

کنترل غیر خطی و مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی تغذیه دوگانه به صورت متمرکز و غیر متمرکز (dcs)

محمد جلالی

Jalali.mohamad990@gmail.com

چکیده

این مقاله در مورد کنترل متمرکز و غیر متمرکز ماشین القایی روتور سیم بندی شده با پل کانورتری سه فاز دو تکه با لینک DC که مابین روتور و شبکه متصل شده است بحث می‌کند و کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو یک ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه (DFIG)، که برای تولید برق در نیروگاههای بادی سرعت متغیر بکار می‌رود، مد نظر می‌باشد. پس از بیان روابط و اثبات معادلات مورد نیاز در کنترل متمرکز، یک مدل که نشان دهنده کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو، در ژنراتور القایی DFIG می‌باشد، در محیط Matlab-Simulink شبیه سازی و نتایج آن بررسی شده است. سپس تفاوت اجرای این نوع پیاده سازی کنترل را با کنترل توزیع شده مورد بحث قرار خواهیم داد. در روش کنترل توان به روش فیدبک حالت ورودی و خروجی از امتدادیابی شار شبکه استفاده می‌شود.

واژه های کلیدی: کنترل غیر خطی، توان اکتیو، توان راکتیو، ژنراتور القایی، کنترل مستقل، dcs

۱- مقدمه

ولی شار استاتور بایستی تخمین زده شود، از امتدادیابی ولتاژ استاتور (بجای امتدادیابی شار) استفاده می‌شود [۳]. همچنین قابل ذکر است که یک ضعف کلی در روش‌های کنترل برداری آن است که عمل امتدادیابی فقط در حالت ماندگار محقق می‌شود برای حل این مشکل در یک مختصات مرجع سنکرون که در آن محور d در امتداد بردار فضایی ولتاژ شبکه ثابت تغذیه استاتور قرار گیرد یک کنترل کننده غیر خطی مقاوم بر اساس روش خطی سازی ورودی-خروجی طراحی و پیاده سازی خواهد گردید هدف از طراحی کنترلر محاسبه و اعمال ولتاژهای دو محوری روتور می‌باشد.

برای کنترل ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه از روش کنترل برداری از امتدادیابی شار استاتور استفاده می‌شود و کنترل کننده های PI مورد استفاده قرار می‌گیرند نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مرجع [۷،۴،۱] مربوط به کنترل برداری مشکلاتی از قبیل: عدم وجود دکوپلینگ در حالت گذرا و وجود خطای ماندگار به وجود می‌آورد.

به دلیل به وجود آمدن این مشکلات به سبب چشم پوشی از مقاوت استاتور، روش غیرخطی کنترل فیدبک ورودی-خروجی در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد ملاحظه خواهد شد که با استفاده از این روش توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور به طور مستقل و پایدار کنترل خواهد شد با توجه به اینکه ولتاژ استاتور توسط حسگر ولتاژ قابل دسترسی است

۲- کنترل ماشین القایی تغذیه دوگانه به روش

فیدبک حالت ورودی و خروجی

دو نوع خطی سازی دقیق فیدبک (خطی سازی ورودی - حالت و خطی سازی ورودی - خروجی) وجود دارد در مواقعی که معادلات غیر خطی یک مدل یا یک سیستم موجود متغیر خروجی مد نظر بود از روش خطی سازی فیدبک حالت ورودی - خروجی استفاده می شود

۳- مدل ماشین القایی تغذیه دوگانه همراه با طراحی کنترل کننده:

در این قسمت از قاب مرجع dq که محور آن با بردار فضایی ولتاژ شبکه همراستا باشد استفاده می شود. این امتدادیابی قاب مرجع را می توان امتدادیابی شار شبکه نامید. در این حالت شار در یک استاتور سه فاز و با صرف نظر از دینامیک های سیستم در تمام زمان ها مستقیماً با ولتاژ استاتور سنکرون خواهد بود. بر خلاف کنترل برداری توان اکتیو، راکتیو که با استفاده امتدادیابی شار استاتور انجام می گیرد در روش کنترل توان به روش فیدبک حالت ورودی و خروجی از امتدادیابی شار شبکه استفاده می شود، امتدادیابی ولتاژ استاتور روش مؤثر در کنترل ماشین القایی نیست اما در مورد ژنراتور القایی تغذیه دوگانه تأثیرگذار خواهد بود هر چند تفاوت اندکی در امتدادیابی شار استاتور و امتدادیابی شبکه است اما از نظر عملی اهمیت زیادی دارند.

