

کنترلر DTC ماشین القایی به صورت بهبود یافته در حالت قطع فاز برای کاربردهای با قابلیت اطمینان بالا و توان بالا

اصغر طاهری^۱، مریم نقیلو^۲، حسین معصومخانی^۳

taheri@znu.ac.ir

- ۱- دانشیار گروه برق، دانشکده فنی دانشگاه زنجان
- ۲- کارشناسی ارشد گروه برق، دانشکده فنی دانشگاه زنجان
- ۳- کارشناس ارشد گروه برق، دانشکده فنی دانشگاه زنجان

چکیده

هدف اصلی مقاله، ارائه روشی کارآمد در کنترل ماشین القایی شش فاز، هنگام بروز خطای قطع فاز می باشد. یکی از مزایای اصلی ماشین های چندفاز امکان کنترل آن در شرایط بروز خطا در یک یا چند فاز آن می باشد، لذا کنترل این ماشین ها در شرایط پس از خطا از اهمیت بالایی برخوردار است. به دلیل مزایای کنترل مستقیم گشتاور، در این مقاله از این روش استفاده شده و برای کاهش جریان هارمونیک از روش کنترل چرخه کاری در شرایط قطع فاز استفاده شده است. همچنین با قطع بندی جدید ارائه شده در این مقاله تعداد بردارهای قابل انتخاب در شرایط خطا از ۱۲ بردار به ۱۶ افزایش یافته است. جدول کلیدزنی پیشنهادی در این مقاله قابلیت اعمال به موتور شش فاز در شرایط خطا را داشته و از پاسخ دینامیکی مناسبی برخوردار است. روش PI - DutyDTC به طور متوسط ضریب شار و گشتاور را به ترتیب ۸۳،۲۹ و ۶۶ درصد نسبت به روش پایه کاهش می دهد. همچنین مقدار تلفات در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ به مقدار ناچیزی می رسد. بخش بندی جدید و جدول کلیدزنی ارائه شده در این مقاله موجب عملکرد صحیح موتور در حالت قطع فاز می باشد. با وقوع خطا مقدار ضریب شار و شار به ترتیب ۲۷ و ۶۶ درصد نسبت به حالت بدون خطا افزایش می یابد. با وجود افزایش ضریب شار و گشتاور در حالت قطع فاز، این مقادیر همچنان از مقادیر ضریب شار و گشتاوری که در روش پایه در حالت بدون خطا بدست می آید، بطور قابل ملاحظه ای (حدوداً ۷۰ درصد) کمتر هستند. نتایج شبیه سازی ارائه شده در این مقاله قابلیت روش پیشنهادی در شرایط دینامیکی مختلف و با وجود خطاها را نشان می دهد.

واژگان کلیدی: موتور القایی شش فاز، کاهش تلفات، کنترل مستقیم گشتاور، Duty Cycle Control، قطع فاز.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۱۱/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۴/۰۶

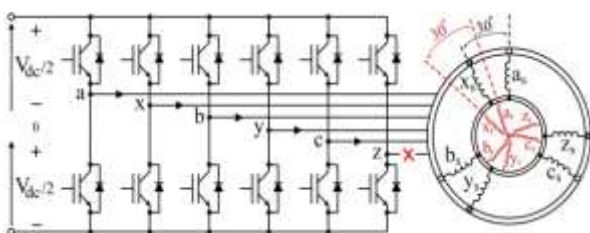
۱- مقدمه

خطای مدار باز کلیدها استفاده نمود. در [۷] از یک سنسور ولتاژ اضافی برای اندازه‌گیری ولتاژ استفاده شده است. هر چند استفاده از سنسور اضافی ولتاژ باعث تشخیص سریع خطای اتصال کوتاه و مدارباز می‌شود، اما قیمت بالای این روش از معایب آن می‌باشد. در [۸] روش‌هایی بر مبنای سنسور جریان استفاده گردیده است. پس از اندازه‌گیری جریان می‌توان از روش‌هایی نظیر تبدیل پارک، تبدیل ویولت، تبدیل فوریه که معروف تر از سایر روش‌ها می‌باشند استفاده نمود.

تمام روش‌های عنوان شده به عنوان روش‌های تشخیص خطا در اینورتر می‌باشند که در ماشین‌های سه فاز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها با تغییراتی قابل استفاده برای ماشین‌های چندفاز به خصوص شش‌فاز هستند. در زمینه تشخیص خطای ماشین‌های چند فاز نیز مطالعاتی انجام شده است [۹-۱۰].

در [۱۰-۱۱] بلوک دیاگرام مربوط به تشخیص خطا در ماشین القایی پنج فاز مغناطیس دائم با استفاده از روش مدلسازی VSD^۱ [۱۲] در شرایط خطا توضیح داده شده است. در این مقالات با استفاده از تخمین جریان و استفاده از روش تبدیل VSD تشخیص خطای اتفاق افتاده صورت گرفته است.

پس از تشخیص خطا برای آنکه موتور بتواند به عملکرد صحیح خود ادامه دهد باید سیستم کنترلی، تحمل‌پذیر خطا باشد. روش مرسوم استفاده شده در بسیاری از مقالات کنار گذاشتن کامل ساق معیوب و بدست آوردن مدل جدید اینورتر است [۱۳]. برای بررسی این روش فرض می‌شود یکی از ساق‌های اینورتر شش‌فاز مثلاً یکی از کلیدهای فاز شش‌ام از اینورتر شش‌فاز مطابق شکل (۱) دچار مشکل شده است. در این حالت تابع ولتاژ هر فاز نسبت به نقطه خنثی بین دو منبع اینورتر بصورت زیر تعریف می‌شود:



شکل (۱) شماتیک موتور و اینورتر شش‌فاز.

استفاده از ماشین‌های القایی شش فاز به دلیل مزایای زیاد این ماشین‌ها در سال‌های اخیر زیاد مورد توجه محققان بوده است [۱-۲]. این ماشین‌ها مزایای زیادی دارند که از آن جمله می‌توان به ریپل گشتاور کمتر، ضربان ولتاژ پایین‌تر، قابلیت اطمینان بالاتر و امکان کنترل در شرایط خطا اشاره نمود [۳-۴]. این ماشین‌ها امروزه در کاربردهای زیادی از جمله نیروهای کشش کشتی‌ها و بالابرها و در کاربردهایی که نیاز به قابلیت اطمینان بالا دارند مورد استفاده قرار گرفته اند.

یکی از خطاهای معمول در سیستم‌های کنترل موتور القایی بروز خطا در بخش اینورتر می‌باشد. به این ترتیب که یکی از کلیدهای یکی از ساق‌های اینورتر قطع می‌شود که اصطلاحاً به آن قطع‌فاز نیز گفته می‌شود. این خطا با مدارباز یا اتصال کوتاه شدن کلید رخ می‌دهد. در این حالت عملکرد موتور دچار اختلال می‌شود.

خطای مربوط به مدارباز شدن کلید در درایوهای صنعتی معمولاً وجود ندارد و باید توسط خود استفاده‌کننده به سیستم درایو اضافه گردد. برای محافظت از خطای مدارباز چندین روش در [۵] ارائه شده است. این روش‌ها بر پایه سیگنال مرجع، مدل سیستم و یا سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده اینورتر می‌باشند. در روش اول برای تشخیص خطا بر اساس مدل مرجع از میزان اختلاف بین جریان مرجع و جریان واقعی به عنوان یک ایندکس تشخیص خطا استفاده میکند [۶]. این روش سریع، ساده، ارزان و مقاوم در برابر تغییرات سریع بار می‌باشد. البته این روش تنها بر روی یک سیستم حلقه بسته قابل پیاده سازی می‌باشد.

بر اساس روش دوم معرفی شده (روش تشخیص خطای باز بودن کلید بر اساس مدل) می‌توان از تخمین خروجی سیستم بر اساس سیگنال‌های ورودی و مدل بار و سپس کم نمودن مقدار تخمینی از مقدار واقعی استفاده نمود. اگر اختلاف بیشتر از صفر باشد یعنی خطا رخ داده است. هر چند این روش تشخیص بسیار ساده و ارزان می‌باشد، اما دقت تشخیص به مدل بار بستگی دارد.

