

## کنترل ولتاژ لینک DC مبدل های قدرت براساس کنترل سرعت ژنراتور بادی PM

محمد نعمت اله پورولی<sup>1</sup> و<sup>3</sup> علی قدمگاهی<sup>2</sup>، محمد توکلی بینا<sup>3</sup>

<sup>1</sup> دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، m\_poorvali@yahoo.com

<sup>2</sup> دانشگاه تهران، تهران، ایران، ghadamgahi.ali@gmail.com

<sup>3</sup> دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، tavakoli@kntu.ac.ir

چکیده - در این مقاله تامین بار متغیر با استفاده از ژنراتور مغناطیس دائم (PM) بادی و مبدل AC-DC-AC مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. با توجه به متغیر بودن الگوی وزش باد و هم چنین تغییرات بار، کنترل ولتاژ لینک DC از طریق کنترل سرعت ژنراتور PM صورت گرفته است. برای دستیابی به این هدف از دو حلقه‌ی کنترلی جهت کنترل ولتاژ لینک DC و تولید سرعت مرجع، و همچنین کنترل سرعت ژنراتور استفاده شده است. تنظیم سرعت ژنراتور به روش کنترل برداری و با استفاده از مؤلفه‌های  $dq$  و باند هیستریزس محقق شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی صورت گرفته، مؤید تئوری مسأله است.

کلیدواژه- ژنراتور مغناطیس دائم - لینک DC - کنترل برداری - مبدل های قدرت

به دلیل در دسترس بودن روزافزون مواد مغناطیس دائم با انرژی بالا، تحقیق و علاقه زیادی در زمینه ژنراتورهای بادی با تحریک مغناطیس دائم پدید آمده است. ژنراتورهای AC باروتورهای مغناطیس دائم می‌توانند پتانسیل بهره بالاتر در عمل و ساختار ساده و مستحکم در طراحی را به خاطر عدم حضور سیم‌بندی‌های تحریک و جریان میدان DC عرضه کنند [2].

در این مطالعه تنظیم توان خروجی ژنراتور با توجه به توان مورد نیاز بار مد نظر می‌باشد، به طوری که ولتاژ لینک DC در مقدار مطلوب کنترل شود. کنترل ولتاژ لینک DC با توجه به تغییرات سرعت ژنراتور و غیر خطی بودن مشخصه توان سیستم از اهمیت زیادی برخوردار است. تمرکز به طور خاص روی تنظیم ولتاژ لینک DC توسط مبدل سمت ژنراتور، از طریق کنترل سرعت ژنراتور می‌باشد. در قسمت دوم به معرفی سیستم و اجزای آن و روابط حاکم بر آن‌ها پرداخته می‌شود. کنترل سرعت ژنراتور مغناطیس دائم، مبدل‌های قدرت و لینک DC در قسمت سوم مورد بررسی قرار می‌گیرند. در قسمت چهارم روند شبیه‌سازی سیستم در محیط سیمولینک و نتایج حاصل از آن آورده شده است. در انتها نتیجه گیری حاصل از این مطالعه آمده است.

