

تشخیص خطا و تکنیک SVPWM تحمل خطای مبدل شش فاز ناشی از خطا سوئیچ باز

روح اله بلبل نیا^۱ کریم عباس زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری تخصصی- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران

R.bolbolnia@email.kntu.ac.ir

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران

Abbaszadeh@kntu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک روش جدید تشخیص خطای سوئیچ باز برای مبدل شش فاز AC-DC بر اساس اختلاف بین جریان فاز و مرجع مربوطه و مقایسه این اختلاف با مقدار آستانه تطبیقی پیشنهاد شده است. روش تشخیص خطا پیشنهادی با سیگنال‌های مورد نیاز کنترل کننده ادغام شده است، از همین روی، خطای سوئیچ باز بدون هیچ گونه تجهیزات اضافی و محاسبات پیچیده تشخیص داده خواهد شد. روش پیشنهادی تحمل خطا از حالت افزونگی^۱ بردارهای فضایی در مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (SVPWM) استفاده نموده است و با تغییر سیگنال‌های سوئیچینگ در ناحیه‌های خطا دار، مقدار اضافه جریان و مقدار اعوجاج هارمونیک کل (THD) را در فازهای سالم و خطا دار کاهش داده است. این روش بدون افزودن پایه، سوئیچ یا تریاک (TRIAC)^۲، به مدار انجام شده است. در نهایت، روش پیشنهادی تحمل خطا با شبیه‌سازی در محیط سیمولینک نرم افزار MATLAB ارزیابی شده و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی تأثیر آن را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تشخیص خطا، تکنیک SVPWM تحمل خطا، خطای سوئیچ باز، مبدل شش فاز

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.93

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۶/۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۹/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر کریم عباس زاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان شریعتی - پلاک ۲۳۹ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

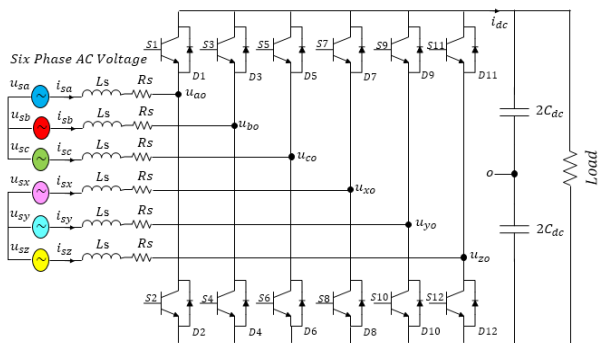
در سال‌های اخیر، با توجه به افزایش استفاده از انرژی باد و تاثیر قابل توجه آن بر شبکه قدرت، قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم‌های انرژی بادی بسیار مهم شده است [۱]. توربین بادی با ژنراتور سنکرون آهنربای دائم (PMSG) دارای مزایای چگالی توان و راندمان بالا است و همچنین به دلیل حذف گیربکس قابلیت اطمینان آن افزایش یافته است. این مزایا نگرانی‌های سرمایه‌گذاری در توربین بادی PMSG را کاهش می‌دهد [۳، ۲]. از طرف دیگر، استفاده از ژنراتورهای چندفاز در سیستم‌های توربین بادی مزایای بیشتری مانند کاهش دامنه گشتاور ضربانی و افزایش فرکانس آن، کاهش تلفات مسی استاتور و کاهش جریان فاز برای ولتاژ نامی یکسان فراهم می‌کند. علاوه بر این، ژنراتورهای چندفاز، قابلیت اطمینان و درجه آزادی را افزایش می‌دهند [۴]. بنابراین PMSG شش فاز یکی از بهترین گزینه‌ها برای سیستم توربین بادی است. یک توربین بادی مجهز به PMSG شش فاز به یک مبدل تمام ظرفیت نیاز دارد تا توان استحصالی از توربین باد را به شبکه قدرت تزریق نماید. بر اساس مطالعات اخیر [۵-۷]، آسیب پذیرترین قسمت سیستم توربین بادی، تجهیزات الکترونیک قدرت آن است و بیشترین خطاها ناشی از سوئیچ‌های قدرت است، که منشأ ۲۵ درصد از خطاها تشخیص داده شده‌اند. بررسی دیگری [۸] نشان می‌دهد که مبدل‌های الکترونیک قدرت مسئول بیش از ۲۲ درصد از کل زمان از کارافتادگی مزارع بادی هستند، که طولانی‌ترین زمان خرابی در بین همه عوامل است. به طور کلی، خطاهای سوئیچ قدرت به دو نوع خطای اتصال کوتاه و سوئیچ باز تقسیم بندی می‌شود. برخلاف خطای اتصال کوتاه، خطای سوئیچ باز باعث خاموش شدن فوری سیستم نمی‌شود و می‌تواند برای مدتی بدون تشخیص باقی بماند [۹]. لازم به ذکر است، خطای سوئیچ باز می‌تواند عملکرد و قابلیت اطمینان سیستم را مختل کند، تا منجر به خطاهای ثانویه در مبدل و در نهایت سبب از کارافتادگی کامل توربین بادی شود [۱۰، ۱۱]. به منظور بهبود قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم توربین بادی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هر دو موضوع تشخیص خطا و تحمل خطا تا انجام اقدامات اصلاحی مناسب لازم و ضروری است [۱۲].

به طور کلی، روش‌های تشخیص خطا در سه گروه، تشخیص خطا مبتنی بر مدل، تشخیص خطا مبتنی بر دانش و تشخیص خطا مبتنی بر سیگنال دسته‌بندی می‌شوند. روش تشخیص خطا مبتنی بر مدل با به کارگیری مشاهده گر^۳ در [۱۳، ۱۴]، اجرا شده است. البته روش‌های مبتنی بر مدل، نیاز به اطلاعات دقیق از مدل سیستم دارند و به تغییرات پارامترهای سیستم بسیار حساس هستند [۹]. در [۱۵] روش تشخیص خطای فازی مبتنی بر دانش برای مبدل‌های منبع ولتاژ پیاده‌سازی شده است. لازم به ذکر است، روش‌های مبتنی بر دانش، به داده‌های قبلی سیستم، آموزش طولانی مدت و تلاش محاسباتی زیاد

نیاز دارند. روش‌های مبتنی بر سیگنال با بررسی ویژگی‌های سیگنال‌های ولتاژ و جریان اجرا می‌شوند. در [۱۶، ۱]، روش تشخیص خطای سوئیچ باز با مقایسه ولتاژ اندازه‌گیری شده و مقدار مرجع برای یک سیستم توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) ارائه شده است. روش‌های تشخیص خطا مبتنی بر ولتاژ، سبب افزایش هزینه سیستم، پیچیدگی آن و احتمال خرابی تجهیزات اضافی مانند سنسورهای ولتاژ می‌شوند [۱۷]. روش‌های مبتنی بر جریان، چون که به مدل دقیق سیستم، محاسبات پیچیده و تجهیزات اضافی نیاز ندارند؛ به طور گسترده‌ای برای تشخیص خطای سوئیچ باز استفاده شده است [۱۲]. بردار تبدیل پارک جریان و متوسط بردار تبدیل پارک جریان در [۱۸، ۱۹] معرفی گردیده است و خطای سوئیچ باز با استفاده از زاویه فاز ناشی از تبدیل پارک بردار جریان مشخص شده است. مقایسه بین شیب زاویه فاز بردار تبدیل پارک جریان و یک آستانه ثابت در [۲۰، ۲۱] پیشنهاد گردیده است. نرمالیزه کردن شاخص تشخیص خطا از وابستگی این شاخص به تغییرات بار جلوگیری می‌کند. در [۲۲، ۲۳]، دامنه هارمونیک اول جریان و مقدار متوسط قدرمطلق جریان به عنوان مقدارهای نرمال‌کننده در نظر گرفته شده است. در [۲۴]، مقدار لحظه‌ای جریان به عنوان یک کمیت نرمال‌کننده پیشنهاد گردیده است. معمولاً مقدار آستانه ثابت سبب کاهش قابلیت اطمینان روش‌های تشخیص خطا می‌شود، چون که با تغییر نقطه عملکرد یا مقادیر مرجع، تنظیم مقدار آستانه ضروری است [۲۵]. از همین روی، در [۲۶]، از آستانه تطبیقی به جای آستانه ثابت برای افزایش استحکام روش تشخیص خطا استفاده گردیده است. تکنیک‌های اشاره شده، به منظور تشخیص خطاهای سوئیچ باز در مبدل‌های سه فاز معمولی با شش سوئیچ استفاده شده‌اند، اما هنوز برای سیستم‌های چندفاز مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفته‌اند.

