

### تأثیر عدم دقت پارامترهای ژنراتور سنکرون بر عملکرد پایداری گذرای ژنراتورها و سیستم قدرت

مینا رضایی

rezaii.mina@monenco.com

اکبر بیگ خورمیزی

akbar\_beik@yahoo.com

محمد رضا آقا محمدی

aghamohammadi@pwut.ac.ir

مرکز مطالعات دینامیکی شبکه برق ایران  
دانشگاه صنعت آب و برق  
تهران - ایران

واژه‌های کلیدی: ژنراتور سنکرون، پارامترهای دینامیکی، پایداری گذرا، عدم دقت

#### چکیده

پارامتر روی پایداری گذرای سیستم قدرت بررسی گردیده است. برای این منظور حساسیت  $\delta_{FS}$  نسبت به هر پارامتر محاسبه گردیده است. از این حساسیت برای اولویت بندی تأثیر پارامترها و نیز تعیین موثرترین پارامتر بر رفتار گذرای ژنراتور استفاده شده است. همچنین تأثیر تغییر پارامتر ژنراتورهای دیگر بر رفتار یک ژنراتور دیگر بررسی و مطالعه شده است. بررسی ها نشان می دهند که در کلیه حالات عدم دقت در شناسایی پارامتر H بیشترین تأثیر را بر نتایج پایداری ژنراتورها خواهد داشت روش پیشنهادی روی شبکه ۳۹ باس IEEE آزمایش شده است.

#### ۱- مقدمه

امروزه با گسترش روزافزون سیستم های قدرت و لزوم بهره برداری از آنها در نقاط نزدیک به حدود پایداری شان به خاطر

در این مقاله، تأثیر عدم دقت پارامترهای دینامیکی یک ژنراتور سنکرون بر پایداری گذرای خودش و دیگر ژنراتورها در پی وقوع اختلال بررسی شده است. تغییرات زاویه روتور در خیز اول بعنوان شاخصی برای رفتار دینامیکی ژنراتور استفاده شده است. برای پایداری ژنراتور دو نوع خطا که شامل خطای متوسط بر روی خطی نزدیک به ژنراتور مورد مطالعه و خطای شدید بر روی باس ژنراتور می باشند اعمال گردیده است. برای بررسی رفتار گذرای ژنراتور، پارامترهای ژنراتور به دو صورت مستقل و بدون رعایت همبستگی با سایر پارامترها و نیز با رعایت شرط همبستگی تغییر داده شدند و در پی آن دامنه زاویه روتور در خیز اول ( $\delta_{FS}$ ) محاسبه گردید. در این مقاله با استفاده از مفهوم آنالیز حساسیت عملکرد دینامیکی ژنراتور نسبت به پارامترهای دینامیکی آن تأثیر عدم دقت هر

شبیه‌سازی سیستم قدرت همراه با میزانی از خطا باشد. امروزه روش‌های موجود برای تعیین پارامترهای ژنراتور سنکرون همگی با نوعی از خطا همراه می‌باشند لذا تعیین حد دقت لازم برای شناسایی پارامترها که سبب تطابق قابل قبولی از نتایج شبیه‌سازی با رفتار واقعی ژنراتور می‌گردد اهمیت زیادی دارد.

در این مقاله، میزان خطای قابل قبول در شناسایی و تعیین هر یک از پارامترهای ژنراتور سنکرون از منظر تأثیر گذاری آن‌ها بر رفتار دینامیکی ژنراتورها بررسی گردیده است. بدین معنی که چنانچه مقدار هر پارامترها در بازه دقت قابل قبول خود تغییر کند شاخص‌های رفتار دینامیکی ژنراتور سنکرون تغییر قابل توجهی نخواهند داشت. در این مقاله، پایداری گذرای توان-زاویه پدیده‌ای است که از منظر آن و نحوه تأثیر گذاری پارامترهای ژنراتور سنکرون بر آن به بررسی میزان دقت مورد نیاز برای هر پارامتر پرداخته شده است. برای این منظور زاویه خیز اول  $\delta_{FS}$  ژنراتورها بعنوان شاخص رفتار دینامیکی در نظر گرفته شده است. با تعریف درصد معینی از خطای قابل قبول برای تغییرات زاویه خیز اول می‌توان در صد خطای قابل قبول و باند دقت لازم برای شناسایی هر یک از پارامترهای ژنراتور را تعیین نمود.

## ۲- مدل‌سازی ژنراتور سنکرون

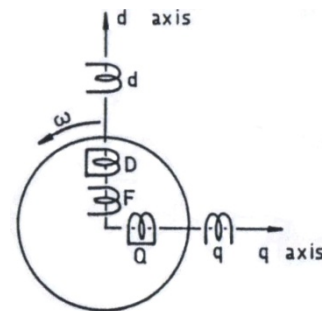
۲-۱- نقش مدل‌سازی ژنراتور در پایداری سیستم قدرت  
ماشین‌های سنکرون از مهمترین عناصر تشکیل دهنده‌ی یک سیستم قدرت محسوب می‌شوند. مطالعات مختلف مورد نیاز برای تحلیل و بررسی رفتار سیستم‌های قدرت نشان می‌دهد که مدل‌سازی مناسب ژنراتورهای سنکرون بخش اساسی از مدل‌سازی سیستم قدرت را خصوصا در مطالعات گذرا از قبیل محاسبات اتصال کوتاه، پایداری اغتشاش کوچک، پایداری گذرا و دینامیکی، نوسان‌های زیرسنکرون و طراحی کنترل‌کننده‌ها تشکیل می‌دهد. مدل‌سازی دقیق و مناسب ژنراتورهای سنکرون دارای تأثیر بسزایی بر نتایج مطالعات پایداری سیستم قدرت و ژنراتورها می‌باشد بگونه‌ای که مدل‌سازی نادرست ژنراتورها می‌تواند نتایج متفاوتی از پایداری ژنراتورها و سیستم را ایجاد نماید.

