

## مقایسه روش‌های کنترل مبدل سمت ماشین در توربین-ژنراتور بادی مبدل کامل با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

محسن رحیمی<sup>۱</sup>، استادیار؛ علی حقی<sup>۲</sup>، کارشناسی ارشد؛ محمد بلالی<sup>۳</sup>، کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان- ایران - mrahimi@kashanu.ac.ir  
 ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان- ایران - a.haghi@grad.kashanu.ac.ir  
 ۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان- ایران - belalimohammad@gmail.com

**چکیده:** محور توربین-ژنراتورهای بادی نسبتاً نرم بوده و سیستم مکانیکی عموماً به صورت دو جرمه مدل می‌شود. مدل دو جرمه دارای مدهای پیچشی نوسانی است که در هنگام تغییرات سرعت باد و وقوع خطا در شبکه این مدها در پاسخ‌های خروجی ژنراتور ظاهر می‌شود. توربین-ژنراتورهای بادی سنکرون مغناطیس دائم دارای مبدل‌های سمت ماشین و سمت شبکه است که به وسیله مبدل سمت ماشین می‌توان سرعت/توان ژنراتور را در مقدار مطلوب جهت کارکرد در مد توان بهینه کنترل نمود. در حقیقت کنترل اصلی توربین برعهده مبدل سمت ماشین است. همچنین به وسیله مبدل سمت شبکه ولتاژ لینک dc در مقدار مرجع ثابت نگه داشته می‌شود. هدف این مقاله، تبیین استراتژی‌های مختلف کنترلی مبدل سمت ماشین در توربین-ژنراتور بادی سنکرون مغناطیس دائم است. استراتژی‌های مختلف کنترلی شامل کنترل توربین-ژنراتور در مد کنترل سرعت، مد کنترل توان و یا مد نرخ سرعت نوک بهینه می‌باشد. سپس عملکرد روش‌های کنترلی شرح داده شده، درازای تغییرات سرعت باد، نوسانات توان ناشی از سایه برج و افتادگی ولتاژ شبکه آزموده و مقایسه می‌شود. در ادامه با بهبود عملکرد کنترل کننده مبدل سمت ماشین، پاسخ توربین بادی بهبود داده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** توربین-ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، نوسانات گشتاور پیچشی شفت، کنترل مبدل سمت ماشین، کنترل سرعت، سایه برج.

### Comparison of Machine side Converter Control Methods in PMSG based Wind Turbines

M. Rahimi<sup>1</sup>, Assistant Professor; A. Haghi<sup>2</sup>, MSc; M. Belali<sup>3</sup>, MSc

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: mrahimi@kashanu.ac.ir  
 2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: a.haghi@grad.kashanu.ac.ir  
 3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: belalimohammad@gmail.com

**Abstract:** Wind turbine-generators shaft is relatively soft and wind turbine mechanical systems is usually represented as two mass model. Two mass model contains torsional oscillatory modes that may be excited under wind speed variations and grid fault conditions. In this state, torsional oscillations may appear on the output responses of the wind turbine-generator. PMSG based WTs include two converters: machine side converter (MSC) and grid side converter (GSC). The main function of the GSC is the dc-link voltage regulation. Also, the MSC is used to control the generator speed or active power, and thus the control of the generator is mainly carried out by the MSC. There are different strategies for the control of MSC. The purpose of this paper is to study different control strategies of the MSC in the PMSG based WTs. These control strategies include turbine-generator control in speed control mode, power control mode or optimum tip speed ratio mode. Then, performance of the WT by using the mentioned control strategies against wind speed changes, aerodynamic power fluctuations due to tower shadow effect and grid voltage dip is examined and compared. Next, by modifying the MSC control, the wind turbine response is improved.

**Keywords:** Permanent magnet synchronous turbine-generator, shaft torsional torque oscillations, machine side converter control, speed control, tower shadow.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۳ و ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

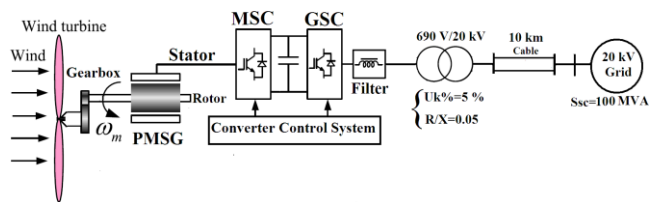
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۶

نام نویسنده مسئول: محسن رحیمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کاشان - ۶ کیلومتر بلوار قطب راوندی - دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از توربین‌های بادی سرعت متغیر بسیار مورد استقبال قرار گرفته‌است. دو نوع توربین بادی سرعت متغیر بسیار پرکاربرد شامل توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه با مبدل کسری و توربین‌های بادی با مبدل کامل<sup>۱</sup> است. توربین-ژنراتور بادی سرعت متغیر با مبدل کامل به دلیل تأثیرپذیری کمتر از خطاهای شبکه یک انتخاب مناسب برای کاربرد در توربین ژنراتورهای مگاواتی است [۱]. در بین انواع توربین-ژنراتورهای سرعت متغیر مبدل کامل، توربین ژنراتور مبتنی بر ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم<sup>۲</sup> به دلیل قابلیت اطمینان بالاتر و تعمیرات-نگهداری کمتر پرکاربردتر از انواع دیگر می‌باشد [۶-۲]. در این توربین-ژنراتور، می‌توان با بالا بردن تعداد قطب، عملاً جعبه‌دنده را حذف نمود و یا از جعبه‌دنده کوچک‌تر استفاده کرد. به همین دلیل استفاده از این نوع توربین-ژنراتور قابلیت اطمینان<sup>۳</sup> سیستم را بالا می‌برد [۸-۷]. شمای کلی این توربین در شکل ۱ نشان داده شده‌است. در توربین-ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم دو مبدل واسط بین شبکه و ژنراتور وجود دارد که یکی از آن‌ها مبدل سمت شبکه<sup>۴</sup> و دیگری مبدل سمت ماشین<sup>۵</sup> می‌باشد [۹].



شکل ۱: طرح کلی توربین بادی سنکرون مغناطیس دائم

در مقالاتی که به کنترل توربین‌های بادی مبدل کامل با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم پرداخته‌اند، اساساً دو ساختار کنترلی به شرح زیر برای کنترل مبدل‌های سمت ماشین و شبکه وجود دارد:

- ۱- ساختار کنترلی اول که در بیشتر مقالات هم مورد استفاده قرار گرفته‌است و در آن مبدل سمت ماشین برای کنترل توان/سرعت ژنراتور به کار می‌رود و مبدل سمت ماشین وظیفه کنترل و تثبیت ولتاژ لینک dc را به عهده دارد [۱۰-۱۳].
- ۲- ساختار کنترلی دوم که در آن مبدل سمت ماشین برای کنترل و تثبیت ولتاژ لینک dc به کار می‌رود و مبدل سمت شبکه، توان تزریقی به شبکه را کنترل می‌کند [۱۸-۱۴].

در این مقاله برای کنترل توربین-ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم از ساختار کنترلی اول استفاده می‌شود. از حیث این‌که مبدل سمت ماشین در مد کنترل توان یا کنترل سرعت کار کند، ساختار کنترلی اول نیز به چند طریق قابل پیاده‌سازی است و با استراتژی‌های مختلفی می‌توان مبدل سمت ماشین را در مد کنترل سرعت یا توان کنترل نمود. در یک سیستم قدرت سنتی دارای ژنراتورهای سنکرون معمول، مسأله اساسی در مطالعات دینامیکی سیستم قدرت، مسأله نوسان‌های الکترومکانیکی زاویه‌ای روتور می‌باشد که با استفاده از پایدارساز سیستم قدرت یا به کارگیری ادوات FACTS می‌توان میرایی این

نوسان‌ها را افزایش داد [۱۹]. با اضافه شدن توربین‌های بادی به شبکه قدرت، مسأله میرایی نوسان‌های پیچشی که مربوط به سیستم رانشگر توربین‌های بادی است، نیز به مطالعات دینامیکی سیستم قدرت اضافه شده‌است [۲۰].

در این مقاله پنج استراتژی کنترل مبدل سمت ماشین که براساس سرعت، توان و نرخ سرعت بهینه نوک پره<sup>۶</sup> ( $\lambda_{opt}$ ) است مطرح شده و در نهایت بهترین استراتژی کنترل براساس کمترین نوسانات پیچشی شفت<sup>۷</sup> که منجر به تنش و استرس کمتر بر سیستم مکانیکی خواهد شد، انتخاب می‌شود.

۲- مدل‌سازی و کنترل ماشین سنکرون مغناطیس دائم

در این بخش به مدل‌سازی ماشین سنکرون مغناطیس دائم در دستگاه مرجع سنکرون<sup>۸</sup> منطبق بر روتور با فرضیات زیر پرداخته می‌شود:

۱. جهت قراردادی جریان‌های استاتور به طرف داخل سیم‌پیچ‌ها فرض می‌شود (جهت موتوری).

۲. معادلات در حوزه پریونیت نوشته می‌شود.

معادلات ولتاژ، شار و گشتاور حاکم بر ماشین سنکرون مغناطیس دائم در دستگاه مرجع سنکرون با محورهای  $d$  و  $q$  به صورت روابط به ترتیب (۱)، (۲) و (۳) است [۲۱].

$$V_{s,dq} = R_s i_{s,dq} + j\omega_r \Psi_{s,dq} + \frac{d\Psi_{s,dq}}{\omega_b dt} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{sd} &= L_d i_{sd} + \Psi_{PM} \\ \Psi_{sq} &= L_q i_{sq} \end{aligned} \quad (2)$$

$$T_e = [\Psi_{PM} i_{sq} + (L_q - L_d) i_{sd} i_{sq}] \quad (3)$$

که  $V_s$ ,  $\Psi_s$ ,  $i_s$ ,  $T_e$  و  $\omega_r$  به ترتیب ولتاژ، شار، جریان استاتور، گشتاور الکترومکانیکی و سرعت الکتریکی چرخش روتور برحسب پریونیت است. همچنین  $L_d$  و  $L_q$  اندوکتانس‌های محورهای  $d$  و  $q$  استاتور می‌باشد. در ماشین سنکرون قطب صاف  $L_d = L_q$  و رابطه گشتاور به صورت  $T_e = \Psi_{PM} i_{sq}$  می‌باشد و لذا به وسیله  $i_{sq}$  می‌توان سرعت ماشین را کنترل نمود.

