باز شده است)

شکل ۴ جریان سه فاز در حالت سالم و خطا در حالت سرعت ۵۵۰ rpm و گشتاور ۷.۵ n.m



الف) جریان سه فاز در حالت سالم



ب) جریان سه فاز در حالت خطا (کلید S1 باز شده است)

شکل ۵: جریان سه فاز در حالت سالم و خطا در حالت سرعت ۷۵۰ rpm و گشتاور ۱۱.۵ n.m

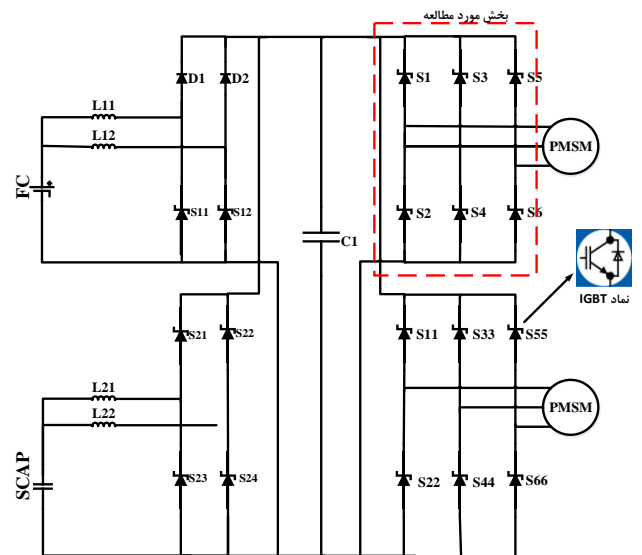
برای استخراج ویژگی سیستم، از جریان سه فاز تبدیل فوریه گرفته می‌شود. شکل ۶ نشان دهنده نتایج حاصل از اعمال تبدیل فوریه بر روی شکل موج جریان سه فاز موتور در دو حالت سالم و خطای S1 می‌باشد. این تغییرات برحسب اندازه فرکانس بیان شده است. با ایجاد خطا در سیستم، تغییراتی در اندازه فرکانس‌های سیستم ایجاد می‌گردد که با توجه به نوع خطا، شدت خطا و مکان خطا، این تغییرات مقدار و اندازه

فاز موتور، پالس‌های فرمان گیت IGBT تولید شده و اینورتر با توجه به سرعت و گشتاور درخواست شده از طرف راننده خودرو، کنترل می‌گردد [۲۳-۲۵].

۳. تشخیص خطای اتصال باز

۳-۱- معرفی مبدل DC/AC مورد مطالعه

این خودرو دارای پیکربندی مبدل DC/DC با ورودی چند گانه است. در بخش درایو حرکتی این خودرو از دو مبدل DC/AC که به طور جداگانه به دو موتور PMSM متصل شده‌اند، استفاده شده است. به این ترکیب دیفرانسیل الکتریکی می‌گویند. اینورتر مورد استفاده در این خودرو، از نوع اینورتر منبع ولتاژ می‌باشد و مجهز به ۶ عضو کلیدزنی IGBT است. از مزایای این اینورتر می‌توان به ثبات بهتر ولتاژ خروجی، اعوجاج هارمونیک کم، خروجی متغیر ولتاژ و فرکانس اشاره کرد. همچنین این طرح به دلیل دارا بودن امیدانس کم، دارای ولتاژ ورودی و خروجی ثابت و یکسانی است که برای عملکرد در حالت تک یا چند موتور الکتریکی مناسب می‌باشد. ساختار داخلی سیستم مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: ساختار داخلی سیستم مورد مطالعه

۳-۲- معرفی مؤلفه‌های سالم و خطای مبدل

تشخیص و شناسایی خطای اتصال باز در خودرو الکتریکی نیازمند اطلاعاتی از شرایط عملکرد سیستم در سرعت‌های مختلف و سطح بار متفاوت می‌باشد. لازم به ذکر است که هنگامی که بیش از دو IGBT دچار خطای اتصال باز می‌شوند، جریان سیستم به بیش از ۳ برابر مقدار نامی سیستم می‌رسد. این افزایش جریان نیز همانند افزایش جریان در خطای اتصال کوتاه توسط سیستم کنترلی و حفاظتی شناسایی می‌شود و نیازی به استفاده از روش‌های پیچیده محاسباتی ندارد. به همین دلیل در این مقاله تنها خطاهای تکی و دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم در سطح بار و سرعت متفاوت برای حالت‌های سالم و خطای S1, S2, ..., S6, S1S2, ..., S3S4, ..., S5S6

