

ارائه روشی جدید و ساده به منظور جبران سازی کامل هارمونیک ها و نامتعادلی بار و افزایش پاسخ دینامیکی سیستم کنترلی DFIG توربین بادی در حالت مستقل از شبکه

صالح رحمانی^۱، مهدی اخباری^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، ^۲ استادیار دانشکده فنی، دانشگاه شاهد

چکیده

در این مقاله الگوریتم کنترل جدید و ساده‌ای در ژنراتور القایی تغذیه دوسویه (DFIG) در حالت مستقل از شبکه برای بارهای غیر خطی و نامتعادل پیشنهاد می‌شود.

بارهای غیرخطی سبب ایجاد هارمونیک در جریان و ولتاژ استاتور می‌شود. به منظور غلبه بر این مشکل الگوریتم های کنترلی مختلفی در مبدل های سمت بار و سمت روتور پیشنهاد گردیده است که تقریباً تمام آنها از یک تئوری پیروی می‌کند. در این مقاله بر خلاف تمام مقالات، از تئوری توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای در قاب ساکن $[\alpha-\beta]$ استفاده می‌شود، بدین ترتیب بدون نیاز به ناچ فیلترها و قاب‌های مرجع مختلف، هارمونیک‌های موجود در جریان استاتور به صورت کامل و با پاسخ دینامیکی بسیار سریع توسط LSC تامین می‌گردد. در اینصورت ولتاژ استاتور سینوسی می‌گردد. بنابراین ولتاژ و جریان استاتور تحت سیستم کنترلی پیشنهادی متعادل و کاملاً سینوسی خواهند شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی که برای شرایط مختلف عملکرد سیستم کنترلی آورده شده‌اند، برتری استراتژی کنترلی پیشنهادی را به نسبت دیگر روش‌های ارائه شده در این زمینه نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: "توربین بادی"، "DFIG"، "پاسخ دینامیکی"، "هارمونیک و نامتعادلی"، "تئوری توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای"

۱- مقدمه

DFIG در حالت‌های متصل به شبکه و مستقل از شبکه عمل می‌کند. در حالت متصل به شبکه روش‌های مختلف کنترل توان اکتیو و راکتیو، جبران‌سازی^۴ هارمونیک و نامتعادلی در شبکه و

ژنراتور های القایی تغذیه دوسویه (DFIG) در دو دهه اخیر کاربرد گسترده‌ای در توربین‌های بادی سرعت متغیر^۲ دارند. از جمله فواید آن می‌توان به کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو و کاهش ظرفیت مبدل قدرت^۳، اشاره کرد [1].

^۳Power Converter

^۴Compensation

^۱Doubly Fed Induction Generator

^۲Variable Speed Wind Turbine

کنترل بدون نیاز به سنسور^۵ مورد بررسی قرار گرفته- است [2]_[3]_[4]_[5]_[6]_[7].

(7ω) و فیلترهای میان‌گذر^{۱۲} و ناچ‌فیلتر^{۱۴} استفاده می‌شود [11]_[12]، که این پاسخ زمانی^{۱۵} و ناپایداری سیستم کنترلی را افزایش می‌دهد.

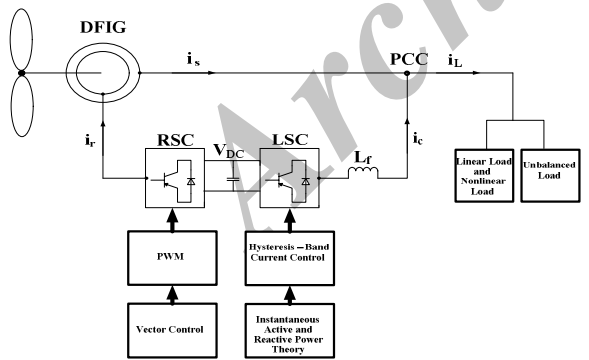
در چند سال اخیر توجه بسیار زیادی به DFIG در حالت مستقل از شبکه شده‌است. از جمله بارهای محلی می‌توان به روستاها و تجهیزات نظامی دوردست اشاره کرد. مهمترین مشخصه DFIG در حالت مستقل از شبکه، داشتن ولتاژ و فرکانس ثابت در استاتور، مستقل از تغییرات بار و سرعت باد است. طراحی و عملکرد DFIG برای بار خطی و متعادل در حالت مستقل از شبکه در [8] بررسی شده است. در عمل بار-های مصرفی شامل نامتعادلی^۶ و یا حتی هارمونیک است. وجود این‌گونه بارها سبب ایجاد نامتعادلی و هارمونیک در جریان و ولتاژ استاتور و روتور و تولید گشتاور الکترو مغناطیسی ضربانی^۷ می‌شود. از طرفی ولتاژ نامتعادل و هارمونیکی استاتور بر عملکرد بارهای متعادل و خطی تاثیر سوء دارد.

