

اثر نصب واحدهای تولید پراکنده بر پایداری گذرای سیستم قدرت

مهدی هاتف^۱، بهزاد تقی پورموزن^۲، محمدرضا بدخشان مهر^۳

^۱ آموزشکده فنی و حرفه ای سما سیاهکل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لاهیجان، سیاهکل، ایران، hatef_mehdi@yahoo.com

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی مرکز سیاهکل-سیاهکل - ایران، Taghipoor_behzad@yahoo.com

^۳ شرکت توزیع برق استان گیلان-لاهیجان، mohamad_badakhshan@yahoo.com

چکیده - بر اساس پیش بینی کارشناسان صنعت برق، میزان فن آوری های جدید تولید برق متصل به سیستم های قدرت، در آینده نزدیک افزایش چشم گیری خواهد یافت. بسیاری از این فن آوری ها، از لحاظ ظرفیت تولید، بسیار کوچک تر از ژنراتورهای متعارف هستند. علاوه بر این، بسیاری از آنها، مبتنی بر فن آوری هایی متفاوت از ژنراتورهای سنکرون، هم چون ژنراتورهای القایی، هستند. اتصال واحدهای تولید پراکنده، در مقادیر کم، تأثیر چندانی بر پایداری گذرای سیستم های قدرت نخواهد داشت. اما اگر سطح نفوذ این واحدها در سیستم قدرت افزایش یابد، نصب این واحدها بر رفتار دینامیکی کل سیستم قدرت تأثیرگذار خواهد بود. این مقاله تأثیر فن آوری و سطح نفوذ تولید پراکنده و نیز محل وقوع خطا بر پایداری گذرای سیستم قدرت را، از طریق مطالعه یک سیستم تست ۲۶ شینه، مورد بررسی قرار می دهد. کلید واژه ها- پایداری گذرا، تولید پراکنده، زمان رفع خطای بحرانی

۱- مقدمه

رفتار کل سیستم آغاز می شود [۱ و ۲]. این مقاله، از طریق مدلسازی واحدهای تولید پراکنده در سیستم قدرت نمونه ای، با در نظر گرفتن محل های مختلف وقوع خطا، به بررسی و تحلیل تأثیر واحدهای تولید پراکنده بر پایداری گذرای سیستم قدرت می پردازد.

۲- روش شبیه سازی

این شبیه سازی برای بررسی تأثیر نصب واحدهای تولید پراکنده (DG) بر پایداری گذرای یک سیستم قدرت تست ۲۶ شینه که شامل ۶ دستگاه ژنراتور سنکرون متمرکز است، انجام می شود (جدول ۱). برای بررسی این تأثیر، تأثیر مدل DG، سطح نفوذ DG و محل وقوع خطا بر زمان رفع خطای بحرانی سیستم (ter)، در این شبیه سازی مورد بررسی قرار می گیرد. براساس تعریف زمان رفع خطای بحرانی، زمانی است که در صورت سپری شدن آن رفع اغتشاش وارد بر سیستم کمکی به حفظ پایداری گذرای سیستم نمی کند و اختلاف زاویه روتور ژنراتورهای سنکرون متمرکز سیستم با شین مرجع بسیار زیاد می شود.

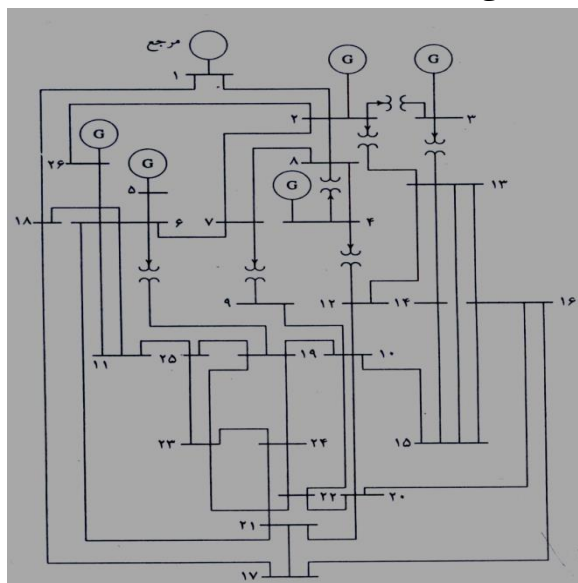
در این صورت سیستم اصطلاحاً سنکرونیزم خود را از دست می دهد [۳].

