

مدیریت توان یک سیستم انرژی تجدید پذیر مبتنی بر باد

ایمان زنگی آبادی^(۱) - افشین اعتصامی^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - سرپرست مهندسی و نظارت شرکت نیرو صنعت سرچشمه کرمان، کرمان، ایران

(۲) مربی - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸

خلاصه: امروزه باد یکی از گزینه‌های جذاب حوزه‌ی انرژی، حجم قابل توجهی از مطالعات و سرمایه‌گذاری را به خود اختصاص داده است. به دلیل اهمیت انرژی باد به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، در این مقاله مدیریت تولید توان‌های اکتیو و راکتیو یک سیستم تبدیل انرژی باد مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه در دستور کار قرار داده شده است. در این راستا ساختاری مبتنی بر روش کنترل برداری جهت کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو پیشنهاد می‌شود. استراتژی مدیریت تولید توان‌های اکتیو و راکتیو از طریق مبدل الکترونیک قدرت سمت رتور ژنراتور القایی دو سو تغذیه، به شبکه اعمال می‌شود. بر این اساس، تولید توان اکتیو بر اساس استراتژی استخراج ماکزیمم توان از باد و بهبود کیفیت توان، مبتنی بر استراتژی‌های تصحیح ضریب توان و کاهش هارمونیک جریان شبکه ناشی از بار غیر خطی، جهت اعمال به شبکه اولویت‌بندی می‌شوند. جهت ارزیابی طرح پیشنهادی، شبیه‌سازی آن در شرایط مختلفی از بار راکتیو متصل به شبکه با نرم افزار متلب تحت آزمایش قرار داده می‌شود. نتایج به دست آمده، به وضوح گویای عملکرد مناسب کنترل توان سیستم تبدیل انرژی باد، بهبود ضریب توان شبکه و کاهش جریان هارمونیک شبکه، مبتنی بر طرح پیشنهادی است.

کلمات کلیدی: ژنراتور القایی دو سو تغذیه، مبدل سمت رتور، مبدل سمت شبکه، کیفیت توان، هارمونیک

Power Management for Renewable Energy System Based on Wind

Iman Zangiabadi⁽¹⁾ - Afshin Etesami⁽²⁾

(1) MSc - Head of Enginring and Supervision Sarcheshmeh Industrial Power Co., Kerman, Iran
imanzangiabadi@yahoo.com

(2) Indicator - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Esfahan, Iran

Today wind is one of the attractive points of energy area which has got the noticeable amount of investment and studies in this field. Considering the importance of the wind energy and its potentials as one of the renewable energy sources, in this paper managing the production of active and reactive powers of a wind energy conversion system equipped with DFIG has been studied. In this regard, a structure based on vector control is offered to achieve an independent control of active and reactive powers. The strategy of managing the production of active and reactive power is applied to network by rotor side converter of a DFIG. The production of active power according to the maximum power point taking (MPPT) strategy to get a maximum power of the wind energy has been done and also improvement of power quality based on strategies of power factor correction and harmonics reduction have been arranged for a power network. In order to evaluate the performance of the proposed method, a DFIG connected with a power network in different conditions of the reactive load has been simulated by MATLAB software. Obviously, the results state the proper operation of the power control of wind energy converting system, improvement of the network power factor, and Reduction of harmonic current of network based on the proposed method.

Index Terms: Doubly fed induction generator, Rotor side convertor, Grid side convertor, Power quality, Harmonic

نویسنده مسئول: ایمان زنگی آبادی، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، اصفهان، ایران،
imanzangiabadi@yahoo.com

۱- مقدمه

اکتیو و جبران‌سازی هایبرید برای یک مبدل واسط ژنراتور سنکرون آهن‌ربای دائم سرعت متغیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته شده است [۱۳]. در [۱۴] قابلیت بارگذاری توان راکتیو سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه مورد بحث قرار گرفته است. در [۱۵] ترکیب‌های مختلف کنترل توان اکتیو مبدل سمت رتور و مبدل سمت شبکه ژنراتور القایی دو سو تغذیه بررسی شده است. در [۱۶] کاهش فلیکر ژنراتور القایی دو سو تغذیه را بر اساس کنترل مبدل سمت رتور، مورد مطالعه قرار دادند. در [۱۷] مبدل سمت رتور به منظور تولید توان اکتیو، جبران توان راکتیو و قابلیت فیلتر کردن اکتیو جریان هارمونیک بار غیرخطی متصل به نقطه اتصال مشترک بدون اضافه بار مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله ساختاری مبتنی بر روش کنترل برداری جهت کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو پیشنهاد می‌شود. در این ساختار کنترلی، عملکرد تنظیم شده‌ای از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انترگالی نشان داده می‌شود که بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده‌ها، با استفاده از روش الگوریتم هوشمند جستجوی باکتری انجام شده است. همچنین یک استراتژی کنترلی برای مدیریت اولویت‌های توان سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه پیشنهاد شده است. این استراتژی بین استخراج حداکثر توان از باد و بهبود کیفیت توان با جبران توان راکتیو و کاهش هارمونیک‌های تولید شده توسط بار غیرخطی، اولویت‌بندی می‌کند. به این ترتیب اولویت اول به تولید توان اکتیو داده می‌شود. اولویت دوم به اصلاح ضریب توان داده می‌شود و مقدم بر کاهش هارمونیک است. در نهایت قابلیت فیلتر کردن اکتیو جریان هارمونیک توسط مبدل سمت رتور در هر زمانی که نیاز باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از استراتژی پیشنهادی، مبدل سمت رتور بدون هیچ اضافه باری در حداکثر ظرفیت خود، بهره‌برداری خواهد شد.

۱- مدل توربین

توان مکانیکی گرفته شده توسط توربین از معادله (۱) به دست می‌آید که در آن ρ چگالی هوا، S مساحت جاروب شده توسط پره، v سرعت باد، $C_p(\lambda, \theta)$ ضریب توان توربین، λ نسبت سرعت رأس پره و θ زاویه گام است [۱۸، ۱۹].

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \theta) s v^3 \quad (1)$$

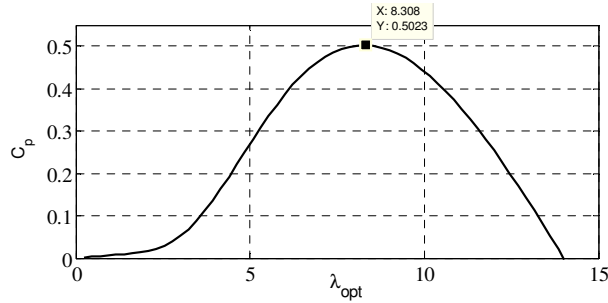
نسبت سرعت رأس پره از رابطه (۲) به دست می‌آید که در آن R شعاع توربین و ω_i سرعت توربین می‌باشد [۲۰].

$$\lambda = \frac{R \omega_i}{V} \quad (2)$$

سیستم تبدیل انرژی باد به منظور حفظ λ در مقدار بهینه‌ی خود می‌تواند اجازه دهد ω_i با تغییرات سرعت باد، تغییر کند. شکل (۱) تغییرات ضریب توان را در مقابل λ در سرعت باد ۱۳ متر بر ثانیه و برای مقدار ثابت زاویه گام نشان می‌دهد.

در دهه‌ی گذشته افزایش تقاضای توان الکتریکی، بحران‌های زیست محیطی را افزایش داده است. این افزایش نیاز، منجر به تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر شده است [۱، ۲]. در میان منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد به عنوان منبع پاک و قابل دسترس در جهان، یکی از گزینه‌های جذاب این حوزه می‌باشد به طوری که تولید انرژی الکتریکی بادی جهان به طور قابل توجهی رشد کرده است. تخمین زده شده که تولید توان الکتریکی مبتنی بر باد، ۱۰٪ از کل برق جهان را تا سال ۲۰۲۰ میلادی به خود اختصاص دهد و انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۴۰ میلادی دو برابر شود [۳، ۴]. توربین‌های بادی که نقش اصلی را در سیستم‌های تبدیل انرژی باد بازی می‌کنند، از لحاظ سرعت چرخشی به فن‌آوری‌های سرعت ثابت و سرعت متغیر تقسیم‌بندی شده‌اند. توربین‌های بادی سرعت متغیر به دلیل مزایایی از قبیل جذب حداکثر توان از باد، کاهش سر و صدا و قابلیت بهبود کیفیت توان، به تازگی به طور فزاینده‌ای استفاده می‌شوند [۵]. ژنراتور سنکرون با مبدل ظرفیت کامل و ژنراتور القایی دو سو تغذیه با مبدل‌های درصدی از ظرفیت کامل، می‌تواند در سیستم‌های تبدیل انرژی باد استفاده شود. ژنراتور القایی دو سو تغذیه با توجه به هزینه‌های پایین‌تر مبدل‌ها و مناسب بودن برای تولید توان‌های بالا، کاربرد بیشتری در سیستم‌های توربین بادی سرعت متغیر دارد. کنترل ژنراتور القایی دو سو تغذیه، توسط مبدل سمت رتور و مبدل سمت شبکه صورت می‌گیرد، به طوری که مبدل سمت رتور به منظور کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو و مبدل سمت شبکه با هدف تنظیم ولتاژ لپنک dc کنترل می‌شود. به تازگی تحقیقات و پژوهش‌های زیادی بر روی سیستم‌های تبدیل انرژی باد سرعت متغیر مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه انجام شده است [۶، ۷]. در این راستا بسیاری از مقالات به تولید برق و بهبود کیفیت توان با استفاده از یک سیستم تبدیل انرژی باد پرداخته‌اند. در [۸] جبران توان راکتیو و فیلتر کردن اکتیو هارمونیک‌های بار غیرخطی توسط مبدل سمت رتور، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مرجع یک فیلتر انتخابی باند گذر برای استخراج مؤلفه‌های هارمونیک جریان استفاده شده است. در [۹] یک کنترل میدان‌گرایی بدون سنسور، برای توانایی همزمان استخراج حداکثر توان از باد و بهبود کیفیت توان با حذف مهمترین و قابل توجه‌ترین هارمونیک‌های جریان، مورد مطالعه قرار گرفته است.