در این مقاله به منظور جبران‌سازی نامتعادلی و هارمونیک‌ها به صورت همزمان از روش کنترلی و جبران‌سازی ساده‌ای در LSC استفاده می‌شود. الگوریتم کنترل و جبران‌سازی LSC برخلاف مقالات که در قاب‌های مختلف صورت می‌گیرد، در این تحقیق براساس تئوری کنترل توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای^{۱۶} در قاب ساکن^{۱۷} [α-β] انجام می‌گردد. در این صورت از فیلترهای میان-گذر و ناچ فیلتر صرف‌نظر شده‌است، که این منجر به ایجاد سیستم جبران‌سازی و کنترلی ساده با پاسخ زمانی و پایداری مناسبی می‌گردد. بر خلاف تمام مقالات که جبران‌سازی هارمونیک‌ها فقط برای هارمونیک ۵ و ۷ صورت می‌گیرد، در این مقاله تمام هارمونیک‌های جریان ناشی از بار غیرخطی توسط LSC تولید شده و جریان و ولتاژ استاتور و روتور عاری از این-گونه هارمونیک‌هاست.

به منظور حذف و یا کاهش نامتعادلی و هارمونیک جریان و ولتاژ الگوریتم‌های جبران‌سازی مختلفی در مبدل‌های سمت روتور^۸ (RSC) و سمت بار^۹ (LSC) بیان شده است.

بعد از ارائه کلیات تحقیق در مقدمه، در فصل دوم معادلات ماشین و روش کنترل RSC توضیح داده می‌شود. در فصل سوم بعد از اشاره‌ای مختصر به تئوری توان اکتیو راکتیو لحظه‌ای، به تفصیل الگوریتم کنترل و جبران‌سازی پیشنهادی در LSC پرداخته می‌شود. پس از ارائه نتایج شبیه‌سازی در فصل چهارم، نتیجه‌گیری حاصل از پژوهش بیان شده و پیشنهادهای برای تحقیقات آتی در فصل پنجم ارائه می‌گردد.

الگوریتم جبران‌سازی در RSC به گونه‌ای است که متناسب با نامتعادلی و هارمونیک موجود در ولتاژ استاتور، مولفه‌های هارمونیکی در جریان روتور تزریق می‌گردد. با وجود اینکه شکل موج ولتاژ استاتور سینوسی و متعادل می‌شود ولی جریان روتور و استاتور غیرسینوسی و نامتعادل می‌گردند که این سبب ایجاد مشکلات ذکر شده می‌شود [9]_[10].



الگوریتم‌های جبران‌سازی مختلفی در (LSC) با هدف حذف نامتعادلی و هارمونیک‌های جریان استاتور بیان شده‌است [11]_[12]. جبران‌سازیدر این مقالات یا به منظور بار-های نامتعادل و یا برای بارهای غیرخطی صورت می‌گیرد. به منظور متمایز کردن توالی منفی^{۱۰} و هارمونیک‌های ۵ و ۷ از توالی مثبت^{۱۱} و فرکانس اصلی^{۱۲}، از قاب‌های مختلف (0-، 0-، 5- و -

^{۱۲}Fundamental Frequency
^{۱۳}Passe-Bande Filter
^{۱۴}Notch Filter
^{۱۵}Response time
^{۱۶}Instantaneous Active and Reactive Power Theory
^{۱۷}Stationary Frame

^۵Sensorless
^۶Unbalanced
^۷Electromagnetic Torque Pulsation
^۸Rotor Side Converter
^۹load Side Converter
^{۱۰}Negative Sequence
^{۱۱}Positive Sequence

شکل ۱: نمای کلی DFIG مستقل از شبکه همراه با بار خطی و غیر خطی و نامتعادل

۲- کنترل مبدل سمت روتور

معادلات DFIG در قاب مرجع سنکرون^{۱۸} به شکل زیر است [2].

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} = L_m i_m$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$$

$$\psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr}$$

$$\psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr}$$

رابطه (۱)

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + (d\psi_{ds}/dt) - \omega_e \psi_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + (d\psi_{qs}/dt) + \omega_e \psi_{ds}$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + (d\psi_{dr}/dt) - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr}$$

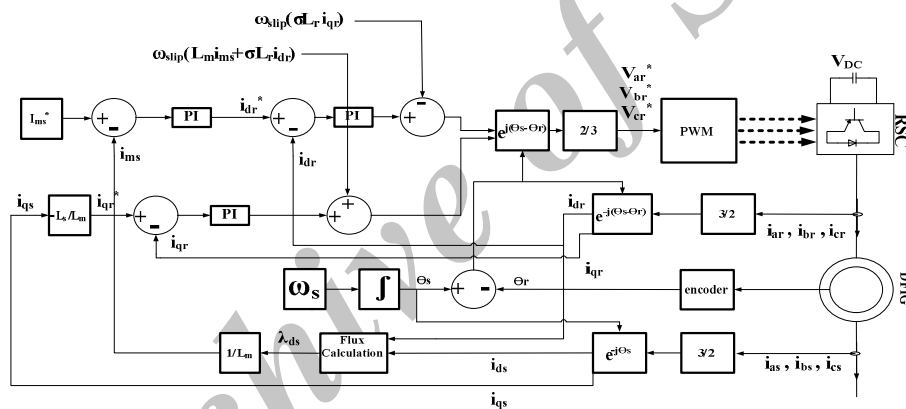
$$V_{qr} = R_r i_{qr} + (d\psi_{qr}/dt) + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr}$$

که i_{ms} همان جریان مغناطیس کننده استاتور است.