مسائل اقتصادی، حفظ امنیت سیستم‌های قدرت به مسئله‌ای بسیار مهم تبدیل شده است. در مطالعات امنیت دینامیکی سیستم، مطالعات پایداری سیستم به خصوص پایداری گذرا از اهمیت خاصی برخوردار است. از آن جا که پایداری گذرای سیستم قدرت به طور عمده به حفظ حالت سنکرونیزم بین ژنراتورهای شبکه بستگی دارد لذا مدل‌سازی نسبتا دقیق ژنراتورها در این نوع پایداری به نظر ضروری می‌باشد. شناسایی و استخراج هر چه دقیقتر پارامترهای ژنراتور سنکرون عامل تعیین کننده‌ای در مدل‌سازی دقیق ژنراتورها در مطالعات پایداری گذرا است. با توجه به نقش کلیدی ژنراتورهای سنکرون اینگونه بنظر می‌رسد که برای تحلیل هر چه واقعیت رفتار سیستم‌های قدرت به مدل هرچه دقیقتری از ژنراتورهای سنکرون نیاز است [۱]. در بسیاری از روش‌های مدل‌سازی ماشین‌های سنکرون [۲] از تئوری و مدل پارک [۳] برای مدل‌سازی استفاده می‌کنند. در بسیاری از روش‌ها با فرض یک ساختار شناخته شده برای ماشین سنکرون با روش‌هایی چون اتصال کوتاه، پاسخ فرکانسی ثابت (SSR) [۹۸] و پاسخ فرکانسی مدار باز (OCFR) به تعیین پارامترهای ماشین سنکرون می‌پردازند. مشکل اصلی این روش‌ها که به روش‌های مدل‌سازی White-Box معروفند این است که پارامترها بصورت مجزا با استفاده از آزمایش‌های Off-line بدست می‌آیند و زمانیکه بطور همزمان استفاده می‌شوند همراه با خطا خواهند بود. این خطاها ممکن است بخاطر استفاده از یک مدل ثابت در شرایط کاری مختلف باشد. برای غلبه بر این مشکل مدل‌های زیادی بجز مدل دو محوری  $d-q$  برای ماشین سنکرون پیشنهاد شده است [۴] و [۵]. برای غلبه بر مشکلات روش‌های مدل‌سازی White-Box، در سال‌های اخیر روش‌های تعیین پارامترهای ژنراتور بر اساس اندازه‌گیری On-line مورد توجه قرار گرفته است [۶] و [۷]. روش‌های زیادی برای تعیین پارامترهای ژنراتور سنکرون در مراجع ذکر شده است [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] و [۱۳]. اما سوالی که همواره مطرح می‌باشد این است که هر یک از پارامترهای ژنراتور با چه دقتی باید تعیین گردند و اینکه آیا همگی با یک دقت باید شناسایی شوند؟. بدیهی است که خطا و عدم دقت لازم در شناسایی پارامترهای دینامیکی ژنراتورها سبب می‌گردد که هرگونه مدل‌سازی و

۲-۲- مدل پارک ژنراتور سنکرون

معادلات اصلی ماشین سنکرون توسط پارک [۳] استخراج شده‌اند که در واقع ساده‌ترین و کاربردی‌ترین معادلات لازم برای مدل‌سازی ماشین سنکرون را در بر دارند. شکل (۱) مدل پیشنهادی ماشین سنکرون را بر اساس تئوری دو محوری پارک نشان می‌دهد.

در این مدل، سیم پیچی‌های سه فاز آرمیچر با دو سیم پیچی  $d$  و  $q$  جایگزین شده‌اند. در شکل (۱) سیم پیچی‌های  $d$  و  $q$  بعنوان سیم پیچی‌های فرضی محور طولی و عرضی آرمیچر تعریف می‌شوند. همچنین سیم پیچی‌های  $D$ ,  $Q$  بعنوان سیم پیچی‌های فرضی میراکننده محور طولی و عرضی رتور می‌باشند که بصورت اتصال کوتاه شده هستند. سیم پیچی  $F$  بر روی محور  $d$  سیم پیچ تحریک است که با منبع DC تحریک می‌شود.



شکل (۱) مدل دو محوری ماشین سنکرون

معادلات اصلی ماشین بر حسب شار و جریان مغناطیسی گذرنده از سیم پیچی‌ها را می‌توان بصورت زیر نوشت [۱۵]:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_F \\ \Psi_D \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_0} \begin{bmatrix} x_d & x_{md} & x_{md} \\ x_{md} & x_F & x_{md} \\ x_{md} & x_{md} & x_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_F \\ i_D \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_0} \begin{bmatrix} x_q & x_{mq} \\ x_{mq} & x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_Q \end{bmatrix}$$

اصولا ماشین‌های سنکرون را می‌توان به دو شکل زیر مدل‌سازی نمود.

۱- مدل‌سازی الکترومغناطیسی: این مدل بر حسب کمیات لحظه‌ای جریان، شار مغناطیسی و ولتاژهای گذرنده از سیم

پیچی‌ها است و عمدتا برای مطالعه حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی استفاده می‌شود.

۲- مدل‌سازی فازوری: این مدل بر حسب کمیات فازوری ولتاژ و جریان سیم پیچی‌ها بوده و عمدتا برای مطالعه پدیده‌های پایداری سیستم قدرت استفاده می‌شود.

در مدل‌سازی فازوری، ژنراتور سنکرون براساس مدل دو محوری پارک توسط مجموعه‌ای از راکتانس‌ها و ثابت زمانی‌های محور طولی و محور عرضی که به عنوان پارامترهای عملیاتی ژنراتور سنکرون شناخته می‌شوند تعریف می‌شود. این پارامترها که حاوی اثرات سیم پیچ‌های تحریک و میراکننده هستند شامل راکتانس‌ها و ثابت زمانی‌های ماشین سنکرون برای دوره‌های زمانی تند گذر، کند گذر و ماندگار بوده که بشکل زیر تعریف می‌شوند.