ساختارهای مختلفی برای تحمل خطای سوئیچ باز پیشنهاد شده است. به طوری که در [۲۷، ۲۸]، یک پایه اضافی با استفاده از TRIAC به فازهای مبدل متصل گردیده است، در حالی که در [۲۹]، این پایه اضافی به نقطه خنثی ماشین متصل شده است. همچنین، در [۳۰] و [۳۱]، سوئیچ‌های اضافی حذف گردیده‌اند و تنها توسط TRIAC‌ها، نقطه میانی خازن‌های لینک-DC به فازهای مبدل یا نقطه خنثی ماشین یا ترانسفورماتور شبکه متصل شده است [۳۲، ۳۳]. در [۳۴]، هر دو طرف (شبکه/ماشین) مبدل پشت‌به‌پشت^۴ از طریق TRIAC به یکدیگر متصل گردیده است. تجهیزات اضافی مانند سوئیچ‌ها و TRIAC‌ها هزینه و پیچیدگی سیستم را افزایش می‌دهند. در برخی از تحقیقات [۱۰، ۳۵، ۳۶]، روش تحمل خطا با تجدیدنظر در سیگنال سوئیچینگ SVPWM اجرا شده است، که از افزایش هزینه سیستم جلوگیری می‌کند. البته باید به این موضوع اشاره کرد، این روش تحمل خطا هنوز برای سیستم‌های چندفاز به کارگیری نشده است.

این مقاله یک روش تشخیص و تحمل خطا را برای خطاهای سوئیچ باز در مبدل شش فاز AC-DC به عنوان بخشی از سیستم



شکل (۲): ساختار مبدل AC-DC شش فاز

منبع شش فاز متقارن، به صورت دو مجموعه سه فاز abc و xyz با نقطه خنثی مجزا، در نظر گرفته شده است، که این دو مجموعه با یکدیگر ۶۰ درجه اختلاف فاز دارند. معادله دیفرانسیل مبدل AC-DC شش فاز به شرح ذیل است:

$$u_{sn}(t) = L \frac{di_{sn}}{dt} + Ri_{sn}(t) + u_{mod-n}(t) \quad (1)$$

که در آن اندیس n نمایانگر فازهای a, b, c, x, y, z است و u_s ولتاژ منبع و u_{mod} ولتاژ مبدل است. L اندوکتانس فیلتر و R مقاومت سیم پیچی است. همچنین معادلات مبدل شش فاز با در نظر گرفتن ماتریس T_{62} رابطه (۲)، به قاب گردان dq منتقل می شود. در رابطه (۳)، i_d و i_q به ترتیب جریان های محور d و محور q هستند، u_{sd} و u_{sq} به ترتیب ولتاژ محور d و محور q هستند. همچنین w_1 فرکانس زاویه ای است.

$$T_{62} = \frac{2}{6} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - \pi) & \cos(\theta + \frac{\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \frac{\pi}{3}) & -\sin(\theta - \pi) & -\sin(\theta + \frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & w_1 \\ -w_1 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{mod,d}(t) \\ u_{mod,q}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sd}(t) \\ u_{sq}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

به منظور تثبیت ولتاژ لینک-DC مبدل AC-DC شش فاز در مقدار مرجع و تحقق ضریب توان واحد، مطابق شکل (۳) از کنترل کننده ولتاژ گردان (VOC) محورهای d و q استفاده شده است. محورهای d و q با فرکانس زاویه ای w_1 می چرخند و از طرفی بردار ولتاژ نیز با همین سرعت می چرخد. بنابراین سیگنال های سینوسی با فرکانس اصلی در قاب مرجع dq ، به سیگنال های ثابت تبدیل خواهند شد. از این روی، کنترل کننده تناسبی-انتهگرای (PI) با انتخاب ضرایب مناسب، می تواند میزان انحراف از مقدار مرجع را به صفر برساند [۳۷].

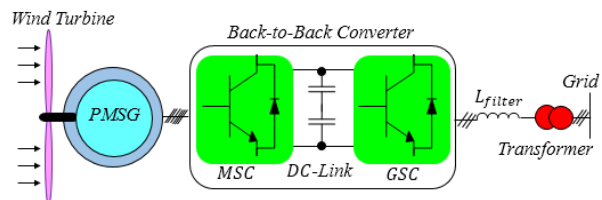
توربین بادی چندفاز ارائه می دهد. نوآوری های این مقاله را می توان به شرح زیر دسته بندی کرد:

- روش تشخیص خطای پیشنهادی فقط به مقادیر داده شده توسط سنسورهای جریان و سیگنال های مرجع آن نیاز دارد.
- مقادیر این جریان ها و مرجع آن قبلاً توسط سیستم کنترل اصلی اندازه گیری شده است و احتیاجی به سنسورهای اضافی یا محاسبات پیچیده نمی باشد.
- پس از تشخیص خطا، بدون افزودن هیچ گونه تجهیزات اضافی، روش تحمل خطا با تجدیدنظر در بردارهای فضایی سیگنال سوئیچینگ SVPWM در ناحیه های خطا دار اجرا می شود.
- روش تحمل خطا، مقدار اضافه جریان و THD را در فازهای سالم و خطا دار کاهش می دهد.

ساختار این مقاله به شرح زیر تنظیم شده است. مدل مبدل شش فاز AC-DC مورد استفاده در توربین بادی در بخش ۲ ارائه شده است. تکنیک تشخیص و تحمل خطا سوئیچ باز به ترتیب در بخش های ۳ و ۴ معرفی شده است. در بخش ۵، عملکرد روش تحمل خطا با استفاده از نتایج شبیه سازی ارزیابی گردیده است. سپس در بخش پایانی، نتیجه گیری ارائه شده است.

۲- توصیف مدل مبدل AC-DC شش فاز

توربین بادی با PMSG شش فاز از طریق مبدل تمام ظرفیت پشت به پشت به شبکه متصل می شود. طبق شکل (۱)، این مبدل از دو قسمت مبدل سمت ماشین (MSC) و مبدل سمت شبکه (GSC) تشکیل شده است که از طریق خازن لینک-DC به یکدیگر متصل می شوند. از آنجاکه تعداد سوئیچ های MSC شش فاز (۱۲ سوئیچ)، دو برابر تعداد سوئیچ های MSC سه فاز است، بنابراین تشخیص خطای سوئیچ باز و تحمل این خطا، در این مبدل بسیار مهم می شود. بسیاری از روش های تشخیص خطا و تحمل خطا برای اینورتر DC-AC توسعه داده شده است و تحقیقات اندکی برای مبدل AC-DC وجود دارد [۱۰]. در این مقاله جهت بررسی روش پیشنهادی تشخیص و تحمل خطا طبق شکل (۲)، مبدل شش فاز AC-DC بدون اتصال به شبکه در نظر گرفته شده است و از بار محلی به عنوان مصرف کننده استفاده شده است.



شکل (۱): ساختار توربین بادی مجهز به PMSG شش فاز

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \\ v_x \\ v_y \\ v_{01} \\ v_{02} \end{bmatrix} = \frac{2}{6} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\varphi) & \cos(2\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \sin(2\varphi) \\ 1 & \cos(2\varphi) & \cos(4\varphi) \\ 0 & \sin(2\varphi) & \sin(4\varphi) \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_a \\ u_x \\ u_b \\ u_y \\ u_c \\ u_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

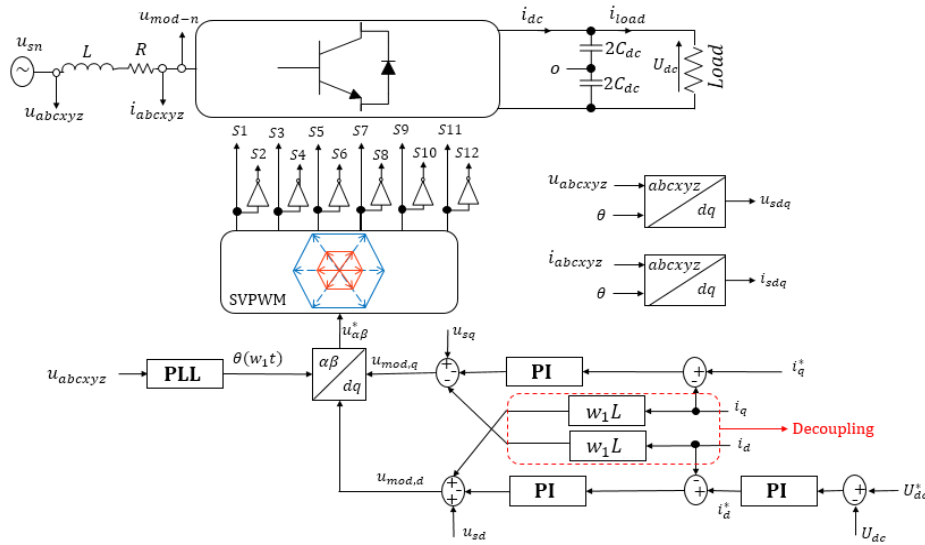
بردارهای فضایی در صفحه $\alpha\text{-}\beta$ بر اساس دامنه، به چهار دسته بردار صفر $|V_{zero}|=0$ ، بردار کوچک $|V_{sm}|=1/3Vdc$ ، بردار متوسط $|V_m|=1/\sqrt{3}Vdc$ و بردار بزرگ $|V_l|=2/3Vdc$ تقسیم بندی می شوند. هر دوره زمانی به ۱۲ ناحیه تقسیم گردیده است، که بردارهای فضایی هر یک از این ناحیه ها در عملکرد عادی، در جدول (۱) ارائه شده است. بردارهای فضایی به گونه ای انتخاب شده اند، که میانگین بردارهای فضایی در هر دوره زمانی، در صفحه های دوبعدی $x\text{-}y$ و 0^+-0^- صفر گردد. توالی بردارهای سوئیچینگ هر ناحیه، شامل دو بردار صفر، دو بردار کوچک، دو بردار متوسط و یک بردار بزرگ است. زمان سکون هر یک از بردارهای فضایی با در نظر گرفتن اصل تعادل ولتاژ-زمان و مجموع زمان های هر دوره زمانی، طبق روابط (۶) و (۷) محاسبه خواهد شد.

همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، مولفه d جریان مرجع (i_d^*) ، وظیفه کنترل ولتاژ لینک-DC در مقدار مرجع (U_{dc}^*) را بر عهده دارد؛ چون که محور d هم راستا با بردار ولتاژ در نظر گرفته شده است. در حالی که، مولفه q جریان مرجع (i_q^*) وظیفه کنترل ضریب توان واحد را بر عهده دارد و مقدار آن در صفر تنظیم شده است [۳۷]. در نهایت پس از تولید ولتاژ مرجع $(u_{\alpha\beta}^*)$ توسط کنترل کننده، از تکنیک SVPWM شش فاز، جهت تولید سیگنال های سوئیچینگ استفاده شده است، که در هر فاز، سوئیچ بالا و پایین مکمل یکدیگرند. قدرت منبع (P_s) بر اساس رابطه (۴) در نظر گرفته شده است. بخشی از قدرت منبع به عنوان تلفات در مبدل (P_{losses}) تلف می شود و بقیه توان به بار (P_{load}) تحویل داده می شود.

$$P_s = P_{load} + P_{losses} = 3(u_{sd}i_d + u_{sq}i_q) \quad (4)$$

۲-۱- الگوی سوئیچینگ SVPWM شش فاز

مبدل شش فاز دوسطحی، دارای $2^6=64$ بردار سوئیچینگ است، که هر کدام از بردارهای سوئیچینگ به صورت $V=(S_a S_b S_c S_d S_e S_f)$ طبق اعداد باینری از (000000) تا (111111) در نظر گرفته شده است. با استفاده از رابطه (۵)، تصویر بردارهای فضایی طبق شکل (۴) به سه صفحه عمود برهم دوبعدی $\alpha\text{-}\beta$ ، $x\text{-}y$ و 0^+-0^- منتقل می شوند [۳۸].



شکل (۳): ساختار کنترل کننده مبدل AC-DC شش فاز بر مبنای VOC با سوئیچینگ SVPWM

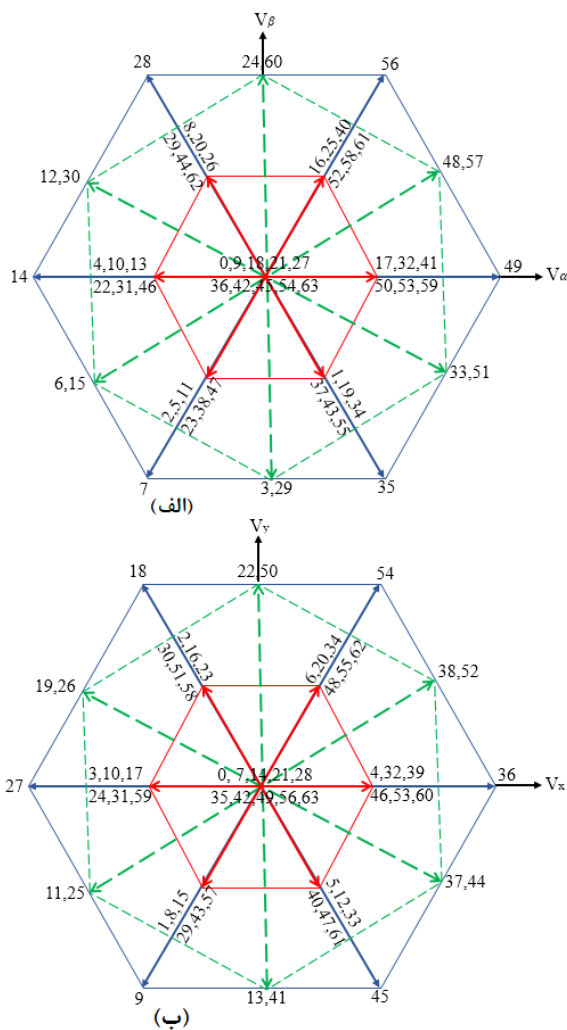
$$T_m = \frac{V_\beta^* V_1^\alpha - V_\alpha^* V_1^\beta}{V_1^\alpha V_m^\beta - V_1^\beta V_m^\alpha} T_s$$

$$T_l = 2\rho \frac{V_\alpha^* V_m^\beta - V_\beta^* V_m^\alpha}{V_1^\alpha V_m^\beta - V_1^\beta V_m^\alpha} T_s \quad (9)$$

$$T_{sm} = 2(1-\rho) \frac{V_\alpha^* V_m^\beta - V_\beta^* V_m^\alpha}{V_1^\alpha V_m^\beta - V_1^\beta V_m^\alpha} T_s$$

جدول (۱): بردارهای فضایی مبدل شش فاز در حالت عملکرد عادی

ناحیه‌ها	توالی بردارهای سوئیچینگ
Reg1: $(0 - \frac{\pi}{6})$	$V_0, V_{32}, V_{48}, V_{49}, V_{57}, V_{59}, V_{63}$
Reg2: $(\frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{6})$	$V_0, V_{16}, V_{48}, V_{56}, V_{57}, V_{61}, V_{63}$
Reg3: $(\frac{2\pi}{6} - \frac{\pi}{2})$	$V_0, V_{16}, V_{24}, V_{56}, V_{60}, V_{61}, V_{63}$
Reg4: $(\frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{6})$	$V_0, V_8, V_{24}, V_{28}, V_{60}, V_{62}, V_{63}$
Reg5: $(\frac{4\pi}{6} - \frac{5\pi}{6})$	$V_0, V_8, V_{12}, V_{28}, V_{30}, V_{62}, V_{63}$
Reg6: $(\frac{5\pi}{6} - \pi)$	$V_0, V_4, V_{12}, V_{14}, V_{30}, V_{31}, V_{63}$
Reg7: $(\pi - \frac{7\pi}{6})$	$V_0, V_4, V_6, V_{14}, V_{15}, V_{31}, V_{63}$
Reg8: $(\frac{7\pi}{6} - \frac{8\pi}{6})$	$V_0, V_2, V_6, V_7, V_{15}, V_{47}, V_{63}$
Reg9: $(\frac{8\pi}{6} - \frac{3\pi}{2})$	$V_0, V_2, V_3, V_7, V_{39}, V_{47}, V_{63}$
Reg10: $(\frac{3\pi}{2} - \frac{10\pi}{6})$	$V_0, V_1, V_3, V_{35}, V_{39}, V_{55}, V_{63}$
Reg11: $(\frac{10\pi}{6} - \frac{11\pi}{6})$	$V_0, V_1, V_{33}, V_{35}, V_{51}, V_{55}, V_{63}$
Reg12: $(\frac{11\pi}{6} - 2\pi)$	$V_0, V_{32}, V_{33}, V_{49}, V_{51}, V_{59}, V_{63}$



شکل (۴): تصویر بردارهای فضایی مبدل شش فاز در صفحه دوبعدی الف) $\alpha-\beta$ ب) $x-y$

۳- تشخیص خطای سوئیچ‌باز

خطاهای سوئیچ‌باز در کانورترهای شش‌فاز AC-DC دارای الگوهای جریان متفاوتی در مقایسه با اینورترهای منبع ولتاژ شش‌فاز هستند. برخلاف اینورترها، این مبدل‌ها جریان‌های مثبت و منفی را به‌طور کامل در حین خطای سوئیچ‌باز مسدود نمی‌کنند. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، در عملکرد عادی، جریان نیم‌سیکل مثبت از طریق سوئیچ پایین و دیود موازی-معکوس بالا آن فاز هدایت می‌شود. در حالی که، سوئیچ بالا و دیود موازی-معکوس پایین آن فاز، جریان نیم‌سیکل منفی را هدایت می‌کنند. بنابراین، اگر یک خطای سوئیچ‌باز در سوئیچ بالا رخ دهد، نیم‌سیکل منفی جریان فاز مخدوش می‌شود، اما نیم‌سیکل مثبت آن تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. برعکس، اگر یک خطای سوئیچ‌باز در سوئیچ پایین رخ دهد، نیم‌سیکل منفی جریان فاز تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد، اما نیم‌سیکل مثبت آن مخدوش می‌شود. بنابراین، خطاهای سوئیچ‌باز می‌تواند با ارزیابی قسمت از دست‌رفته جریان فاز تشخیص داده شود [۳۳].

