Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 126-138

Vol. 11/ No. 1/ Spring 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of DFIG Back-To-Back Converter Switch Open-Circuit Based on a New SVM Common-Leg Method with the Application of a Wind Turbine

Mehrnoosh Kamarzarrin[1], Ph.D. Student, Mohammad Hossein Refan[2], Professor, Parviz Amiri[3], Associate Professor
1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran- Iran
-kamarzarrin.mehrnoosh@sru.ac.ir
2- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran- Iran
-refan@sru.ac.ir
3- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran- Iran
-amiri@sru.ac.ir

Abstract:

One of the most common types of wind turbines (WTs) is the Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) with a back-to-back converter. The power converter with an Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) switch is essential equipment for power regulation and grid connection in WTs. The converter IGBT open-circuit causes a drawback in output current and as a result, the production performance of the turbine is reduced. Condition Monitoring (CM), Fault Diagnostic (FD), and Fault-Tolerant Control (FTC) of a WT increase the reliability and availability of the turbine and are typical methods to reduce energy production costs and WT downtime. The IGBT switch's open-circuit failure rate is significant compared to the overall fault rate in WTs. This paper discusses IGBT open-circuit FTC in back-to-back DFIG converters. In the proposed structure, the converter switch fault is first diagnosed using a fast and numerical method. In the first part, a method based on normalized phase currents, the absolute of the phase currents, and an adaptive threshold is used. The FTC system can be divided into two classes of redundancy and non-redundancy or into active and inactive classes. In this article, the proposed method is active and non-redundancy. In the second step, the FTC process is activated to compensate for the system degradation. In this method, the faulty leg is removed with the gate opening of both IGBTs in one leg by the controller, and one of the legs is positioned as a common leg between the two grid side and rotor side converters. The conventional method in this structure is to use Pulse Width Modulation (PWM) with a zero sequence signal. The novelty of the paper is the use of the proposed SVM vector control. The proposed structure is inexpensive. Furthermore, the fault diagnostic structure operates without additional sensors and the FTC structure operates with minimal hardware. To evaluate the proposed structure, a 2.5 MW turbine software simulator based on real data is used. The simulations show that the proposed method is effective and robust in FD and FTC and that the proposed method is successful in detecting multiple defects of the grid-side and rotor-side converters, as well as the defects of one leg. The proposed method can compensate for the open switch fault to construct three-phase output currents by comparing the numerical parameters. The ability of the proposed method is specified.

Keywords: Wind Turbine, DFIG, Fault Detection, Fault Tolerant Control, Back-to-Back Converter, Non-Redundant Topology.

Submit date: 2021/05/09
Accepted date: 2022/01/02
Corresponding author Name: Mohammad Hossein refan
Corresponding author address: Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran-Iran.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۱۳۸- ۱۲۶

Vol. 11 / No. 1/ Spring 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

تشخیص عیب و کنترل تحمل پذیر خطای مدار باز سوئیچ مبدل پشت به پشت ژنراتور DFIG بر اساس روش جدید ساق مشترک SVM با کاربرد توربین بادی

مهرنوش کمرزرین[۱]، دانشجوی دکتری، محمد حسین رفان[۲]، استاد، پرویز امیری[۳]، دانشیار

نوع مطالعه: پژوهشی

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران
– kamarzarrin.mehrnoosh@sru.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران
– refan@sru.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران
– amiri@sru.ac.ir

چکیده: پایش وضعیت، عیب‌یابی و کنترل تحمل‌پذیر خطای توربین بادی موجب افزایش قابلیت اطمینان و در دسترس بودن توربین می‌شود. نرخ عیب مدار باز سوئیچ IGBT مبدل در مقایسه با نرخ کل عیوب در توربین بادی قابل توجه است. در این مقاله به کنترل تحمل‌پذیر خطای مدار باز IGBT در مبدل‌های پشت به پشت ژنراتور DFIG پرداخته شده است. در ساختار پیشنهادی ابتدا تشخیص عیب سوئیچ مبدل با استفاده از یک روش سریع و عددی انجام می‌شود و سپس کنترل تحمل‌پذیر خطا به منظور جبران سازی نقصان پیش آمده فعال می‌شود، در این روش ساق معیوب با باز شدن گیت هر دو IGBT در یک ساق توسط کنترل‌کننده، کنار رفته و یکی از ساق‌ها به عنوان ساق مشترک بین دو مبدل سمت شبکه و سمت روتور قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از روش کنترل برداری پیشنهادی، کنترل کانورتر انجام می‌گیرد. ساختار پیشنهادی ارزان قیمت است و کنترل تحمل پذیر خطا در آن با حداقل سخت‌افزار اضافه عمل می‌کند. برای ارزیابی ساختار پیشنهادی از یک شبیه‌ساز نرم‌افزاری توربین ۲/۵ مگاوات بر اساس داده واقعی، استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که روش پیشنهادی در تشخیص عیوب، موثر و مقاوم است و به خوبی توانسته است جبران‌سازی خطای سوئیچ را برای ساختن جریان‌های سه فاز خروجی انجام دهد، مقایسه شاخص‌های عددی، توانایی روش پیشنهادی را مشخص کرده است.

واژه های کلیدی: توربین بادی، DFIG، تشخیص عیب، کنترل تحمل‌پذیر خطا، مبدل پشت به پشت، توپولوژی بدون افزونه.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۰/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول : محمد حسین رفان

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران، لویزان، دانشگاه شهید رجائی، دانشگاه مهندسی برق

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]

۱- مقدمه

در کاربردهای توربین بادی بهبود عملکرد، افزایش کارایی و قابلیت اطمینان دارای اهمیت زیادی است. از مهم‌ترین راهبردهای این حوزه، تشخیص[۱] و شناسایی خطا[۲] در کمترین زمان و کنترل تحمل‌پذیر[۳] آن به منظور به حداقل رساندن تخریب سامانه و جلوگیری از خاموشی‌های طولانی است. یکی از اصلی‌ترین بخش‌های یک توربین بادی که وظیفه تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را بر عهده دارد ژنراتور و بسته به نوع آن، مبدل است. مطلوب این است که در هنگام وقوع خطا و بعد از آن، توربین بادی همچنان به شبکه متصل باشد و به طور موثری به پایداری سامانه کمک و از نوسان توان خروجی جلوگیری کند. در مزارع بادی به سبب تنظیم توان راکتیو، بهبود کیفیت توان و ...، تعداد زیادی از توربین‌های بادی دارای ژنراتور دو سو تغذیه هستنند. این ژنراتورها از یک مبدل دو سویه استفاده می‌کنند که شامل دو درایو قدرت است، یک درایو به شبکه و استاتور ژنراتور متصل است و درایو دیگر به سیم پیچ روتور متصل است (Hemanth Kumar, Saravanan, Sanjeevikumar, & Blaabjerg, 2018).

نرخ عیوب مبدل توان در توربین بادی زیاد است، در مبدل‌های توان نزدیک به ۳۵ درصد عیوب به واسطه سوئیچ‌های IGBT است. این عیوب اغلب به واسطه استرس‌های مکانیکی، خطا در مدار کنترل گیت، استرس حرارتی، قطع سیم و مشکلات جریانی است (Göksu, Altin, Fortmann, & Sørensen, 2016). دو عیب در بخش مبدل توربین بادی مطرح است، خطای اتصال باز و اتصال کوتاه سوئیچ. عیب اتصال کوتاه توسط سامانه حفاظت توربین بادی کنترل می‌شود و توربین بادی خاموش می‌گردد. اما عیب اتصال باز IGBT مبدل توربین بادی باعث از کار افتادن توربین بادی نمی‌شود بلکه در شرایط عملکردی توربین بادی از جمله کیفیت توان، به هم زدن تعادل و بالانس بین فازها تاثیرگذار است (Olimpo, Jenkins, Ekanayake, Cartwright, & Hughes, 2011).