دسترسی به یک مدل دقیق از بار تحت تمامی شرایط کاری سخت می‌باشد. بر اساس روش سوم عنوان شده می‌توان از مقدار ولتاژ یا جریان اینورتر برای توسعه روش‌های تخمین

^۱ Vector Space Decomposition

می آید. با وقوع خطا در یکی از ساقها، تعداد حالت‌های ممکن برای کلیدها ۳۲ حالت می‌باشد و پس از انتقال، این بردارهای ولتاژ با چشم‌پوشی از بردارهای صفحه (O_1-O_2) ، در صفحات $(\alpha - \beta)$ و (Z_1-Z_2) قرار می‌گیرند. هر بردار ولتاژ در صفحه $(\alpha - \beta)$ متناظر با یک شماره کلیدزنی در کلیدهای اینورتر می‌باشد. این شماره کلیدزنی یک بردار ولتاژ متناظر در صفحه (Z_1-Z_2) نیز خواهد داشت.

پس از بدست آمدن بردارهای ولتاژ جدید، جدول کلیدزنی متناسب با این بردارها ارائه شده و به اینورتر اعمال می‌گردد [۱۳-۱۴].

در این مقاله روشی جدید ارائه می‌شود که هنگام بروز خطا در یکی از کلیدهای ساق، کل آن ساق کنار گذاشته نمی‌شود، بلکه از کلید سالم آن ساق استفاده می‌شود. در هر ساق از اینورتر یا کلید بالا و یا کلید پایین روشن می‌شود. اگر هر کدام از این کلیدها بسوزند، می‌توان کلید دیگر را کلاً روشن کرد. مثلاً اگر کلید بالا بسوزد کلید پایین روشن نگاه داشته می‌شود، به عبارتی مقدار آن ساق روی صفر قفل می‌شود.

$$V_{10} = (5 \times S_1 - 1) \times \frac{E}{6} \quad (۱)$$

$$V_{20} = (5 \times S_1 - 1) \times \frac{E}{2} \quad (۲)$$

$$V_{30} = (5 \times S_3 - 1) \times \frac{E}{2} \quad (۳)$$

$$V_{40} = (2 \times S_4 - 1) \times \frac{E}{2} \quad (۴)$$

$$V_{50} = (2 \times S_5 - 1) \times \frac{E}{2} \quad (۵)$$

$$V_{60} = 0 \quad (۶)$$

به این ترتیب ولتاژهای فازهای موتور القایی شش‌فاز بصورت زیر بدست می‌آید:

$$V_{1n} = \frac{1}{5} \times (4.V_{10} - V_{20} - V_{30} - V_{40} - V_{50}) \quad (۷)$$

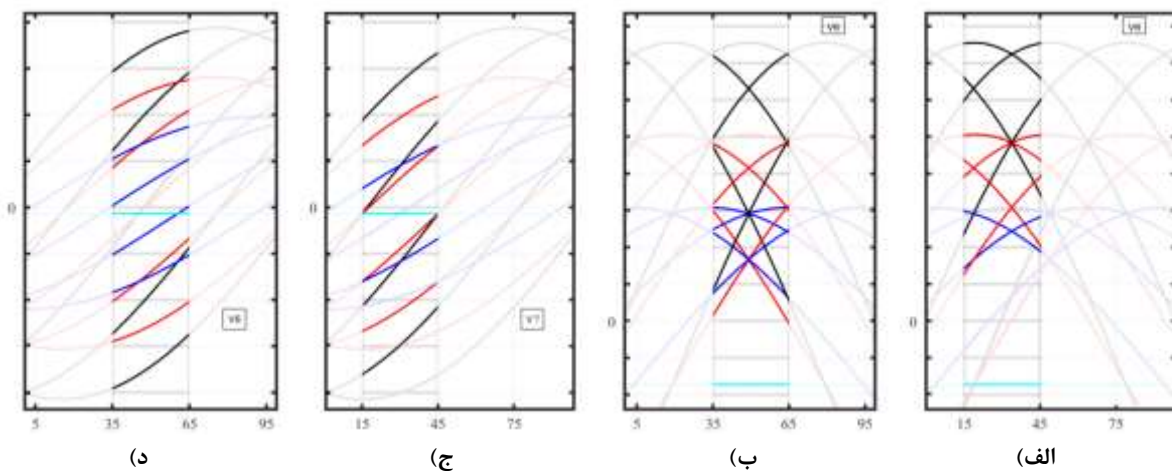
$$V_{2n} = \frac{1}{5} \times (4.V_{20} - V_{10} - V_{30} - V_{40} - V_{50}) \quad (۸)$$

$$V_{3n} = \frac{1}{5} \times (4.V_{30} - V_{20} - V_{10} - V_{40} - V_{50}) \quad (۹)$$

$$V_{4n} = \frac{1}{5} \times (4.V_{40} - V_{20} - V_{30} - V_{10} - V_{50}) \quad (۱۰)$$

$$V_{5n} = \frac{1}{5} \times (4.V_{50} - V_{20} - V_{30} - V_{40} - V_{10}) \quad (۱۱)$$

با اعمال ماتریس انتقال T_6 ، بردارهای ولتاژ منتقل شده به سه زیرفضای $(\alpha - \beta)$ ، (Z_1-Z_2) و (O_1-O_2) بدست



شکل (۲) شیب گشتاور حاصل از بردارهای مطلوب با الف) قطاع بندی پایه ب) قطاع بندی پیشنهادی؛ شیب شار حاصل از بردارهای مطلوب با ج) قطاع بندی پایه د) قطاع بندی پیشنهادی.

جدول (۱) شماره بردارهای گروه V, W, U و Q .

$V_0(0,7,56,63)$	$V_1(48)$	$V_2(56)$	$V_3(60)$	$V_4(28)$	$V_5(12)$	$V_6(14)$	$V_7(15)$	$V_8(7)$	$V_9(3)$	$V_{10}(35)$	$V_{11}(51)$	$V_{12}(49)$
$W_0(0,7,56,63)$	$W_1(57)$	$W_2(52)$	$W_3(24)$	$W_4(44)$	$W_5(30)$	$W_6(13)$	$W_7(6)$	$W_8(11)$	$W_9(39)$	$W_{10}(19)$	$W_{11}(33)$	$W_{12}(50)$
$U_0(0,7,56,63)$	$U_1(53)$	$U_2(16)$	$U_3(40)$	$U_4(62)$	$U_5(29)$	$U_6(4)$	$U_7(10)$	$U_8(47)$	$U_9(23)$	$U_{10}(1)$	$U_{11}(34)$	$U_{12}(59)$
$U'_0(0,7,56,63)$	$U'_1(32)$	$U'_2(58)$	$U'_3(61)$	$U'_4(20)$	$U'_5(8)$	$U'_6(46)$	$U'_7(31)$	$U'_8(5)$	$U'_9(2)$	$U'_{10}(43)$	$U'_{11}(55)$	$U'_{12}(17)$
$Q_0(0,7,56,63)$	$Q_1(54)$	$Q_2(25)$	$Q_3(36)$	$Q_4(26)$	$Q_5(45)$	$Q_6(22)$	$Q_7(9)$	$Q_8(38)$	$Q_9(27)$	$Q_{10}(37)$	$Q_{11}(18)$	$Q_{12}(61)$

شکل (۲) شیب گشتاور و شار حاصل از بردارهای مختلف را نشان می‌دهد. هدف پیدا کردن بردارهایی است که گشتاور را افزایش می‌دهند چراکه برای کاهش گشتاور می‌توان از بردار صفر استفاده نمود. در روش PI - DutyDTC تنها در حالتی کلیدزنی می‌شود که گشتاور موتور از مقدار گشتاور مرجع کمتر باشد [۱۶]. به همین دلیل در جدول کلیدزنی تنها دو حالت افزایش گشتاور و افزایش شار و حالت افزایش گشتاور و کاهش شار در نظر گرفته می‌شود.

در شکل (۲) بردارهایی که مقدار شیب مثبت دارند برای قطاع دوم مشخص شده اند، یعنی بردارهایی که در این قطاع باعث افزایش گشتاور می‌شوند. تعداد این بردارها ۱۲ عدد است. هر کدام از این بردارها یا باعث افزایش شار شده و یا مقدار شار را کاهش می‌دهند (۶ بردار باعث کاهش شار و ۶ بردار دیگر باعث افزایش شار می‌شوند). بنابراین بردارهایی که در قسمتی از دوره نمونه برداری باعث افزایش شار و در قسمت دیگر باعث کاهش شار می‌شوند در نظر گرفته نمی‌شوند.