در این مرجع جبران توان راکتیو و اضافه بار مبدل سمت رتور، مورد بحث نیست. در [۱۰] مبدل سمت شبکه به عنوان یک فیلتر موازی به منظور کنترل ضریب توان و اطمینان از جبران هارمونیک، مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۱] مبدل سمت شبکه به عنوان یک فیلتر موازی فعال در یک شبکه مستقل استفاده شده است. در [۱۲]، مبدل سمت شبکه به صورت فعال به منظور تولید توان راکتیو و جبران هارمونیک بار غیرخطی در نقطه اتصال مشترک، بررسی شده است. طرح جبران هارمونیک و توان راکتیو شامل فیلترهای پسیو، فیلترهای



شکل (۱): تغییرات ضریب توان نسبت به سرعت رأس پره

Fig. (1): Power Factor Variations VS the tip speed ratio

$$u_{dr} = R_r i_{dr} + (L_r - \frac{L_m}{L_s}) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{L_m}{L_s}) i_{qr} \quad (17)$$

$$u_{qr} = R_r i_{qr} + (L_r - \frac{L_m}{L_s}) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{L_m}{L_s}) i_{dr} + g \frac{L_m u_s}{L_s} \quad (18)$$

بنابراین توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور از روابط (۱۹) و (۲۰) استخراج می‌شوند.

$$P_s = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{ds} - u_{qs} i_{qs}) \quad (19)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs}) \quad (20)$$

از روابط (۱۲) تا (۱۶) می‌توان به منظور نوشتن توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور به صورت روابط (۲۱) و (۲۲) استفاده نمود.

$$P_s = -\frac{3 u_s L_m}{2 L_s} i_{qr} \quad (21)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{u_s}{L_s \omega_s} (u_s - L_m \omega_s i_{dr}) \quad (22)$$

۳- نواحی کاری مختلف از نظر سرعت باد

سرعت باد، عامل تعیین‌کننده مرجع توان، گشتاور و یا سرعت توربین است. بر حسب اینکه سرعت باد چه مقداری باشد، می‌توان عملکرد توربین را به چهار حالت کلی تقسیم‌بندی کرد.

- حالت اول، سرعت باد کمتر از سرعت قطع پایین

در این حالت به دلیل پایین بودن بیش از حد سرعت باد و بالاتر بودن تلفات از توان تولیدی، ژنراتور را در حالت خارج از خط قرار می‌دهند و در واقع توانی جذب نمی‌شود. سرعت قطع پایین بیانگر حداقل سرعتی است که ژنراتور که در آن تولید توان می‌کند، که معمولاً حدود چهار متر بر ثانیه است.

- حالت دوم، عملکرد کنترل سرعت، گشتاور و توان

۲- مدل ژنراتور القایی دوسو تغذیه

معادلات ولتاژ و شار ژنراتور القایی دو سو تغذیه در قاب مرجع پارک به صورت روابط (۳) تا (۱۰) بیان می‌شوند که در آنها R_s مقاومت استاتور، R_r مقاومت رتور، ω_s سرعت زاویه‌ای سنکرون، ω_r سرعت زاویه‌ای رتور و λ_d و λ_q شار محورهای d و q هستند [۱۲].

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_s \lambda_{qs} \quad (3)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_s \lambda_{ds} \quad (4)$$

$$u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qs} \quad (5)$$

$$u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{ds} \quad (6)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (7)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (8)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (9)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (10)$$

علاوه بر این گشتاور الکترومغناطیسی از رابطه (۱۱) به دست می‌آید که در آن J ثابت اینرسی کل، Ω_g سرعت ژنراتور القایی دو سو تغذیه، f ضریب اصطکاک کل و T_L گشتاور بار می‌باشد.

$$T_{em} = J \frac{d\Omega_g}{dt} + f \Omega_g + T_L \quad (11)$$

از مقاومت استاتور صرف‌نظر شده و شار استاتور در راستای محور d می‌باشد، پس $\lambda_{ds} = \lambda_s$ و $\lambda_{qs} = 0$ ، در نتیجه روابط (۳)، (۴) و (۷) تا (۹) به ترتیب به صورت روابط (۱۲) تا (۱۶) نوشته می‌شوند [۲۱].

$$u_{ds} \approx 0 \quad (12)$$

$$u_s = u_{qs} \approx \omega_s \lambda_s \quad (13)$$

$$\lambda_s = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (14)$$

$$0 = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (15)$$

$$T_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \lambda_s i_{qr} \quad (16)$$

از این رو معادلات ولتاژ رتور به صورت روابط (۱۷) و (۱۸) نوشته می‌شود که در آنها u_s ولتاژ استاتور که ثابت فرض شده است و g دامنه‌ی لغزش است.

۴-۱- استخراج حداکثر توان از باد

از معادله (۱۶) می‌توان اثبات کرد که گشتاور الکترومغناطیسی می‌تواند به صورت مستقیم توسط مولفه محور q جریان رتور کنترل شود. مرجع محور q جریان رتور توسط رابطه (۲۳) بیان می‌شود.

$$i_{qr_ref} = -\frac{\sqrt{2}L_s\omega_s}{3pu_sL_m}T_{emref} \quad (23)$$

از معادله (۲۲) می‌توان اثبات کرد که توان راکتیو می‌تواند توسط مولفه محور d جریان رتور کنترل شود. مرجع محور d جریان رتور توسط رابطه (۲۴) بیان می‌شود [۱۲].

$$i_{dr_ref} = -\frac{\sqrt{2}L_s\omega_s}{\sqrt{2}u_sL_m}(\frac{3u_s^2}{\sqrt{2}L_s\omega_s} - Q_{sref}) \quad (24)$$

برای اطمینان از استخراج حداکثر توان، می‌توان از یک کنترل کننده تناسبی-انترگرالی استفاده کرد. علاوه بر این برای استخراج حداکثر توان از باد، مرجع سرعت ژنراتور از معادله (۲۵) تخمین زده می‌شود که در آن δ نسبت جعبه دنده و λ_{opt} نسبت سرعت رأس پره بهینه می‌باشد [۲۳].

$$\Omega_{g_ref} = \delta \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (25)$$

برای کنترل مبدل سمت رتور، مرجع جریان محور q رتور از خطای سرعت برگرفته می‌شود و تغییرات خطا توسط کنترل کننده سرعت تناسبی-انترگرالی تنظیم می‌شود. همچنین برای کنترل توان راکتیو به یک مقدار مورد نظر، مرجع جریان محور d رتور می‌تواند از معادله (۲۴) برگرفته شود. در این مقاله به منظور کنترل توان راکتیو قوی‌تر، میزان توان راکتیو مورد نیاز جهت تصحیح ضریب توان شبکه به یک مقدار هدف، از طریق یک حلقه‌ی خارجی محاسبه می‌شود و به عنوان مرجع توان راکتیو تعریف می‌شود. این مقدار مرجع با توان راکتیو تزریقی استاتور به شبکه مقایسه شده و تغییرات خطا با یک کنترل کننده تناسبی-انترگرالی تنظیم می‌شود. از سوی دیگر برای طراحی حلقه‌های کنترل جریان در امتداد دو محور، معادلات (۱۷) و (۱۸) مورد استفاده قرار گرفته است. بدین ترتیب کنترل مستقل جریان محورهای dq با اضافه کردن یک کنترل کننده تناسبی-انترگرالی تحقق می‌یابد.