۳-۱ دلایل امتدادیابی ولتاژ استاتور (شار شبکه) به جای امتدادیابی شار استاتور در طراحی کنترل کننده:

- ✓ بسیار دقیق تر و ساده تر بودن امتدادیابی ولتاژ استاتور.
- ✓ وجود خطاها در اثر تخمین پارامترها و به دلیل عدم اندازه گیری مستقیم شار در امتدادیابی شار استاتور.
- ✓ امتدادیابی ولتاژ استاتور چون توسط حسگر ولتاژ قابل دسترسی می باشد سریعتر انجام می پذیرد.

- ✓ مقادیر ویژه ی سیستم تحت امتدادیابی ولتاژ استاتور میرایی بیشتری خواهند داشت که سبب افزایش پایداری سیستم می گردد.
- ✓ اتصال نرم و بدون حالت گذرای سیم پیچی های استاتور به شبکه طی مرحله ی راه اندازی..

حال با فرض یک مدل مغناطیسی خطی، معادلات دومیوری یک ماشین القایی روتور سیم پیچی شده در دستگاه مختصات (d,q) سنکرون ولتاژ استاتور با انتخاب جریان و شار استاتور به عنوان متغیرهای حالت به صورت زیر قابل استخراجند:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot [\mu \cdot (\psi_d i_q - \psi_q i_d) - T_L]$$

$$\frac{di_d}{dt} = -\gamma \cdot i_d + \omega_2 \cdot i_q + \frac{\alpha}{\sigma} \cdot \psi_d + \frac{\omega}{\sigma} \cdot \psi_q + \frac{u_{sd}}{\sigma} - \beta \cdot u_{rd}$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\gamma \cdot i_q - \omega_2 \cdot i_d + \frac{\alpha}{\sigma} \cdot \psi_q - \frac{\omega}{\sigma} \cdot \psi_d - \beta \cdot u_{rq}$$

$$\frac{d\psi_d}{dt} = -R_S \cdot i_d + \omega_o \cdot \psi_q + u_{sd}$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = -R_S \cdot i_q - \omega_o \cdot \psi_d$$

که در آن i_d ، i_q ، ψ_d ، ψ_q به ترتیب جریان ها و شارهای دو محوری استاتور می باشند. u_{rd} و u_{rq} ولتاژهای دو محوری روتور و u_{sd} ولتاژ محور d استاتور می باشد. ω_o و U به ترتیب سرعت زاویه ای و دامنه ولتاژ استاتور، ω سرعت روتور بر حسب رادیان الکتریکی بر ثانیه، $\omega_2 = \omega_o - \omega$ فرکانس روتور (فرکانس لغزش)، J اینرسی ماشین و T_L گشتاور بار می باشد. پارامترهای μ ، γ ، σ ، α نیز به صورت ذیل تعریف می شوند:

(۲)

$$\mu = \frac{3P}{2}, \gamma = \left(\frac{\alpha}{\sigma} L_S + \frac{R_S}{\sigma} \right), \sigma = L_S \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \right), \beta = \frac{L_m}{L_r}$$

$$\alpha = \frac{R_r}{L_r}$$

به علاوه، مؤلفه های توان اکتیو و راکتیو تزریقی به مدار استاتور عبارتند از:

(۳)

$$P_S = 1.5 u_{sd} i_d$$

معادلات دوماحوری یک ماشین القایی روتور سیم‌پیچی شده
خطای دینامیکی جریان‌های استاتور عبارت است از:

(۸)