با دقت در شکل (۲) که شیب شار و گشتاور حاصل از بردارهای ولتاژ مختلف را نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد که اگر قطاع بندی^۱ به اندازه ۲۰ درجه به جلو انتقال داده شود، تعداد بردارهایی که در هر قطاع به منظور افزایش گشتاور می‌توان داشت از ۱۲ به ۱۶ بردار می‌رسد که نصف این تعداد باعث افزایش شار و نصف دیگر باعث کاهش شار می‌شود. بنابراین قطاع بندی را ۲۰ درجه انتقال می‌دهیم و در بررسی‌ها از قطاع بندی جدید استفاده می‌کنیم.

اکنون باید برای هر دوره T_s یک گروه برداری شامل سه دسته بردار انتخاب شود. بردارهایی که برای هر دسته انتخاب می‌شوند، باید تا حد امکان شیب نزدیک به هم داشته باشند تا در تغییر قطاع جهش خیلی زیاد گشتاور یا شار ایجاد نشود. در انتخاب دسته بردارها باید به این نکته توجه کرد که بردارهایی که می‌توانند در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ روبروی هم قرار گیرند از مجموعه گروه‌های زیر هستند: (V, W) و (Q, W) و (V, Q) . اگر فرض شود بردار شار استاتور در ناحیه k باشد، گروه‌های برداری مناسب به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{k+2}, W_{k+2}, V_{k+4}, W_{k+4}, V_0 \quad (۱)$$

$$V_{k+1}, W_{k+1}, V_{k+5}, W_{k+5}, V_0 \quad (۲)$$

$$W_{k+2}, Q_{k+2}, W_{k+4}, Q_{k+4}, V_0 \quad (۳)$$

شکل (۱) شماتیک یک اینورتر شش‌فاز به همراه یک موتور شش‌فاز را نشان می‌دهد. در اینورتر شش‌فاز به دلیل وجود ۶ ساق، ۶۴ حالت کلیدزنی یا ۶۴ بردار ولتاژ وجود دارد. اگر در اینورتر یک کلید بسوزد، بردارهایی که متاثر از روشن بودن آن کلید بودند قابل استفاده نخواهند بود. تعداد این بردارها ۳۲ عدد است. بنابراین ۳۲ بردار در دسترس خواهد بود، به منظور ادامه عملکرد صحیح موتور و بدست آمدن کمترین ضربان شار و گشتاور و تلفات، از بین این ۳۲ بردار، بردارهای مطلوب انتخاب خواهند شد.

۲- روش کنترل مستقیم گشتاور

در روش DTC پایه در هر دوره نمونه برداری فقط یک بردار و آن هم از گروه V انتخاب می‌شود. دلیل این انتخاب این است که بردارهای گروه V دارای بیشترین دامنه در صفحه $(\alpha - \beta)$ و کمترین دامنه در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ هستند، بنابراین بیشترین شار و گشتاور را در صفحه $(\alpha - \beta)$ و کمترین تلفات را در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ ایجاد می‌کنند [۱۵]. در اینجا به دلیل عدم امکان استفاده از تعدادی از بردارها ناچاراً از بردارهای گروه‌های W, U و Q نیز استفاده می‌شود، این بردارها در [۱۶] معرفی شده‌اند. برای کاهش ضربان شار و گشتاور و همچنین کاهش تلفات، از روش PI - DutyDTC که بر پایه‌ی روش Duty Cycle Control است، استفاده خواهد شد [۱۶]. در این روش در هر دوره نمونه برداری T_s سه دسته بردار اعمال می‌شود. دسته بردار اول برای افزایش شار و گشتاور، دسته بردار دوم برای کاهش شار و افزایش گشتاور و دسته بردار سوم بردار صفر است. در روش PI - DutyDTC از بردارهای گروه‌های V و W استفاده شده است که در صفحه $(\alpha - \beta)$ شار و گشتاور بزرگ ایجاد می‌کنند و در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ روبروی هم قرار می‌گیرند تا تلفات صفر شود.

۳- روش پیشنهادی

برخلاف روش PI - DutyDTC که در آن تنها بردارهایی از گروه‌های V و W اعمال می‌گردد، در روش پیشنهادی در این مقاله از بردارهای گروه‌های دیگر نیز استفاده می‌شود. فرض می‌شود بردار شار استاتور در ناحیه دوم قرار دارد (ناحیه دوم در DTC پایه زاویه بین ۱۵ تا ۴۵ درجه است).

¹ Sector

نزدیک به صفر و قابل قبول است اما دسته بردار گروه هفتم دارای تلفات بسیاری زیادی است، بنابراین معمولا از این دسته بردار استفاده نمی‌شود مگر اینکه گروه برداری دیگری برای انتخاب در دسترس نباشد.

ضربان شار حاصل از گروه دوم بیشتر از گروه‌های برداری دیگر است و تقریبا برابر با ۳ درصد مقدار شار مرجع می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت گروه‌های برداری مختلف ضربان شار کم و قابل قبولی دارند. اما بررسی ضربان گشتاور نشان می‌دهد که گروه اول بیشترین مقدار ضربان گشتاور (۸، ۲۰ درصد گشتاور بار) و گروه چهارم کمترین مقدار ضربان گشتاور (۹، ۱۰ درصد گشتاور بار) را دارد. با توجه به اینکه این مقادیر نسبت به ضربان شار بزرگ هستند بنابراین کم بودن ضربان گشتاور را مدنظر قرار داده و اولویت بندی بر اساس آن انجام می‌شود. یعنی گروهی که ضربان گشتاور کمتری را موجب می‌شود اولویت بالاتری دارد. با توجه به این مورد، اولویت بندی گروه‌های برداری مختلف به صورت زیر است:

- ۱- گروه چهارم
- ۲- گروه سوم
- ۳- گروه دوم
- ۴- گروه اول
- ۵- گروه هفتم

حال باید این گروه‌های برداری در صورت بروز خطا بررسی شوند. این بررسی باید به صورت قطاع به قطاع انجام شود، یعنی نمی‌توان به صورت پارامتری از k عمل کرد. ابتدا فرض می‌شود بردار شار استاتور در قطاع $k = 1$ قرار دارد، بردارهای مطلوب در جدول (۳) آورده شده است.

ابتدا به بررسی بردارهایی پرداخته می‌شود که باعث افزایش شار و گشتاور می‌شوند. در صورتی که کلید بالا از ساق اول دچار مشکل شود، عدد ساق روی صفر قفل می‌شود، یعنی فقط عدد صفر را می‌توان به این ساق داد و کلید پایین از این ساق را می‌توان استفاده نمود. اگر فرض شود این نوع خطا اتفاق بیفتد، با توجه به جدول (۳) مشخص است که تمامی بردارها به غیر از بردار U'_3 را می‌توان استفاده کرد، چون این بردار در ساق اول باید مقدار یک را داشته باشد، قابل استفاده نیست. بنابراین در صورت بروز این نوع خطا، بردار مطلوب براحتی قابل انتخاب است. با توجه به اولویت بندی دسته بردارها که در قسمت قبل بررسی شد، در

جدول (۲) مقایسه گروه‌های برداری مختلف.

