

مقایسه روشهای تشخیص خطای مدار باز IGBT در اینورترهای PWM منبع ولتاژ درایو موتورهای القایی

حامد اکبری^۱، محمد مردانه^۲، امیرحسین رجایی^۳ و صمد تقی پور^۴
^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شیراز، hamed_power2006@yahoo.com
^۲استادیار، دانشگاه صنعتی شیراز، mardaneh@sutech.ac.ir
^۳استادیار، دانشگاه صنعتی شیراز، a.rajaei@sutech.ac.ir
^۴استادیار، دانشگاه شهرکرد، samadtb@yahoo.com

چکیده - امروزه به طور گسترده از اینورترها در درایوهای صنعتی استفاده می شود و با توجه به شرایط و محیط کار، انواع استرس و فشار به تجهیزات فوق اعمال می شود که به نوبه خود منجر به ایجاد انواع خطا در این تجهیزات می شود. بنابراین تشخیص به موقع و رفع چنین خطاهایی باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می گردد. یکی از این خطاها خطای مدار باز IGBT ناشی از دست رفتن فرمان گیت یا قطع شدن اتصالات در اینورترهای PWM منبع ولتاژ می باشد. در این مقاله سعی شده مهمترین روشهای تشخیص خطای مدار باز که تا کنون ارائه شده اند در پارامترهایی نظیر کارایی و زمان تشخیص و ... با یکدیگر مقایسه و پیشنهادهای نیز ارائه گردد. کلید واژه - اینورترهای PWM، تشخیص خطای مدار باز، تعیین محل خطا، درایوهای سرعت-متغیر، IGBT.

۵- خطای سنسورها (سنسور جریان AC، سنسور ولتاژ
لینک DC)

۶- خطا در تجهیزات کنترلی
به طور کلی خطاهای درایو را می توان به گروههای مختلف تقسیم بندی کرد:

۱- خطاهایی که در نهایت منجر به از کار افتادن درایو می شود

۲- خطاهایی با امکان بهره برداری اضطراری

۳- شروع شدن خطا با اثر کم بر روی کارکرد

تشخیص و مانیتور کردن خطا در درایوهای کنترل سرعت ac معمولاً با اندازه گیری، تطبیق و ذخیره سیگنالهایی از درایو، نظیر جریان، ولتاژ، شار، گشتاور، لرزش، سرعت یا سیگنالهای مشابه صورت می پذیرد. بعضی از این سیگنالها جهت کارهای کنترلی اندازه گیری می شوند. این سیگنالها با توجه به کاربرد تطبیق پیدا می کنند یعنی فیلتر می شوند و اغلب با تبدلات فوریه یا تکنیک بردار فضایی و مولفه های متقارن تبدیل می شوند. گام بعدی تعیین خطا است و آخرین گام تعیین محل خطا و عملکرد متناسب با آن است. که در این خصوص راههای مختلفی به کار برده می شود که به روشهای زیر دسته بندی می شوند:

۱- روشهای دانش پایه

۲- روشهایی بر اساس مدل

۳- استفاده از سیستمهای expert

۱- مقدمه

ویژگیهای خاص موتورهای القایی باعث شده است که استفاده از این نوع موتورها گسترش یافته و در همین راستا در کاربردهای مختلف جهت کنترل سرعت این نوع ماشینها استفاده از انواع درایوهای الکتریکی نیز زیاد شود که این موضوع به نوبه خود باعث شده است که مشکلات و خطاها بیشتر شده و لزوم تشخیص این خطاها و افزایش قابلیت اطمینان در سیستمها بیش از پیش خود را نشان دهد. ساختار یک درایو الکتریکی PWM منبع ولتاژ متشکل از یکسو کننده سه فاز، راکتور ورودی، بانک خازن، لینک DC، اینورتر، چاپر، اسنابر، راکتور خروجی و سیستم کنترل می باشد که خطا می تواند به صورت مدار باز یا اتصال کوتاه در هر یک از قسمتهای آن رخ دهد.

این خطاها شامل موارد زیر می باشند:

۱- خطا در ورودی سه فاز (خطای تک فاز به زمین، خطای

بین دو فاز، و مدار باز شدن فازها)

۲- خطای لینک DC (خطای زمین، خطا در چاپر)

۳- خطا در نیمه هادیهای قدرت (اتصال کوتاه یا مدار باز

شدن نیمه هادیهای یکسو کننده و اینورتر)

۴- خطای اتصال کوتاه خازنهای لینک DC

۴- استفاده از شبکه های عصبی

۵- استفاده از منطق فازی انواع دیگری از هوش مصنوعی که غالباً با روش دسته بندی خطاها یا تکنیکهای درختی خطاها ترکیب می شوند.