$X_d$ : راکتانس سنکرون محور طولی

$X'_d$ : راکتانس کند گذر محور طولی

$X''_d$ : راکتانس تند گذر محور طولی

$X_q$ : راکتانس سنکرون محور عرضی

$X'_q$ : راکتانس کند گذر محور عرضی

$X''_q$ : راکتانس تند گذر محور عرضی

$T'_{do}$ : ثابت زمانی کند گذر مدار باز محور طولی

$T''_{do}$ : ثابت زمانی تند گذر مدار باز محور طولی

$T'_{qo}$ : ثابت زمانی تند گذر مدار باز محور عرضی

در مطالعات شبیه سازی پایداری سیستم‌های قدرت، مدل مناسب ژنراتور سنکرون در شبیه سازی عملکرد دینامیکی ژنراتور موثر بوده و دقت مدل‌سازی ژنراتور به دقت پارامترهای دینامیکی آن وابسته است. پارامترهای یک ژنراتور توسط معمولا توسط شرکت سازنده ارائه می‌شود و در غیر اینصورت می‌توان آن‌ها را با استفاده از روش‌ها و آزمایشات مختلفی تعیین کرد. بین راکتانس‌ها و ثابت زمانی‌های یک ژنراتور رابطه زیر برقرار می‌باشد [۱۵]:

$$\begin{aligned} X_d > X_q > X'_q > X'_d > X''_q > X''_d \\ T'_{do} > T''_{do} \end{aligned} \quad (1)$$

### ۳- تأثیر پارامترها بر رفتار دینامیکی ژنراتورها

#### ۳-۱- تأثیر پارامترهای دینامیکی ژنراتور بر رفتار خودش

هر یک از پارامترهای ژنراتور بر رفتار دینامیکی خودش و سایر ژنراتورها تأثیر گذار می‌باشند. روش محاسبه و تعیین میزان تأثیر گذاری هر یک از پارامترها بر رفتار دینامیکی ژنراتور و شبکه بدین ترتیب است که مقدار هر یک از پارامترهای دینامیکی ژنراتور مورد مطالعه را بطور جداگانه در بازه  $30\% -$  تا  $30\% +$  با پله های  $10\%$  نسبت به مقدار پایه آن پارامتر تغییر داده می‌شود. بدین ترتیب برای هر یک از پارامترهای ژنراتور ۷ مقدار بدست خواهد آمد. برای بررسی رفتار هر یک از ژنراتورها، دو نوع اغتشاش شدید (اتصال کوتاه سه فاز) و متوسط در نزدیکی آن اعمال می‌گردد. ابتدا دامنه خیز اول ژنراتور را به ازای مقادیر پایه پارامترها محاسبه نموده و بعنوان دامنه اول خیز پایه ثبت می‌نمائیم. سپس هر یک از پارامترهای ۱۱ گانه ژنراتور را بطور جداگانه و تک تک در ۷ پله تغییر داده و پاسخ خیز اول ژنراتور را از طریق محاسبات پایداری گذرا توسط نرم افزار **Digsilent** بدست می‌آوریم. بدین ترتیب برای هر ژنراتور علاوه بر پاسخ پایه، تعداد ۶۶ پاسخ دیگر خواهیم داشت که در مقایسه با پاسخ پایه، حساسیت دامنه خیز اول ژنراتور نسبت به پارامترهای مورد نظر محاسبه می‌گردد. همانگونه که در رابطه (۱) نشان داده شده است، بعضی از پارامترهای دینامیکی ژنراتور سنکرون نسبت به یکدیگر همبسته می‌باشند به همین دلیل بین مقدار آنها یک نوع رابطه همبستگی و سازگاری برقرار می‌باشد. براین اساس تغییر مقدار هر یک از پارامترهای دینامیکی ژنراتور به دو صورت، بدون رعایت همبستگی و سازگاری بین پارامترها و با رعایت همبستگی و سازگاری بین پارامترها مطابق رابطه (۱) انجام می‌گیرد.

در حالت اول، مقدار یک پارامتر بدون توجه به همبستگی آن با سایر پارامترها تغییر داده می‌شود. در واقع بدون رعایت وابستگی رابطه (۱) مقدار هر پارامتر مستقلاً تغییر داده شده و محاسبات شبیه سازی بر این اساس انجام می‌شود.

پارامترهای دینامیکی متفاوت منجر به رفتارهای دینامیکی متفاوت ژنراتور خواهند شد. حال سوال این است که در تعیین پارامترهای ژنراتور چه مقدار خطا می‌تواند جایز باشد. از آنجاییکه تغییر در پارامترهای ژنراتور می‌تواند رفتار دینامیکی آن را تغییر دهد، بنابراین رفتار دینامیکی ژنراتور را می‌توان بعنوان معیاری برای ارزیابی مقدار مجاز خطا در پارامترهای ژنراتور مورد استفاده قرار داد. به عبارت دیگر تا زمانی که مقدار تغییر در پارامترهای دینامیکی ژنراتور منجر به تغییر فاحش و یا غیر قابل قبولی در رفتار دینامیکی ژنراتور نشود، آن میزان تغییر بعنوان عدم دقت مجاز برای پارامتر شناخته می‌شود.

#### ۳-۲- معیار دقت مدل ژنراتور سنکرون

همانطور که پیش‌تر ذکر شد عملکرد دینامیکی ماشین سنکرون و در نتیجه رفتار دینامیکی سیستم قدرت به دقت مدل مورد استفاده برای ژنراتور وابسته است. بمنظور ارزیابی میزان عدم دقت مجاز برای پارامترهای ژنراتور نیاز است شاخصی در نظر گرفت. در این مقاله عملکرد دینامیکی ژنراتور به عنوان معیاری برای ارزیابی میزان عدم دقت مجاز پارامترهای دینامیکی آن به کار می‌رود. در پی رخداد یک خطای نسبتاً بزرگ و در طول دوره گذرا، دامنه نوسان زاویه رتور بعنوان یک شاخص در نظر گرفته می‌شود. هرچه دامنه نوسان رتور در خیز اول کمتر باشد ژنراتور از حاشیه پایداری بیشتری برخوردار خواهد بود. برای این منظور حساسیت دامنه خیز اول رتور نسبت به هر یک از پارامترهای ماشین محاسبه می‌شود. هر چه این حساسیت بزرگتر باشد نشان دهنده آن است که تغییر پارامتر مورد نظر تأثیر بیشتری بر پایداری ژنراتور دارد و لذا محدوده مجاز برای عدم دقت در پارامتر کوچکتر خواهد بود. بر اساس بزرگی حساسیت دامنه زاویه رتور در خیز اول نسبت به پارامترهای ژنراتور، موثرترین پارامترها تأثیر گذار بر پایداری گذرای ژنراتور معین خواهد شد.