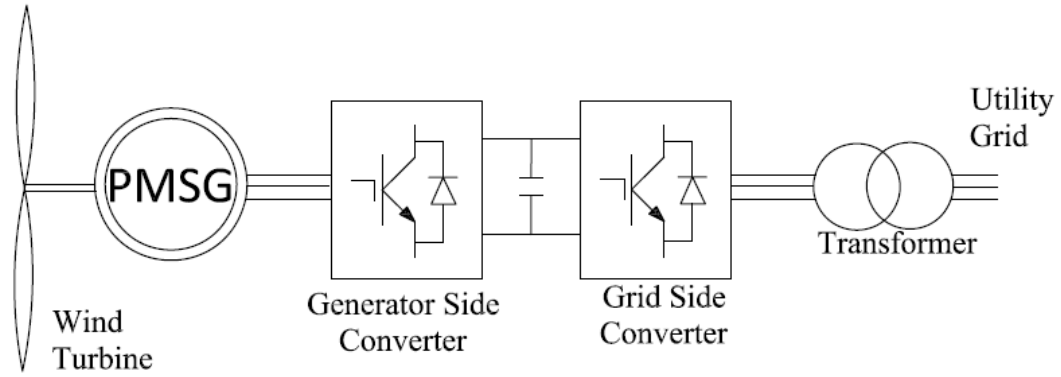
### 2- تعاریف و بیان مسأله

سیستم تبدیل انرژی باد مورد مطالعه شامل یک ژنراتور

### 1- مقدمه

در سال‌های اخیر نگرانی فزاینده‌ای درباره‌ی تغییرات اقلیمی و گرم شدن زمین و اثرات زیانبار انتشار آلاینده‌های کربنی به وجود آمده است و این امر سبب افزایش تقاضا برای منابع انرژی پاک، از قبیل باد، دریا، خورشید و بیوماس شده است [1]. امروزه با گسترش استفاده از انرژی باد در سیستم‌های قدرت، ساختارهای مختلفی برای استفاده از این انرژی پاک و تجدید پذیر، ایجاد و توسعه داده شده است. مشکلات اصلی در استفاده از انرژی باد مربوط به تصادفی بودن سرعت و رخداد آن و همچنین چگونگی حصول ماکزیمم انرژی گرفته شده از این منبع است.

ژنراتورهایی که در کاربردهای توربین بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند به دو دسته‌ی اصلی سرعت ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند. توربین‌های بادی سرعت ثابت به همراه ژنراتورهای القایی معمولاً در مراحل اولیه توسعه انرژی باد مورد استفاده قرار می‌گرفتند. بعضی از معایب ژنراتورهای سرعت ثابت عبارتند از: بهره پایین، کیفیت توان نامناسب و تنش‌های مکانیکی بالا [1]. در سال‌های اخیر با توجه به گسترش و توسعه تکنولوژی ادوات الکترونیک قدرت و کاهش هزینه‌های آن‌ها، عملکرد در حالت سرعت متغیر مورد توجه قرار گرفته است. با راه‌اندازی ژنراتور توربین بادی در حالت سرعت متغیر - فرکانس متغیر، ماکزیمم توان در سرعت‌های کم و متوسط باد می‌تواند حاصل شود.



شکل 1 - نمای کلی سیستم تبدیل انرژی باد

محوری از تساوی ماتریسی آورده شده در (2) استفاده می‌شود.  
(2)

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

ژنراتور از نوع مغناطیس دائم سطحی است و روابط ولتاژ در حالت دائمی در مختصات دو محوری dq به صورت (3) می‌باشد [5].

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d - W \psi_q + \dot{\psi}_d \\ U_q = R_s i_q + W \psi_d + \dot{\psi}_q \end{cases} \quad (3)$$

مؤلفه‌های شار استاتور در (4) آورده شده است.

$$\begin{cases} \psi_q = L_q i_q \\ \psi_d = L_d i_d + \psi_m \end{cases} \quad (4)$$

که  $U_d$  و  $U_q$  ولتاژهای ترمینال،  $i_d$  و  $i_q$  جریان استاتور،  $R_s$  مقاومت سیم‌بندی استاتور،  $L_d$  و  $L_q$  اندوکتانس‌های مؤلفه‌ی مستقیم و عرضی استاتور هستند و  $\psi_m$  شار ناشی تحریک است. گشتاور الکترومغناطیسی می‌تواند از (5) به دست آید.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{\gamma} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (5)$$

با جایگذاری (4) در (5) داریم:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{\gamma} (\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (6)$$

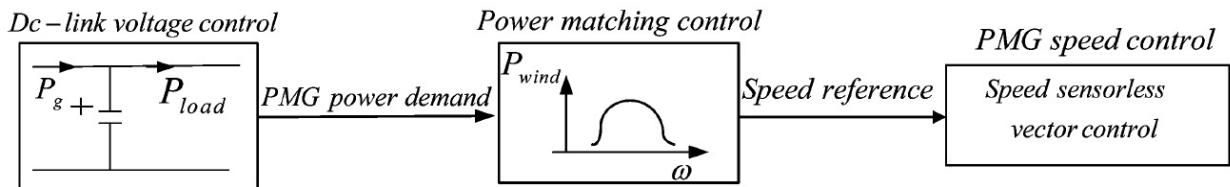
جمله اول گشتاور متقابل بین میدان مغناطیسی و جریان محور q استاتور و جمله دوم گشتاور رلوکتانسی است. در ژنراتور مغناطیس دائم سطحی اندوکتانس‌های  $L_d$  و  $L_q$

سنکرون مغناطیس دائم است که به وسیله توربین بادی به حرکت در می‌آید. خروجی ژنراتور توسط یکسوساز با مدولاسیون PWM، یک مدار DC واسط شامل خازن و یک اینورتر با مدولاسیون PWM به سیستم قدرت منتقل می‌شود [3]. شکل (1) یک شمای کلی از مدار قدرت سیستم توربین بادی سرعت متغیر را نشان می‌دهد. از آنجا که باد یک منبع انرژی مداوم نیست، فرکانس و ولتاژ ژنراتور در سرعت‌های مختلف باد تغییر می‌کند. خروجی متغیر توان AC ژنراتور ابتدا بوسیله یکسوساز PWM، یکسو می‌شود و توان DC موجود با ولتاژ و فرکانس موردنیاز از طریق تنظیم اینورتر به شبکه داده می‌شود [4].