تشخیص سریع این عیب سوئیچ و رفع آن موجب افزایش در دسترس پذیری توربین بادی خواهد شد. در سال‌های اخیر روش‌های مختلف در خصوص آشکارسازی عیب مدار باز سوئیچ ارائه شده است، هر چند برخی از این روش‌ها بسیار دقیق هستند اما در خصوص مبدل توربین بادی، سرعت تشخیص عیب و امکان پیاده‌سازی در سامانه کنترل برای جبران‌سازی خطا اهمیت زیادی دارد. چنین روشی باید ساده باشد و دچار هشدار اشتباه نشود. نیاز به سخت‌افزار و سنسور اضافه نداشته باشد، مقاوم، ارزان قیمت و سریع باشد. در این مقاله عیب مورد مطالعه از مبدل توربین بادی مدار باز سوئیچ IGBT است. روش‌های تشخیص عیب در خصوص مبدل‌های الکترونیک قدرت با کاربرد توربین باد در مقالات بسیاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در مقاله (Freire, Estima, & Cardoso, 2012) برای مبدل ژنراتور PMSG دو روش مجزا برای تشخیص مکان عیب و عیب‌یابی سمت ژنراتور و سمت شبکه به کار گرفته شده است. مدل عیب‌یابی بر اساس فاز بردار پارک است که دارای پیچیدگی تنظیمات و محاسبات بالا و زمان پردازش بالا است و مکان عیب در سمت شبکه بر اساس قطبیت[۴] جریان تعیین می‌شود که این روش نیز در جریان‌های ضعیف اثر بخشی‌اش کاهش می‌یابد، در حالی‌که در سمت ژنراتور بر اساس مقادیر میانگین جریان نرمالیزه شده[۵] است. از یک روش بلادرنگ مبتنی بر بردار پارک برای تشخیص عیب مدار باز و مکان سوئیچ معیوب در مبدل AC/DC استفاده شده است (Das & Kim, Real-Time Multiple Open-Switch Fault Diagnosis in Three-phase AC/DC PWM Converter for PMSG Based Grid-Connected Wind Power Generation System, 2014). ژنراتور مربوطه از نوع PMSG بوده و از RMS جریان نرمالیزه شده برای عیب‌یابی و تشخیص استفاده شده است. بر اساس همین ساختار، ولی با دریافت ولتاژ لینک DC، عیب‌یابی و تشخیص سوئیچ مدار باز مبدل توربین بادی با ژنراتور PMSG در (Das & Kim, Voltage-based On-Line Fault Detection and Faulty Switch Identification under Multiple Open-Switches in Grid-Connected Wind Power Converter, 2014) ارائه شده است، این روش نیز در جریان-های ضعیف دارای اثر بخشی کمی است. در (Jlassi, Estima, El Khil, Bellaaj, & Cardoso, 2014)، یک روش بر اساس مشاهده‌گر برای آشکارسازی و میانگین جریان برای مکان‌یابی عیب مدار باز سوئیچ مطرح شده است، در روش‌های مبتنی بر مشاهده‌گر دقت مدل موثر خواهد بود. در مقاله (Keyuan, Jingjia, & Shoudao, 2015)، روشی بر اساس شیب زاویه فاز[۶] بردار پارک جریان سه فاز ژنراتور PMSG ارائه شده است. این روش دارای دشواری در تنظیمات، وابستگی آستانه‌ها به سیگنال‌ها، زمان پردازش بالا است و در جریان-های کم اثر بخش خود را از دست می‌دهد. برای مبدل پشت به پشت DFIG ۴ سوئیچه روش‌هایی برای عیب سوئیچ مطرح شده است که این روش‌ها بر اساس بازیابی ساختار[۷] هستند (Sae-Kok, Grant, & Williams, System reconfiguration under open-switch faults in a doubly fed induction machine, 2010). یک روش مبتنی بر FPGA و سریع، برای تشخیص عیب سوئیچ مبدل پشت به پشت بر اساس دو معیار ولتاژ و زمان ارائه شده است (Karimi, Gaillard, Poure, & Saadate, 2008). در مبدل مربوط به DFIG و در بالاتر از سرعت همزمان مشکل هشدار اشتباه مشهود خواهد بود که در مرجع (Sae-Kok, Converter fault diagnosis and post fault operation of a doubly-fed induction generator for a wind turbine, 2008) این مشکل با استفاده از اندازه‌گیری جریان DC نرمالیزه شده مطلق[۸] حل شده است هرچند همچنان مساله پیچیدگی محاسباتی و زمان پردازش در این روش وجود دارد. یک روش بر اساس بردار پارک نرمالیزه قدر مطلق جریان[۹] ارائه شده است و تشخیص را در ناحیه سنکرون تضمین می‌کند (Zhao & Cheng, Open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of DF wind turbine, 2017). در (You & Zhang, 2012)، یک روش بر اساس شبکه عصبی ارائه شده است که مشکل زمان آموزش بالا دارد. در مرجع (Duan, Xie, Zhang, & Rong, 2010)، روش

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]

جریان DC نرمالیزه شده مطلق، گسترش و بهبود داده شده است. مقاله (Shahbazi, Poure, Saadate, & Zolghadri, FPGA-based fast detection with reduced sensor count for a fault-tolerant three-phase converter, 2012) (Shahbazi, Poure, Saadate, & Zolghadri, FPGA-based reconfigurable control for fault-tolerant back-to-back converter without redundancy, 2013) بر اساس FPGA و برای FT با افزودن دو سوئیچ است. وجود دو IGBT افزونه هزینه‌ی روش را افزایش می‌دهد. پیکربندی کنترل تحمل‌پذیر خطا برای مبدل‌های الکترونیک-قدرت مختلف در (Campos-Delgado, Espinoza-Trejo, & Palacios, 2003) (Jacobina, de Araujo Ribeiro, Lima, & da Silva, 2008) مرور شده است. برای مبدل چند سطحه و ماتریسی، راهبرد کنترل تحمل‌پذیر خطا به ترتیب در (Meradi, Benmansour, Herizi, Tadjine, & Boucherit, 2013) و (Edorta, et al., 2011) معرفی شده است. روش‌های ارائه شده برای مبدل‌های چند سطحی با پیچیدگی زیاد و هزینه بیشتر است. در (Sae-Kok, Grant, & Williams, System reconfiguration under open-switch faults in a doubly fed induction machine, 2010) و (Karimi, Poure, & Saadate, FPGA-based fully digital fast power switch fault detection and compensation for three-phase shunt active filters, 2008)، کنترل تحمل‌پذیر خطای سوئیچ مبدل سه فاز بر اساس FPGA به ترتیب بر اساس راهبرد با و بدون ساق افزونه مورد بررسی قرار گرفته است. در (Bouscayrol, Francois, Delarue, & Niirane, 2005) و برای مبدل سه فاز یک موتور القایی، راهبرد پنج ساق برای کنترل تحمل‌پذیر خطا پیشنهاد شده است.

در ساختار پیشنهادی این مقاله، جبران‌سازی خطای مدار باز سوئیچ مبدل در دو بخش اصلی انجام می‌شود، بخش اول تشخیص عیب و بخش دوم کنترل تحمل‌پذیر خطا است. در بخش اول از روشی بر اساس جریان‌های فاز نرمالیزه شده و قدر مطلق جریان فازها استفاده شده است، در روش پیشنهادی، از یک آستانه تطبیقی استفاده شده است. روش ارائه شده یک روش سریع، ساده و با قابلیت اطمینان بالا برای تشخیص عیب (آشکارسازی خطا و تعیین مکان خطا) است. بخش دوم روش کنترل تحمل‌پذیر خطا برای مبدل پشت به پشت است. سامانه کنترل تحمل‌پذیر خطا را می‌توان به دو کلاس با افزونگی و بدون افزونگی و از طرفی به دو کلاس فعال و غیر فعال تقسیم نمود. در این مقاله روش پیشنهادی فعال و بدون افزونه است. روش ارائه شده بر این اساس است که ابتدا ساق معیوب با باز شدن گیت هر دو IGBT در یک ساق توسط کنترل‌کننده، کنار رفته و یکی از ساق‌ها به عنوان ساق مشترک بین دو مبدل سمت شبکه و سمت روتور قرار می‌گیرد. این روش بر اساس راهبرد "بدون افزودن ساق افزونه" و با مزیت کم هزینه بودن است. روش متعارف در این ساختار استفاده از مدولاسیون عرض پالس[10] با سیگنال توالی صفر[11] است. نوآوری مقاله تشخیص و کنترل تحمل‌پذیر خطای مدار باز سوئیچ مبدل پشت به پشت توربین بادی بدون افزونگی و استفاده از کنترل برداری SVM[12] پیشنهادی است. سنجش و ارزیابی روش بر اساس یک شبیه‌ساز توربین بادی منطبق بر توربین بادی ۲/۵ مگاوات تاکستان-کهک متعلق به شرکت مپنا است. شبیه‌ساز مورد استفاده منطبق بر پارامترهای اجزای توربین واقعی است و بر اساس داده‌های واقعی برداشت شده از مزرعه بادی کار می‌کند.

ساختار مقاله به این صورت است؛ بخش دوم روش تشخیص، آشکارسازی و مکان‌یابی خطا بیان می‌شود. روش پیشنهادی کنترل تحمل‌پذیر خطا در بخش سوم شرح داده می‌شود. در بخش چهارم مقاله به ارائه‌ی بستر شبیه‌سازی، نتایج شبیه‌سازی و بررسی نتایج پرداخته شده است، بخش پنجم مقاله آنالیز بر اساس شاخص‌های عددی و مقایسه است و مقاله با بیان نتیجه‌گیری در بخش ششم پایان می‌یابد.

نوآوری مقاله:

- استفاده از آستانه تطبیقی در آشکارسازی خطا و تعیین مکان خطا
- کنترل تحمل‌پذیر خطای مبدل پشت به پشت توربین بادی بدون ساق افزونه
- استفاده از توپولوژی ساق مشترک در کنترل تحمل‌پذیر خطا با در نظر گرفتن کنترل برداری SVM پیشنهادی

۲- روش تشخیص عیب اتصال باز IGBT در مبدل پشت به پشت توربین بادی

هنگامی که خطای مدار باز در IGBT مبدل پشت به پشت توربین بادی رخ می‌دهد در واقع نیم سیکل سیگنال جریان مربوط به سوئیچ معیوب صفر می‌شود. در صورتی که دو سوئیچ در یک ساق مدار باز شود به صورت کلی جریان آن فاز تقریبا صفر می‌گردد. بنابراین خطای مدار باز سوئیچ IGBT بر اساس جریان هر فاز می‌تواند استخراج گردد. مقدار میانگین جریان فاز مبدل در یک دوره پس از رخدادن خطای مدار باز سوئیچ IGBT تغییر خواهد کرد. استفاده از مقدار میانگین جریان به تنهایی ممکن است منجر به تشخیص اشتباه خطا به علت وجود نوسانات و یا حالت گذرا شود. بنابراین برای غلبه بر این مساله، مقدار متوسط بر اساس بردار پارک و جریان فاز نرمالیزه شده بدست می‌آید. بردار پارک به صورت زیر تعریف می‌شود (Zhao & Cheng, Open-Switch Fault-Diagnostic Method for Back-to-Back Converters of a Doubly Fed Wind Power Generation System, 2018):

$$i_\alpha = \sqrt{2/3}\, i_a - 1/\sqrt{6}\, i_b - 1/\sqrt{6}\, i_c \quad (۱)$$

$$i_\beta = 1/\sqrt{2}\, i_b - 1/\sqrt{2}\, i_c \quad (۲)$$

$$\|i_s\| = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (۳)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]