## ۴- آنالیز حساسیت رفتار دینامیکی ژنراتور

همانگونه که ذکر شد حساسیت تغییرات زاویه رتور ژنراتور نسبت به تغییر در پارامترهای آن می‌تواند بعنوان شاخصی برای ارزیابی تأثیر تغییر پارامترهای ژنراتور بر پایداری گذرا مورد استفاده قرار گیرد. زاویه رتور ژنراتور یک تابع غیر خطی و بسیار پیچیده از پارامترهای ژنراتور است. برای ارزیابی حساسیت تغییرات زاویه رتور نسبت به پارامترهای ژنراتور چون یک تابع تحلیلی در دسترس نیست لذا در این مقاله از روش عددی و محاسبات شبیه سازی حوزه زمان استفاده گردیده است. برای این منظور هر یک از پارامترهای دینامیکی ژنراتور را از مقدار پایه در بازه  $30\% \pm$  تا  $30\% +$  با پله‌های  $10\%$  تغییر داده و طبق فرآیند زیر حساسیت شاخص پایداری را نسبت به هر یک از پارامترها محاسبه می‌نمائیم.

با فرض اینکه پارامتر مورد نظر  $Xt$  و زاویه رتور متناظر با هر پله تغییرات  $Xt$  بصورت  $\delta_{FS}(Xt)$  باشد آنگاه می‌توان نوشت:

$$\Delta Xt = Xt_{+30\%} - Xt_{-30\%}$$

$$\Delta \delta_{F.S} = \delta_{F.S}(Xt_{+30\%}) - \delta_{F.S}(Xt_{-30\%}) \quad (2)$$

بطوریکه  $\Delta Xt$  تغییرات پارامتر مورد نظر و  $\Delta \delta_{FS}$  تغییرات زاویه رتور در خیز اول است. در این صورت اگر  $S$  را بعنوان حساسیت  $\delta_{FS}$  نسبت به پارامتر  $Xt$  تعریف کنیم خواهیم داشت:

$$S_X^\delta = \frac{\frac{\Delta \delta_{F.S}}{\delta_{F.S}(n)}}{\frac{\Delta Xt}{Xt(n)}} = \frac{(\delta_{F.S}(Xt_{+30\%}) - \delta_{F.S}(Xt_{-30\%}))}{\delta_{F.S}(n)}}{\frac{(Xt_{+30\%} - Xt_{-30\%})}{Xt(n)}} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $\delta_{FS}(n)$  و  $Xt(n)$  به ترتیب زاویه خیز اول رتور و مقدار پارامتر مورد نظر در حالت  $(n\%)$  تغییر در پارامتر هستند. از این حساسیت بعنوان شاخصی جهت تعیین اولویت پارامترها در تأثیرگذاری بر رفتار دینامیکی ژنراتور استفاده می‌شود.

در حالت دوم در هنگام تغییر مقدار هر پارامتر، روابط همبستگی آن با سایر پارامترها طبق رابطه (۱) رعایت می‌شود. برای این منظور در هنگام تغییر یک پارامتر، برای جلوگیری از نقض رابطه (۱) پارامتر همبسته و متناظر با آن نیز متناسباً طوری تغییر داده می‌شود که رابطه همبستگی معتبر باقی بماند. قدم‌های بررسی میزان تأثیرگذاری پارامترهای دینامیکی یک ژنراتور بر رفتار دینامیکی خودش بشرح زیر می‌باشد.

- ۱- تغییر پارامتر بدون (با) رعایت همبستگی
- ۲- اعمال خطای متوسط (شدید) بر ژنراتور مورد مطالعه
- ۳- محاسبه تغییرات زاویه رتور ژنراتور مورد مطالعه
- ۴- محاسبه حساسیت تغییرات دامنه زاویه رتور در خیز اول به تغییر هر کدام از پارامترهای ژنراتور مورد مطالعه

## ۳-۲- تأثیر پارامترهای یک ژنراتور بر رفتار دیگر ژنراتورها

در این بخش نحوه تأثیر گذاری خطای شناسائی پارامترهای یک ژنراتور بر رفتار دینامیکی سایر ژنراتورها بررسی می‌گردد. سؤال اساسی این است که آیا وجود خطا در شناسایی پارامترهای یک ژنراتور بر رفتار دینامیکی سایر ژنراتورهای شبکه تأثیر گذار می‌باشد یا خیر؟ در صورت پاسخ مثبت و شدید بودن این اثر باید بازه دقت لازم برای شناسایی پارامترهای ژنراتور مورد مطالعه را با لحاظ کردن تأثیر آن‌ها بر رفتار دیگر ژنراتورها بدست آورد. در این حالت نیز تغییر مقدار هر یک از پارامترهای ژنراتورها به دو صورت بدون رعایت همبستگی و سازگاری با دیگر پارامترها و با رعایت همبستگی بین آن‌ها انجام می‌گیرد. فرآیند بررسی میزان تأثیرگذاری پارامترهای دینامیکی یک ژنراتور بر رفتار دینامیکی دیگر ژنراتورها بشرح زیر می‌باشد.

- ۱- تغییر پارامتر ژنراتور اول بدون رعایت همبستگی
- ۲- اعمال خطای شدید بر ژنراتور دوم
- ۳- محاسبه تغییرات زاویه رتور ژنراتور دوم
- ۴- محاسبه حساسیت تغییرات دامنه زاویه رتور ژنراتور دوم در خیز اول به تغییر هر کدام از پارامترهای ژنراتور اول

## ۵- مطالعات شبیه سازی

در خیز اول محاسبه می‌گردد و با توجه به روابط (۲) تغییرات پارامتر و زاویه رتور بدست می‌آید. حال با کمک رابطه (۳) حساسیت تغییرات زاویه رتور در خیز اول را نسبت به هر یک از پارامترها بدست می‌آوریم. مقادیر حساسیت پارامترهای دینامیکی هر ژنراتور در دو حالت خطای متوسط و شدید محاسبه گردیده که نتایج آن به ترتیب در جداول (۲) و (۳) آمده است.