جداسازی که به وسیله خازن لینک DC صورت می‌گیرد امکان کنترل جداگانه برای هر یک از مبدل‌ها را فراهم می‌کند. با به کارگیری این ساختار، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم از شبکه ایزوله می‌شود و این امکان را فراهم می‌کند که جریان‌های خطای درون ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ناشی از خطای شبکه کنترل گردند. اصول کلی روش کنترل در شکل (2) نشان داده شده است. مقدار توانی که از توربین بادی به دست می‌آید توسط (1) بیان می‌شود.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} P A C_p(\omega) V^3 \quad (1)$$

که در آن P چگالی هوا، A سطح جاروب شده توسط پره‌های توربین، V سرعت باد،  $C_p$  ضریب توان توربین بادی و تابعی از سرعت توربین یا ژنراتور ( $\omega$ ) است. در ماشین‌های قطب برجسته، نیروی عکس‌العمل آرمیچر می‌تواند به دو محور d و q تقسیم شود که به آن تئوری دو محوری می‌گویند. از مدل d-q دینامیک برای ژنراتور مغناطیس دائم استفاده شده تا اندوکتانس‌های متغیر با زمان از بین بروند. متغیرها در محورهای a-b-c به وسیله تبدیل پارک به محورهای d-q انتقال داده می‌شوند. برای انتقال ولتاژها و جریان‌ها از سیستم a-b-c به مختصات دو



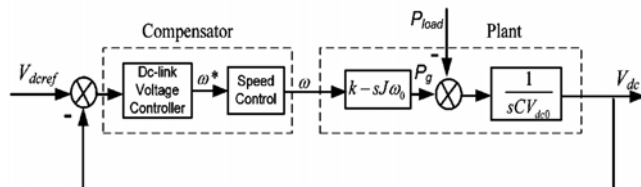
شکل 2 - شمای کلی روش کنترل ولتاژ لینک DC

$$= V_{dc} C \frac{dV_{dc}}{dt} = j\omega \frac{d\omega}{dt}$$

رابطه (9) نشان می‌دهد که ارتباط بین ولتاژ لینک DC و سرعت ژنراتور غیر خطی است که این به دلیل غیرخطی بودن  $C_p(\omega)$  و وجود دو جمله دیفرانسیلی است. با در نظر گرفتن  $P_{load}$  به عنوان اغتشاش رابطه‌ی بالا می‌تواند در یک نقطه کار مشخص (ولتاژ لینک  $V_{dco} = dc$ ، سرعت ژنراتور  $\omega_0$ ) خطی شود. تابع تبدیل ولتاژ لینک DC و سرعت ژنراتور در حوزه فرکانس به صورت (10) بیان می‌شود.

$$\frac{V_{dc}(s)}{\omega(s)} = \frac{k - j\omega_c s}{V_{dc} C s} = \frac{j\omega_c}{V_{dc} C} \frac{[-s + (\frac{k}{j\omega_c})]}{s} \quad (10)$$

در بالا،  $k$  شیب نمودار توان سرعت متناظر با نقطه‌ی کار است [3]. با توجه به رابطه‌ی بالا، می‌توان بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ لینک DC را به صورت شکل (3) رسم کرد.



شکل 3 - بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ لینک DC

کنترل کننده‌ی ای که در این قسمت استفاده شده یک کنترل کننده PI با ضرایب  $k_p$  و  $k_i$  مشخص است که می‌تواند ولتاژ موردنظر را در نقطه‌ی کار دنبال کند و پاسخ خوبی به تغییرات بار و گشتاور داشته باشد. در واقع کنترل کننده با مقایسه ولتاژ مرجع داده شده و ولتاژ لینک DC، سرعت مرجع را برای قسمت کنترل سرعت فراهم می‌کند. از آنجا که با یک سیستم غیرخطی مواجه هستیم و همچنین اتصال حلقه کنترل لینک DC به حلقه‌ی کنترل سرعت به نوعی سبب تغییر سیستم می‌شود و ضمناً تنظیم هم‌زمان دو کنترلر PI به کمک اصول طراحی و استفاده از روابط ریاضی پیچیدگی زیادی دارد یک روند عملی برای تنظیم PI لینک DC در پیش گرفته شد. ابتدا بدون وصل کردن کنترل کننده‌ی ولتاژ لینک DC، و با دادن

برابرند و جمله دوم حذف می‌شود [6].