یک الگوی جدید معرفی شده است که برای تمام سرعت‌های کاری و فرکانس‌های اساسی متفاوت سیستم و تحت شرایط کاری متفاوت، مناسب بوده و کارایی خوبی از خود نشان داده است. این الگو به صورت رابطه زیر نوشته شده است:

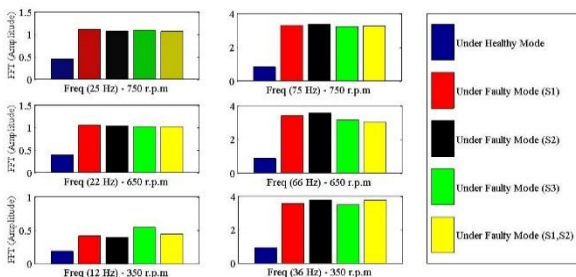
$$F_{open-phase\ fault} = \frac{(k + 1)f_f}{2} \quad (4)$$

در معادله بالا، $k = 0, 2$ و f_f فرکانس اصلی سیستم در سرعت موتور می باشد که از طریق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

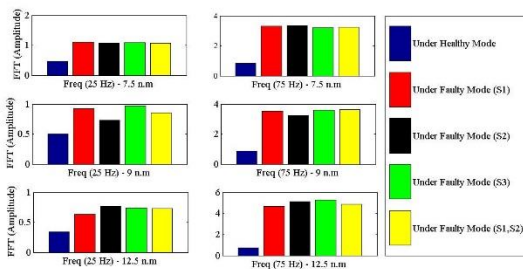
$$f_f = \frac{2P \times N_s}{120} \quad (5)$$

در معادله بالا N_s سرعت موتور الکتریکی تحت شرایط عملیاتی، $2P$ تعداد جفت قطب است. از مزیت‌های این الگوی شناسایی می‌توان به سادگی، انتخاب فرکانس مناسب جهت شناسایی خطا، عملکرد مناسب در حالت خطاهای تک‌ و دوگانه و همچنین کارایی مناسب در هنگام تغییر بار یا سرعت اشاره کرد.

شکل ۸ و ۹ به ترتیب اثر تغییر سرعت و بار بر روی شاخص خطا را نشان می‌دهد. فرکانس‌های انتخابی بر اساس الگوی شناسایی خطای معرفی شده در این مقاله انتخاب شده است. از آنجایی که در تست حالت تغییر بار بر روی موتور الکتریکی، سرعت موتور در مقدار ۷۵۰ rpm ثابت بوده است، از یک گروه فرکانس برای تمام حالت‌های بار استفاده شده است.



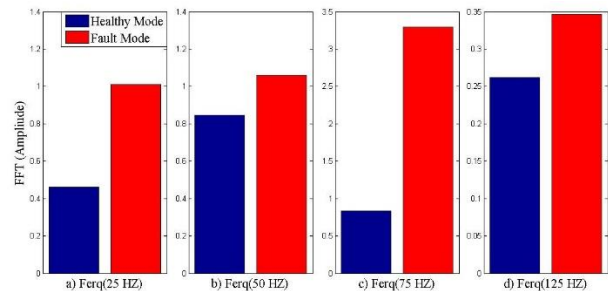
شکل ۸: اثر تغییر سرعت بر روی خطاهای مختلف و کارایی الگوی شناسایی خطا معرفی شده در این مقاله



شکل ۹: اثر تغییر بار بر روی خطاهای مختلف و کارایی الگوی شناسایی خطا معرفی شده در این مقاله

کارایی الگوی شناسایی خطای معرفی شده در این مقاله برای حالت‌های سالم و خطا در شرایط مختلف عملیاتی مورد مطالعه در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در این شکل‌ها رنگ آبی حالت سالم و سایر رنگ‌ها حالت‌های خطا را نشان می‌دهند. تمایزی که میان

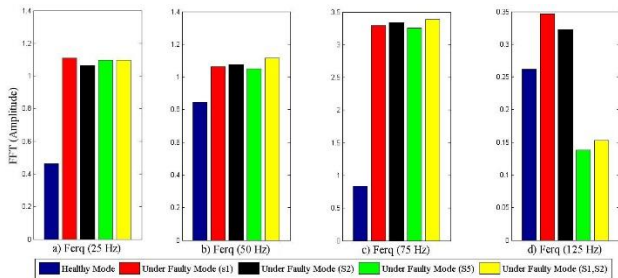
متفاوتی دارد. در بخش بعد نمونه‌هایی از اثر چند خطا بر چند فرکانس سیستم نشان داده شده است.



