

کاهش نوسانات سرعت در محرکه موتور القایی قفس سنجابی سه فاز در حالت تغذیه تکفاز

همایون مشگین کلک

استادیار

دانشکده مهندسی برق تفرش، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

با پیشرفت سیستم‌های ریزپردازنده‌ای بسیار سریع و قطعات نیمه‌هادی با سرعت و قدرت بالا، محرکه‌های موتورهای القایی در صنعت مدرن کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. با اینحال، در شرایطی که یک یا چند عنصر نیمه‌هادی در یکسوکننده و یا اینورتر تغذیه‌کننده‌ی موتور آسیب می‌بیند، در تغذیه موتور، حالت عدم تقارن و یا افت ولتاژ و در گشتاور و سرعت موتور، اعوجاج شدید ایجاد می‌شود. در این مقاله، شرایط کار موتور، بعد از وقوع خرابی در عناصر اینورتر و ادامه کار موتور تحت شرایط قطع یک فاز که منجر به نوسانات سرعت آن می‌شود، مورد بررسی، شبیه‌سازی و آزمایش قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، الگویی برای کاهش نوسانات سرعت موتور ارائه می‌گردد.

Reduction of Speed Oscillation in Three-Phase Induction Motor Drive Under Single Phase Operation

H. Meshgin Kelk

Assistant Professor

Amirkabir University of Technology, Tafresh Campus

Abstract

Three phase induction motor drives are widely used in modern industry due to appearance of high speed power electronic devices and microprocessors. Simulation results under device faults in inverter stage of an induction motor drive shows that there are undesirable affects in motor voltages and motor speed. Experimental results confirm the existence of motor speed oscillation. This study shows that after fault occurrence, it is possible to drive the motor in single-phase mode. However, there is large low frequency speed oscillation. Simulation results show that it is possible to reduce motor speed oscillation by injection of proper current harmonic to motor under single-phase operation.

Keyword

Induction motor drive, fault, single phase operation



امروزه با توجه به کاربرد گسترده موتورهای القایی در صنعت مدرن و همچنین بکارگیری این موتورها در سیستم‌های حمل و نقل و خودروهای الکتریکی، و ظهور سیستم‌های ریزپردازنده‌ای بسیار سریع و قطعات نیمه‌هادی با سرعت و قدرت بالا، امکان کنترل و بهره‌برداری از موتورهای القایی در حد مطلوب وجود دارد. به کمک سیستم‌های کنترل ریزپردازنده‌ای و قطعات نیمه‌هادی جدید، کارمی‌توان از الگوهای مختلف کلیدزنی برای کنترل موتور استفاده نمود. از روش‌های مرسوم، می‌توان به مدولاسیون پهنای پالس (PWM)، روش PWM با نمونه‌برداری سینوسی و با نمونه‌برداری یکنواخت، و روش‌های PWM با حذف هارمونیک‌های خاص اشاره کرد. بهینه‌سازی راندمان و حداقل کردن ضرایب‌های گشتاور نیز از روش‌های بهینه کنترل اینورترهای PWM است. روش‌های PWM با نمونه‌برداری سینوسی و یکنواخت را می‌توان با مدارهای آنالوگ پیاده‌سازی کرد، ولی روش‌های PWM بهینه، نیاز به کنترل ریزپردازنده‌ای دارند [۱].

از طرف دیگر، در شرایطی که موتور القایی توسط یک سیستم یکسوکننده-اینورتر تغذیه می‌شود، بالا بودن قابلیت اطمینان سیستم الکترونیک قدرت تغذیه‌کننده موتور در کاربردهای صنعتی، تجاری، حمل و نقل، فضایی و نظامی از اهمیت خاصی برخوردار است. در شرایطی که برخی از عناصر نیمه‌هادی در یکسوکننده و یا اینورتر آسیب می‌بینند، در تغذیه موتور حالت عدم تقارن و یا افت ولتاژ، و در سرعت و گشتاور موتور اعوجاج شدید ایجاد می‌شود. در صورت وقوع چنین خطاهایی روش‌هایی برای ادامه کار موتور ارائه شده‌اند: داشتن اینورتر ذخیره برای جایگزینی در صورت لزوم، استفاده از ماشین با تعداد فاز بیشتر (۵ یا ۶ فاز) که هر کدام از فازهای آن با یک اینورتر تکفاز مستقل کنترل می‌شود و داشتن اینورتر تکفاز ذخیره برای جایگزینی در صورت بروز خطا [۲]، و طراحی اینورتر اولیه به نحوی که حالت اضافه‌باری را بتواند تحمل نماید [۳]، که در روش اخیر سبب بالا رفتن هزینه سیستم تغذیه موتور می‌شود.

در برخی از کاربردها امکان خروج موتور از سرویس وجود ندارد. در قطارهای زیرزمینی و خودروهای الکتریکی، زمانی که در حال حرکت هستند و در سیستم محرکه آنها خطایی رخ می‌دهد، مطلوب آنست که تا رسیدن به ایستگاه تعمیرات، وسیله نقلیه بتواند همچنان به حرکت خود ادامه دهد. اصولاً در حمل و نقل به گشتاور حرکتی کوچکی نیاز است (برای غلبه بر اصطکاک و مقاومت هوا) که این گشتاور به راحتی با محرکه آسیب دیده نیز قابل تامین است. با این حال، بدلیل کاهش حداکثر ظرفیت محرکه، شتاب‌گیری وسیله نقلیه با محدودیت مواجه خواهد بود.

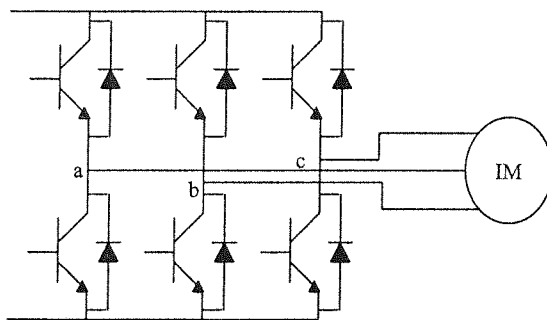
در صورت بروز خطا در محرکه آسانسورها، متوقف نشدن آسانسور در بین دو طبقه و رسیدن آن به طبقه بعدی یا قبلی از اهمیت خاصی برخوردار است. پس اگر آسانسور به صورت کامل بارگذاری نشده باشد، ادامه کار آن با بار سبک برای مدت محدود مناسب است.