بر اساس پیش بینی کارشناسان، میزان فن آوری های جدید تولید برق متصل به سیستم های قدرت در آینده نزدیک افزایش چشمگیری خواهد یافت. بسیاری از فن آوری های جدید تولید برق، از ژنراتور سنکرون متصل به شبکه سنتی برای تولید برق استفاده نمی کنند. آنها از ژنراتورهای القایی قفس سنجایی یا تغذیه دوسو (برخی انواع توربین بادی) یا از ژنراتورهای سنکرون یا ژنراتور القایی قفس سنجایی که از طریق یک مبدل الکترونیکی قدرت به شبکه متصل می شوند (انواع دیگر توربین بادی و یا توربین های گازی پرسرعت در اندازه کوچک)، برای تبدیل انرژی اولیه به برق بهره می گیرند. تفاوت مهم تر فن آوری های جدید تولید برق با ژنراتورهای سنتی در این است که بسیاری از این فن آوری ها از لحاظ اندازه به طور قابل ملاحظه ای کوچک تر از واحدهای آبی، هسته ای، و یا حرارتی متداولی هستند که تاکنون بخش عمده توان الکتریکی مصرفی سراسر دنیا را تأمین می کنند. از این رو آنها غالباً به شبکه های ولتاژ پایین و یا ولتاژ متوسط متصل می شوند. تا زمانی که سطح نفوذ این فن آوری های جدید در سیستم قدرت پایین است و آنها نسبت کوچکی از بار سیستم را پوشش می دهند به سختی بر رفتار دینامیکی سیستم قدرت تأثیر خواهند گذاشت. اما اگر میزان آنها در سیستم قدرت، افزایش یابد، تأثیر آنها بر

۳۵/۲٪، ۳۸/۸٪، ۴۱/۹٪، ۴۴/۹٪، ۴۷/۵٪.

برای بررسی تأثیر محل وقوع خطا در سیستم قدرت بر زمان رفع خطای بحرانی سیستم (ter)، ۴ محل مختلف خطا در سیستم تست در نظر گرفته می شود (شکل ۱):

محل ۱: خطا در خط انتقال بین باس های ۱۳ و ۱۴ نزدیک باس ۱۳ (یعنی در محلی نزدیک به سه ژنراتور G_2 و G_3 و G_4 که مجموعاً ۳۵/۶٪ توان تولیدی توسط ژنراتورهای متمرکز را تأمین می کنند).



شکل (۱) نمودار تک خطی سیستم تست ۲۶ شینه

محل ۲: خطا در خط انتقال بین باس های ۶ و ۲۱، نزدیک باس ۶ (یعنی در محلی نزدیک به ژنراتورهای G_5 و G_{26} که مجموعاً ۶۴/۴٪ توان تولیدی توسط ژنراتورهای متمرکز را تأمین می کنند).

محل ۳: خطا در خط انتقال بین باس های ۱۶ و ۲۰ نزدیک باس ۱۶ (یعنی در محلی دور از مکان قرار گرفتن ژنراتورهای متمرکز سیستم قدرت تست)

محل ۴: خطا بین باس های ۲۰ و ۲۲ نزدیک باس ۲۰ (در فاصله خیلی دور از ژنراتورها).