### 3- روش کنترلی ارائه شده

#### 3-1- کنترل ولتاژ لینک DC

برای کنترل ولتاژ لینک DC در مقدار موردنظر و جلوگیری از تغییرات نامطلوب آن که بر اثر تغییر بار و همچنین تغییرات گشتاور وارده به ژنراتور ایجاد می‌شود، نیاز به یک کنترلر داریم که بتواند ولتاژ لینک DC را در مقدار مطلوب ثابت نگه دارد. با صرفنظر از تلفات مبدل قدرت، روابط دینامیکی ولتاژ لینک DC به شکل (7) است:

$$P_g - P_{load} = V_{dc} I_{dc} = V_{dc} C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (7)$$

که در آن  $V_{dc}$  و  $I_{dc}$  ولتاژ و جریان خازن لینک DC می‌باشند.

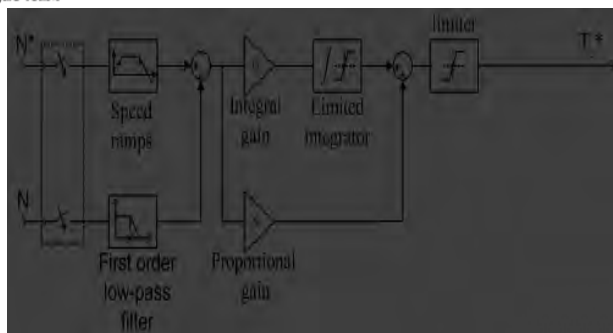
با صرفنظر از تلفات در حالت پایدار، توان تولیدی ژنراتور ( $P_g$ ) با  $P_{wind}$  برابر است، هنگامی که سرعت ژنراتور تغییر می‌کند بین  $P_g$  و  $P_{wind}$  اختلافی به اندازه‌ی توان مکانیکی مورد نیاز برای افزایش یا کاهش سرعت به وجود می‌آید که با (8) بیان می‌شود.

$$P_{wind} - P_g = j\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

که در آن  $J$  اینرسی سیستم است و از تلفات مکانیکی و الکتریکی ژنراتور صرفنظر شده است. از روابط بالا مشخص است که یک راه‌حل برای کنترل ولتاژ لینک DC تغییر توان خروجی ژنراتور با کنترل سرعت آن است.

به منظور دستیابی به رابطه‌ی بین ولتاژ لینک DC و سرعت ژنراتور دو رابطه‌ی (7) و (8) با هم ترکیب می‌شوند که به صورت (9) در می‌آید:

$$\frac{1}{\psi} P_{AC} P(\omega) V^3 - P_{load} = \quad (9)$$



شکل 5- بلوک دیاگرام کنترل کننده سرعت

سرعت ژنراتور می‌باشد ورودی‌های این بلوک گشتاور مرجع تولید شده در بلوک کنترل سرعت،  $\theta$  موقعیت زاویه‌ای روتور و جریان‌های استاتور می‌باشد. جزئیات درون این بلوک در شکل (6) قابل مشاهده است. ابتدا گشتاور مرجع ورودی به بلوک از طریق (11) و به وسیله یک تابع سبب تولید  $i_q^*$  می‌شود.

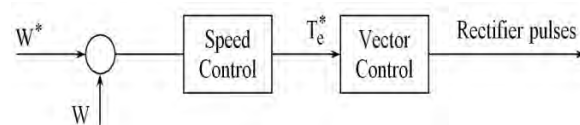
$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) \phi_m i_q^* \quad (11)$$

چون از روش ماکزیمم بهره در کنترل سرعت ماشین استفاده می‌کنیم مقدار  $i_d^*$  را برابر صفر قرار می‌دهیم تا جریان محور  $d$  استاتور به سمت صفر شدن برود و نسبت تغییرات گشتاور ماشین به جریان‌های استاتور ماکزیمم گردد. مقادیر  $i_q^*$  و  $i_d^*$  به همراه موقعیت زاویه‌ای روتور وارد بلوک تبدیل  $dq$  به  $abc$  می‌شوند تا جریان‌های مرجع استاتور یعنی  $I_a^*$ ،  $I_b^*$  و  $I_c^*$  تولید گردند. در بلوک تنظیم کننده ی جریان ابتدا جریان هر فاز با جریان مرجع متناظرش مقایسه می‌شود. اختلاف بین این دو جریان وارد یک رله یا بلوک هیستریزس می‌شود. با توجه به پهنای باند تعریف شده، برای هیستریزس و با در نظر گرفتن این که این اختلاف جریان درون یا بیرون باند هیستریزس باشد، بلوک هیستریزس مقدار 0 یا 1 را تولید می‌کند. خروجی این بلوک به همراه  $Not$  آن به ترتیب به دو المان قدرت موجود در یک ساق وصل می‌شوند تا فرمان روشن و خاموش شدن را به آن‌ها بدهند. پالس‌های تولید شده ی شش گانه به این روش توسط یک باس به ورودی گیت  $universal\ bridge$  وصل می‌شود تا کنترل خاموش و روشن شدن المان‌های آن را برعهده بگیرد. با دنبال کردن جریان‌های مرجع توسط جریان‌های استاتور، سرعت ژنراتور هم سرعت مرجع مطلوب ما را دنبال خواهد کرد.