شکل ۶: تبدیل فوری در حالت سالم و خطا

۳-۳- مؤلفه‌های سیستم در شرایط مورد آزمایش

سیستم مورد نظر در چند حالت خطا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تبدیل فوری برای حالت‌های مختلف خطا در سرعت ۷۵۰ rpm در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: تبدیل فوری از جریان سه‌فاز در چند حالت مختلف خطا

همان‌طور که در بخش ۳-۲ توضیح داده شد؛ خطاهای مختلف تأثیر مستقیم بر روی اندازه فرکانس‌های سیستم دارند. که این تأثیرات با توجه به مکان و شدت خطا متفاوت می‌باشد. در شکل ۷ اثر چند نوع خطا بر روی فرکانس‌های سیستم نشان داده شده است که با توجه به نوع و مکان خطا، مقدار متفاوتی دارد.

۳-۴- الگوی شناسایی خطای اتصال باز

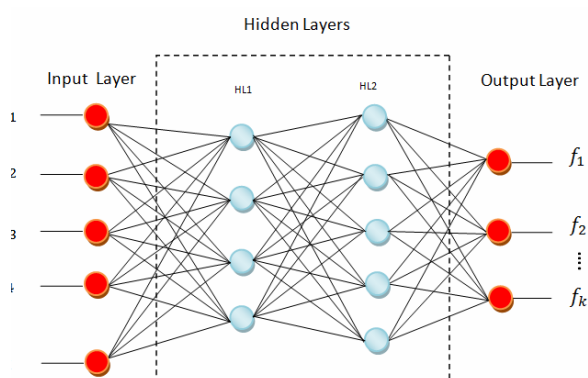
همان‌گونه که در بخش قبل بیان شد، از جریان سه‌فاز موتور به منظور رسیدن به هدف تشخیص و شناسایی خطای اتصال باز IGBT در اینورتر منبع ولتاژ استفاده شده است. به کمک تبدیل فوری ویژگی شکل موج جریان استخراج و مقایسه‌ای هم میان حالت عملیاتی سالم و خطا صورت گرفت که این امر برای تشخیص و شناسایی خطا بسیار مفید و مؤثر می باشد.

در اینجا لازم به ذکر است که از هر فرکانسی نمی‌توان برای هدف شناسایی و تشخیص خطا استفاده کرد. در واقع تنها چند فرکانس خاص هستند که برای پروسه شناسایی و تشخیص خطا مناسب می‌باشند و موجب ساده شدن پروسه شناسایی خطا می‌شوند. در این مقاله برای انتخاب فرکانس‌های مورد نظر برای پروسه تشخیص و شناسایی خطا،

۴. شناسایی خطا با استفاده از شبکه عصبی

۴-۱- شبکه عصبی چندلایه :

مفهوم پرسپترون در سال ۱۹۴۳ توسط McCulloch و Pitts به عنوان یک نورون مصنوعی ارائه شده است. یک شبکه پرسپترون چندلایه، ارتباط غیرخطی میان بردارهای ورودی و خروجی را نشان می‌دهد. این عمل از طریق اتصال نرون‌های هر گره به لایه قبلی و بعدی انجام می‌شود. خروجی هر نرون در ضرایب وزنی ضرب و به تابع تحریک غیرخطی به عنوان ورودی داده می‌شود. در مرحله آموزش به پرسپترون اطلاعات آموزشی داده می‌شود، سپس وزن‌های شبکه به گونه‌ای تنظیم می‌شود که خطای بین خروجی فعلی و هدف حداقل گردد و یا این که تعداد دفعات آموزش، به مقداری که از پیش تعیین شده است، برسد. پس از آن برای ارزیابی صحت فرایند آموزش، یک سری ورودی‌های تجزیه نشده به شبکه اعمال می‌شود. این ورودی‌ها متفاوت از ورودی‌های به کاررفته در فرایند آموزش شبکه هستند. عموماً آموزش شبکه‌های عصبی بسیار پیچیده و یک مسئله بهینه‌سازی با تعداد متغیرهای بسیار می‌باشد [۲۶]. شبکه عصبی چندلایه از لایه‌های ورودی، لایه‌های مخفی و لایه‌های خروجی که هر یک شامل تعداد نرون‌های مشخصی است تشکیل می‌شود. ساختار شبکه عصبی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این مقاله از یک شبکه عصبی با ۲ لایه که لایه اول دارای ۶۰ سطح و لایه دوم دارای ۷ سطح می‌باشد، برای آشکارسازی و شناسایی خطای اتصال باز استفاده شده است.