در این موارد، چنانچه بتوان با همان اینورتر آسیب دیده، البته با توان پایین‌تر موتور را تغذیه نمود، کار موتور برای مدت محدود ادامه خواهد یافت. توجه شود که به دلیل عملکرد بد موتور تحت این شرایط، کنترل کلیدهای نیمه‌هادی تحت این شرایط از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نحوه تنظیم دامنه و فاز جریان فازهای باقیمانده در صورت باز شدن یکی از فازهای ماشین سه‌فاز، در [۴] ارائه شده است. با این حال پیاده‌سازی روش پیشنهادی در [۴] نیاز به اتصال نقطه نول موتور به وسط خازن پیوند DC دارد و سبب ایجاد جریان بزرگ در سیم نول می‌شود. همچنین برای موتورهای با اتصال مثلث کاربرد ندارد. برای کاربردهای صنعتی همچون غلتک‌های نورد و کاغذ و مشابه آنها، همواره به گشتاور حداکثر نیاز است. به همین دلیل، در این نوع کاربردها، از ابتدا می‌توان محرکه را به صورت پیشینه طراحی نمود.

در این مقاله، شرایط کار محرکه بعد از وقوع خرابی در عناصر اینورتر و عملکرد موتور در حالت قطع یک فاز که شدیدترین عدم تقارن در تغذیه موتور است، شبیه‌سازی و آزمایش می‌شود. پس از آن، برای بهبود عملکرد موتور در حالت تغذیه تکفاز، الگوهای تغذیه مناسب که بر مبنای تزریق هارمونیک‌های ولتاژ به ولتاژ تغذیه موتور است ارائه می‌شوند. برای داشتن الگوهای مناسب و دقیق، ماشین در فضای حقیقی مدل شده [۷]، و برای تعیین الگوهای بهینه از روش الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

۱- سیستم تغذیه موتور القایی و خطاهای محتمل در اینورتر تغذیه موتور

در شکل (۱) نحوه اتصال یک موتور القایی سه فاز به یک اینورتر منبع ولتاژ نشان داده شده است. خروجی اینورترهای منبع ولتاژ، ولتاژی است با فرکانس و دامنه متغیر که این کار با قطع و وصل متناوب ولتاژ ورودی آن که از نوع DC است حاصل می شود. این ولتاژ DC با یکسوسازی و فیلتر نمودن ولتاژ متناوب ورودی یکسوکنده بدست می آید. برای ایجاد ولتاژ مطلوب در خروجی اینورتر، معمولاً از روش های PWM استفاده می شود. در مواردی که از کلیدهای نیمه هادی سریع همچون IGBT استفاده می شود، فرکانس کلیدزنی PWM را می توان آنقدر بالا برد که جریان خروجی با فیلترینگ مناسب، دارای اعوجاج بسیار کمی باشد. البته در برخی موارد، شکل ولتاژ خروجی اینورتر از نوع شش پله ای نیز دیده شده است.



شکل (۱): نحوه اتصال موتور القایی سه فاز به اینورتر منبع ولتاژ

بدلیل مشخصه های کنترلی مطلوب، اینورترهای منبع ولتاژ تا حد توان های متوسط کاربرد وسیعی پیدا کرده اند. با این حال در توان های بالا بدلیل آسیب پذیری عملکرد اینورتر نسبت به خرابی قطعات نیمه هادی، محدودیت دارند. عناصر نیمه هادی که اساسی ترین قسمت یک اینورتر را تشکیل می دهند، نسبت به تنش های جریان و ولتاژ بسیار حساس هستند. اضافه جریان و اضافه ولتاژ می توانند سبب آسیب دیدن قطعه نیمه هادی بشوند؛ به نحوی که قطعه به صورت یک مدار اتصال کوتاه عمل کند. همچنین، در اینورترهای ترانزیستوری، امکان مدار باز شدن یک قطعه نیمه هادی وجود دارد. این عناصر، اغلب دارای مدار کنترل ایزوله هستند. عمل اشتباه یکی از واحدهای کنترل، سبب باز ماندن قطعه نیمه هادی مربوط به آن می شود.

اتصال کوتاه شدن ترانزیستور، تنش های شدیدی روی قطعات اینورتر ایجاد می کند و بنابراین مدار باید به سرعت در مقابل آن حفاظت شود. این نوع خطا، شایع ترین خطا در اینورترهاست. یک ترانزیستور ممکن است در اثر تنش های جریان یا ولتاژ آسیب ببیند. آسیب دیدگی در اثر تنش جریان زمانی رخ می دهد که در حال عبور از جریان بار قطعه نیمه هادی است؛ در حالیکه آسیب دیدگی در اثر تنش ولتاژ در زمان قطع شدن جریان یا سد کردن ولتاژ مستقیم (توسط قطعه) رخ می دهد. برای چنین خطایی، تحریک ترانزیستور دوم در همان ساقی که خطا در آن رخ داده است، باید به سرعت غیرفعال شود تا از توسعه خطا جلوگیری شود؛ چه در غیر اینصورت، جریان فاز رشد شدیدی خواهد داشت.

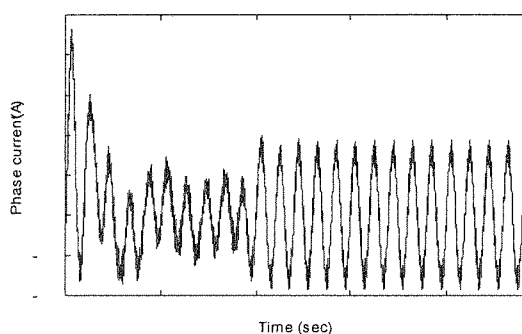
گرچه سیستم حفاظت، قطعات را در مقابل اضافه جریان حفاظت می کند، باید قبل از وصل مجدد تحریک به ترانزیستورهای سالم، ابتدا فاز معیوب از سیستم جدا شود. اگر فاز معیوب سریعاً باز شود، امکان ادامه کار موتور در حالت تکفاز (در بار کمتر) و همچنین عملکرد ضعیف تر وجود دارد.