تکنیکهایی که بر پایه مدل هستند اگر مدل فرآیند دقیق بدست آید تکنیکهای خوبی هستند. در درایو موتورهای القایی به سختی می توان یک مدل دقیق از سیستم بدست آورد. بدست آوردن مدل اینورتر (شامل اسنابر خازن و مقاومتها) نه تنها سخت است بلکه بدلیل پارازیتها و محدودیتها و مفروضات غیر قابل اجتناب، دقیق هم نیستند. بنابراین روشهایی که به مدل نیاز ندارند جذاب ترند.

۲- روش های تشخیص خطا

روش برداری پارک [3]: تشخیص در این روش بر اساس محاسبه موقعیت مسیر جریان در نقطه میانی می باشد که مقدار میانگین بردار فضایی جریان در یک دوره می باشد در ابتدا متوسط جریان سه فاز محاسبه می شود سپس تبدیل پارک به کار برده می شود تا زاویه فاز و جریان ac بدست آید. در یک سیستم نرمال مقدار میانگین صفر است و مسیر بردار جریانیک دایره است. حال اگر خطایی رخ دهد اندازه بردار فضایی صفر نخواهد بود. نیمه هادی معیوب را می توان با زاویه فاز تعیین کرد.

روش جریان DC نرمالیزه شده [4],[5]: این روش در واقع اصلاحی از روش برداری پارک است که مشکل عمده آن وابستگی آن به بار است. برای حل این مشکل با استفاده از رابطه زیر جریان DC نرمالیزه می شود:

$$\mu_v = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N I_v(k\tau) \quad (1)$$

$$\gamma_i = \frac{\mu_i}{\sqrt{a_{1,i}^2 + b_{1,i}^2}}$$

$i \in (a, b, c)$
 $a_1(a, b, c)$ و $b_1(a, b, c)$ ضرایب هارمونیک مرتبه اول هستند.

مقدار نرمالیزه شده برای هر فاز محاسبه می گردد تا سوئیچ معیوب شناسایی گردد. در نهایت $\gamma_{a,b,c}$ با مقدار تجربی 0.45 مقایسه می گردد.

روش جریان DC نرمالیزه شده اصلاح شده [4],[5]: در روش قبل وقتی از کنترل حلقه بسته استفاده می شود، مشکلاتی وجود دارد. در این روش نیز از همان الگوریتم قبلی استفاده می شود با این تفاوت که راههای کمتری برای تعیین محل خطا استفاده می گردد. تنها بزرگترین مقدار قدر مطلق بین $\gamma_{a,b,c}$ با

0.45 مقایسه می شود. جدول ۳-۱ جهت تعیین محل سوئیچ معیوب در این روش استفاده می شود.

روش شیب [6]: برای تشخیص خطا، شیب Ψ مربوط به قطر مسیر بردار جریان استفاده می شود که از رابطه زیر تعریف می شود:

$$\Psi = \frac{i_{dk} - i_{d(k-1)}}{i_{qk} - i_{q(k-1)}} \quad (2)$$

که i_{dk} و i_{qk} به ترتیب نمونه مولفه های جریان محور d و محور q هستند. مسیر جریان با محاسبه تبدیل پارک حاصل می شود و شیب قطر آن برای تشخیص ساق معیوب اینورتر و صفر شدن نیم سیکل شکل موج جریان نیز جهت تشخیص محل سوئیچ معیوب استفاده می شود.

در این روش برای تشخیص خطا لازم است پلاریته جریان مشخص باشد که می توان با نمودارهای Schmitt-trigger وضعیت پلاریته جریان را مشخص کرد. جدول زیر وضعیت فازها را در حالت خطا نشان می دهد.

جدول شماره ۱: وضعیت فازها در حالت خطا

Faulty Phase	Phase (a)	Phase (b)	Phase (c)
Ψ	0	$\sqrt{3}$	$-\sqrt{3}$

روش جریان مستقیم ساده [4],[5]: در این روش از مقدار میانگین جریان سه فاز برای تشخیص خطا استفاده می شود. بیشترین مقدار قدر مطلق جریان dc سه فاز، با یک حد مقایسه و ساق معیوب مشخص می گردد. و سوئیچ معیوب نیز با پلاریته این مقدار تعیین می شود. در این روش با استفاده از رابطه زیر مولفه مستقیم برای هر یک از سه فاز محاسبه می شود:

$$\mu_v = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N I_v(k\tau) \quad (3)$$

در این روش به نرمالیزاسیون و تبدیل نیازی نیست. همانطور که در بالا اشاره شد جهت تشخیص بیشترین مقدار مولفه مستقیم با یک حد مقایسه و سوئیچ معیوب مشخص می گردد.

روش مسیر بردار جریان و فرکانس لحظه ای بردار فضایی جریان AC [6]: همانطور که از نام این روش مشخص است در این شیوه از فرکانس لحظه ای بردار فضایی جریان، جهت تشخیص خطای مدار باز استفاده می کنیم. هنگامی که خطای مدار باز در سوئیچ رخ می دهد، فرکانس لحظه ای بردار فضایی جریان روی قطر نیم دایره صفر است. برای تشخیص خطا کافی است که f_i کمتر از یک حد مشخص باشد. این روش فقط خطای مدار باز را تشخیص می دهد اما محل آن را نمی تواند تعیین کند.