با استفاده از رابطه (۱) معادلات دینامیکی جریان‌های محورهای  $d$  و  $q$  استاتور به صورت رابطه (۴) است:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} - L_q \omega_r i_{sq} + \frac{L_d di_{sd}}{\omega_b dt} \quad (4)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_r \Psi_{PM} + L_d \omega_r i_{sd} + \frac{L_d di_{sq}}{\omega_b dt}$$

با استفاده از رابطه (۴) حلقه‌های کنترل مؤلفه‌های  $d$  و  $q$  جریان استاتور به صورت شکل ۲ و شکل ۳ به دست می‌آید.

ژنراتور می‌باشد. با فرض اینکه دینامیک حلقه داخلی کنترل جریان به اندازه کافی سریع تر از حلقه خارجی کنترل سرعت باشد، می‌توان از دینامیک حلقه کنترل جریان صرف نظر کرد. در این صورت تابع تبدیل حلقه بسته  $\frac{\omega_r}{\omega_r^*}$  به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید:

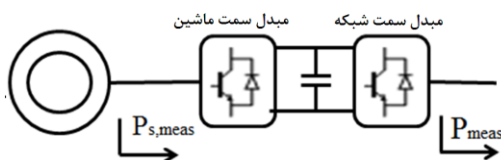
$$\frac{\omega_r}{\omega_r^*} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{(k_{p\omega}s + k_{i\omega})(\Psi_{PM}/2H_g)}{s^2 + (k_{p\omega}\Psi_{PM}/2H_g)s + (k_{i\omega}\Psi_{PM}/2H_g)} \quad (6)$$

که در آن  $\omega_n^2 = \frac{k_{i\omega}\Psi_{PM}}{2H_g}$  و  $2\zeta\omega_n = \frac{k_{p\omega}\Psi_{PM}}{2H_g}$  است. برای سیستم تحت مطالعه (با پارامترهای ذکر شده در پیوست) با انتخاب  $\zeta = 0.7$  و  $\omega_n^* = 2\pi \text{ rad/sec}$ ،  $k_{p\omega} = 6.2$  و  $k_{i\omega} = 28.83$  خواهند بود.

در شکل ۴ سرعت مرجع ژنراتور است. در توربین-ژنراتورهای مختلف برای کنترل سرعت نیاز به سرعت مرجع  $(\omega_r^*)$  است. می‌توان گفت برای به دست آوردن سرعت مرجع دو روش کلی وجود دارد: (الف)- کنترل سرعت جهت حصول نرخ سرعت نوک بهینه  $(\lambda_{opt})$  برای هر توربین باتوجه به ویژگی‌های آیرودینامیکی پره، یک نرخ سرعت نوک بهینه وجود دارد که به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود [۲۲]:

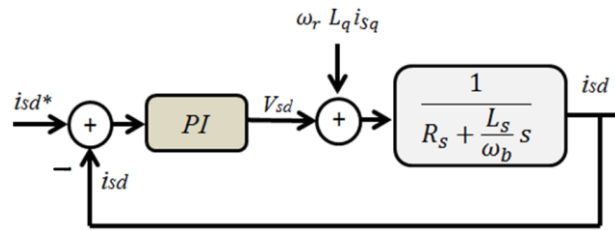
$$\lambda_{opt} = \frac{R\omega_{t,opt}}{v_w} \quad (7)$$

برای هر سرعت باد مشخص یک سرعت بهینه  $\omega_{t,opt}$  وجود دارد که اگر توربین در این سرعت بچرخد، نرخ سرعت نوک بهینه شده و در نتیجه توربین در مد توان بهینه<sup>۱</sup> (MPPT) کار می‌کند. (ب)- استخراج سرعت مرجع از طریق منحنی سرعت-توان منحنی سرعت-توان درحقیقت یک جدول جستجو از پیش برنامه‌ریزی شده توسط کارخانه سازنده است که ورودی آن توان توربین و خروجی آن سرعت مرجع ژنراتور است. همان‌طور که از بلوک دیاگرام شکل ۵ و ۷ مشخص است برای به دست آوردن سرعت مرجع از منحنی سرعت-توان<sup>۱</sup> می‌توان از دو سیگنال توان استفاده کرد.

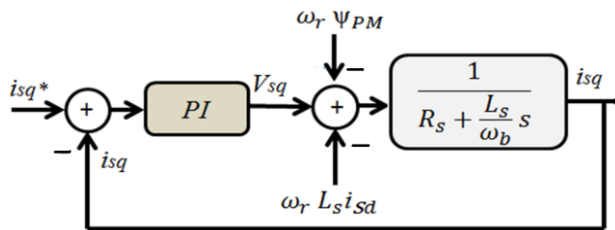


شکل ۵: توان خروجی از ژنراتور و مبدل سمت شبکه

$P_{meas}$  در واقع توانی است که از مبدل سمت شبکه به شبکه تزریق می‌شود و  $P_{s,meas}$  که از استاتور ژنراتور به مبدل سمت ماشین هدایت می‌شود؛ بنابراین درحالت کلی می‌توان گفت که سه استراتژی مختلف برای استخراج  $\omega_r^*$  و کنترل سرعت ژنراتور وجود دارد: ۱) کنترل سرعت براساس نرخ سرعت نوک بهینه  $(\lambda_{opt})$



شکل ۲: حلقه کنترل جریان محور d استاتور



شکل ۳: حلقه کنترل جریان محور q استاتور

از آنجاکه در ماشین سنکرون قطب صاف  $L_d = L_q$ ، گشتاور و توان تنها وابسته به  $i_{sq}$  است و لذا جهت حصول بیشترین گشتاور بر جریان  $i_{sd}^*$  در شکل ۲ برابر صفر قرار می‌گیرد. همچنین  $i_{sq}^*$  برحسب اینکه ژنراتور در مد کنترل توان یا سرعت کار کند، از حلقه‌های خارجی کنترل توان یا سرعت به دست می‌آید.

### ۳- کنترل مبدل سمت ماشین

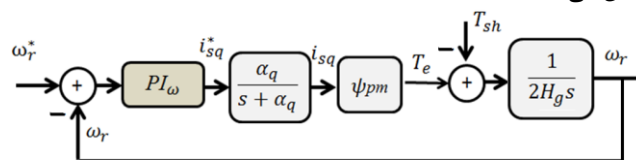
با صرف نظر از مقاومت استاتور، توان خروجی استاتور در یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم قطب صاف به صورت رابطه (۵) می‌باشد:

$$P_s \cong -\Psi_{PM} i_{sq} \omega_r \quad (5)$$

باتوجه به رابطه (۵)، با استفاده از مبدل سمت ماشین و به وسیله  $i_{sq}$  می‌توان توان ماشین را کنترل نمود. برحسب اینکه مبدل سمت ماشین سرعت یا توان را کنترل کند، ژنراتور دارای دو مد کنترل سرعت یا توان است.

### ۳+ مد کنترل سرعت

در این مد، مبدل سمت ماشین سرعت ژنراتور را کنترل و آن را در مقدار مرجع تنظیم می‌کند. شکل ۴ حلقه کنترل سرعت ژنراتور را نشان می‌دهد.



شکل ۴: حلقه خارجی کنترل سرعت

در شکل ۴ تابع تبدیل  $\frac{\alpha_q}{s + \alpha_q}$  مدل کننده حلقه داخلی کنترل جریان محور q با پهنای باند  $\alpha_q$  و  $PI_\omega(s) = k_{p\omega} + \frac{k_{i\omega}}{s}$ ، کنترل کننده سرعت است و همچنین  $T_{sh}$  گشتاور شفت ژنراتور و  $H_g$  ثابت اینرسی

با توجه به نتایج ذکر شده پنج روش برای کنترل توان/سرعت با استفاده از مبدل سمت ماشین وجود دارد:

۱. کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان و با استفاده از

$$P_{meas}$$

۲. کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان و با استفاده از

$$P_{s,meas}$$

۳. کنترل سرعت برای دستیابی به نرخ سرعت نوک بهینه

$$(\lambda_{opt})$$

۴. کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از

$$P_{meas}$$

۵. کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از

$$P_{s,meas}$$

در بخش (۶) عملکرد توربین-ژنراتور PMSG با اعمال هریک از روش‌های فوق بررسی و مقایسه خواهد شد.

در این مقاله به‌ازای همه روش‌های کنترلی شرح داده شده در بالا، توربین در مد MPPT کار می‌کند. بطور کلی با توجه به توضیحات فوق، به سه طریق توربین در مد MPPT یا توان بهینه کار می‌کند.