کنترل برداری مبدل سمت روتور به صورت کامل در [2] و [8] توضیح داده شده است، با این شرایط خلاصه ای از آن در این قسمت ارائه می‌گردد. با توجه به بلوک دیاگرام کنترلی RSC در شکل ۲، به منظور جداسازی حلقه های کنترل جریان اکتیو و راکتیو از تکنیک امتدادیابی شار استاتور بر محور مستقیم (d) در قاب مرجع سنکرون استفاده می‌شود ($V_{ds} \approx 0$)، که برای این هدف، معادله زیر باید همچنان برقرار باشد.

$$i_{qr}^* = -i_{qs} \left(\frac{L_s}{L_r} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در حالت مستقل از شبکه، میدان استاتور (اندازه ولتاژ استاتور) توسط i_{dr}^* و گشتاور (فرکانس الکتریکی) توسط i_{qr}^* کنترل می‌گردد (طبق رابطه ۲ تعریف می‌شود).



شکل ۲: دیاگرام کنترل مبدل سمت روتور (RSC)

۳-۱- بلوک کنترل توان و مولد جریان مرجع

بلوک کنترل توان، ولتاژ و جریان فازهای بار را اندازه‌گیری کرده، و بر اساس تئوری توان اکتیو و راکتیو لحظه ای در نهایت جریان مرجعی که توسط LSC تولید می‌شود را ایجاد می‌کند [13], [14]. با توجه به تئوری، در ابتدا مقادیر متغیر اندازه‌گیری شده به قاب ساکن $[0, \beta, \alpha]$ انتقال داده می‌شود، توان لحظه‌ای طبق رابطه ۳ در قاب ساکن قابل محاسبه است.

۳- سیستم کنترلی و جبرانسازی مبدل سمت

استاتور

بر خلاف تمام مقاله‌ها که از کنترل برداری و تبدیل‌های abc به قاب‌های مختلف (قاب‌های: توالی منفی، توالی مثبت، پنجم، هفتم، مرجع استاتور) بهره می‌برند، در این مقاله از بلوک کنترل توان و مولد جریان مرجع که بر اساس تئوری توان اکتیو و راکتیو لحظه ای است، استفاده می‌شود.

^{۱۸}Synchronous Reference Frame

شکل موج ولتاژ بار به دلیل افت ولتاژ هارمونیک ناشی از عبور جریان هارمونیک از مقاومت و اندوکتانس استاتور نیز هارمونیک و نامتعادل است، پس جریانی که طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود، هارمونیک‌ها را نمی‌تواند به درستی جبران کند. در این حالت بجای استفاده از ولتاژ فاز بار از دامنه ولتاژ توالی مثبت مولفه اصلی (V_{+1}) استفاده می‌گردد که این عمل توسط بلوک حلقه قفل شده-فاز سنکرون با توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ^{۱۹} (FPSVD)، انجام می‌شود [15].

بلوک دیاگرام حلقه کنترل توان در شکل ارائه شده است. توان اکتیو مورد نیاز برای LSC از مجموع دو ترم حاصل می‌گردد. اولین ترم شامل جزء ac توان اکتیو (P_{ac}) است، در حالی که دومین ترم، خروجی کنترلر ولتاژ لینک dc که در واقع توانی است که باید توسط LSC به منظور ثابت نگه داشتن سطح ولتاژ لینک dc جذب شود (P_{cap}). با توجه به شکل ۱، سه حالت برای انتخاب توان راکتیو مرجع وجود دارد. حالت اول توان راکتیو لحظه ای کل ($Q_{dc}+Q_{ac}$) را جبران‌سازی می‌کند، حالت دوم فقط جزء ac توان راکتیو لحظه‌ای را جبران می‌کند - نماید (Q_{ac})، و در نهایت حالت سوم Q_{ac} بعلاوه قسمتی از Q_{ac} را جبران می‌کند، که در این مقاله حالت سوم در نظر گرفته شده است ($KQ_{dc}+Q_{ac}$).