مجموعه بردار	ضربان گشتاور	ضربان شار
گروه ۱	۰,۶۲۵۰	۰,۰۱۰۲
گروه ۲	۰,۴۷۰۷	۰,۰۱۵۷
گروه ۳	۰,۴۰۲۷	۰,۰۰۷۹
گروه ۴	۰,۳۲۸۱	۰,۰۱۱۱
گروه ۵	۰,۵۲۸۶	۰,۰۱۰۱
گروه ۶	۰,۴۰۹۳	۰,۰۱۳۴

جدول (۳) بررسی بردارهای در دسترس به ازای $k=1$

افزایش شار و گشتاور						افزایش گشتاور و کاهش شار						
۰	۰	۱	۱	۰	۰	V_5	۱	۱	۱	۱	۰	V_3
۰	۱	۱	۱	۱	۰	W_5	۰	۱	۱	۰	۰	W_3
۰	۰	۱	۱	۱	۰	V_6	۱	۱	۱	۰	۰	V_2
۰	۰	۱	۱	۰	۱	W_6	۱	۱	۰	۱	۰	W_2
۱	۰	۱	۱	۱	۰	U_6	۱	۰	۱	۰	۰	U_3
۰	۰	۰	۱	۰	۰	U'_6	۱	۱	۱	۱	۱	U'_3
۰	۰	۱	۰	۰	۰	U_5	۰	۱	۰	۰	۰	U_4
۰	۱	۱	۱	۰	۱	U'_5	۱	۱	۱	۰	۱	U'_4

$$W_{k+2}, Q_{k+1}, W_{k+5}, Q_{k+5}, V_0 \quad (۴)$$

$$V_{k+2}, Q_{k+8}, V_{k+4}, W_{k+10}, V_0 \quad (۵)$$

$$V_{k+1}, Q_{k+9}, V_{k+5}, W_{k+11}, V_0 \quad (۶)$$

$$U_{k+2}, U_{k+5}, V_0 \quad (۷)$$

بردارهای گروه U در صفحه $(\alpha - \beta)$ یا $(Z_1 - Z_2)$ در راستای بردارهای گروه‌های دیگر قرار نمی‌گیرند، بنابراین برای اینکه تلفات $(Z_1 - Z_2)$ آنها صفر شود برداری برای اعمال با آنها وجود ندارد پس به تنهایی در گروهی جداگانه قرار می‌گیرند.

حال باید این گروه‌های برداری از نظر ضربان شار و گشتاور و تلفات $(Z_1 - Z_2)$ اولویت بندی شوند. جدول (۱) مقادیر ضربان شار و گشتاور و تلفات در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ را برای گروه‌های برداری مختلف در شبیه‌سازی متلب نشان می‌دهد. این مقادیر در حالتی بدست آمده است که با استفاده از روش $PI - DutyDTC$ موتور کنترل شده است. با بررسی بردارها در زمان بروز خطا خواهیم دید که دسته بردارهای گروه‌های ۵ و ۶ هنگام بروز خطا، یا از بین می‌روند و یا اصلا استفاده نمی‌شوند بنابراین از فهرست اولویت خارج می‌شوند و فقط ۵ گروه دیگر اولویت بندی می‌شوند. با توجه به جدول (۲) تلفات صفحه $(Z_1 - Z_2)$ حاصل از گروه‌های اول تا چهارم

جدول (۴) بردارهای انتخابی در قطاع اول به ازای انواع خطاها.

ساق اول	ساق دوم	ساق سوم	ساق چهارم	ساق پنجم	ساق ششم
کلید بالا ۰	کلید بالا ۰	کلید بالا ۰	کلید بالا ۰	کلید بالا ۰	کلید بالا ۰
کلید پایین ۱	کلید پایین ۱	کلید پایین ۱	کلید پایین ۱	کلید پایین ۱	کلید پایین ۱
افزایش شار و گشتاور	W_3 Q_3	U_3 Q_2	V_3 W_2	W_2 U_5	V_2 U_4
افزایش گشتاور و کاهش شار	V_5 W_5	W_6 U_9	U_6 Q_6	W_6 U_5	V_6 U_4
۱	۲	۳	۴	۵	۶
۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲

جدول (۵) نوع کلیدزنی انتخابی به ازای خطای ویژه در قطاعها.

حالت خطا	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴	ناحیه ۵	ناحیه ۶	ناحیه ۷	ناحیه ۸	ناحیه ۹	ناحیه ۱۰	ناحیه ۱۱	ناحیه ۱۲
(۱-۰)	۱	۳	۱۰	۱۲	۵	۷	۲	۴	۹	۱۱	۶	۸
(۱-۱)	۲	۴	۹	۱۱	۶	۸	۱	۳	۱۰	۱۲	۵	۷
(۲-۰)	۳	۱۰	۱۲	۵	۷	۲	۴	۹	۱۱	۶	۸	۱

داده می‌شود و شماره خطای ۰ به آن اختصاص داده می‌شود. به خطاهای دیگر نیز به تعداد گامی که نسبت به کلیدزنی مرجع دارند شماره خطایی به تعداد همان گام اختصاص داده می‌شود. شماره‌گذاری خطاها به مطابق جدول (۶) خواهد بود. مرحله بعدی تعیین زمان اعمال هر کدام از این دسته بردارها است. در واقع باید مشخص شود هر کدام از این گروه‌های برداری چه سهمی از کل زمان T_s را دارند. این زمان‌ها باید در راستای حداقل کردن تلفات در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ انتخاب شوند. همانطور که قبلاً گفته شد، دسته بردارها تا حد امکان طوری انتخاب می‌شوند که در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ در خلاف جهت یکدیگر قرار گیرند و تلفات صفر شود. برای این منظور با توجه به اینکه بردارهای هر دسته بردار از چه گروه برداری ای هستند، برداری که در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ دامنه بیشتری دارد مدت زمان کمتر و برداری که دامنه کمتری دارد مدت زمان بیشتری اعمال می‌شود.

بنابراین مدت زمان اعمال هر کدام از بردارها با توجه به عکس نسبت دامنه اش از مجموع دامنه بدست می‌آید. این زمان‌ها در جدول (۷) آورده شده است. مرحله بعدی بررسی بردارهای صفر است. قبلاً گفته شد که کلاً ۶۴ بردار وجود دارد که از این تعداد، ۴ عدد بردار صفر است. جدول (۸) نشان می‌دهد در صورت بروز هر کدام از خطاهای گفته شده در بالا، کدامیک از بردارهای صفر قابل استفاده است.

با توجه به مراحل دنبال شده تاکنون شامل: بررسی انواع خطا، بردارهای در دسترس پس از وقوع خطا، اولویت‌بندی بردارها، بدست آوردن ترتیب بردارهای انتخابی در قطاعها، شماره‌گذاری خطاها، محاسبه زمان نسبی اعمال بردارها و

این حالت یعنی در $k = 1$ و در صورت بروز خطای $(1 - 0)$ ، بردارهای W_2 و Q_2 انتخاب می‌شوند. در صورتی که کلید پایین از ساق اول دچار خطا بشود، یعنی ساق اول روی عدد صفر قفل شود، در اینصورت طبق جدول (۳) برای افزایش شار و گشتاور تنها بردار U_3 را می‌توان انتخاب نمود. در این حالت نمی‌توان برداری را همراه با بردار U_3 اعمال کرد به طوری که این بردارها در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ در جهت مخالف هم قرار گیرند، بنابراین انتخاب و اعمال این بردار سبب افزایش تلفات در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ خواهد شد.

در جدول (۳) حالت‌هایی که در آن‌ها به ناچار از بردارهای گروه‌های U و U' استفاده می‌شود، نشان داده شده است. با بررسی ساق‌های مختلف و خطاهای مختلف، دسته بردارهای مناسب برای اعمال در هر حالت بدست بدست می‌آید که در جدول (۴) نشان داده شده است. برای راحتی کار به هر دسته بردار یک عدد از ۱ تا ۱۲ نسبت داده می‌شود. اکنون باید بررسی شود در صورت بروز یک نوع خطای ویژه، مثلاً خطای $(1 - 0)$ (این خطا یعنی در ساق اول کلید بالا سوخته و مقدار ساق روی عدد ۰ قفل شده است)، در هر قطاع چه دسته برداری باید اعمال شود.

بنابراین جدول (۴) به همراه جدول‌های معادل آن برای خطاهای دیگر، به شکل مناسب زیر یعنی جدول (۵) تبدیل می‌شود (جدول فقط برای سه نوع خطا آورده شده است). با دقت در جدول (۵) مشاهده می‌شود بدلیل تقارن در بردارهای ولتاژ، در صورتی که نوع خطا تغییر یابد، روند کلیدزنی برای قطاع‌های مختلف یکسان است و فقط محل شروع آن تغییر می‌کند. بنابراین خطای $(1 - 0)$ مرجع قرار

جدول (۸) بردارهای صفر قابل استفاده به ازای خطای ویژه.