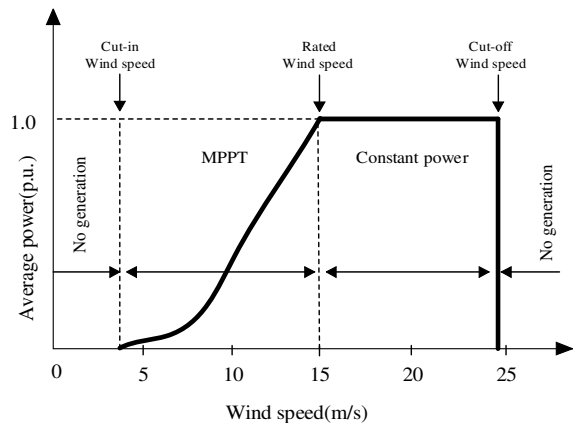
۴-۲- عملکرد فیلتر کردن فعال

روش‌های مختلفی برای شناسایی مرجع جریان هارمونیک وجود دارد. این روش‌ها را اساساً می‌توان به دو حوزه زمان و حوزه فرکانس طبقه‌بندی کرد. متداول‌ترین روش، تئوری توان لحظه‌ای pq نامیده می‌شود که می‌تواند برای جبران جریان هارمونیک گسترش یابد. به همین دلیل در این مقاله تئوری توان لحظه‌ای ارائه شده است. شکل (۳) این تئوری را نشان می‌دهد [۲۴]. همانطور که از شکل مشخص است، برای به دست آوردن مرجع جریان هارمونیک ابتدا باید جریان‌ها- و ولتاژهای سه فاز به دستگاه آلفا و بتا تبدیل شوند. برای این کار از ماتریس تبدیل کلارک می‌شود. پس از این تبدیل، توان‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای با استفاده از رابطه (۲۶) محاسبه می‌شوند [۲۵].

در این محدوده، سرعت باد بیشتر از قطع پایین و کمتر از سرعت نامی است. هدف کنترل کننده در این حالت استخراج حداکثر توان از باد است. بدین منظور باید ضریب توان جذب شده‌ی توربین، حداکثر مقدار خودش را داشته باشد.

- حالت سوم، سرعت باد بیش از مقدار نامی و کمتر از مقدار قطع بالا در این حالت به دلیل اینکه توان به مقدار نامی رسیده است، کنترل کننده‌ی زاویه گام وارد عمل می‌شود و با افزایش زاویه گام، توان خروجی را در حد توان نامی ژنراتور نگه می‌دارد.

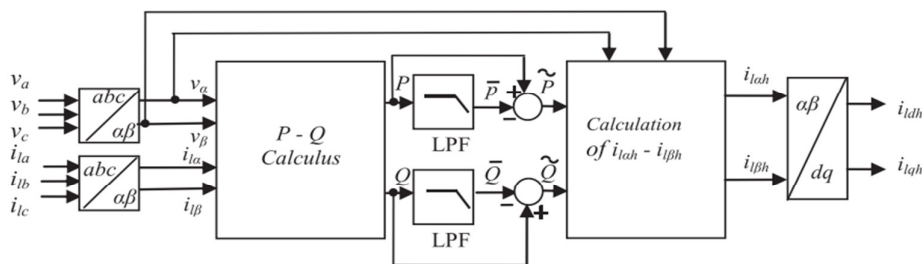
- حالت چهارم، سرعت باد بیش از حد سرعت قطع بالا در این حالت به جهت جلوگیری از آسیب دیدن قطعات مکانیکی، ژنراتور قطع می‌شود و توان جذب شده برابر صفر خواهد بود. انتخاب مقادیر سرعت قطع پایین، سرعت نامی و سرعت قطع بالا با طراحی توربین است و طوری صورت می‌گیرد که توازن مناسب بین جذب حداکثری توان و کنترل بارهای مکانیکی برقرار باشد. در واقع سرعت قطع بالا، آستانه‌ی آسیب‌پذیری ماشین است که معمولاً حدود ۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد. در شکل (۲) منحنی تغییرات توان توربین به ازای سرعت‌های مختلف باد نشان داده شده است [۲۲]. در این مقاله جهت بررسی استخراج حداکثر توان از باد، سرعت باد ۱۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. هدف کنترل کننده سرعت در این حالت استخراج حداکثر توان از باد است. بدیهی است اگر سیستم وارد حالت سوم شود، کنترل برداری بخوبی کار کرده، بعلاوه کنترل کننده‌ی زاویه گام، از سرعت گرفتن ژنراتور در شرایط عملکرد نرمال و غیرعادی پیش‌گیری کرده و پایداری دینامیکی ژنراتور افزایش می‌دهد.



شکل (۲): منحنی تغییرات توان توربین به ازای سرعت‌های مختلف باد [۱۵]
Fig. (2): Turbine power variations curve for load different speeds [15]

۴-۳ کنترل مبدل سمت رتور

در این مقاله کنترل مبدل سمت رتور به منظور دو هدف استخراج ماکزیمم توان از باد و بهبود کیفیت توان از طریق افزایش ضریب توان و فیلتر کردن جریان هارمونیک انجام می‌شود. روش رسیدن به این اهداف به شرح زیر است.



شکل (۳): استخراج مولفه‌های هارمونیک با روش توان لحظه‌ای [۱۷]

Fig. (3): Extraction of harmonic components using instantaneous power [17]

q رتور برای استخراج حداکثر توان از باد و حداکثر جریان محور d رتور برای جبران توان راکتیو و عملکرد فیلتر کردن اکتیو است.

$$I_{dr\max} = \sqrt{I_{rn}^2 - i_{qrref}^2} \quad (30)$$

به منظور بهره‌برداری از مبدل سمت رتور در حداکثر توانایی خود از لحاظ توان، در این مقاله، مراجع جریان برای تولید توان اکتیو، جبران توان راکتیو و کاهش هارمونیک توسط معادلات (۳۱) و (۳۲) بیان می‌شوند.

$$i_{drref} = i_{drref} + k i_{drhref} \quad (31)$$

$$i_{qrref} = i_{qrref} + k i_{qrhref} \quad (32)$$

در روابط فوق k یک ضریب مثبت است که می‌تواند بین ۰ و ۱ باشد. پس اولویت دوم به جبران توان راکتیو داده می‌شود که بر کاهش هارمونیک تقدم دارد. از این رو استراتژی کنترلی برای بهبود کیفیت توان می‌تواند به شرح زیر باشد.

الف) نخست، اگر مرجع جریان راکتیو رتور به صورت رابطه (۳۳) باشد.

$$|i_{drref}| \geq I_{dr\max} \quad (33)$$

آنگاه مبدل سمت رتور می‌تواند در ظرفیت کامل خود از لحاظ توان عمل کند و تنها تولید توان اکتیو و جبران توان راکتیو ممکن است (یعنی $k=0$) و مرجع جریان رتور مجموع توسط روابط (۳۴) و (۳۵) ارائه می‌شود [۱۲].

$$i_{drref} = \text{sign}(i_{drref}) I_{dr\max} \quad (34)$$

$$i_{qrref} = i_{qrref} \quad (35)$$

ب) دوم، اگر مرجع جریان راکتیو رتور به صورت رابطه (۳۶) باشد.

$$|i_{drref}| < I_{dr\max} \quad (36)$$

آنگاه یک بخش از جریان راکتیو رتور برای استفاده جهت فیلتر کردن هارمونیک‌ها وجود دارد که در این حالت دو مورد را می‌توان مورد مطالعه قرار داد.

ب- ۱) اولین مورد زمانی اتفاق می‌افتد که رابطه (۳۷) برقرار باشد:

$$(i_{drref} + i_{drhref})^2 + (i_{qrref} + i_{qrhref})^2 \leq I_{rn}^2 \quad (37)$$

در این مورد مبدل سمت رتور می‌تواند برای جبران توان راکتیو و فیلتر کردن جریان هارمونیک مجموع، بدون هیچ اضافه نرخی مورد استفاده قرار گیرد (یعنی $k=1$). در نتیجه مرجع مجموع جریان رتور توسط معادلات (۳۸) و (۳۹) به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (26)$$

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر، توان‌های اکتیو و راکتیو در فرکانس نامی به دست می‌آید. اختلاف بین توان‌های اکتیو و راکتیو اصلی شبکه و توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از فیلتر پایین‌گذر، توان هارمونیک شبکه خواهد بود. در شکل (۲) توان‌های هارمونیک شبکه با نماد \tilde{P}, \tilde{Q} ، نشان داده شده است. با در اختیار داشتن توان هارمونیک شبکه، از رابطه (۲۷) می‌توان جریان هارمونیک شبکه را به دست آورد [۱۷].

$$\begin{bmatrix} i_{tah} \\ i_{tph} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (27)$$

سیس مرجع جریان‌های هارمونیک شبکه از دستگاه کلارک به دستگاه dq تبدیل می‌شوند. این جریان‌ها باید به جریان‌های رتور قاب مرجع معادل آنها تبدیل شوند. برای این منظور از روابط (۱۴) و (۱۵) استفاده شده و مرجع جریان‌های هارمونیک از روابط (۲۸) و (۲۹) به دست می‌آیند [۱۲].

$$i_{drhref} = -\frac{l_s}{l_m} i_{tdh} \quad (28)$$

$$i_{qrhref} = -\frac{l_s}{l_m} i_{tqh} \quad (29)$$

برای جبران‌سازی، جریان‌های هارمونیک dq مرجع را باید با علامت مخالف در نظر گرفت، لذا علامت منفی در روابط فوق حذف خواهد شد.

