

## روشی برای محاسبه دقیق مقدار مرجع زاویه توان ژنراتور سنکرون

سلمان خرم<sup>۱</sup>، حمیدرضا ایزدفر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات شاهرود، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، khorram@iau-shahrood.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، hrizadfar@semnan.ac.ir

چکیده - اصلی‌ترین متغیر در مباحث پایداری سیستم قدرت، زاویه توان ژنراتور می‌باشد. وجود یک کنترل‌کننده زاویه توان باعث می‌شود سیستم بتواند اغتشاشات بزرگتری را برای مدت زمانی بیشتر تحمل کند. از این رو محققان همواره به دنبال راه‌حلهایی برای کنترل زاویه توان ژنراتور و در نتیجه کارکرد ایمن‌تر سیستم قدرت بوده‌اند. برای اجرای یک کنترل مناسب نیاز به محاسبه یک مقدار مطلوب به عنوان مقدار مرجع زاویه توان امری اجتناب‌ناپذیر بوده‌است. در این مقاله ابتدا روشی برای تخمین زاویه توان ژنراتور سنکرون، تنها با استفاده از سیگنالهای توان اکتیو، توان راکتیو و ولتاژ خروجی ژنراتور سنکرون و بدون استفاده از پارامترهای دینامیکی معرفی می‌شود. سپس نحوه محاسبه مقدار مرجع کنترلر زاویه توان بیان می‌گردد. یک ژنراتور سنکرون منفرد متصل به شبکه بینهایت در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و نتایج تحلیل می‌شود. کلید واژه - زاویه توان، ژنراتور سنکرون.

طرف روتور روی استاتور و ولتاژ خروجی ژنراتور [۲]. تعریف دیگر زاویه توان تفاوت موقعیت زاویه‌ای روتور با محوری که با سرعت سنکرون می‌چرخد است [۳]. این زاویه در واقع اختلاف زاویه مکانیکی بین میدان مغناطیسی روتور و شار مغناطیسی آرمیچر ژنراتور سنکرون می‌باشد [۴].

افزایش بارگذاری روی یک ژنراتور منجر به افزایش زاویه توان می‌شود و افزایش بیش از حد مجاز زاویه توان، نقطه کار ژنراتور را وارد ناحیه کار ناپایدار خواهد کرد. در بسیاری از سیستم‌های قدرت هیچ‌المانی به‌طور مستقل وظیفه کنترل زاویه توان را بر عهده ندارد. با این وجود در نقاط کاری که به‌اندازه کافی از حدود پایداری دور است، نوسانات زاویه توان میرا می‌شود. مشکل زمانی به وجود می‌آید که یک اغتشاش به اندازه کافی بزرگ به سیستم اعمال شود و با افزایش بیش از حد زاویه توان، سیستم را وارد ناحیه ناپایدار کند. این امر در نهایت منجر به از دست رفتن سنکرونیزم خواهد شد. تحت چنین شرایطی وجود یک کنترل‌کننده زاویه توان مجزا که زاویه توان را تا مقدار مجاز کاهش دهد، می‌تواند سیستم را از ناپایدار شدن و خروج از سنکرونیزم نجات دهد. از این رو محققان همواره به دنبال راه‌حلهایی برای کنترل زاویه توان ژنراتور و در نتیجه کارکرد ایمن‌تر سیستم قدرت بوده‌اند. برای اجرای یک کنترل مناسب نیاز به محاسبه یک مقدار مطلوب به عنوان مقدار مرجع زاویه

### ۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت امروزی بسیار عظیم و پیچیده بوده و با افزایش روزافزون تقاضا و به دلایل اقتصادی نقطه کار ژنراتورهای سیستم قدرت از نظر پایداری به نقاط مرزی نزدیک می‌شود. مسأله پایداری سیستم قدرت به‌طور عمده، حفظ حالت سنکرونیزه بین ماشین‌های سنکرون به هم پیوسته است [۱]. پایدار بودن سیستم قدرت، حدودی را برای عملکرد ژنراتور ایجاد می‌کند که در صورت عبور از این حدود پایداری سیستم به مخاطره می‌افتد.