### ۳ ۴ ۱- کارکرد براساس نرخ سرعت نوک بهینه در مد کنترل سرعت

در این حالت، به‌ازای هر سرعت بادی، سرعت مرجع ژنراتور به‌گونه‌ای استخراج گردد که  $\lambda$  برابر با  $\lambda_{opt}$  گردد. برای توربین تحت مطالعه  $\lambda_{opt}$  برابر  $\lambda/3$  بوده و سرعت مرجع ژنراتور در مد کنترل سرعت

$$\text{به صورت } \omega_{r-ref} = \frac{\omega_{r-opt}}{n_{gear}} = \frac{1}{n_{gear}} \frac{\lambda_{opt} V_w}{R} \text{ به دست می‌آید.}$$

### ۳ ۴ ۲- کارکرد براساس منحنی توان-سرعت در مد کنترل توان

در این حالت یک جدول جستجو موجود است که نقاط منحنی توان-سرعت در آن وارد شده‌است، ورودی این جدول جستجو، سرعت اندازه‌گیری شده ژنراتور و خروجی آن توان مرجع می‌باشد. با توجه به این که در مد MPPT توان استاتور یا توان خروجی توربین با تقریب بسیار خوب با توان ۳ سرعت ژنراتور ارتباط دارد، یعنی  $P_{MPPT} \approx k_{opt} \omega_r^3$ ، بنابراین در مقاله حاضر توان مرجع برای حلقه کنترل توان به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که متناسب با مکعب سرعت ژنراتور باشد. برای سیستم تحت مطالعه ارتباط بین توان بهینه (برحسب پیونیت) با سرعت ژنراتور (برحسب پیونیت) در منحنی توان سرعت به صورت  $P_{MPPT} \approx \omega_r^3$  در نظر گرفته شده‌است.

### ۳ ۴ ۳- کارکرد براساس منحنی سرعت-توان در مد کنترل سرعت

در این حالت یک جدول جستجو موجود است که نقاط منحنی سرعت-توان در آن وارد شده‌است، ورودی به این جدول جستجو، توان اندازه‌گیری شده ژنراتور و خروجی آن سرعت مرجع ژنراتور می‌باشد. با توجه به اینکه در مد MPPT توان استاتور یا توان خروجی توربین با تقریب بسیار خوب با توان ۳ سرعت ارتباط دارد، بنابراین در مقاله

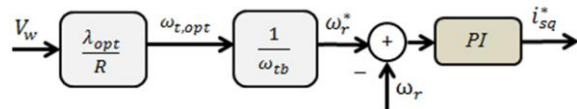
۲. کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان و با استفاده از

$$P_{meas}$$

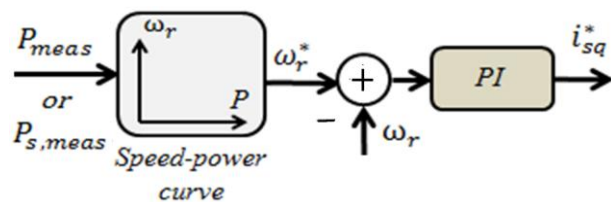
۳. کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان و با استفاده از

$$P_{s,meas}$$

شکل ۶ چگونگی استخراج  $\omega_r^*$  براساس نرخ سرعت نوک بهینه را نشان می‌دهد. در این شکل،  $\omega_{tb}$  سرعت مبنای توربین است. شکل ۷ استخراج  $\omega_r^*$  براساس منحنی سرعت-توان و با استفاده از  $P_{meas}$  یا  $P_{s,meas}$  را نشان می‌دهد.



شکل ۶: حلقه خارجی کنترل سرعت با  $\lambda_{opt}$

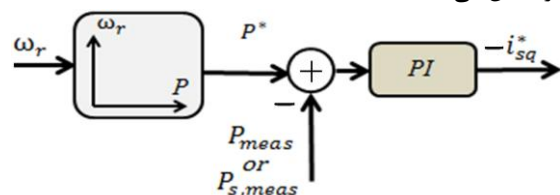


شکل ۷: حلقه خارجی کنترل سرعت با منحنی سرعت-توان

در این مطالعه فرض می‌شود که توربین در همه سرعت‌ها در مد توان بهینه کار می‌کند؛ بنابراین منحنی سرعت-توان و ارتباط بین سرعت مرجع و توان اندازه‌گیری شده به صورت  $\omega_r^* = (\frac{P}{k_{opt}})^{\frac{1}{3}}$  در نظر گرفته می‌شود.

### ۳ ۴ ۴- مد کنترل توان

در این مد، مبدل سمت ماشین توان استاتور یا توان تزریقی به شبکه را کنترل و در مقدار مرجع تنظیم می‌کند. شکل ۸ حلقه خارجی کنترل توان را نشان می‌دهد.



شکل ۸: حلقه خارجی کنترل توان با منحنی توان-سرعت

در شکل ۸ توان مرجع ( $P^*$ ) با استفاده از سرعت ژنراتور و براساس منحنی توان-سرعت<sup>۱۱</sup> استخراج می‌شود. منحنی توان-سرعت یک جدول جستجو از پیش برنامه‌ریزی شده است که ورودی آن سرعت اندازه‌گیری شده ژنراتور و خروجی آن توان مرجع ژنراتور است. با توجه به شکل ۸ برای کنترل توان با استفاده از مبدل سمت ماشین به دو طریق می‌توان عمل کرد:

۱. کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از

$$P_{meas}$$

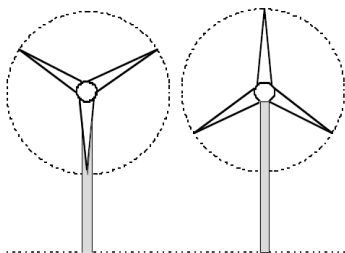
۲. کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از

$$P_{s,meas}$$

هرچقدر ثابت فنری شفت بزرگ‌تر باشد، فرکانس قطب و صفر نوسانی بزرگ‌تر شده و تأثیر جمله دوم بر پایداری و عملکرد سیستم مکانیکی کمتر می‌شود.  $\omega_{01}$  در رابطه (۱۵) در واقع فرکانس پیچشی سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور است. برای سیستم توربین-ژنراتور PMSG تحت‌مطالعه با  $H_g = 4 \text{ sec}$ ،  $H_t = 0.6 \text{ sec}$ ،  $D_{ig} = 1.2 \text{ pu}$  و  $k_{s-eq} = 0.6 \text{ pu / elec. rad}$  صفر ناشی از جمله کشسانی عبارت‌اند از:  $f_{01} = 2.14 \text{ Hz}$ ،  $f_{02} = 0.77 \text{ Hz}$  و  $\omega_{01} = 13.2 \text{ rad / sec}$  (که نسبتاً کوچک است). به‌عبارت‌دیگر فرکانس پیچشی شفت برای سیستم تحت‌مطالعه حدود ۲ هرتز است. در مواقع دینامیک و گذرا مثل وقوع خطا در شبکه یا تغییرات سرعت باد و ... مدهای نوسانی پیچشی سیستم مکانیکی ممکن است تحریک گردد و در چنین مواقعی اگر سیستم کنترل نتواند میرایی مناسب را برای این مدها فراهم کند، این نوسانات پیچشی در پاسخ گشتاور پیچشی، سرعت و توان ژنراتور می‌تواند ظاهر شود که باعث بروز استرس و تنش مکانیکی بر روی شفت می‌گردد [۲۴]. در ادامه پاسخ سیستم تحت‌مطالعه از حیث وقوع نوسانات پیچشی درازای تغییرات سرعت باد و با در نظر گرفتن استراتژی‌های کنترلی ذکر شده در بخش ۳ بررسی خواهد شد.

#### ۵- رفتار دینامیکی توربین با در نظر گرفتن نوسانات گشتاور ناشی از سایه برج<sup>۱۲</sup>

یکی از عواملی که باعث ایجاد مشکلات کیفیت توان می‌شود، اثر سایه برج است. توربین‌های بادی با محور افقی دارای پایه یا برج می‌باشند. این برج باعث اغتشاش در جریان باد، به‌هنگام عبور پره از مقابل آن می‌شود. در هر زمان که یکی از پره‌های توربین از مقابل برج عبور می‌کند، پدیده‌ای به نام سایه برج بروز می‌کند. پدیده سایه برج باعث ایجاد تغییرات در توان مکانیکی توربین می‌شود [۲۵، ۲۶]. شکل ۹ مکان روتور را در دو موقعیت متفاوت نشان می‌دهد.



شکل ۹: روتور توربین بادی در دو موقعیت متفاوت

اگر توربین دارای سه پره باشد، تغییرات توان با فرکانس سه برابر سرعت چرخش توربین ظاهر می‌شود. در شکل ۹ توربین در موقعیت سمت راست دارای اثر سایه برج نیست. در این موقعیت توان توربین بیشترین مقدار است. نوسانات توان روی شفت می‌تواند باعث ایجاد نوسان توان خروجی ژنراتور شود. توان مکانیکی منتقل شده به شفت توربین بادی به‌واسطه پدیده سایه برج و تغییرات و آشفتگی‌های سرعت باد ثابت نبوده بلکه دارای یک مؤلفه میانگین و یک مؤلفه

حاضر سرعت مرجع برای حلقه کنترل سرعت به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که  $\omega_{r-ref} = (P/k_{opt})^{(1/3)}$  برای سیستم تحت‌مطالعه ارتباط بین سرعت مرجع (بر حسب پرینیت) با توان (بر حسب پرینیت) در منحنی سرعت-توان به صورت  $\omega_{r-ref} = (P)^{1/3}$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴- دینامیک شفت و قسمت‌های مکانیکی توربین-ژنراتور

اگر شفت واسط توربین-ژنراتور به‌اندازه کافی صلب نباشد و خاصیت کشسانی داشته‌باشد، از مدل چندجرمه برای مدل‌سازی سیستم رانشر توربین و شفت توربین-ژنراتور استفاده می‌شود. مدل دوجرمه سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور بادی به شرح زیر است [۲۳].

$$2H_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_e + T_{sh} \quad (8)$$

$$\frac{d\theta_{sh}}{dt} = \omega_b \cdot (\omega_t - \omega_g) \quad (9)$$

$$2H_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_m - T_{sh} \quad (10)$$

که  $T_{sh}$  گشتاور پیچشی شفت بوده و عبارت است از:

$$T_{sh} = k_{s-eq} \cdot \theta_{sh} + D_{ig} \cdot (\omega_t - \omega_g) \quad (11)$$