$$V_{ph}^* T_s = V_{zero} T_{zero} + V_{sm} T_{sm} + V_m T_m + V_l T_l \quad (6)$$

$$T_s = T_{zero} + T_{sm} + T_m + T_l \quad (7)$$

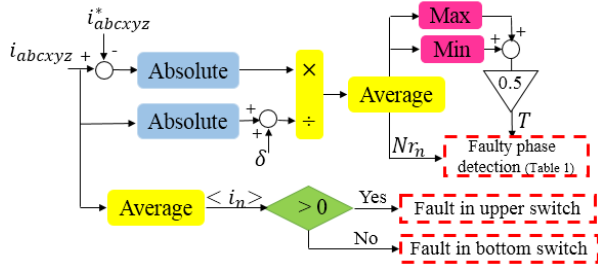
در روابط فوق، V_{ph}^* بردار مرجع و T_{zero} ، T_m ، T_{sm} و T_l به ترتیب زمان سکون بردارهای فضایی صفر، کوچک، متوسط و بزرگ است. همچنین T_s ، دوره زمانی نمونه برداری است. با در نظر گرفتن متغیر کنترلی ρ بر اساس رابطه (۸) و تقسیم‌بندی بردارهای فضایی در صفحه $\beta\alpha$ به دو قسمت موهومی و حقیقی، زمان سکون هر یک از بردارهای فضایی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۸].

$$\rho = \frac{T_l}{T_l + \frac{T_{sm}}{2}} \quad (8)$$

در نظر گرفته می‌شود. اگر مقدار $\langle i_n \rangle$ بیشتر از صفر باشد، خطای سوئیچ باز در سوئیچ بالایی رخ داده است، اما اگر مقدار $\langle i_n \rangle$ کمتر از صفر باشد، خطای سوئیچ باز در سوئیچ پایینی رخ داده است. بلوک دیاگرام تشخیص خطای سوئیچ باز بر اساس دو شاخص Nr_n و $\langle i_n \rangle$ در شکل (۵) ارائه شده است.

جدول (۲): حالت‌های مختلف تشخیص خطای سوئیچ باز

$Nr_a, Nr_b, Nr_c, Nr_x, Nr_y, Nr_z \approx T$	شرایط عادی
$Nr_b, Nr_c, Nr_x, Nr_y, Nr_z < T$	$Nr_a > T$ خطا در سوئیچ‌های فاز a
$Nr_a, Nr_c, Nr_x, Nr_y, Nr_z < T$	$Nr_b > T$ خطا در سوئیچ‌های فاز b
$Nr_a, Nr_b, Nr_x, Nr_y, Nr_z < T$	$Nr_c > T$ خطا در سوئیچ‌های فاز c
$Nr_a, Nr_b, Nr_c, Nr_y, Nr_z < T$	$Nr_x > T$ خطا در سوئیچ‌های فاز x
$Nr_a, Nr_b, Nr_c, Nr_x, Nr_z < T$	$Nr_y > T$ خطا در سوئیچ‌های فاز y
$Nr_a, Nr_b, Nr_c, Nr_x, Nr_y < T$	$Nr_z > T$ خطا در سوئیچ‌های فاز z



شکل (۵): بلوک دیاگرام تکنیک تشخیص خطای سوئیچ باز

۴- تحمل خطای سوئیچ باز

خطای سوئیچ باز در مبدل شش فاز بلافاصله باعث خاموش شدن سیستم نمی‌گردد، اما عملکرد مبدل را تضعیف خواهد نمود. به‌منظور بهبود عملکرد مبدل و جلوگیری از خطای ثانویه، تکنیک‌هایی جهت تحمل خطا انجام می‌شود. شکل (۶)، جریان‌های شش فاز مبدل AC-DC را در حالت عادی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن ضریب توان واحد، مشابه شکل موج ولتاژ است. معادله کلی جریان به شرح زیر است:

$$i_k = I_m \cos(\omega_1 t - \frac{(k-1)\pi}{3}) \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (12)$$

که در این رابطه، I_m دامنه جریان شش فاز و ω_1 فرکانس زاویه‌ای است. طبق قانون جریان کیرشهف^۵ در مدارهای الکتریکی، مجموع جریان‌های مبدل شش فاز باید صفر باشد. از آنجاکه سوئیچ خطادار قادر به هدایت جریان نیم‌سیکل مربوط به خود نیست، سبب اضافه جریان در فازهای سالم و خطادار می‌گردد. این اضافه جریان تنش بسیار زیادی بر روی سوئیچ‌ها ایجاد می‌کند و احتمال خطاهای ثانویه را در مبدل افزایش می‌دهد. بنابراین تکنیک تحمل خطا پیشنهاد شده، باید این جریان اضافی را در فازهای سالم و خطادار محدود نماید.

وقتی که خطای سوئیچ باز در سوئیچ بالا یا پایین یک فاز رخ می‌دهد، سبب حذف بخشی از جریان نیم‌سیکل منفی یا مثبت آن فاز می‌شود، در نتیجه بین جریان فاز و مقدار مرجع مربوطه، اختلاف ایجاد می‌شود. از همین روی، اختلاف بین جریان فاز و مرجع مربوطه، به‌عنوان شاخص تشخیص خطا در نظر گرفته می‌شود. شاخص تشخیص خطا به‌صورت نرمالیزه شده در نظر گرفته می‌شود تا از تغییرات بار مستقل گردد [۳۹].

اولین شاخص تشخیص خطا، جریان باقی مانده نرمالیزه شده (Nr_n) است. همان‌طور که در رابطه (۱۰) نشان داده شده است، مقدار Nr_n میانگین قدرمطلق اختلاف مقدار واقعی جریان هر فاز با مقدار مرجع مربوطه تقسیم بر قدرمطلق جریان واقعی هر فاز است. در این رابطه، i_n^* و i_n به ترتیب مقدار واقعی و مقدار مرجع جریان در هر فاز هستند. δ ، یک مقدار کوچک مثبت است.

$$Nr_n = \left\langle \frac{|i_n - i_n^*|}{\delta + |i_n|} \right\rangle \quad n = a, b, c, x, y, z \quad (10)$$

در شرایط عادی، مقدار Nr_n در تمام فازها تقریباً برابر با صفر است. اما وقتی که در فازی خطا رخ می‌دهد، Nr_n فاز مربوطه افزایش یافته و از مقدار آستانه بیشتر می‌شود. یک مقدار آستانه خوب برای تشخیص خطای مقاوم ضروری است [۳۹]. اگر مقدار آستانه ثابت بالا باشد، حساسیت خطا کاهش می‌یابد، درحالی‌که اگر مقدار آستانه ثابت پایین باشد، میزان هشدارهای اشتباه افزایش می‌یابد. بنابراین، مقدار آستانه تطبیقی بهترین جایگزین برای آستانه ثابت است. طبق رابطه (۱۱)، مقدار آستانه تطبیقی (T)، میانگین R_{max} و R_{min} است. در این معادله، R_{max} ، ماکسیمم Nr_n در همه فازها و R_{min} ، مینیمم Nr_n در همه فازها است.

$$T = \frac{R_{max} + R_{min}}{2} \quad (11)$$

$$R_{max} = \max\{Nr_a, Nr_b, Nr_c, Nr_x, Nr_y, Nr_z\}$$

$$R_{min} = \min\{Nr_a, Nr_b, Nr_c, Nr_x, Nr_y, Nr_z\}$$

در شرایط عادی، مقدار آستانه تطبیقی مشابه مقدار Nr_n است و تقریباً برابر با صفر است. اما در شرایط خطا، با تغییر ناگهانی مقدار Nr_n ، مقدار R_{max} افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، مقدار آستانه تطبیقی نیز افزایش یافته و از صفر بیشتر می‌شود [۳۶]. چون که مقدار T میانگین مقادیر R_{max} و R_{min} است، پس در فاز خطادار مقدار T کوچک‌تر از Nr_n می‌شود. البته مقدار Nr_n در فازهای غیر خطادار تغییر زیادی نمی‌کند و مقدار آن در این فازها کمتر از مقدار جدید T می‌شود. فازی که دچار خطای سوئیچ باز شده است، با در نظر گرفتن اولین شاخص تشخیص خطا (Nr_n) و مقدار آستانه تطبیقی (T) بر اساس جدول (۲) تشخیص داده می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، هر فاز دارای دو سوئیچ است. پس از تشخیص فاز خطادار، باید مشخص شود که خطا در سوئیچ بالا رخ داده است یا در سوئیچ پایین رخ داده است. بنابراین، مقدار میانگین جریان هر فاز $\langle i_n \rangle$ به‌عنوان شاخص دوم

نظر گرفته شود. ناحیه‌های ۱، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ تحت تاثیر خطای سوئیچ باز قرار می‌گیرند و بردارهای فضایی مطلوب V_2, V_0, V_6, V_{32} و V_{48} در این ناحیه‌ها، به ترتیب به بردارهای فضایی نامطلوب $V_1, V_3, V_7, V_{33}, V_{49}$ تبدیل می‌شوند و باید با بردارهای فضایی دیگری جایگزین گردند. از همین روی، بردارهای فضایی که در ناحیه‌های خطادار جایگزین بردار فضایی نامطلوب گردیده‌اند در جدول (۴) نشان داده شده است.