شماره خطا	بردارهای صفر قابل استفاده	بردارهای صفر	حالت کلیدهای اینورتر
۸ یا ۴ یا ۰	V_{0-4} و V_{0-1}	V_{0-1}	۰۰۰۰۰۰
۹ یا ۵ یا ۱	V_{0-3} و V_{0-1}	V_{0-2}	۱۱۱۱۱۱
۱۰ یا ۶ یا ۲	V_{0-3} و V_{0-2}	V_{0-3}	۰۱۰۱۰۱
۱۱ یا ۷ یا ۳	V_{0-4} و V_{0-2}	V_{0-4}	۱۰۱۰۱۰

بردارهای مطلوب انتخاب می‌شوند. در جدول (۱۰) زمان اعمال بردارهای انتخابی آورده شده است. برای آنکه کارایی جدول کلیدزنی پیشنهادی در هنگام بروز خطا به اثبات برسد، این جدول کلیدزنی برای روش PI - DutyDTC که در [۱۶] ارائه شده است، استفاده می‌شود. بلوک دیاگرام کنترلی این روش در شکل (۳) نشان داده شده است.

۴- شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی در محیط نرم افزاری متلب برای روش PI - DutyDTC با بکارگیری جدول کلیدزنی پیشنهادی در شرایط غیر ایده آل (با در نظر گرفتن اثر One Step Delay) برای حالت‌های مختلف بار و سرعت در زمان‌های قبل و بعد از وقوع خطا بررسی شده است.

جدول (۶) شماره گذاری خطاها.

شماره خطا	حالت خطا	شماره خطا	حالت خطا	شماره خطا	حالت خطا
۰	(۱-۰)	۴	(۳-۰)	۸	(۵-۰)
۱	(۲-۰)	۵	(۴-۰)	۹	(۶-۰)
۲	(۵-۱)	۶	(۱-۱)	۱۰	(۳-۱)
۳	(۶-۱)	۷	(۲-۱)	۱۱	(۴-۱)

جدول (۷) نسبت زمان اعمال بردارها در مقایسه با یکدیگر.

اندازه بردار در صفحه Z	گروه	زمان اعمال بردار دوم	زمان اعمال بردار اول	بردارهای انتخابی
۰,۲۹۸۹	V	۰,۲۶۸	۰,۷۳۲	W
۰,۸۱۶۵	W	۰,۴۲۴۶	۰,۵۷۵۴	Q
۱,۱۱۵۴	Q	۰,۲۱۱	۰,۷۸۹	V
۰,۵۷۷۴	U	۰,۵۸۶	۰,۴۱۴	U

تحلیل بردارهای صفر در وقوع خطا، در نهایت جدول کلیدزنی مطابق جدول (۹) بدست می‌آید. برای استفاده از جدول (۹) ابتدا با توجه به شماره خطا و شماره قطاع مقدار متغیر State بدست می‌آید و سپس

جدول (۹) جدول کلیدزنی پیشنهادی (نحوه انتخاب بردارها).

State_num	Selected vectors				
1	W_{K+2}	Q_{K+2}	V_{K+4}	W_{K+4}	V_0
2	W_{K+1}	Q_{K+1}	W_{K+5}	U'_{K+3}	V_0
3	W_{K+1}	Q_{K+1}		W_{K+4}	V_0
4	V_{K+1}	W_{K+1}		U'_{K+5}	V_0
5		V_{K+1}		U'_{K+4}	V_0
6		W_{K+1}		U_{K+5}	V_0
7		U_{K+2}		W_{K+5}	V_0
8		U_{K+3}		V_{K+5}	V_0
9		U_{K+2}	V_{K+5}	W_{K+5}	V_0
10		W_{K+2}	W_{K+5}	Q_{K+5}	V_0
11	W_{K+1}	U_{K+4}	W_{K+5}	Q_{K+5}	V_0
12	V_{K+2}	W_{K+2}	W_{K+4}	Q_{K+4}	V_0

جدول (۱۰) جدول کلیدزنی پیشنهادی (زمان اعمال بردارها).

State_num	Time of Selected vectors				
1	(0.5754)(d1)	(0.4246)(d1)	(0.732)(d2-d1)	(0.268)(d2-d1)	(1-d2)
2	(0.5754)(d1)	(0.4246)(d1)	(0.414)(d2-d1)	(0.586)(d2-d1)	(1-d2)
3	(0.5754)(d1)	(0.4246)(d1)		(d2-d1)	(1-d2)
4	(0.732)(d1)	(0.268)(d1)		(d2-d1)	(1-d2)
5		d1		(d2-d1)	(1-d2)
6		d1		(d2-d1)	(1-d2)
7		d1		(d2-d1)	(1-d2)
8		d1		(d2-d1)	(1-d2)
9		d1	(0.732)(d2-d1)	(0.268)(d2-d1)	(1-d2)
10		d1	(0.5754)(d2-d1)	(0.4246)(d2-d1)	(1-d2)
11	(0.414)(d1)	(0.586)(d1)	(0.5754)(d2-d1)	(0.4246)(d2-d1)	(1-d2)
12	(0.732)(d1)	(0.268)(d1)	(0.5754)(d2-d1)	(0.4246)(d2-d1)	(1-d2)

یک فاز استاتور و گشتاور موتور برای روش پایه و روش پیشنهادی را در حالت پایدار برای بار ۳ نیوتون متر و سرعت مرجع ۷۵ رادیان بر ثانیه نشان می دهد. مقادیر عددی مربوطه نیز در جدول (۱۲) ارائه شده است. با انجام شبیه سازی در بارها و سرعت های مختلف، روش پیشنهادی به طور متوسط ضربان شار و گشتاور را به ترتیب ۸۳،۹۲ و ۸۳،۲۹ درصد نسبت به روش پایه کاهش می دهد. همچنین مقدار تلفات در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ به مقدار ناچیزی می رسد. البته فرکانس کلیدزنی در روش پیشنهادی ۷،۶ برابر روش پایه است، که به دلیل اعمال ۵ بردار به جای یک بردار در هر دوره نمونه برداری می باشد. البته این ویژگی همی روش های Duty Cycle Control است که به دلیل اعمال تعداد بردار بیشتر، فرکانس کلیدزنی بالاتری نیز دارند. با وجود اینکه فرکانس کلیدزنی بیشتر، موجب افزایش تلفات کلیدزنی می شود، مقدار تلفات کلیدزنی به قدری نیست که در تلفات کل تاثیر قابل توجهی داشته باشد. به طوریکه تلفات کل در روش پیشنهادی نسبت به روش پایه به اندازه ۵،۵ درصد هم کاهش داشته است. حال به بررسی روش پیشنهادی در حالت قبل و بعد از وقوع خطا می پردازیم.

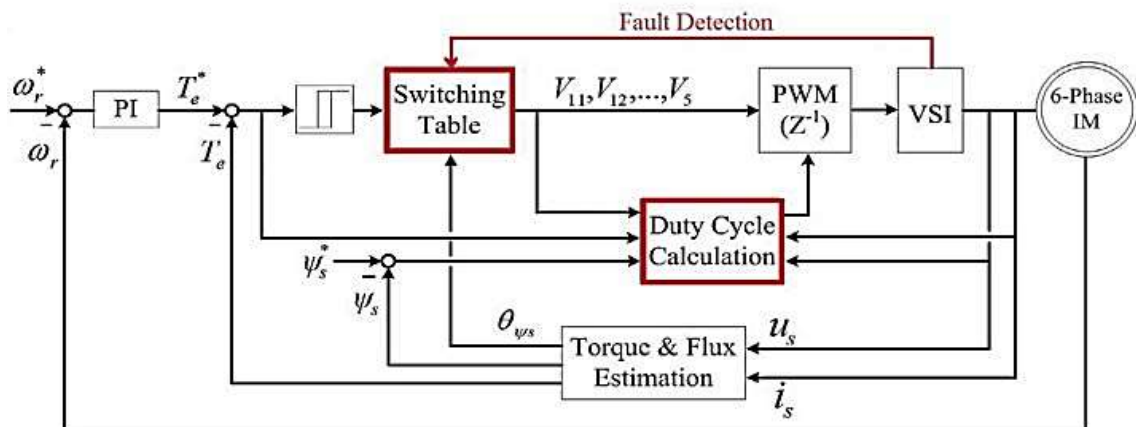
شار نامی موتور برابر با ۰،۵ وبر است و خطای پیش آمده از نوع $(1 - 0)$ است. یعنی کلید بالای ساق اول دچار مشکل شده و مقدار ساق روی صفر قفل شده است. نتایج شکل جریان استاتور، شار، گشتاور، سرعت رتور به ازای بارها و سرعت های مختلف آورده شده است. پارامترهای موتور القایی شش فاز مورد استفاده در شبیه سازی در جدول (۱۱) آمده است. متوسط فرکانس کموتاسیون، از شمارش تعداد کل تغییر وضعیت مربوط به هر ساق در یک دوره زمانی ثابت (در اینجا ۰،۵ ثانیه) بدست می آید. همچنین برای محاسبه ضربان شار و گشتاور از روابط زیر استفاده شده است:

$$\psi_{rip} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|\bar{\psi}_s(i)| - |\bar{\psi}_s|_{avg})^2} \quad (12)$$