در رابطه فوق  $H_g$  و  $H_t$  ثابت‌های اینرسی توربین و ژنراتور،  $T_e$  و  $T_m$  گشتاورهای پیچشی شفت و توربین،  $\theta_{sh}$  زاویه پیچشی شفت توربین-ژنراتور،  $k_{s-eq}$  ثابت فنری معادل شفت توربین-ژنراتور و  $D_{ig}$  ثابت میرایی معادل توربین-ژنراتور است. تابع تبدیل حلقه باز از سرعت ژنراتور به گشتاور الکترومکانیکی عبارت است از:

$$\frac{\omega_g}{T_e} = \frac{1}{2(H_g + H_t)s} \frac{2H_g H_t}{H_g + H_t} \frac{2H_g s^2 + D_{ig}s + k_{s-eq}\omega_b}{s^2 + D_{ig}s + k_{s-eq}\omega_b} \quad (12)$$

همچنین توابع تبدیل حلقه باز از سرعت توربین و گشتاور پیچشی به گشتاور الکترومکانیکی عبارت است از:

$$\frac{\omega_t}{T_e} = \frac{1}{2(H_g + H_t)s} \frac{D_{ig}s + k_{s-eq}\omega_b}{H_g + H_t} \frac{2H_g H_t}{s^2 + D_{ig}s + k_{s-eq}\omega_b} \quad (13)$$

$$\frac{T_{sh}}{T_e} = \frac{H_t}{(H_g + H_t)s} \frac{D_{ig}s + k_{s-eq}\omega_b}{H_g + H_t} \frac{2H_g H_t}{s^2 + D_{ig}s + k_{s-eq}\omega_b} \quad (14)$$

تابع انتقال حلقه باز در رابطه (۱۴) حاصل ضرب دو جمله است. جمله اول تابع انتقال حلقه باز سیستم مکانیکی تک‌جرمه می‌باشد و جمله دوم اثر صلب‌نبودن شفت را نمایش می‌دهد. فرکانس قطب  $\omega_{01}$  و صفر  $\omega_{02}$  نوسانی ناشی از جمله دوم عبارت است از:

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{k_{s-eq}\omega_b(H_g + H_t)}{2H_g H_t}} \quad (15)$$

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{k_{s-eq}\omega_b}{2H_t}}$$

۱۰ به ۱۳ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ عملکرد دینامیکی توربین در مد نرخ سرعت نوک بهینه در پاسخ به تغییرات سرعت باد بسیار نامطلوب می‌باشد. به علاوه همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مد کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان، هنگام تغییر سرعت باد نوساناتی با فرکانس ۲ Hz در پاسخ گشتاور پیچشی شفت ظاهر می‌شود که این نوسانات مربوط به مدهای پیچشی سیستم مکانیکی است و به نوسانات پیچشی معروف است. با توجه به شکل ۱۰، در مد کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان، پاسخ‌های خروجی مانند توان، گشتاور الکتریکی، سرعت و حتی ولتاژ لینک dc به‌ازای دو روش کنترلی (کنترل به‌وسیله توان خروجی استاتور  $P_{s, meas}$  یا کنترل به‌وسیله توان تزریقی به شبکه  $P_{meas}$ ) دینامیک یکسانی دارند. در صورتی که با توجه به شکل ۱۰-ج، در روش کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان با استفاده از  $P_{s, meas}$  نوسانات پیچشی شفت نسبت به دو روش دیگر کمتر بوده و این باعث بالارفتن عمر شفت می‌شود.

#### ۴-۶ مطالعات شبیه‌سازی براساس کنترل توان

این بخش به مطالعه پاسخ سیستم تحت مطالعه درازای تغییرات سرعت باد از ۱۰ m/s به ۱۳ m/s زمانی که توربین در مد کنترل توان کنترل می‌شود، می‌پردازد. شکل ۱۱ پاسخ سیستم را در دو حالت نشان می‌دهد. در حالت اول توربین در مد کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از توان خروجی تزریقی به شبکه  $P_{meas}$  کنترل می‌شود. همچنین در حالت دوم توربین در مد کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از توان خروجی استاتور  $P_{s, meas}$  کنترل می‌شود. همان‌طور که شکل ۱۱ نشان می‌دهد، پاسخ‌های دینامیکی هر دو روش از حیث دامنه و میرایی نوسانات پیچشی (که بر روی گشتاور شفت ظاهر می‌شود) تقریباً یکسان است.

#### ۴-۶ شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه در اثر پدیده سایه برج

در این بخش سیستم تحت مطالعه تحت نوسانات توان ناشی از سایه برج آزموده می‌شود. فرض می‌شود که دامنه نوسانات توان ناشی از سایه برج برابر با ۲۰ درصد مقدار متوسط باشد. پدیده سایه برج باعث ایجاد تغییرات در توان مکانیکی توربین می‌شود. در این بخش شبیه‌سازی با در نظر گرفتن سایه برج، در سرعت باد ۱۲ m/s و در دو مد کنترل سرعت و کنترل توان انجام می‌گیرد. در ابتدا در مد کنترل سرعت از سه استراتژی زیر استفاده خواهد شد:

۱. کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان و با استفاده از  $P_{meas}$
۲. کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان و با استفاده از  $P_{s, meas}$
۳. کنترل سرعت براساس نرخ سرعت نوک بهینه

نوسانی است. می‌توان رابطه گشتاور مکانیکی توربین در حضور سایه برج را چنین نوشت:

$$T_m = T_{m-ave} + \tilde{T}_m(t) \quad (۱۶)$$

که  $T_{m-ave}$  مقدار میانگین گشتاور مکانیکی توربین بوده و وابسته به سرعت توربین و سرعت باد است.  $\tilde{T}_m$  مؤلفه نوسانی گشتاور مکانیکی توربین ناشی از سایه برج می‌باشد که فرکانس آن وابسته به سرعت ژنراتور، تعداد قطب‌ها، نسبت تبدیل جعبه‌دنده و تعداد پره‌های توربین است. با فرض تغییرات سینوسی برای  $\tilde{T}_m(t)$  خواهیم داشت:

$$\tilde{T}_m(t) = D_{Tm} \sin(\omega_s t + \phi) \quad (۱۷)$$

که  $D_{Tm}$  دامنه نوسانات گشتاور مکانیکی توربین بوده و فرض می‌شود که اندازه آن متناسب با  $T_{m-ave}$  باشد. برای توربین با سه پره، فرکانس زاویه‌ای  $\omega_s$  چنین به دست می‌آید:

$$\omega_s = \frac{3\omega_b}{n_p n_{gear}} \omega_b \quad (۱۸)$$

که  $n_p$  تعداد جفت قطب‌ها،  $n_{gear}$  نسبت جعبه دنده،  $\omega_b$  فرکانس زاویه‌ای استاتور برحسب پریونیت و  $\omega_b$  فرکانس زاویه‌ای پایه یا مبنا می‌باشد. دامنه نوسانات توان توربین در اثر سایه برج ( $D_{Tm}$ ) ۱۰ تا ۲۰ درصد مقدار میانگین  $T_{m-ave}$  است. برای سیستم تحت مطالعه با  $n_p = 4$ ،  $n_{gear} = 31$  و در فرکانس استاتور برابر با ۱ پریونیت (۵۰ هرتز) برابر با ۱/۲ هرتز می‌باشد.

#### ۶ مطالعات شبیه‌سازی

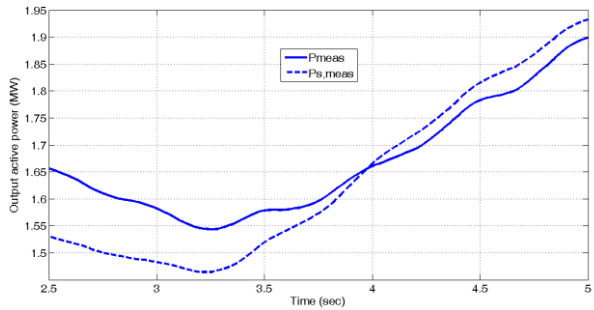
همان‌طور که در بخش ۳ اشاره شد کنترل توربین-ژنراتور بادی به‌وسیله مبدل سمت ماشین در دو مد کنترل سرعت و کنترل توان قابل انجام است. با توجه به توضیحات بخش ۳، سه روش برای کنترل توربین در مد کنترل سرعت و دو روش برای کنترل توربین در مد کنترل توان وجود دارد. این بخش به شبیه‌سازی روش‌های مذکور و همچنین اثر پدیده سایه برج بر رفتار دینامیکی توربین به ازای استراتژی‌های مختلف کنترلی در سیستم تحت مطالعه شکل ۱ (با پارامترهای ذکر شده در پیوست) در نرم‌افزار Matlab-Simulink می‌پردازد.

#### ۶-۴ مطالعات شبیه‌سازی براساس کنترل سرعت

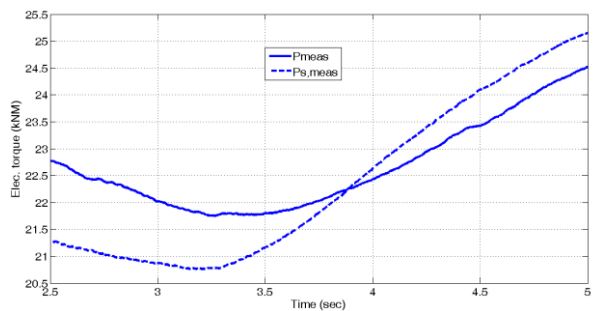
از آنجاکه تغییرات پله‌ای سرعت باد می‌تواند باعث تحریک مدهای پیچشی شفت گردد، لذا در این قسمت به مطالعه پاسخ سیستم در برابر تغییرات پله‌ای سرعت باد پرداخته شده و قابلیت استراتژی‌های کنترلی ذکر شده در بخش ۳ از حیث ظهور نوسانات پیچشی در پاسخ سیستم مقایسه می‌شود.