به منظور بررسی نحوه و میزان تاثیر عدم دقت پارامترهای یک ژنراتور بر رفتار دینامیکی خودش و دیگر ژنراتورها، الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه ۳۹ باسه IEEE پیاده‌سازی شده است. شبکه ۳۹ باسه IEEE دارای ۱۰ ژنراتور سنکرون است که شامل ۲ ژنراتور آبی، ۶ ژنراتور بخاری و ۲ ژنراتور سیکل ترکیبی می‌باشد. برای این بررسی، ژنراتور آبی شماره ۳۵، ژنراتور بخاری شماره ۳۴، ژنراتور بخاری شماره ۳۲ و ژنراتور سیکل ترکیبی شماره ۳۶ انتخاب می‌شوند. برای بررسی میزان تاثیرگذاری پارامترهای دینامیکی یک ژنراتور بر رفتار دینامیکی سایر ژنراتورها، تاثیر پارامترهای ژنراتورهای ۳۴، ۳۲ و ۳۶ بر عملکرد دینامیکی ژنراتور ۳۵ بررسی شده است. همانطور که پیش تر ذکر شد برای بررسی رفتار گذرای ژنراتور از دو نوع خطای متوسط و شدید استفاده می‌شود. خطای متوسط، بصورت یک خطای سه فاز روی خطی نزدیک به ژنراتور و خطای شدید، بصورت یک خطای سه فاز روی ترمینال ژنراتور اعمال شده است. انجام شبیه سازی ها در دو حالت بدون رعایت همبستگی بین پارامترها و با در نظر گرفتن همبستگی بین آنها با استفاده از نرم افزار DigSilent انجام شده است.

جدول (۱) محدوده ی تغییرات پارامترهای واحد آبی ۳۵ بدون

در نظر گرفتن همبستگی بین پارامترها

پارامتر	-30%	-20%	-10%	مقدار پایه پارامتر 0%	10%	20%	30%
Xd	0.651	0.744	0.837	0.93	1.023	1.116	1.209
X'd	0.211	0.2416	0.2718	0.302	0.3322	0.362	0.392
X''d	0.171	0.196	0.2205	0.245	0.2695	0.294	0.318
Xq	0.483	0.552	0.621	0.69	0.759	0.828	0.897
X''q	0.189	0.216	0.243	0.27	0.297	0.324	0.351
t'd0	5.6	6.4	7.2	8	8.8	9.6	10.4
t''d0	0.063	0.0723	0.0813	0.0904	0.0994	0.108	0.117
t''q0	0.042	0.048	0.054	0.06	0.066	0.072	0.078
H	2.373	2.712	3.051	3.39	3.729	4.068	4.407

جدول (۲) حساسیت زاویه رتور ژنراتورها در خیز اول بدون در

نظر گرفتن همبستگی بین پارامترهای با اعمال خطای متوسط

Gen. No.	خطا روی خطی نزدیک به ژنراتور			
	Hydo G35	Steam G34	Steam G32	CC G36
MVA	231.6	233	384	192
Fault Location	Line22-21	Line16-19	Line14-13	Line24-23
Fault Duration	0.1	0.1	0.1	0.1
پارامتر	مقادیر حساسیت			
Xd	0.0205	-0.002	0.016	0.0152
X'd	0.3209	-0.020	0.172	0.0996
X''d	-0.0793	-0.018	0.051	-0.0396
Xq	0.4231	-0.370	0.996	0.8417
X'q		0.159	-0.114	-0.1206
X''q	0.0233	-0.004	0.099	0.0698
T'd0	-0.0391	0.006	-0.064	-0.0530
T''d0	0.0074	0.005	-0.041	0.0146
T'q0		-0.014	0.009	0.0178
T''q0	-0.0374	-0.050	0.114	-0.0527
H	-0.2967	0.786	-1.169	-0.5284

### ۵-۱- تاثیر پارامترهای دینامیکی ژنراتور بر رفتار خودش

#### ۵-۱-۱- بدون در نظر گرفتن همبستگی بین پارامترها

در این حالت پارامترهای ژنراتورها بدون توجه به برقراری رابطه (۱) بطور مستقل در محدوده ۳۰٪- تا ۳۰٪+ مقدار پایه با گام‌های ۱۰٪ تغییر داده می‌شوند. تغییر پارامترهای ژنراتور ۳۵ در محدوده فوق در جدول (۱) نشان داده شده است. و برای ژنراتورهای دیگر نیز به همین صورت پارامترها تغییر داده شده‌اند. با تغییر هر یک از پارامترهای ژنراتور بطور جداگانه و مستقل و اعمال خطا و انجام محاسبات شبیه سازی، مقدار زاویه رتور

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

دارند. بنابراین عدم دقت در شناسایی ۵ پارامتر  $X'd, H, X'q, Xq$  نسبت به پارامترهای دیگر، پایداری گذرای ژنراتور را بیشتر تحت تاثیر قرار خواهد داد. در حالتی که حساسیت زاویه روتور در خیز اول نسبت به پارامتری مثبت باشد، با کاهش آن پارامتر زاویه خیز اول روتور کاهش و نتیجتاً پایداری ژنراتور افزایش خواهد یافت.