مقایسه ولتاژ AC و مقدار مرجع در حوزه زمان [7,11]: در این روش از تکنیکی استفاده میشود که نیاز به اندازه گیری ولتاژ بوده و بر اساس مدل تحلیلی VSI می باشد. در این روش سعی می شود که فاصله زمانی بین رخ دادن خطا و تشخیص آن کم شود. تحلیل در این روش بر این اساس است که وقوع فالت باعث ایجاد خطا در ولتاژ نسبت به حالت عادی می شود. لذا برای تشخیص ولتاژ اندازه گیری شده با ولتاژ مرجع که حاصل از سیگنالهای مرجع PWM می باشد مقایسه می گردد. این روش در قالب روشهایی است که بر اساس اندازه گیری می باشد. این اندازه گیریها شامل ولتاژ قطب، ولتاژ ورودی سیستم و ولتاژ طبیعی ماشین. سیگنال خطای اختلاف بین مقدار اندازه گیری شده ولتاژ و ولتاژ مرجع جهت تعیین خطا و سوییچ معیوب استفاده می شود.

تشخیص با استفاده از ولتاژ بین سوییچهای پایینی [8]: تشخیص در این روش بر این اساس است که در زمان وقوع خطای مدار باز اختلاف ولتاژ بین سوییچهای پایینی حدود نصف ولتاژ باس است. به طور عادی این ولتاژ صفر یا به اندازه ولتاژ باس است.

تشخیص خطای Centroid-Based [9]: در این روش الگوریتمها از الگویی متقارن میان قسمت مثبت و منفی محورهای $\alpha\beta$ استفاده می کنند. در این روش جریان سه فاز abc با تبدیل کنکور دیا به $\alpha\beta$ تبدیل می شود. یک خطای مدار باز زمانی مشخص می شود که یک مقدار مرکز ثقل در مبدا و مرکز نباشد. با تبدیل جریان استاتور یک موتور القایی و رسم الگوی آن بر حسب آلفا و بتا می توان یک شکل دایره اییا بیضوی بدست آورد. نمودار جریان استاتور یک موتور القایی در حالت سالم یک دایره است (که اندازه آن بستگی به بار دارد دایره بزرگتر برای بار بزرگتر و بر عکس). تغییرات در شکل این دایره نشان از ایجاد خطا در جریان است.

روش تشخیصی الگوی جریان در حوزه زمان [10]: در این روش، حالتی خطای سیستم اینورتر با استفاده از الگوی شکل موج جریان در حوزه زمان توصیف می شود. این الگوی توصیفی با پارامترهای زیر تعیین می شود: مقدار dc، پلاریته مقدار متوسط جریان در یک چهارم اول و دوم کل دوره تناوب، که هر کدام می تواند کوچکتر یا بزرگتر از صفر باشد.

تشخیص قواعد رفتارهای مبدل در حوزه زمان [11]: این روش بر اساس جریان لینک dc در هر ساق، جریان AC و ولتاژها می باشد. با توجه به اینکه اندازه گیری جریان dc در هر ساق مشکل

می باشد با استفاده از قانون کیرشهف مقدار آن برای همه حالتی سوییچها محاسبه می گردد. این قواعد رفتاری دانش پایه در حالت آفلاین اثبات شده است. با این حال تعیین رفتار کامل سوییچینگ نیازمند سنسورهای اضافی و محاسبات بیشتر است.

روش تحلیل طیف [12]: در این روش طیف جریان تحلیل می شود تا مشخصه هاییک سوییچ معیوب تعیین شود. جهت تحلیل طیف از تبدیل فوریه سریع استفاده می شود. که نیاز به توان محاسباتی بالایی دارد.

روش انحراف جریان [13]: در این روش جریان خروجی اینورتر نرمالیزه می شود. اگر اینورتر به موتور وصل باشد سپس متغیرهای حالت ماشین ارزیابی می شوند. انحراف c جریان اندازه گیری شده $i_{s,meas}$ از جریان مرجع $i_{s,ref}$ جهت تشخیص خطا استفاده می شود.

$$c = i_{s,ref} - i_{s,meas}$$

$$c^m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi mk/N} \quad (4)$$

با بکارگیری تبدیل فوریه مقدار میانگین c^0 و مولفه اصلی c^1 انحراف محاسبه میگردد. شاخص خطا f از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$f = \frac{c^1}{c^0} \quad (5)$$

این شاخص تاثیر شرایط بار را کاهش می دهد و یک روش تشخیصی مستقل از گشتاور را ایجاد می کند. اندازه شاخص با یک حد مشخص مقایسه می شود تا شرایط خطا معلوم گردد. به صورت تجربی و با چند شبیه سازی این حد 0.5 بدست آمده است.

$$|f| > 0.5 \quad (6)$$

همچنین زاویه شاخص خطای f مکان نیمه هادی معیوب را تعیین می کند.

