

یک استراتژی کنترلی برای بهبود عملکرد درایو موتور القائی CSI با استفاده از فیلتر اکتیو

علی اصغر محمدزاده^۱، محمدرضا عزیزیان^۲، پارسا فرمان زاده^۳

۱. دانشگاه صنعتی سهند، m83ali@yahoo.com

۲. دانشگاه صنعتی سهند، azizian@sut.ac.ir

۳. دانشگاه صنعتی سهند، parsafar2007@gmail.com

واژه‌های کلیدی: موتور القائی، اینورتر منبع جریان، کاهش هارمونیک، فیلتر اکتیو موازی، شبیه سازی

چکیده

درایوهای موتور القائی تغذیه شده با اینورتر منبع جریان بطور معمول برای کاربردهای توان بالا که نیاز به دینامیک سریع ندارند استفاده می شوند. این درایوها مزایایی دارند که جذابیت استفاده از آنها را افزایش می دهد لیکن وجود برخی معایب نیز محدودیت های شدیدی را برای این درایوها ایجاد می کند. در این مقاله سعی شده است که با استفاده از یک شیوه جدید برخی معایب این درایوها را برطرف کرده و کارآرایی آن ها بهبود داده شود. در این شیوه از یک اینورتر منبع ولتاژ بصورت موازی با اینورتر منبع جریان بعنوان فیلتر اکتیو موازی استفاده شده است. نتایج حاصل نشان از تاثیر چشمگیر این شیوه بر روی مجموعه درایو و بخصوص جریان بار دارد.

۱. مقدمه

اینورترهای منبع ولتاژ در صنعت به وفور برای تغذیه درایوهای موتور القائی استفاده می شوند لیکن این اینورترها در کاربردهایی در رنج مگاوات استفاده چندانی ندارند. به علاوه از نظر قابلیت اطمینان اینورتر منبع جریان نسبت به اینورتر منبع ولتاژ بهتر است. نیاز به فرکانس سوئیچینگ بالا برای تامین جریان مناسب برای تغذیه ضمن بالا بردن تلفات سوئیچینگ، جریان هایی در شفت و یاتاقان القاء کرده و تاثیرات الکترومغناطیسی ایجاد می کند. این موضوع همچنین در کابل های بلند ایجاد اضافه ولتاژ می کند [۱] و [۳]. علاوه بر این ها برای اینکه درایوهای تغذیه شده با اینورتر منبع جریان امکان کار در حالت ژنراتوری و بازیافت انرژی را داشته باشند می بایست مدارات دیگری نیز به آن ها اضافه شود. اما در مقابل درایوهای تغذیه شده با اینورتر منبع جریان مزایای زیر

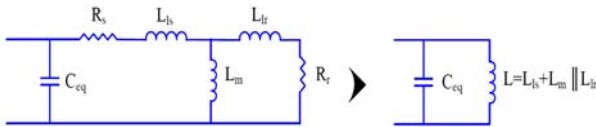
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

ترکیب سری L_m و L_{lr} با L_{ls} می‌باشد. اثر پوستی موجب افزایش مقاومت روتور خواهد شد لیکن برای ساده تر شدن از این امر نیز صرف نظر شده است. فرکانس رزونانس مدار با عبارت زیر داده می‌شود [۵] و [۶]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{eq}}} \quad (1)$$

$$L = L_{ls} + \frac{L_m * L_{lr}}{L_m + L_{lr}} \quad (2)$$

مولفه های هارمونیک جریان خروجی اینورتر می‌تواند ولتاژ و جریان مخربی را در ماشین به علت تاثیر رزونانس ایجاد کند. این امر همچنین موجب افزایش تلفات مسی، تلفات هسته و گشتاور پالسی می‌شود [۷].