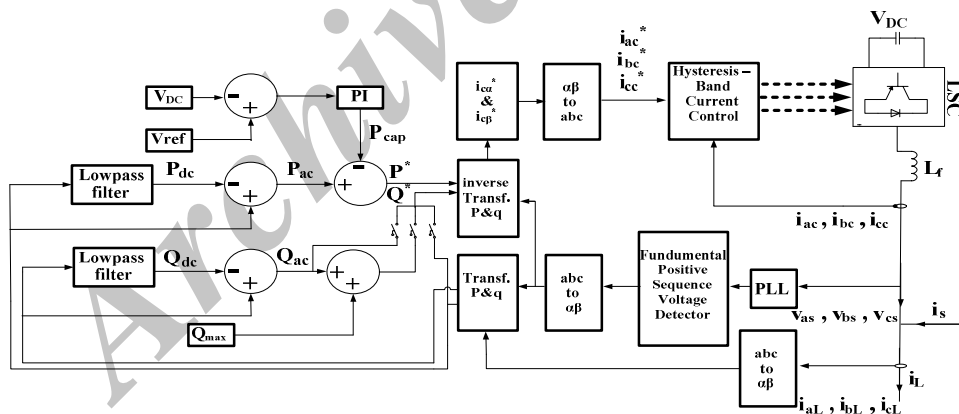
$$\begin{bmatrix} P \\ Q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{dc} \\ Q_{dc} \\ p_{0dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{0ac} \\ Q_{0ac} \\ p_{0ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه بالا P توان اکتیو و Q توان راکتیو و P_0 توان توالی صفر است. سیستم مورد نظر سه سیمه است به گونه‌ای که می‌توان توالی صفر را صفر در نظر گرفت. در بارهای غیر خطی و نامتعادل، P و Q دارای اجزاء dc و ac هستند بدین ترتیب توان اکتیو لحظه‌ای با فرکانس اصلی (P_{dc}) سه برابر توان اکتیو در هر فاز است و متناسب با آن توان راکتیو لحظه‌ای با فرکانس اصلی (Q_{dc})، سه برابر توان راکتیو در هر فاز است. اجزاء ac هر دو توان لحظه‌ای، (P_{ac}) و (Q_{ac})، مطابق با هارمونیک و نامتعادلی بار است. جریان‌های مرجع در قاب $[\alpha, \beta]$ به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha + v_\beta} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۴)}$$

جریان‌های فاز مرجع LCS از رابطه (۵) بدست می‌آیند.

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۵)}$$



شکل ۳: بلوک دیاگرام کنترل و جبران‌سازی مبدل سمت استاتور (LSC)

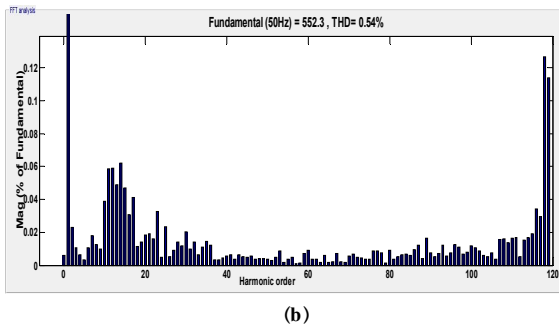
۴- شبیه‌سازی و ارزیابی

در این بخش به بررسی نتایج شبیه‌سازی سیستم مورد نظر تحت نرم افزار متلب^{۲۰} پرداخته می‌شود. در قسمت اول به بررسی عملکرد دینامیکی و پایداری سیستم جبران‌ساز و کنترلی

خازن سمت لینک dc بگونه ای انتخاب می‌گردد تا ریبیل ولتاژ لینک dc کمتر از ۲ درصد ولتاژ نامی آن باشد و کنترل آن بوسیله کنترلر تناسبی انجام می‌شود.

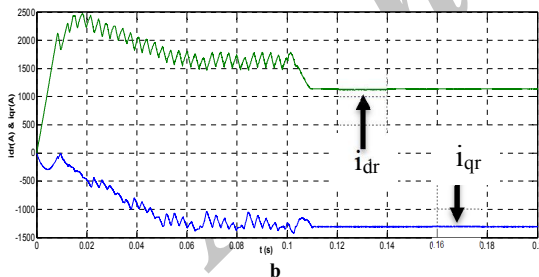
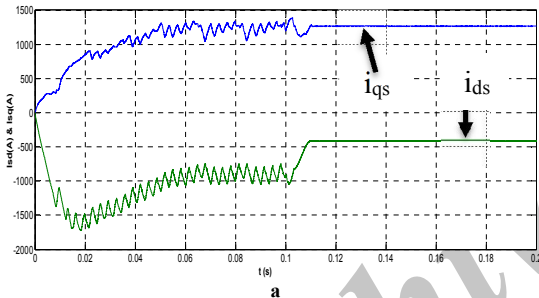
^{۲۰}MATLAB

^{۱۹}Fundamental Positive Sequence Voltage Detector



شکل ۵: طیف هارمونیک و THD ولتاژ استاتور: (a) قبل از جبران سازی (b) بعد از جبران سازی

بر خلاف تمام مقالات که در بارهای غیر خطی متصل به DFIGN، فقط هارمونیک‌های ۵ و ۷ و در نهایت ۱۱ را جبران سازی می‌کنند، در این مقاله طیف کامل هارمونیک‌ها جبران می‌شود (با توجه به شکل ۵).
جریان محورهای d و q استاتور و روتور در قاب سنکرون (+ωe) به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ قابل مشاهده است.