۵-۱-۲ با در نظر گرفتن همبستگی بین پارامترها

در این حالت تغییر پارامترهای ژنراتورها با توجه به رابطه همبستگی بین آنها صورت گرفته است. در واقع چون برخی از پارامترهای ژنراتور به یکدیگر وابسته می‌باشند در هنگام تغییر آنها باید رابطه (۱) همواره برقرار باقی بماند. تغییر پارامترهای ژنراتور آبی ۳۵ برای نمونه در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴) محدوده‌ی تغییرات پارامترهای واحد آبی ۳۵ با در

نظر گرفتن همبستگی بین پارامترها

پارامتر	0%	30%	مقدار پایه پارامتر 0%	-30%
$X_d$	1.209	1.209	0.93	0.6510 $X_q=483$
$X'd$	0.3926	0.392	0.302	0.2114 $X''d=0.1715$
$X''d$	0.3185 $X''q=0.351$	0.318	0.245	0.1715
$X_q$	0.897	0.897	0.69	0.483
$X''q$	0.351	0.351	0.27	0.189 $X''d=0.1715$
$t'd0$	10.4	10.4	8	5.6
$t''d0$	0.11752	0.117	0.0904	0.06328
$t'q0$	0.078	0.078	0.06	0.042
H	4.407	4.407	3.39	2.373

همانطور که از جدول ۴ مشخص است برای کاهش  $X'd$  به میزان 30% میبایست  $X''d$  را نیز برای برقراری رابطه (۱) به میزان 0.1715 p.u کاهش داد. بعنوان مثال دیگر برای تغییر  $X''d$  به میزان 30%+ میبایست  $X''q$  به میزان 0.351 p.u افزایش داده شود. با تغییر هر یک از پارامترهای ژنراتور و اعمال خطا، به کمک محاسبات پایداری گذرا زاویه خیز اول

جدول (۳) حساسیت زاویه رتور ژنراتورها در خیز اول بدون در نظر گرفتن همبستگی بین پارامترهای با اعمال خطای شدید

Gen. No.	خطا روی باس ژنراتور			
	Hydo G35	Steam G34	Steam G32	CC G36
MVA	231.6	233	384	192
Fault Location	Bus 25	Bus 34	Bus 32	Bus 36
Fault Duration	0.22	0.24	0.186	0.25
پارامتر	مقادیر حساسیت			
$X_d$	0.022	0.066	0.023	0.030
$X'd$	0.508	0.433	0.227	0.331
$X''d$	-0.144	-0.391	-0.065	-0.051
$X_q$	0.278	0.338	0.399	0.342
$X'q$		-0.017	0.009	0.003
$X''q$	0.008	0.009	0.0001	0.013
$T'd0$	-0.044	-0.217	-0.094	-0.112
$T''d0$	0.001	-0.058	-0.046	0.014
$T'q0$		-0.007	-0.002	-0.003
$T''q0$	0.000	0.047	0.016	0.016
H	-1.610	-1.427	-1.743	-1.484

لازم به ذکر است که دوره زمانی اختلال شدید برابر بیشترین زمانی است که بازای آن ژنراتور با کمترین  $H$  ناپایدار نگردد و زمان اختلال متوسط ۱۰۰ میلی ثانیه انتخاب شده است.

برای ژنراتور آبی چون قطب برجسته است  $X'q = Xq$  و  $t'q0$  هم قابل تعریف نیست لذا در جداول (۱)، (۲) و (۳) برای  $X'q$  و  $t'q0$  مقداری ذکر نگردیده است.

همانگونه که از جدول (۲) برداشت می‌شود در حالتیکه همبستگی رعایت نشود و خطای متوسط اعمال شود برای ژنراتورهای ۳۵ و ۳۲ پارامترهای  $H, X'd$  و  $Xq$  و برای ژنراتورهای ۳۴ و ۳۶ پارامترهای  $H, X'q$  و  $Xq$  بدلیل داشتن حساسیت بیشتر، بیشترین تاثیر در زاویه خیز اول رتور و در نتیجه بیشترین تاثیر را بر رفتار گذرای ژنراتور دارند.

از نتایج جدول (۳) مشخص است که در حالتی که همبستگی رعایت نشود و خطای شدید اعمال شود برای ژنراتورهای ۳۲، ۳۵ و ۳۶ پارامترهای  $H, X'd$  و  $Xq$  و برای ژنراتور ۳۴ پارامترهای  $H, X'd, X'q, Xq$  بدلیل داشتن حساسیت بیشتر، بیشترین تاثیر را بر رفتار گذرای ژنراتور و سیستم

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\Delta\delta_{F.S} = 0.42\Delta Xq - 0.3\Delta H + 0.27\Delta X'_d + 0.11\Delta X_d \quad (7)$$

رابطه زیر بین ثابت اینرسی H ژنراتورهای مورد مطالعه برقرار است:

$$H_{G32} < H_{G36} = H_{G35} < H_{G34} \quad (8)$$

جدول (۶) حساسیت زاویه رتور ژنراتورها در خیز اول با در نظر گرفتن همبستگی بین پارامترهای با اعمال خطای شدید

Gen. No.	خطا روی باس ژنراتور			
	Hydo G35	Steam G34	Steam G32	CC G36
MVA	231.6	233	384	192
Fault Location	Bus 25	Bus 34	Bus 32	Bus 36
Fault Duration	0.22	0.24	0.186	0.25
پارامتر	مقادیر حساسیت			
Xd	0.069	0.248	0.254	0.978
X'd	0.433	1.911	0.183	0.247
X''d	-0.141	-0.380	-0.030	-0.038
Xq	0.278	0.235	0.408	0.353
X'q		-0.017	0.009	0.003
X''q	-0.075	0.008	-0.037	-0.038
T'd0	-0.044	-0.217	-0.094	-0.112
T''d0	0.001	-0.058	-0.046	0.014
T'q0		-0.007	-0.002	-0.003
T''q0	0.000	0.047	0.016	0.016
H	-1.610	-1.427	-1.743	-1.484

جدول (۷) اولویت پارامترهای ژنراتور در تأثیرگذاری بر رفتار

دینامیکی ژنراتور با در نظر گرفتن همبستگی بین پارامترهای ژنراتور

خطای متوسط				خطای شدید			
Hydro G35	Steam G34	Steam G32	CC G36	Hydro G35	Steam G34	Steam G32	CC G36
Xq	H	H	Xq	H	X'd	H	H
H	Xq	Xq	H	X'd	H	Xq	Xd
X'd	Xd	Xd	Xd	Xq	X''d	Xd	Xq
Xd	X'q	X''d	X'q	X''d	Xd	X'd	X'd
X''d	T''q0	X'd	t'do	X''q	Xq	t'do	t'do
t'do	X''d, X''q	X''q	t''qo	Xd	t'do	t''do	X''d
t''qo	X'd	t''qo	X'd	t'do	t''do	X''q	X''q
X''q	T''qo	X'q	X''d	t''do	t''qo	X''d	t''qo
t''do	T'do	t'do	X''q	t''qo	X'q	t''qo	t''do
-	T''do	t''do	t''qo	-	X''q	X'q	X'q
-	-	t''qo	t''do	-	t''qo	t''qo	t''qo