به منظور ارزیابی اثربخشی روش تحمل خطای پیشنهادی، شاخص اضافه جریان (I_{ov}) در فازهای سالم و خطادار، طبق رابطه (۱۳) تعریف می‌شود، که این تکنیک تحمل خطا سعی در کاهش آن دارد. در این رابطه، زیرنویس k نمایانگر فاز مبدل است و $i_{k-normal}$ و $i_{k-fault}$ جریان فاز در حالت خطادار و عادی هستند.

$$i_{k-ov} = \max \left| \frac{i_{k-fault} - i_{k-normal}}{i_{k-normal}} \right| \quad (13)$$

جدول (۴): بردارهای فضایی مطلوب، نامطلوب و بردار فضایی جایگزین در ناحیه‌های خطادار مبدل شش فاز در حالت خطای

سوئیچ باز S_{I2}

ناحیه خطادار	بردار فضایی مطلوب	بردار فضایی نامطلوب	بردار فضایی جایگزین
Reg1	$V_0(00000\downarrow)$ $V_{32}(10000\downarrow)$ $V_{48}(11000\downarrow)$	$V_1(00000\downarrow)$ $V_{33}(10000\downarrow)$ $V_{49}(11000\downarrow)$	$V_{63}(111111)$ $V_{53}(110101)$ No vector
Reg8	$V_0(00000\downarrow)$ $V_2(00001\downarrow)$ $V_6(00011\downarrow)$	$V_1(00000\downarrow)$ $V_3(00001\downarrow)$ $V_7(00011\downarrow)$	$V_{63}(111111)$ $V_{23}(010111)$ No vector
Reg9	$V_0(00000\downarrow)$ $V_2(00001\downarrow)$ $V_6(00011\downarrow)$	$V_1(00000\downarrow)$ $V_3(00001\downarrow)$ $V_7(00011\downarrow)$	$V_{63}(111111)$ $V_{23}(010111)$
Reg10	$V_0(00000\downarrow)$	$V_1(00000\downarrow)$	$V_{63}(111111)$
Reg11	$V_0(00000\downarrow)$	$V_1(00000\downarrow)$	$V_{63}(111111)$
Reg12	$V_0(00000\downarrow)$ $V_{32}(10000\downarrow)$	$V_1(00000\downarrow)$ $V_{33}(10000\downarrow)$	$V_{63}(111111)$ $V_{53}(110101)$

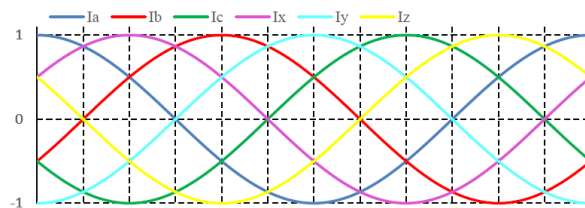
۵- نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی عملکرد تکنیک‌های پیشنهادی تشخیص و تحمل خطای سوئیچ باز در مبدل شش فاز AC-DC، چندین شبیه‌سازی در محیط سیمولینک نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. پارامترهای شبیه‌سازی مبدل شش فاز و خطای سوئیچ باز در جدول (۵) ارائه شده است. اگرچه تکنیک تحمل خطا می‌تواند بلافاصله پس از تشخیص خطا اجرا شود، اما پس از مدتی (در ثانیه $t=0.3$) انجام می‌شود تا اثربخشی این روش در نتایج شبیه‌سازی بیشتر مشخص شود. نتایج شبیه‌سازی به سه بازه زمانی تقسیم می‌شوند.

۱- بازه زمانی شرایط عادی: ثانیه $t < 0.2$

۲- بازه زمانی خطای سوئیچ باز: ثانیه $0.3 < t < 0.7$

۳- بازه زمانی اجرای تکنیک تحمل خطا: ثانیه $t > 0.7$



شکل (۶): جریان‌های شش‌فاز مبدل AC-DC در عملکرد عادی

زمانی که در مبدل خطای سوئیچ باز رخ دهد، سیگنال‌های سوئیچینگ به درستی به سوئیچ خطادار اعمال نمی‌شوند و در نتیجه، بعضی از بردارهای فضایی تحت تاثیر این خطا، از بردار فضایی مطلوب (طبق جدول (۱)) به بردار فضایی نامطلوب تبدیل می‌گردند. در تکنیک تحمل خطا پیشنهادی، از حالت افزونگی بردارهای فضایی استفاده شده است؛ به طوری که در بعضی از ناحیه‌های خطادار، بردارهای فضایی نامطلوب با بردارهای دیگری جایگزین شده است. به عنوان مثال در شکل (۲)، اگر خطای سوئیچ باز در سوئیچ S_1 رخ دهد، ناحیه‌های ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ تحت تاثیر خطای سوئیچ باز قرار می‌گیرند و بردارهای فضایی مطلوب V_{63}, V_{60}, V_{62} و V_{47}, V_{39} به ترتیب به بردارهای فضایی نامطلوب $V_7, V_{15}, V_{28}, V_{30}, V_{31}$ تبدیل می‌شوند. همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است، تکنیک تحمل خطا با استفاده از ویژگی افزونگی بردارهای فضایی مبدل شش فاز طبق شکل (۴)، در هر یک از ناحیه‌های خطادار، بردار فضایی دیگری را جایگزین بردار فضایی نامطلوب نموده است. البته امکان جایگزینی برای بردارهای فضایی متوسط وجود ندارد، چون که میانگین بردارهای فضایی در هر دوره زمانی، در صفحه X-Y دیگر صفر نخواهد شد.

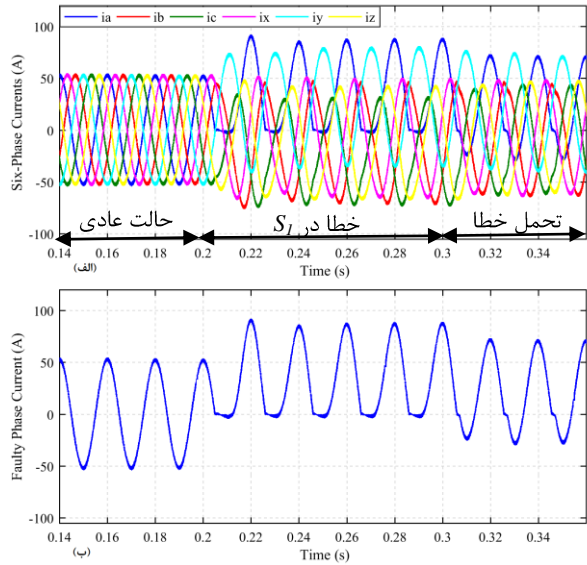
جدول (۳): بردارهای فضایی مطلوب، نامطلوب و بردار فضایی جایگزین در ناحیه‌های خطادار مبدل شش فاز در حالت خطای

سوئیچ باز S_1

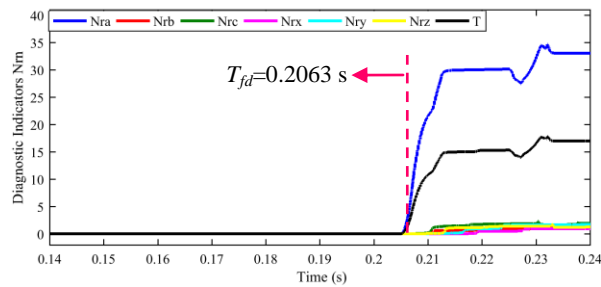
ناحیه خطادار	بردار فضایی مطلوب	بردار فضایی نامطلوب	بردار فضایی جایگزین
Reg4	$V_{60}(111100)$ $V_{62}(111110)$ $V_{63}(111111)$	$V_{28}(011100)$ $V_{30}(011110)$ $V_{31}(011111)$	No vector $V_{20}(010100)$ $V_0(000000)$
Reg5	$V_{62}(111110)$ $V_{63}(111111)$	$V_{30}(011110)$ $V_{31}(011111)$	$V_{20}(010100)$ $V_0(000000)$
Reg6	$V_{63}(111111)$	$V_{31}(011111)$	$V_0(000000)$
Reg7	$V_{63}(111111)$	$V_{31}(011111)$	$V_0(000000)$
Reg8	$V_{47}(101111)$ $V_{63}(111111)$	$V_{15}(001111)$ $V_{31}(011111)$	$V_5(000101)$ $V_0(000000)$
Reg9	$V_{39}(100111)$ $V_{47}(101111)$ $V_{63}(111111)$	$V_7(000111)$ $V_{15}(001111)$ $V_{31}(011111)$	No vector $V_5(000101)$ $V_0(000000)$

اگر خطای سوئیچ باز در سوئیچ پایینی مبدل شش فاز رخ دهد، بردارهای فضایی که سیگنال "0" را به فاز خطادار اعمال می‌کنند، به بردارهای نامطلوب تبدیل می‌شوند و باید بر اساس تکنیک تحمل خطا، با بردارهای فضایی دیگری، مطابق شکل (۴) جایگزین گردند. به عنوان مثال، خطای سوئیچ باز در سوئیچ S_{12} مطابق با شکل (۲) در

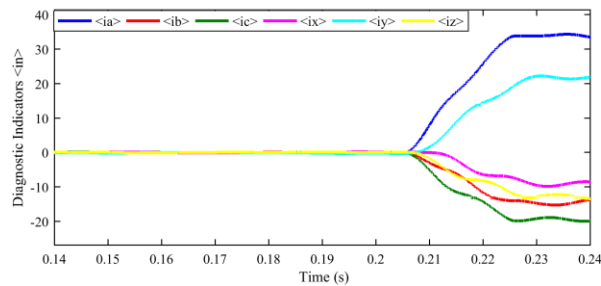
نشان داده شده است، مقدار $\langle i_a \rangle$ بزرگ تر از صفر است، پس خطای سوئیچ باز در سوئیچ بالایی فاز A رخ داده است.