الگوریتم wavelet-fuzzy [14]: این روش، الگوریتمی برای مانیتور کردن شرایط زمان-واقعی خطاست که از تحلیل شکل موج جریان سه فاز استفاده می کند تا تغییرات و رخدادها را در جریان تعیین کند. علاوه بر مشخص کردن تغییرات، dc آفست جریان نیز محاسبه می شود. پلاریته و مقدار dc آفست، به سیستم منطق فازی داده می شود تا قسمت معیوب تعیین و مشخص گردد. تغییرات در جریان را می توان افزایش ناگهانی، کاهش یا حالت گذرا در اندازه جریان در نظر گرفت. بنابراین wavelet برای این روش مناسب می باشد. Wavelet امکان مناسبی برای تحلیل تغییرات فرکانس با زمان را فراهم می کند که به نوبه خود به تشخیص و تعیین محل قسمت معیوب کمک می کند.

روش wavelet-neuralnetwork [15]: در این روش از جریان‌های سه فاز برای تشخیص و طبقه بندی خطاها استفاده می‌شود. تبدیل Wavelet برای بدست آوردن اطلاعات در مورد علائم خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تبدیل روش موثری برای تحلیل پدیده‌های گذرا می‌باشد که می‌تواند اطلاعات زمان و فرکانس را از سیگنال گذرا استخراج کند. در واقع تبدیل سیگنال گذرا را به مولفه‌های فرکانسی مختلف با ضرایب تقریبی تجزیه می‌کند. در هر مرحله تجزیه، ضرایب تقریبی، مربوط به مولفه‌های سیگنال با فرکانس پایین هستند که از فیلترهای پایین گذر بدست می‌آیند و جزئیات دقیق، مولفه‌هایی با فرکانس بالا هستند که از فیلترهای بالا گذر حاصل می‌شوند. انتخاب یک فیلتر مناسب برای این منظور، می‌تواند ویژگی‌های سیگنال‌های خطای جریان و ولتاژ را تعیین کند. شکل زیر روند اصلی اجرای تبدیل Wavelet را نشان می‌دهد که در آن $x[n]$ سیگنال اصلی، $h[n]$ و $g[n]$ به ترتیب فیلتر پایین گذر و فیلتر بالا گذر را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است توسط فیلترها، سیگنال ورودی، به مولفه‌های تقریبی و مولفه‌هایی با جزئیات دقیق تقسیم‌بندی می‌شوند، که هر کدام با ضریب ۲ اعشاری می‌شوند این روند تا زمانی که به سطح مطلوبی از تفکیک سیگنال برسد ادامه پیدا می‌کند. در اینجا سیگنال ورودی در واقع همان جریان‌های فازی استاتور هستند. در این روش یک تفکیک ۶ سطحی انجام می‌شود یعنی $6[n] \dots d1$ و $6[n] \dots a1$ را خواهیم داشت.

اطلاعات دقیق و تقریبی مربوط به جریان استاتور پس از چند مرحله تحلیل و تفکیک از سیگنال اصلی بدست می‌آید. وقتی خطایی در هر یک از سوئیچ‌های قدرت رخ می‌دهد می‌توان تغییرات را در ضرایب تجزیه شده مشاهده کرد. تغییرات تند در سیگنال، حاکی از بروز خطاست.

ضرایب تقریبی نرمالیزه شده به شبکه عصبی داده می‌شود تا شرایط خطا و سالم بودن، تعیین گردد.

سیستم Wavelet-ANFI [16]: در این روش جریان dc لینک درایو برای تشخیص، در یک سیکل مانیتور می‌شود تبدیل موجی پیوسته روی سیگنال مشخصه خطا صورت می‌گیرد و اندیسها به سیستم واسطه عصبی انطباقی ANFI ارسال می‌شوند. هر سوئیچ الکترونیکی را می‌توان با یک مقاومت غیر خطی مدل کرد، وقتی که سوئیچ خاموش است مقدار آن خیلی زیاد و هنگام روشن بودن مقدار آن خیلی کم است. بنابراین خطای مدار باز در سوئیچ را نیز می‌توان با یک مقاومت غیر خطی با مقدار زیاد مدل کرد. یک سوئیچ در دو مرحله متوالی روشن می‌ماند.

یعنی یک سوم دوره کامل. اجرای مشخصه‌ها تحت شرایط مدار باز برای همه سوئیچها مشاهده و در نظر گرفته می‌شود. این مشخصه‌ها با شرایط نرمال مقایسه می‌گردد. در این روش شکل موج لینک DC، به عنوان سیگنال مشخصه جهت تشخیص خطا استفاده می‌شود. جهت مانیتورینگ و اندازه گیری، سیگنال‌های جریان همیشه راحتتر و ارزاتر هستند. برای پرهیز از نویز، حالت‌های گذرا و خطاهای اندازه گیری در استخراج اطلاعات، معمولا حوزه فرکانسی در نظر گرفته میشود. لذا تبدیل Wavelet پیوسته انتخاب می‌شود تا مشخصات شکل موج را برای تشخیص اندیسها پردازش کند.