اصلی‌ترین متغیر در محاسبات مربوط به مسئله پایداری ژنراتور زاویه توان (زاویه بار) است. با افزایش بیش از حد زاویه توان، خطر تجاوز از محدوده عملکرد پایدار ژنراتور را تهدید می‌کند. برای رفع این مشکل می‌بایست با استفاده از روش‌های کنترلی زاویه توان را کاهش داد، اما با کاهش بیش از حد زاویه توان، توان اکتیو تحویلی ژنراتور از حد مجاز کمتر می‌شود. پس برای بهبود کارکرد پایدار ژنراتور لازم است زاویه توان ژنراتور به گونه‌ای کنترل گردد که اولاً قیود و حدود پایداری رعایت شود و ثانیاً توان اکتیو تحویلی ژنراتور بصورت بهینه تنظیم گردد. زاویه توان یا زاویه بار عبارتست از زاویه بین ولتاژ القا شده از

ندارد. بنابراین شناسایی و تخمین سیگنال زاویه توان از سیگنالهای برداشتی در آزمایش درحین کار برای شناسایی پارامترهای دینامیکی ژنراتور سنکرون بسیار موثر می‌باشد [۳]. لذا ارائه روشی برای تخمین زاویه توان بدون استفاده از پارامترهای دینامیکی بسیار مفید خواهد بود.

در مقابل روش‌های تخمین، روش‌های اندازه‌گیری زاویه توان قرار دارند. مشکل اصلی روش‌های اندازه‌گیری نامشخص بودن موقعیت زاویه‌ای روتور و در دسترس نبودن موقعیت ولتاژ القایی داخل استاتور است. برای غلبه بر این مشکل باید از سنسورهای برای تعیین موقعیت و پروسسورهای برای تحلیل آن استفاده کرد که ضمن عدم صرفه اقتصادی، در بسیاری از موارد استفاده از چنین لوازم اضافی اساساً امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این مقاله ابتدا روشی برای تخمین زاویه توان ژنراتور سنکرون، تنها با استفاده از سیگنالهای توان اکتیو، توان راکتیو و ولتاژ خروجی ژنراتور سنکرون معرفی می‌گردد. روش پیشنهادی زاویه توان ژنراتور را بدون استفاده از پارامترهای دینامیکی محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از روش تخمین مطرح شده، چگونگی محاسبه یک مقدار مرجع مناسب برای زاویه توان تشریح می‌گردد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام گرفته است. به عنوان مثال در [۵] تخمین زاویه توان با استفاده از دیاگرام برداری  $V-I$  ژنراتور سنکرون و با فرض معلوم بودن  $Xq$  انجام گرفته است. در [۶] نیز همان روش استفاده شده با این تفاوت که پارامترهای ترانسفورماتور و خط انتقال هم در نظر گرفته شده است. [۷] با استفاده از یک آنکدر دیجیتال به همراه یک پروسسور دیجیتال موقعیت روتور را شناسایی و تحلیل کرده و زاویه توان را محاسبه می‌کند. [۸] برای اندازه‌گیری زاویه توان موقعیت زاویه‌ای روتور ژنراتور قطب برجسته را با استفاده از یک آنکدر نوری مورد سنجش قرار می‌دهد. [۹] روشی دیگر برای تخمین ارائه کرده و در آن برای حذف حساسیت روش تخمین نسبت به تغییر پارامترهای دینامیکی، با اعمال یک اغتشاش کوچک، مودهای دینامیکی در حالت ماندگار به صورت عددی محاسبه شده است. مقدار محاسبه شده ثابت فرض شده و در معادله‌ی مربوط به زاویه توان قرار گرفته است. [۱۰] اندازه‌گیری زاویه توان را بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام توسط تعداد زیادی سنسور انجام می‌دهد. در [۱۱] با انجام یک مسئله بهینه‌سازی،

توان امری اجتناب‌ناپذیر بوده است. لذا برای تحلیل مباحث پایداری و کنترل ژنراتور به گونه‌ای که حتی پس از مواجهه با یک اختلال یا اغتشاش در محدوده پایدار باقی بماند دانستن موقعیت زاویه توان ژنراتور امری حیاتی می‌باشد و این در حالی است که در بسیاری از موارد سیگنال زاویه توان در عمل قابل برداشت و ثبت نیست و در مواردی نیز ثبت سیگنال زاویه توان به دلیل استفاده از سنسورهای اضافی از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. از این رو تخمین زاویه توان ژنراتور با استفاده از سیگنال‌هایی مانند ولتاژ و جریان که در حالت کار عادی ژنراتور در دسترس هستند بسیار سودمند می‌نماید. به هر روی هم اندازه‌گیری و هم تخمین زاویه توان یکی از موضوعاتی است که نظر محققان زیادی را به خود جلب کرده است.