شکل (۸): نتایج شبیه سازی جریان های مبدل شش فاز قبل و بعد از خطای سوئیچ باز در سوئیچ S_1 (الف) همه فازها (ب) فاز خطا دار



شکل (۹): نتایج شبیه سازی شاخص تشخیص خطا Nr_n برای خطای سوئیچ باز در فاز A



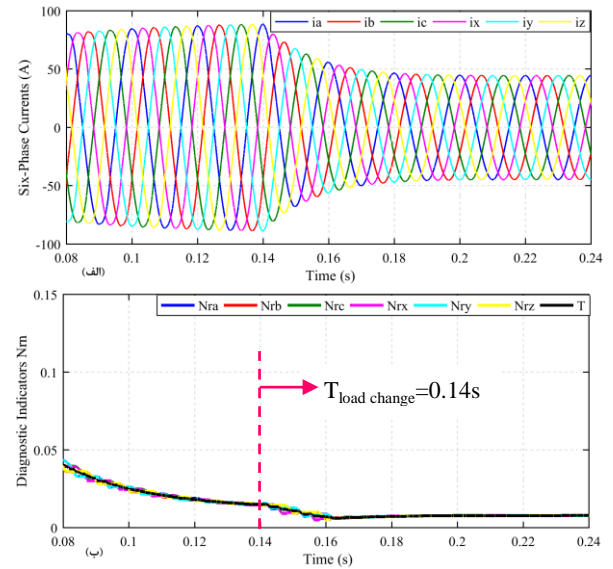
شکل (۱۰): نتایج شبیه سازی شاخص تشخیص خطا $\langle i_n \rangle$ برای خطای سوئیچ باز در سوئیچ S_1

پس از شناسایی سوئیچ خطا دار r_k مطابق جدول (۳)، تکنیک تحمل خطا در ثانیه $t = 0/3$ اجرا می شود. همان طور که در شکل (۸-ب) نشان داده شده است، وقتی که S_1 دچار خطای سوئیچ باز شده است، در ناحیه های ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ بردارهای فضایی V_{20} ، V_0 و V_5 ، به ترتیب جایگزین بردارهای فضایی نامطلوب V_{30} ، V_{15} و V_{31} می شوند. با استفاده از این تکنیک تحمل خطا، علاوه بر کاهش اضافه جریان در فازهای سالم و خطا دار، THD جریان در این فازها

جدول (۵): پارامترهای شبیه سازی مبدل AC-DC شش فاز

ولتاژ منبع	۲۳۰ ولت	ولتاژ لینک-DC	۷۰۰ ولت
فرکانس	۵۰ هرتز	خازن لینک-DC	۰/۰۲۲ فاراد
اندوکتانس	۵ میلی-هانری	مقاومت بار DC	۱۰ اهم
نوع کنترلر	VOC(dq)	زمان شروع خطا	۰/۲ ثانیه
		زمان شروع تحمل خطا	۰/۳ ثانیه

قبل از اجرای تکنیک های تشخیص و تحمل خطا، باید مقاوم بودن تکنیک تشخیص خطا در برابر تغییرات بار ارزیابی شود. در شکل (۷-الف) فرض گردیده است، در ثانیه $t = 0/14$ بار متصل به مبدل نصف شده است. همان طور که در شکل (۷-ب) نشان داده شده است، تغییرات بار بر همه فازها تاثیر می گذارد و مقدار Nr_n و T را افزایش می دهد، اما این مقادیر نزدیک یکدیگر می مانند. بنابراین، روش تشخیص خطا چنین تغییراتی را به عنوان شرایط بدون خطا به درستی تشخیص می دهد و در برابر آن مقاوم است.

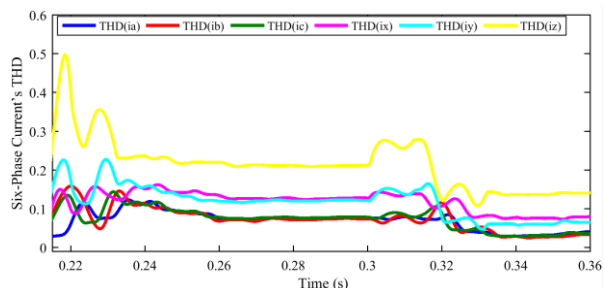


شکل (۷): نتایج شبیه سازی جهت ارزیابی مقاوم بودن تکنیک تشخیص خطا در مقابل تغییرات بار (الف) جریان های شش فاز (ب) شاخص های تشخیص Nr_n

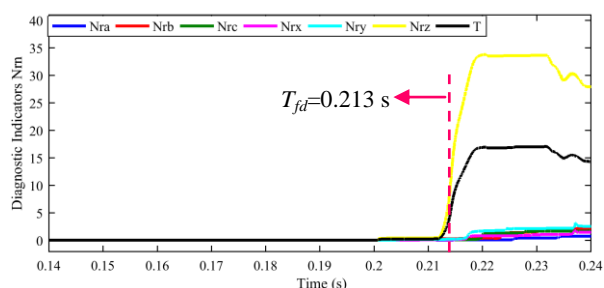
با توجه به شکل (۸-الف)، خطای سوئیچ باز در سوئیچ S_1 در ثانیه $t = 0/2$ رخ داده است که باعث ایجاد اغتشاش در جریان های مبدل شش فاز شده است. بر اثر این خطا، بخشی از جریان نیم سیکل منفی فاز A حذف می شود، در حالی که فازهای دیگر از اضافه جریان رنج می برند.

در شرایط عادی، مقادیر جریان های واقعی و مرجع نزدیک به هم هستند، پس مقادیر Nr_n و T تقریباً صفر می باشند. پس از شروع خطای سوئیچ باز، مقدار Nr_n در فاز خطا دار افزایش می یابد، که به پیروی از آن، مقدار T افزایش می یابد. از آنجاکه $(T < Nr_n)$ ، $(T > Nr_b)$ ، $(T > Nr_c)$ ، $(T > Nr_x)$ ، $(T > Nr_y)$ و $(T > Nr_z)$ است، مطابق جدول (۲) و شکل (۹)، خطای سوئیچ باز در فاز A در ثانیه $T_{fd} = 0/2063$ تشخیص داده می شود. همان طور که در شکل (۱۰)

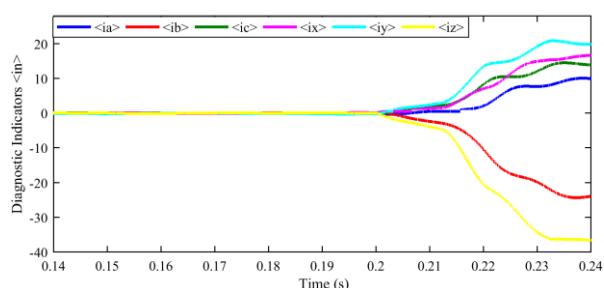
مقدار T کوچک تر است. مطابق شکل (۱۴)، هنگامی که $(T > Nr_a)$ ، $(T > Nr_b)$ ، $(T > Nr_c)$ ، $(T > Nr_x)$ ، $(T > Nr_y)$ و $(T < Nr_z)$ است، خطای سوئیچ باز در ثانیه $T_{fd} = 0.213$ در فاز Z تشخیص داده می شود. همان طور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است، مقدار $\langle i_z \rangle$ کوچک تر از صفر است، بنابراین خطای سوئیچ باز در سوئیچ پایینی فاز Z (S_{12}) رخ داده است.