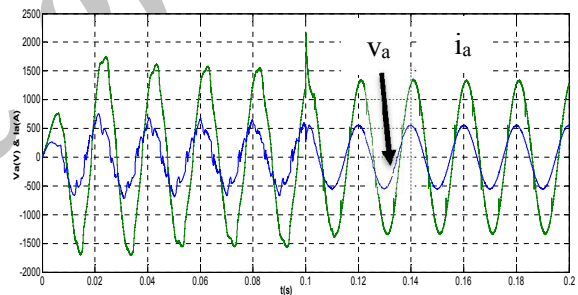
شکل ۶: جریان محورهای d و q در قاب سنکرون (+ωe) قبل و بعد از ورود جبران ساز تحت بار خطی و غیر خطی (a) استاتور (b) روتور

همانطور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، تا قبل از ۰/۱ ثانیه شکل موج‌ها شامل طیف وسیعی از هارمونیک‌هاست ولی بعد از ۰/۱ ثانیه به دلیل استفاده از الگوریتم بسیار ساده در LSC، شکل موج‌ها تقریباً بعد از ۱۳ ms به حالت پایدار و عاری از هارمونیک‌ها می‌رسند (که این مناسب بودن پاسخ زمانی سیستم کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهد). بدلیل

پیشنهادی برای بار غیر خطی همراه با بار خطی پرداخته می‌شود. در قسمت دوم عملکرد سیستم جبران ساز تحت بار نامتعادل بررسی می‌شود. پارامترهای ماشین و مبدل در پیوست آورده شده است.

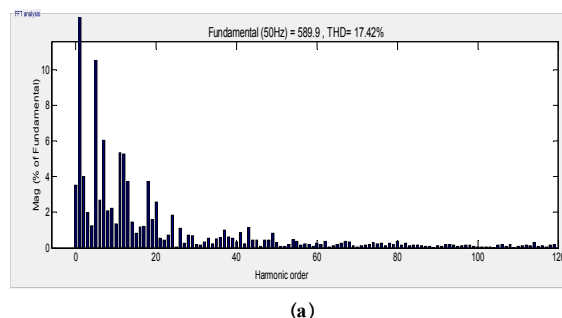
۴-۱- نتایج برای بار غیر خطی

به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی در جبران سازی هارمونیک‌های جریان استاتور، بار خطی با ظرفیت ۱،۰۶۳ مگا ولت آمپر و ضریب توان ۰/۷۵ پسفاز (۰/۸MW) = P_L و $Q_L = 0.7 \text{ MVAR}$ به همراه بار غیر خطی در نظر گرفته شده است. بار غیر خطی در این مقاله یک مبدل شش پالسه به همراه مقاومت ۳ اهمی می‌باشد. تا قبل از ۰/۱ ثانیه کنترل مربوط به LSC فقط شامل کنترل ولتاژ لینک dc است. در لحظه $t = 0.1 \text{ s}$ جبران سازی در LSC فعال می‌شود و P^* و Q^* (توان اکتیو و راکتیو مرجع LSC) به ترتیب برابر $P_{cap} + P_{ac}$ و $KQ_{dc} + Q_{ac}$ (ضریب K به گونه‌ای تعیین می‌گردد تا ضریب توان استاتور برابر ۰/۹۵ شود). شکل ۴، ولتاژ و جریان فاز a استاتور را نشان می‌دهد.

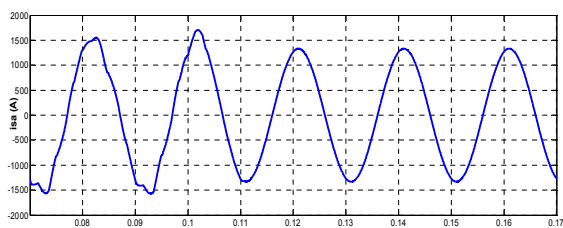


شکل ۴: ولتاژ و جریان فاز a استاتور قبل و بعد از جبران سازی در حضور بار خطی و غیر خطی

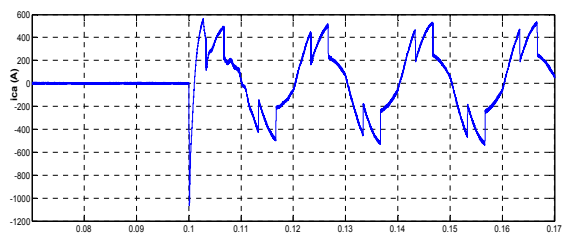
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود بعد از جبران سازی ولتاژ و جریان سینوسی می‌شوند. طیف هارمونیک ولتاژ استاتور قبل و بعد از جبران سازی نیز در شکل ۵ قابل مشاهده است.