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} &= -\gamma \cdot (\tilde{i}_d + i_d^*) + \omega_2 \cdot (\tilde{i}_q + i_q^*) + \frac{\alpha}{\sigma} \cdot (\tilde{\psi}_d + \psi_d^*) \\ &+ \frac{\omega}{\sigma} \cdot (\tilde{\psi}_q + \psi_q^*) + \frac{u_{sd}}{\sigma} - \beta \cdot u_{rd} - i_d^* \\ \frac{d\tilde{i}_q}{dt} &= -\gamma \cdot (\tilde{i}_q + i_q^*) - \omega_2 \cdot (\tilde{i}_d + i_d^*) + \frac{\alpha}{\sigma} \cdot (\tilde{\psi}_q + \psi_q^*) \\ &- \frac{\omega}{\sigma} \cdot (\tilde{\psi}_d + \psi_d^*) - \beta \cdot u_{rq} - i_q^* \end{aligned}$$

با استفاده از روش خطی‌سازی دقیق فیدبک مؤلفه‌های بردار
ولتاژ مرجع دوماحوری روتور برای فرمان دادن به اینورتر
سمت روتور به صورت ذیل به دست می‌آیند:

(۹)

$$\begin{aligned} u_{rd} &= \frac{1}{\beta} \cdot (-\gamma \cdot i_d^* + \omega_2 \cdot i_q^* + \frac{\alpha}{\sigma} \cdot \psi_d^* + \frac{\omega}{\sigma} \cdot \psi_q^* \\ &+ \frac{u_{sd}}{\sigma} + v_{rd} - \frac{di_d}{dt} \\ u_{rq} &= \frac{1}{\beta} \cdot (-\gamma \cdot i_q^* - \omega_2 \cdot i_d^* + \frac{\alpha}{\sigma} \cdot \psi_q^* - \frac{\omega}{\sigma} \cdot \psi_d^* \\ &+ v_{rq} - \frac{di_q}{dt} \end{aligned}$$

با جایگذاری دو معادله‌ی قبل معادلات خطای دینامیکی
سیستم به صورت ذیل به دست می‌آید:

(۱۰)

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} &= -\gamma \cdot \tilde{i}_d + \omega_2 \cdot \tilde{i}_q + \frac{\omega}{\sigma} \cdot \tilde{\psi}_d + \frac{\omega}{\sigma} \cdot \tilde{\psi}_q - u_{rd} \\ \frac{d\tilde{i}_q}{dt} &= -\gamma \cdot \tilde{i}_q - \omega_2 \cdot \tilde{i}_d + \frac{\omega}{\sigma} \cdot \tilde{\psi}_q - \frac{\omega}{\sigma} \cdot \tilde{\psi}_d - u_{rq} \\ \frac{d\tilde{\psi}_d}{dt} &= -R_s \cdot \tilde{i}_d + \omega_o \cdot \tilde{\psi}_q \\ \frac{d\tilde{\psi}_q}{dt} &= -R_s \cdot \tilde{i}_q - \omega_o \cdot \tilde{\psi}_d \end{aligned}$$

با تعریف متغیرهای جدید به صورت:

(۱۱)

$$\begin{aligned} v_{rd} &= k_i \tilde{i}_d \\ v_{rq} &= k_i \tilde{i}_q \end{aligned}$$

که در آن k_i ضریب کنترل کننده می‌باشد، می‌توان با
استفاده از معیار پایداری لیاپانوف نشان داد که سیستم پایدار
است یعنی:

(۱۲)

$$Q_s = -1.5 u_{sd} i_q$$

از روی معادله قبل با انتخاب مؤلفه‌های i_d ، i_q که متناظر با
جریان‌های مرجع اکتیو و راکتیو سمت استاتور هستند، هدف
از طراحی کنترل‌کننده‌ی غیرخطی، محاسبه و اعمال
ولتاژهای دو محوری u_{rd} و u_{rq} به گونه‌ای می‌باشد که
داشته باشیم:

(۴)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (i_d - i_d^*) = 0 \quad \text{و} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (i_q - i_q^*) = 0$$

لازم به ذکر است که در این جا فرض می‌شود که جریان‌های
مرجع یا مشتق مرتبه اول آنها محدود و ثابت هستند. طراحی
کنترل فیدبک ورودی - خروجی برای ماشین القایی روتور
سیم‌پیچی شده با تعریف خطاهای جریان و شار استاتور به
صورت ذیل:

(۵)

$$\begin{aligned} \tilde{i}_d &= i_d - i_d^* \quad , \quad \tilde{i}_q = i_q - i_q^* \\ \tilde{\psi}_d &= \psi_d - \psi_d^* \quad , \quad \tilde{\psi}_q = \psi_q - \psi_q^* \end{aligned}$$