شکل ۲: مدار معادل موتور القایی با خازن موازی

علاوه بر مشکل رزونانس بالا که به رزونانس هارمونیک معروف است، نوع دیگری از رزونانس نیز ممکن است رخ دهد که به رزونانس فرکانس اصلی مربوط است. این رزونانس ممکن است مابین خازن ها و اندوکتانس مغناطیس کننده ماشین رخ دهد و محدودیتی در میزان حداکثر مقدار خازن ها اعمال می‌کند. با توجه به رابطه زیر و فرکانس اصلی حداکثر میزان خازن ها را می‌توان تعیین کرد [۶]:

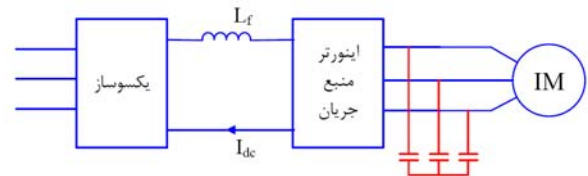
$$f_{lr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_{max}}} \quad (3)$$

همانگونه که گفته شد L_m در رابطه بالا اندوکتانس مغناطیس کننده موتور می‌باشد.

داشتن شکل موج های جریان و ولتاژ با هارمونیک های کم در موتور القایی علاوه بر حذف و یا حداقل کاهش مشکلات رزونانس به دلایل دیگری نیز مطلوب می‌باشد. هارمونیک های جریان موجب گرم شدن اضافی سیم پیچ ها می‌شوند. این امر بویژه در موتورهای بزرگ که اثرات پوستی مهم است مشکل سازتر می‌شود. همچنین هارمونیک های ولتاژ موجب افزایش تلفات هسته و جهش های سریع ولتاژی موجب ایجاد تنش های عایقی در سیم پیچ ها می‌شوند [۷].

را دارا می‌باشند: ۱. کارکرد ذاتی در چهار ناحیه، درایوهای موتور القایی تغذیه شده با اینورترهای منبع جریان از یکسوسازهای تمام کنترل شده در ورودی استفاده می‌کنند. بنابراین این مدار بر خلاف درایوهای تغذیه شده با اینورترهای منبع ولتاژ نیازی به مدارات خارجی برای حالت باز یافت ندارد. ۲. قابلیت اطمینان، در درایوهای موتور القایی تغذیه شده با اینورترهای منبع جریان سلف لینک dc میزان افزایش جریان در حالت اتصال کوتاه را محدود می‌کند. ۳. ساختار ساده، درایوهای موتور القایی تغذیه شده با اینورترهای منبع جریان به علت ساختار ساده ای که دارند در مقایسه با درایوهای تغذیه شده با اینورترهای منبع ولتاژ مطلوب تر می‌باشند.

شکل (۱) بلوک دیاگرام کلی مربوط به یک درایو موتور القایی تغذیه شده با اینورتر منبع جریان را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل نشان داده شده است، در این سیستم از خازن های موازی در ترمینال موتور استفاده شده است. این خازن ها علاوه



شکل ۱: بلوک کلی درایو CSI رایج

بر اینکه جهش های ولتاژی شدید ناشی از شکل موج مربعی جریان را تا حدودی محدود می‌کند موجب ایجاد کموتاسیون می‌شود. با این حال وجود این خازن ها مشکل رزونانس را پدید می‌آورد.

جریان اعمال شده به موتور دارای هارمونیک می‌باشد. یکی از این هارمونیک ها ممکن است موجب ایجاد رزونانس شود. شکل (۲)، [۴]، مدار معادل هارمونیک تک فاز ماشین با خازن موازی معادل در ورودی را نشان می‌دهد. در ماشین های بزرگ مقاومت های R_s و R_r مقادیر کوچکی دارند و بنابراین می‌توان از آنها صرف نظر کرد. مدار معادل LC ساده شده در سمت راست نشان داده شده است که در آن

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$I_{pa,1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{dc} = 0.78 I_{dc} \quad (5)$$

سیستم کنترل طراحی شده به گونه ای است که در نهایت جریان موتور برابر با مولفه اصلی جریان خروجی اینورتر باشد. بنابراین جریان مربوط به فیلتر اکتیو یا همان VSI از روابط زیر محاسبه می شود:

$$i_{ha} = i_{pa} - i_{sa}$$

و برای مقدار rms آن خواهیم داشت:

$$I_{ha} = \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{6}{\pi^2}} I_{dc} = 0.24 I_{dc} \quad (6)$$

در روابط بالا i_{sa} جریان مطلوب خروجی است که طبق آنچه گفته شد برابر با $i_{pa,1}$ است. رابطه (۶) نشان می دهد که رنج توان اینورتر ولتاژ بسیار کوچک تر از اینورتر جریان بوده و هزینه چندانی بر سیستم تحمیل نخواهد کرد.