توجه به این نکته ضروری است که در اینجا منظور از تخمین زاویه توان محاسبه مقدار لحظه‌ای زاویه توان ژنراتور است و این مقدار با توجه به سیگنالهای خروجی ژنراتور در هر لحظه محاسبه می‌شود درحالی‌که مقدار مرجع زاویه توان مقدار مطلوب زاویه توان است که مستقل از اینکه سیگنالهای خروجی چه مقداری دارند، باید رفرنس مورد نیاز کنترلر زاویه توان را تامین کند. در ادامه ابتدا در بخش ۲ روشی برای تخمین زاویه توان معرفی می‌کنیم و در بخش ۳ مقدار مرجع زاویه توان محاسبه می‌گردد.

## ۲- تخمین زاویه توان ژنراتور سنکرون

در بسیاری از روش‌های پیشنهاد شده برای تخمین زاویه توان، پارامترهای دینامیکی معلوم و مقدار آن در نقاط کار مختلف ثابت فرض می‌شود. برای شناسایی پارامترهای دینامیکی ژنراتور سنکرون روش‌های مختلفی در دو حالت ایستا و در حین کار وجود دارد. آزمایش‌های در حالت ایستا در مقادیر پایین ولتاژ و شار و در نقاطی دورتر از نقطه کار صورت می‌گیرد و بدین ترتیب پارامترهایی که از روش‌های ایستا به دست آورده می‌شوند، ممکن است نتوانند وضعیت‌های مختلف کاری ژنراتور را در حالات بارگذاری مختلف نشان دهند و احتیاج به تصحیح دارند. روشهای درحین کار، برای محاسبه مقادیر دینامیکی زاویه توان را معلوم فرض می‌کنند اما در برخی موارد عملی و در نیروگاه‌های بزرگ خروجی برای ثبت سیگنال زاویه توان وجود

در روابط فوق:

S: توان ظاهری خروجی ژنراتور

P: توان اکتیو خروجی ژنراتور

Q: توان راکتیو خروجی ژنراتور

$V_t$ : ولتاژ ترمینال ژنراتور

I: جریان ترمینال ژنراتور

$X_q$ : راکتانس سنکرون محور عرضی

R: مقاومت استاتور

$\varphi$ : اختلاف زاویه ولتاژ و جریان پایانه

$\delta$ : زاویه توان ژنراتور سنکرون است.

بر اساس معادلات ولتاژ ماشین سنکرون و با استفاده از تبدیل پارک، ولتاژ محور مستقیم مدل حوزه پارک ژنراتور سنکرون  $V_d$  بر اساس معادله (۴) بیان می شود  
[۱ و ۲ و ۳ و ۱۲ و ۱۶ و ۱۷]:

$$V_d = X_q I_q \quad (4)$$

از طرفی با توجه به دیاگرام فیزوری می توان ولتاژ  $V_d$  را به صورت رابطه‌ی (۵) نوشت [۱ و ۲ و ۳ و ۵ و ۱۲ و ۱۷]:

$$V_d = V_t \sin \delta \quad (5)$$

با ترکیب روابط (۴) و (۵) به رابطه‌ی (۶) می رسیم:

$$X_q = \frac{V_t \sin \delta}{I_q} \quad (6)$$

همچنین می توان جریان  $I_q$  را به صورت زیر بدست آورد [۱ و ۲ و ۳ و ۱۸]:

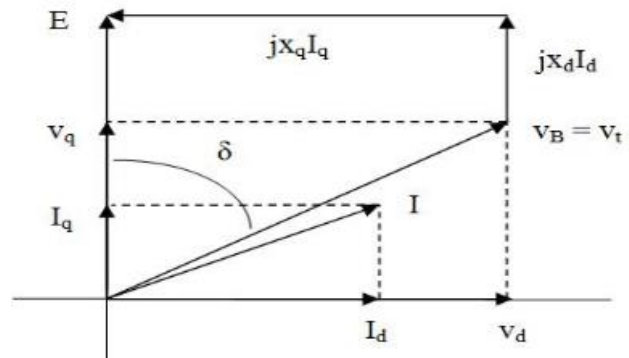
$$I_q = I \cos(\delta + \varphi) \quad (7)$$