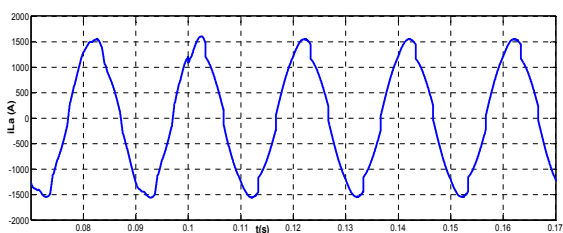
(a)



(a)



(b)



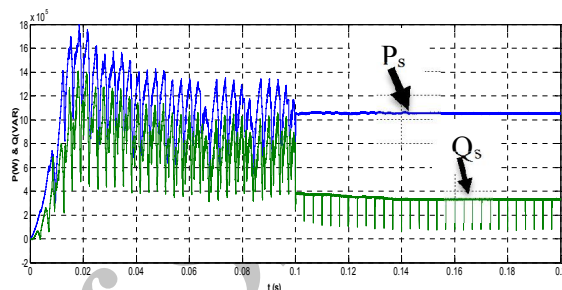
(c)

شکل ۹: عملکرد دینامیکی و ایستای: (a) جریان استاتور (b) جریان جبران‌سازی (جریان LSC) (c) جریان بار

۴-۳- نتایج برای بار نامتعادل

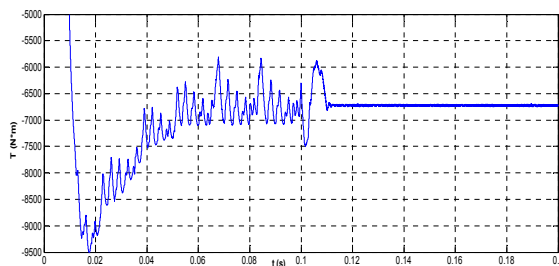
در این قسمت به منظور تعمیم قابلیت جبران‌سازی LSC، عملکرد آن در حضور مشترک بار متعادل و نامتعادل نشان داده می‌شود. مشخصات بار متعادل مشابه بار خطی در قسمت قبل است ($p_L = 0.8 \text{ MW}$ و $q_L = 0.7 \text{ MVAR}$). بار نامتعادل شامل سه مقاومت با مقادیر 0.3Ω ، 2Ω و 9Ω است که به ترتیب به فازهای a، b و c متصل هستند. تئوری کنترلی همانند قسمت قبل است. جریان فازهای استاتور قبل و بعد از جبران‌سازی در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد.

اینکه قسمتی از توان راکتیو بار توسط LSC تامین می‌گردد، در لحظه ۰/۱ ثانیه مقدار i_{ds} و i_{dr} کاهش پیدا می‌کنند. با توجه به شکل ۷ بعد از زمان $t=0/1\text{s}$ ، به منظور ایجاد ضریب توان ۰/۹۵، توان راکتیو تولیدی توسط ژنراتور برابر ۳۴۲ کیلو وات است (که ۳۵۸ کیلو وات توسط LSC تامین می‌گردد). از طرفی توان اکتیو تولیدی ژنراتور پس از جبران‌سازی شامل مجموع P_L (۸۰۰ KW)، P_{cap} (در حدود ۱۰ KW) و توان اکتیو مصرفی توسط مقاومت ۳ اهمی موجود در مبدل شش پالسه (۲۹۳ KW)، می‌باشد.



شکل ۷: توان اکتیو و راکتیو استاتور قبل و بعد از جبران‌سازی تحت بار خطی و غیرخطی

با توجه به شکل ۸، قبل از اینکه سیستم جبران‌سازی فعال شود، گشتاور القایی دارای ضرباناتی در حد $\pm 1250 \text{ N.m}$ است (۱۹٪ مقدار dc گشتاور). در حالی که بعد از جبران‌سازی ضربانات گشتاور حذف می‌شود.

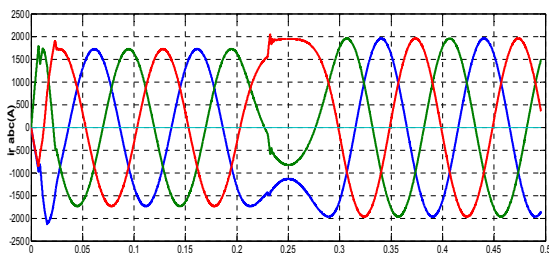


شکل ۸: پاسخ دینامیکی و ایستای گشتاور القایی در لحظه فعال‌سازی کنترلر ($t=0/1\text{s}$) تحت بار خطی و غیرخطی

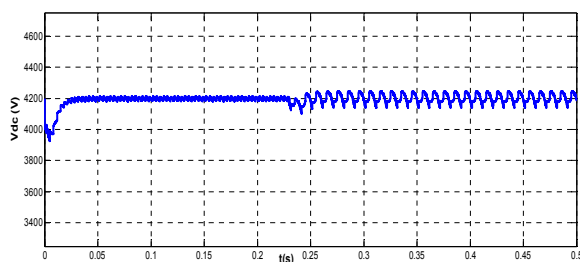
شکل ۹، عملکرد دینامیکی (در لحظه ورود جبران‌ساز) و ایستای جریان استاتور (i_{as})، جریان جبران‌سازی LSC (i_{ca}) و جریان بار (i_{La}) را نشان می‌دهد.