۲- شبیه سازی موتور القایی در حالت تغذیه سه فاز و تکفاز

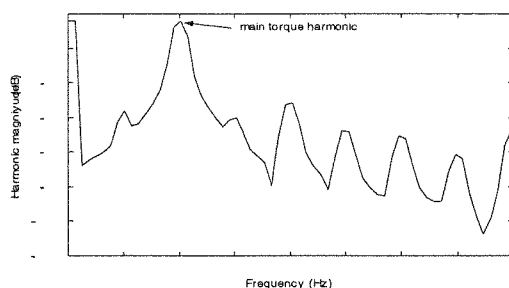
برای پیش بینی رفتار موتور القایی قفس سنجابی در حالت دائمی و در حالت دینامیکی و با شکل موج های مختلف برای ولتاژ موتور، می توان مدل سازی را با استفاده از روش تابع سیم پیچ [۶] و یا از روش مدار معادل مغناطیسی [۷] انجام داد. در هر دو روش تمام هارمونیک های فضایی سیم پیچی ها در نظر گرفته می شوند. با این حال، بدلیل آنکه در روش مدار معادل مغناطیسی می توان رلوکتانس دندانه های استاتور، رتور و شیارهای ماشین را در نظر گرفت، نتایج شبیه سازی با آن دقیق تر

است.

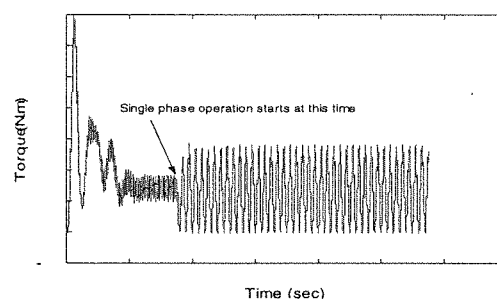
در این قسمت نتایج شبیه‌سازی یک موتور القایی سه‌فاز نمونه به کمک روش مدار معادل مغناطیسی و با فرض منحنی مغناطیسی به صورت خطی ارائه شده است. جریان یکی از فازهای ماشین در راه‌اندازی با تغذیه به صورت سه‌فاز و سپس ادامه کار بصورت تکفاز (در اثر وقوع خطا در اینورتر، و عمل سیستم حفاظتی اینورتر و تکفاز شدن خروجی آن) در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پس از تغییر وضعیت تغذیه از حالت سه‌فاز به حالت تکفاز، جریان فاز ماشین افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد که لزوم کاهش بار موتور در این حالت را نشان می‌دهد. گشتاور تولیدی و سرعت ماشین در قبل و بعد از تغییر وضعیت تغذیه ماشین در فرکانس تغذیه ۵۰ هرتز بترتیب در شکل‌های (۳) و (۵) نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود پس از تکفاز شدن تغذیه، در هر دو منحنی، نوساناتی با فرکانس ۱۰۰ هرتز، یعنی ۲ برابر فرکانس تغذیه، ایجاد می‌شود که در شکل‌های (۴) و (۶) نشان داده شده‌اند. نوسان گشتاور منجر به نوسان در سرعت ماشین می‌شود.



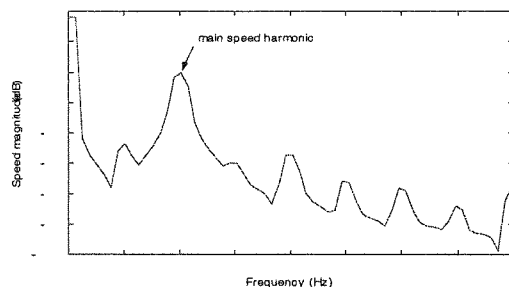
شکل (۲): جریان فاز ماشین قبل و بعد از تکفاز شدن تغذیه ماشین



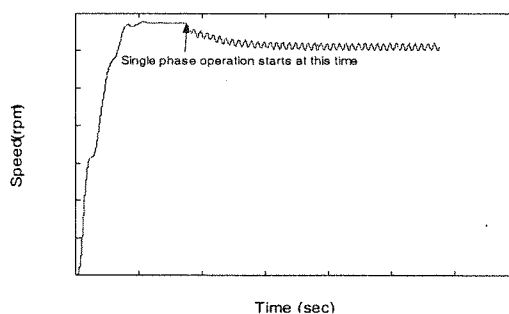
شکل (۴): طیف فرکانسی گشتاور تولیدی ماشین بعد از تکفاز شدن تغذیه ماشین در فرکانس تغذیه ۵۰ هرتز



شکل (۳): گشتاور تولیدی ماشین قبل و بعد از تکفاز شدن تغذیه ماشین در فرکانس تغذیه ۵۰ هرتز



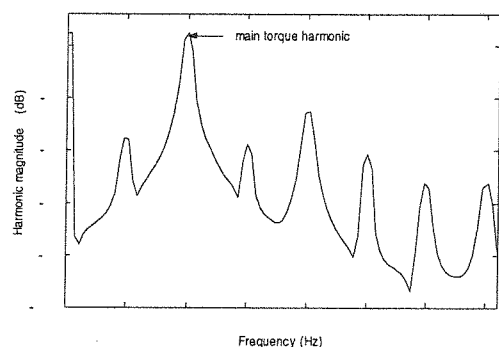
شکل (۶): طیف فرکانسی سرعت ماشین بعد از تکفاز شدن تغذیه ماشین در فرکانس تغذیه ۵۰ هرتز



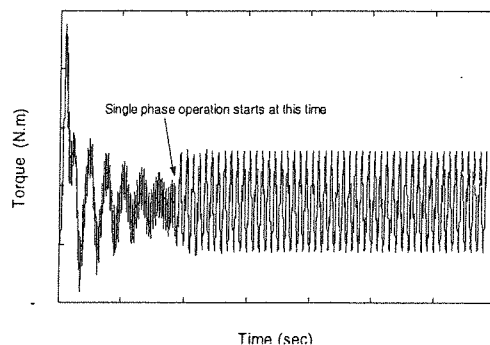
شکل (۵): سرعت ماشین قبل و بعد از تکفاز شدن تغذیه ماشین در فرکانس تغذیه ۵۰ هرتز

برای بررسی اثرات فرکانس تغذیه در عملکرد ماشین سه‌فاز در حالت تغذیه تکفاز، ماشین در فرکانس تغذیه ۲۵ هرتز نیز شبیه‌سازی شده است که نتایج آن در شکل‌های (۷) تا (۱۰) نشان داده شده‌اند. پس از تکفاز شدن تغذیه، در گشتاور و سرعت

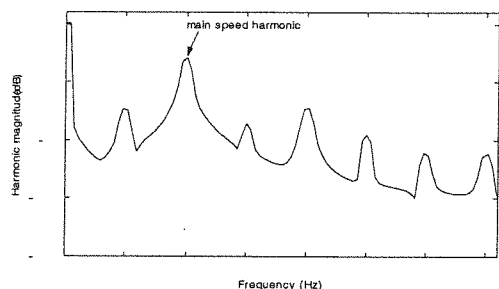
ماشین، نوساناتی با فرکانس ۵۰ هرتز، یعنی ۲ برابر فرکانس تغذیه، مشاهده می‌شود. همچنین دامنه نوسانات سرعت با کاهش فرکانس افزایش یافته است. توجه شود که دامنه نوسانات سرعت به اندازه ممان اینرسی مجموعه ماشین و بار آن بستگی دارد. با توجه به نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی ماشین، در اثر تغذیه ماشین القایی سه‌فاز با ولتاژ تکفاز، سرعت ماشین با فرکانسی دو برابر فرکانس تغذیه نوسان می‌کند که به دلیل پایین بودن فرکانس این نوسانات، امکان ایجاد پدیده تشدید مکانیکی وجود دارد و می‌تواند بسیار خطرناک باشد.