در مورد رابطه فوق باید دقت کرد که زاویه توان، زاویه بین ولتاژ القا شده‌ی میدان  $E_f$  و ولتاژ ترمینال  $V_t$  است. در بی باری این دو ولتاژ برهم منطبق بوده و زاویه توان صفر است. در این حالت ولتاژها هم راستا با محور  $q$  می باشند. پس از بارگذاری، ولتاژ  $V_t$  به اندازه‌ی  $\delta$  از ولتاژ القا شده  $E_f$  عقب می افتد ولی  $E_f$  در همان موقعیت قبل می ماند.  $E_f$  منطبق بر محور  $q$  است. برخی مقالات آنرا با اندیس  $q$  نمایش داده ( $E_q$ ) و زاویه توان را زاویه بین  $V_t$  و محور  $q$  دانسته اند. از طرفی ولتاژ ترمینال  $V_t$  و جریان ترمینال  $I$  به اندازه‌ی  $\varphi$  اختلاف زاویه دارند. پس می توان نتیجه گرفت که زاویه بین جریان  $I$  با محور  $q$  برابر است با  $(\delta + \varphi)$ . پس اگر بخواهیم جریان  $I$  با دو مولفه  $d$  و  $q$  معرفی شود:

پارامترهای ژنراتور و زاویه توان به طور هم زمان تخمین زده می شوند. در روش پیشنهادی در [۱۲] از سنسور فاصله هوایی خازنی استفاده می شود. در [۱۳] علاوه بر سنسور فاصله هوایی از سنسور چگالی شار هم استفاده شده. [۱۴] تخمین زاویه توان ماشین سنکرون با سیستم تحریک آهن ربای دائم را بر پایه‌ی تخمین شار پیوندی انجام داده است. در نهایت [۱۵] تخمین زاویه توان را بر اساس شبکه عصبی انجام می دهد.

## ۲-۱- تشریح روابط تخمین زاویه توان ژنراتور سنکرون

شکل ۱ دیاگرام فیزور ژنراتور سنکرون را نشان می دهد [۱ و ۲]. در این شکل برای سادگی مقاومت استاتور  $R=0$  فرض شده است. دیاگرام فیزور ژنراتور سنکرون در حالتی که  $R$  مخالف صفر است با کمی تغییر در شکل زیر بدست می آید.



شکل ۱: دیاگرام فیزوری ژنراتور سنکرون

با کمی کار هندسی روی دیاگرام شکل ۱ می توان رابطه (۱) را برای زاویه توان بدست آورد [۱ و ۲].

$$\delta = \arctg \frac{I X_q \cos \varphi - I R \sin \varphi}{V_t + I X_q \sin \varphi + I R \cos \varphi} \quad (1)$$

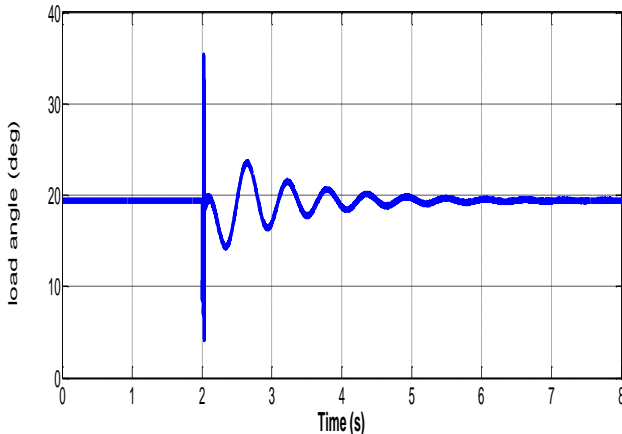
با توجه به رابطه‌ی توان های اکتیو، راکتیو و ظاهری که در رابطه‌ی (۲) آمده است و با ضرب کردن S در صورت و مخرج معادله‌ی (۱) به رابطه‌ی (۳) می رسیم. این رابطه در کتب و مقالات مختلف بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است [۱ و ۲ و ۳ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸].

$$\begin{cases} S^2 = P^2 + Q^2 \\ P = S \cos \varphi \\ Q = S \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

$$\delta = \arctg \frac{I X_q P - I R Q}{V_t S + I X_q Q + I R P} \quad (3)$$

شبه‌سازی را در محیط سیمولینک متلب نمایش می‌دهد. برای بررسی عملکرد روش تخمین ارائه شده تحت شرایط گذرای ناشی از مواجه شدن ژنراتور با یک اغتشاش شدید، یک اتصال کوتاه سه فاز به مدت ۲۰ ms به پایانه‌های ژنراتور سنکرون اعمال شده است.