رتور محاسبه می‌گردد و با کمک رابطه (۳) مقدار حساسیت زاویه رتور نسبت به هر پارامتر در این حالت بدست خواهد آمد. نتایج تحلیل حالت گذرا که شامل زاویه رتور و حساسیت متناظر با هر پارامتر است برای ژنراتورها با اعمال خطای متوسط و شدید به ترتیب در جداول (۵) و (۶) آمده است. در این حالت اولویت پارامترها در تأثیر گذاری بر رفتار ژنراتور در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول (۵) حساسیت زاویه رتور ژنراتورها در خیز اول با در نظر گرفتن همبستگی بین پارامترهای با اعمال خطای متوسط

Gen. No.	خطا روی خطی نزدیک به ژنراتور			
	Hydo G35	Steam G34	Steam G32	CC G36
MVA	231.6	233	384	192
Fault Location	Line22-21	Line16-19	Line14-13	Line24-23
Fault Duration	0.1	0.1	0.1	0.1
پارامتر	مقادیر حساسیت			
Xd	0.1121	-0.206	0.601	0.4971
X'd	0.2763	-0.021	0.173	0.0432
X''d	-0.0715	-0.022	0.180	0.0310
Xq	0.4231	-0.371	0.603	0.8047
X'q		0.159	-0.114	-0.1206
X''q	-0.0192	-0.022	0.150	0.031
T'd0	-0.0391	0.006	-0.064	-0.0530
T''d0	0.0074	0.005	-0.041	0.0146
T'q0		-0.014	0.009	0.0178
T''q0	-0.0374	-0.050	0.114	-0.0527
H	-0.2967	0.786	-1.169	-0.5284

تغییرات زاویه خیز اول رتور در حالتی که همبستگی بین پارامترها رعایت شود بصورت زیر خواهد بود:

$$\% \Delta \delta_{F.S} = \frac{d\delta_{F.S}}{dX'd} (\Delta X'd) + \frac{d\delta_{F.S}}{dX''d} (\Delta X''d) \quad (4)$$

$$\% \Delta \delta_{F.S} = \frac{d\delta_{F.S}}{dX''d} (\Delta X''d) + \frac{d\delta_{F.S}}{dX''q} (\Delta X''q) \quad (5)$$

$$\% \Delta \delta_{F.S} = \frac{d\delta_{F.S}}{dX''d} (\Delta X''d) + \frac{d\delta_{F.S}}{dX''q} (\Delta X''q) \quad (6)$$

مطالعات شبیه‌سازی در این حالت نشان می‌دهد که تأثیر ترکیبی پارامترهای ژنراتور بر تغییرات زاویه خیز اول رتور طبق رابطه زیر یک تابع خطی می‌باشد:

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

شده است. در این حالت اختلال اعمال شده اختلال از نوع شدید است.

جدول (۸) تأثیر تغییر پارامتر سایر ژنراتورها بر  $\delta F.S$  ژنراتور ۳۵

پارامتر	$\frac{d\delta_{F.S}(35)}{dXt(32)}$	$\frac{d\delta_{F.S}(35)}{dXt(34)}$	$\frac{d\delta_{F.S}(35)}{dXt(35)}$	$\frac{d\delta_{F.S}(35)}{dXt(36)}$
Xd	0.00004	0.00002	0.022	0.011
X'd	-0.0001	-0.0002	0.508	0.039
X''d	-0.0070	-0.0049	-0.144	-0.015
Xq	-0.0028	0.0005	0.278	0.028
X'q	-0.0051	-0.0077		0.012
X''q	-0.0049	-0.0050	0.008	-0.017
t'do	-0.0001	-0.0001	-0.044	-0.006
t''do	0.0002	0.0002	0.008	0.007
t'qo	0.0004	0.0004		-0.013
t''qo	0.0069	0.0067	-0.0004	0.022
H	0.0289	0.0186	-1.610	-0.065

همانطور که از جدول (۸) پیداست حساسیت شاخص  $\delta_{FS}$  نسبت به تغییر پارامترهای خودش بجز برای  $X''q$  و  $t''qo$  برای سایر پارامترها به مراتب بیشتر از حساسیت آن به تغییر پارامتر ژنراتورهای دیگر است.

همانطور که از جدول روشن است تغییر پارامتر  $H$  ژنراتورهای دیگر نیز بیشترین تأثیر را بر رفتار ژنراتور ۳۵ دارد لذا موثرترین پارامتر ژنراتورهای دیگر بر رفتار ژنراتور ۳۵ همان موثرترین پارامتر ژنراتور بر  $\delta F.S$  خودش است. پس در تعیین دقت پارامتر  $H$  ژنراتور علاوه بر تأثیر تغییر آن بر شاخص پایداری ( $\delta_{FS}$ ) خودش باید تأثیر تغییر آن بر  $\delta_{FS}$  ژنراتورهای دیگر را نیز در نظر گرفت.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر عدم دقت پارامترهای دینامیکی یک ژنراتور سنکرون بر پایداری گذرای خودش و دیگر ژنراتورها در پی وقوع اختلال بررسی شده است. تغییرات زاویه روتور در خیز اول بعنوان شاخصی برای رفتار دینامیکی ژنراتور استفاده شده است. برای پایداری ژنراتور دو نوع خطا که شامل خطای متوسط بر روی خطی نزدیک به ژنراتور مورد مطالعه و خطای شدید بر روی باس ژنراتور می‌باشد اعمال گردیده است. برای