به کمک معادلات دوماحوری یک ماشین القایی روتور سیم-
پیچی شده برای دینامیک‌های خطای شار استاتور داریم(۶)

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{\psi}_d}{dt} &= -R_s \cdot (\tilde{i}_d + i_d^*) + \omega_o \cdot (\tilde{\psi}_q + \psi_q^*) + u_{sd} - \psi_d^* \\ \frac{d\tilde{\psi}_q}{dt} &= -R_s \cdot (\tilde{i}_q + i_q^*) + \omega_o \cdot (\tilde{\psi}_d + \psi_d^*) - \psi_q^* \end{aligned}$$

با انتخاب

(۷)

$$\begin{aligned} \psi_d^* &= \frac{(-R_s \cdot i_q^* - \psi_q^*)}{\omega_o} \\ \psi_q^* &= \frac{(-R_s \cdot i_d^* - u_{sd} + \psi_d^*)}{\omega_o} \end{aligned}$$

معادلات به فرم خطی تبدیل می‌شوند (ψ_d^* و ψ_q^* شارهای
مرجع دو محوری استاتور هستند). همچنین با استفاده از

$$x = [\tilde{i}_d, \tilde{i}_q, \tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q]$$

افزودن یک جمله انتگرالی به v_{rd} و v_{rq} برای بهبود پایداری و نیز مقاوم کردن کنترل کننده پیشنهادی نسبت به تغییر پارامترهای ماشین ما را در امر کنترل یاری می‌رساند

۴- نتایج شبیه سازی:

هدف از شبیه‌سازی مدل مربوط به DFIG و کنترل کننده‌ی متناسب با آن صفر نمودن خطای حالت ماندگار می‌باشد. پس از مدل کردن ژنراتور با استفاده از روابط گفته شده و مدل نمودن کنترل کننده با استفاده از روابط موجود اهداف مورد نظر بررسی خواهند شد.

شبیه‌سازی این ماشین در حالت ژنراتوری زیر سنکرون و ژنراتوری بالای سنکرون امکان پذیر می‌باشد اما در این مقاله به بررسی حالت ژنراتوری زیر سنکرون این ماشین می‌پردازیم. در این شبیه‌سازی فرکانس شبکه 50 Hz و ولتاژ خط به خط 380 V می‌باشد و ضرایب کنترل کننده با استفاده از روش سعی و خطا طوری محاسبه شده‌اند که خطای حالت ماندگار و ریبیل کاهش یافته و به سمت صفر میل کنند. توان اکتیو مرجع استاتور تا ثانیه دوم در مقدار -550 W ، از ثانیه دوم تا چهارم 500 W ، از ثانیه چهارم تا ششم در مقدار 200 W - و پس از ثانیه ششم در مقدار 400 W - قرار داده شده است و توان اکتیو مرجع استاتور تا ثانیه دوم 330 var ، از ثانیه دوم تا چهارم 250 var و پس از آن در مقدار 350 var قرار داده شده است.

شکل ۱ تغییرات توان اکتیو و راکتیو را به همراه مقادیر مرجع توان نشان می‌دهد ملاحظه می‌شود شکل مربوط به مقادیر واقعی نزدیک به مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو می‌باشد که