شکل ۳ مقدار تخمین زده شده‌ی زاویه توان را تحت این شرایط نمایش می‌دهد. شکل ۴ مقدار خطای تخمین را نمایش می‌دهد. خطای تخمین حاصل تفاضل مقدار تخمین زده شده‌ی زاویه توان با مقدار واقعی آن می‌باشد. همان طور که از نتایج مشخص است خطای حالت ماندگار زاویه بار، قبل و بعد از اتصال کوتاه، بسیار کم و در حدود صفر است. معمولاً بارگذاری ژنراتورهای سنکرون به گونه‌ای است که زاویه توان ژنراتور از ۳۰ درجه تجاوز نکند. این نتیجه می‌داند این مطلب است که روش مطرح شده برای تخمین، تحت شرایط کار عادی ژنراتور و در محدوده‌ی مجاز تغییرات زاویه توان، صحت بسیار بالایی از خود نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ بیشترین مقدار خطای تخمین تحت شرایط گذرای ناشی از اتصال کوتاه بوده است. اتصال کوتاه موجب تغییرات شدید زاویه توان و دیگر متغیرهای مورد استفاده در رابطه‌ی (۱۳) می‌شود. با این وجود خطای تخمین تحت چنین شرایطی نیز قابل قبول است. در عمل یک تغییر شدید در متغیرها موجب به اشباع رفتن المان‌های اندازه‌گیری و در نتیجه آن ایجاد خطا در محاسبات خواهد شد. این موضوع در شبه‌سازی در نظر گرفته نشده است. وجود نویز روی سیگنال‌های برداشتی از دیگر عواملی است که می‌تواند صحت نتایج تخمین را به مخاطره بیندازد.



شکل ۳: زاویه توان ژنراتور سنکرون (درجه بر ثانیه)

$$I^2 = id^2 + iq^2 \quad (۸)$$

آنگاه اندازه‌ی مولفه Iq با توجه به اینکه این مولفه منطبق بر محور q است بصورت  $Iq = I \cdot \cos(\delta + \varphi)$  می‌باشد. این موضوع در دیگرام برداری شکل ۱ به وضوح مشخص می‌شود.

اکنون با ترکیب روابط (۶) و (۷) این رابطه بدست می‌آید:

$$Xq = \frac{Vt \cdot \sin \delta}{I \cdot \cos(\delta + \varphi)} \quad (۹)$$

و در صورتیکه زاویه‌ی  $\varphi$  را از رابطه (۱۰) محاسبه کنیم [۱ و ۲ و ۳ و ۱۸]:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (۱۰)$$

در نتیجه:

$$Xq = \frac{Vt \cdot \sin \delta}{I \cdot \cos\left(\delta + \arctg\left(\frac{Q}{P}\right)\right)} \quad (۱۱)$$

و با قراردادن معادله‌ی (۱۱) در معادله‌ی (۳) رابطه‌ی جدید برای زاویه توان بدست می‌آید:

$$\delta = \arctg \frac{I \cdot \frac{Vt \cdot \sin \delta}{I \cdot \cos\left(\delta + \arctg\left(\frac{Q}{P}\right)\right)} \cdot P - I \cdot R \cdot Q}{Vt \cdot S + I \cdot \frac{Vt \cdot \sin \delta}{I \cdot \cos\left(\delta + \arctg\left(\frac{Q}{P}\right)\right)} \cdot Q + I \cdot R \cdot P} \quad (۱۲)$$

و با ساده کردن معادله‌ی (۱۲) و حذف I از صورت و مخرج کسره‌ی جزئی حاضر در صورت و مخرج عبارت اصلی:

$$\delta = \arctg \frac{\frac{Vt \cdot \sin \delta}{\cos\left(\delta + \arctg\left(\frac{Q}{P}\right)\right)} \cdot P - I \cdot R \cdot Q}{Vt \cdot S + \frac{Vt \cdot \sin \delta}{\cos\left(\delta + \arctg\left(\frac{Q}{P}\right)\right)} \cdot Q + I \cdot R \cdot P} \quad (۱۳)$$

توجه شود که معادله‌ی زاویه توان مستقل از تغییرات مقاومت استاتور (R) است [۶ و ۷ و ۸ و ۱۰ و ۱۵] و در نتیجه با توجه به اینکه مقادیر  $Vt, I, P, S, Q$  بصورت آنلین به سادگی قابل اندازه‌گیری هستند، با قرار دادن مقدار نامی مقاومت استاتور (R) رابطه‌ی فوق یک معادله‌ی غیر خطی برحسب  $\delta$  بوده و با حل این معادله مقدار زاویه توان محاسبه می‌شود.