که i_α و i_β اجزا بردارهای پارک، $\|i_s\|$ بردار پارک است. i_a، i_b و i_c جریان‌های سه فاز مبدل است. جریان نرمالیزه شده هر فاز بـه صـورت زیر خواهد بود:

$$i_{mN}=i_m/\|i_s\| \quad (۴)$$

که m اشاره به سه فاز a، b و c دارد. در شرایط نرمال شکل مـوج جریان (i_m) سینوسی با دامنه I_m است. $\|i_s\|=\sqrt{1.5}\,\mathrm{I_m}$ و i_{mN} به صـورت زیر خواهد بود:

$$i_{mN}=i_m/\|i_s\|=\sqrt{1.5}\sin(\omega t+\varphi) \quad (۵)$$

همچنین مقدار متوسط جریان نرمالیزه شده به صورت زیر خواهد بود:

$$\bar{i}_{mN}=\frac{1}{N}\sum_{j=k-N+1}^{k} i_{mN}(j) \quad (۶)$$

در یک دوره‌ی زمانی، وقتی N به سمت بینهایت میل کنـد، ایـن معادله به صورت انتگرال زیر خواهد بود:

$$\bar{i}_{mN}=\frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega} i_{mN}\,dt=0 \quad (۷)$$

$$\overline{|i_{mN}|}=\frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega} |i_{mN}|\,dt=\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{8}{3}}\approx 0.5 \quad (۸)$$

در شرایط نرمال $\bar{i}_{mN}$ برابر با صفر و $\overline{|i_{mN}|}$ تقریبـا برابـر بـا ۰/۵ خواهد بود. در شرایطی که خطای مدار باز رخ دهد، نیمـی از دامنـه‌ی جریان نزدیک به صفر خواهد شد در نتیجه این مقدار تغییر می‌کند. بـا تعریف ξ_m به صورت زیر می‌توان زمینه را برای تشـخیص خطـا ایجـاد کرد.

$$\xi_m=\bar{i}_m/|\bar{i}_m| \quad (۹)$$

در شرایط نرمال، $\bar{i}_m$ برابر صفر و در نتیجه ξ_m صفر خواهد بـود. اما با اتفاق افتادن خطا مـدار بـاز سـوئیچ نیمـی از دوره تنـاوب دارای دامنه‌ی نزدیک صفر و در نتیجه ξ_m یک و یا منفی یک خواهد شد.

در نهایت متغیر تشخیص خطا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_m=\bar{i}_{mN}.|\xi_m| \quad (۱۰)$$

این مقدار در شرایط نرمال صفر است. در صورت بروز خطای مدار باز با توجه به اینکه ξ_m یک و یا منفی یک است، متغیر تشخیص خطـا $\bar{i}_{mN}$ خواهد شد. بنابراین متغیر D_m تمام مشخصات $\bar{i}_{mN}$ فاز معیـوب را خواهد داشت. متغیر ξ_m فاز بدون عیب به بازه (۱و۰) یا (۰و۱-) تعلق دارد و متغیر D_m متناظر با آن کمتر از $\bar{i}_{mN}$ خواهد بود. سطح آسـتانه در شرایط نرمال برابر بـا $|\bar{i}_{mN}|$ و مقـداری برابـر بـا ۰/۵ دارد. بـا بـروز خطای مدار باز متغیر D_m افزایش می‌یابد. از آنجـایی کـه نیمـه پریـود دامنه‌ی جریان متناظر با سوئیچ معیوب نزدیک به صـفر اسـت، متغیـر $|\bar{i}_{mN}|$ مربوط به فاز معیوب کوچک‌تر شده و $|\bar{i}_{mN}|$ مربـوط بـه فازهـای سالم بزرگتر می‌شود. وقتی دو سوئیچ در یک ساق به صـورت همزمـان دچار خطا می‌شوند جریان آن فاز در یک دوره کامل تقریبا نزدیک بـه صفر می‌شود و $|\bar{i}_{mN}|$ مربوط به این فاز نزدیک به صـفر مـی‌شـود. بـه همین علت متغیر $|\bar{i}_{mN}|$ در تعیین مقـدار سـطح آسـتانه مـوثر اسـت و سطح آستانه به صورت $|\bar{i}_{mN}|-\xi$ تعریف می‌شود. متغیر ξ یـک ثابـت بزرگتر از صفر است. بر اساس آنالیز انجام شده، بهترین مقدار ξ برابر با حد وسط ۰ تا ۰/۵ است و بـه همـین علـت مقـدار ξ، ۰/۲۵ در نظـر گرفته شده است. این روش میان حساسـیت و مقـاوم بـودن تشـخیص خطا موازنه ایجاد می‌کند. با مقایسه‌ی D_m با سـطح آسـتانه، تصـمیم-گیری در خصوص تشخیص خطا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_m=\begin{cases}-1 & D_m\ge T_m\\ 0 & -T_m<D_m<T_m\\ 1 & D_m\le -T_m\\ 2 & T_m<D_m<-T_m\end{cases} \quad (۱۱)$$

که F_m نشانه خطا است و بر اسـاس آن خطـای مـدار بـاز مبـدل تشخیص داده می‌شود. "صفر" به معنای عدم وجود خطا، "۱" و "۱-" به معنای وجود خطا در سوئیچ بالا و پایین فاز m، "۲" نشان دهنده‌ی وجود خطا در هر دو سوئیچ است. شـکل (۱) سـاختار روش تشـخیص خطا را نشان می‌دهد. جدول (۱) راهنمـای تشـخیص خطـا در مبـدل پشت به پشت را نشان می‌دهد. این جدول یک بار برای مبـدل سـمت شبکه و بار دیگر برای مبدل سمت روتور تکرار می‌شود.

جدول (۱): راهنمای تشخیص خطا در مبدل‌های سمت شبکه و سمت روتور

سوئیچ معیوب	F_a	F_b	F_c	سوئیچ معیوب	F_a	F_b	F_c
S_1	1	0	0	S1, S2	1	1	-1
S_6	0	0	-1	S1, S3	1	-1	1
S_2	0	1	0	S5, S6	1	-1	-1
S_4	-1	0	0	S4, S5	-1	-1	1
S_3	0	0	1	S3, S5	0	-1	1
S_5	0	-1	0	S4, S6	-1	1	-1
S_1, S_4	2	0	0	S2, S6	0	1	-1
S_3, S_6	0	0	2	S2, S4	-1	1	0
S_2, S_5	0	2	0	S3, S4	-1	0	1
S_1, S_5	1	-1	0	S2, S3	-1	1	1
S_1, S_6	1	0	-1				

۳- روش کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی مبدل پشت به پشت توربین بادی

کنترل تحمل‌پذیر خطا در مبدل‌های پشت به پشت توربین بادی شامل دو رویکرد سخت‌افزاری و نرم‌افزاری است. از آنجـایی کـه بـا مـدار بـاز شدن یک سوئیچ IGBT در واقع گیت آن سوئیچ بـاز شـده و از مـدار خارج می‌شود، از لحاظ سخت‌افزاری تغییر ایجاد شده و نیاز به بازسازی سـخت‌افـزاری وجـود دارد. روش پیشـنهاد شـده در ایـن مقالـه بـرای توپولوژی سخت‌افزاری در حالت وجود خطا برای مبدل پشت به پشـت توربین بادی مبتنی بر DFIG، توپولوژی پنج سـاق بـا سـاق مشـترک است. این روش دارای حداقل تعداد تریاک است و در صورت بروز خطا در ساق هر سمت از مبدل پشت به پشـت (سـمت روتـور و یـا سـمت شبکه) امکان بازیابی برای آن وجود دارد. پس از رخداد خطـا و تغییـر توپولوژی، دیگر امکان استفاده از کنترل شش سـوئیچه وجـود نـدارد،

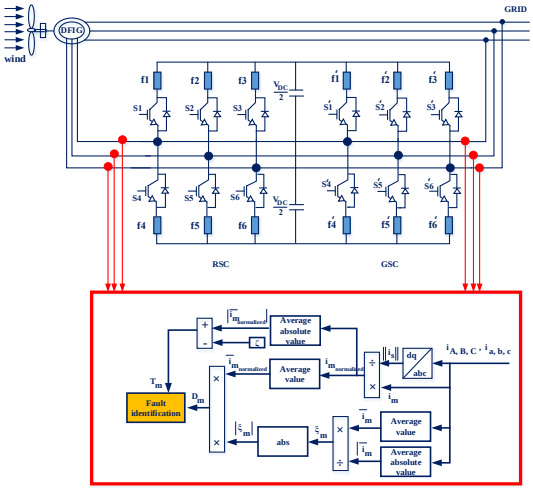
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]

بنابراین باید از تغییر رویکرد نرم‌افزاری نیز بهره برد. به منظور کنترل توان کانورتر DFIG از روش کنترل برداری استفاده شده است. در این مقاله با توجه به رخداد خطا در یک سوئیچ و از بین رفتن کارایی یک ساق و تغییر توپولوژی سخت‌افزاری به پنج ساق، به ارائه‌ی کنترل SVM پنج سوئیچه به منظور کنترل تحمل‌پذیر خطای مبدل پشت به پشت با یک ساق مشترک پرداخته شده است. روش کنترلی SVM با توجه به اینکه مناسب‌ترین بردار را انتخاب می‌کند خروجی دقیق‌تری نسبت به روش‌های دیگر مانند PWM خواهد داشت.