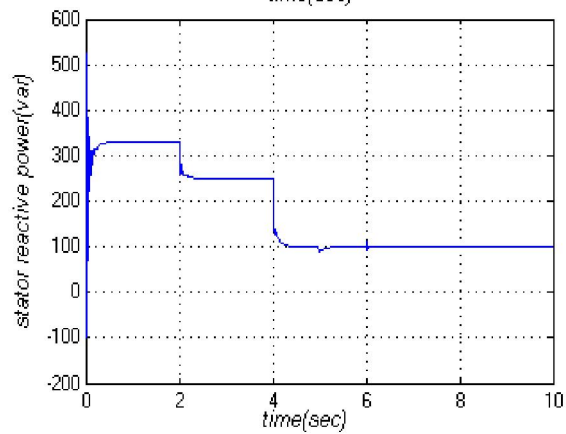
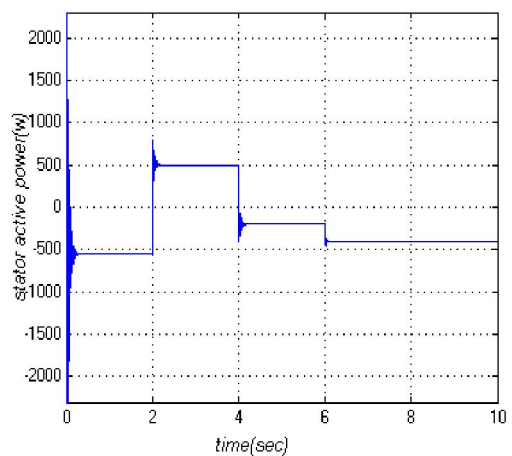
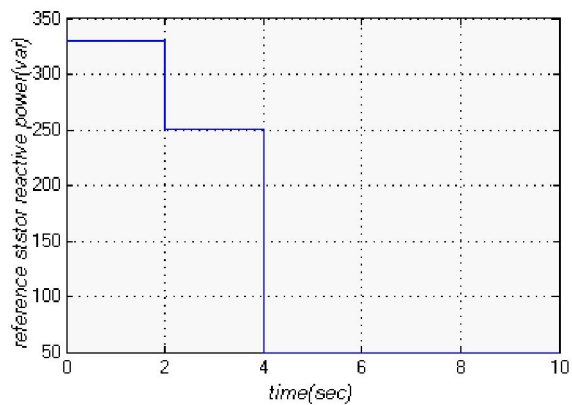
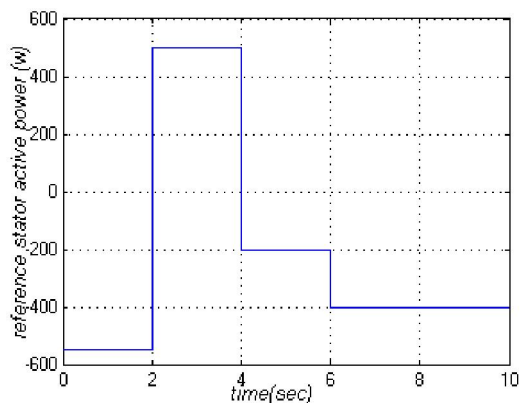
این موضوع ردیابی مقادیر مرجع توان‌ها را بیان می‌کند به علاوه استقلال توان‌ها، دکوپلینگ مناسب توان‌های اکتیو و راکتیو را بازگو می‌کند.

شکل ۲ تغییرات توان اکتیو و راکتیو روتور را نشان می‌دهد انتظار داریم طبق رابطه $P_r = -SP_s$ توان روتور کوچکتر از توان استاتور باشد و همچنین در ناحیه‌ی ژنراتوری زیر سنکرون توان اکتیو روتور مثبت است که این دو موضوع با دقت به شکل ۲ مورد تصدیق است.

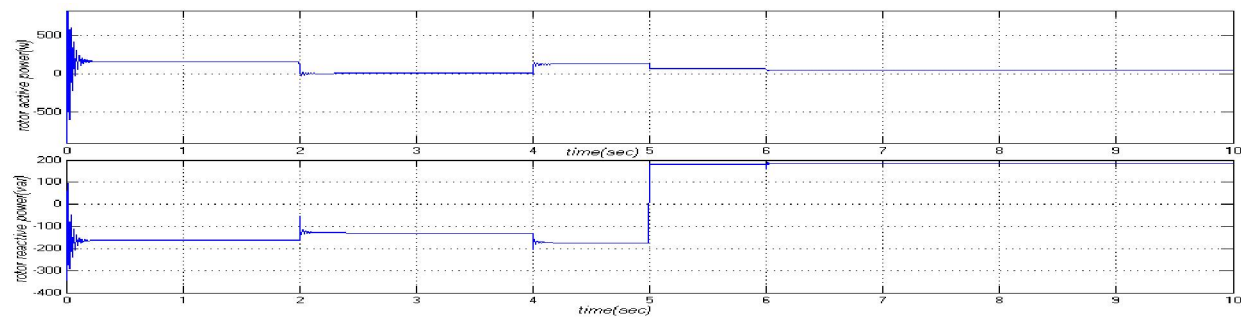
در شکل ۳ مقادیر جریان‌های دو محوری استاتور در قاب مرجع سنکرون نشان داده شده است طبق رابطه‌ی توان اکتیو و راکتیو استاتور تغییرات مؤلفه‌ی d جریان استاتور همانند تغییرات توان اکتیو و تغییرات مؤلفه‌ی q همانند منفی تغییرات توان راکتیو است.