۳-۴- بهبود کیفیت توان

با توجه به ادغام بارهای غیرخطی با شبکه، نقش سیستم تبدیل انرژی باد نه تنها گرفتن حداکثر توان از باد است بلکه می‌تواند در بهبود کیفیت توان نیز مشارکت داشته باشد.

۴-۴- مدیریت اولویت‌های عملکردی سیستم تبدیل انرژی باد

قابلیت مبدل سمت رتور از لحاظ توان، توسط جریان نامی رتور محدود می‌شود. اولین اولویت تولید توان اکتیو است که مقدم بر کیفیت توان است. بنابراین مقدار حداکثر جریان راکتیو قابل دسترس رتور برای جبران توان راکتیو و کاهش جریان هارمونیک از معادله (۳۰) محاسبه می‌شود که در آن I_{rn} حداکثر جریان رتور، i_{qrref} جریان مرجع محور

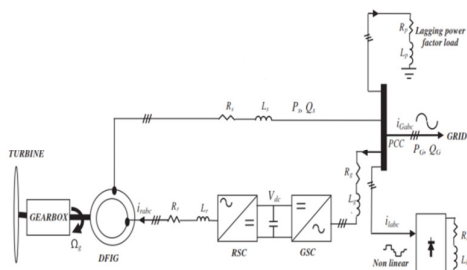
حالی که در الگوریتم‌های دیگر عموماً تنها از هوش جمعی استفاده شده است. جزئیات بیشتر و روابط این روش بهینه‌سازی در [۲۶] آمده است. همچنین پارامترهای مورد استفاده در این مقاله در بخش ضامم آمده است. قابل ذکر است که اولین قدم در اجرای این الگوریتم، معرفی تابع هدف مناسب می‌باشد که کاربر با توجه به روند مینیم‌سازی آن به دنبال پارامترهای بهینه در آن می‌گردد. با توجه به اینکه در کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی به دنبال رساندن مقادیر واقعی و مرجع به هم هستیم، لذا بایستی خطای ورودی به کنترل‌کننده کاهش یابد. پس طبق رابطه (۴۵)، انتگرال خطا به عنوان بهترین گزینه تابع هدف، تعریف شده و الگوریتم در راستای مینیم‌کردن تابع هدف تلاش می‌کند.

$$J = k \int |e| dt \quad (44)$$

به منظور نشان دادن تأثیر این الگوریتم، منحنی تابع هدف بر حسب نسل برای اولین کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مورد استفاده در حلقه‌ی کنترل سرعت، در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است الگوریتم باعث حداقل شدن تابع هدف شده است. ضرایب کنترل‌کننده سرعت قبل از بهینه‌سازی برابر با $k_p = 21$ و $k_i = 20/72$ بود که بعد از بهینه‌سازی به $k_p = 33/0.361$ و $k_i = 28/83.04$ تغییر یافته است.

۶- بحث و نتایج شبیه‌سازی

استراتژی کنترلی پیشنهادی برای یک سیستم تبدیل انرژی باد مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه‌ی ۷/۵ کیلو واتی به کار برده شده است. عملکرد سیستم تبدیل انرژی باد تحت سرعت نامی باد در ۱۳ متر بر ثانیه مورد مطالعه قرار گرفته است. بار مجموع سیستم از یک بار غیرخطی و یک بار خطی پس فاز تشکیل شده است. بار غیرخطی متصل شده به نقطه اتصال مشترک، یک یکسوساز با توان ظاهری ۱ کیلو ولت آمپر و بار خطی پس فاز با توان اکتیو ۱۳ کیلو وات در نظر گرفته شده است. حداکثر توانایی ژنراتور جهت تولید توان راکتیو حدود ۵ کیلووار می‌باشد. بنابراین توان راکتیو بار خطی برای جبران‌سازی ۲، ۳/۵ و ۹/۵ کیلو وار در نظر گرفته شده است که به ترتیب در زمان‌های صفر، ۱ و ۳ ثانیه به شبکه متصل می‌شود. ولتاژ شبکه ۴۰۰ ولت و جریان نامی رتور ۲۰ آمپر می‌باشد. شکل (۷) پروفیل بار راکتیو را در طول زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد.



شکل (۴): طرح مختصر سیستم تبدیل انرژی باد مورد مطالعه
Fig. (4): Brief description of wind energy conversion system studied

$$i_{dref} = i_{drref} + i_{drhref} \quad (38)$$

$$i_{qref} = i_{qrref} + i_{qrhref} \quad (39)$$

ب- ۲) دومین مورد زمانی اتفاق می‌افتد که رابطه (۴۰) برقرار باشد.

$$(i_{dref} + i_{drhref})^2 + (i_{qref} + i_{qrhref})^2 > I_{rn}^2 \quad (40)$$

در این حالت، مبدل سمت رتور می‌تواند برای جبران توان راکتیو و فیلترکردن بخشی از جریان هارمونیک مجموع بدون هیچ اضافه نرخی مورد استفاده قرار گیرد. برای اینکه مبدل در اضافه بار قرار نگیرد، دو استراتژی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

- در استراتژی اول از آنجا که تمام جریان‌های هارمونیک نمی‌تواند جبران شود، عملیات فیلتر کردن هارمونیک‌ها حذف شود و تنها بهبود ضریب توان در نظر گرفته شود. یعنی مرجع جریان محورهای dq توسط روابط (۳۱) و (۳۲) با $k = 0$ بیان می‌شوند. در این مورد مبدل سمت رتور از لحاظ فیلترکردن در ظرفیت کامل کار نمی‌کند.

- رویکرد دوم که در این مقاله پیشنهاد شده است، اجازه بهره‌برداری از قابلیت کامل مبدل سمت رتور از لحاظ توان توسط فیلتر کردن یک بخش از جریان هارمونیک را بدون هیچ اضافه نرخی می‌دهد. برای این منظور ضریب مناسب k_{opt} که بین ۰ و ۱ است، توسط معادله (۴۱) بررسی می‌شود.

$$(i_{dref} + k_{opt} i_{drhref})^2 + (i_{qref} + k_{opt} i_{qrhref})^2 = I_m^2 \quad (41)$$

مقدار فیزیکی k_{opt} می‌تواند توسط حل معادله مرتبه دوم فوق به دست آید. به عنوان یک نتیجه، مرجع مجموع جریان رتور به شرح زیر بیان می‌شود [۱۲].

$$i_{dref} = i_{drref} + k_{opt} i_{drhref} \quad (42)$$

$$i_{qref} = i_{qrref} + k_{opt} i_{qrhref} \quad (43)$$

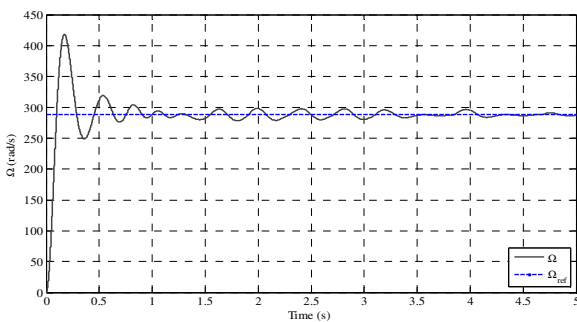
۵- توصیف و شرح مدل

طرح مختصر سیستم مورد مطالعه در شکل (۴) نشان داده شده است که شامل سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه، یک بار خطی و یک بار غیرخطی است. این عناصر با هم در نقطه اتصال مشترک، متصل شده‌اند. شکل (۵) جزئیات طرح کنترل مبدل سمت رتور را به منظور تولید توان اکتیو، جبران توان راکتیو و کاهش جریان هارمونیک شبکه نشان می‌دهد. از آنجا که کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی دارای ساختاری ساده بوده و از عملکرد نسبتاً مقاومی برخوردار هستند، امروزه نیز علی‌رغم پیشرفت‌های علمی، به وفور از این کنترل‌کننده‌ها در صنایع یافت می‌شود. در طرح پیشنهادی کنترل‌برداری از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی استفاده می‌شود. یکی از مشکلات اساسی این کنترل‌کننده‌ها، تنظیم ضرایب آنها می‌باشد. در این مقاله جهت برطرف کردن این مشکل در رنج وسیعی از نقاط کار، الگوریتم پیشرفته جستجوی هوشمند باکتری به کار گرفته می‌شود. این الگوریتم با الهام از روند جستجوی تغذیه باکتری جهت تنظیم بهینه این کنترل‌کننده‌ها استفاده می‌شود. یکی از مزایای عملکرد این الگوریتم بهینه‌سازی، بهره بردن از هوش فردی در کنار هوش جمعی می‌باشد. در