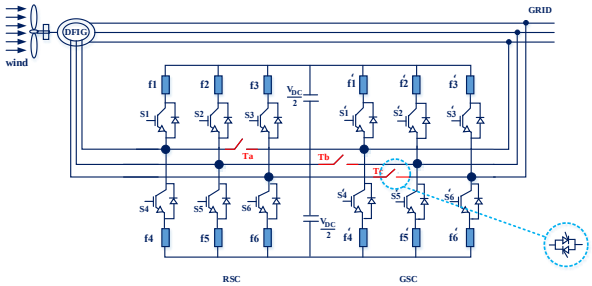
۳-۱- توپولوژی سخت‌افزاری

توپولوژی سخت افزاری پیشنهادی در این مقاله بر اساس روش پنج ساق است. توپولوژی پیشنهادی به صورت شکل (۲) ارائه شده است که در آن از سه تریاک T_a، T_b و T_c استفاده شده است. در این ساختار به جای سه تریاک T_a، T_b و T_c می‌توان از یک تریاک استفاده نمود اما با توجه به جریان‌کشی، تلفات و گرمای تولید شده سه تریاک استفاده می‌گردد.



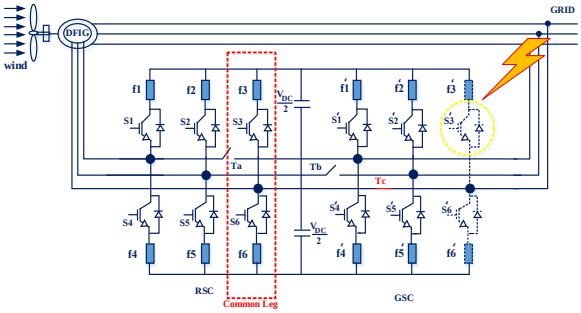
شکل (۱): دیاگرام تشخیص خطای مدار باز سوئیچ IGBT در مبدل پشت به پشت برای ژنراتور DFIG

در صورت بروز خطا و تشخیص مکان آن توسط سامانه FDI، گیت مربوط به هر دو IGBT آن ساق توسط کنترل‌کننده، صفر شده و تریاک مربوطه روشن می‌شود. به عنوان مثال در شکل (۲)، IGBT $S_3^{'}$ مدار باز شده و ساق ششم حذف می‌شود. تریاک T_c روشن شده و در نهایت به صورت شکل (۳) خواهد شد.



شکل (۲): توپولوژی پیشنهادی کنترل تحمل‌پذیر خطای مدار باز در مبدل پشت به پشت در توربین بادی مبتنی بر DFIG

در این حالت مبدل به صورت پنج ساق حاصل شده و کنترل پنج ساق به آن اعمال می‌شود. ساق سوم، ساق مشترک خواهد شد.



شکل (۳): ساختار کنترل تحمل‌پذیر خطای مدار باز در مبدل پشت به پشت در توربین بادی مبتنی بر DFIG در بروز اولین خطا

روش کنترلی توپولوژی نرم‌افزاری

روش پیشنهادی این مقاله به منظور تولید سیگنال‌های گیت IGBT استفاده از کنترل برداری SVM اصلاح شده است. در روش SVM اصلاح شده پیشنهادی با توجه به اینکه پس از رخدادن خطای اول در هر کدام از دو مبدل، بر اساس توپولوژی پنج ساق یکی از ساق‌ها به عنوان ساق مشترک در نظر گرفته می‌شود، نیاز است SVM برای پنج ساق طراحی شود. اگر ساختار مبدل پس از رخدادن خطا و فعال شدن کنترل تحمل‌پذیر خطا به صورت شکل (۲) گردد و ساق مربوط به فاز c به عنوان ساق مشترک در نظر گرفته شود، عملکرد سوئیچ‌ها به صورت جدول (۲) خواهد شد. در SVM پنج ساق، ۳۲ بردار وجود خواهد داشت.

جدول (۲): وضعیت سوئیچ‌ها در روش کنترلی SVM پنج ساق

ساق اول			ساق دوم			ساق سوم			
V_{aN}	S_4	S_1	V_{bN}	S_5	S_2	V_{cN}	S_6	S_3	
V_{DC}	Off	On	V_{DC}	Off	On	V_{DC}	Off	On	P
0	On	Off	0	On	Off	0	On	Off	O

ساق چهارم			ساق پنجم			
V_{AN}	$S_4^{'}$	$S_1^{'}$	V_{BN}	$S_5^{'}$	$S_2^{'}$	
V_{DC}	Off	On	V_{DC}	Off	On	P
0	On	Off	0	On	Off	O

بر اساس حالت‌های ممکن در مبدل پنج ساق، اندازه‌ی بردارها محاسبه می‌گردد. با رسم اندازه‌ی این ۳۲ بردار، ۳۰ سکتور خواهیم داشت که به صورت شکل (۴) خواهد بود. به منظور استفاده از این مدولاسیون، پس از محاسبه‌ی اندازه و زاویه‌ی ولتاژ مرجع، تعیین می‌شود که ولتاژ مرجع در کدام سکتور قرار دارد. تعیین شدن شماره سکتور مشخص می‌کند که از کدام بردارها برای تعیین سوئیچ‌زنی استفاده شود. پس از تعیین بردارها مساله‌ی زمان مورد نیاز برای روشن شدن هر بردار است. با در نظر گرفتن سکتور اول مطابق با شکل (۵) محاسبه‌های مربوط به زمان‌های هر بردار به صورت زیر خواهد بود.

زمان کل مربوط به بردارهای a و b به صورت زیر است:

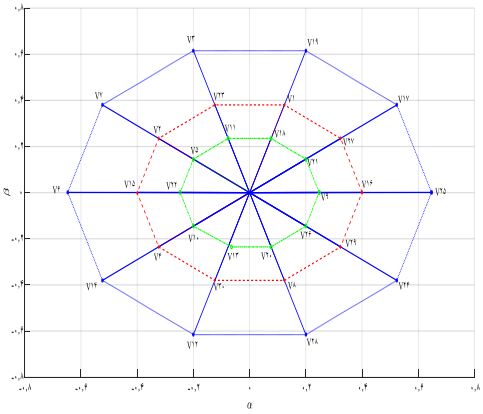
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]

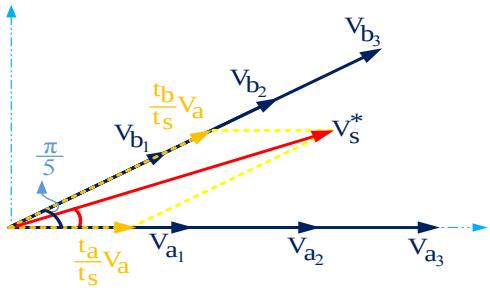
$$t_a = |v_s^*|\sin\left(\frac{\pi}{5}-\alpha\right)\Big/|v_{a3}|\sin\left(\frac{\pi}{5}\right) \quad (۱۲)$$

$$t_b = |v_s^*|\sin\left(\alpha-\frac{\pi}{5}\right)\Big/|v_{b3}|\sin\left(\frac{\pi}{5}\right) \quad (۱۳)$$

که در آن $|v_{a3}|=|v_{b3}|=0.4V_{DC}\left(2\cos\frac{\pi}{5}\right)=0.6155$ است.



شکل (۴): نمایش ۳۲ بردار مشخص شده در حوزه αβ



شکل (۵): نمودار برداری سکتور اول

همچنین متناظر با هر یک از بردارهای v_{a1}، v_{a2}، v_{a3}، v_{b1}، v_{b2} و v_{b3} زمان‌های t_{a1}، t_{a2}، t_{a3}، t_{b1}، t_{b2} و t_{b3} به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$t_{a1} = t_a\left(v_{a1}/\left(v_{a3}+v_{a2}+v_{a1}\right)\right) \quad (۱۴)$$

$$t_{a2} = t_a\left(v_{a2}/\left(v_{a3}+v_{a2}+v_{a1}\right)\right) \quad (۱۵)$$

$$t_{a3} = t_a\left(v_{a3}/\left(v_{a3}+v_{a2}+v_{a1}\right)\right) \quad (۱۶)$$

$$t_{b1} = t_b\left(v_{b1}/\left(v_{b3}+v_{b2}+v_{b1}\right)\right) \quad (۱۷)$$

$$t_{b2} = t_b\left(v_{b2}/\left(v_{b3}+v_{b2}+v_{b1}\right)\right) \quad (۱۸)$$

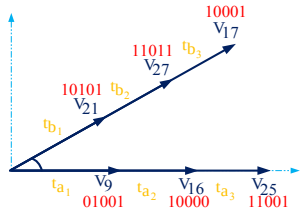
$$t_{b3} = t_b\left(v_{b3}/\left(v_{b3}+v_{b2}+v_{b1}\right)\right) \quad (۱۹)$$

همچنین مجموع زمان‌های صفر هر سکتور به صورت زیر است:

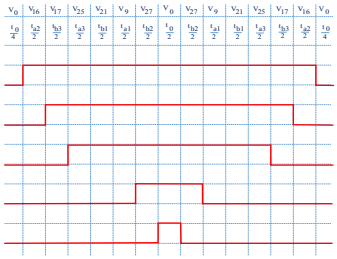
$$t_0=t_s-t_{a1}-t_{a2}-t_{a3}-t_{b1}-t_{b2}-t_{b3} \quad (۲۰)$$

زمان‌های مربوط به بردارهای v_{a1}، v_{a2}، v_{a3}، v_{b1}، v_{b2} و v_{b3} در سایر سکتورها با همین روش و با دوران به اندازه‌ی $(k)\frac{\pi}{5}, k=0,\ldots,10$ بدست می‌آید.

مطابق با شکل (۴)، سکتور اول متشکل از بردارهای V_9، V_{16}، V_{25}، V_{21}، V_{27} و V_{17} است که در شکل (۶) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن کمترین میزان تغییر در سوئیچ‌زنی بردارها، در نهایت سوئیچ‌زنی در سکتور اول به صورت شکل (۷) خواهد شد.