ب) سیستم کنترل فیلتر اکتیو

استراتژی کنترل جریان سینوسی روش جبران سازی است که فیلتر اکتیو را وادار به جبران بار غیرخطی می کند به طوری که جریان منبع جبران سازی شده سینوسی و متعادل شود. به منظور سینوسی و متقارن کردن جریان های جبران سازی شده، فیلتر اکتیو موازی باید بتواند تقریباً تمام هارمونیک های ناخواسته را جبران کند. ذکر این نکته لازم است که در اینجا هدف جبران و سینوسی کردن جریان موتور می باشد.

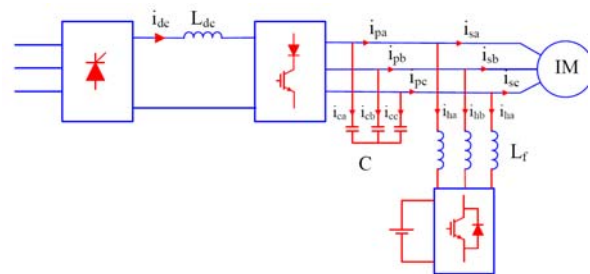
با توجه به اینکه در سرعت های پایین ولتاژ ترمینال موتور کاهش می یابد لذا ثابت نگه داشتن ولتاژ باس dc فیلتر اکتیو بسیار سخت خواهد بود. از اینرو بجای خازن های موجود در باس dc طبق آنچه در فیلتر های اکتیو داریم اجباراً از یک منبع استفاده می کنیم. با این کار سیستم کنترلی فیلتر اکتیو ساده تر خواهد شد و دیگر مشکلات عدم تعادل ولتاژهای خازن ها را نداریم.

ج) سیستم کنترل درایو

یک شیوه عملی و بهبود یافته کنترل اسکالر درایو تغذیه شده با اینورتر منبع جریان در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شیوه حلقه کنترل سرعت، با تنظیم لغزش، گشتاور را

۲. ساختار و ویژگی های سیستم درایو همراه با فیلتر اکتیو موازی

یکی از روش های رایج برای مقابله با پدیده رزونانس استفاده از فیلتر اکتیو موازی به جای خازن های موازی است [۲]، [۶]، [۸] و [۱۰]. بلوک دیاگرام این سیستم در شکل (۳) نشان داده شده است. همانگونه که دیده می شود در این سیستم به جای خازن ها از فیلتر اکتیو در ترمینال ماشین استفاده شده است. فیلتر اکتیو علاوه بر اینکه جهش های ولتاژی ناشی از مربعی بودن جریان را جبران می کند، شکل موج جریان را نیز تا حد زیادی سینوسی خواهد کرد.



شکل ۳: بلوک کلی درایو CSI با فیلتر اکتیو

قسمت اصلی تولید کننده توان بار، اینورتر منبع جریان است. در نتیجه سوئیچینگ بالا در این اینورتر می تواند تلفات را افزایش دهد. بنابراین فرکانس سوئیچینگ این اینورتر را با فرکانس کاری برابر می گیریم. در نتیجه در خروجی آن شکل موج های مربعی با هدایت ۱۲۰ درجه برای هر فاز خواهیم داشت. اما فرکانس سوئیچینگ اینورتر منبع ولتاژ بسیار بیشتر خواهد بود. تا بتواند جریان سینوسی به بار تحویل دهد.

الف) بررسی رنج توان هر یک از اینورتر ها

با صرف نظر از جریان اندک خازن ها، اگر جریان خروجی اینورتر منبع جریان را بصورت ایده آل، مربعی با هدایت ۱۲۰ درجه برای هر فاز با دامنه I_{dc} در نظر بگیریم، برای مقدار rms جریان خروجی فاز a، CSI خواهیم داشت:

$$I_{pa} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dc} = 0.82 I_{dc} \quad (4)$$

و نتیجتاً برای مقدار rms مولفه اصلی این جریان خواهیم داشت:

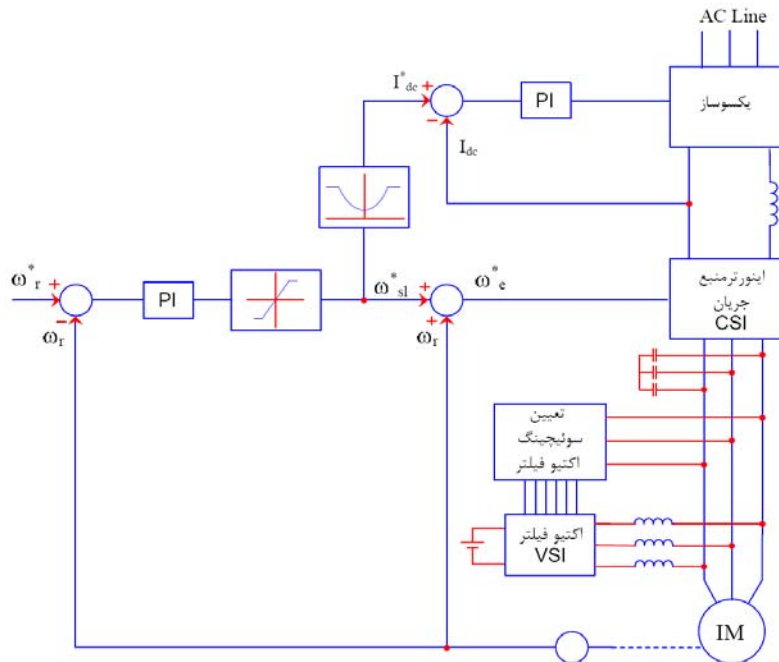
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

سازی شده است. در درایو های رایج وجود خازن های موازی با بار الزامی است. لیکن مشکل اساسی پایدار سازی و جلوگیری از ایجاد رزونانس است. برای اینکه مشکل رزونانس را در درایو رایج نداشته باشیم از شیوه سوئیچینگ SHE با حذف سه هارمونیک جریان استفاده کرده ایم. با این شیوه مشکل پایداری تا حد زیادی حل شده است. لیکن آنچه مشهود است تلفات سوئیچینگ به شدت افزایش می یابد. زیرا فرکانس سوئیچینگ جریان در حدود هفت برابر افزایش یافته است.

کنترل می کند. علاوه بر آن این سیگنال بعد از عبور از یک تابع محاسباتی برای ثابت نگه داشتن شار، جریان I_{dc}^* را نیز کنترل می کند. در لغزش صفر گشتاور تولیدی صفر است اما جریان مقدار حداقل خود را دارد که برابر با جریان مغناطیس کننده ماشین می باشد.

۳. شبیه سازی

برای اینکه امکان مقایسه بین نتایج شیوه جدید با شیوه های رایج کنترل درایوهای موتور القائی تغذیه شده با اینورتر منبع جریان (CSI) حاصل شود درایو رایج CSI نیز شبیه



شکل ۴: درایو CSI با کنترل شار و سرعت به همراه فیلتر اکتیو

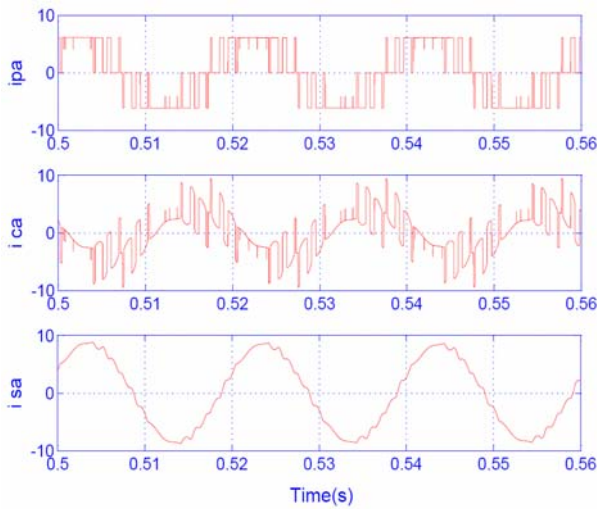
(i_{pa}) و در شکل (۷) دیاگرام FFT و THD جریان موتور (i_{sa}) برای فاز a نشان داده شده است. شکل (۵) نشان می دهد که استفاده از خازن تا حدودی جریان را بهبود می دهد. لیکن مشکل کارآرایی خازن در فرکانس پایین مشهود است. این امر در مقایسه با شکل موج های مربوط به سرعت 150 (rad/s) و گشتاور نامی که در ادامه آورده شده است، کاملاً دیده می شود.