بنابراین برای بررسی تأثیر DG بر زمان رفع خطای بحرانی سیستم، با احتساب دو مدل مختلف DG و ۱۱ سطح نفوذ مختلف و نیز ۴ محل مختلف وقوع خطا در سیستم، مجموعاً ۸۸ حالت مختلف مورد بررسی قرار می گیرد.

| مشخصات سیستم | مقدار |
|--------------------------|--------------------|
| تعداد باسها | ۲۶ |
| تعداد ژنراتورها | ۶ |
| تعداد بارها | ۶ |
| تعداد خطوط | ۴۶ |
| مقدار کل بار | ۵۵۹ MW ۲۲۳ MVar |
| مقدار توان راکتیو تزریقی | ۲۲ MVar |
| مقدار کل تولید | ۱۲۶۳ MW / ۶۳۷ MVar |

براین اساس در این مقاله، DG به دو صورت ژنراتور القایی و ژنراتور سنکرون مدلسازی می شود. برای افزایش سطح نفوذ DG در سیستم قدرت، بدین صورت عمل می شود: در هر باس بار، توان اکتیو و راکتیو در پله های ۵ درصدی افزایش می یابد. این افزایش تا جایی صورت می گیرد که تقاضای بار در هر باس بار به حد ۱/۵ برابر (۱۵۰٪) حالت اولیه برسد. واحد تولید پراکنده نصب شده در هر باس بار به گونه ای تنظیم می شود که در هر حالت افزایش بار، معادل افزایش تقاضای بار همان باس بار، توان اکتیو تولید کند. در حالت ژنراتور القایی، واحد تولید پراکنده علاوه بر تولید P، توان راکتیو جذب می کند. ولی در حالت ژنراتور سنکرون، DG به صورت باس PV مدل می شود. باید دقت داشت که در سیستم تست به کار رفته در این مطالعه، افزایش بار در هر باس بار به میزان بیشتر از ۵۰٪ صورت نمی گیرد. زیرا در نظر گرفتن در صد نفوذ بالاتر برای واحدهای تولید پراکنده در سیستم قدرت، ضرورت بازنگری در مفهوم سیستم های قدرت همزمان و مقایسه آن با سایر راهکارها از قبیل سیستم های اتصال DC و سیستم های نیمه خودگردان را بوجود می آورد. بنابراین مطالعه تأثیر چنین سطوح نفوذ بالایی از DG بر رفتار دینامیکی یک سیستم قدرت کلاسیک متصل به هم، اساساً سودی در پی نخواهد داشت [۴]. سطح نفوذ DG در سیستم قدرت، بدین صورت محاسبه می شود:

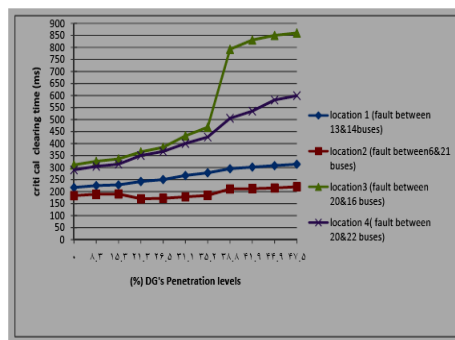
$$\% \text{ DG penetration - level} = \frac{P_{DG}}{P_{DG} + P_{CG}} \times 100 \quad (1)$$

که P_{DG} و P_{CG} به ترتیب مقدار کل توان اکتیو تولیدی به وسیله تولید پراکنده و ژنراتورهای متمرکز سیستم است [۴]. بنابراین برای سطح نفوذ DG با احتساب یک حالت اولیه (بدون DG) و ۱۰ حالت (معادل با ۱۰ پله افزایش بار در هر باس بار) مجموعاً ۱۱ حالت در نظر گرفته می شود:

(۰٪، ۸/۳٪، ۱۵/۳٪، ۲۱/۳٪، ۲۶/۵٪، ۳۱/۱٪،

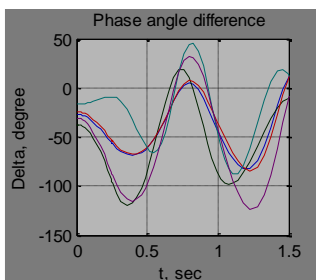
۳- نتایج شبیه سازی

با شبیه سازی های انجام شده، زمان رفع خطای بحرانی سیستم در حالت های مختلف نصب DG، در مدلسازی DG به صورت ژنراتور القایی، بدست می آید. براساس اطلاعات بدست آمده، نمودار تغییرات زمان رفع خطای بحرانی بر حسب سطح نفوذ DG، در ۴ محل مختلف وقوع خطا، به دست می آید (شکل ۲).



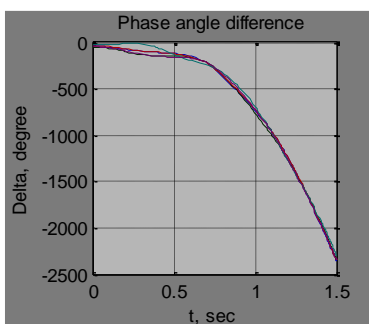
شکل (۲) نمودار زمان رفع خطای بحرانی سیستم تست بر حسب سطح نفوذ DG، در ۴ محل مختلف وقوع خطا در مدل ژنراتور القایی برای DG

بر اساس آن چه که در شکل ۲ مشاهده می شود، در مدل سازی DG به صورت ژنراتور القایی، در صورت وقوع خطا در سه محل از ۴ محل مورد تست (بجز محل ۲ در نزدیکی ژنراتور های G₅ و G₂₆ که تقریباً ۶۵٪ توان متمرکز سیستم را تولید می کنند)، با افزایش سطح نفوذ DG، t_{cr} افزایش می یابد. این افزایش در سطوح نفوذ بالاتر بیشتر است. یعنی از ۳۱/۴٪ = P.L. به بعد با افزایش سطح نفوذ، t_{cr} با سرعت بیشتری افزایش می یابد. این روند در صورت وقوع خطا در محل ۲ کمی متفاوت است. بدین صورت که در $P.L. = ۲۱/۳٪$ ، t_{cr} به میزان اندکی افت می کند، اما پس از آن سیر صعودی خود را دنبال خواهد کرد. در این مدل، بیشترین t_{cr} در هر سطح نفوذ معین، مربوط به وقوع خطا در محل ۳ است. تا $P.L. = ۳۱/۱٪$ ، t_{cr} در محل های ۳ و ۴ تفاوت چندانی با هم ندارند. اما با افزایش سطح نفوذ، این تفاوت بیشتر خواهد شد. به طور کلی بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه سازی و نمودار شکل ۲،

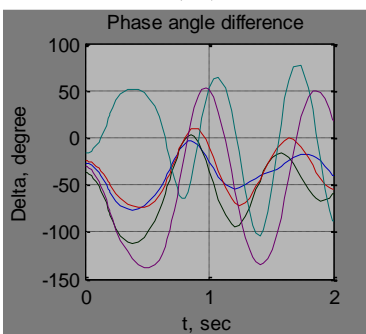


(ب)

شکل (۳) خطا در محل ۱ رفع خطا در $t_{cr} = ۲۵۰$ ms، (الف) سیستم بدون حضور DG ناپایدار است. (ب) سیستم با سطح نفوذ ۴۷/۵ درصدی DG پایدار است.