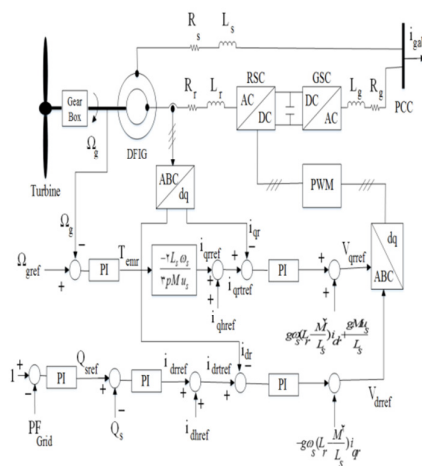
۶-۱- تولید توان اکتیو

اولین و مهمترین اولویت در مدیریت توان ژنراتور، تولید توان اکتیو است. به منظور استخراج حداکثر توان از باد در سرعت نامی باد ۱۳ متر بر ثانیه، سرعت بهینه ژنراتور از رابطه (۲۵) تخمین زده می‌شود. همچنین ماکزیمم ضریب توان توربین در این سرعت باد در شکل (۱) نشان داده شده است. برای کنترل مبدل سمت رتور، گشتاور بهینه از خطای سرعت برگرفته می‌شود و تغییرات خطا توسط کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرالی تنظیم می‌شود. شکل (۸) سرعت ژنراتور و مرجع آن را در طول زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

می‌توان مشاهده کرد که این سرعت، مرجع خود را به خوبی دنبال می‌کند، بدین ترتیب حداکثر توان از باد جذب می‌شود. برای طراحی حلقه‌ی کنترل جریان در امتداد محور q ، از معادله (۱۸) استفاده می‌شود. شکل (۹) جریان محور q رتور و مرجع آن را به عنوان حلقه‌ی کنترلی داخلی نشان می‌دهد. به دلیل محدود شدن این جریان در انتهای محور q و جلوگیری از اضافه بار مبدل سمت رتور، این جریان از دنبال کردن مرجع خود در پیکها، خودداری کرده است. از طرف دیگر اگر مقدار متوسط جریان مرجع را در نظر بگیریم، مشاهده می‌شود که جریان واقعی، متوسط جریان مرجع را به خوبی دنبال کرده است. لذا کنترل سرعت ژنراتور به عنوان هدف اصلی محور q به خوبی حاصل شده است. پس کنترل برداری به خوبی کار می‌کند.



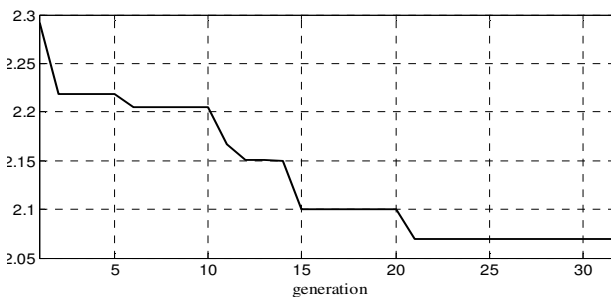
شکل (۸): سرعت ژنراتور و مرجع آن در طول مدت زمان شبیه‌سازی
Fig. (8): Generator speed and its reference during simulation time



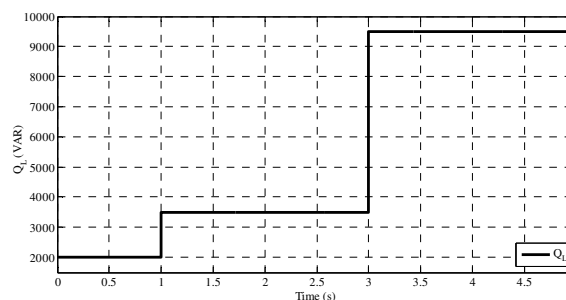
شکل (۵): طرح کنترل مبدل سمت رتور برای تولید توان اکتیو، جبران توان راکتیو و کاهش هارمونیک

Fig. (5): Rotor side converter control scheme to produce active power, reactive power compensation and harmonic reduction

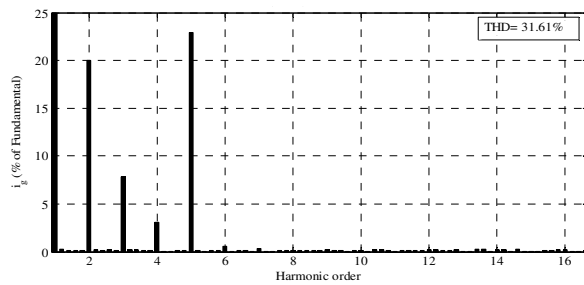
۶-۲- بهبود کیفیت توان در مرجع جریان رتور کوچکتر از جریان نامی با توجه به اهمیت تولید توان اکتیو به عنوان اولویت ژنراتور بادی، شرایط کنترل توان راکتیو در شرایط ایزوله شدن از شبکه اهمیت بیشتری دارد. لذا پس از تولید توان اکتیو، به منظور بهبود کیفیت توان، جریان رتور باقی مانده به جریان محور d تعلق می‌گیرد. در بهبود کیفیت توان، اولویت اول به جبران توان راکتیو و اولویت بعدی به کاهش جریان هارمونیکی شبکه داده می‌شود. در این بخش جبران توان راکتیو و کاهش هارمونیکی، با مرجع جریان رتور اشباع نشده مورد مطالعه قرار گرفته می‌شود، بار اکتیو خطی برابر با ۱۳ کیلو وات، بار غیرخطی ۱ کیلو ولت آمپر و توان راکتیو بار خطی برای جبران‌سازی در این بخش، ۲ کیلووات در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه جریان محور d رتور لازم برای جبران‌سازی کمتر از جریان محور d رتور ماکزیمم است، جبرانی جهت جبران‌سازی جریان هارمونیکی شبکه باقی می‌ماند. در نتیجه ضریب k_{opt} برابر با عددی بین صفر و یک می‌شود. در این حالت ضریب توان به صورت کامل اصلاح شده و مجموع اعوجاج هارمونیکی جریان شبکه نیز از ۳۱/۶۱٪ به ۲۳/۱۱٪ کاهش یافته است. شکل (۱۰) ضریب توان شبکه را در زمان اعمال بار راکتیو ۲ کیلوواتی نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۱) توان راکتیو استاتور و مرجع آن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که کنترل توان راکتیو استاتور به عنوان هدف اصلی محور d به خوبی حاصل شده است. پس کنترل برداری به خوبی کار می‌کند. شکل (۱۲) جریان محور q رتور و مرجع آن را به عنوان حلقه‌ی کنترلی داخلی نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۱۳) و (۱۴)



شکل (۶): منحنی تابع هدف جهت بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده‌ی سرعت
Fig. (6): Objective function curves to optimize the speed controller parameters

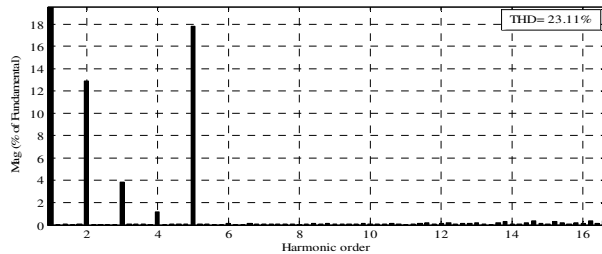


شکل (۷): توان راکتیو بار خطی در طول مدت شبیه‌سازی
Fig. (7): Linear load reactive power during simulation



شکل (۱۳): درصد اعوجاج هارمونیک جریان شبکه قبل از جبران سازی هارمونیک در زمان اعمال بار راکتیو ۲ کیلو واری

Fig. (13): Grid current harmonic distortion before harmonic compensation at the time of applying 2 KVAR reactive load



شکل (۱۴): درصد اعوجاج هارمونیک جریان شبکه بعد از جبران سازی هارمونیک در زمان اعمال بار راکتیو ۲ کیلو واری

Fig. (14): The percentage of network current harmonic distortion after harmonic compensation at the time of applying 2KVAR reactive load

جدول (۱): درصد هارمونیک های جریان شبکه در زمان اعمال بار راکتیو ۲ کیلو واری
Table1. The Grid current harmonics when applying reactive load 2 KVAR

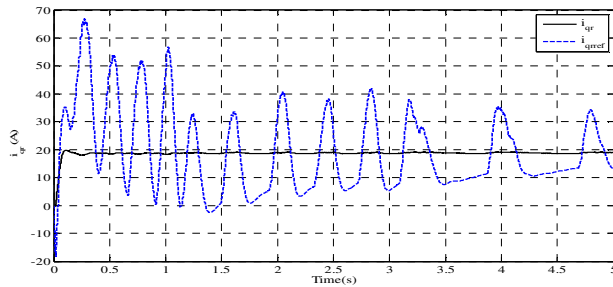
مرتبۀ هارمونیک	درصد هارمونیک قبل از جبران سازی	درصد هارمونیک بعد از جبران سازی
۲	۱۹/۹۹	۱۳/۰۱
۳	۷/۷۹	۳/۸۰
۴	۳/۱۱	۱/۱۸
۵	۲۳/۰۰	۱۷/۸۷
۶	۰/۵۹	۰/۱۷
۷	۰/۳۲	۰/۱۱
۸	۰/۱۲	۰/۰۴
۹	۰/۲۱	۰/۱۲