برای پیاده سازی سیستم کنترل جدید از بلوک دیاگرام شکل (۴) استفاده شده است. شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار Matlab-Simulink انجام شده است. و نتایج مورد نیاز ثبت شده است.

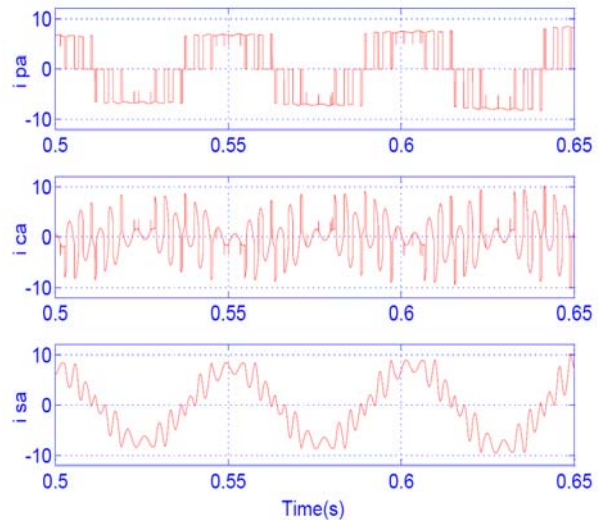
۴. نتایج شبیه سازی

شکل (۵)، جریان ها را در درایو رایج با سرعت 60 (rad/s) و گشتاور نامی نشان می دهد. در ادامه در شکل (۶) دیاگرام FFT و THD مربوط به جریان خروجی اینورتر

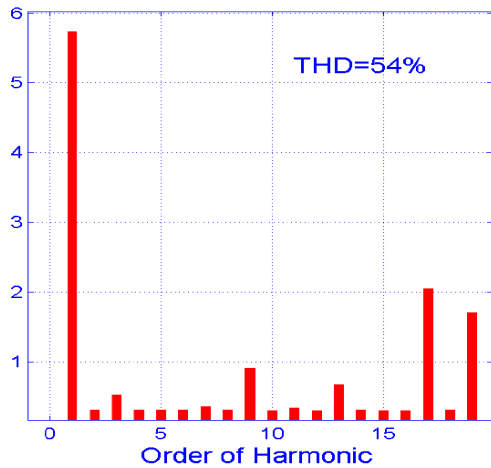
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



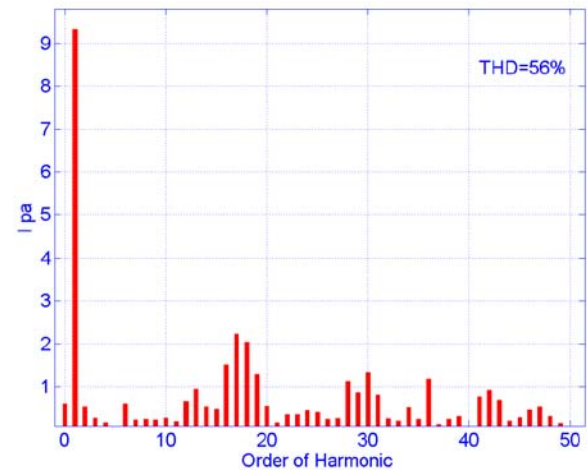
شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی درایو رایج. شکل‌ها به ترتیب مربوط به جریان‌های اینورتر، خازن و موتور می‌باشند. سرعت 150 (rad/s) و گشتاور نامی



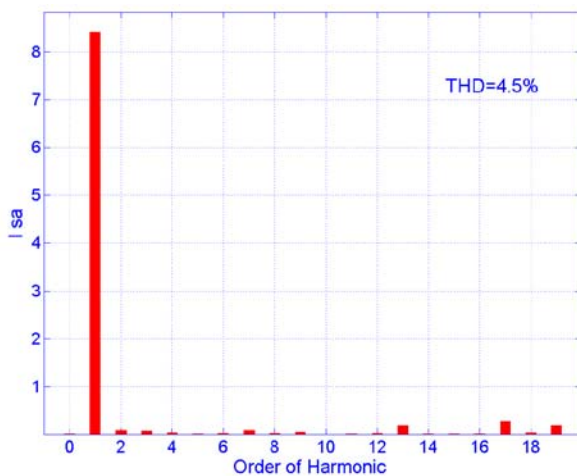
شکل ۵: نتایج شبیه‌سازی درایو رایج. شکل‌ها به ترتیب مربوط به جریان‌های اینورتر، خازن و موتور می‌باشند. سرعت 60 (rad/s) و گشتاور نامی