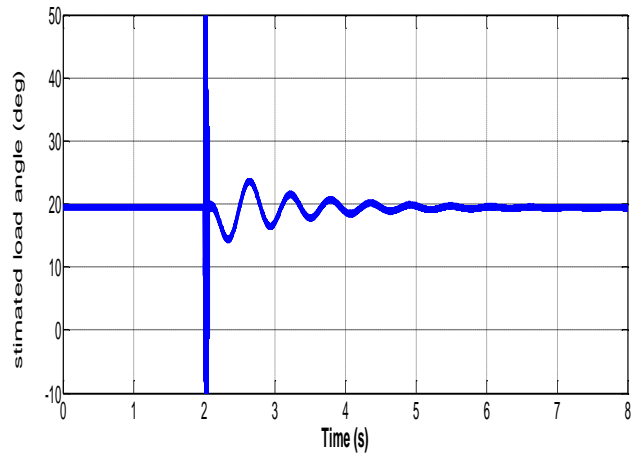
برای بررسی روش ارائه شده برای تخمین زاویه توان، از مدل‌سازی ژنراتور سنکرون در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب استفاده کرده‌ایم. شکل ۲ زاویه توان بدست آمده از نتایج

در نیروگاه‌های قدرت مقدار مطلوب زاویه توان با توجه مقدار توان اکتیو تحویلی ژنراتور تعیین می‌شود. مقدار توان اکتیو با توجه به نیاز شبکه در دوره‌های زمانی مختلف تغییر می‌کند ولی در هر بازه زمانی مقداری ثابت دارد. لذا مقدار زاویه توان در هر دوره زمانی ثابت خواهد بود. در نتیجه می‌توان این مقدار ثابت را به عنوان مقدار مرجع زاویه توان در نظر گرفت. لازم به ذکر است که منظور از توان اکتیو، مقدار مرجع توان اکتیو است که در بازه‌های زمانی مختلف مقداری ثابت دارد.

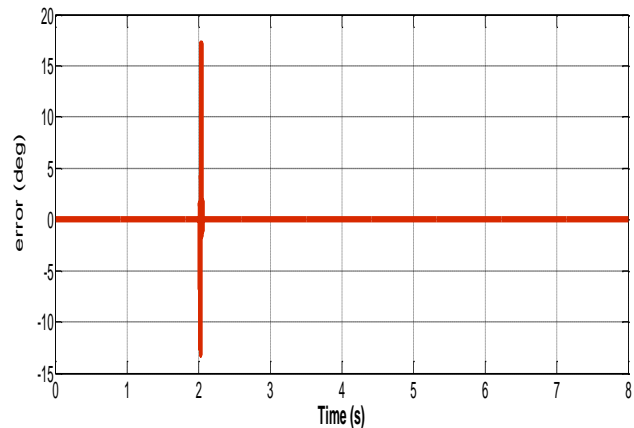
روش محاسبه مقدار مرجع زاویه توان بر اساس رابطه (۱۳) می‌باشد که در بخش دوم برای محاسبه زاویه توان معرفی گردید. در این رابطه مقادیر  $P$  و  $Vt$  به ترتیب برابر مقدار مرجع توان اکتیو و مقدار مرجع ولتاژ ژنراتور هستند. در مدل شبیه‌سازی شده در این مقاله مقدار توان اکتیو مرجع برابر  $۰,۷۵$  پریونیت و مقدار ولتاژ مرجع برابر  $۱$  پریونیت در نظر گرفته شده است. در عمل مقدار رفرنس ولتاژ ژنراتور توان اکتیو آن را تعیین می‌کند [۲۰]. این یعنی برای توان اکتیو  $Q$  نیز یک مقدار مرجع وجود دارد که این مقدار با توجه به ولتاژ مورد نیاز شبکه تعیین می‌شود. در این تحقیق این مقدار از خروجی ژنراتور اندازه‌گیری شده. مقاومت استاتور  $R$  برابر مقدار نامی  $۰,۰۰۰۲۸۵$  پریونیت می‌باشد. سیگنال جریان  $I$  همواره در دسترس و قابل اندازه‌گیری است و از خروجی ژنراتور اندازه‌گیری می‌شود. مقدار  $S$  از روی  $P$  و  $Q$  به سادگی با معادله (۲) بدست می‌آید. مقدار مرجع بدست آمده برای زاویه توان، با توجه به توضیحات فوق برابر  $۱۹,۳۸۸$  درجه می‌باشد. در صورت نیاز به افزایش یا کاهش توان اکتیو ژنراتور در دوره‌های زمانی مختلف، تغییر مقدار مرجع زاویه توان هم‌زمان با تغییر مقدار مرجع توان اکتیو انجام خواهد شد. برای این منظور مقدار مرجع توان اکتیو را به  $۰,۸$  پریونیت تغییر داده و شبیه‌سازی را مجدداً انجام دادیم. جدول ۱ مقدار مرجع بدست آمده برای زاویه توان را با توجه به مقادیر مرجع توان اکتیو و ولتاژ در نظر گرفته شده در دو وضعیت آزمایش فوق‌الذکر نشان می‌دهد. تمامی محاسبات از طریق برنامه نویسی کامپیوتری در نرم‌افزار متلب ورژن ۲۰۱۳ انجام شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور محاسبه مقدار مرجع زاویه توان