شکل ۱۰ پاسخ‌های توان خروجی ( $P_{meas}$ )، گشتاور الکترومکانیکی ( $T_e$ )، گشتاور پیچشی شفت، ولتاژ لینک dc ( $V_{dc}$ ) و سرعت ژنراتور را در مد کنترل سرعت براساس نرخ سرعت نوک بهینه و براساس منحنی سرعت-توان (با استفاده از توان خروجی استاتور  $P_{s, meas}$  و با استفاده از توان تزریقی به شبکه  $P_{meas}$ ) در پاسخ به تغییرات پله‌ای سرعت باد از

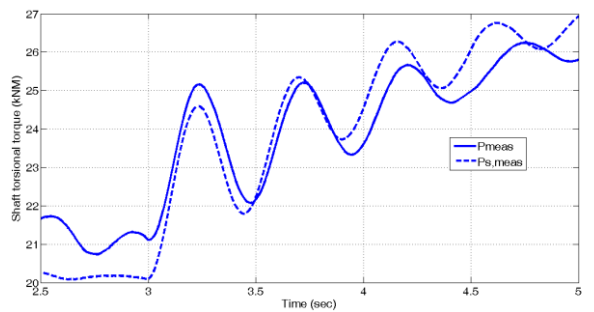
شکل ۱۰: پاسخ سیستم تحت مطالعه به تغییرات سرعت باد از ۱۰ m/s به ۱۳ m/s در مود کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان و با استفاده از  $P_{s,meas}$  و  $\lambda_{opt}$  الف- توان خروجی، ب- گشتاور الکتریکی، ج- گشتاور شفت، د- ولتاژ لینک dc و ه- سرعت ژنراتور



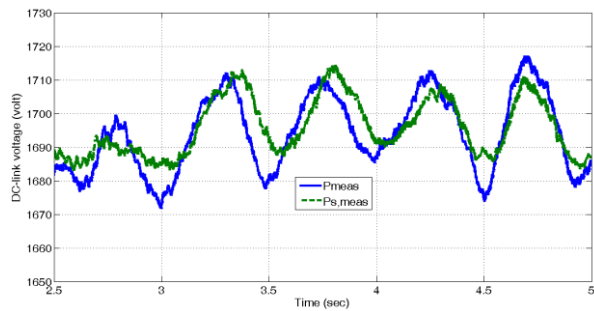
(الف)



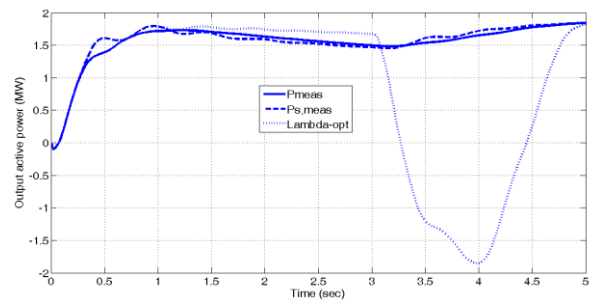
(ب)



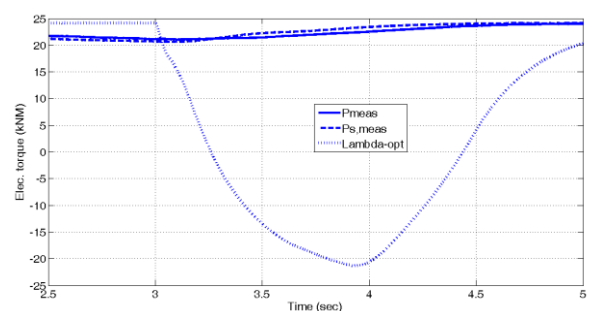
(ج)



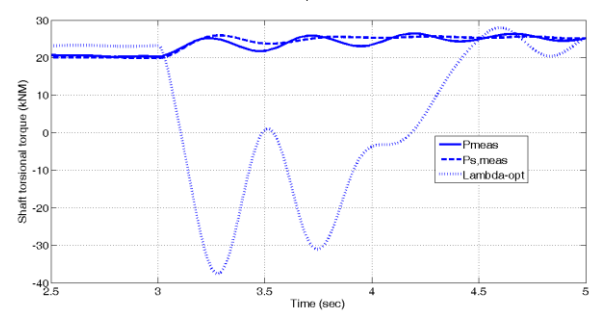
(د)



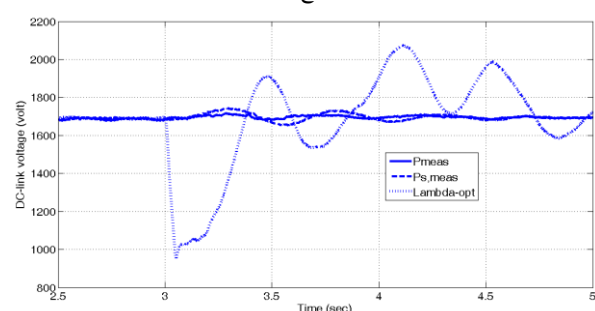
(الف)



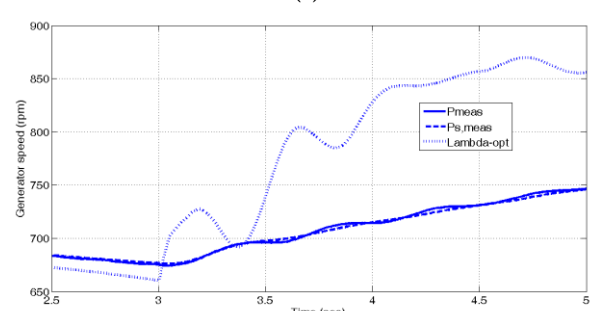
(ب)



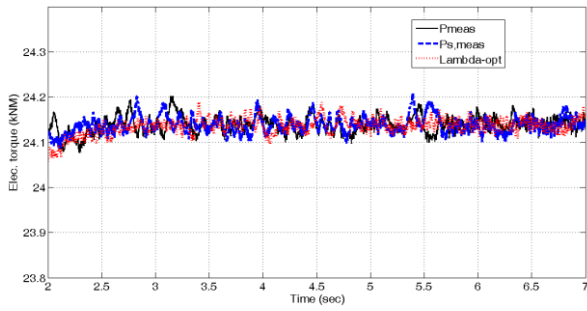
(ج)



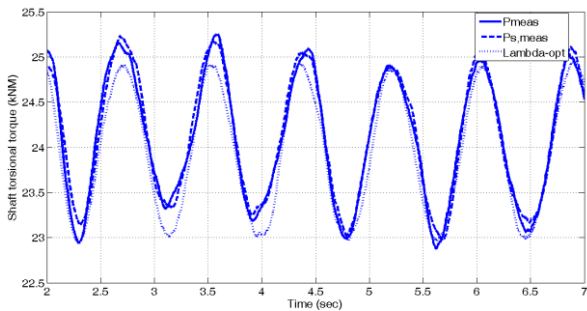
(د)



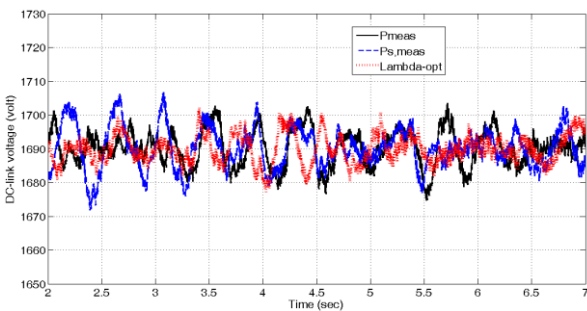
(ه)



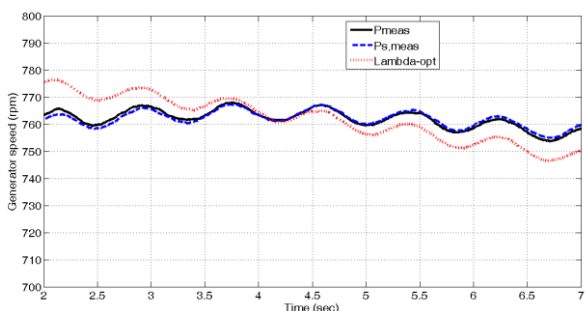
(ب)



(ج)

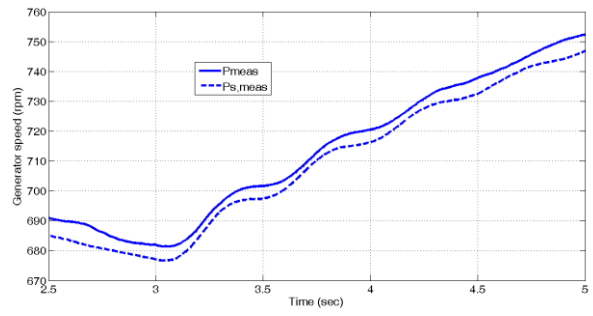


(د)



(ه)

شکل ۱۲: پاسخ سیستم تحت مطالعه به اثر پدیده سایه برج در مد کنترل سرعت براساس منحنی سرعت- توان و با استفاده از  $P_{s,meas}$  و  $\lambda_{opt}$  الف- توان خروجی، ب- گشتاور الکتریکی، ج-گشتاور شفت، د- ولتاژ لینک dc و ه- سرعت ژنراتور



(و)

شکل ۱۱: پاسخ سیستم تحت مطالعه به تغییرات سرعت باد از ۱۰ m/s به ۱۳ m/s در مد کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از  $P_{s,meas}$  الف- توان خروجی، ب- گشتاور الکتریکی، ج-گشتاور شفت، د- ولتاژ لینک dc و ه- سرعت ژنراتور

شکل ۱۲ پاسخ‌های سیستم را درحالتی که توربین در مد کنترل سرعت کنترل می‌شود را نشان می‌دهد.