شکل (۱۳): نتایج شبیه سازی THD جریان فازهای سالم و خطادار برای خطای سوئیچ باز در سوئیچ S_{12}



شکل (۱۴): نتایج شبیه سازی شاخص تشخیص خطا Nr_n برای خطای سوئیچ باز در فاز Z

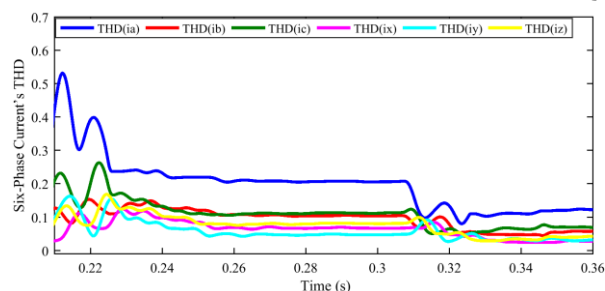


شکل (۱۵): نتایج شبیه سازی شاخص تشخیص خطا $\langle i_n \rangle$ برای خطای سوئیچ باز در سوئیچ S_{12}

در خطای سوئیچ باز، حداکثر مقدار ریپل ولتاژ لینک-DC کمتر از ۲ درصد مقدار مرجع این ولتاژ است، که مقدار قابل قبولی است و با اجرای تکنیک تحمل خطا، کمی بهبود یافته است. در شکل (۱۶) ریپل ولتاژ لینک-DC برای خطای سوئیچ باز در سوئیچ های بالا و پایین نشان داده شده است.

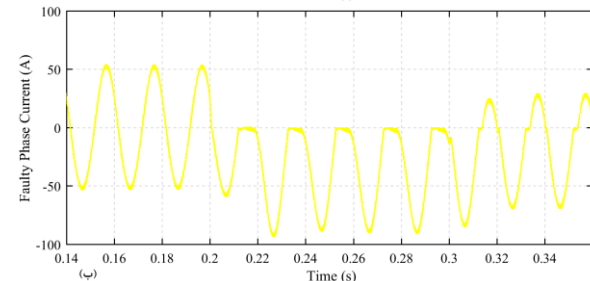
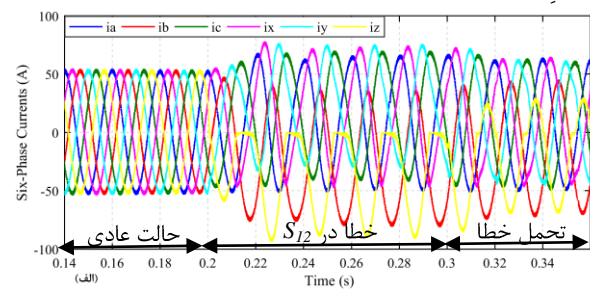
جهت بررسی بهتر نتایج شبیه سازی تحلیل عددی بر اساس شاخص اضافه جریان (I_{ov}) و THD برای فازهای سالم و خطادار در زمان خطای سوئیچ باز S_1 و S_{12} و پس از اجرای تکنیک تحمل خطا به ترتیب در جدول (۶) و جدول (۷)، ارائه شده است. بر اساس این جدول، تاثیر تکنیک تحمل خطا برای فاز خطادار کاملاً مشهود است.

نیز کاهش می یابد. THD فازهای سالم و خطادار در شکل (۱۱) ارائه شده است.



شکل (۱۱): نتایج شبیه سازی THD جریان فازهای سالم و خطادار برای خطای سوئیچ باز در سوئیچ S_1

بر اثر خطای سوئیچ باز در سوئیچ پایین یکی از فازهای مبدل شش فاز، جریان نیم سیکل مثبت فاز خطادار محدود می گردد و علاوه بر فاز خطادار، فازهای سالم هم متحمل اضافه جریان خواهند شد. به عنوان مثال فرض گردد، سوئیچ S_{12} دچار خطای سوئیچ باز شده است. همان طور که در شکل (۱۲-الف) نشان داده شده است، مطابق جدول (۴)، با جایگزینی بردارهای فضایی V_{53} و V_{23} ، V_{63} به ترتیب به جای بردارهای فضایی نامطلوب V_1 و V_3 ، ناحیه های ۱، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲، مقدار اضافه جریان فازهای سالم و خطادار کاهش خواهد شد. به طور خاص کاهش مقدار اضافه جریان فاز خطادار Z پس از اجرای تکنیک تحمل خطا در شکل (۱۲-ب) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۳)، با اجرای تکنیک تحمل خطا، علاوه بر مقدار اضافه جریان، مقدار THD جریان فازهای سالم و خطادار کاهش یافته است.



شکل (۱۲): نتایج شبیه سازی جریان های مبدل شش فاز قبل و بعد از خطای سوئیچ باز در سوئیچ S_{12} (الف) همه فازها (ب) فاز خطادار

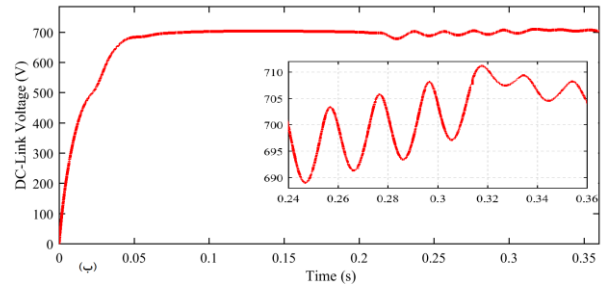
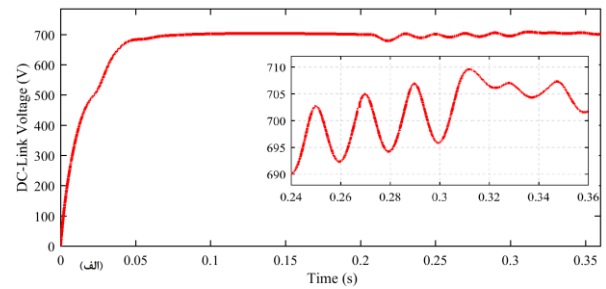
خطای سوئیچ باز زمانی شناسایی خواهد شد که مقدار Nr_n در یک فاز از مقدار T بزرگ تر باشد، در حالی که در فازهای دیگر از

۶- نتیجه گیری

این مقاله روش تشخیص و تحمل خطا در مبدل شش فاز AC-DC برای خطاهای سوئیچ باز پیشنهاد می کند. رویکرد تشخیص خطا معرفی شده دارای یک فرایند ساده است که با سیگنال های کنترل کننده مبدل ادغام شده است و به محاسبات پیچیده، مدل سازی دقیق سیستم و تجهیز اضافی نیاز ندارد. این روش در برابر تغییرات بار مقاوم است، زیرا از یک شاخص خطا نرمالیزه شده و یک آستانه تطبیقی استفاده نموده است. نوآوری اصلی این تحقیق، تحمل خطاهای سوئیچ باز بدون افزودن تجهیزات به مدار و فقط با تغییر سیگنال های سوئیچینگ است که در ناحیه های خطادار، با استفاده از حالت افزونگی به دنبال جایگزینی برای بردارهای فضایی نامطلوب است. تکنیک پیشنهادی، مقدار اضافه جریان فازهای سالم و خطادار را کاهش داده است و THD این فازها نیز کاهش یافته است. با توجه به جدول (۶) و جدول (۷)، بیشترین تاثیر اجرای تکنیک تحمل خطا، در فاز خطادار است، به طوری که اضافه جریان فاز خطادار حداقل نصف شده است و مقدار THD آن حداقل ۳۰ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این، ولتاژ لینک-DC با یک ریبیل قابل قبول، که کوچک تر از ۲ درصد مقدار مرجع است، تثبیت می شود. اثربخشی روش های تشخیص و تحمل خطا با نتایج شبیه سازی برای چند مورد مختلف خطای سوئیچ باز تأیید گردیده است.

مراجع

- [1] Shahbazi, M., Poure, P., & Saadate, S., Real-time power switch fault diagnosis and fault-tolerant operation in a DFIG-based wind energy system. *Renewable Energy*, 2018, **116**: p. 209-218.
- [۲] حریری علی محمد، دامکی علی آباد علی اکبر. طراحی جامع و ساخت موتور سنکرون آهن ربای دائم با هدف دستیابی به کمترین گشتاور دندانه. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۱): ۱۱۳-۱۲۱.
- [3] Nasiri, M., Mobayen, S., & Zhu, Q. M. Super-twisting sliding mode control for gearless PMSG-based wind turbine. *Complexity*, 2019.
- [4] Wang, C. N., Lin, W. C., & Le, X. K. Modelling of a PMSG wind turbine with autonomous control. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- [5] Nahome Alemayehu A, Zaimeddine R, Liu B, Undeland T., Vector control of direct drive six phase permanent magnet synchronous generators. InConf. Rec. IEEE PES PowerTech, 2011. (pp. 1-7).
- [6] Qiao, W., & Lu, D. A survey on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis—Part I: Components and subsystems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015. **62**(10): p. 6536-6545.
- [۷] رحیمی توحید، حسینی سید حسین، صباحی مهران، عیابور مهدی، قره پتیان گئورگ. تحلیل قابلیت اطمینان آرایش های مازاد متداول برای کلیدهای قدرت و ارائه ساختار مازاد جدید. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۱): ۸۹-۱۰۲.



