

بررسی عملکرد دینامیکی ژنراتور القایی در شرایط مختلف بهره برداری و بهبود رفتار آن به کمک ابزار مناسب FACTS

مهدی صدری، جواد صفایی

گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

Me_Sadri@yahoo.com, J_Safaei@yahoo.com

چکیده: در این مقاله به منظور بهبود عملکرد دینامیکی ژنراتور القایی، استفاده از SVC و STATCOM ارزیابی و مقایسه شده است. استفاده از ژنراتورهای القایی در نیروگاههای بادی و آبی کوچک مزایای بسیاری دارد، اما مشکلاتی نظیر کنترل ولتاژ و فرکانس در اثر نوسانات دینامیکی بار و همچنین مسائل مربوط به کیفیت توان، باعث شده است که تحقیقات وسیعی بر روی این نوع ژنراتور صورت پذیرد. در غالب تحقیقات انجام شده عملکرد حالت دائمی ژنراتور بررسی شده و در هر کدام به طراحی یکی از ابزار FACTS پرداخته شده است و در آنها بیشتر مسائل طراحی و تعیین پارامترهای مختلف این تجهیزات مطرح شده لیکن به مقایسه رفتار ژنراتور در کنار هر کدام از این تجهیزات و مزایای آنها بر یکدیگر در شرایط دینامیکی مختلف پرداخته نشده است. در این مقاله ضمن مقایسه رفتار دو ابزار فوق و بیان مزایای آنها بر یکدیگر، نشان داده شده است که بکارگیری هر یک از این تجهیزات تاثیر قابل ملاحظه ای در بهبود کیفیت انرژی تولیدی از ژنراتور بخصوص از نوع خود تحریک داشته و همچنین می تواند در بهبود بارگیری از آن مؤثر باشد.

کلید واژه: رفتار دینامیکی، ژنراتور القایی، FACTS

۱- مقدمه

توان راکتیوی که ماشین از شبکه اخذ می نماید افزایش می یابد و کمترین مقدار آن در سرعت سنکرون می باشد [1].

قابل توجه است که گاهی ممکن است میزان توان راکتیوی که ژنراتورهای القایی از شبکه جذب می کنند حتی از میزان قدرت اکتیوی که تولید می کنند تجاوز نماید که این مشخصه نامطلوب، یک تحمیل غیر ضروری به شبکه و واحدهای سنکرون متصل به آن می باشد و در نتیجه سیستم را ممکن است از لحاظ شرایط تنظیم ولتاژ تضعیف نماید. برای حذف این پدیده بایستی توان راکتیو مورد نیاز هر ژنراتور القایی را بطور محلی جبران نمود. از آنجا که میزان توان راکتیو تولیدی توسط خازن وابسته به ولتاژ ترمینال ژنراتور می باشد و امکان تغییر پیوسته در مقدار آن نیست، در شرایط مختلف بارگیری به منظور تثبیت فرکانس و دامنه ولتاژ، به مقادیر متغیری از توان راکتیو می باشد که این مسئله باعث می شود تا بکارگیری منابع توان راکتیو متغیر نظیر تجهیزات FACTS ضروری گردد [3، 4 و 5]. تاکنون مقالات متعددی در این زمینه منتشر شده است که در غالب آنها عملکرد حالت دائمی ژنراتور بررسی شده و در هر کدام به طراحی یکی از این ابزار پرداخته شده است [4 و 5] و در آنها بیشتر مسائل طراحی و تعیین پارامترهای مختلف این تجهیزات

استفاده از ژنراتور القایی قفسه سنجایی با تحریک خازنی در نیروگاه های بادی و آبی کوچک دارای مزایای فوق العاده زیادی می باشد. این ژنراتورها ارزان، محکم، ساده و بدلیل نداشتن رینگ، جاروبک، کموتاتور، باطری و اینورتر، تعمیرات و نگهداری خیلی ساده ای دارند، اما استفاده از این ژنراتورها بصورت SEIG بدلیل فقدان سیستم کنترل مناسب و ارزان چندان در نیروگاه آبی کوچک مورد استفاده قرار نگرفته است [1 و 2].

هنگامیکه ماشین القایی بصورت ژنراتور کار می کند جریان مغناطیسی (راکتیو) مورد نیاز خود را به دو روش می تواند تأمین نماید. در حالت متصل به شبکه این جریان از شبکه و در حالتی که به صورت خود تحریک مورد بهره برداری قرار می گیرد این جریان راکتیو توسط بانک خازنی فراهم می گردد. البته وجود خازن حتی در حالت اول می تواند به کاهش جریان خط انتقال منجر شود که این مسئله خود باعث کاهش تلفات و بهبود رگولاسیون ولتاژ می گردد. نکته قابل توجه در این حالت این است که میزان توان راکتیوی که ماشین القایی در حالت ژنراتوری از شبکه اخذ می نماید به ازای لغزش مشخص از حالت موتوری بیشتر بوده و با افزایش توان اکتیو تولیدی آن، میزان