۳-۶- جبران توان راکتیو و کاهش هارمونیک در مرجع جریان

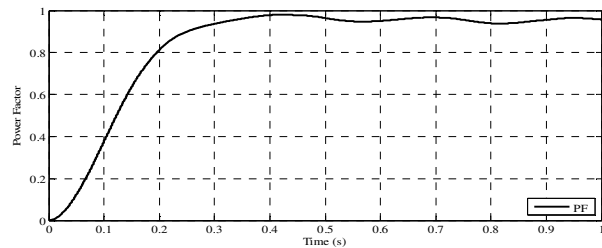
رتور در محدوده جریان نامی

برای نشان دادن تأثیر استراتژی پیشنهادی برای قابلیت بهره برداری از مبدل سمت رتور در حداکثر توانایی خود، بارهای اکتیو و غیرخطی، مشابه بخش قبل اما توان بار راکتیو برابر با ۳/۵ کیلو واری در نظر گرفته می شود. در این صورت مبدل سمت شبکه می تواند با توجه به اولویت جبران توان راکتیو نسبت به جبران جریان هارمونیک، ضریب توان شبکه را کاملاً اصلاح کرده و جریان کمی جهت کاهش هارمونیک شبکه در دسترس خواهد بود. در شکل (۱۵) ضریب توان شبکه را در طول مدت اتصال بار راکتیو ۳/۵ کیلو واری نشان می دهد. همچنین شکل (۱۶) توان راکتیو استاتور و مرجع آن را نشان می دهد. می توان مشاهده

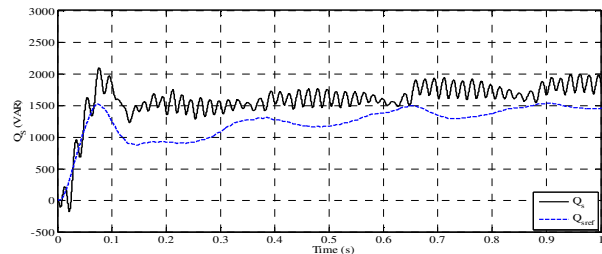
نیز به ترتیب درصد اعوجاج هارمونیک شبکه را قبل و بعد اعمال ضریب k_{opt} نشان می دهد. درصد هارمونیک های جریان شبکه در زمان اعمال بار راکتیو ۲ کیلو واری در جدول (۱) آمده است.



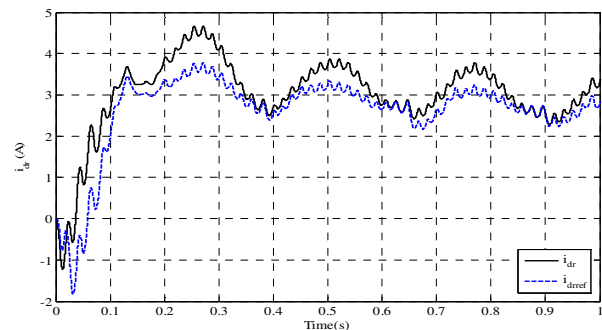
شکل (۹): مولفه ی q جریان رتور و مرجع آن در طول مدت زمان شبیه سازی
Fig. (9): Rotor current q component and its reference during simulation time



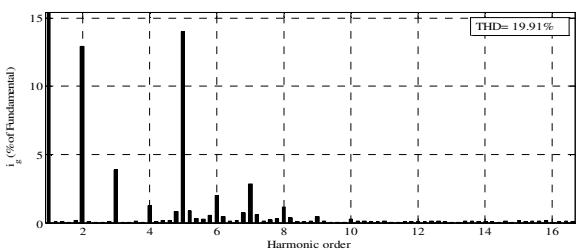
شکل (۱۰): ضریب توان شبکه در زمان اعمال بار راکتیو ۲ کیلو واری
Fig. (10): Grid power factor at the time of applying 2KVAR reactive load



شکل (۱۱): توان راکتیو استاتور و مرجع آن در زمان اعمال بار راکتیو ۲ کیلو واری
Fig. (11): Stator reactive power and its reference at the time of applying 2 KVAR reactive load

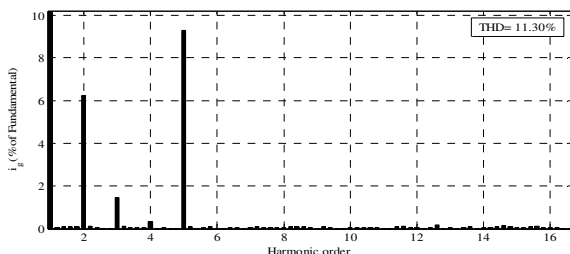


شکل (۱۲): مولفه ی q جریان رتور و مرجع آن در زمان اعمال بار راکتیو ۲ کیلو واری
Fig. (12): Rotor current q component and its reference at the time of applying 2 KVAR reactive load



شکل (۱۸): درصد اعوجاج هارمونیک جریان شبکه قبل از جبران سازی هارمونیک در زمان اعمال بار راکتیو ۳/۵ کیلو واری

Fig. (18): %current harmonic distortion before harmonic compensation at the time of applying 3.5KVAR reactive load



شکل (۱۹): درصد اعوجاج هارمونیک جریان شبکه بعد از جبران سازی هارمونیک در زمان اعمال بار راکتیو ۳/۵ کیلو واری

Fig. (19): % current harmonic distortion after harmonic compensation at the time of applying 3.5KVAR reactive load

جدول (۲): درصد هارمونیک های جریان شبکه در زمان اعمال بار راکتیو ۳/۵ کیلو واری

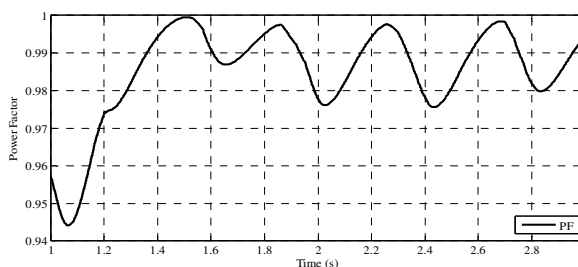
Table (2): The Grid current harmonics when applying reactive load 3.5KVAR

مرتبه هارمونیک	درصد هارمونیک قبل از جبران سازی	درصد هارمونیک بعد از جبران سازی
۲	۱۲/۸۰	۶/۲۳
۳	۳/۷۵	۱/۹۱
۴	۱/۱۳	۰/۳۱
۵	۱۴/۰۱	۹/۳۵
۶	۱/۹۰	۰/۰۳
۷	۲/۷۳	۰/۰۸
۸	۱/۲۱	۰/۰۴
۹	۰/۴۱	۰/۰۸

۴-۶- جبران توان راکتیو و کاهش هارمونیک در مرجع جریان رتور بزرگتر از جریان نامی

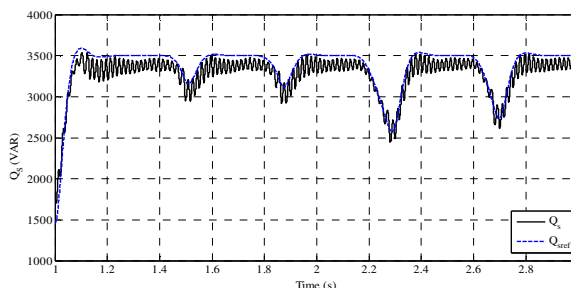
در این بخش جبران توان راکتیو و کاهش هارمونیک، با مرجع جریان رتور اشباع شده مورد مطالعه قرار گرفته است. بارهای اکتیو و غیرخطی مانند دو بخش قبلی به نقطه اتصال مشترک متصل شده و تنها توان راکتیو بار خطی برای جبران سازی در این بخش، ۹/۵ کیلو وار در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه جبران توان راکتیو بر جبران جریان هارمونیک شبکه تقدم دارد، در این حالت، تنها می توان بخشی از توان راکتیو شبکه را جبران نمود و جریان محور d رتور برای جبران سازی جریان هارمونیک در دسترس نیست. در این حالت توان راکتیو تزریقی استاتور به شبکه در مقدار نهایی خود قرار می گیرد و استراتژی عملی منجر به عملکرد مبدل سمت رتور در ظرفیت کامل خود شده و از اضافه

نمود که توان راکتیو استاتور به خوبی مرجع خود را با هدف اصلاح ضریب توان شبکه، دنبال می کند. از طرفی به منظور استفاده از حداکثر توان مبدل سمت رتور و جلوگیری از اضافه بار آن، اختلاف جریان نامی رتور و جریان واقعی رتور در جهت کاهش جریان هارمونیک شبکه استفاده می شود. لذا پس از جبران سازی، مجموع اعوجاج هارمونیک جریان شبکه از ۱۹/۹۱٪ به ۱۱/۳۰٪ کاهش یافته است. اما اهمیت این استراتژی کنترل زمانی مشخص می شود که بر روی یک مزرعه بادی اعمال شود، آنگاه کیفیت توان شبکه می تواند با تصحیح ضریب توان و جبران جریان های هارمونیک شبکه ناشی از بارهای غیرخطی، افزایش پیدا کند. شکل (۱۷) جریان محور d رتور و مرجع آن را به عنوان حلقه ی کنترلی داخلی نشان می دهد. همچنین شکل های (۱۸) و (۱۹) نیز به ترتیب درصد اعوجاج هارمونیک شبکه را قبل و بعد اعمال استراتژی جبران هارمونیک نشان می دهد. درصد هارمونیک های جریان شبکه در زمان اعمال بار راکتیو ۳/۵ کیلو واری در جدول (۲) آمده است.