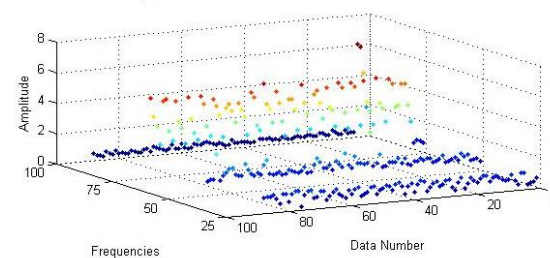
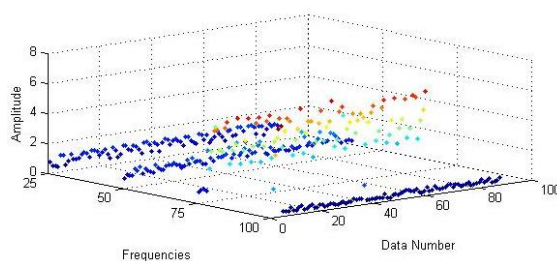


شکل ۱۲: نمایش ساختار شبکه عصبی چندلایه

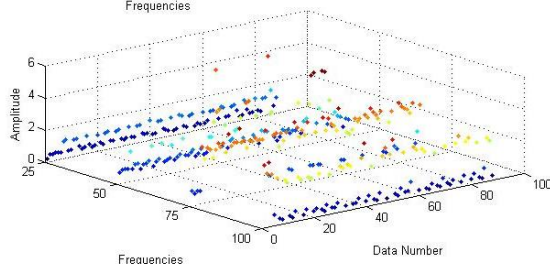
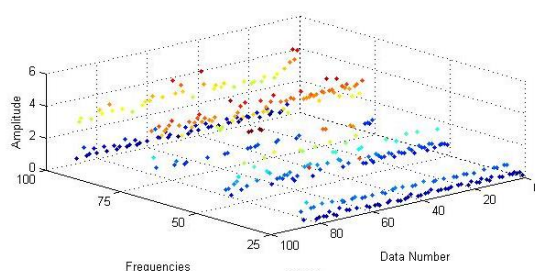
۴-۲- استراتژی و الگوریتم شناسایی خطا

پروسه استراتژی شناسایی و طبقه‌بندی خطا به صورت زیر تعریف می‌شود. ابتدا سیستم در سطح بار و سرعت متفاوت برای حالت‌های سالم و خطای $S1, S2, \dots, S6, S1S2, \dots, S3S4, \dots, S5S6$ مورد تست و آزمایش قرار می‌گیرد. نمایی از شرایط تست سیستم و خروجی در نظر گرفته شده برای هر خطا در شکل ۱۳ نشان داده شده است. خروجی شبکه عصبی به صورت اعداد باینری می‌باشد و تعداد آن به تعداد حالت‌های خطا بستگی دارد. در این مقاله سیستم مورد نظر در دو شرایط عملیاتی متفاوت در ۱۱۰ حالت مورد تست و آزمایش قرار گرفته است.