شکل ۳: زاویه توان تخمین زده شده (درجه بر ثانیه)



شکل ۴: خطای تخمین زاویه توان (درجه بر ثانیه)

### ۳- محاسبه مقدار مرجع زاویه توان

مطالعه نشریات و مقالات سال‌های اخیر نشان می‌دهد که تحقیق در زمینه کنترل زاویه توان با استفاده از یک کنترلر زاویه توان مجزا کمتر مورد توجه محققین بوده ولی اخیراً برخی پژوهشگران نشان داده‌اند سیستم تحریک دارای کنترلر زاویه توان کارکرد ایمن ژنراتور را در نقطه‌ای نزدیکتر به حدود پایداری ممکن می‌سازد [۱۹ و ۲۰]. اساس کار غالب این مقالات کنترلر زاویه توان از طریق کنترل کردن ولتاژ تحریک می‌باشد. روش آنها بکارگیری یک کنترلر PID موازی با کنترل‌کننده ولتاژ تحریک است. در این روش‌ها تعیین رفرنس مناسب برای کنترلر زاویه توان بسیار حساس و اثرگذار است. در واقع مقدار انتخاب شده برای رفرنس کنترل‌کننده باید این امکان را برای ژنراتور فراهم کند که به سرعت از حدود پایداری دور شود.



و دومین کنفرانس بین المللی برق،  
۲۰۰۷.