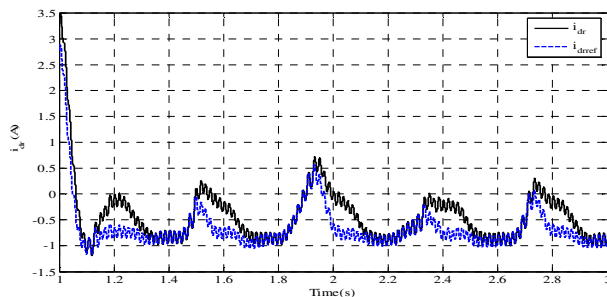
شکل (۱۵): ضریب توان شبکه در زمان اعمال بار راکتیو ۳/۵ کیلو واری

Fig. (15): Grid power factor at the time of applying 3.5KVAR reactive load



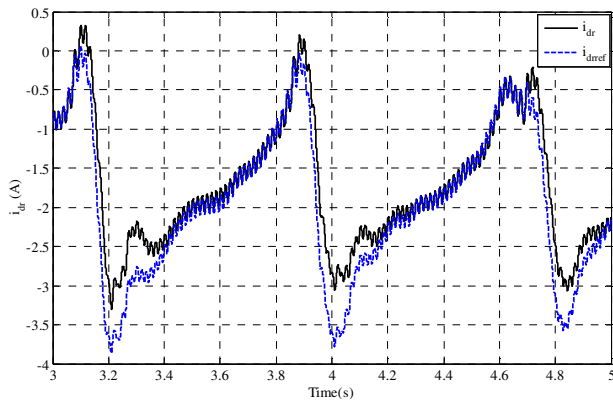
شکل (۱۶): توان راکتیو استاتور و مرجع آن در زمان اعمال بار راکتیو ۳/۵ کیلو واری

Fig. (16): Stator reactive power and its reference at the time of applying 3.5KVAR reactive load



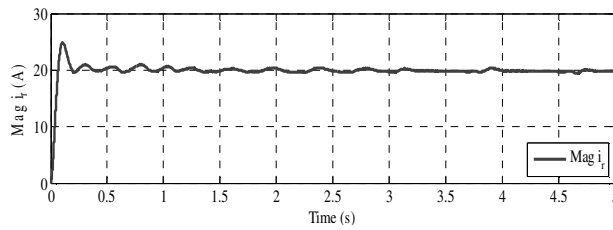
شکل (۱۷): مولفه ی d جریان رتور و مرجع آن در زمان اعمال بار راکتیو ۳/۵ کیلو واری

Fig. (17): Rotor current d component and its reference at the time of applying 3.5KVAR reactive load



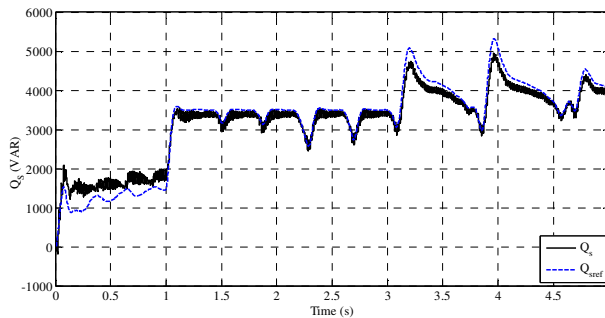
شکل (۲۲): مولفه d جریان رتور و مرجع آن در زمان اعمال بار راکتیو ۹/۵ کیلو واری

Fig. (22): Rotor current d component and its reference at the time of applying 9.5KVAR reactive load



شکل (۲۳): دامنه جریان رتور و در طول مدت زمان شبیه‌سازی

Fig. (23): Rotor current amplitude and its reference during simulation time

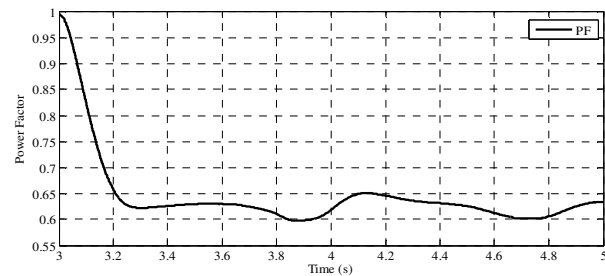


شکل (۲۴): توان راکتیو استاتور و مرجع آن طول مدت شبیه‌سازی

Fig. (24): Stator reactive power and its reference during simulation time

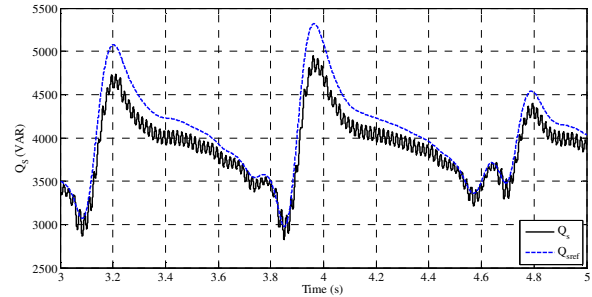
بعلاوه شکل‌های (۲۵) و (۲۶) به ترتیب مقادیر توان اکتیو و راکتیو شبکه را در طول زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد. با مشاهده این دو شکل و مقایسه آنها با مقادیر بارهای اکتیو و راکتیو می‌توان دریافت که با توجه به ثابت بودن توان بار اکتیو در طول شبیه‌سازی، مقدار تقریباً ثابتی توان اکتیو از شبکه کشیده شده است. از طرفی دیگر با توجه به اینکه در بارهای راکتیو ۲ و ۳/۵ کیلوواری (زمان صفر تا ۳ ثانیه) اصلاح ضریب توان توسط ژنراتور انجام شده است، توان راکتیو بسیار ناچیزی از شبکه کشیده شده است، اما در زمان اعمال بار راکتیو ۹/۵ کیلوواری با توجه به اینکه این مقدار بیش از توانایی ژنراتور بوده است، مابقی توان راکتیو توسط شبکه تامین شده است.

بار آن جلوگیری می‌کند. لذا ضریب توان شبکه به حدود ۰.۶۳ بهبود داده شده و چون بهبود بیشتر آن منجر به اضافه بار مبدل سمت رتور می‌شود، مابقی توان راکتیو بار راکتیو ۹/۵ کیلو واری، از شبکه تامین می‌شود. همچنین هیچ جبران‌سازی جریان هارمونیک انجام نمی‌شود. شکل (۲۰) ضریب توان شبکه و شکل (۲۱) توان راکتیو استاتور و مرجع آن را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که توان استاتور به خوبی مرجع خود را دنبال می‌کند، در نتیجه کنترل توان راکتیو به خوبی انجام شده است.



شکل (۲۰): ضریب توان شبکه در زمان اعمال بار راکتیو ۹/۵ کیلو واری

Fig. (20): Grid power factor at the time of applying 9.5KVAR reactive load



شکل (۲۱): توان راکتیو استاتور و مرجع آن در زمان اعمال بار راکتیو ۹/۵ کیلو واری

Fig. (21): Stator reactive power and its reference at the time of applying 9.5 KVAR reactive load

شکل (۲۲) جریان محور d رتور و مرجع آن را به عنوان حلقه‌ی کنترل داخلی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که این جریان به خوبی مرجع خود را دنبال می‌کند. به علاوه شکل (۲۳) دامنه جریان رتور را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که در زمان اعمال هر سه مقدار بار راکتیو، از حداکثر جریان رتور (۲۰ آمپر) به منظور اهداف کنترلی استفاده شده است، در نتیجه مبدل سمت رتور در حداکثر توانایی خود بهره‌برداری شده است. شکل (۲۴) توان راکتیو استاتور را در طول زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد. با مقایسه این شکل و شکل (۷) می‌توان مشاهده کرد که با افزایش بار راکتیو، توان راکتیو استاتور نیز افزایش نموده و عمل جبران‌سازی به خوبی انجام شده است.

این مقاله نسبت به مقالات قبلی، می‌توان به بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی با استفاده از روش هوشمند جستجوی باکتری و همچنین اضافه کردن یک حلقه‌ی کنترلی خارجی، جهت عملکرد بهتر اصلاح ضریب توان اشاره کرد. نتایج شبیه‌سازی با نرم افزار متلب، اثر بخشی روش و استراتژی کنترلی پیشنهادی را اثبات می‌کند.