بارنامتعادل در لحظه $t=0/23s$ وارد مدار می‌شود. در تمام این مدت جبران‌ساز در LSC نیز فعال است.

جریان سه فاز روتور و ولتاژ لینک dc مبدل back to back به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده‌است.



شکل ۱۲: عملکرد دینامیکی جریان سه فاز روتور تحت بار غیر خطی و نامتعادل همزمان با تغییرات سرعت باد از زیر سنکرون به فوق سنکرون

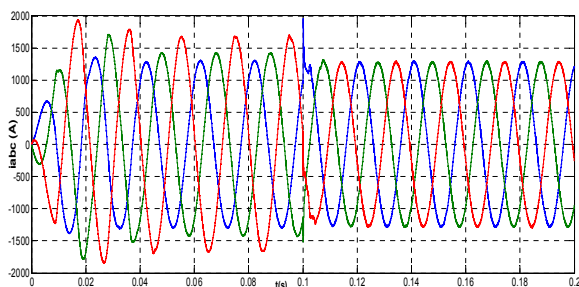


شکل ۱۳: ولتاژ لینک dc مبدل back to back تحت بار غیر خطی و نامتعادل و تغییرات سرعت باد

با توجه به شکل ۱۲، بعد از ورود بار نامتعادل در لحظه $0/23s$ ، جریان روتور بعد یک اعوجاج کوچک به دلیل عملکرد جبران‌ساز سینوسی می‌گردد، که با این حال دامنه جریان روتور افزایش می‌یابد. نوسانات ولتاژ لینک dc بعد از ورود بار نامتعادل بیشتر می‌شود (شکل ۱۳).

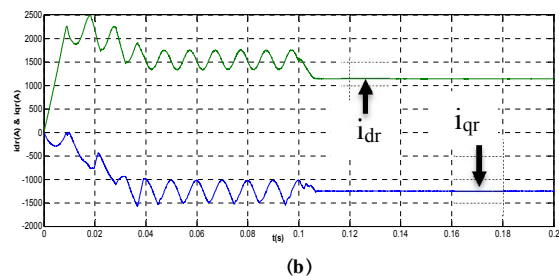
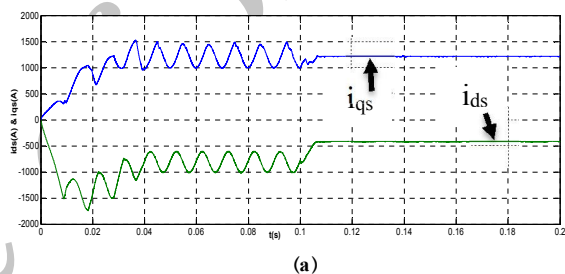
۵- نتیجه‌گیری

تأثیرات بار غیرخطی و نامتعادل بر ولتاژ و جریان استاتور و روتور DFIG در حالت مستقل از شبکه بررسی شد. به منظور کنترل ساده LSC و جبران‌سازی همزمان هارمونیک‌ها و نامتعادلی ولتاژ و جریان استاتور از روش ساده و جدیدی در LSC استفاده می‌شود که برای این هدف از تئوری توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای در قاب $[\alpha, \beta]$ بهره برده می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی که تحت بارها و شرایط مختلف صورت گرفت، می‌توان به این نتیجه رسید که سیستم جبران‌ساز پیشنهادی قابلیت حذف طیف وسیعی از هارمونیک‌ها و نامتعادلی ولتاژ و جریان استاتور را داراست و از طرفی پاسخ دینامیکی سیستم



شکل ۱۰: جریان سه فاز استاتور قبل و بعد از جبران‌سازی تحت بار متعادل و نامتعادل

جریان محوره‌های d-q استاتور و روتور تا قبل $t=0/1s$ دارای مولفه ای با فرکانس 100 Hz می‌باشند (شکل ۱۰). در لحظه ای که سیستم جبران‌ساز فعال می‌شود ($t=0/1s$) بعد از حدود 9 ms جریان محور های d-q استاتور و روتور dc می‌شود که این مفهوم تولید توالی منفی جریان بار را توسط LSC را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: جریان محوره‌های d-q در قاب سنکرون $(+0_s)$ قبل و بعد از جبران‌سازی تحت بار متعادل و نامتعادل: (a) استاتور (b) روتور

۴-۳ نتایج شبیه‌سازی حین تغییر سرعت باد در حضور بار غیر خطی و نامتعادل

در این قسمت عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی در سخت‌ترین شرایط بررسی می‌شود. سخت‌ترین شرایط به این معنی است که بار خطی و غیرخطی از ابتدا حضور دارند. در لحظه $t=0/2s$ سرعت روتور (ω_r) از 1200 rpm ($s=0/2$) افزایش یافته و در لحظه $t=0/3s$ به 1800 rpm ($s=-0/2$) می‌رسد و در این خلال