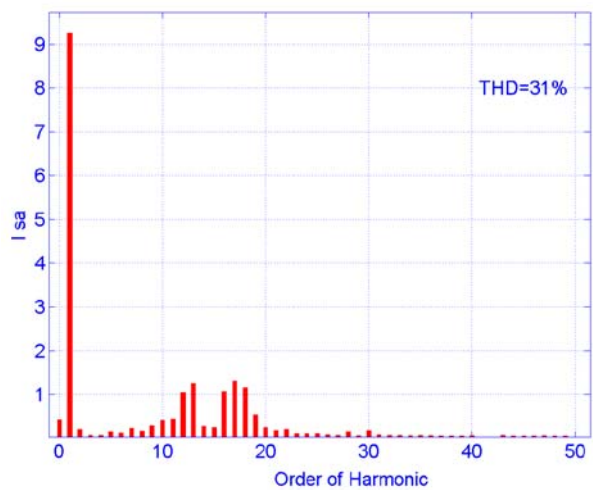
شکل ۹: دیاگرام FFT جریان اینورتر سیستم رایج، سرعت 150 (rad/s) و گشتاور نامی



شکل ۶: دیاگرام FFT جریان اینورتر سیستم رایج، سرعت 60 (rad/s) و گشتاور نامی

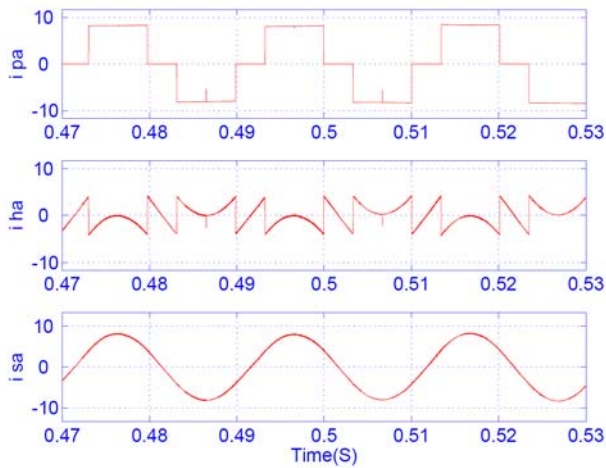


شکل ۱۰: دیاگرام FFT جریان موتور سیستم رایج، سرعت 150 (rad/s) و گشتاور نامی

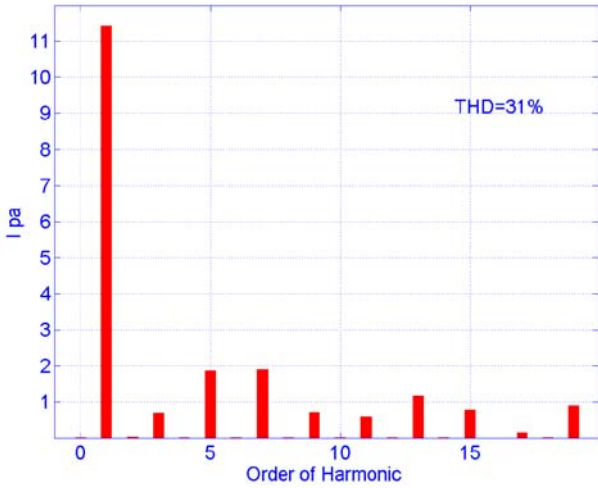


شکل ۷: دیاگرام FFT جریان موتور سیستم رایج، سرعت 60 (rad/s) و گشتاور نامی

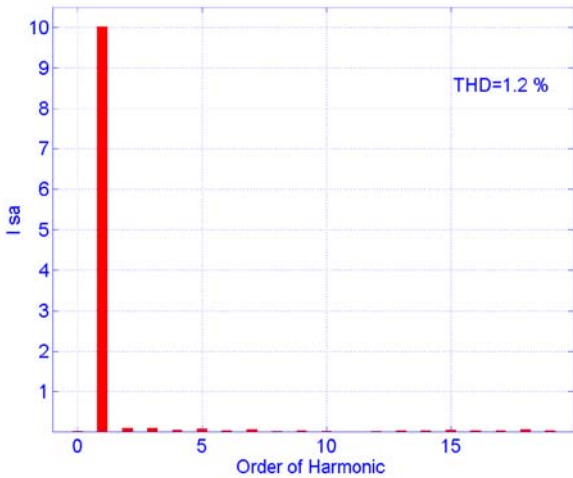
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