۸- ضامئ

جدول (۳): پارامترهای توربین

Table (3): Turbine parameters

۱۰	توان [KW]
۳	تعداد پره‌ها
۳	شعاع توربین [m]
۸	نسبت گیربکس

جدول (۴): پارامترهای ژنراتور

Table (4): Generator parameters

۷/۵	توان [KW]
۹	توان ظاهری [KVA]
۰/۴۵۵	مقاومت استاتور [Ω]
۰/۶۲	مقاومت رتور [Ω]
۰/۰۸۴	اندوکتانس فاز استاتور [H]
۰/۰۸۱	اندوکتانس فاز رتور [H]
۰/۰۷۸	اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی [H]

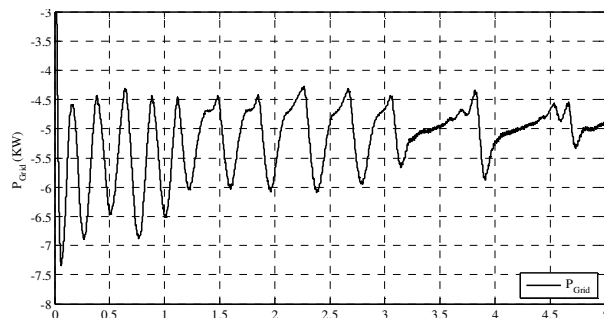
جدول (۵): پارامترهای SBFA

Table (5): SBFA parameters

۶	N_s
۱۰	$N_{e,d}$
۲	N_c
۳	N_{er}
۸	s
٪۱۵	P_{ed}
۰/۰۰۱	C_{min}

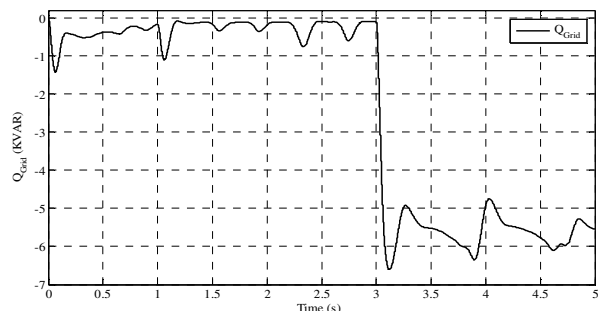
Periodicals:

- [1] G. Shahgholian, "PID controller design for load-frequency control in power system with hydro-turbine includes transient droop compensation", Dam and Hydroelectric Powerplant, Vol. 2, No. 5, pp. 50-64, 2015 (in Persian).
- [2] M. Mahdavian, G. Shahgholian, M. Janghorbani, B. Soltani, N. Wattanapongsakorn, "Load frequency control in power system with hydro turbine under various conditions", Proceeding of the IEEE/ECTICON, pp. 1-5, Hua Hin, Thailand, June 2015.
- [3] J. Mohammadi, S. Vaez-Zadeh, S. Afsharnia, E. Daryabeigi, "A combined vector and direct power control for DFIG-based wind turbines", IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol. 5, No. 3, pp. 767-775, June 2014.
- [4] M. Fooladgar, E. Rok-Rok, B. Fani, Gh. Shahgholian, "Evaluation of the trajectory sensitivity analysis of the DFIG control parameters in response to changes in wind speed and the line impedance connection to the grid DFIG", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 5, No. 20, pp. 37-54, winter 2015 (in Persian).
- [5] M. Mohseni, S.M. Islam, M.A.S. Masoum, "Enhanced hysteresis-based current regulators in vector control of DFIG wind turbines", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 26, No. 1, pp. 223-234, Jan. 2011.
- [6] G. Shahgholian, N. Izadpanahi, "Improving the performance of wind turbine equipped with DFIG using STATCOM based on input-output feedback linearization controller", Energy Equipment and Systems, Vol. 4, No. 1, pp. 65-79, June 2016.



شکل (۲۵): توان اکتیو شبکه در طول مدت شبیه‌سازی

Fig. (25): Grid active power and its reference during simulation time



شکل (۲۶): توان راکتیو شبکه در طول مدت شبیه‌سازی

Fig. (26): Grid reactive power and its reference during simulation time

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای مدیریت توان و بهبود کیفیت توان شبکه با استفاده از یک سیستم تبدیل انرژی باد مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه ارائه و شبیه‌سازی گردید. مبدل سمت رتور برای اولویت بین تولید توان اکتیو ماکزیمم و بهبود کیفیت توان بدون هیچ اضافه باری، مورد استفاده قرار گرفت. بلوک کنترلی پیشنهادی اولویت اول را تولید توان اکتیو و اولویت دوم را بهبود کیفیت توان بدون هیچ اضافه باری قرار داد. پس از تولید توان اکتیو و اصلاح ضریب توان، قابلیت مبدل سمت رتور به طور کامل به منظور کاهش جریان هارمونیک شبکه بدون هیچ اضافه باری مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از نوآوری و برتری

References

- [7] G. Shahgholian, K. Khani, M. Moazzami, "The Impact of DFIG based wind turbines in power system load frequency control with hydro turbine", *Dam and Hydroelectric Powerplant*, Vol. 1, No. 3, pp. 38-51, Winter 2015 (in Persian).
- [8] A. Gaillard, P. Poure, S. Saadate, M. Machmoum "Variable speed DFIG wind energy system for power generation and harmonic current mitigation", *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 6, pp. 1545-1553, June 2009.
- [9] M.T. Abolhassani, P. Enjeti, H.A. Toliyat, "Integrated doubly fed electric alternator/ active filter (IDEA), a viable power quality solution for wind energy conversion systems", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 23, No. 2, pp. 642-650, June 2008.
- [10] M. Singh, A. Chandra, "Application of adaptive network-based fuzzy inference system for sensorless control of PMSG-based wind turbine with nonlinear-load-compensation capabilities", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 26, No. 1, pp.165-175, Jan. 2011.
- [11] A.K. Jain, V.T. Ranganathan, "Wound rotor induction generator with sensorless control and integrated active filter for feeding nonlinear loads in a stand-alone grid", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 1, pp. 218-228, Jan. 2008.
- [12] M.Singh, V. Khadkikar, A. Chandra, "Grid synchronisation with harmonics and reactive power compensation capability of a permanent magnet synchronous generator-based variable speed wind energy conversion system", *IET Power Electronics*, Vol. 41, No. 1, pp. 122-130, Jan 2011.
- [13] Z. Chen, "Compensation schemes for a SCR converter in variable speed wind power systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, pp. 813-821, Vol. 19, No. 2, April 2004.
- [14] S. Engelhardt, S.I. Erlich, C. Feltes, J. Kretschmann, F. Shewarega, "Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction generators", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 1, pp. 364-372, March 2011.
- [15] M. Kayikçi, J. Milanovic, "Reactive power control strategies for DFIG-based plants", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 389-396, June 2007.
- [16] M. Machmoum, A. Hatoum, T. Bouaouiche, "Flicker mitigation of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion system", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 81, No. 2, pp. 433-445, Oct. 2010.
- [17] M. Boutoubat, L. Mokrani, M. Machmoum, "Control of a wind energy conversion system equipped by a DFIG for active power generation and power quality improvement", *Renewable Energy*, Vol. 50, pp. 378-386, Feb. 2013.
- [18] R.M. Linus, P. Damodharan, "Maximum power point tracking method using a modified perturb and observe algorithm for grid connected wind energy conversion systems", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 9, No. 6, pp. 682-689, Aug. 2015.
- [19] N. Ramesh-Babu, P. Arulmozhivarman, " Wind energy conversion systems: A technical review", *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 493 – 507, 2013.
- [20] G. Shahgholian, K. Khani, M. Moazzami, "Frequency control in autonomous microgrid in the presence of DFIG based wind turbine", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 6, No. 23, pp. 3-12, Autumn 2015 (in Persian).
- [21] M. Boutoubat, L. Mokrani, M. Machmoum, F. Auger, "Selective harmonics compensation using a WECS equipped by a DFIG", *Proceeding of the IEEE/IECON*, pp. 745-750, Montreal, QC, Oct. 2012.
- [22] V. Kumar, M. Bajaj, A. Kumar, "Power electronics converters for a wind energy conversion system: Review", *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 4, No. 6, pp. 2686-2693, June 2013.
- [23] S. Vanukuru, S. Sukhavasi, "Active & reactive power control of a doubly fed induction generator driven by a wind turbin", *International Journal of Power System Operation and Energy Management*, Vol. 1, No. 2, 2011.
- [24] M. Machmoum, M. Boutoubat, L. Mokrani, "Power quality improvement using grid side converter of wind energy conversion system", *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 7, pp. 752-759, 2013.
- [25] H. Akangi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. IA-20, No. 3, May/June 1984.
- [26] E. Daryabeigi, B. Mirzaeian-Dehkordi, "Smart bacterial foraging algorithm based controller for speed control of switched reluctance motor drives", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 62, pp. 364–373, Nov. 2014.