همچنین در مد کنترل توان نیز از دو استراتژی زیر استفاده

می‌شود:

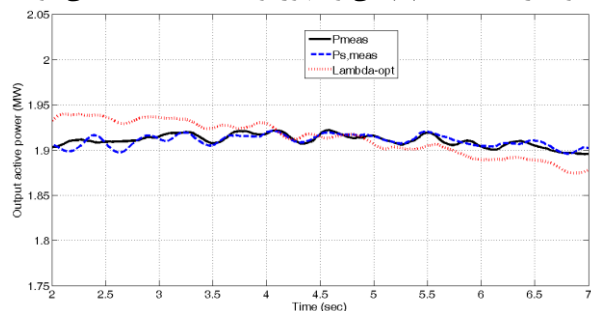
۱. کنترل توان براساس منحنی توان- سرعت و با استفاده از  $P_{meas}$

۲. کنترل توان براساس منحنی توان- سرعت و با استفاده از  $P_{s,meas}$

شکل ۱۳ پاسخ سیستم را درحالتی که توربین در مد کنترل توان

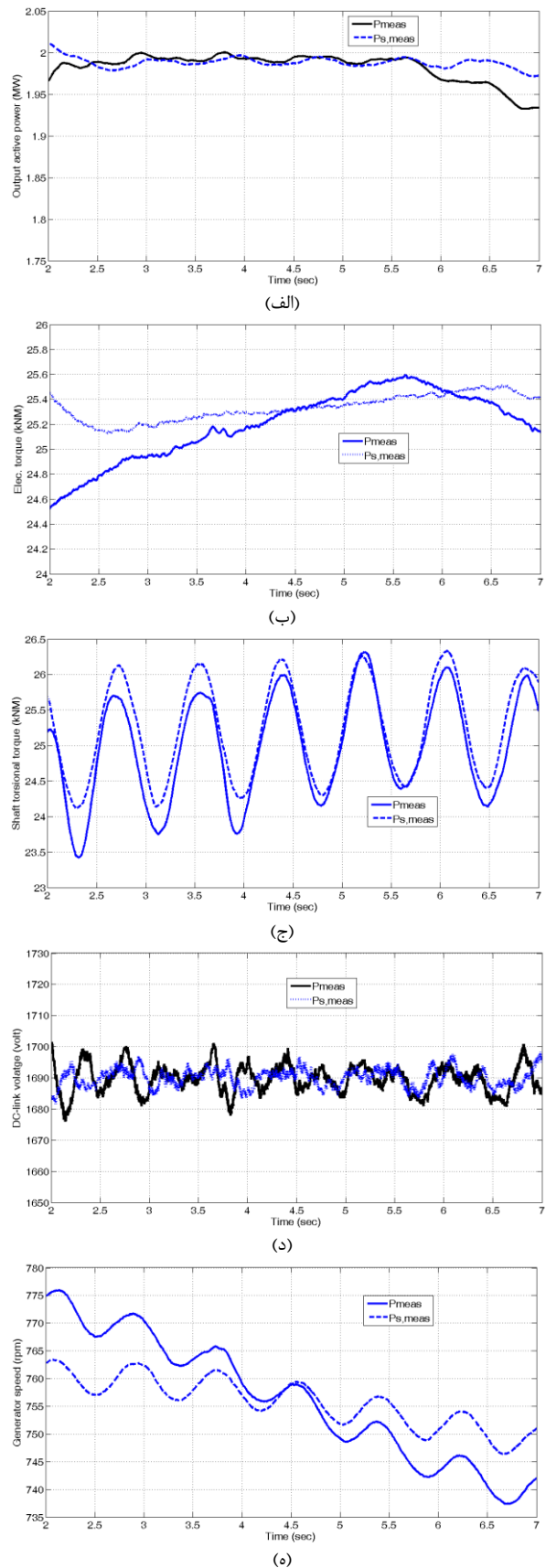
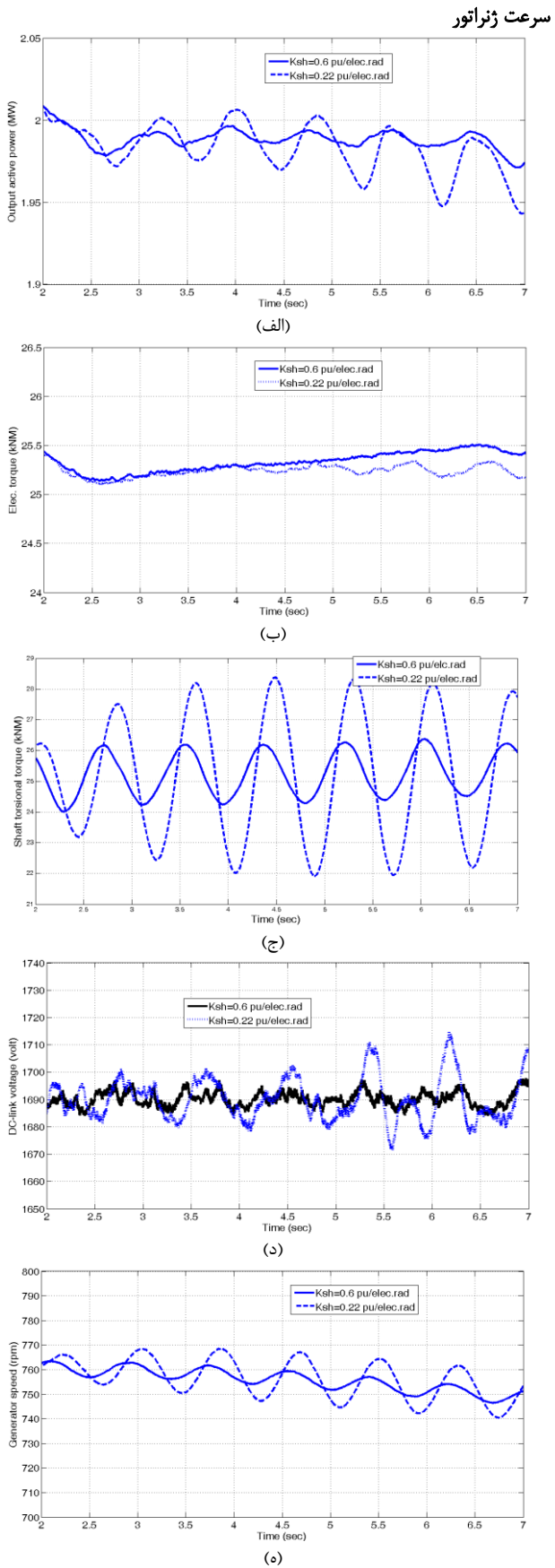
کنترل می‌شود، نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل های ۱۲ و ۱۳ واضح است، در اثر پدیده سایه برج، نوساناتی با فرکانس ۱/۲ هرتز بر روی گشتاور پیچشی و سرعت ژنراتور ظاهر می‌گردد. به علاوه با توجه به شکل های ۱۲ و ۱۳، تغییر روش کنترلی بر روی پاسخ های توربین به پدیده سایه برج تأثیر آن چنانی ندارد.

در ادامه به شبیه سازی سیستم تحت مطالعه در اثر پدیده سایه برج با تمرکز بر تأثیر تغییرات ثابت فنری شفت پرداخته می‌شود. در شکل های ۱۲ و ۱۳ ثابت فنری شفت ۰/۶ پریونیت در نظر گرفته شده بود. شکل ۱۴ پاسخ سیستم را در اثر پدیده سایه برج، وقتی ثابت فنری شفت برابر با ۰/۲۲ پریونیت باشد، نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود با تغییر ثابت فنری شفت از ۰/۶ به ۰/۲۲ پریونیت، فرکانس نوسانات پیچشی از ۲ Hz به ۱/۲ Hz تغییر می‌کند. همچنین فرکانس نوسانات توان ناشی از سایه برج نیز ۱/۲ Hz است که این باعث وقوع تشدید و تحریک مدهای پیچشی و ظهور نوسانات با دامنه بالا می‌شود.

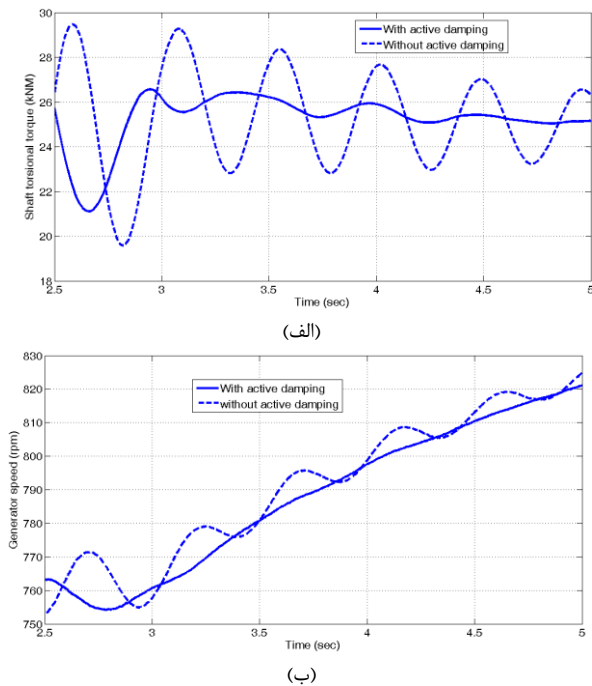


(الف)





شکل ۱۳: پاسخ سیستم تحت مطالعه به اثر پدیده سایه برج در مود کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از  $P_{s,meas}$  و  $P_{meas}$  - الف- توان خروجی، ب- گشتاور الکتریکی، ج- گشتاور شفت، د- ولتاژ لینک dc و ه-