تشخیص به صورت اتوماتیک، با استفاده از یک سیستم یادگیر باهوش که از یک سری اندیس تشخیصی در شرایط مختلف بهره برداری می‌کند امکانپذیر است.

سیستم Clustering-ANFI [17]: در این روش در ابتدا جریان سه فاز با استفاده از تبدیلات به محور d-q برده می‌شوند. سپس میانگین بردار جریان از رابطه داده شده محاسبه می‌گردد:

$$I_{av} = \frac{1}{N} \left[\sum_{n=1}^N i_a(n) + j \sum_{n=1}^N i_q(n) \right] = |I_{av}| < \theta_{av} \quad (7)$$

که N تعداد نمونه‌ها در یک مدت مشخص است و $i(n)$ ، N امین مقدار جریان d-q می‌باشد. در بخش تشخیص، شرایط عملکرد اینورتر، توسط C-ANFIS طبقه بندی می‌گردد. در این روش ابعاد مدل فازی کاهش مییابد.

روش میانگین بردار جریان بر اساس سیستم Subtractive Clustering [18]: در این روش ابتدا جریان سه فاز استاتورها استفاده از تبدیل کنکور دیا به $\alpha\beta$ تبدیل می‌شوند. در این روش مراحل زیر دنبال می‌شود:

گرفتن اطلاعات، تبدیل کنکور دیا، استخراج ویژگیها و تشخیص، در قسمت گرفتن اطلاعات همانطور که اشاره شد با استفاده از تبدیل کنکور دیا جریان سه فاز موتور القایی به جریانهای $\alpha\beta$ تبدیل می‌شوند.

در بخش استخراج ویژگیها، میانگین بردار جریان محاسبه می‌شود:

$$I_{av} = \frac{1}{N} \left[\sum_{n=1}^N i_a(n) + j \sum_{n=1}^N i_q(n) \right] = |I_{av}| < \theta_{av} \quad (8)$$

این سیستم درایو موتور یک سیستم گسسته می‌باشد، که N تعداد نمونه در یک مدت مشخص و $i(n)$ برابر با N امین مقدار جریان $\alpha\beta$ می‌باشد. در هر سیکل در این بخش میانگین بردار جریان محاسبه و به عنوان منبع اطلاعات در نظر گرفته می‌شود. این اطلاعات سپس جهت تشخیص به سیستم تشخیص

Subtractive Clustering داده می شود.

بیشتر روشهای قبل بهتر عمل می کند. عملکرد در این روش مطابق شکل ۱ است.

جدول شماره ۲: مقایسه انواع روشهای تشخیص در عملکرد و اجرا

روش	پیچیدگی تنظیم	پیچیدگی اجرا	زمان تشخیص برابر آلام اشتباه	تحمل در برابر آلام اشتباه
برداری پارک	زیاد	متوسط	>20 ms	ضعیف در جریانهای کم
جریان dc نرمالیزه	کم	کم	18.4	ضعیف
جریان dc نرمالیزه اصلاح شده	کم	کم	18.4	خوب
روش شیب	زیاد	کم	38.3	ضعیف
روش dc ساده	متوسط	کم	به بار بستگی دارد	متوسط
فرکانس لحظه ای ac	کم	کم	20	متوسط
مقایسه مقدار مرجع و واقعی	متوسط	زیاد	5	خوب
اندازه گیری ولتاژ بین سوئیچهای پایین	-	متوسط	2.7	خوب
تشخیص خطا بر اساس مرکز یابی	-	متوسط	-	خوب
تشخیص الگوی جریان	متوسط	زیاد	10	متوسط
روش انحراف جریان	کم	زیاد	۲ سیکل	متوسط
Wavelet-fuzzy	متوسط	زیاد	۵ سیکل	خوب
Wavelet-neural network	کم	زیاد	-	خوب
Wavelet-ANFI	کم	زیاد	-	-
میانگین بردار جریان بر اساس Subtractive Clustering	کم	متوسط	۱/۴ سیکل	-
باند گراف	-	زیاد	-	-

استفاده از مدل بانددگراف [17]: در این روش اینورتر با المانهایباند گراف مدل می شود. و از مقدار میانگین ولتاژ بین سوئیچها جهت تشخیص استفاده می گردد. اجرای این روش نسبتا پیچیده می باشد.

۳- ارزیابی عملکرد روشهای تشخیصی

در بخش قبل به بررسی انواع روشهای تشخیصی خطای مدار باز نیمه هادیها در اینورتر پرداخته شد. در این بخش جهت ارزیابی و مقایسه بهتر این روشها پارامترهای زیر که در اغلب روشها مشترک بوده و اندازه گیری شده اند به ترتیب زیر مورد بررسی قرار می گیرند:

۱- کارایی: یک روش، زمانی کارا و موثر است که بدرستی خطا را نشان دهد.