- application to variable speed wind-energy generation', IEE Proc. Electr. Power Appl., 1996, 143, (3), pp. 231-241,
- [3] 3- G. Abad, M. Rodriguez, G. Iwanski, and J. Poza, "Direct power control of doubly-fed-induction-generator-based wind turbines under unbalanced grid voltage," IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 2, pp. 442-452, Feb. 2010.
- [4] 4- D. Santos-Martin, J. Rodriguez-Amenedo, and S. Amalte, "Direct power control applied to doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage conditions," IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 5, pp. 2328- 2336, Sep. 2008.
- [5] 5- Y. Zhou, P. Bauer, J. Ferreira, and J. Pierik, "Operation of grid-connected DFIG under unbalanced grid voltage condition," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 1, pp. 240-246, Mar, 2009.
- [6] 6- Longya, X., Wei, C.: "Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme", IEEE Trans. Ind. Appl., 1995, 31, (3), pp. 636-642
- [7] 7- Datta, R., Ranganathan, V.T.: "A simple position-sensorless algorithm for rotor-side field-oriented control of wound-rotor induction machine", IEEE Trans. Ind. Electron., 2001, 48, (4), pp. 786-793
- [8] 8- Pena, R., Clare, J.C., Asher, G.M.: "A doubly fed induction generator using back-to back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine", IEE Proc. Electr. Power Appl., 1996, 143, (5), pp. 380-387
- [9] 9-Phan, Lee.: "Control Strategy for Harmonic Elimination in Stand-Alone DFIG Applications With Nonlinear Loads", IEEE TRANS. POWER ELECTRONICS, VOL. 26, NO. 9, SEPT 2011
- [10] 10- Phan, Lee.: "Performance Enhancement of Stand-Alone DFIG Systems With Control of Rotor and Load Side Converters Using Resonant Controllers", IEEE TRANS INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 48, NO. 1, JANUARY/FEB 2012
- [11] 11- R. Pena, R. Cardenas, E. Escobar, J. Clare, P. Wheeler, Control system for unbalanced operation of stand-alone doubly fed induction generators, IEEE Trans. Energy Conv. 22 (2) (2007) 544-545.
- [12] 12- A. Jain and V. Ranganathan, "Wound rotor induction generator with sensorless control and integrated active filter for feeding nonlinear loads in a stand-alone grid," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 1, pp. 218-228, Jan. 2008
- [13] 13- H. Akagi, E. Watanabe, and M. Aredes, Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning (IEEE Press Series on Power Engineering). New York: Wiley, 2007.
- [14] 14- R. S. Herrera, P. Salmerín, and H. Kim, "Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: Different approaches, assessment, and experimental results," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 1, pp. 184-196, Jan. 2011.
- [15] M. Aredes, L. F. C. Monteiro, and J. M. Miguel, "Control strategies for series and shunt active filters," in Proc. IEEE PowerTech Conf., Bologna, Italy, Jun. 2009, vol. 2.

کنترلی به دلیل سادگی و عدم وجود مدارهای تأخیری، بسیار سریع می‌باشد که این به پایداری سیستم کمک شایانی می‌کند.

پیوست.

لیست علامتها

Ψ	شار روتور یا استاتور
i	جریان روتور یا استاتور
V	ولتاژ روتور و استاتور
R	مقاومت
L	اندوکتانس
T_e	گشتاور القایی الکتریکی
τ	ثابت زمانی
p	تعداد قطبها
ω_r	سرعت زاویه‌ای الکتریکی روتور
ω_e	سرعت زاویه‌ای سنکرون
Q, P	توان اکتیو و راکتیو
زیر وندها	
d, q	بردارهای $d-q$
α, β	بردارهای $\alpha-\beta$
r, s	استاتور و روتور
a, b, c	بردارهای سه فاز $a-b-c$

پارامترهای DFIG توربین بادی ۲ مگاواتی

مقادیر	پارامتر
۲۰۰۰	توان نامی (کیلو وات)
۵۰	فرکانس (هرتز)
۶۹۰	ولتاژ نامی استاتور خط به خط (ولت)
۱۷۶۰	جریان نامی استاتور (آمپر)
۱۲۷۳۲	گشتاور نامی (نیوتن-متر)
ستاره	اتصال استاتور
۲۰۷۰	ولتاژ نامی روتور خط به خط (ولت)
ستاره	اتصال روتور
۲	زوج قطب
۰/۳۴	نسبت دور استاتور به روتور
۲/۶	مقاومت استاتور (میلی اهم)
۰/۰۸۷	اندوکتانس نشستی استاتور (میلی هانری)
۲/۵	اندوکتانس مغناطیسی پیوندی (میلی هانری)
۲/۹	مقاومت روتور (میلی اهم)
۰/۰۸۷	اندوکتانس نشستی روتور (میلی هانری)

مراجع

- [1] 1- G. Abad, M. Rodriguez, G. Iwanski, J. Lopez, L. Marroyo, 'Doubly fed induction machine : Modeling and control for wind energy generation'
- [2] 2- Pena, R., Clare, J.C., Asher, G.M.: 'Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its