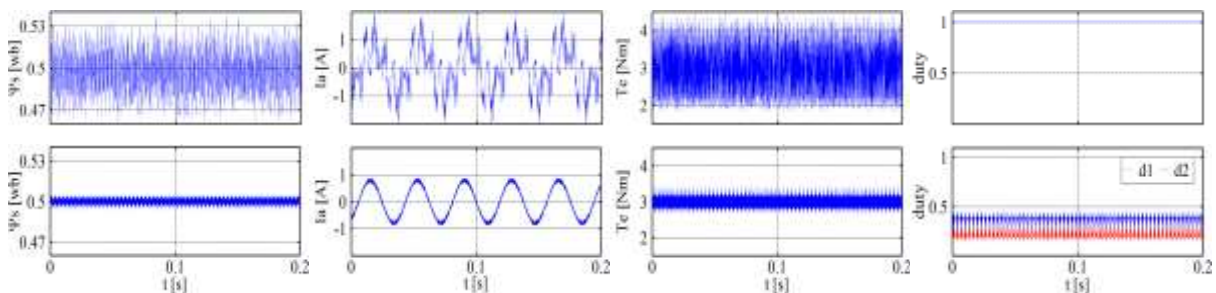
$$T_{rip} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_e(i) - T_{avg})^2} \quad (13)$$

که N تعداد نمونه و T_{avg} و $|\bar{\psi}_s|_{avg}$ به ترتیب متوسط گشتاور و شار استاتور است.

ابتدا نتایج شبیه سازی برای مقایسه جدول کلیدزنی پیشنهادی با روش پایه در حالت پایا در شرایط غیر ایده آل (با در نظر گرفتن اثر One Step Delay) آورده می شود. شکل (۴) نتایج شبیه سازی کمیت های شار استاتور، جریان



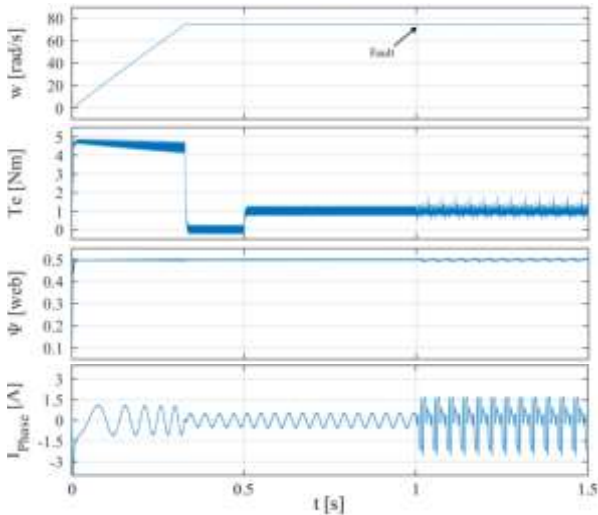
شکل (۳) فرایند توسعه بلوک دیاگرام کنترلی برای روش پیشنهادی.



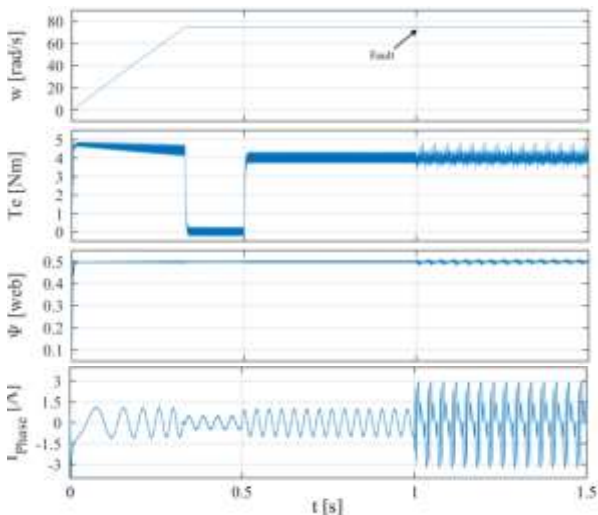
شکل (۴) پارامترهای مختلف موتور در سرعت ۷۵ rad/s و بار ۲،۵ N-m برای روش پایه و پیشنهادی به ترتیب از بالا به پایین.

جدول (۱۱) پارامترهای موتور مورد استفاده در شبیه سازی

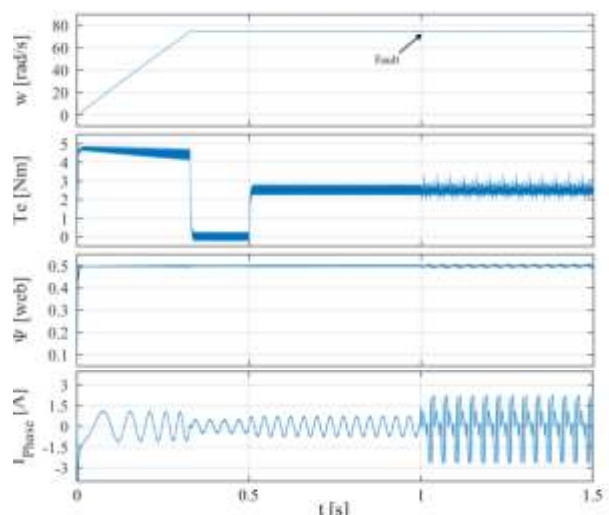
توان نامی	۷۰۰ w
ولتاژ نامی	۲۰۰ V
جریان نامی	۲ A
سرعت نامی	۱۴۰۰ rpm
فرکانس	۵۰ Hz
تعداد قطب	۴
Lm	۱۹۶ mH
Ls	۶۰۳,۳ mH
Lr	۶۰۴,۴ mH
Rs	۱۵,۰ Ω
Rr	۷,۹۱ Ω



شکل (۶) پارامترهای مختلف موتور در حالت قطع فاز در سرعت ۷۵ rad/s و بار ۱ N-m.



شکل (۷) پارامترهای مختلف موتور در حالت قطع فاز در سرعت ۷۵ rad/s و بار ۴ N-m.



شکل (۵) پارامترهای مختلف موتور در حالت قطع فاز در سرعت ۷۵ rad/s و بار ۲,۵ N-m.

جدول (۱۳) مقایسه عددی پارامترهای مختلف موتور.

حالت قطع فاز	حالت عادی	نماد
۱۰	۱۸,۶۶	فرکانس کلیدزنی (KHz)
۰,۱۵۴۱	۰,۱۲۱۳	ضربان گشتاور (N.m)
۰,۰۰۳۵	۰,۰۰۲۱	ضربان شار (wb)

با مقدار نامی ۲,۵ نیوتون متر و سرعت موتور نیز برابر با مقدار نامی ۷۵ رادیان بر ثانیه است، نشان می‌دهد. موتور ابتدا در شرایط بی‌باری راه‌اندازی شده و سپس گشتاور بار در لحظه $t = 0.5$ به مقدار نامی رسیده است. در لحظه $t = 1$ ثانیه نیز خطا رخ داده است. همانطور که در شکل (۵) مشخص است، بعد از وقوع خطا نیز موتور همچنان با سرعت نامی به

جدول (۱۲) مقایسه عددی پارامترهای مختلف موتور.