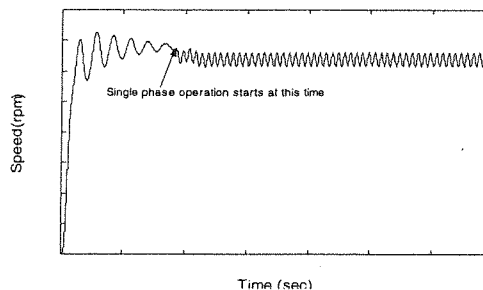
شکل (۸): طیف فرکانسی گشتاور تولیدی ماشین بعد از تکفاز شدن تغذیه ماشین در فرکانس تغذیه ۲۵ هرتز



شکل (۷): گشتاور تولیدی ماشین قبل و بعد از تکفاز شدن تغذیه ماشین در فرکانس تغذیه ۲۵ هرتز



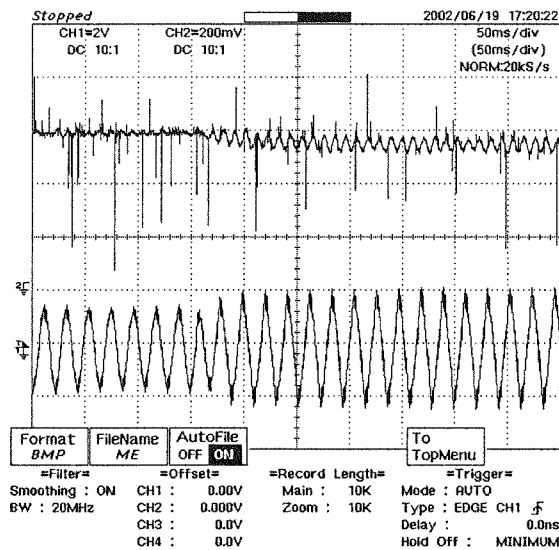
شکل (۱۰): طیف فرکانسی سرعت ماشین بعد از تکفاز شدن تغذیه ماشین در فرکانس تغذیه ۲۵ هرتز



شکل (۹): سرعت ماشین قبل و بعد از تکفاز شدن تغذیه ماشین در فرکانس تغذیه ۲۵ هرتز

۸- آزمایش یک موتور القایی در حالت تغذیه سه‌فاز و تکفاز

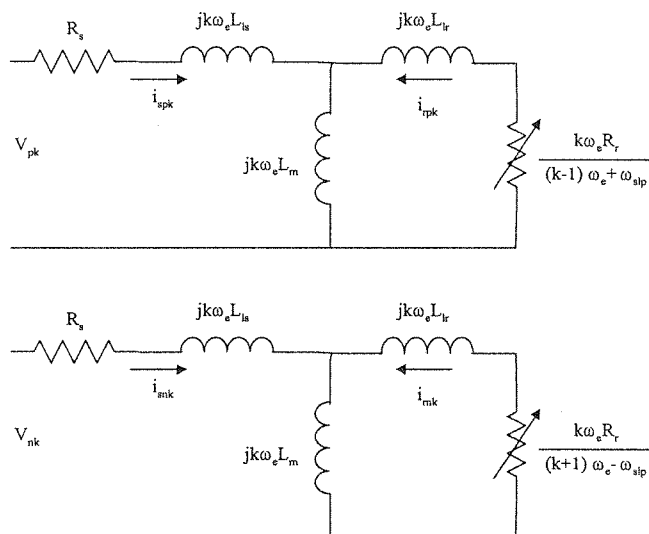
در این قسمت نتیجه آزمایش بر روی یک موتور القایی سه‌فاز نمونه، تغذیه شده توسط یک اینورتر منبع ولتاژ ارائه می‌شود. در ابتدا، موتور به صورت سه‌فاز تغذیه می‌شود و پس از آن با قطع یکی از فازهای خروجی اینورتر به موتور، تغذیه موتور به صورت تکفاز در می‌آید. سرعت و جریان یکی از فازهای ماشین به ترتیب توسط حس‌گر مناسب سرعت و جریان، اندازه‌گیری و در حافظه یک اسیلوسکوپ دیجیتال ذخیره می‌شود. در شکل ۱۱، منحنی‌های سرعت (در بالا) و جریان (در پایین) نشان داده شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی و عملی یکدیگر را بخوبی تایید می‌کنند. مشاهده می‌شود که پس از تغییر وضعیت تغذیه از حالت سه‌فاز به حالت تکفاز، سرعت ماشین افت می‌کند و در آن نوسان ایجاد می‌شود. دامنه جریان فاز ماشین هم افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد که لزوم کاهش بار موتور در این حالت را نشان می‌دهد، چرا که قطعات نیمه‌هادی محدودیت جریانی دارند و ادامه کار موتور بدون کاهش بار، به این قطعات آسیب می‌رساند. همچنین مشاهده شد که نویز صوتی موتور افزایش می‌یابد.



شکل (۱۱): منحنی‌های سرعت (بالا) و جریان ماشین (پایین) بدست آمده از آزمایش قبل و بعد از تکفاز شدن تغذیه ماشین

۴- گشتاورهای هارمونیک ماشین در حالت تغذیه تکفاز

بررسی تحلیلی گشتاورهای هارمونیک ماشین در حالت تغذیه تکفاز با استفاده از روش مؤلفه‌های متقارن انجام می‌شود. شکل (۱۲)، مدارهای معادل توالی مثبت و منفی را نشان می‌دهند.