شکل (۶): برداری تشکیل‌دهنده‌ی سکتور اول



شکل (۷): سوئیچ‌زنی سکتور اول

شکل (۸) ساختار کلی کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهد. مطابق با این ساختار در رخداد خطا، با ورود ولتاژهای مرجع سمت روتور و سمت شبکه، پس از تشخیص خطا و تعیین ساق معیوب، الگوریتم SVM شروع به کار کرده و در نهایت پنج سیگنال به گیت‌های IGBTهای سالم اعمال می‌کند. شکل (۹) فلوچارت کنترلی مورد نظر در روش پیشنهادی مقاله است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

۴-۱- شبیه‌ساز ارزیابی

به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی روش تشخیص خطا و کنترل تحمل-پذیر خطای پیشنهادی و همچنین شبیه‌سازی عیب مدار باز سوئیچ IGBT در مبدل پشت به پشت از یک شبیه‌ساز توربین بادی در محیط نرم‌افزاری SIMULINK/MATLAB استفاده شده است.

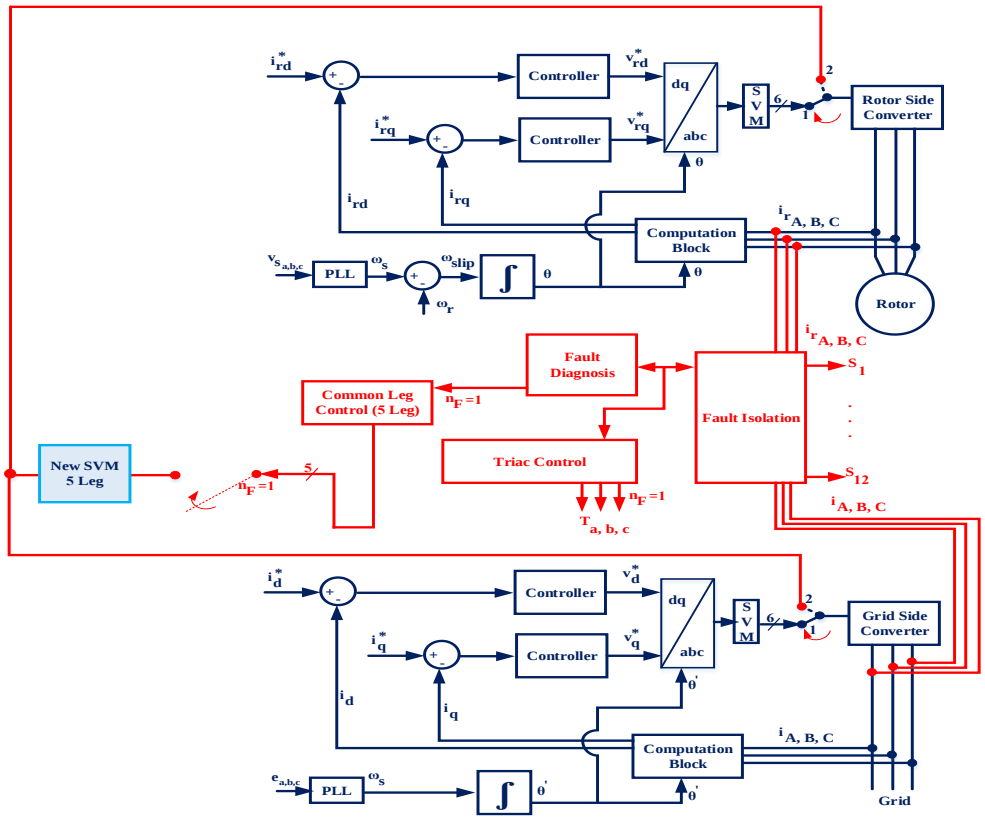
داده ورودی بر اساس اطلاعات واقعی توربین بادی ۲/۵ مگاوات سایت بادی کهک-تاکستان قزوین متعلق به شرکت مپنا است. جدول (۳) خلاصه‌ای از پارامترهای استفاده شده در این شبیه‌ساز توربین بادی را نشان می‌دهد.

در این شبیه‌ساز یک استراتژی کنترل برداری برای مبدل پشت به پشت استفاده شده است و فرض شده است که همه‌ی دیودهای موازی و معکوس ایده‌آل کار می‌کنند. شبیه‌سازی عیب مدار باز IGBT با باز کردن سیگنال کنترل گیت انجام می‌شود. شکل (۱۰)، جریان‌های سه فاز سمت شبکه و سمت روتور هنگامی که هیچ خطای مدار بازی وجود ندارد، نشان می‌دهد.

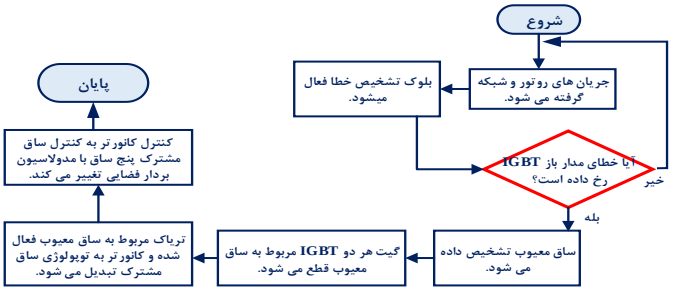
در شکل (۱۱) و (۱۲) به ترتیب سیمولینک مورد نظر برای اتصال باز و سیگنال نمونه‌ی ورودی به گیت IGBTها در مبدل سمت شبکه نشان داده شده است. در این مقاله از یک کلید دستی برای اعمال اتصال باز استفاده شده است. شکل‌های (۱۳)، (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) نمودارهای جریان، متغیر و پرچم تشخیص خطا در مبدل‌های سمت شبکه و روتور بر اساس رخدادن عیب مدار باز در سوئیچ‌های مختلف را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

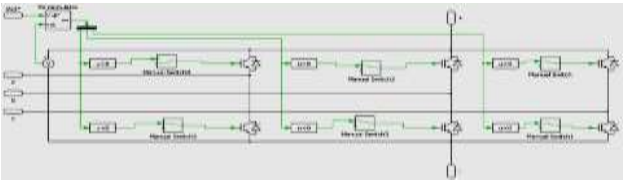
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]



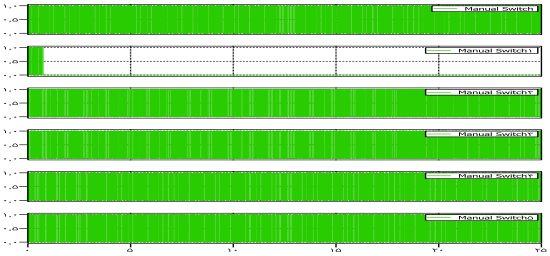
شکل (۸): الگوریتم کلی کنترلی پیشنهادی



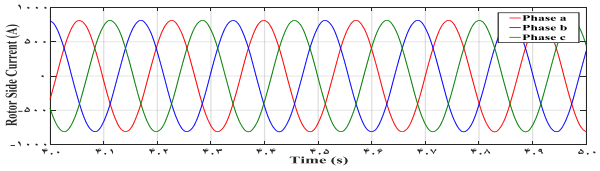
شکل (۹): فلوچارت کنترلی مورد نظر در روش پیشنهادی



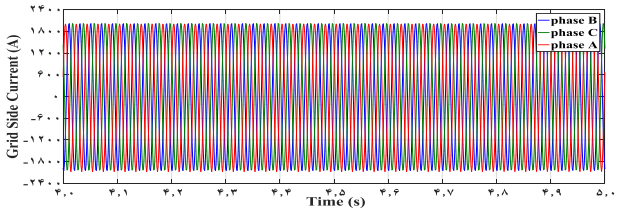
شکل (۱۱): نمونه تست برای مدار باز کردن سوئیچ



شکل (۱۲): نمونه‌ی سیگنال ورودی به گیت IGBTها در مبدل سمت شبکه



الف



ب

شکل (۱۰): جریان سه فاز بدون رخداد خطا. الف: سمت شبکه، ب: سمت روتور

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

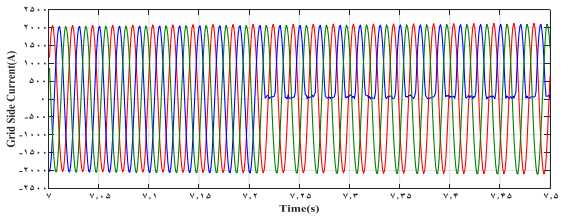
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]

جدول (۳): پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی توربین بادی مورد استفاده مطابق با توربین بادی ۲/۵ مگاواتی شرکت مپنا

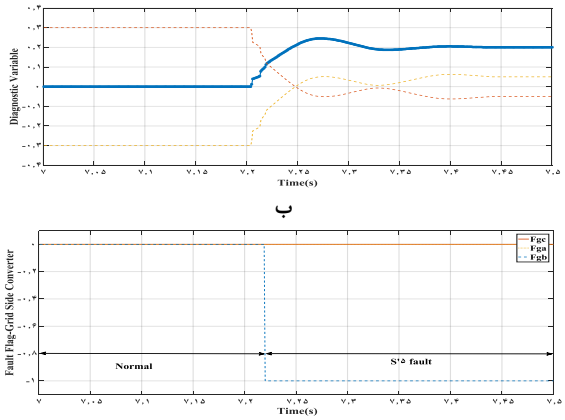
ژنراتور DFIG		توربین باد	
توان نامی	۲/۵ مگاوات	سرعت باد	۱۱/۴۳ متر بر ثانیه
تعداد قطب‌ها	سه جفت	ضریب توان	۰/۴۳
سرعت (۵۰ هرتز)	۱۳۱۰-۷۵۰ دور بر دقیقه	چگالی هوا	۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب
ولتاژ نامی استاتور	۶۹۰ ولت	شعاع پره	۵۳ متر
مقاومت القایی	۰/۰۰۱۴ اهم	نسبت سرعت نوک	۹
فرکانس نامی	۵۰ هرتز	مساحت جاروب شده توسط پره	۸۴۹۵ متر مربع
مقاومت استاتور	۰/۰۰۱۴ اهم	شروع تولید	۳/۵ متر بر ثانیه
مقاومت روتور	۰/۰۰۱۴ اهم	پایان تولید	۲۵ متر بر ثانیه
اندوکتانس نشتی استاتور	9.8e-5H	گیربکس	سه طبقه با ۷۹/۶: ۱
اندوکتانس نشتی روتور	8.6e-5H	مبدل پشت به پشت	
اندوکتانس مغناطیسی	۰/۰۰۱۶۹ هانری	فرکانس سوئیچینگ روتور	۲/۵ کیلو هرتز
نسبت تبدیل استاتور/روتور	۰/۳	فرکانس سوئیچینگ استاتور	۳ کیلوهرتز
مقاومت خط	۰/۰۰۰۱ اهم	خازن لینک DC/ ولتاژ لینک DC	۲۲ میلی فاراد/۱۱۰۰ ولت