روش پیشنهادی	روش پایه	نماد
۰,۱۳۲۵	۰,۵۸۰۲	ضربان گشتاور (N.m)
۰,۰۰۲۳	۰,۰۱۵۳	ضربان شار (wb)
۱۸,۶۶	۲,۴۵	فرکانس کلیدزنی (KHz)
۰,۰۰۱۴۲	۲۳,۹۲	تلفات صفحه $(Z_1 - Z_2)$
۳,۲۷	۰,۵۲	تلفات کلیدزنی
۵۰۱	۵۳۰	تلفات کل

الف- پاسخ موتور در شرایط بار نامی و سرعت نامی

شکل (۵) نتایج شبیه‌سازی را در حالتی که گشتاور بار برابر

ه- پاسخ موتور در شرایط بار نامی و سرعت بالا

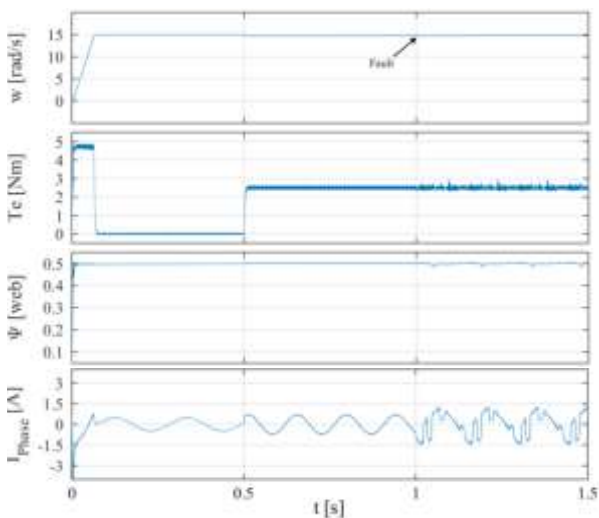
در این حالت روش پیشنهادی برای سرعت بالا یعنی ۱۵۰ رادیان بر ثانیه تست شده است. همانطور که شکل (۹) نشان می‌دهد، سرعت موتور بعد از وقوع خطا افت نکرده است و موتور عملکرد خوبی نشان می‌دهد. ضربه گشتاور تا حدودی زیاد شده است ولی این افزایش در نقاط محدودی به صورت تیزی رخ داده و در اکثر نقاط ضربه کم است. با توجه به این که ثابت زمانی مکانیکی موتور مقدار بزرگی دارد، تیزی در نقاطی محدود تأثیری در عملکرد موتور نخواهد داشت.

و- پاسخ موتور در حالت قطع فاز در اثر تغییر ناگهانی گشتاور بار

روش پیشنهادی برای تغییرات ناگهانی گشتاور و سرعت در زمان بعد از وقوع خطا نیز در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در زمان وقوع خطا مقدار بار ۲٫۵ نیوتون متر است. در زمان $t = 0.5$ ثانیه، ابتدا بار افزایش یافته و به مقدار ۴ نیوتون متر رسیده و سپس در زمان $t = 1$ ثانیه مقدار بار به ۱ نیوتون متر کاهش می‌یابد.

ز- پاسخ موتور در حالت قطع فاز در اثر تغییر ناگهانی سرعت مرجع

در این حالت در زمان وقوع خطا سرعت موتور مقدار نامی ۷۵ نیوتون متر است. در حالت پایدار در زمان $t = 0.5$ ثانیه، سرعت مرجع به مقدار ۵۰ رادیان بر ثانیه کاهش می‌یابد.



شکل (۸) پارامترهای مختلف موتور در حالت قطع فاز در سرعت ۱۵ rad/s و بار ۲٫۵ N-m.

کار خود ادامه می‌دهد و مقدار افزایش ضربه بار و گشتاور نیز قابل قبول است.

در جدول (۱۳) مقایسه عددی پارامترهای مختلف موتور در حالت عادی و حالت وقوع خطا در شرایط بار و سرعت نامی، آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در زمان وقوع خطا فرکانس کلید زنی نسبت به حالت عادی حدود ۴۶ درصد کمتر است. دلیل این کاهش، حذف کلیدزنی در ساق معیوب و کاهش تعداد بردارهای اعمالی در بعضی از قطعات می‌باشد. با توجه به مقادیر جدول، با وقوع خطا مقدار ضربه بار گشتاور و شار به ترتیب ۲۷ و ۶۶ درصد نسبت به حالت بدون خطا افزایش می‌یابد. این میزان افزایش ضربه بار و گشتاور با توجه به عملکرد صحیح موتور قابل قبول است. از طرفی، این مقادیر همچنان از مقدار ضربه بار و گشتاور که در روش پایه در حالت بدون خطا بدست می‌آید، بطور قابل ملاحظه‌ای (حدوداً ۷۰٪) کمتر هستند.

ب- پاسخ موتور در شرایط بار کم و سرعت نامی

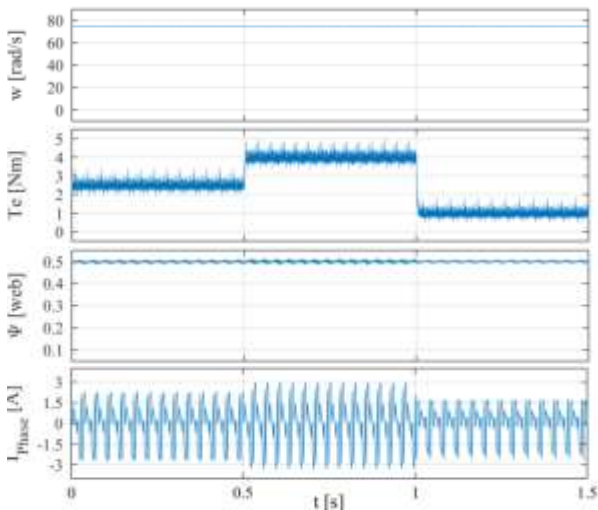
در این حالت سرعت همان سرعت نامی ۷۵ رادیان بر ثانیه است. موتور در حالت بی باری راه‌اندازی می‌شود و در لحظه $t = 0.5$ ثانیه به مقدار ۱ نیوتون متر میرسد. سپس در لحظه $t = 1$ ثانیه خطا رخ می‌دهد. شکل (۶) نتایج شبیه‌سازی در این شرایط را نشان می‌دهند. واضح است که در این حالت نیز علی‌رغم وجود خطا، موتور همچنان با سرعت نامی به کار خود ادامه می‌دهد و ضربه بار و گشتاور قابل قبولی دارد.

ج- پاسخ موتور در شرایط بار زیاد و سرعت نامی

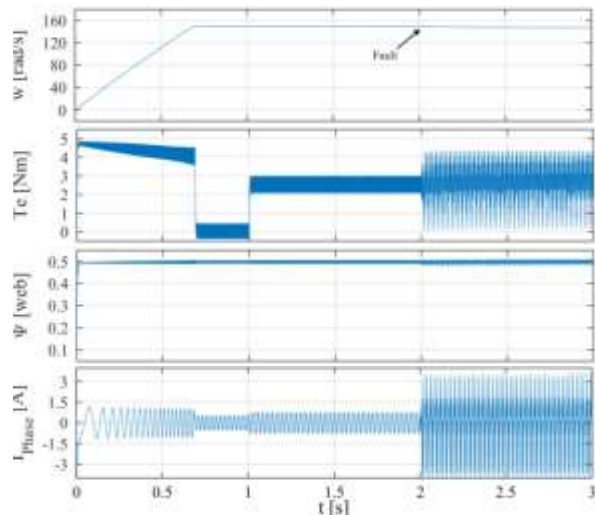
در این حالت بار موتور ۴ نیوتون متر است و سرعت نیز همان سرعت نامی است. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، در این شرایط نیز موتور عملکرد خوبی دارد و سرعت آن افت نمی‌کند.