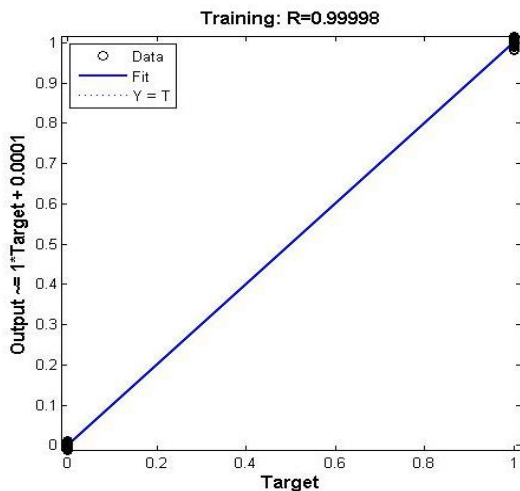
حالت‌های سالم و خطا در شکل ۸ و ۹ وجود دارد، نشان دهنده کارایی الگوی شناسایی خطای معرفی شده در این مقاله است. هرچه این تمایز بیشتر و واضح‌تر باشد، پروسه تشخیص و شناسایی خطا آسان‌تر و سریع‌تر می‌باشد. همپوشانی میان داده‌های تربیت شبکه عصبی در حالت سرعت‌های متفاوت و بارهای متفاوت در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ در دو جهت مختلف نشان داده شده است. حالت‌های مختلف خطا که در بخش ۲-۳ معرفی شده بود، در این قسمت به منظور نمایش رابطه غیرخطی میان این حالت‌ها، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. به این منظور، ابتدا تمام داده‌های تربیتی شبکه عصبی به صورت سه بعدی رسم می‌شوند. شکل ۱۰ و ۱۱ داده‌های شبکه عصبی را به صورت سه بعدی نشان می‌دهد. مطابق با رابطه غیرخطی میان داده‌ها که در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شد و همچنین با توجه به کارایی خوب شبکه عصبی در حل مسائل غیرخطی، استفاده از شبکه عصبی چندلایه برای دستیابی به هدف این مقاله قابل توجیه است.



شکل ۱۰: همپوشانی میان داده‌ها در بارهای متفاوت



شکل ۱۱: همپوشانی میان داده‌ها در سرعت‌های متفاوت



شکل ۱۵: رگرسیون به دست آمده از تربیت شبکه عصبی

خروجی و نتایج شبکه عصبی تحت شرایط متفاوت خطای اتصال باز در مبدل DC/AC خودرو الکتریکی در جدول ۱ آورده شده است. مطابق با استراتژی شناسایی خطا، ۷ خروجی برای شبکه عصبی تنظیم شده است. این خروجی‌ها را می‌توان برای شناسایی خطای اتصال باز و همچنین مسئله کنترل و ایزوله کردن خطا مورد استفاده قرار داد. نمونه خطا برای ارزیابی شبکه عصبی در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که در جدول نشان داده شده است، تمام نه حالت مورد شناسایی و تشخیص قرار گرفته است.

جدول ۱ خروجی به دست آمده از تست شبکه عصبی

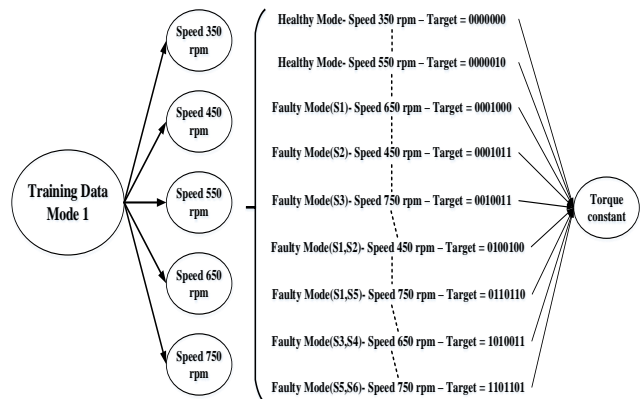
حالت خطا	سالم	S1	S2	S3	S1,2	S3,4	S1,5	S3,6
خروجی ۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱
خروجی ۲	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰
خروجی ۳	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱
خروجی ۴	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱
خروجی ۵	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰
خروجی ۶	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱
خروجی ۷	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تشخیص و شناسایی خطای اتصال باز در مبدل DC/AC یک خودرو الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. مبدل مورد استفاده از نوع اینورتر منبع ولتاژ بوده و در درایو یک موتور PMSM مورد استفاده قرار گرفته است. یک الگوی شناسایی خطای اتصال باز برای شناسایی فرکانس‌های مناسب برای تشخیص خطا در کاربرد خودرو الکتریکی معرفی شده است. کارایی الگوی شناسایی پیشنهادی در تشخیص فرکانس مناسب خطا در حالت سرعت و بار متفاوت و خطاهای تکی و چندگانه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت که نتیجه آن رضایت‌بخش بوده است.