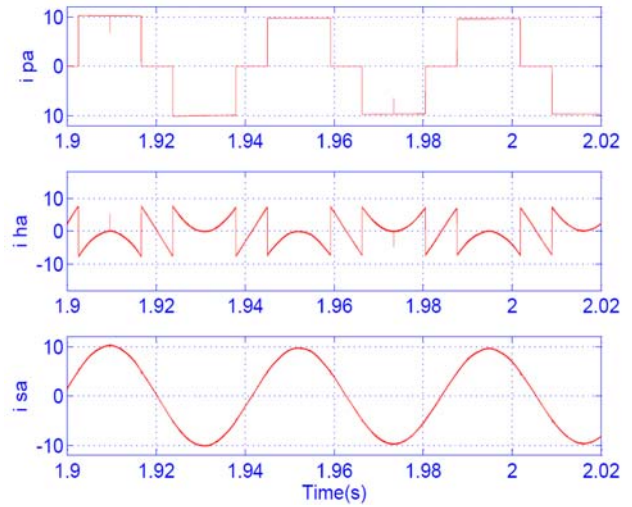
شکل ۱۴: نتایج شبیه سازی درایو جدید. شکل ها به ترتیب مربوط به جریان های اینورتر، فیلتر و موتور می باشند. سرعت 150 (rad/s) و گشتاور نامی



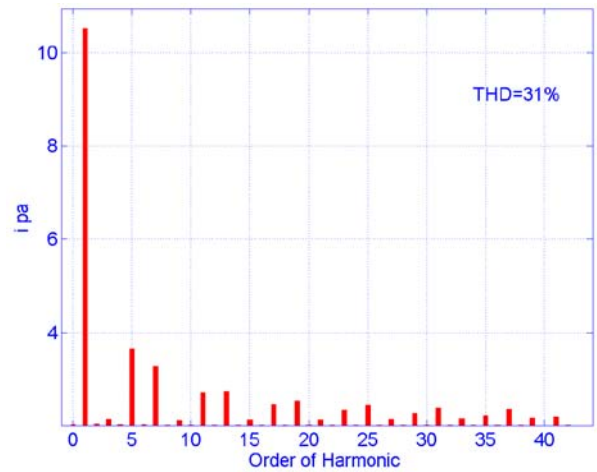
شکل ۱۵: دیاگرام FFT جریان اینورتر سیستم جدید، سرعت 150 (rad/s) و گشتاور نامی



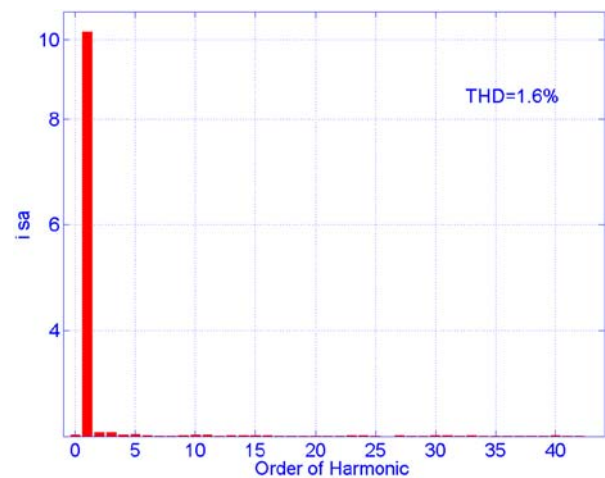
شکل ۱۶: دیاگرام FFT جریان موتور سیستم جدید، سرعت 150 (rad/s) و گشتاور نامی



شکل ۱۱: نتایج شبیه سازی درایو رایج. شکل ها به ترتیب مربوط به جریان های اینورتر، فیلتر و موتور می باشند. سرعت 60 (rad/s) و گشتاور نامی