شکل (۱۲): مدارهای معادل توالی مثبت و منفی

در این مدارهای معادل، جریان‌های توالی مثبت و توالی منفی بر حسب مؤلفه‌های جریان‌های فاز به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$I_{spk} = \frac{1}{3} (I_{ak} + I_{bk} e^{j\gamma} + I_{ck} e^{-j\gamma}) \quad (1)$$

$$I_{snk} = \frac{1}{3} (I_{ak} + I_{bk} e^{-j\gamma} + I_{ck} e^{j\gamma}) \quad (2)$$

از طرفی برای جریان‌های فاز یک موتور القایی که نقطه نول آن باز باشد، در حالت تغذیه تکفاز روابط زیر برقرار است:

$$I_{ak} = 0 \quad (3)$$

$$I_{ck} = -I_{bk} \quad (4)$$

با جایگزینی (۳) و (۴) در (۱) و (۲) و مرتب‌سازی جملات، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$I_k = -j\sqrt{3}I_{spk} = j\sqrt{3}I_{snk} \quad (5)$$

عبارت کلی گشتاور الکترومغناطیسی به صورت زیر است:

$$t_e = \frac{2}{3}L_m \text{Im}(\vec{i}_s \vec{i}_r) \quad (6)$$

که در آن \vec{i}_s و \vec{i}_r بترتیب بردارهای فضایی جریان استاتور و رتور هستند و به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\vec{i}_s = \frac{3\sqrt{2}}{2} \sum_1 [I_{spl} e^{j\omega_e t} + I_{snl}^* e^{-j\omega_e t}] \quad (7)$$

$$\vec{i}_r = \frac{3\sqrt{2}}{2} \sum_m [I_{rmp} e^{jm\omega_e t} + I_{rnm}^* e^{-jm\omega_e t}] \quad (8)$$

با فرض آنکه فقط هارمونیک‌های فرد در جریان خط وجود داشته باشند، عبارت کلی گشتاور تولیدی به صورت زیر خواهد بود:

$$t_e = 3L_m \text{Im} \sum_{l=1,3,\dots}^{2k+1} \sum_{m=1,3,\dots}^{2k+1} \left[I_{spl} I_{rpm}^* e^{j(l-m)\omega_e t} + I_{snl}^* I_{rpm}^* e^{-j(l+m)\omega_e t} + I_{spl} I_{rnm} e^{j(l+m)\omega_e t} + I_{snl}^* I_{rnm} e^{-j(l-m)\omega_e t} \right] \quad (9)$$

معادله (۹) را می‌توان به صورت مجموع دو مؤلفه گشتاور به صورت زیر نوشت:

$$t_e = 3L_m \text{Im} \sum_{m=1,3,\dots} \left[\begin{aligned} & (I_{spl} I_{rpm}^* + I_{snm}^* I_{rm1}) e^{-j(m-1)\omega_e t} \\ & + (I_{sn1}^* I_{rpm}^* + I_{snm}^* I_{rp1}) e^{-j(m+1)\omega_e t} \\ & + (I_{spl} I_{rnm} + I_{spm} I_{rm1}) e^{j(m+1)\omega_e t} \\ & + (I_{sn1}^* I_{rnm} + I_{spm} I_{rp1}) e^{j(m-1)\omega_e t} \end{aligned} \right] \quad (10)$$

$$+ 3L_m \text{Im} \sum_{l=3,5,\dots}^{2k+1} \sum_{m=3,5,\dots}^{2k+1} \left[I_{spl} I_{rpm}^* e^{j(l-m)\omega_e t} + I_{snl}^* I_{rpm}^* e^{-j(l+m)\omega_e t} + I_{spl} I_{rnm} e^{j(l+m)\omega_e t} + I_{snl}^* I_{rnm} e^{-j(l-m)\omega_e t} \right] = t_{ea} + t_{eb}$$

رابطه آخر در معادله (۱۰) که نشانگر گشتاور تولیدشده توسط هارمونیک‌های شار و جریان است، به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$t_{eb} = 3L_m \operatorname{Im} \sum_{l=3,5,\dots}^{2k+1} \sum_{m=3,5,\dots}^{2k+1} \left[I_{spn} (I_{rpm} + I_{rnm})^* e^{j(l-m)\omega_e t} + I_{spl} (I_{rpm} + I_{rmm}) e^{j(l+m)\omega_e t} \right] \quad (11)$$

از مدار معادل موتور تکفاز از شکل (۱۲)، می‌توان عبارت زیر را بدست آورد:

$$I_{rpm} + I_{rnm} = \frac{j \frac{2m^2 \omega_e^2 \omega_r}{m^2 \omega_e^2 - \omega_r^2} R_r L_r I_{spm}}{\{R_r + j(m\omega_e - \omega_r)L_r\} \{R_r + j(m\omega_e + \omega_r)L_r\}} \quad (12)$$

واضح است که اگر $m > 1$ باشد، آنگاه،

$$|I_{rpm} + I_{rmm}| \approx 0 \quad (13)$$

و بنابراین،

$$t_{eb} \approx 0 \quad (14)$$

از نظر فیزیکی، معادله (۱۴) با صرف نظر کردن از مؤلفه‌های گشتاور ناشی از هارمونیک‌های جریان و شار معادل است. حال جمله t_{ea} را در نظر بگیرید. مؤلفه‌های گشتاور حاصله از دو مؤلفه متوالی هارمونیک جریان ($m = g, m = h$) به وسیله معادلات زیر محاسبه می‌شوند. در این معادلات $h = g + 2$ فرض شده است.

$$t_{ea}|_g + t_{ea}|_h = 3L_m \operatorname{Im} \left[\begin{array}{l} \left\{ I_{spl} (I_{rpg} + I_{rmg}) + I_{snl}^* (I_{rph} + I_{rmh}) + \right\} e^{j\omega_e t} + \\ \left\{ I_{spg} (I_{rp1} + I_{rm1}) + I_{sph} (I_{rp1} + I_{sn1})^* \right\} e^{j(g-1)\omega_e t} + \\ \left\{ I_{sn1}^* (I_{rpg} + I_{rmg}) + I_{spg} (I_{rp1} + I_{rm1}) \right\} e^{j(g-1)\omega_e t} + \\ \left\{ I_{spl} (I_{rmh} + I_{rph}) + I_{sph} (I_{rp1} + I_{rm1}) \right\} e^{j(h+1)\omega_e t} \end{array} \right] \quad (15)$$

و $\omega_d = (g+1)\omega_e = (h-1)\omega_e$ برای حذف هارمونیک گشتاور با فرکانس ω_d بایستی I_{sph} و I_{spg} در معادله زیر صدق کند:

$$I_{sph} = - \frac{(I_{rp1} + I_{rm1})}{(I_{rp1} + I_{m1})^*} I_{spg} \quad (16)$$