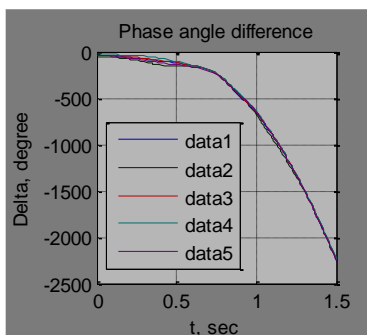
(الف)



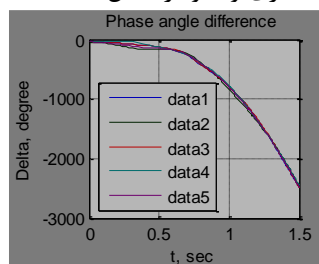
(ب)

شکل (۴) خطا در محل ۲ رفع خطا در $t_{cr} = ۲۰۰$ ms (الف) سیستم بدون حضور DG ناپایدار است. (ب) سیستم با سطح نفوذ ۴۷/۵ درصدی پایدار است

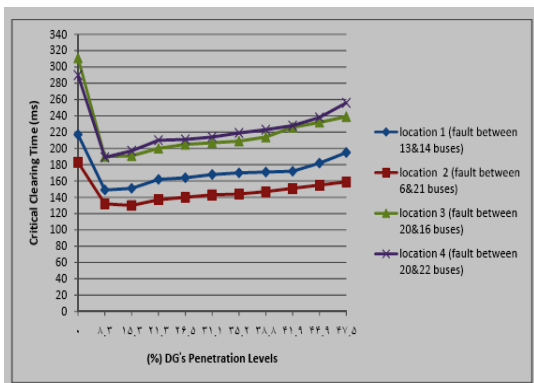
می توان نتیجه گرفت که: با استفاده از فن آوری ژنراتور القایی در بهره برداری از DG در سیستم قدرت



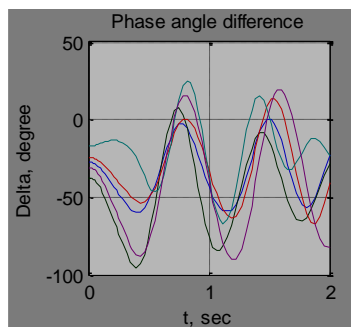
(الف)



(الف)

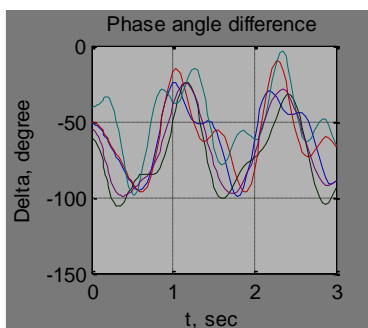


(ب)

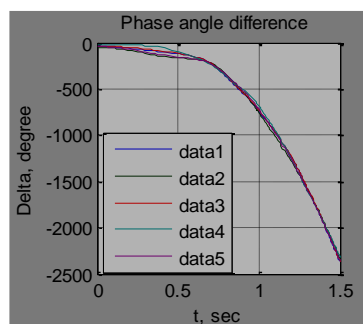


شکل (۵) خطا در محل ۳، رفع خطا در $t_{cr} = 350$ ms (الف) سیستم بدون حضور DG ناپایدار است (ب) سیستم با سطح نفوذ ۴۷/۵ درصدی DG پایدار است.

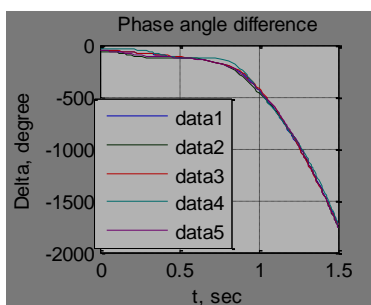
شکل (۷) نمودار زمان رفع خطای بحرانی سیستم تست بر حسب سطح نفوذ DG در ۴ محل مختلف وقوع خطا در مدل ژنراتورسنگرون برای DG



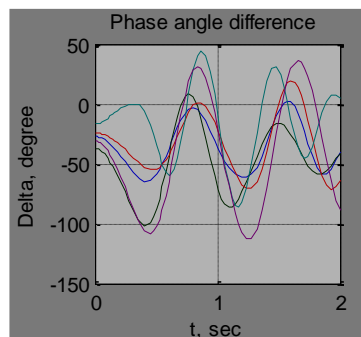
(الف)



(الف)