د- پاسخ موتور در شرایط بار نامی و سرعت پایین

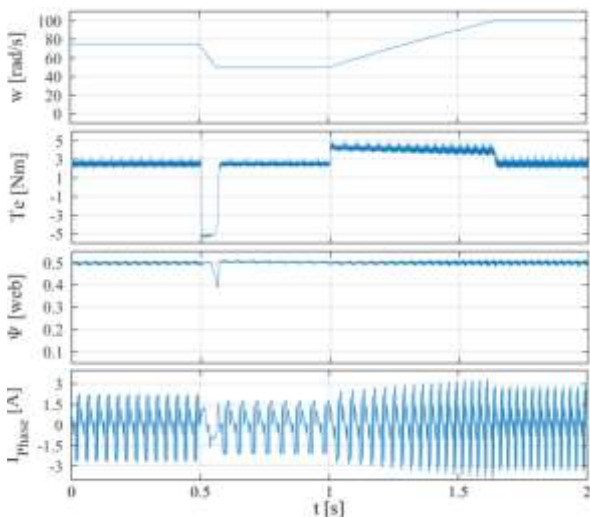
در این حالت بار مقدار نامی ۲٫۵ نیوتون متر دارد ولی سرعت آن کم و برابر با ۱۵ رادیان بر ثانیه است. با توجه به شکل (۸) مشخص است که روش پیشنهادی در این شرایط نیز از کارایی خوبی برخوردار است.



شکل (۱۰) پاسخ دینامیکی در اثر تغییر ناگهانی گشتاور بار در حالت قطع فاز.



شکل (۹) پارامترهای مختلف موتور در حالت قطع فاز در سرعت ۱۵۰ rad/s و بار ۲,۵ N-m.



شکل (۱۱) پاسخ دینامیکی در اثر تغییر ناگهانی سرعت مرجع در حالت قطع فاز.

در حالت قطع فاز، می‌توان به روش کنترلی تحمل‌پذیر خطا دست یافت که علاوه بر عملکرد صحیح موتور پس از وقوع خطا، منجر به افزایش توان تزریقی به ماشین در شرایط قطع فاز و همچنین امکان کنترل ماشین القایی شش‌فاز در روش کنترل گشتاور به همراه کنترل چرخه‌کاری در شرایط خطا می‌شود. با انتخاب بردارهای مناسب از میان بردارهای قابل اعمال، مقادیر ضربان شار و گشتاور و تلفات در صفحه $(Z_1 - Z_2)$ در شرایط پس از خطا قابل قبول می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی تحت سرعت‌های مختلف و بارهای مختلف و بررسی پارامترهایی چون ضربان شار و گشتاور، شکل موج جریان استاتور نشان می‌دهد موتور پس از وقوع خطا نیز همچنان با سرعت مرجع عملکرد مطلوب

سپس در زمان $t = 1$ ثانیه، مقدار سرعت مرجع را برابر ۱۰۰ رادیان بر ثانیه قرار می‌دهیم. شکل (۱۱) نشانگر صحت عملکرد موتور در این شرایط است.

۵- نتیجه‌گیری

در روش‌های معمول ارائه شده در هنگام خطای قطع فاز کل فاز مربوطه قطع می‌شود. این کار باعث می‌شود که موتور چندفاز نتواند با توان نامی خود در حالت قطع فاز کار کند. با روش پیشنهادی در این مقاله امکان تزریق توان در این حالت فراهم می‌شود. در عملکرد حالت سالم ماشین‌های چندفاز، جریان‌های تمامی فازهای استاتور دارای مقادیر یکسان (در حالت ایده‌آل) هستند و محدودیت‌ها توسط جریان نامی سیستم محرک به این جریان‌ها اعمال می‌شود. حال اگر یک فاز به سبب خطای قطع فاز از دست برود، مقدار موثر و شکل موج‌های جریان استاتور بطور کامل برهم می‌ریزد و گشتاور با ضربان زیادی همراه خواهد بود.

جریان فازها در این حالت افزایش می‌یابند. در روش عنوان شده به دلیل عدم قطع کامل فاز مورد نظر و تزریق توان مورد نیاز توسط یک کلید دیگر، این مقدار افزایش چندانی ندارد.

در این مقاله با ارائه یک روش جدید در حالت قطع فاز مبنی بر عدم کنار گذاشتن ساق معیوب و استفاده از کلید سالم آن ساق، پیشنهاد قطع‌بندی جدید بردارهای ولتاژ، ارائه جدول کلیدزنی جدید در شرایط قطع فاز و همچنین اعمال روش کنترلی PI-DutyDTC بر مبنای روش Duty Cycle Control

[8] Lu, B. and Sharma, S., "A Literature Review of IGBT Fault Diagnostic and Protection Methods for Power Inverters," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.45, No.5, pp.1770-1777, 2009.

[9] Wang, X., Wang, Z., Xu, Z., Cheng, M., Wang, W. and Hu, Y., "Comprehensive Diagnosis and Tolerance Strategies for Electrical Faults and Sensor Faults in Dual Three-Phase PMSM Drives", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.34, No.7, pp.6669-6684, 2019.

[10] Gonz'alez-Prieto, I., Duran, M.J., Rios-Garcia N., Barrero, F., and Mart'ın, C., "Open-Switch Fault Detection in Fve-Phase Induction Motor Drives Using Model Predictive Control," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.65, No.4, pp.3045-3055, 2018.

[11] Bermudez, M., Gonz'alez-Prieto, I., Barrero, F., Guzman, H., Kestelyn, X., and Duran, M.J., "An Experimental Assessment of Open-Phase Fault-Tolerant Virtual-Vector based Direct Torque Control in Fve-Phase Induction Motor Drives," IEEE Trans. Power Electron., Vol.33, No.3, pp.2774-2784, 2018.

[12] Zhao, Y. and Lipo, T., "Space Vector PWM Control of Dual Three-Phase Induction Machine using Vector Space Decomposition", IEEE Trans. Ind. App, Vol.31, No.5, pp.1100-1109, 1995.

[13] Zhao Thomas, Y., Lipo, A., "Modeling and Control of a Multi-Phase Induction Machine with Structural Unbalance", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.11, No.3, Part1, 1996.

[14] Che H.S., Levi, E., Jones, M., Hew, W.P. and Rahim, N.A., "Current Control Methods for an Asymmetrical Six-Phase Induction Motor Drive," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.29, No.1, pp.407-417, 2014.

[15] Pujol A. A., "Improvements in Direct Control of Induction Motors", Ph.D. Thesis, Catalonia University of Thechnology, 2000.

[16] Masoumkhani, H. and Taheri, A., "PI Regulator-Based Duty Cycle Control to Reduce Torque and Flux Ripples in DTC of Six-phase Induction Motor", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. Early Access.

داشته و مقدار افزایش ضربان شار و گشتاور هم قابل قبول می‌باشد. این نتایج کارآمدی جدول کلیدزنی پیشنهادی را در هنگام وقوع خطا به اثبات می‌رساند.

۶- ضمیمه

$$T_6 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

۷- مراجع

[1] Abdel-Khalik, A.S., Massoud, A.M. and Ahmed, S., "Nine-Phase Six-Terminal Induction Machine Modeling Using Vector Space Decomposition," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.66, No.2, pp.988-1000, 2019.

[2] Melo, V.F.M.B., Jacobina C.B., Rocha, N. and Braga-Filho, E.R., "Fault Tolerance Performance of Two Hybrid Six-Phase Drive Systems Under Single-Phase Open-Circuit Fault Operation" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.55, No.3, pp.2973-2983, 2019.

[3] Holakooie M.H., Ojaghi, M. and Taheri, A., "Direct Torque Control of Six-Phase Induction Motor With a Novel MRAS-Based Stator Resistance Estimator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.65, No.10, pp.7685-7696, 2018.

[4] Holakooie M.H., Ojaghi, M. and Taheri, A., "Modified DTC of a Six-Phase Induction Motor With a Second-Order Sliding-Mode MRAS-Based Speed Estimator", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.34, No.1, pp.600-611, 2019.

[5] Sleszynski, W., Nieznanski, J., and Cichowski, A., "Open-Transistor Fault Diagnostics in Voltage-Source Inverters by Analyzing the Load Currents," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.56, No.11, pp.4681-4688, 2009.

[6] Estima J.O. and Cardoso, A.J.M., "A New Algorithm for Real-time Multiple Open-Circuit Fault Diagnosis in Voltage-Fed PWM Motor Drives by the Reference Current Errors," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.60, No.8, pp.3496-3505, 2013.

[7] Che, H., Levi, E., Jones, M., Ping, H. and Rahim N.A., "Current Control Methods for an Asymmetrical Six-phase Induction Motor Drive", IEEE Trans. Power Electron, Vol.27, No.1, pp.407-417, 2014.