برای اینکه کارایی کنترل کننده‌ی غیر خطی را بررسی کنیم روش‌های مختلفی وجود دارد اما در اینجا با تغییر ۱۵ درصدی مقاومت استاتور کنترل توان اکتیو و راکتیو استاتور را بررسی می‌کنیم به گونه‌ای که در شبیه‌سازی تمام مقادیر مقاومت استاتور و روتور (نه کنترل کننده) را ۱۵ درصد افزایش می‌دهیم و خروجی‌های مطلوب را دوباره مشاهده می‌کنیم ملاحظه می‌شود اگرچه مقداری ریبیل در توان‌های استاتور و روتور پدید آمد ولی کنترل توان اکتیو و راکتیو استاتور به خوبی صورت گرفت. شکل ۴ مقادیر مرجع و واقعی توان اکتیو و راکتیو استاتور، شکل ۵ مقادیر جریان‌های دو محور استاتور در قاب مرجع سنکرون را نشان می‌دهد

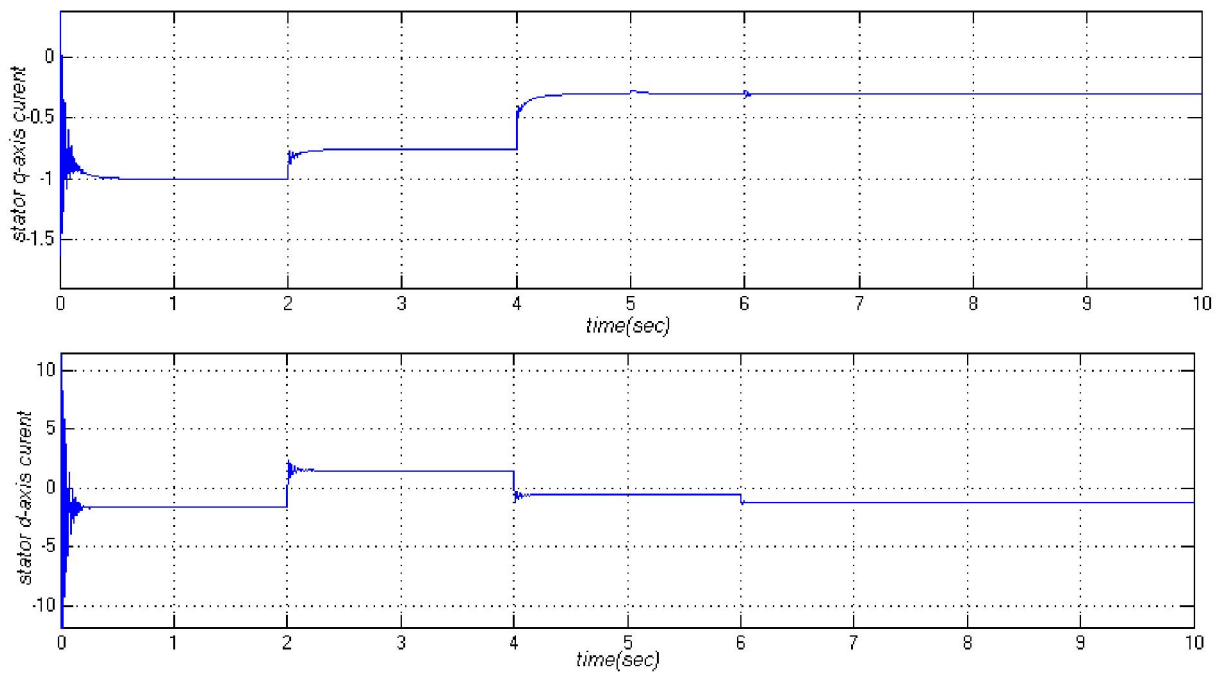
در حالت ژنراتوری بالای سنکرون نیز مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو همانند حالت زیر سنکرون می‌باشد