نهایتاً از الگوریتم شبکه عصبی برای طبقه‌بندی اطلاعات خطا و شناسایی آن استفاده شده است، تمام حالات خطا با دقت بسیار خوبی

به این ترتیب شبکه عصبی دارای ۷ خروجی می‌باشد. تبدیل فوریه در شرایط مختلف کاری سیستم بر روی شکل موج جریان اعمال می‌شود و با استفاده از الگوی شناسایی خطای اتصال باز معرفی شده در این مقاله، فرکانس‌های مورد نیاز برای آنالیز سیگنال، انتخاب می‌گردد.

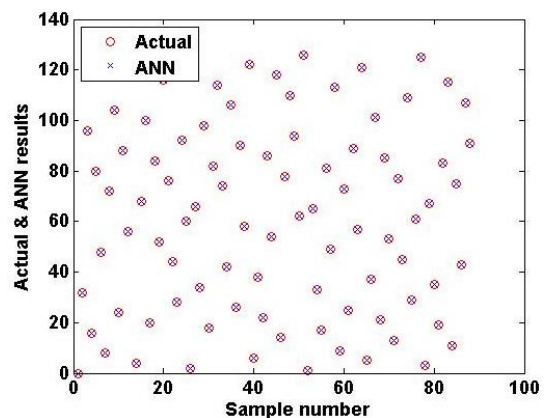


شکل ۱۳: شرایط تست سیستم و خروجی مد نظر برای هر خطا

۴-۳- تربیت شبکه عصبی

گروه‌های مختلفی که در شکل ۱۳ معرفی شده‌اند، در این بخش برای تربیت شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفته است. مجموع داده مورد بحث در این مقاله ۲۲۰ عدد می‌باشد که ۱۱۰ عدد از آن‌ها برای حالت‌های تغییر سرعت و ۱۱۰ عدد از آن‌ها برای حالت‌های تغییر بار است. خطاهای مورد بحث، از نوع خطای اتصال باز تکی و دوگانه در پایه IGBT است. ۷۵ درصد از این داده‌ها برای تربیت شبکه عصبی و ۲۵ درصد باقی‌مانده به عنوان داده‌های تست شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفته است.

بعد از استفاده از الگوی شناسایی خطا نوبت به تربیت شبکه عصبی می‌رسد. برای اطمینان از روش پیشنهادی، الگوریتم شبکه عصبی ۲۰ بار مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج به دست آمده دقت ۹۷ درصدی را به همراه داشته است. شکل ۱۴ طبقه‌بندی داده‌های تربیت شبکه عصبی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴: داده‌های تربیت شبکه عصبی

رگرسیون به دست آمده، حاصل از تربیت شبکه عصبی، در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

- [13] Milad Falahi, Hung-Ming Chou, Mehrdad Ehsani, Le Xie, and Karen L. Butler-Purry, "Potential Power Quality Benefits of Electric Vehicles", IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 4, NO. 4, OCTOBER 2013.
- [14] Omar Hegazy, Joeri Van Mierlo and Philippe Lataire, "Analysis, Control and Comparison of DC/DC Boost Converter Topologies for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Applications", 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 2011.
- [15] Mario Marchesoni, and Camillo Vacca, "New DC-DC Converter for Energy Storage System Interfacing in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles" IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.22, 08 January 2007.
- [16] Zedong Zheng, Kui Wang, Lie Xu, Yongdong Li, "A Hybrid Cascaded Multi-level Converter for Battery Energy Management Applied in Electric Vehicles", IEEE Transactions on Power Electronics, VOL.29, 2013.
- [17] Omar Hegazy, Joeri Van Mierlo and Philippe Lataire, "Modeling and Control of Interleaved Multiple-Input Power Converter for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles", International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, ACEMP), 2011.
- [18] A. Di Napoli, F. Crescimbin, F. Giulii Cappon, L. Solero, "Control Strategy for Multiple Input DC-DC Power Converters Devoted to Hybrid Vehicle Propulsion Systems", International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2002.
- [19] A. Di Napoli, F. Crescimbin, S. Rodo, L. Solero, "Multiple Input DC-DC Power Converter for Fuel-Cell Powered Hybrid Vehicles", Power Electronics Specialists Conference, PESC 2002.
- [20] A. Haddoun, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili5 and K. Srairi, "Design and Implementation of an Electric Differential for Traction Application", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010.
- [21] Bekheira Tabbache, Abdelaziz Kheloui, and Mohamed El Hachemi Benbouzid, "An Adaptive Electric Differential for Electric Vehicles Motion Stabilization", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 60, NO. 1, JANUARY 2011.
- [22] A. Haddoun, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili5 and K. Srairi, Comparative Analysis of Control Techniques for Efficiency Improvement in Electric Vehicles", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2007.
- [23] Ahmad Asri, Dahaman Ishak, Shahid Iqbal, Mohamad Kamarol, "A Speed Sensorless Field Oriented Control of Parallel- Connected Dual PMSM", IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, 2011.
- [24] Matheus Alexandre Bevilacqua, Ademir Nied, José de Oliveira, "Labview FPGA FOC Implementation for Synchronous Permanent Magnet Motor Speed Control", 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2014.
- [25] Fatih Korkmaz, smail Topalolu, M.Faruk Çakr, Rza Gürbüz, "Comparative Performance Evaluation of FOC and DTC Controlled PMSM Drives", Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013.
- [26] D. E. Rumelhart, E. Hinton, and J. Williams, "Learning internal representation by error propagation," Parallel Distributed Processing, vol. 1, 318-362, 1986.
- طبقه‌بندی و مورد شناسایی قرار گرفت. این طبقه‌بندی علاوه بر دادن اطلاعات ارزشمند از وضعیت سیستم جهت کنترل تلورانس خطا در آینده می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