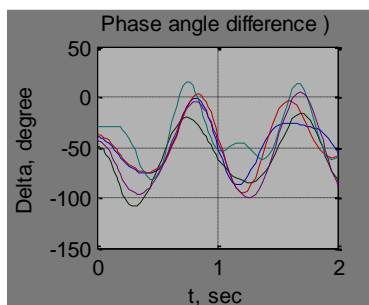


(ب)



(ب)

شکل (۶) خطا در محل ۴ رفع خطا در $t_{cr} = 350$ ms (الف) سیستم بدون حضور DG ناپایدار است (ب) سیستم با سطح نفوذ ۴۷/۵ درصدی DG پایدار است.



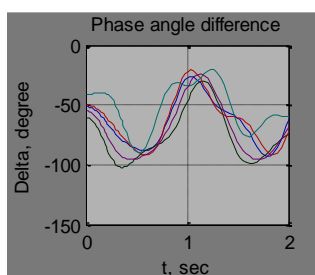
(ج)

مورد آزمایش، در صورت وقوع خطا در هر یک از ۴ محل مورد نظر با رفع خطا، از طریق جداسازی خط خطادار در یک زمان معین (t_{cl})، وضعیت پایداری گذرای سیستم در حضور DG ها، به خصوص در سطوح نفوذ بالا، بسیار بهبود خواهد یافت. شکل های (۳) تا (۶)، این بیان را تأیید می نمایند. در این شکل ها، data1 تا data5، به ترتیب بیانگر $\delta_{3,1}$ ، $\delta_{2,1}$ ، $\delta_{5,1}$ ، $\delta_{26,1}$ بوده و نشان دهنده اختلاف زاویه روتور ژنراتورهای متمرکز سیستم (G_2 ، G_3 ، G_4 ، G_5 ، G_{26}) با ژنراتور مرجع (G_1) هستند.

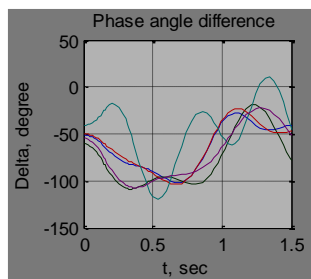
شکل (۸) خطا در محل ۱ رفع خطا در $t_{cr} = 170$ ms، وضعیت پایداری گذرای سیستم در (الف) P.L=47.5% از (ب) P.L=15.3% بهتر ولی از (ج) P.L=0% بدتر است.

۳ و ۴ تفاوت زیادی با هم نخواهند داشت. به طور کلی براساس نتایج حاصله ونمودار شکل ۷، می توان نتیجه گرفت که: با استفاده از فن آوری ژنراتور سنکرون در بهره برداری از DG در سیستم قدرت مورد آزمایش، در صورت وقوع خطا در هر یک از ۴ محل مورد نظر با رفع خطا، از طریق جداسازی خط خطادار در یک زمان معین (t_{cr})، وضعیت پایداری گذرای سیستم در سطوح نفوذ بالای DG نسبت به سطوح نفوذ پایین بهتر است. اما به طور کلی با نصب DG به صورت ژنراتور سنکرون، در یک زمان رفع خطای مشخص، پایداری گذرای سیستم قدرت به خطر می افتد. (شکل های ۸ تا ۱۱ را ببینید). با مقایسه دو شکل ۲ و ۷ نیز می توان مشاهده کرد که:

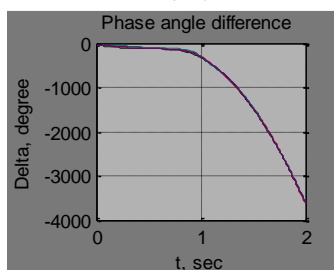
به صورت مشابه، زمان رفع خطای بحرانی سیستم قدرت را در حالت های مختلف افزایش سطح نفوذ DG و در محل های مختلف خطا، برای مدل DG به صورت ژنراتور سنکرون بدست می آوریم (شکل ۷). در مدلسازی DG به صورت ژنراتور سنکرون: با افزایش سطح نفوذ DG از $P.L = 8/3\%$ تا $47/5\%$ $P.L = \%$ برای t_{cr} ، محل افزایش می یابد. اما یک تفاوت اساسی این حالت با حالت قبل (DG به صورت ژنراتور القایی) این است که: اساساً با نصب DG، زمان رفع خطای بحرانی سیستم کاهش می یابد این کاهش در دو محل ۳ و ۴ (یعنی محل های دور از مکان ژنراتورها) بیشتر است. در این مدل DG، برای یک سطح نفوذ معین t_{cr} ، محل ۳ بیشترین مقدار خود را خواهد داشت.



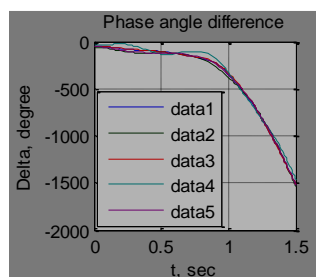
(الف)



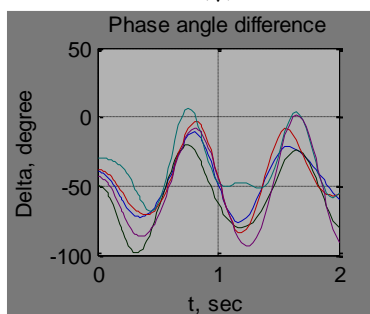
(الف)



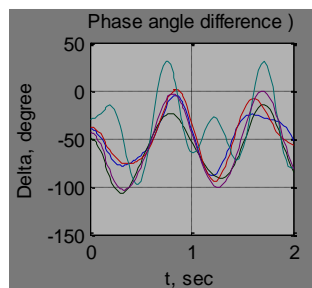
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل (۱۰) خطا در محل ۳ رفع خطا در $t_{cr}=200\text{ms}$ ، وضعیت پایداری گذرای سیستم در (الف) $P.L=47.5\%$ از (ب) $P.L=15.3\%$ بهتر ولی از (ج) $P.L=0\%$ بدتر است.

با مقایسه دو شکل ۲ و ۷ نیز می توان مشاهده کرد که: در هر دو مدل به کار رفته برای DG، در یک سطح نفوذ مشخص، با نزدیک شدن محل خطا به ژنراتورهایی که درصد بیشتری (%)

شکل (۹) خطا در محل ۲ رفع خطا در $t_{cr}=150\text{ms}$ ، وضعیت پایداری گذرای سیستم در (الف) $P.L=47.5\%$ از (ب) $P.L=15.3\%$ بهتر ولی از (ج) $P.L=0\%$ بدتر است.

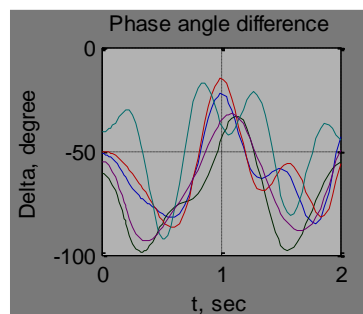
در این مدل t_{cr} ، در یک سطح نفوذ معین، در محل های