۲- تحمل در برابر آلام اشتباه: آلام اشتباه ممکن است در شرایط گذرا به دلیل وجود نویز ایجاد شود. این موضوع را می توان با ایجاد یک زمان مرده بهبود داد. هر چند این موضوع باعث کند شدن تشخیص خطا می شود.

۳- زمان تشخیص: زمان تشخیص بستگی به پیچیدگی روش تشخیص و تحمل در برابر نویز و آستانه مشخص شده برای آن روش دارد.

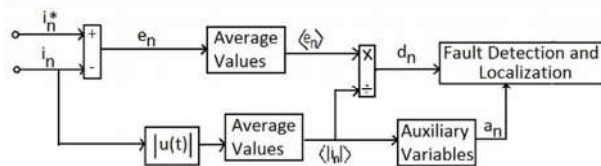
۴- پیچیدگی اجرا: سختی اجرای الگوریتم به راحتی تشخیص پارامترهای خطا، عملگرهای ریاضی و فرایند تصمیم بستگی دارد. لذا پیچیدگی در هر روش به عوامل فوق بستگی دارد.

۵- پیچیدگی تنظیم: داشتن تلورانس و قابل تنظیم بودن آستانه تا حد ممکن مفید واقع می شود.

۴- روش تشخیص زمان-واقعی خطای مدار باز تک

سوئیچ و چند سوئیچ [20], [21]:

با توجه به آنچه بیان شد و با توجه به جدول شماره ۲ تنها روش جریان dc نرمالیزه اصلاح شده در کلیه پارامترها عملکرد خوبی از خود نشان می دهد اما مانند سایر روشها فقط خطای مدار باز یک سوئیچ تشخیص داده می شود و محدودیت تشخیص وجود دارد. لذا در این بخش روشی ارائه می شود که علاوه بر کارایی بالاتر و دقت مناسب قادر به تشخیص خطاهای چند سوئیچ نیز خواهد بود. از دیگر مزایای روش مذکور استفاده از سنسورهای کمتر نسبت به روشهای قبل می باشد که پیچیدگی و هزینه اجرا را پایین می آورد. لذا این روش از لحاظ پیچیدگی اجرا و دقت از

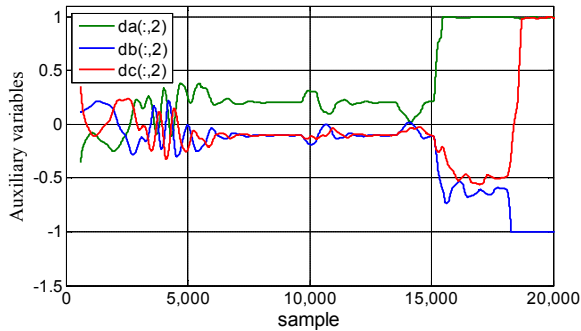


شکل ۱: عملکرد روش تشخیص زمان-واقعی خطا

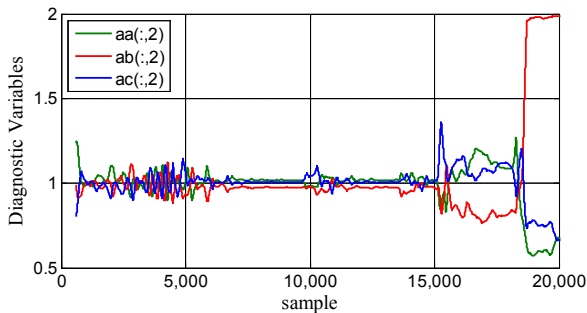
مطابق شکل فوق با استفاده از یک سیستم کنترل اصلی سه خطای جریان e_n از رابطه زیر بدست می آید:

جدول ۳: تشخیص خطا و سوئیچ معیوب

سوئیچ معیوب	D_a	D_b	D_c	A_a	A_b	A_c
T1	P	0	0	H	H	H
T2	N	0	0	H	H	H
T3	0	P	0	H	H	H
T4	0	N	0	H	H	H
T5	0	0	P	H	H	H
T6	0	0	N	H	H	H
T1,T2	-	0	0	L	H	H
T3,T4	0	-	0	H	L	H
T5,T6	0	0	-	H	H	L
T1,T4	P	N	0	H	H	H
T2,T3	N	P	0	H	H	H
T1,T6	P	0	N	H	H	H
T2,T5	N	0	P	H	H	H
T3,T6	0	P	N	H	H	H
T4,T5	0	N	P	H	H	H
T1,T3,[T6]	P	P	N	H	H	H
T2,T4,[T5]	N	N	P	H	H	H
T3,T5,[T2]	N	P	P	H	H	H
T4,T6,[T1]	P	N	N	H	H	H
T1,T5,[T4]	P	N	P	H	H	H
T2,T6,[T3]	N	P	N	H	H	H



شکل ۲: نمودار فوق تغییرات متغیرهای تشخیصی d_a, d_b, d_c را بر حسب زمان در خطای مدار باز T1 و T3 نشان می دهد. موتور از نوع القایی 5HP و 460V ، 60 HZ ، 1750 RPM ، گشتاور اعمالی ۱۱،۹ نیوتن متر می باشد.