یک مرجع سرعت دلخواه به حلقه‌ی کنترل سرعت، تلاش شد تا یک کنترل کننده سرعت مناسب با پاسخ سریع و مطلوب برای ماشین پیدا شود. سپس با اضافه کردن کنترل کننده لینک DC به بقیه بخش کنترلی، ابتدا با یک بهره ثابت و زیاد کردن آن، و سپس اضافه کردن انتگرال گیر و تغییر گام به گام مقادیر  $k_p$  و  $k_I$  سعی در یافتن کنترل کننده ای با پاسخ مناسب برای سیستم گردید. پس از یافتن کنترل کننده مناسب، عملکرد سیستم با وارد کردن اغتشاشات مورد بررسی قرار گرفت.

### 3-2- کنترل سرعت

از آن جا که طبق روابط (7) تا (10)، کنترل ولتاژ لینک DC مستلزم کنترل سرعت ژنراتور می‌باشد، در این بخش به بررسی اصول و شیوه کنترل سرعت ژنراتور به کار گرفته شده در این مطالعه می‌پردازیم. شمای کلی بلوک دیاگرام روش کنترل سرعت ژنراتور مغناطیس دائم به کار گرفته شده در شکل (4) آورده شده است.

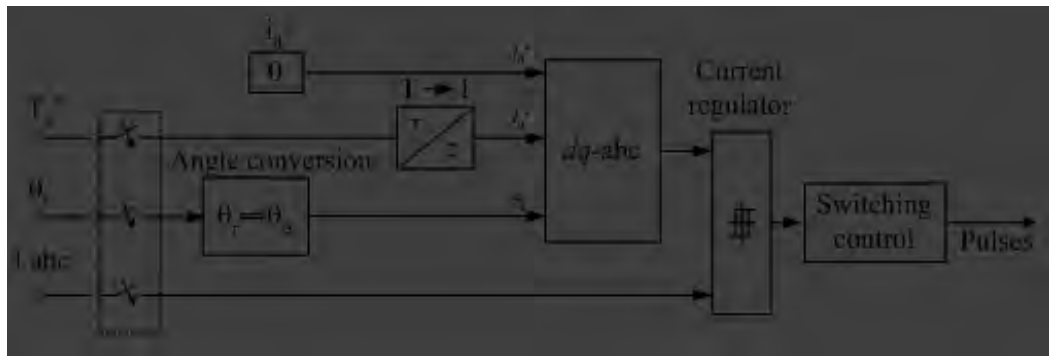


شکل 4- بلوک دیاگرام روش کنترل سرعت ژنراتور

وظیفه بخش کنترل سرعت این است که با مقایسه سرعت واقعی ژنراتور و سرعت مرجع داده شده به آن به تولید گشتاور مرجع موردنیاز که در روش کنترل برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد، بپردازد. جزئیات این بلوک در شکل (5) آورده شده است. اصول کار این بلوک به این صورت است که ابتدا سرعت مرجع و سرعت لحظه‌ای روتور ژنراتور با هم مقایسه می‌شوند و سپس مقدار خطا، وارد یک کنترل کننده ی PI می‌گردد که وظیفه این قسمت تولید گشتاور مرجع برای بلوک بعدی، یعنی بلوک کنترل برداری می‌باشد. البته قبل از دادن گشتاور مرجع به بلوک کنترل برداری این گشتاور وارد یک بلوک اشباع می‌شود تا اگر احیاناً مقدار تولید شده خارج از محدوده مجاز گشتاور باشد، به اشباع برود تا کنترل برداری ماشین مختل نگردد.