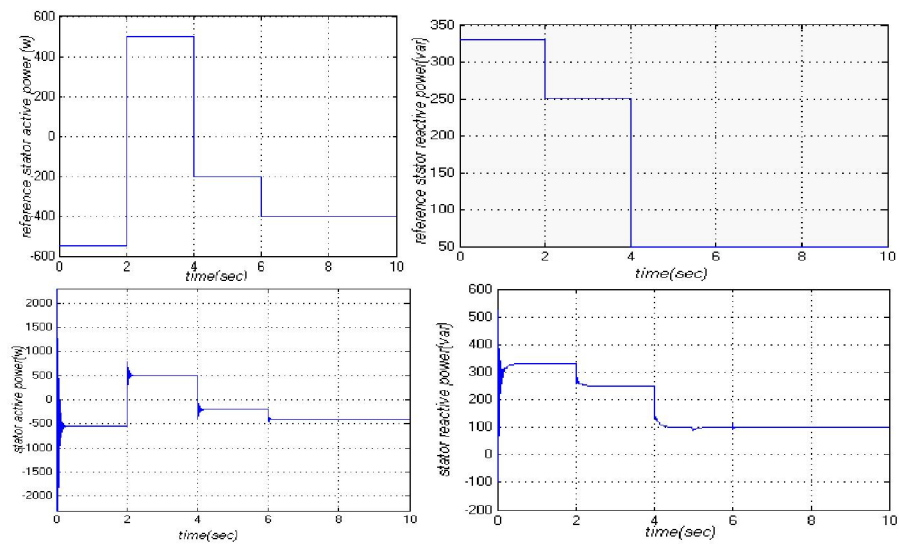
شکل ۱ مقادیر مرجع و واقعی توان اکتیو استاتور



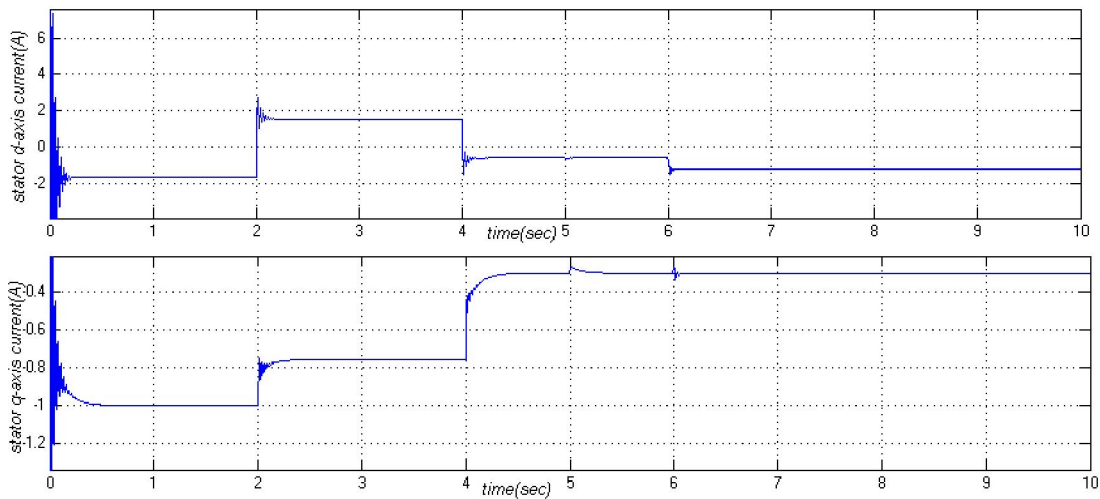
شکل ۲ مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو روتور



شکل ۳ مقادیر جریان‌های دو محوری استاتور در قاب مرجع سنکرون



شکل ۴ مقادیر مرجع و واقعی توان اکتیو استاتور در صورت افزایش ۱۵ درصدی مقاومت‌های استاتور و روتور



شکل ۵ مقادیر جریان‌های دو محوری استاتور در صورت افزایش ۱۵ درصدی مقاومت‌های استاتور و روتور

۵- کنترل توزیع شده (dcs)

سیستم کنترل متمرکز، پیشنهادی در خصوص کنترل توان اکتیو و راکتیو به صورت توزیع شده به گونه ای مطرح می‌شود که ساختار کلید زنی چند لایه با استفاده از کنترل فیدبکی پربودیک در آن تاثیر گذار است یکی از دلایل به کارگیری سوئیچینگ در مدل شبیه سازی شده ی قبل، جلوگیری از تغییرات ناگهانی در دینامیک سیستم یاد شده می باشد که انعطاف پذیری بالای مدل و سیستم را در پی خواهد داشت .