در شکل (۱۳) خطای مدار باز در سوئیچ پایین فاز B در مبدل سمت شبکه (S_5') در ثانیه t=7.205 رخ داده است. مطابق با شکل (۱۳-الف) ملاحظه می‌گردد با خاموش شدن این سوئیچ، نیم سیکل منفی جریان فاز B صفر می‌شود. مطابق با شکل (۱۳-ب) و (۱۳-ج) که متغیر تشخیص خطا و پرچم تشخیص خطای متناسب با آن است ملاحظه می‌گردد خطا در t=7.219 تشخیص داده شده است. در حالت سالم، D_{ra} نباید از حد بین $T_{r,g}$ و $-T_{r,g}$ تجاوز کند. $D_{ra,ga}$، $D_{rb,gb}$ و $D_{rc,gc}$ همیشه تا زمانی که خطایی رخ ندهد نزدیک به صفر هستند.

مطابق با روش تشخیص خطای شرح داده شده و مطابق با جدول (۱)، در شکل (۱۴)، رخداد خطا در دو سوئیچ، در مبدل سمت شبکه نشان داده شده است. در این شکل، ابتدا سوئیچ بالایی فاز A (S_1') در زمان t=7.103 و پس از آن سوئیچ پایین فاز C (S_6') در t=7.375 مدار باز شده و اثر آن بر روی جریان مبدل سمت شبکه نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد با مدار باز شدن سوئیچ بالای فاز A نیم-سیکل مثبت جریان این فاز صفر شده و همچنین با مدار باز شدن سوئیچ پایین فاز C نیم سیکل منفی جریان این فاز صفر شده است. مطابق با شکل (۱۴-ب) و (۱۴-ج) ملاحظه می‌گردد که خطای مدار باز سوئیچ بالای فاز A در t=7.125 و سوئیچ پایین فاز C در t=7.397 تشخیص داده شده است و در این زمان‌ها به ترتیب پرچم فاز a (F_a)"یک" و سپس پرچم فاز c (F_c) "منفی یک" می‌شود.



الف



ب

ج

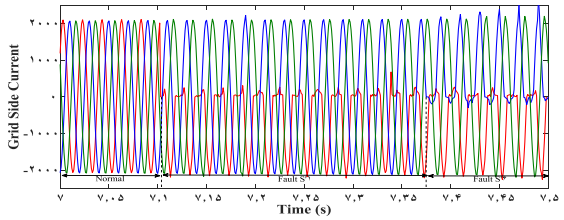
شکل (۱۳): رخداد خطای مدار باز در سوئیچ پایین فاز B در مبدل سمت شبکه، الف: جریان سه فاز سمت شبکه، ب: متغیر تشخیص خطا، ج: پرچم تشخیص خطا

دو شکل (۱۵) و (۱۶) رخداد خطا در مبدل سمت روتور را نشان داده است. مطابق با شکل (۱۵) خطا در سوئیچ بالای فاز c (S_3) و در t=7.651 رخ داده است. مطابق با شکل (۱۵-ب) و (۱۵-ج) ملاحظه می‌گردد تشخیص خطا در t=7.687 انجام شده و پرچم تشخیص خطا در این زمان و مطابق با جدول (۱)، یک شده است. شکل (۱۶) نیز رخداد خطا در دو سوئیچ مبدل سمت روتور را نشان می‌دهد. در این آزمایش ابتدا در t=7.286 خطای اول در سوئیچ بالای فاز c (S_3) و سپس خطای دوم در t=8.416 در سوئیچ پایین همین فاز (S_6) رخ داده است. مطابق با شکل (۱۶-الف) ملاحظه می‌گردد جریان این فاز با رخدادن خطای اول نیم سیکل مثبت خود را از دست داده و پس از رخداد خطای دوم، جریان این فاز تقریبا از دست رفته است. بر اساس شکل (۱۶-ب) و (۱۶-ج) ملاحظه می‌گردد خطای اول در t=7.308 و خطای دوم در t=8.441 آشکار شده است. همچنین پرچم فاز a (F_a) ابتدا "یک" و سپس "دو" گردیده است.

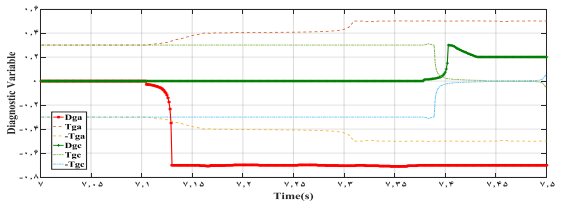
مطابق با الگوریتم شکل (۸)، پس از تشخیص خطا، کنترل تحمل‌پذیر خطا وارد حلقه‌ی کنترلی می‌شود. در این گام، پس از خاموش شدن هر دو گیت IGBT مربوط به ساق معیوب، با روشن شدن تریاک مربوطه، ساق مشترک تشکیل شده و با ۵ ساق مبدل به کارکرد خود ادامه می‌دهد. شکل (۱۷)، جریان سه فاز مبدل سمت شبکه را نشان می‌دهد. این شکل حاصل کنترل تحمل‌پذیر خطای سوئیچ پایین فاز B در مبدل سمت شبکه است. ملاحظه می‌گردد کنترل تحمل‌پذیر خطا توانسته با استفاده از ساق مشترک نیم سیکل منفی جریان را جبران سازد. شکل (۱۸) ولتاژ لینک DC را با رخداد خطا در مبدل سمت شبکه نشان می‌دهد. در بازه‌ی رخداد، تشخیص تا کنترل تحمل‌پذیر خطا، ولتاژ لینک DC دچار نوسان شده و پس از اتصال تریاک مربوطه و تشکیل ساختار پنج ساق، با تقریب خوبی ولتاژ لینک DC به مقدار مطلوب رسیده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

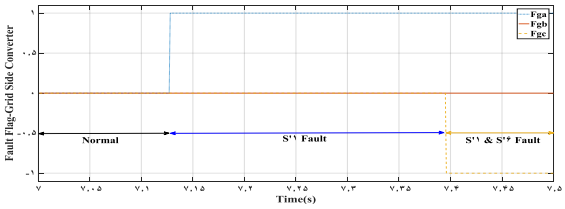
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]



الف

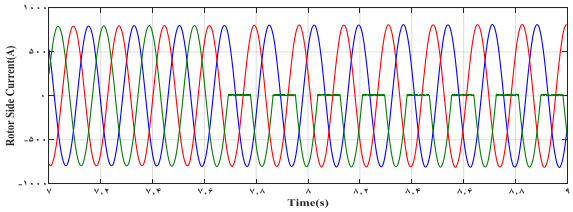


ب

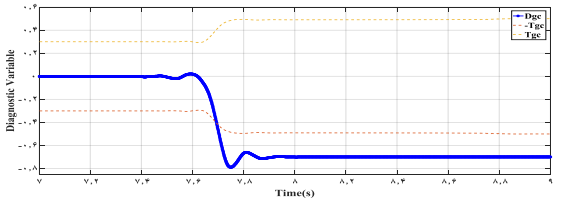


ج

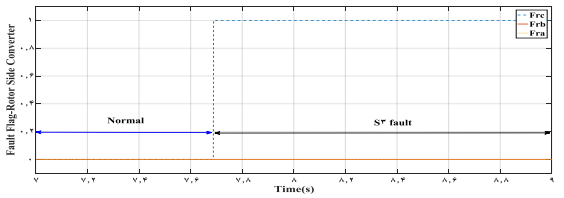
شکل (۱۴): رخداد خطای مدار باز در سوئیچ بالای فاز A و سوئیچ پایین فاز C در مبدل سمت شبکه، الف: جریان سه فاز سمت شبکه، ب: متغیر تشخیص خطا، ج: پرچم تشخیص خطا



الف

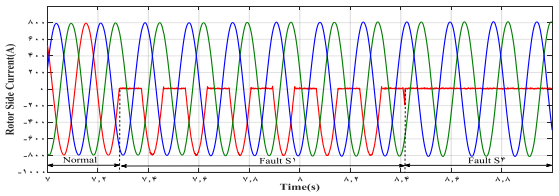


ب

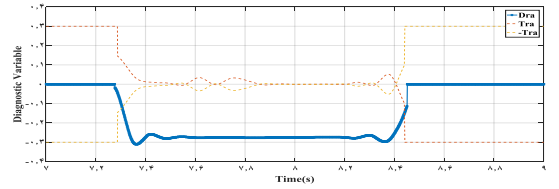


ج

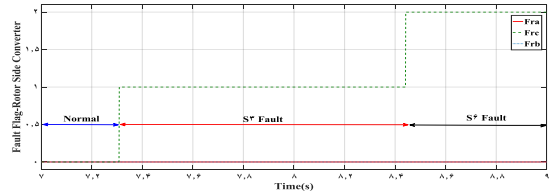
شکل (۱۵): رخداد خطای مدار باز در سوئیچ بالای فاز c در مبدل سمت روتور، الف: جریان سه فاز سمت شبکه، ب: متغیر تشخیص خطا، ج: پرچم تشخیص خطا