با جایگزینی معادلات (۱۳) و (۱۶) در (۱۵)، خواهیم داشت:

$$t_{ea}|_g + t_{ea}|_h = 3L_m \operatorname{Im} \left[\begin{array}{l} I_{spg} (I_{rp1} + I_{rm1})^* e^{j(g-1)\omega_e t} + \\ I_{sph} (I_{rp1} + I_{m1}) e^{j(h+1)\omega_e t} \end{array} \right] \quad (17)$$

اگر معادله (۱۶) برای هر $g = 1, 3, \dots, 2k - 1$ صادق باشد، آنگاه،

$$t_{ea} = 3L_m \operatorname{Im} \left[I_{spl} I_{rp1}^* + I_{sn1}^* I_{m1} + I_{sp(2k+1)} (I_{rp1} e + I_{m1})^{j(2k+2)\omega_e t} \right] \quad (18)$$

دیده می‌شود که گشتاور ضربانی هارمونیک دوم توسط گشتاور هارمونیک $(2k+2)$ جایگزین شده است. بنابراین، معادله (۱۶) همان فرمول مورد نظر برای حذف گشتاور هارمونیک است. با استفاده از (۵) در (۱۶)، می‌توان الگوریتم حذف گشتاور هارمونیک‌های جریان خط بشرح زیر بدست آورد.

$$I_h = I_g e^{j\theta}; g = 1, 3, \dots, (2k-1); h = g + 2 \quad (19)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{\omega_{slp} L_r}{R_r} - \tan^{-1} \frac{\omega_{sln} L_r}{R_r} \quad (20)$$

معادله (۲۰) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$I_m = I_1 e^{j(m-1)\theta}; m = 3, 5, \dots, 2k+1 \quad (21)$$

که عبارت کلی برای جریان هارمونیک تزریقی است. اگر مؤلفه اصلی جریان به صورت زیر باشد:

$$i_1(t) = \sqrt{2} I_1 \cos(\omega_e t + \alpha) \quad (22)$$

آنگاه عبارت جریان هارمونیک مرتبه m ($m = 3, 5, 7, \dots, 2k+1$) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$i_m(t) = \sqrt{2} I_1 \cos(m\omega_e t + m\alpha + (m-1)\theta) \quad (23)$$

سپس جریان کلی ماشین را می‌توان با استفاده از جمع آثار به صورت زیر نوشت:

$$i(t) = \sum_{m=1,3,\dots}^{2k+1} i_m(t) \quad (24)$$

معادلات (۱۹) تا (۲۴) الگوریتم حذف گشتاور هارمونیک را بر حسب جریان تزریقی بیان می‌کنند.

نتیجه اینکه برای حذف هارمونیک دوم گشتاور بایستی جریان هارمونیک سوم به جریان فاز تزریق شود. با این کار مؤلفه گشتاور هارمونیک دوم با گشتاور هارمونیک چهارم جایگزین می‌شود. و به همین ترتیب برای حذف مؤلفه گشتاور هارمونیک $(2k)$ بایستی هارمونیک جریان $(2k+1)$ به جریان فاز تزریق شود و نتیجه این تزریق، جایگزینی گشتاور هارمونیک $(2k)$ توسط گشتاور هارمونیک $(2k+2)$ است. از طرف دیگر با افزایش فرکانس گشتاور هارمونیک، نه تنها امکان ایجاد تشدید مکانیکی کاهش می‌یابد بلکه ممان اینرسی سیستم محرکه می‌تواند نوسانات سرعت حاصله را کاهش دهد.

چون طرح کنترلی $\left(\frac{Volt}{Hz}\right)$ در اینجا مد نظر است، مناسب‌تر است که الگوریتم حذف بر اساس ولتاژ بیان شود. اگر عبارت مؤلفه اصلی ولتاژ به صورت زیر داده شده باشد:

$$v_1(t) = \sqrt{2} V_1 \cos(\omega_e t) \quad (25)$$

آنگاه عبارت ولتاژ هارمونیک مرتبه m ($m = 3, 5, 7, \dots, 2k+1$) را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$v_m(t) = \sqrt{2} V_m \cos(m\omega_e t + (m-1)\frac{\pi}{2} + \phi_m) \quad (26)$$

که در آن

$$\phi_m = \theta_{zm} - m\theta_{z1} - (m-1)\theta_c \quad (27)$$

$$\theta_{zm} = \angle(Z_{pm} + Z_{nm}) \quad (28)$$

$$\theta_{z1} = \angle(Z_{p1} + Z_{n1}) \quad (29)$$

$$\theta_c = \tan^{-1} \frac{\omega_{sp} L_r}{R_r} + \tan^{-1} \frac{\omega_{sln} L_r}{R_r} \quad (30)$$

در آن‌ها Z_{pm} و Z_{nm} بترتیب، امپدانس توالی مثبت و توالی منفی در هارمونیک m ام هستند. ولتاژ هارمونیکی تزریقی مرتبه m ام و ولتاژ کلی تغذیه به صورت زیر معین می‌شوند:

$$V_m = V_1 \frac{|Z_{pm} + Z_{nm}|}{|Z_{p1} + Z_{n1}|} \quad (31)$$

$$v(t) = \sum_{m=1,3,\dots}^{2k+1} v_k(t) \quad (32)$$

تعیین مؤلفه‌های تزریقی ولتاژ

الف - کاربرد الگوریتم ژنتیک برای یافتن پارامترهای هارمونیک‌های تزریقی مناسب

پاسخ سیستم به ورودی $X_{ei} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ را به صورت $Y_{ei} = (y_1, y_2, \dots, y_j)$ در نظر می‌گیریم. n زوج ورودی/خروجی $(X_{ei}, Y_{ei})_{i=1, \dots, n}$ را با شبیه سازی ماشین بدست می‌آوریم. سیستم دارای مدلی در فضای حقیقی است که پارامترهای آن $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ هستند. Y_{di} را پاسخ مطلوب مدل شبیه‌سازی شده در نظر می‌گیریم. هدف یافتن ورودی‌های مناسب X_{ei} بگونه‌ایست که $Y_{di} = Y_{ei}$ شود. در اینجا، ورودی‌های (x_1, x_2, \dots, x_k) بترتیب متناظر با هارمونیک‌های مناسب ولتاژ برای تزریق به ورودی ماشین برای کاهش نوسانات سرعت موتور در حالت تغذیه تکفاز هستند. با توجه به مدل استفاده شده برای ماشین، پاسخ مورد نظر، و حضور خطاهای عددی در شبیه‌سازی، در عمل امکان تحقیق برابری $Y_{di} = Y_{ei}$ به صورت دقیق وجود ندارد. با این حال، بهترین تخمین از ورودی، تخمینی است که در آن تابع خطا (که در اینجا مجموع مربعات خطا برای n زوج Y_{ei} و Y_{di} تعریف شده است) حداقل شود. به عبارت دیگر، باید تابع معیار زیر حداکثر شود:

$$F_{fit} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (Y_{ei} - Y_{di})^2} \quad (33)$$

بدین ترتیب، مسأله تعیین متغیرهای ورودی به یک مسأله بهینه‌سازی تبدیل می‌شود که با الگوریتم ژنتیک قابل حل است. هر کدام از ورودی‌های $(h=3, 5, \dots, 2k+1)$ یک مؤلفه هارمونیکی فرد ولتاژ است که دامنه و فاز آن مجهول است. خروجی مورد نظر در اینجا، سرعت ماشین در حالت تغذیه تکفاز است که باید دارای حداقل نوسان باشد.