۷- نتیجه گیری:

از آنجائیکه پس از تولید توان، برای بررسی پایداری سیستم نوبت به کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو می‌رسد، تجزیه تحلیل روش-های مختلف کنترل توان اکتیو و راکتیو در ژنراتورهای القایی تغذیه دو گانه شکل مهم‌تری به خود می‌گیرد.

استفاده از روش‌های خطی و غیرخطی برای کنترل توان اکتیو و راکتیو در ژنراتور القایی تغذیه دوگانه به روش متمرکز و غیر متمرکز در این مقاله مطرح شد، ابتدا بر اساس مراجع یاد شده روش مرسوم کنترل برداری DFIG مورد بحث قرار گرفت سپس

در این روش کنترلی انجام عملیات کنترل به صورت غیر متمرکز یا توزیع شده می باشد در این سیستم کنترل شبیه سازی شده کلیه ی کنترلرها و سنسورهای محلی در پروسس به اتاق کنترل آورده شده و پس از پردازش نرم افزاری به صورت اتوماتیک و یا به صورت دستی در می‌آید در نهایت سیگنال متناسب با دستگاه یا المان کنترل شونده به صورت خروجی و متمرکز انجام می-

شود

۶- پیشنهادی در رابطه با کنترل توزیع شده توان

اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی تغذیه دو گانه

امروزه dcs به عنوان یک ابزار اتوماسیون معمول در آمده که از دیدگاه های مختلف می تواند تعابیر مختلفی داشته باشد از نقطه نظر مهندسی پروسه این سیستم می تواند سبب بهبود میزان تولید و کیفیت و ایمنی و قابلیت اطمینان بر مراحل اجرای یک پروسه به گرفته شود به منظور حذف مشکلات بوجود آمده در

- [5]. S. Peresada, A. Tilli and A. Tonielli, "Robust output feedback control of a doubly fed induction machine", IEEE 25th annual conference on industrial electronics, Vol.3, No. 1, pp. 1348- 1354, Nov 1999
- [6]. Kishor Thakre, "Dynamic performance of DFIG wind turbine under unbalance grid fault condition" Ph.D. Thesis, National Institute of Technology Rourkela, 2006.
- [7]. Ned Mohan, Ted K. A. Brekken "Control of a Doubly Fed Induction Wind Generator Under Unbalanced Grid Voltage Conditions" IEEE Transaction Energy conversion, vol.no22. 1, march 2007 page 129-135.
- [8]. A. Petersson, "Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines," Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2005.
- [9]. E. Bogalecka, "Power control of a double fed induction generator without speed or position sensor", IEEE fifth European conference on power electronics and applications, pp. 224- 228. Sept1993

با توجه به مشکلات کنترل‌کننده‌های برداری از جمله عدم دکوپلینگ در حالت گذرا، وجود خطای ماندگار به دلیل چشم-پوشی از مقاومت استاتور روش غیرخطی کنترل فیدبک ورودی-خروجی مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این روش توان‌های اکتیو و راکتیو به طور مستقل و پایدار کنترل شده‌اند.

۸- مراجع

- [۱] محمد ناصر هاشم نیا، کنترل توان ژنراتورهای القایی تغذیه دو گانه به روش غیر خطی، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، شهریورماه ۱۳۸۷.
- [۲] سیستم‌های کنترل غیرخطی، دکتر حسن خلیل، ترجمه دکتر غلامعلی منتظر، مرکز انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، سال ۱۳۸۰.
- [۳] آشنایی با سیستم های کنترل dcs، شهرام فهیمی، مرکز آموزشی گروه صنعتی ندا.
- [4]. Shauheen zahirazami, "multi layer switching structure with periodic feedback control" proceedings of the 2006 american control confrence , USA, june14-16, 2006