الف



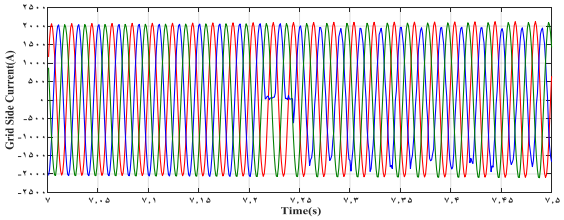
ب



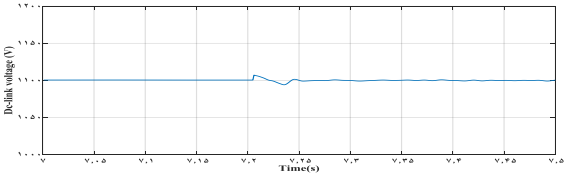
ج

شکل (۱۶): رخداد خطای مدار باز در سوئیچ بالا و پایین فاز a در مبدل سمت روتور، الف: جریان سه فاز سمت شبکه، ب: متغیر تشخیص خطا، ج: پرچم تشخیص خطا

دو شکل (۱۹) و (۲۰) جریان سه فاز مبدل سمت روتور و ولتاژ لینک DC پس از رخداد خطا در این مبدل را نشان می‌دهد. خطای رخ داده در سوئیچ بالای فاز c مبدل سمت روتور بوده، پس از تشخیص خطا در t=7.701 کنترل‌کننده‌ی تحمل‌پذیر خطا توانسته به خوبی سیگنال سینوسی از دست رفته را جبران کند. همچنین نوسان ایجاد شده ناشی از ایجاد خطا در ولتاژ لینک DC با تقریب نسبتا خوبی به سطح مطلوب رسیده است.



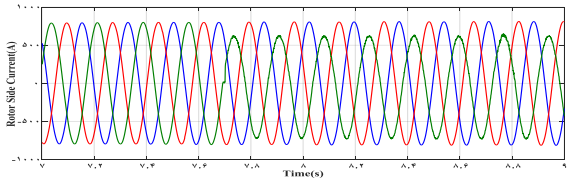
شکل (۱۷): جریان سه فاز مبدل سمت شبکه با رخداد خطا در سوئیچ پایین فاز B با کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی



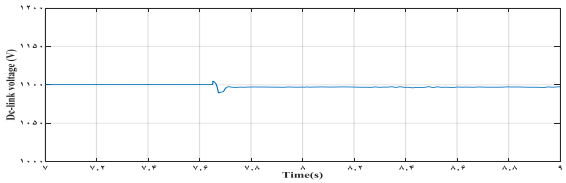
شکل (۱۸): ولتاژ لینک DC مبدل سمت شبکه با رخداد خطا در سوئیچ پایین فاز B با کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]



شکل (۱۹): جریان سه فاز مبدل سمت روتور با رخداد خطا در سوئیچ بالای فاز c با کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی



شکل (۲۰): ولتاژ لینک DC مبدل سمت روتور با رخداد خطا در سوئیچ بالای فاز c با کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی

جدول (۴): مقایسه روش‌های تشخیص و کنترل تحمل‌پذیر خطای بررسی شده در حوزه مبدل توربین بادی

روش	موثر بودن و کارایی	پیچیدگی پیاده‌سازی	دشواری تنظیمات و پیچیدگی محاسبات	سیگنال مورد استفاده	وابستگی آستانه‌ها به سیگنال‌ها	هزینه
روش‌های تشخیص خطا						
بردار پارک	ابهام در جریان پایین	متوسط	زیاد	جریان سه فاز	زیاد	کم
جریان نرمالیزه	ضعیف در جریان کم	کم	کم	جریان سه فاز	-	کم
تصحیح شده جریان نرمالیزه	خوب	کم	کم	جریان سه فاز	-	کم
روش شیب	ضعیف در جریان کم	کم	زیاد	جریان سه فاز	زیاد	کم
روش ساده DC	ضعیف در جریان کم	کم	متوسط	جریان سه فاز	زیاد	کمس
روش WT شبکه عصبی	-	زیاد	کم	جریان سه فاز	-	کم
روش مقاله	خوب	متوسط	متوسط	جریان سه فاز	کم	کم
روش‌های کنترل تحمل‌پذیر خطا						
روش‌های مبتنی بر ساق افزونه	خوب	متوسط	متوسط	جریان سه فاز	-	زیاد
روش‌های بر پایه مبدل‌های چند سطحی	خوب	زیاد	زیاد	جریان سه فاز	-	زیاد
روش پیشنهادی	**خوب**	**متوسط**	**زیاد**	**جریان سه فاز**	-	**کم**

همانطور که در بخش مقدمه آورده شده و در تکمیل موضوع در خصوص بررسی عملکرد روش‌های به کار رفته در حوزه‌های تشخیص و کنترل‌تحمل‌پذیر خطا مقایسه‌ای در جدول (۴) ارائه شده است. مطابق با این نتایج، در خصوص روش تشخیص خطا روش پیشنهادی مقاله عملکرد خوبی در همه مقادیر جریان دارد. این در صورتی است که در اکثر روش‌های بررسی شده در این حوزه، در جریان‌های ضعیف، کارایی و اثر بخشی روش‌ها کاهش می‌یابد. هرچند که پیچیدگی محاسباتی و پیاده‌سازی روش مقاله نسبت به روش‌های دیگر بالاتر است (با توجه به وجود آستانه تطبیقی روش)، اما این موضوع باعث می‌شود که تشخیص اشتباه و یا از دست دادن خطا در روش کاهش یافته و دقت و کارایی افزایش یابد. در خصوص روش‌پیشنهادی مقاله در حوزه کنترل تحمل-پذیر خطا، دارای حداقل تعداد تریاک است و در صورت بروز خطا در ساق هر سمت از مبدل پشت به پشت (سمت روتور و یا سمت شبکه) امکان بازیابی برای آن وجود دارد. پس از رخداد خطا و تغییر توپولوژی، دیگر امکان استفاده از کنترل شش سوئیچه وجود ندارد، بنابراین باید از تغییر رویکرد نرم‌افزاری نیز بهره برد. از این رو این روش، نسبت به روش‌های ارائه شده مبتنی بر ساق افزونه، نیازمند هزینه‌ی کمتری است. با توجه به نتایج بدست آمده امکان بازیابی سیگنال و در نتیجه کارایی روش خوب است. در خصوص پیچیدگی پیاده‌سازی و محاسباتی روش پیشنهادی مقاله، هرچند کم نیست اما در مقایسه با روش‌ها مبتنی بر مبدل‌های چند سطحی پیچیدگی روش کمتر است.

۵- آنالیز بر اساس شاخص‌های عددی

به منظور ارزیابی پارامتری روش پیشنهادی، نتایج در حالت عملکرد نرمال، پس از رخداد خطا و پس از اعمال کنترل تحمل‌پذیر خطا مقایسه گردید. جدول (۵) و (۶) به ترتیب این ارزیابی پارامتری را برای مبدل سمت شبکه و سمت روتور نشان می‌دهد.

جدول (۵): مقایسه‌ی پارامتری مبدل سمت شبکه در حالت عملکرد نرمال و عملکرد کنترل تحمل‌پذیر خطا پس از رخداد خطا در سوئیچ پایین فاز B

	عملکرد نرمال	عملکرد کنترل تحمل‌پذیر خطا
RMS جریان	۱۴۷۱/۴۸	۱۳۵۸/۱۷
ضریب قدرت	۰/۹۷۵	۰/۹۶۸
متوسط V_{dc}	۱۱۰۰	۱۰۹۹/۸
میانگین جریان	-۰/۵۳۱۵	۱۰۱/۸۵۵۶

مطابق با جدول (۵) ملاحظه می‌گردد کنترل تحمل‌پذیر خطا پس از رخداد خطا در سمت شبکه با تقریب نسبتا خوبی توانسته سیگنال جریان را جبران کند. معیار RMS و متوسط جریان به حالت نرمال نزدیک است و ولتاژ لینک DC به خوبی کنترل شده است.

جدول (۶): مقایسه‌ی پارامتری مبدل سمت روتور در حالت عملکرد نرمال و عملکرد کنترل تحمل‌پذیر خطا پس از رخداد خطا

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]

در سوئیچ بالای فاز c

	عملکرد نرمال	عملکرد کنترل تحمل‌پذیر خطا
RMS جریان	۵۶۸/۵۲	۵۰۸/۰۶
ضریب قدرت	۰/۹۷۵	۰/۹۷۱
متوسط V_{dc}	۱۱۰۰	۱۰۹۶/۹
میانگین جریان	۰/۱۹۳۶	-۲۰/۷۲۱۹

جدول (۶) پارامترهای عددی مربوط به رخداد خطا در مبدل سمت روتور را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد مقادیر جریانی پس از کنترل تحمل‌پذیر خطا به مقدار نرمال نزدیک بوده و سیگنال به خوبی جبران‌سازی شده است. جدول (۷) پارامترهای خروجی توان و گشتاور توربین در سه حالت نرمال، در هنگام رخداد خطا و پس از رخداد خطا برای دو خطای بررسی شده در مبدل سمت شبکه و سمت روتور را نشان می‌دهد.