ب - مدل مناسب ماشین برای تعیین مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ تزریقی

هر چند برای بررسی تحلیلی گشتاورهای هارمونیکی ماشین در حالت تغذیه تکفاز از روش مؤلفه‌های متقارن استفاده شد،

با این حال مدل‌سازی ماشین با روش تابع سیم‌پیچ [۶] و یا با روش مدار معادل مغناطیسی [۷] نتایج دقیق‌تری به دنبال دارد؛ زیرا در هر دو روش، تمام هارمونیک‌های فضایی سیم‌پیچی‌ها در نظر گرفته می‌شوند که این مورد در روش مؤلفه‌های متقارن به هیچ وجه لحاظ نمی‌شود. همچنین به دلیل آنکه در روش مدار معادل مغناطیسی می‌توان رلوکتانس دندانه‌های استاتور و رتور و شیارهای ماشین را در نظر گرفت، نتایج حاصله از آن دقیق‌تر خواهد بود. البته باید در نظر داشت که زمان اجرای شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک بنحو چشمگیری افزایش می‌یابد.

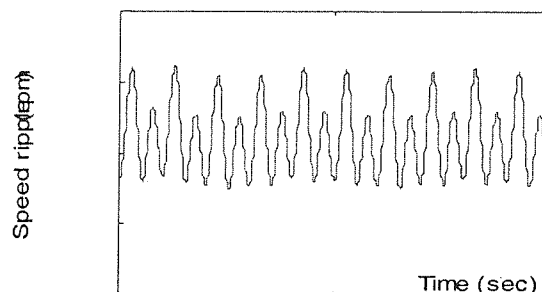
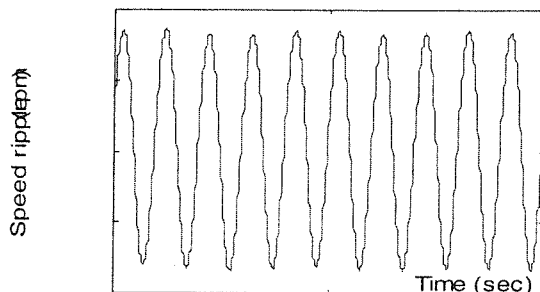
۶- نتایج شبیه‌سازی و کاهش نوسان سرعت ماشین

در زیر نتایج اعمال روش پیشنهادی در حالت کار تک‌فاز موتور و برای بارهای مختلف ارائه شده‌اند. در سه حالت سرعت نامی، هفتاد و پنج درصد و نصف سرعت نامی، منحنی سرعت بر حسب زمان قبل و بعد از تزریق هارمونیک سوم به ولتاژ تغذیه برترتیب در شکل‌های (۱۳)، (۱۴)، و (۱۵) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که در هر سه حالت با تزریق هارمونیک سوم مناسب می‌توان نوسانات سرعت را بطور چشمگیری کاهش داد. همچنین فرکانس نوسانات سرعت نیز در هر حالت دو برابر شده است که با نتایج تحلیلی تطابق دارد. همچنین شکل (۱۶) نشان می‌دهد که در حالت سرعت نامی، با تزریق همزمان هارمونیک‌های سوم و پنجم، نوسان سرعت از $48/9 \text{ (rpm)}$ به $15/55 \text{ (rpm)}$ کاهش یافته است و فرکانس نوسانات سرعت نیز شش برابر (بدلیل تزریق همزمان دو هارمونیک) شده است. بنابراین، با محاسبه مقادیر مناسب دامنه و فاز هارمونیک‌های تزریقی، و با استفاده از جدول راهنما (Look up Table) می‌توان الگوی مناسب برای کلیدزنی در اینورتر را فراهم نمود. در جدول (۱)، مقادیر دامنه و فاز هارمونیک‌های متناظر با شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که دامنه و فاز هارمونیک سوم تزریقی برای حالتی که فقط هارمونیک سوم به ولتاژ خط تزریق می‌شود نسبت به حالتی که دو هارمونیک (۳) و (۵) بطور همزمان به ولتاژ خط تزریق می‌شوند، متفاوت است. این در حالی است که در روش تحلیلی حذف گشتاور هارمونیکی، این مورد مشاهده نمی‌شود.

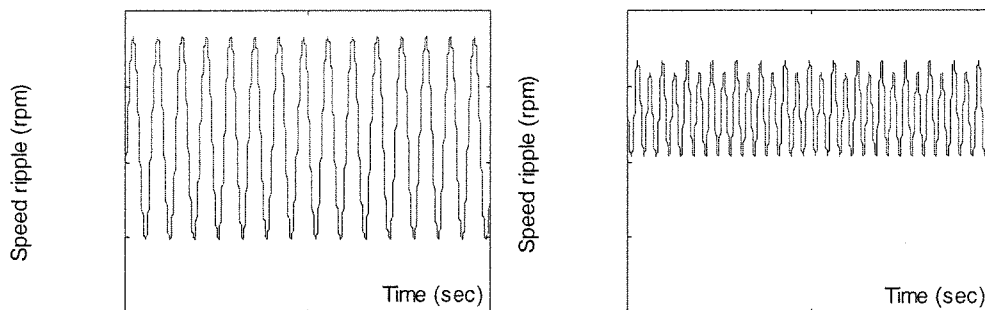
جدول (۱): مقادیر دامنه و فاز هارمونیک‌ها