### 3-3- بلوک کنترل برداری

وظیفه‌ی این بلوک اعمال روش کنترل برداری بر روی

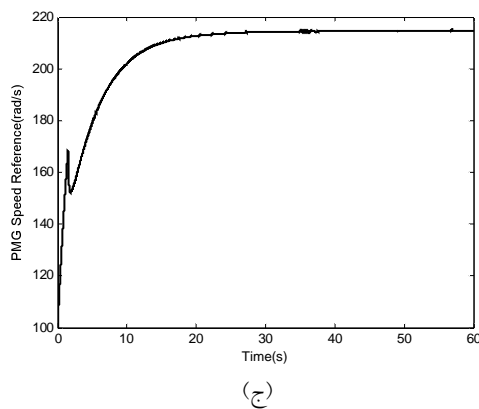
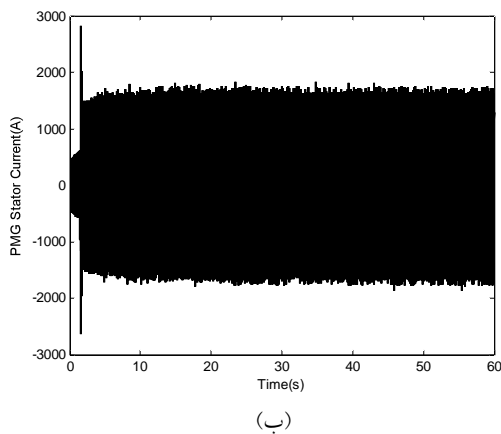
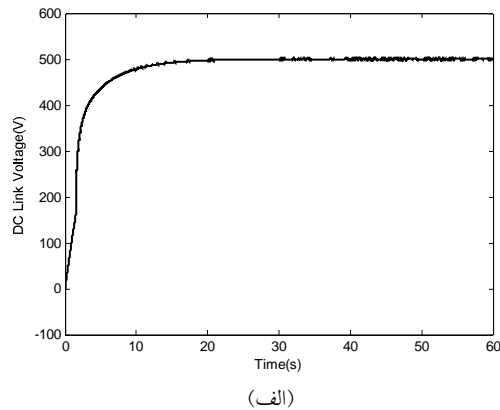


شکل 6 - بلوک کنترل برداری

#### 4- نتایج شبیه سازی

سیستم قدرتی که در جدول (1) مشخصات آن آورده شده است توسط نرم افزار متلب شبیه سازی گردید تا امکان پذیر بودن روش کنترلی مطرح شده بررسی شود. شکل (7) نمودارهای حاصل از شبیه سازی سیستم را تحت شرایط زیر نشان می دهد.

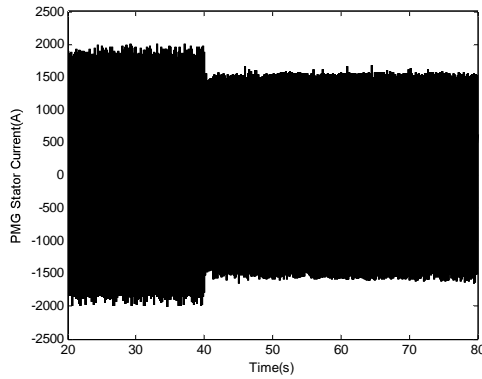
$$P = 600 \text{ kw}, K_p = 0.2, k_I = 0.16$$



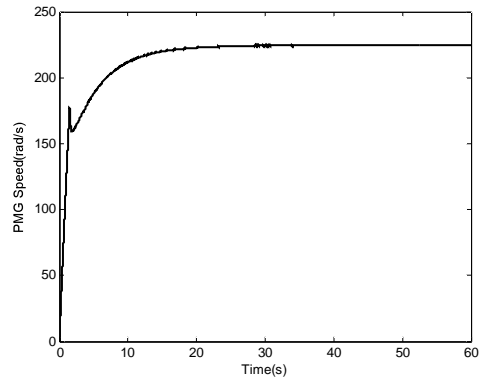
جدول (1) - مشخصات سیستم شبیه سازی شده

|     |                          |     |                                   |
|-----|--------------------------|-----|-----------------------------------|
| 8   | تعداد قطب PMG            | 460 | ولتاژ نامی PMG (V)                |
| 8/5 | اندوکتانس محور (mH)d     | 8/5 | اندوکتانس محور q (mH)             |
| 0/2 | مقاومت استاتور (Ω)       | 500 | ولتاژ نامی لینک DC (V)            |
| 300 | ظرفیت خازنی لینک DC (mF) | 89  | اینرسی ماشین (kg.m <sup>2</sup> ) |
| 600 | بار (KW)                 | 1/5 | قدرت اسمی ژنراتور (MW)            |

پاسخ همان طور که در قسمت (الف) شکل (7) که ولتاژ لینک DC است دیده می شود، از سرعت قابل قبولی برخوردار است و حالت گذرای مناسب و بدون فراجهشی دارد. در قسمت (ب) شکل جریان فاز استاتور دیده می شود و در قسمت های (ج) و (د) نمودارهای سرعت ژنراتور و مرجع آن دیده می شود که یک حالت گذرای کم استرس، سرعت ژنراتور را به مقدار نهایی آن می رساند.