شکل (۱۶): نتایج شبیه سازی ریبیل ولتاژ لینک-DC با اجرای تکنیک تحمل خطای سوئیچ باز (الف) خطای سوئیچ S_1 (ب) خطای سوئیچ S_{12}

جدول (۶): تحلیل عددی شاخص اضافه جریان (I_{ov}) و THD برای

خطای سوئیچ باز S_1

فاز	وضعیت	در زمان خطا سوئیچ باز		پس از اجرای تکنیک تحمل خطا	
		I_{ov}	THD	I_{ov}	THD
A	خطادار	۰/۶۷	۰/۲۱	۰/۳۳	۰/۱۲۵
B	بدون خطا	۰/۳۷	۰/۱۰۵	۰/۱۷	۰/۰۶
C	بدون خطا	۰/۳۶	۰/۱۱۵	۰/۱۶	۰/۰۷
X	بدون خطا	۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۱۷	۰/۰۳
Y	بدون خطا	۰/۴۸	۰/۰۵	۰/۳۸	۰/۰۳
Z	بدون خطا	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۰۴

جدول (۷): تحلیل عددی شاخص اضافه جریان (I_{ov}) و THD برای

خطای سوئیچ باز S_{12}

فاز	وضعیت	در زمان خطا سوئیچ باز		پس از اجرای تکنیک تحمل خطا	
		I_{ov}	THD	I_{ov}	THD
A	بدون خطا	۰/۲۳	۰/۰۷۵	۰/۱۷	۰/۰۴
B	بدون خطا	۰/۴۷	۰/۰۷	۰/۳۵	۰/۰۳
C	بدون خطا	۰/۲۷	۰/۰۸	۰/۱۵	۰/۰۳۵
X	بدون خطا	۰/۴۱	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۰۸
Y	بدون خطا	۰/۳۹	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۰۷
Z	خطادار	۰/۷۰	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۱۴

- turbine applications. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 2012. **60**(9): p. 3957-3967.
- [22] Abramik, S., Sleszynski, W., Nieznanski, J., & Piquet, H. A diagnostic method for on-line fault detection and localization in VSI-fed AC drives. In 10th European Conference on Power Electronics and Applications, 2003. EPE. p.1-8.
- [23] Khomfoi, S., Sae-Kok, W., & Ngamroo, I. An open circuit fault diagnostic technique in IGBTs for AC to DC converters applied in microgrid applications. *Journal of Power Electronics*, 2011. **11**(6): p. 801-810.
- [24] Estima, J. O., & Cardoso, A. J. M. A new approach for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage-source inverters. *IEEE transactions on industry applications*, 2011. **47**(6): p.2487-2494.
- [25] Jlassi, I., & Cardoso, A. J. M. IGBTs and current sensors fault diagnosis in direct-drive PMSG wind turbine systems using adaptive thresholds. In IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017. IEEE. p. 5072-5077.
- [26] Jlassi, I., Estima, J. O., El Khil, S. K., Bellaaj, N. M., & Cardoso, A. J. M. A robust observer-based method for IGBTs and current sensors fault diagnosis in voltage-source inverters of PMSM drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016. **53**(3): p. 2894-2905.
- [27] Duan, P., Xie, K. G., Zhang, L., & Rong, X. Open-switch fault diagnosis and system reconfiguration of doubly fed wind power converter used in a microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010. **26**(3): p.816-821.
- [28] Mohamed, A., Vanteddu, S., & Mohammed, O. Protection of bi-directional AC-DC/DC-AC converter in hybrid AC/DC microgrids. In 2012 Proceedings of IEEE Southeastcon. 2012. IEEE. p. 1-6.
- [29] Aboelhassan, M. O., Raminosa, T., Goodman, A., De Lillo, L., & Gerada, C. Performance evaluation of a vector-control fault-tolerant flux-switching motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012. **60**(8): p. 2997-3006.
- [30] Hu, Y., Zhang, L., Huang, W., & Bu, F. A fault-tolerant induction generator system based on instantaneous torque control. *IEEE Transactions on Energy Conversion (ITC)*, 2010. **25**(2): p.412-421.
- [31] Welchko, B. A., Lipo, T. A., Jahns, T. M., & Schulz, S. E. Fault tolerant three-phase AC motor drive topologies: a comparison of features, cost, and limitations. *IEEE Transactions on power electronics*, 2004. **19**(4): p. 1108-1116.
- [32] de Araujo Ribeiro, R. L., Jacobina, C. B., Da Silva, E. R. C., & Lima, A. M. N. Fault-tolerant voltage-fed PWM inverter AC motor drive systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004. **51**(2): p. 439-446.
- [33] Freire, N. M., & Cardoso, A. J. M. A fault-tolerant PMSG drive for wind turbine applications with minimal increase of the hardware requirements. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013. **50**(3): p. 2039-2049.
- [34] Freire, N. M., & Cardoso, A. J. M. Fault-tolerant PMSG drive with reduced DC-link ratings for wind turbine applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2013. **2**(1): p. 26-34.
- [35] Im, W. S., Moon, J. J., Kim, J. M., Lee, D. C., & Lee, K. B. Fault tolerant control strategy of 3-phase AC-DC
- [8] Kaidis, C., Uzunoglu, B., & Amoiralis, F. Wind turbine reliability estimation for different assemblies and failure severity categories. *IET Renewable Power Generation*, 2015. **9**(8): p. 892-899
- [9] Guo, H., Guo, S., Xu, J., & Tian, X. Power Switch Open-Circuit Fault Diagnosis of Six-Phase Fault Tolerant Permanent Magnet Synchronous Motor System Under Normal and Fault-Tolerant Operation Conditions Using the Average Current Park's Vector Approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020. **36**(3): p. 2641-2660.
- [10] Im, W. S., Kim, J. M., Lee, D. C., & Lee, K. B. Diagnosis and fault-tolerant control of three-phase AC-DC PWM converter systems. *IEEE transactions on industry applications*, 2013. **49**(4): p. 1539-1547.
- [11] Asghar, F., Talha, M., & Kim, S. H. Neural network based fault detection and diagnosis system for three-phase inverter in variable speed drive with induction motor. *Journal of Control Science and Engineering*, 2016.
- [12] Jlassi, I., & Cardoso, A. J. M. Fault-tolerant back-to-back converter for direct-drive PMSG wind turbines using direct torque and power control techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019. **34**(11): p. 11215-11227.
- [13] Jlassi, I., Estima, J. O., El Khil, S. K., Bellaaj, N. M., & Cardoso, A. J. M. Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of PMSG drives for wind turbine systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014. **30**(5): p. 2689-2702.
- [14] Mao, Y., Peng, T., Han, H., Zhao, S., & Li, Z. Open-circuited fault detection on switch of converter in double-fed wind power generator set based on state observer. *Computer Aided Engineering*, 2015. **24**(3): p. 57-61.
- [15] Yan, H., Xu, Y., Cai, F., Zhang, H., Zhao, W., & Gerada, C. PWM-VSI fault diagnosis for a PMSM drive based on the fuzzy logic approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018. **34**(1): p. 759-768.
- [16] Karimi, S., Gaillard, A., Poure, P., & Saadate, S. FPGA-based real-time power converter failure diagnosis for wind energy conversion systems. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2008. **55**(12): p. 4299-4308.
- [17] Zhao, H., & Cheng, L. Open-switch fault-diagnostic method for back-to-back converters of a doubly fed wind power generation system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017. **33**(4): p. 3452-3461.
- [18] Mendes, A. M., & Cardoso, A. M. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach. In *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. 1999. IEEE. p. 704-706.
- [19] Mendes, A. M. S., Cardoso, A. M., & Saraiva, E. S. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by Park's vector approach. In *1998 Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*, 1998. IET. p. 538-543.
- [20] Freire, N. M., Estima, J. O., & Cardoso, A. M. Converters fault-diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications. In *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. 2010. IEEE. p. 403-408.
- [21] Freire, N. M., Estima, J. O., & Cardoso, A. J. M. Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind

- PWM converter under multiple open-switch faults conditions. In 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) 2012. IEEE. p. 789-795.
- [36] Bolbolnia, R., Heydari, E., & Abbaszadeh, K. Fault Tolerant Control in Direct-Drive PMSG Wind Turbine Systems under Open-Circuit Faults. In 2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC). 2020. IEEE. p. 1-5.
- [37] Blaabjerg, F. (Ed.). Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 2 (Vol. 2). Academic Press. 2018.
- [38] Ariff, E. A. R. E., Dordevic, O., & Jones, M. A space vector PWM technique for a three-level symmetrical six-phase drive. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017. 64(11), 8396-8405.
- [39] El Khil, S. K., Jlassi, I., Cardoso, A. J. M., Estima, J. O., & Mrabet-Bellaaj, N. Diagnosis of open-switch and current sensor faults in PMSM drives through stator current analysis. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019. 55(6): p. 5925-5937.

زیر نویس ها

¹ Redundancy

² Triode for alternating currents (TRIACs)

³ Observer

⁴ Back to back converter

⁵ Kirchhoff