شکل ۱۲: دیاگرام FFT جریان اینورتر سیستم جدید سرعت 60 (rad/s) و گشتاور نامی



شکل ۱۳: دیاگرام FFT جریان موتور سیستم جدید سرعت 60 (rad/s) و گشتاور نامی

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- [2] Trzynadlowski, N. Patriciu, F. Blaabjerg, and J. K. Pedersen, "A hybrid, current-source/voltage-source power inverter circuit," IEEE Trans. Power Electron., vol. 16, no. 6, pp. 866–871, Nov. 2001.
- [3] M. Imecs, A. M. Trzynadlowski, I. I. Incze, and C. Szabo, "Vector control schemes for tandem-converter fed induction motor drives," IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 2, pp. 493–501, Mar. 2005.
- [4] G. K. Dubey, Fundamentals of Electrical Drives. Second Edition. Alpha Science International Ltd. 2001, ch. 6.
- [5] B. K. Bose, Modern power electronics and AC drives. Prentice Hall PTR Upper Saddle River, 2002, ch. 6.
- [6] A.R. Beig, V.T. Ranganathan, "A novel CSI-fed induction motor drive" IEEE Trans Power Electron, vol 21, pp 1073 – 1082. July 2006.
- [7] B.Wu, S. B. Dewan, and G. R. Slemon, "PWM CSI inverter for induction motor drives," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 1, pp. 64–71, Jan./Feb. 1992.
- [8] S. Kwak, H. A Toliyat, "A novel hybrid solution for load commuted inverter fed induction motor drives" IEEE Trans Ind. Applicat. Volume 41, Issue 1, PP: 83 – 90, , Jan.-Feb. 2005.
- [9] A. M. Qiu, Y. W. Li, B. Wu, D. Xu, N. Zargar, Y. Liu, "High performance current source inverter fed induction motor drive with minimal harmonic distortion" IEEE PESC Conf. PP. 79-85, June 2007.
- [10] S. Kwak, H. A Toliyat, "A current source inverter with advanced external circuit and control method" IEEE International Conf, PP. 1327-1334, May 2005.
- [11] F. Abrahamsen, A. David, "Adjustable speed drive with active filtering capability for harmonic current compensation" IEEE PESC Conf. PP. 1137 – 1143, Jun 1995.

شکل های (۸) و (۹) و (۱۰) با همان ترتیب قبلی مربوط به سرعت 150 rpm می باشند.

شکل (۱۱)، جریان ها را در درایو جدید با سرعت 60 rpm و گشتاور نامی نشان می دهد. در ادامه در شکل (۱۲) دیاگرام FFT و THD مربوط به جریان خروجی اینورتر (i_{pa}) و در در شکل (۱۳) دیاگرام FFT و THD جریان موتور (i_{sa}) برای فاز a نشان داده شده است. همین شکل موج ها برای درایو جدید در سرعت 150rpm در شکل های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است.

نتیجه گیری

در این مقاله روشی ارائه شده است که در درایوهای موتور القایی تغذیه شده با CSI، بتوان با استفاده از فیلتر اکتیو بصورت موازی با موتور شکل موج جریان را بطور مطلوبی بهبود داد. مقایسه این نتایج با نتایج مربوط به سیستم های رایج که از خازن استفاده می کنند نشان می دهد که استفاده از فیلتر اکتیو بویژه در سرعت های پایین بسیار مطلوب است. همچنین با در نظر گرفتن این موضوع که برای جلوگیری از ایجاد رزونانس در سیستم درایو رایج از سوئیچینگ SHE با حذف سه هارمونیک استفاده شده است لذا فرکانس سوئیچینگ سیستم رایج هفت برابر فرکانس سوئیچینگ سیستم جدید است در نتیجه تلفات مربوط سیستم معمول بمراتب بیشتر است. موضوع قابل ذکر دیگر اینکه فرکانس سوئیچینگ فیلتر اکتیو رنج چند کیلو هرتز است. لیکن با توجه به توان کمی که فیلتر اکتیو دارد و در حدود ۲۵٪ توان کل می باشد، این فرکانس سوئیچینگ بالا چندان مشکل ساز نیست.

نتایج حاصل نشان می دهد که شکل موج جریان موتور بطور چشمگیری بهبود یافته است.

مراجع

- [1] R. J. Kerkman, "Twenty years of PWM ac drive – When secondary issues become primary concerns," in Proc. IECON'96, Taipei, Taiwan, R.O.C., pp. lvii–lxiii.