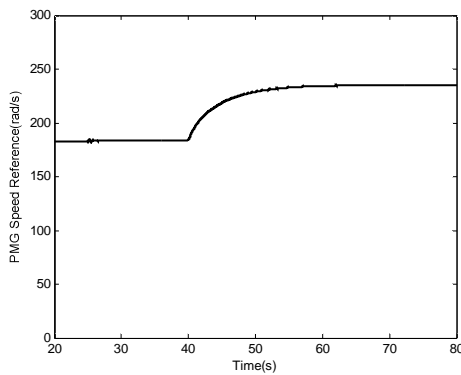
(ب)



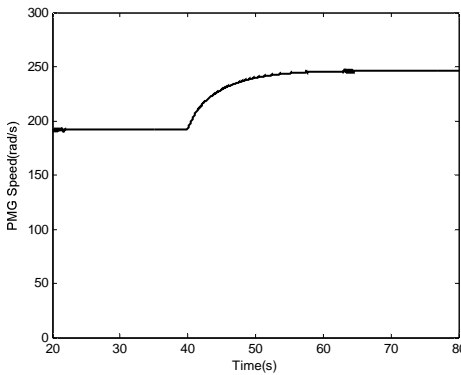
(د)

شکل 7 - نتایج شبیه‌سازی در گشتاور و بار ثابت

الف) ولتاژ لینک DC، ب) جریان استاتور، ج) سرعت مرجع، د) سرعت ژنراتور



(ج)

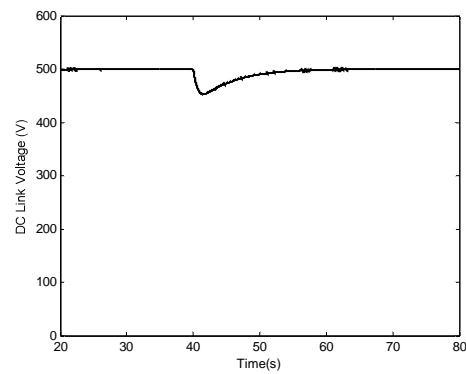


(د)

برای مشاهده‌ی اثر تغییر گشتاور اعمالی به ژنراتور که به نوعی تغییرات در رخداد باد به شمار می‌رود یک کاهش پله ای در زمان  $t = 4 \cdot s$  و به میزان 20 درصد اعمال شده است تا تغییر در مقادیر سیستم و توانایی بهبود و تطبیق آن بررسی شود. در شکل (8) نمودارهای اثر تغییر گشتاور آورده شده است. در قسمت الف) تغییرات ولتاژ لینک DC آمده است که میزان افت ولتاژ 43/3V و زمان جبران 10/15S می‌باشد. در قسمت ب) جریان استاتور و در قسمت‌های ج) و د) سرعت ژنراتور و مرجع آن آورده شده است. این کنترل کننده پاسخ نسبتاً کندی دارد ولی از افت زیاد در ولتاژ لینک DC جلوگیری می‌کند. در شکل (9) اثر تغییر پله‌ای بار بررسی شده است. این تغییر به میزان 50 درصد افزایش بار در نظر گرفته شده است که سبب افت ولتاژ در لینک DC خواهد شد.

شکل 8 - نتایج شبیه‌سازی با کاهش 20 درصدی در گشتاور اعمالی به ژنراتور  
الف) ولتاژ لینک DC، ب) جریان استاتور، ج) سرعت مرجع، د) سرعت ژنراتور

در قسمت الف) شکل (9) نمودار ولتاژ لینک DC آمده است که افتی به میزان 126/6V و زمان جبران 16/27s را داراست. در قسمت ب) جریان استاتور دیده می‌شود که با توجه به افزایش بار و در جهت تامین آن، افزایش یافته است. همچنین در قسمت‌های ج) و د) که سرعت مرجع و سرعت ژنراتور می‌باشند، با توجه به افزایش بار و ثابت بودن گشتاور اعمالی به ژنراتور، افزایش سرعت رخ می‌دهد.