سرعت متوسط موتور (rpm)	نوسان سرعت قبل از تزریق (rpm) و (بر حسب درصد)	نوسان سرعت بعد از تزریق (rpm) و (بر حسب درصد)	هارمونیک سوم		هارمونیک پنجم	
			دامنه (pu)	فاز (درجه)	دامنه (pu)	فاز (درجه)
۱۳۸۸	۴۸/۹ (۳/۵۲ درصد)	۲۳/۲ (۱/۶۷ درصد)	۱/۱۹	۲۱	-	-
۱۰۵۰	۵۳/۶ (۵/۱ درصد)	۲۷/۷ (۲/۶۳ درصد)	۱	۱۸	-	-
۷۰۰	۶۷/۹ (۹/۷ درصد)	۳۴/۱ (۴/۸۷ درصد)	۰/۸	۱۱	-	-
۱۳۸۸	۴۸/۹ (۳/۵۲ درصد)	۱۵/۵۵ (۱/۱ درصد)	۰/۹۹	۲۰/۵	۱/۴۳	۲۵۹

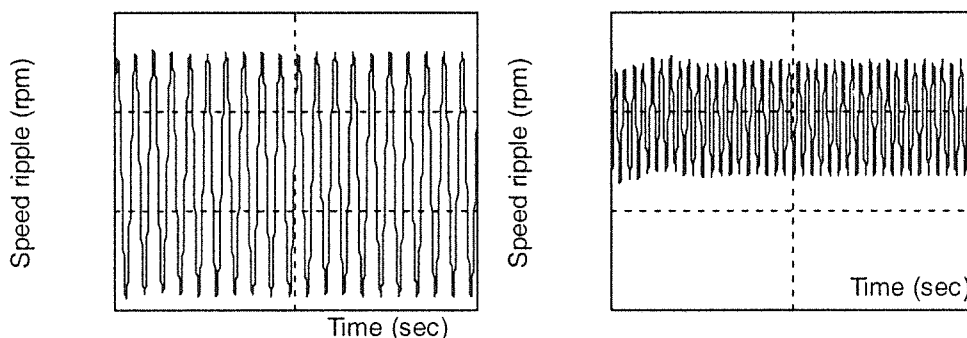
(دامنه هارمونیک‌ها نسبت به دامنه ولتاژ خط در حالت تغذیه تک‌فاز و نوسان سرعت نسبت به سرعت متوسط نرمالیزه شده‌اند)



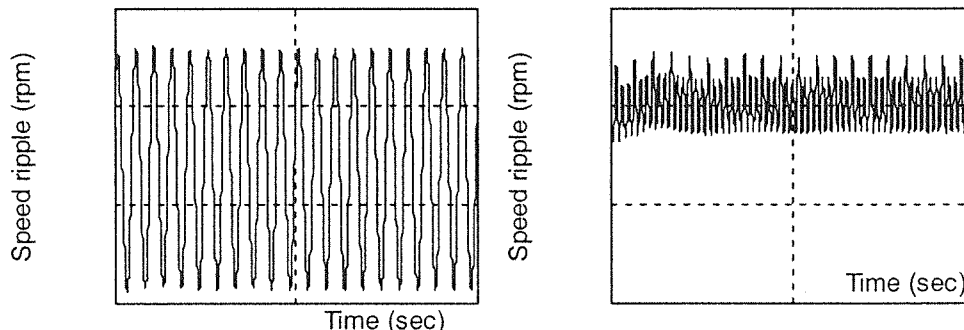
شکل (۱۳): منحنی‌های سرعت قبل (چپ) و بعد (راست) از تزریق هارمونیک سوم در نصف سرعت نامی



شکل (۱۴): منحنی‌های سرعت قبل (چپ) و بعد (راست) از تزریق هارمونیک سوم در ۷۵٪ سرعت نامی



شکل (۱۵): منحنی‌های سرعت قبل (چپ) و بعد (راست) از تزریق هارمونیک سوم در سرعت نامی



شکل (۱۶): منحنی‌های سرعت قبل (چپ) و بعد (راست) از تزریق هارمونیک ۳ و ۵ در سرعت نامی

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، شرایط کار محرکه موتور القایی، پس از وقوع خرابی در عناصر اینورتر و عملکرد موتور تحت شرایط قطع یک فاز، مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که پس از تغییر وضعیت تغذیه از حالت سه‌فاز به تکفاز، سرعت ماشین افت می‌کند و در آن نوسان ایجاد می‌شود. دامنه جریان فاز ماشین نیز افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد که یادآور لزوم کاهش بار موتور در این حالت است. همچنین مشاهده شد که نویز صوتی موتور افزایش می‌یابد. پس از تکفاز شدن تغذیه، در گشتاور تولیدی ماشین نوسانات شدیدی با فرکانس ۲ برابر فرکانس تغذیه، ایجاد می‌شود که منجر به نوسان در سرعت ماشین می‌شود. دامنه نوسانات سرعت با کاهش فرکانس تغذیه موتور افزایش می‌یابد. سپس نشان داده شد که با تزریق هارمونیک‌های فرد با پارامترهای مناسب به ولتاژ خطی تغذیه موتور، می‌توان دامنه نوسانات سرعت را کاهش داد. برای بهینه‌سازی پارامترها از الگوریتم ژنتیک استفاده شد و با استفاده از آن دامنه و فاز مناسب هارمونیک‌های تزریقی برای کاهش نوسانات سرعت، محاسبه شدند.

- [1] G.K. Dubey, "Power Semiconductor Controlled Drives", Prentice Hall, 1989.
- [2] T. M. Jahns, "Improved Reliability in Solid State ac Drives by Means of Multiple Independent Phase Drive Unit", IEEE, Trans. Industry Application, Vol. IA- 27, pp.259-266, 1990.
- [3] T.E. Heb and J.P. Hautier, "Remedial Strategies for Inverter ac Drive System at the Occurrence of a Transistor Drive Fault", Conf. Rec. EPE., pp. 4286-4291, 1991.
- [4] T.H. Liu, J. R. Fu, T. A. Lipo, "A Strategy for Improving Reliability of Field Oriented Controlled Induction Motors Drives", IEEE/IAS Annual Meeting Conf. Rec., pp.449-455, 1991.
- [5] J. Milimonfared, B. Toosi, H. Meshgin Kelk, M. Rostami, "Modeling of Voltage Fed Induction Motor Drive with PSPICE for Device Fault Analysis", Amirkabir Journal of Science & Technology, Vol.10, No. 39, pp 21/E-26E.
- [6] H.A. Toliyat and T .A. Lipo, "Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, Rotor and End ring Faults", IEEE, Trans. Energy Conversion, Vol.22, pp.214-247, 1995.
- [7] J. Milimonfared, H. Meshgin Kelk, "Modeling of Squirrel Cage Induction Machine by Modified Magnetic Equivalent Circuit Method", International Journal of Engineering Science, Vol.12, No. 4, pp. 107-119, 1380