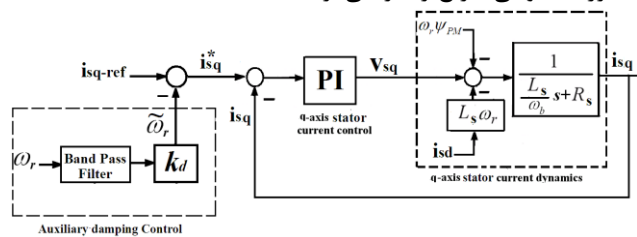
شکل ۱۶: پاسخ سیستم تحت مطالعه در مود کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان و با استفاده از  $P_{s,meas}$  با و بدون میراکننده اکتیو، الف- گشتاور شفت، ب- سرعت ژنراتور

برای محدود کردن ولتاژ لینک dc یکسان است و در هر سه روش مربوط به مود کنترل سرعت، ولتاژ خازن در لحظه وقوع خطا به پیک ۲۴۰۰ ولت می‌رسد که معادل ۴۰٪ اضافه ولتاژ بوده و مطلوب نمی‌باشد. شکل ۱۸ نیز پاسخ ولتاژ لینک dc را در مود کنترل توان به‌ازای ۶۰ درصد افتادگی ولتاژ شبکه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۸ قابلیت هر دو روش در مود کنترل توان تقریباً یکسان است و ولتاژ خازن در هنگام وقوع خطا به مقدار حدود ۲۳۰۰ ولت می‌رسد که معادل ۳۶ درصد اضافه ولتاژ می‌باشد و بنابراین مطلوب نیست. در ادامه جهت محدود کردن ولتاژ خازن، کنترل مبدل سمت ماشین (در هر یک از مدهای کنترل سرعت یا کنترل توان) به‌گونه‌ای بهبود داده می‌شود که تغییرات ولتاژ خازن با وقوع خطا محدود گردد. شکل ۱۹ سیستم کنترل بهبود داده‌شده را نشان می‌دهد. در شکل ۱۹ با فیدبک از ولتاژ خازن، سیگنال مرجع جریان محور q مبدل سمت ماشین به‌گونه‌ای تغییر داده می‌شود که از اضافه ولتاژ بیش از حد خازن لینک dc در هنگام وقوع خطا جلوگیری گردد. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ ولتاژ خازن را در پاسخ به ۶۰ درصد افتادگی ولتاژ شبکه به‌ازای استراتژی‌های مختلف کنترلی، در مدهای کنترل سرعت و توان نمایش می‌دهند. با توجه به شکل‌های ۲۰ و ۲۱ پیک ولتاژ خازن در اثر وقوع خطا با به‌کارگیری کنترل پیشنهادی به ۱۸۵۰ ولت محدود می‌گردد که معادل حداکثر ۱۰ درصد اضافه ولتاژ است و نسبت به شکل‌های ۱۷ و ۱۸ بسیار کمتر می‌باشد.

شکل ۱۴: پاسخ سیستم تحت مطالعه به اثر پدیده سایه برج در مود کنترل توان براساس منحنی توان- سرعت و با استفاده از  $P_{s,meas}$  با ثابت فنی شفت در دو مقدار ۰/۱۶ و ۰/۲۲، الف- توان خروجی، ب- گشتاور الکتریکی، ج- گشتاور شفت، د- ولتاژ لینک dc و ه- سرعت ژنراتور

#### ۴۶ میرایی اکتیو نوسانات پیچشی

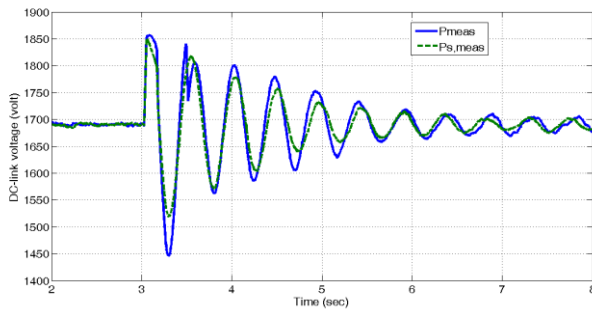
در این بخش برای بهبود میرایی مدهای پیچشی، حلقه کنترل جریان محور q مبدل سمت ماشین به‌گونه‌ای تغییر داده می‌شود که یک مؤلفه گشتاور کمکی برای میرایی نوسانات پیچشی ایجاد گردد. شکل ۱۵ حلقه کنترل بهبود داده‌شده جریان محور q مبدل سمت ماشین را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱۵ جریان مرجع  $i_{sq}^*$  دارای دو مؤلفه است: (۱) مؤلفه اصلی  $i_{sq-ref}$  که از حلقه خارجی کنترل توان یا سرعت به‌دست می‌آید و به‌وسیله آن توربین در مود کنترل توان یا سرعت کنترل می‌شود. (۲) مؤلفه کمکی  $i_{sq-damp}$  که وظیفه میرا کردن نوسانات پیچشی را به‌عهده دارد. به مؤلفه کمکی میراساز، اصطلاحاً میرایی اکتیو گفته می‌شود. برای ایجاد مؤلفه کمکی  $i_{sq-damp}$  از سرعت ژنراتور فیدبک گرفته و از یک فیلتر میان‌گذر تنظیم‌شده روی فرکانس نوسانات پیچشی عبور داده‌شده و در بهره  $k_d$  ضرب می‌شود. به این وسیله به‌محض ظاهر شدن نوسانات پیچشی روی سرعت ژنراتور، یک گشتاور میراساز ایجاد شده و میرایی نوسانات پیچشی را می‌افزاید. شکل ۱۶ پاسخ‌های گشتاور پیچشی شفت و سرعت ژنراتور را با و بدون میرایی اکتیو نشان می‌دهد. در شکل ۱۶ مبدل سمت شبکه در مود کنترل سرعت براساس منحنی سرعت-توان و با استفاده از  $P_{s,meas}$  کنترل می‌شود. با توجه به شکل ۱۶ در حالت میرایی اکتیو، با اضافه شدن مؤلفه کمکی میراساز، نوسانات پیچشی به‌طور محسوسی سریع‌تر میرا می‌گردد.



شکل ۱۵: بلوک دیاگرام حلقه کنترل جریان بهبود داده‌شده مبدل سمت ماشین برای بهبود نوسانات پیچشی

#### ۵۶ مقایسه کنترل‌کننده‌ها از حیث قابلیت گذر از خطا

مهمترین متغیر توربین-ژنراتور PMSG که از وقوع خطا و افتادگی ولتاژ شبکه، بیشترین تاثیر را می‌پذیرد، ولتاژ خازن لینک dc است. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ پاسخ ولتاژ لینک dc را درازای ۶۰ درصد افتادگی ولتاژ شبکه به‌ازای استراتژی‌های مختلف کنترلی نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱۷، قابلیت روش‌های مختلف در مورد کنترل سرعت



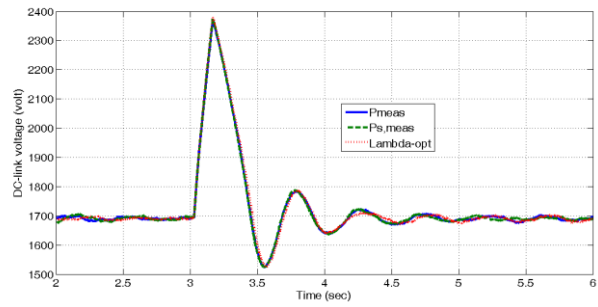
شکل ۲۱: پاسخ ولتاژ لینک dc در مود کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از  $P_{s,meas}$  و  $P_{meas}$  در ازای ۶۰ درصد افتادگی ولتاژ شبکه و با به‌کارگیری کنترل بهبودیافته پیشنهادی

### ۷ نتیجه‌گیری

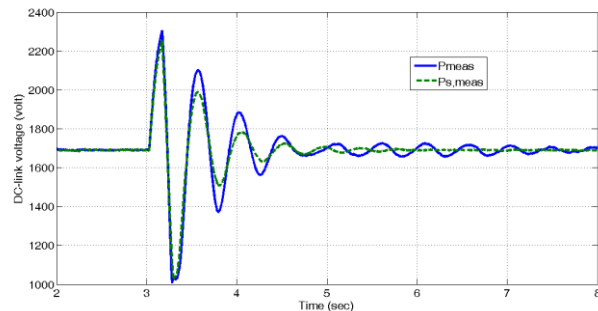
هدف این مقاله تشریح و مقایسه عملکرد استراتژی‌های مختلف کنترل مبدل سمت ماشین در توربین-ژنراتور بادی سنکرون مغناطیس دائم است. این استراتژی‌های مختلف شامل کنترل توربین در مد کنترل سرعت (که خود به سه طریق قابل انجام است) و همچنین شامل کنترل توربین در مد کنترل توان (که خود به دو طریق قابل انجام است) می‌باشد.

از آنجاکه شفت توربین-ژنراتور بادی نسبتاً نرم است، در هنگام تغییرات سرعت باد، نوساناتی با فرکانس مدهای پیچشی شفت در پاسخ سیستم ظاهر می‌شود. این نوسانات پیچشی برای سیستم تحت مطالعه حدود ۲ Hz می‌باشد. در این مقاله عملکرد روش‌های کنترلی از حیث ظهور نوسانات پیچشی در پاسخ سیستم باهم مقایسه می‌شود.