سپاس‌گزاری

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین المللی انجام شده است.

مراجع

- [1] H. Wang, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Toward reliable power electronics-challenges, design tools and opportunities", IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 7, no. 2, pp. 17-26, Jun. 2013.
- [2] E. Wolfgang, "Examples for failures in power electronics systems", ECPE Tutorial on Reliability Power Electronic System, Nuremberg, Germany, Apr. 2007.
- [3] F. W. Fuchs, "Some diagnosis methods for voltage source inverters in variable speed drives with induction machines-A survey", IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference, pp. 1378-1385, Nov. 2003.
- [4] Friednch W. Fuchs, "Some Diagnosis Methods for Voltage Source Inverters in Variable Speed Drives with Induction Machines A Survey", the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2003.
- [5] Ui-Min Choi, Frede Blaabjerg, Kyo-Beum Lee, "Study and Handling Methods of Power IGBT Module Failures in Power Electronic Converter Systems", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 30, NO. 5, MAY 2015.
- [6] L.Mohammadian, E .Babaei, M.B.Bannae Sharifian, "A New Method for Modeling Bidirectional Buck-boost Converter by using a New Form of Signal Flow Graph in order to Employ in Energy Management System of an Electric Vehicle", Tabriz Journal of Electrical Eng., vol. 46, no. 2, summer 2016.
- [7] S. Saeidabadi, A. Ashraf Gandomi, S. H. Hosseini, M. Sabahi, "A New Improved Three Phase Hybrid Multilevel Inverter", Tabriz Journal of Electrical Engineering, vol. 47, no. 2, summer 2017.
- [8] Chengguang Huang, Jin Zhao, Gen Tao, and Wu Chaorong, "Data-based Inverter Multiple Fault Diagnosis for Vector Control Induction Motor Drives", 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2013.
- [9] M. Aktas V. Turkmenoglu, "Wavelet-based switching faults detection in direct torque control induction motor drives", IET Science, Measurement & Technology Volume: 4, Issue: 6, November 2010.
- [10] Chengguang Huang , Jin Zhao , Chaorong Wu, "Data-based inverter IGBT open-circuit fault diagnosis in vector control induction motor drives", IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013.
- [11] Tianzhen Wang , Jie Qi , Hao Xu , Yide Wang , Lei Liu , Diju Gao, "Fault diagnosis method based on FFT-RPCA-SVM for Cascaded-Multilevel Inverter", ISA Transactions, Volume 60, Pages 156-163, January 2016.
- [12] Sherif M. Dabour, Mahmoud I. Masoud, "Open-Circuit Fault Detection of Five-Phase Voltage Source Inverters", 8th IEEE GCC Conference and Exhibition, Muscat, Oman, 1-4 February, 2015.

زیر نویس ها

1. Insulated Gate Bipolar Transistor
2. Voltage Source Inverter
3. Direct Torque Control
4. Support Vector Machine
5. Fast Fourier Transform
6. Relative Principal Component Analysis
7. Space Vector pulse width modulation
8. Permanent Magnet Synchronous Motor
9. Field Oriented Control