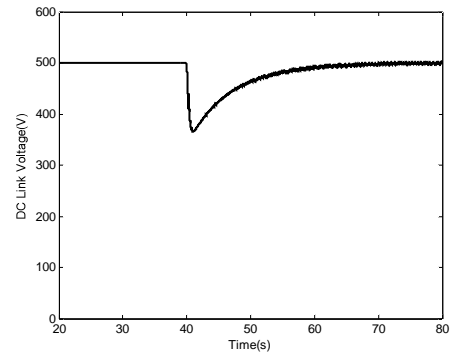
الف)

## 5- نتیجه گیری

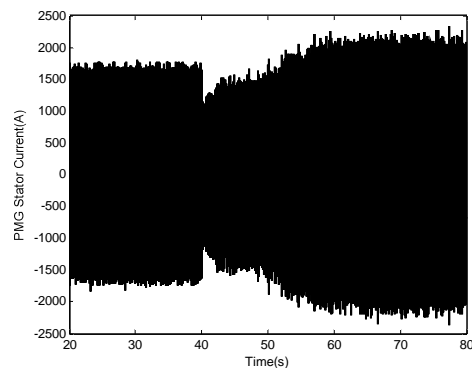
در این مقاله نشان داده شد که در یک سیستم انرژی باد مبتنی بر استفاده از ژنراتور مغناطیس دائم و مبدل‌های قدرت، می‌توان ولتاژ لینک DC را از طریق کنترل مبدل قدرت سمت ژنراتور کنترل کرد. به منظور برآورد میزان موثر بودن روش کنترلی، اغتشاشاتی به سیستم شبیه‌سازی شده اعمال شد تا سرعت تطبیق و بهبود سیستم در شرایط جدید بررسی شود. مشاهدات نشان داد که اعمال این تغییرات سبب افت در ولتاژ لینک DC می‌شود که با حضور کنترلر و تغییر در سرعت و جریان ژنراتور و عملکرد آن در یک نقطه کار جدید، این افت ولتاژ جبران می‌گردد. در شرایطی هم که کنترلر میزان افت ولتاژ را کاهش می‌دهد، سرعت جبران ولتاژ لینک DC کاهش می‌یابد. تاخیر موجود در جبران ولتاژ لینک DC از جهاتی به اینرسی کل سیستم باز می‌گردد. این مشکل نیز با بالاتر بردن ظرفیت خازنی لینک DC و ولتاژ آن تا حدودی قابل جبران است.

## مراجع

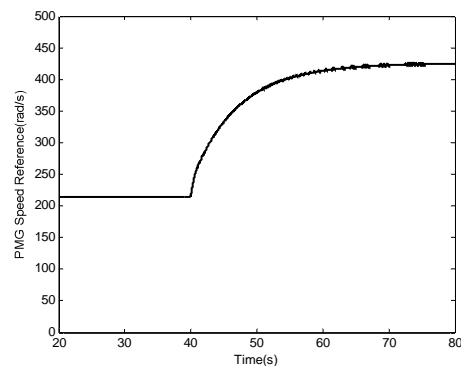
- [1] Maria Oana Mora, "Sensorless vector control of PMSG for wind turbine applications", Master thesis, Institute of energy technology Aalborg University, June 2009
- [2] Chen Jianyi, "Performance enhancement of AC machines and permanent magnet generators for sustainable energy applications", PHD thesis, Curtin University of technology, School of electrical and computer engineering, 1999
- [3] X. Yuan, F. Wang, D. Boroyevich, Y. Li and R. Burgos, "DC-link voltage control of a full power converter for wind generator operating in weak-grid systems", IEEE transactions on power electronics, vol. 24, no. 9, september 2009, p2178-2192
- [4] z. Lubosny, "Wind Turbine operation in electric power systems", Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003, ch. 1.
- [5] Zhuxian Xu, "Unified control for the permanent magnet generator and rectifier system", Master thesis, Blacksburg-Virginia Polytechnic Institute and State University, May 2010
- [6] R. Bharanikumar, A. C. Yazhini, and A. Nirmal Kumar, "Novel Maximum power point tracking controller for wind turbine driven permanent magnet generator", IEEE - January 2009-p;1-6



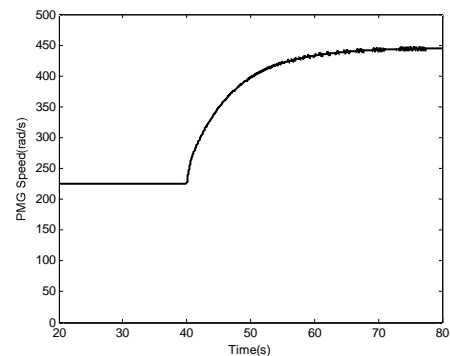
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل 9 - نتایج شبیه‌سازی با افزایش 50 درصدی در بار  
(الف) ولتاژ لینک DC، (ب) جریان استاتور، (ج) سرعت مرجع، (د) سرعت ژنراتور