شکل ۳: نمودار فوق تغییرات متغیرهای تشخیصی کمکی a_a, a_b, a_c را بر حسب زمان در خطای مدار باز T1 و T3 نشان می دهد. موتور از نوع القایی 5HP و 460V ، 60 HZ ، 1750 RPM ، و گشتاور اعمالی ۱۱،۹ نیوتن متر می باشد.

$$e_n = i_n - i_n^* \quad (9)$$

که $n = a, b, c$ و با استفاده از میانگین گیری از e_n مشخصه های متغیر تشخیصی ایجاد می شود:

$$\langle e_n \rangle = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} e_n dt \quad (10)$$

برای اجتناب از مشکلاتی نظیر شرایط کارکرد مکانیکی ماشین مانند سطح بار و سرعت ، مقدار میانگین فوق با استفاده از میانگین قدرمطلق جریان فاز موتور نرمالیزه می شود بنابراین متغیر تشخیصی نهایی از رابطه زیر بدست می آید:

$$d_n = \frac{\langle e_n \rangle}{\langle |i_n| \rangle} \quad (11)$$

در شرایط نرمال و با نادیده گرفتن دامنه نویزهای فرکانس بالا موتور با جریان سینوسی سه فاز بالانس تغذیه می شود. لذا $\langle e_n \rangle$ و در نتیجه d_n صفر خواهد بود. وقتی خطایی رخ می دهد متغیر d_n دارای مقدار خواهد بود و در این روش جهت تشخیص خطای مدار باز تک سوئیچ این مقدار با یک حد آستانه نظیر k_f مقایسه می شود و محل خطا تعیین می گردد. جهت تعیین خطاهای چند سوئیچ چند متغیر کمکی دیگر طبق رابطه زیر تعریف می گردد:

$$a_n = \frac{2\langle |i_n| \rangle}{\langle |i_l| \rangle + \langle |i_m| \rangle} \quad (12)$$

که $l \neq m \neq n$ و $l, m, n \in \{a, b, c\}$ بنا بر این برای تشخیص خطای چند گانه می توان از دو حد اضافی یعنی k_m و k_d استفاده کرد. بنا بر این:

$$D_n = \begin{cases} NIF d_n \leq -k_m \\ 0 & IF |d_n| < k_m \\ PIF d_n > k_m \end{cases} \quad (13)$$

$$A_n = \begin{cases} LIF a_n \leq k_d \\ HIF a_n > k_d \end{cases}$$

که در اینجا $0.025 < k_d < 0.9$ و $0.4 < k_m < 0.9$ مطابق جدول ۳ خطای تک سوئیچ و دو سوئیچ و بیشتر قابل تشخیص خواهد بود.

۵- نتایج شبیه سازی

با استفاده از محیط متلب جهت بررسی دقت و صحت عملکرد روش تشخیص زمان واقعی خطای مدار باز شبیه سازی گردید و انواع خطاها مورد بررسی قرار گرفتند که روش مذکور دقت خوبی از خود نشان داد. به عنوان مثال در نمودارهای زیر متغیرهای تشخیص را در حالتی که سوئیچهای T1 و T3 باز هستند را نشان می دهد. که با مقایسه این نتایج با حدهای عنوان شده نتایج با جدول منطبق می باشند.

PWM motor drivesystems,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 18, no. 2, pp. 587–593, Mar. 2003.

[8] O. S. Yu, N. J. Park, and D. S. Hyun, “A novel fault detection scheme for voltage fed PWM inverter,” in Proc. IEEE Ind. Electron. Conf., 2006, pp. 2654–2659.

[9] P. Gilreath and B. N. Singh, “A new centroid based fault detection method for 3-phase inverter-fed induction motors,” in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2005, pp. 2663–2669.

[10] L. Zhang, I. B. Aris, and L. N. Hulley, “A knowledge-based system for online fault diagnosis of power inverter circuits for AC machines,” in Proc. Eur. Power Electron. Conf., 1995, pp. 334–339.

[11] R. Szczesny, H. Piquet, and P. Kurzynski, “Fault detection and diagnosis in the electric drives,” in Proc. Eur. Power Electron. Appl. Conf., 1997, pp. 995–1000.

[12] B. Raison, G. Rostaing, and J. P. Rognon, “Towards a global monitoring scheme for induction motor drives,” in Proc. Int. Power Electron. Conf., 2000, pp. 1183–1188.