پایداری گذرای یک سیستم قدرت تست بررسی گردید و نتایج بدست آمد که عمده آنها بدین شرح است. تأثیر تولید پراکنده بر پایداری گذرای سیستم قدرت، به شدت به فن آوری به کار رفته برای تولید پراکنده، سطح نفوذ آن در سیستم قدرت و نیز محل وقوع خطا در سیستم قدرت بستگی دارد. در در هر دو مدل به کار رفته برای شبیه سازی DG (ژنراتور القایی و ژنراتور سنکرون)، در یک سطح نفوذ مشخص، با دور شدن محل خطا از ژنراتورهایی که درصد بیشتری تولید متمرکز سیستم را بر عهده دارند، زمان رفع خطای بحرانی (t_{cr}) سیستم افزایش می یابد. این افزایش در مدل ژنراتور القایی برای DG بیشتر است. در یک نتیجه گیری کلی از مباحث مطرح شده در این مقاله می توان گفت که: در صورت بکارگیری فن آوری مناسب و نیز سطح نفوذ متناسب با سیستم، نصب واحدهای تولید پراکنده را می توان به عنوان روشی مناسب برای محدودسازی پخش بار در خطوط انتقال و بهبود پایداری گذرای سیستم انتقال برشمرد. در این مقاله، برای بررسی تأثیر نصب واحدهای تولید پراکنده بر پایداری گذرای سیستم قدرت، یک خطای اتصال کوتاه سه فاز در ۴ محل مختلف بر سیستم وارد گردید. تأثیر انواع دیگر خطا در محل های مختلف و در سیستم های قدرت متفاوت، می تواند موضوع کار مطالعاتی در آینده قرار گیرد. هم چنین بر اساس مباحثی که در این مقاله مطرح گردید، عوامل مختلفی هم چون فن آوری DG، سطح نفوذ DG، محل خطا بر چگونگی تأثیر DG بر پایداری گذرای سیستم قدرت مؤثر خواهد بود. بررسی دقیق تر میزان تأثیرگذاری هر یک از این عوامل، با استفاده از یک تحلیل مبتنی بر آنالیز حساسیت، می تواند زمینه ای مناسب برای مطالعات آینده باشد.

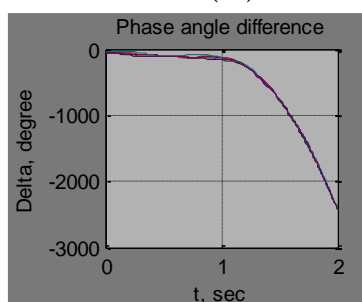
مراجع

- [1] Donnelly, M.K., Dagle, J. "Impact of the Distributed utility on Transmission stability", IEEE Transactions of power systems, Vol.111, No.2, pp.741-746, 1996.
- [2] N. Jenkins, "Impact of dispersed generation on power systems", Invited paper, ELECTRA, no.199 Dec. 2001.
- [3] P. Kundur, Powersystem stability and control. New York, US: McGrawHill, Inc.

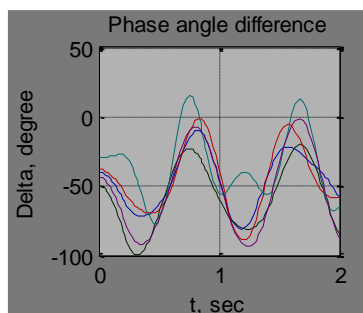
از توان متمرکز سیستم را تأمین می کنند (محل ۲)، زمان رفع خطای بحرانی سیستم به شدت کاهش می یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۱) خطا در محل ۴ رفع خطا در $t_{cr}=200\text{ms}$ ، وضعیت پایداری گذرای سیستم در (الف) $P.L=47.5\%$ از (ب) $P.L=15.3\%$ بهتر ولی از (ج) $P.L=0\%$ بدتر است.

در صورت وقوع خطا در محل ۱ (نزدیک ژنراتورهایی که درصد کمتری از توان متمرکز سیستم، یعنی $35/6\%$ درصد را تولید می کنند)، t_{cr} بیشتر از حالت قبلی (محل ۲) خواهد بود. با دور شدن از محل ژنراتورها، در دو محل دیگر وقوع خطا، یعنی محل های ۳ و ۴ (زمان رفع خطای بحرانی سیستم افزایش خواهد یافت. این افزایش در مدلسازی DG به صورت ژنراتور القایی خیلی بیشتر از مدل ژنراتور سنکرون خواهد بود.

۴- نتایج و پیشنهادات

برای در این مقاله، تأثیر نصب واحدهای تولید پراکنده بر