- [4] A.Abdul Ghani Abro and J. Mohamad Saleh, *ANN-Based Synchronous Generator Excitation For Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation*, School of Electrical & Electronics Engineering, Engineering Campus, Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia, Published online: 10 Jan 2013.
- [5] T. Idzotic, G. Erceg, D. Sumina "Load Angle Estimation of a Synchronous Generator" IEEE MELECON 2004, Dubrovnik, Croatia May 12-15, 2004
- [6] H. Cucek, D. Sumina and N. Švigir "Synchronous Generator Load Angle Estimation" IEEE 978-1-4244-5795-3/10/\$26.00 ©2010
- [7] T. Idzotic, G. Erceg, D. Sumina "Synchronous Generator Load Angle Measurement and Estimation" ISSN 0005-1144 ATKAAF 45(3-4), 179-186, 2004
- [8] D. Sumina, A. Šala, R. Malaric "Determination of Load Angle for Salient-pole Synchronous Machine" Measurement Sciencereview, Volume 10, No. 3, 2010
- [9] J. Turcek, P. Sekerak and D. Hropko "Estimation of Load Angle Using Measured Parameters of Synchronous Machine" IEEE 978-1-4673-1179-3/12/\$31.00 ©2012
- [10] Y. Jin et al "The Power Angle and Phase Measurement Units Based Wide Area Measurement System and Its Application" 2007 iRep Symposium- Bulk Power System Dynamics and Control - VII, Revitalizing Operational Reliability, Charleston, South Carolina, USA, August 19-24, 2007
- [11] E. P. T. Cari, L. F. C. Alberto, N. G. Bretas "A Novel Methodology for Power Angle Estimation of Synchronous Generator Based on Trajectory Sensitivity Analysis" IEEE 978-1-4244-4241-6/09/\$25.00 ©2009
- [12] M. Despalatovic et al "On-Line Hydrogenerator Power Angle and Synchronous Reactances Determination Based on Air Gap Measurement" IEEE 0-7803-8718-x/04/\$20.00 ©2004
- [13] M. Despalatovi'c, M. Jadri'c and B. Terzi'c "Real-time power angle determination of salient-pole synchronous machine based on air gap measurements" Electric Power Systems Research 78 1873-1880, 2008.
- [14] J. Luukko, M. Niemela" and J. Pyrho" nen "Estimation of rotor and load angle of direct-torque-controlled permanent magnet synchronous machine drive" IET Electr. Power Appl. 1, (3), pp. 299-306, 2007
- [15] M. Miskovic and M. Mirosevic "Load Angle Estimation of a Synchronous Generator using dynamical neural networks" Energija, god. 58, No. 2., pp. 174-191, 2009.
- [16] Z. Li, Y. Yang<sup>2</sup> and X. Baa "Simulation and Analysis of the Third-order Model of Synchronous Generator Based on MFC" Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, August 9 - 12, 2009.
- [17] V. Venkatasubramanian and R. G. Kavasseri "Direct Computation of Generator Internal Dynamic States from Terminal Measurements" Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences - 2004
- [18] R. Natarajan and J. Wang "Simulation of the Synchronous machine parameters from performance relations" Electric Power Systems Research 20-173-179, 1991.
- [19] T. Idzotic., G. Erceg, D. Sumina, "Limitation of Minimal Excitation Current by Load Angle Regulation", Faculty of Electrical Engineering and Computing Unska, Zagreb, Croatia, 2004.
- [20] D. SUMINA, N. BULIĆ, M. VRAŽIĆ, "Load Angle Control of a Synchronous Generator", PRZEGLĄD ELEKTRO TECHNICZNY (Electrical Review), ISSN: 0033-2097, R. 88 NR 3a, 2012.

ژنراتور سنکرون ابتدا روشی برای تخمین زاویه توان ژنراتور سنکرون، تنها با استفاده از سیگنالهای توان اکتیو، توان راکتیو، جریان و ولتاژ خروجی ژنراتور سنکرون معرفی شد. روش مطرح شده برای تخمین، تحت شرایط کار عادی ژنراتور و در محدوده‌ی مجاز تغییرات زاویه توان، صحت بسیار بالایی از خود نشان می‌دهد. مزیت اصلی فرمول ارائه شده این است که علاوه بر اینکه زاویه توان ژنراتور بدون استفاده از پارامترهای دینامیکی محاسبه می‌شود، بسیار ساده بوده و پیچیدگی‌های روش‌های متداول را ندارد. مدل ژنراتور سنکرون در محیط سیمولینک نرم افزار متلب شبیه سازی شد و نتایج تخمین با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه شد. سپس بر مبنای شرایط کار واقعی نیروگاه‌ها و براساس فرمول بدست آمده برای تخمین زاویه توان با استفاده از مقادیر مرجع ولتاژ و توان اکتیو ژنراتور مقدار مرجع زاویه توان برای سیستم شبیه‌سازی شده در دو وضعیت کاری مختلف محاسبه شد. در تحقیقات بعدی این روش برای محاسبه مقدار مرجع یک کنترلر زاویه توان جاسازی شده در سیستم تحریک ژنراتور سنکرون استفاده خواهد شد.

جدول ۱: مقادیر بدست آمده از شبیه‌سازی

متغیرهای مورد استفاده در رابطه (۱۳)	آزمایش اول	آزمایش دوم
مقدار مرجع توان اکتیو (پریونیت)	۰٫۷۵	۰٫۸
مقدار مرجع ولتاژ (پریونیت)	۱	۱
محاسبه مقدار مرجع زاویه توان (درجه)	۱۹٫۳۳۸	۱۹٫۵۵۸

## مراجع

- [۱] پرابها کندور، "پایداری و کنترل سیستم‌های قدرت" ترجمه حسین سیفی و علی خاکی صدیق، ۱۳۷۹. تهران، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۲] مهدی کراری "دینامیک و کنترل سیستم‌های قدرت" دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۸۴.
- [۳] اسماعیل قهرمانی، مهدی کراری و محمد باقر منهای "تخمین زاویه توان ژنراتور سنکرون با پارامترهای دینامیکی نامعلوم و با استفاده از سیگنالهای برداشتی در حین کار" بیست