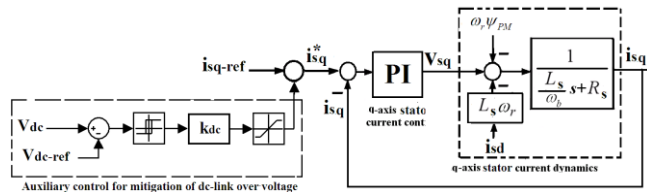
با مقایسه پاسخ سیستم به‌ازای انواع روش‌های کنترلی در مد کنترل سرعت و توان مشخص شد در هنگامی که مبدل سمت ماشین در مد کنترل سرعت براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از  $P_{s,meas}$  کار می‌کند، نوسانات پیچشی کمتر می‌باشد که این باعث می‌شود قابلیت اطمینان سیستم افزایش یابد. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که تغییر استراتژی کنترلی روی پاسخ‌های خروجی الکتریکی مانند توان، جریان و ولتاژ لینک dc تأثیر چندانی ندارد. ولی روی متغیرهای مرتبط با سیستم مکانیکی مانند گشتاور پیچشی به‌طور محسوس خود را نشان می‌دهد. همچنین در هنگامی که مبدل سمت ماشین در مد کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از  $P_{meas}$  یا  $P_{s,meas}$  کار می‌کند، پاسخ‌های دو روش کنترلی تفاوت محسوسی با هم ندارند. در شبیه‌سازی انجام شده در اثر پدیده سایه برج مشاهده شد که در توربین ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم تحت تأثیر این پدیده، نوساناتی با فرکانس سه برابر سرعت چرخش توربین، بر روی توان توربین، گشتاور شفت و سرعت ژنراتور ظاهر می‌شود. به‌علاوه اگر فرکانس نوسانات سایه برج بر فرکانس نوسانات پیچشی شفت منطبق شود، تشدید رخ داده و دامنه نوسانات پیچشی بیشتر و شدیدتر خواهد شد.



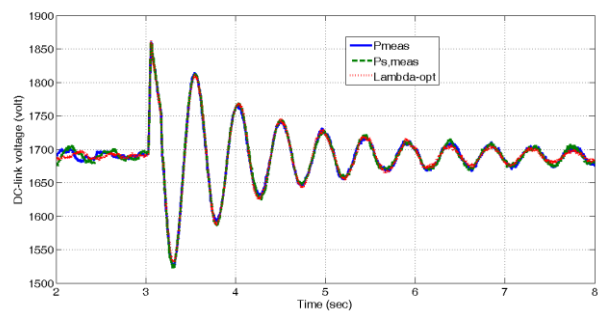
شکل ۱۷: پاسخ ولتاژ لینک dc در مود کنترل سرعت براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از  $P_{s,meas}$ ،  $P_{meas}$  و  $\lambda_{opt}$  در ازای ۶۰ درصد افتادگی ولتاژ شبکه



شکل ۱۸: پاسخ ولتاژ لینک dc در مود کنترل توان براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از  $P_{s,meas}$  و  $P_{meas}$  در ازای ۶۰ درصد افتادگی ولتاژ شبکه



شکل ۱۹: بلوک دیاگرام حلقه کنترل جریان بهبودیافته شده محور q مبدل سمت ماشین برای بهبود قابلیت گذر از خطا



شکل ۲۰: پاسخ ولتاژ لینک dc در مود کنترل سرعت براساس منحنی توان-سرعت و با استفاده از  $P_{s,meas}$ ،  $P_{meas}$  و  $\lambda_{opt}$  در ازای ۶۰ درصد افتادگی ولتاژ شبکه و با به‌کارگیری کنترل بهبودیافته پیشنهادی

پیوست

پارامترهای توربین- ژنراتور PMSG (۲ MW، ۶۹۰ V و ۵۰ Hz) تحت مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱: پارامترهای توربین-ژنراتور PMSG تحت مطالعه

پارامتر	مقدار
شعاع پره	$R = 40m$
چگالی هوا	$\rho = 1.105 \text{ kg / m}^3$
ثابت اینرسی ژنراتور	$H_g = 0.6 \text{ sec}$
ثابت اینرسی توربین	$H_t = 4 \text{ sec}$
نسبت تبدیل جعبه‌دنده	$n_g = 31$
ضریب فنری شفت	$k_{s-eq} = 0.6 \text{ pu / elec.rad}$
خازن لینک dc	$C_{dc} = 50 \text{ mF}$
مقاومت استاتور	$R_s = 2 \text{ m}\Omega$
اندوکتانس محور d	$L_{d'} = 0.11 \text{ mH}$
اندوکتانس محور q	$L_{q'} = 0.11 \text{ mH}$
زوج قطب	$n_p = 4$
شار مغناطیسی دائم	$\Psi_{PM} = 1.7 \text{ wb}$
ضریب میرایی معادل شفت	$D = 1 \text{ pu / rad}$

مراجع

[11] C. Wang, W. Lin, and X. Le, "Modelling of a PMSG Wind Turbine with Autonomous Control", *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-9, 2014.

[12] X. Zhang, Z. Wu, M. Hu, X. Li, G. Lv, "Coordinated Control Strategies of VSC-HVDC-Based Wind Power Systems for Low Voltage Ride Through" *Energies*, vol. 8, no. 7, pp. 7224-7242, 2015.

[13] Cun-Lu Dang, Lei Zhang, Ming-Xing Zhou, "Optimal Power Control Model of Direct Driven PMSG", *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 844 – 848, 2011.

[14] O. Alizadeh, and A. Yazdani, "A Control Strategy for Power Regulation in a Direct-Drive WECS With Flexible Drive-Train", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, October 2014.

[15] A. D. Hansen, and G. Michalke, "Modelling and control of variable-speed multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbine", *Wind Energy*, vol. 11, no. 5, pp. 537–554, 2008.

[16] 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 Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 9, pp. 2178–2192, 2009.

[17] A. D. Hansen, and G. Michalke, "Multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbines' grid support capability in uninterrupted operation during grid faults", *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 3, pp. 333–348, 2009.

[18] T. L. Van, T. D. Nguyen, T. T. Tran, H. D. Nguyen, "Advanced control strategy of back-to-back PWM converters in PMSG wind power system", *Power Engineering and Electrical Engineering*, Vol. 13, no. 2, pp. 81-95, 2015.

[۱۹] سعید اباذری، امید مرادی، "بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت با بکارگیری UPFC و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده براساس یک الگوریتم جدید PSO"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.

[۲۰] محسن رحیمی، محمد رضا اسماعیلی، "طراحی کنترل‌کننده توان و بهبود میرایی نوسانات پیچشی در توربین بادی DFIG-710 kW نصب‌شده در سایت بینالود"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵.

[21] R. Cardenas, R. Pena, J. Clare & G. Asher, "Power smoothing in a variable speed wind-diesel system", *Power Electronics Specialist Conference, IEEE 34th Annual*. Vol. 2, 2003.

[22] Cimpoeru, Andreea, and Kaiyuan Lu, "Encoderless Vector Control of PMSG for wind turbine applications", *Institute of energy technology, AALBORG University, M.Sc Thesis*, pp. 14-21, 2010.

[23] J. F. Conroy, and R. Watson, "Frequency response capability of full converter wind turbine generators in comparison to conventional generation", *IEEE trans. power syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 649-656, 2008.

[24] W. Hu, C. Su, and Z. Chen, "Impact of wind shear and tower shadow effects on power system with large scale wind power penetration", *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 878-883, 2011.

[25] M. Reiso, "The Tower Shadow Effect in Downwind Wind Turbines", *Norwegian University of Science and Technology, PhD Thesis*, 2013.

[26] D. S. Dolan, and P. W. Lehn, "Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow", *IEEE Trans. energy convers*, vol. 21, no. 3, pp. 717-724, 2006.

[1] R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode", *IEEE Trans. Power Electron.* vol. 19, no. 5, pp. 1323-1332, 2004.

[2] A. Uehara, A. Pratap, T. Goya, T. Senjyu, A. Yona, N. Urasaki, and T. Funabashi, "A Coordinated Control Method to Smooth Wind Power Fluctuations of a PMSG-Based WECS", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 2, pp. 550-558, 2011.

[3] A. H. K. Alaboudy, A. A. Daoud, S. S. Desouky, and A. A. Salem, "Converter controls and flicker study of PMSG-based grid connected wind turbines", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 75-91, 2013.

[4] A. H. Rajaei, M. Mohamadian, S. M. Dehghan, and A. Yazdian, "PMSG-based variable speed wind energy conversion system using Vienna rectifier", *Euro. Trans. Electric. Power.*, vol. 21, no. 1, pp. 954-972, 2011.

[5] N. M. A. Freire, A. J. M. Cardoso, "Fault-tolerant PMSG drive with reduced DC-link ratings for wind turbine applications", *IEEE, Emerg. Sel. Top. power Electron.*, vol. 2, no. 1, pp. 26-34, 2014.

[6] S. H. Zhang, K. J. Tseng, D. M. Vilathgamuwa, T. M. Nguyen, X. Y. Wang, "Design of a Robust Grid Interface System for PMSG-Based Wind Turbine Generators", *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol. 58, no. 1, pp. 316-328, 2011.

[7] A. D. Hansen, and G. Michalke, "Modelling and control of variable -speed multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbine", *Wind Energy*, vol. 11, no. 5, pp. 537-554, 2008.

[8] K. Xie, Z. Jiang, and W. Li, "Effect of wind speed on wind turbine power converter reliability", *IEEE Trans. energy convers.*, vol. 27, no. 1, pp. 96-104, 2012.

[9] J. Yan, H. Lin, Y. Feng, and Z. Q. Zhu, "Control of a grid-connected direct-drive wind energy conversion system", *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 371-380, 2014.

[10] M. Chinchilla, S. Arnaltes, and J. Burgos, "Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid". *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 1, pp. 130-135, 2006.

زیرنویس‌ها

<sup>1</sup> Full converter variable speed wind turbine generator (FCWTG)  
<sup>2</sup> Wind turbine with permanent magnet synchronous generator (WT-PMSG)  
<sup>3</sup> Reliability

- 
- 4 Grid side converter (GSC)
  - 5 Machine side converter (MSC)
  - 6 Optimum tip speed ratio
  - 7 Shaft torsional oscillations
  - 8 Synchronous reference frame
  - 9 Maximum peak power tracking (MPPT)
  - 10 Speed-power curve
  - 11 Power-speed curve
  - 12 Tower shadow