با توجه به مقادیر حساسیت زاویه خیز اول رتور نسبت به اینرسی ژنراتورها و با تعریف این حساسیت به شکل  $S(d\delta F.S.G_{35}/dH_{G_{35}})=S_{G_{35}}$  به وضوح از جداول ۲، ۳، ۵ و ۶ مشخص است که هم برای زمانی که همبستگی بین پارامترها رعایت شود و هم برای زمانی که این همبستگی رعایت نشود در حالتی که خطای متوسط اعمال شود:

$$S_{G_{32}} > S_{G_{34}} > S_{G_{36}} > S_{G_{35}} \quad (9)$$

و اگر خطای اعمالی شدید باشد:

$$S_{G_{32}} > S_{G_{35}} > S_{G_{36}} > S_{G_{34}} \quad (10)$$

از روابط ۹ و ۱۰ مشخص است که زاویه رتور ژنراتور ۳۲ در همه حالات بیشترین حساسیت را نسبت به اینرسی آن دارد در حالیکه با توجه به رابطه ۸ مقدار اینرسی ژنراتور ۲ نسبت به سایر ژنراتورهای مورد مطالعه بیشترین مقدار را دارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در شناسایی  $H$  برای ژنراتورهایی که دارای مقدار  $H$  کوچکتری هستند دقت بیشتری لازم است به عبارت دیگر باند مرده حول مقدار واقعی پارامتر  $H$  برای این ژنراتورها کمتر است. بنابراین با بزرگ شدن مقدار پارامتر  $H$  در ژنراتورها، حساسیت شاخص  $\delta_{FS}$  به این پارامتر کاهش می‌یابد (به خاطر افزایش پایداری). همانطور که مشخص است اولویت پارامترهای تأثیرگذار در ژنراتورهای ۳۴ و ۳۲ با این که از یک نوع هستند متفاوت می‌باشد. لذا با توجه به نتایج تأثیر پارامترهای ژنراتور بر رفتار گذرای خودش مشخص است که نوع ژنراتور، ظرفیت ژنراتور و نوع و شدت خطا عواملی هستند که بر رفتار دینامیکی ژنراتورها موثر می‌باشند.

۵-۲- تأثیر پارامترهای دینامیکی یک ژنراتور بر رفتار

دینامیکی سایر ژنراتورها

در این بخش اثر تغییر پارامترهای ژنراتورهای ۳۲، ۳۴ و ۳۶ بر رفتار دینامیکی ژنراتور ۳۵ بررسی می‌شود. برای بررسی این موضوع از اصول و روش تشریح شده در بخش ۳-۲ استفاده شده است. در جدول (۸) حساسیت زاویه خیز اول رتور ژنراتور ۳۵ به پارامترهای ژنراتورهای ۳۴، ۳۲ و ۳۶ نشان داده

- Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, No. 3, September 1989, pp. 551-558.
- [9] A. Keyhani, S. Hao, G. Dayal, "The Effects of Noise on Frequency-Domain Parameter Estimation of Synchronous Machine Models," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, No. 4, December 1989, pp. 600-607.
- [10] A. Tumageanian, A. Keyhani, "Identification of Synchronous Machine Linear Parameters from Standstill Step Voltage Input Data," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, June 1995, pp. 232-240.
- [11] H. B. Karayaka, A. Keyhani, B. Agrawal, D. Selin, G. T. Heydt, "Methodology Development for Estimation of Armature Circuit and Field Winding Parameters of Large Utility Generators," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999, pp. 901-908.
- [12] H. B. Karayaka, A. Keyhani, B. Agrawal, D. Selin, G. T. Heydt, "Identification of Armature Circuit and Field Winding Parameters of Large Utility Generators," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, 1999, pp. 29-34.
- [13] H. B. Karayaka, A. Keyhani, B. Agrawal, D. Selin, G. T. Heydt, "Identification of Armature, Field, and Saturated Parameters of a Large Steam Turbine-Generator from Operating Data," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 2, June 2000, pp. 181-187.
- [14] Yu, Yau-Nan, (1983). *Electric Power System Dynamics*. Academic Press.
- [15] Kundur P., (1994) *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Inc.

بررسی رفتار گذرای ژنراتور پارامترهای ژنراتور به دو صورت مستقل و بدون رعایت همبستگی با سایر پارامترها و نیز با رعایت شرط همبستگی تغییر داده شدند و در پی آن دامنه زاویه روتور در خیز اول ( $\delta_{FS}$ ) محاسبه گردید و حساسیت  $\delta_{FS}$  نسبت به هر پارامتر محاسبه گردیده است. از این حساسیت برای اولویت‌بندی تأثیر پارامترها و نیز تعیین موثرترین پارامتر بر رفتار گذرای ژنراتور استفاده شده است. همچنین تأثیر تغییر پارامتر ژنراتورهای دیگر بر رفتار یک ژنراتور بررسی و مطالعه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که عدم دقت در شناسایی پارامتر H بیشترین تأثیر را بر نتایج پایداری ژنراتورها خواهد داشت.

## مراجع

- [1] IEEE Std 1110 (2002) (Revision of IEEE Std 1110-1991). *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*. 1 – 72.
- [2] IEEE Standard 115 (1995). *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines, Part I—Acceptance and Performance Testing, Part II— Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis*.
- [3] Park R.H. (1933). *Two-Reaction Theory of Synchronous Machines- Generalized method of analysis*. AIEE Transactions, Part I, (48), 716-729, 1929; Part II, (52), 352-355.
- [4] Chan K.H., E. Acha, M. Madrigal, and J.A. Parle (2001). *The use of direct time-phase domain synchronous generator model in standard EMTP-type industrial package*. IEEE Power Eng. Rev., 63-65.
- [5] Cui Y., H.W. Dommel, and W. Xu. (2004). *A Comparative Study of Two Synchronous Machine Modeling Techniques for EMTP Simulation*. IEEE Transactions on Energy Conversion, (19), no. 2, 462 – 463.
- [6] Melgoza J., R. Jesus, G.T. Heydt, and A. Keyhani, (2001). *An algebraic approach for identifying operating point dependent parameters of synchronous machine using orthogonal series expansions*. IEEE Trans. on Energy Conversion, (16), no. 1, 92-98
- [7] Karrari M., O.P. Malik, (2003b). *Nonlinear state space identification of a synchronous generator*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, ( 4 ), 2399- 2404,.
- [8] A. Keyhani, S. Hao, G. Dayal, "Maximum Likelihood Estimation of Solid-Rotor Synchronous Machine Parameters from SSFR Test Data," IEEE