[13] C. Kral and K. Kafka, “Power electronics monitoring for a controlled voltage source inverter drive with induction machines,” in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2000, pp. 213–217.

[14] M. R. Mamat, M. Rizon, and M. S. Khanniche, “Fault detection of 3-phase VSI using wavelet-fuzzy algorithm,” Amer. J. Appl. Sci., vol. 3, no. 1, pp. 1642–1648, 2006.

[15] F. Charfi, F. Sellami, and K. Al-Haddad, “Fault diagnosis in power system using wavelet transforms and neural networks,” in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron., 2006, pp. 1143–1148.

[16] M. A. Awadallah and M. M. Morcos, “Diagnosis of switch open-circuit fault in PM brushless dc motor drives,” in Proc. Large Eng. Syst. Conf. Power Eng., May 2003, pp. 69–73.

[17] J. H. Park, D. H. Kim, S. S. Kim, D. J. Lee, and M. G. Chun, “C-ANFIS based fault diagnosis for voltage-fed PWM motor drivesystems,” in Proc. Annu. Meeting North Amer. Fuzzy Inform. Soc., 2004, pp. 379–383.

[18] Y. Guan, D. Sun, and Y. He, “Mean current vector based online real-time diagnosis for voltage source inverter fed induction motor drives,” in Proc. IEMDC, 2007, pp. 1114–1118.

[19] A. Claudio, “Modelling, simulation and fault diagnosis of the three-phase inverter using bond graph,” in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron., 2007, pp. 130–135.

[20] Jorge O. Estima António J. Marques Cardoso, “A New Algorithm for Real-Time Multiple Open-Circuit Fault Diagnosis in Voltage-Fed PWM Motor Drives by the Reference Current Errors,” in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron., VOL. 60, NO. 8, AUGUST 2013, pp. 3496–3505.

[21] Arafat S. Mohamed, Haitham Z. Azazy and Ashraf S. Zein El Din, “Open-circuit fault diagnosis of three-phase induction motor drive systems,” in International Journal of Electrical Engineering (JEE) 13 (3), 2014, pp. 60–68.

در این مقاله سعی شد تا حد امکان روشهایی که تا کنون جهت تشخیص خطای مدار باز اینورتر منبع ولتاژ مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. در بین روشهای مذکور روش جریان dc نرمالیزه شده اصلاح شده کارایی بالا و تحمل در برابر آلام اشتباه خوبی را از خود نشان داد. روش انحراف جریان که در الگوریتم کنترل اینورتر قرار دارد این مزیت را دارد که می‌تواند با اندازه‌گیری خوب، اینورتر را حتی در حالت خطا به صورت ایمن مورد بهره‌برداری قرار داد. روشهایی که بر اساس تحلیل فازی و تحلیل سیگنالها و شبکه‌های عصبی عمل می‌کند از تشخیص هوشمند بهره می‌برند اما هزینه و پیچیدگی اجرای زیادی دارند. به هر حال بسته به شرایط سیستم، هزینه، پیچیدگی اجرا، اهمیت زمان تشخیص و قابلیت اطمینانی که مدنظر است بر انتخاب روش مناسب تشخیص خطا تاثیر گذار است. روش تشخیص زمان-واقعی خطای مدار باز علاوه بر داشتن عملکرد مناسب در اجرا قادر به تشخیص خطاهای چند سوئیچ نیز خواهد بود که این ویژگی جذابیت این روش را بیشتر می‌کند. علی‌رغم تحقیقات انجام شده در این زمینه اما بدلیل گستردگی استفاده از اینورترها و بروز خطاهای متنوع این حوزه هنوز جای تحقیقات بیشتری دارد و نیازمند اصلاح روشها یا ارایه روشهای هوشمندتر می‌باشد.

مراجع

- [1] F. W. Fuchs, “Some diagnosis methods for voltage source inverters invariable speed drives with induction machines—A survey,” in Proc. IEEE Ind. Electron. Conf., 2003, pp. 1378–1385.
- [2] D. Kasta and B. K. Bose, “Investigation of fault modes of voltage-mode inverter system for induction motor,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 4, pp. 1028–1038, Jul./Aug. 1994.
- [3] A. M. S. Mendes and A. J. Marques Cardoso, “Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed ac drives, by the average current Park’s vector approach,” in Proc. IEMDC, 1999, pp. 704–706.
- [4] K. Rothenhagen and F. W. Fuchs, “Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in three phase voltage source inverters for ac variable speed drives,” in Proc. Eur. Power Electron. Appl. Conf., 2005, pp. 1–10.
- [5] K. Rothenhagen and F. W. Fuchs, “Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in voltage source active rectifiers,” in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2004, pp. 4348–4354.
- [6] R. Peugeot, S. Courtine, and J. P. Rognon, “Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 6, pp. 1318–1326, Nov./Dec. 1998.
- [7] R. L. A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. R. C. Silva, and A. M. N. Lima, “Fault detection of open-switch damage in voltage-fed