جدول (۷): مقایسه‌ی پارامترهای خروجی توربین در دو خطای مورد بررسی

		عملکرد نرمال (درصد)	عملکرد در حالت رخداد خطا (درصد)	عملکرد کنترل تحمل‌پذیر خطا (درصد)
رخداد خطا در سوئیچ S_6'	TWO توان	۱۰/۸۸	۱۷/۵۴	۱۲/۱۷
	TWO گشتاور	۱۰/۲۱	۱۶/۸۵	۱۱/۸۷
رخداد خطا در سوئیچ S_3	TWO توان	۸/۵۶	۱۴/۷۹	۹/۶۴
	TWO گشتاور	۸/۰۲	۱۵/۲۲	۹/۴۷

که در آن TWO[۱۳] نوسانات شکل موج کلی گشتاور و توان است که به صورت رابطه‌ی زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$TWO=\left(\sqrt{X_{rms}^2-X_{ave}^2}\,/\left|X_{ave}\right|\right)\times 100\% \qquad (۲۱)$$

در این رابطه متغیر X دو مقدار گشتاور (T_e) و توان (P) را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین X_{rms} و X_{ave} به ترتیب مقدار RMS و مقدار متوسط متغیر تعریف شده است. مطابق با جدول (۷) ملاحظه می‌گردد کنترل تحمل‌پذیر خطا توانسته با تقریب خوبی رفتار عملکردی توربین را در دو پارامتر توان و گشتاور برای رخداد خطا در هر یک از مبدل‌های سمت روتور و سمت شبکه به مقدار نرمال برساند.

۶- نتیجه‌گیری

عیب مدار باز سوئیچ مبدل توربین باد از عیوب رایج و با نرخ بالا در توربین باد است. یک روش تشخیص خطای مدار باز در مبدل پشت به پشت توربین بادی مبتنی بر ژنراتور DFIG با در نظر گرفتن کنترل تحمل‌پذیر خطای آن در این مقاله ارائه شده است. در این روش ساق معیوب با باز شدن گیت هر دو IGBT در یک ساق توسط کنترل‌کننده، کنار رفته و یکی از ساق‌ها به عنوان ساق مشترک بین دو مبدل سمت شبکه و سمت روتور قرار می‌گیرد و سپس با استفاده از مدولاسیون بردار فضایی فرمان پنج ساق باقی مانده صادر می‌شود. شبیه‌سازی‌های متنوعی در مقاله ارائه شده است که همه آن‌ها کارایی، دقت و سرعت روش پیشنهادی را در تشخیص و کنترل تحمل‌پذیر عیب مدار باز سوئیچ مبدل پشت به پشت توربین باد مبتنی بر DFIG نشان داده‌اند. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که روش پیشنهادی در تشخیص عیوب چندگانه مبدل سمت شبکه و سمت روتور و همچنین در تشخیص عیوب یک ساق موفق است. همچنین ارزیابی‌های عددی در جدول (۴) تا (۶) به خوبی موثر بودن ساختار پیشنهادی را در کنترل تحمل‌پذیر خطای مدار باز سوئیچ IGBT نشان داده‌اند.

مراجع

Bouscayrol, A., Francois, B., Delarue, P & ,. Niirane, J .(۲۰۰۵) .Control implementation of a five-leg AC-AC converter to supply a three-phase induction machine .*IEEE Transactions on Power Electronics* ۱۰۷ , ۲۰ , ۱۱۵ -.

Campos-Delgado, U., Espinoza-Trejo, R & ,. Palacios, E .(۲۰۰۸) .Fault-tolerant control in variable speed drives: a survey .*IET Electric Power Applications*.۱۳۴ - ۱۲۱ ,(۲) ۲ ,

Das, P. S & ,.Kim, K. H .(۲۰۱۴) .Real-Time Multiple Open-Switch Fault Diagnosis in Three-phase AC/DC PWM Converter for PMSG Based Grid-Connected Wind Power Generation System .*International Journal of Control and Automation*.۳۴۴-۳۲۹ ,(۹) ۱ ,

Das, P. S & ,.Kim, K. H .(۲۰۱۴) .Voltage-based On-Line Fault Detection and Faulty Switch Identification under Multiple Open-Switches in Grid-Connected Wind Power Converter .*International Journal of Control and Automation*.۴۱۶-۴۰۱ ,(۱۱) ۱ ,

Duan, P., Xie, K. G., Zhang, L & ,.Rong, X .(۲۰۱۰) . Open-switch fault diagnosis and system reconfiguration of doubly fed wind power converter used in a microgrid .*IEEE Transactions on Power Electronics* ,(۳) ۲۶ , ۸۲۱-۸۱۶.

Edorta, I ,.Andreu, J., Kortabarria, I., Ormaetxea, E., Martínez de Alegría, I ,.Luís Martín, J & ,.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]

Ibañez, P .(۲۰۱۱) .New fault tolerant matrix converter .*Electric Power Systems Research*.۵۵۲-۵۳۸ ,(۲)۸۱ ,

Freire, N. M., Estima, J. O & ,.Cardoso, A. J .(۲۰۱۲)Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications . *IEEE Transactions on Industrial electronics*.۳۹۶۷-۳۹۵۷ ,(۹)۶۰ ,

Göksu, Ö., Altin, M., Fortmann, J & ,.Sørensen, E .(۲۰۱۶)Field Validation of IEC 61400-27-1 Wind Generation Type 3 Model With Plant Power Factor Controller .*IEEE Transactions on Energy Conversion*.۱۱۷۸-۱۱۷۰ ,(۳)۳۱ ,

Hemanth Kumar, B., Saravanan, B., Sanjeevikumar, P & ,.Blaabjerg, F .(۲۰۱۸) .Review on Control Techniques and Methodologies For Maximum Power Extraction From Wind Energy Systems .*IET Renewable Power Generation*.۱۶۲۲-۱۶۰۹ ,(۱۴)۱۲ ,

Jacobina, B., de Araujo Ribeiro, L., Lima, N & ,.da Silva, C .(۲۰۰۳) .Fault-tolerant reversible AC motor drive system .*IEEE Transactions on Industry Applications*.۱۰۸۴ - ۱۰۷۷ ,۳۹ ,

Jlassi, I., Estima, J. O., El Khil, S. K., Bellaaj, N. M & ,.Cardoso, A. J .(۲۰۱۴) .Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of PMSG drives for wind turbine systems .*IEEE Transactions on Power Electronics*.۲۷۰۲-۲۶۸۹ ,(۵)۳۰ ,

Karimi, S., Gaillard, A., Poure, P & ,.Saadate, S .(۲۰۰۸)FPGA-based real-time power converter failure diagnosis for wind energy conversion systems .*IEEE Transactions on Industrial Electronics*.۴۳۰۸-۴۲۹۹ ,(۱۲)۵۵ ,

Karimi, S., Poure, P & ,.Saadate, S .(۲۰۰۸) .FPGA-based fully digital fast power switch fault detection and compensation for three-phase shunt active filters .*Electric Power Systems Research*.۱۹۴۰–۱۹۳۳ ,(۱۱)۷۸ ,

Keyuan, H., Jingjia, L & ,.Shoudao, H .(۲۰۱۵) . Converters open-circuit fault-diagnosis methods research for direct-driven permanent magnet wind power system . *Transactions of China Electrotechnical Society*.۱۳۶-۱۲۹ ,(۱۶)۳۰ ,

Meradi, S., Benmansour, K., Herizi, K., Tadjine, M & ,.Boucherit, S .(۲۰۱۳) .Sliding mode and fault tolerant control for multicell converter four quadrants .*Electric Power Systems Research*.,۱۳۹-۲۸ , ۹۵ ,

Olimpo, A., Jenkins, N., Ekanayake, J., Cartwright, P & ,.Hughes, M .(۲۰۱۱) .*Wind Energy Generation: Modeling and Control* .John Wiley & Sons.

Sae-Kok, W .(۲۰۰۸) .*Converter fault diagnosis and post fault operation of a doubly-fed induction generator for a wind turbine* . Ph.D. Thesis: University of Strathclyde.

Sae-Kok, W., Grant, D. M & ,.Williams, B. W .(۲۰۱۰)System reconfiguration under open-switch faults in a doubly fed induction machine .*IET Renewable Power Generation*.۴۷۰-۴۵۸ ,(۵)۴ ,

Shahbazi, M., Poure, P., Saadate, S & ,.Zolghadri, M .(۲۰۱۲) .FPGA-based fast detection with reduced sensor count for a fault-tolerant three-phase converter .*IEEE transactions on industrial informatics*.۱۳۵۰-۱۳۴۳ ,(۳)۹ ,

Shahbazi, M., Poure, P., Saadate, S & ,.Zolghadri, M .(۲۰۱۳) .FPGA-based reconfigurable control for fault-tolerant back-to-back converter without redundancy .*IEEE Transactions on Industrial Electronics* , .۳۳۷۱-۳۳۶۰ ,(۸)۶۰

You, X & ,.Zhang, W .(۲۰۱۲) .Fault diagnosis of frequency converter in wind power system based on SOM neural network .*Procedia Engineering*.۳۱۳۶-۳۱۳۲ , ۲۹ ,

Zhao, H & ,.Cheng, L .(۲۰۱۸) .Open-Switch Fault-Diagnostic Method for Back-to-Back Converters of a Doubly Fed Wind Power Generation System .*IEEE Transactions on Power Electronics*.۳۴۶۱-۳۴۵۲ ,(۴)۳۳ ,

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]

Zhao, H & ,.Cheng, L .(۲۰۱۷) .Open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of DF wind turbine .*IET Renewable Power Generation*.۴۲۴-۴۱۷ ,(۴) ۱۱ ,

زیرنویس‌ها

[۱] Diagnosis
[۲] Fault Identification
[۳] Tolerant Control (TC)
[۴] Polarity
[۵] Normalized Current Average Values
[۶] Phase Angle Slope
[۷] Structural Recovery
[۸] Absolute Normalized DC Current
[۹] Current Absolute Normalized Park-Vector
[۱۰] Pulse Width Modulation (PWM)
[۱۱] Zero Sequence Signal (ZSS)
[۱۲] Space Vector Modulation (SVM)
[۱۳] Total Waveform Oscillation

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-09-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.4.6]