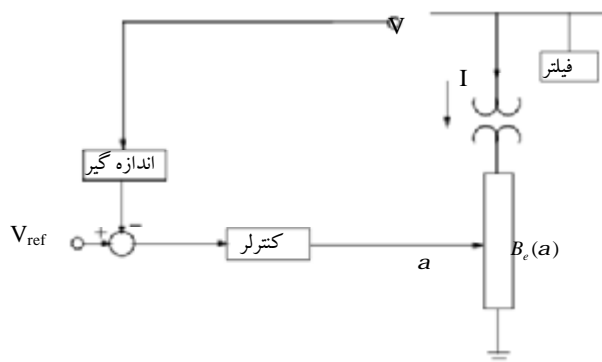
$$P_e = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{qs} + V_{ds} I_{ds})$$

$$Q_e = \frac{3}{2} (-V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs})$$
(3)

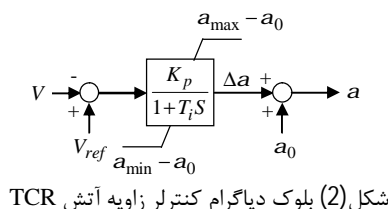
SVC-۲-۲

مدل دینامیکی SVC در شکل (1) نشان داده شده است [9]. از آنجا که راکتورهای سه فاز SVC بکارگرفته شده فاقد کوپلاژ مغناطیسی قابل ملاحظه با یکدیگر هستند مدل dq آنها مانند خازن از دو المان مشابه در محورهای dq تشکیل شده است.

بلوک دیاگرام کنترلر استفاده شده جهت کنترل زاویه آتش ترستورها در شکل (2) نشان داده شده است.



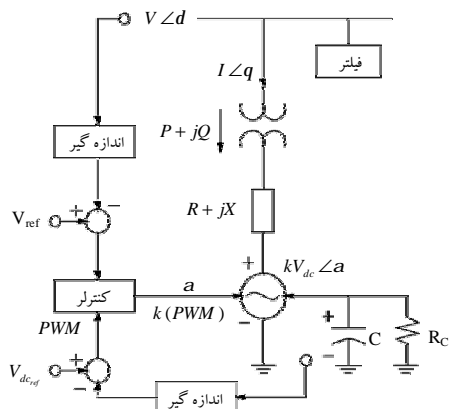
شکل (1) مدل دینامیکی SVC



شکل (2) بلوک دیاگرام کنترلر زاویه آتش TCR

STATCOM-۲-۳

مدل دینامیکی STATCOM و کنترلرهای آن در اشکال (3) و (4) آمده است [9].



شکل (3) مدل دینامیکی STATCOM

مطرح شده است و به مقایسه رفتار ژنراتور در کنار هر کدام از این تجهیزات و مزایای آنها بر یکدیگر در شرایط دینامیکی مختلف پرداخته نشده است. در [6] به مقایسه SVC و DSTATCOM در بهبود پایداری ژنراتور القایی پرداخته شده است. بدین جهت در این مقاله سعی شده است ضمن بررسی عملکرد دینامیکی ژنراتور در کنار SVC و STATCOM به مقایسه آنها پرداخته تا انتخاب هر یک از آنها بر دیگری در شرایط مختلف بهره برداری مستدل گردد.

در ادامه مدل دینامیکی ژنراتور القایی در محورهای dq و معادلات ژنراتور و خازن در این دو محور آمده است. همچنین مدل SVC و STATCOM و کنترلر آنها بیان شده است. در قسمت سوم نحوه شبیه سازی تجهیزات فوق ارائه شده است. در قسمت چهارم نتایج شبیه سازی توسط نرم افزار MATLAB ارائه و به تحلیل پروفایل ولتاژ و فرکانس آن تحت شرایط تغییرات بار و اتصال کوتاه متقارن پرداخته شده است و در هر مورد بکارگیری SVC و STATCOM مورد ارزیابی قرار گرفته است. در قسمت پنجم ارزیابی نهایی در مورد بکارگیری این تجهیزات آمده است.

2- مدل سازی

۲-۱- ژنراتور

در این مقاله از مدل ماشین در دستگاه dq استفاده شده است [7]. روابط ولت آمپری ماشین در [8] آمده و در آن پیشنهاد شده است که معادلات ولتاژ، بر حسب شار بر ثانیه نوشته شود تا تنها یک اپراتور مشتق در معادلات ظاهر شود چراکه این مسئله جهت حل معادلات دیفرانسیل به روش عددی ضروری است. این روابط در نهایت به صورت (1) بدست می آید.

$$pY_{qs} = w_b \left[v_{qs} - \frac{w}{w_b} Y_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} (Y_{mq} - Y_{qs}) \right]$$

$$pY_{ds} = w_b \left[v_{ds} + \frac{w}{w_b} Y_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} (Y_{md} - Y_{ds}) \right]$$

$$pY_{qr} = w_b \left[v_{qr} - \left(\frac{w - w_r}{w_b} \right) Y_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (Y_{mq} - Y_{qr}) \right]$$

$$pY_{dr} = w_b \left[v_{dr} - \left(\frac{w - w_r}{w_b} \right) Y_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (Y_{md} - Y_{dr}) \right]$$
(1)

معادله گشتاور سرعت نیز از رابطه (2) بدست می آید که در آن H ثابت اینرسی توربین و ژنراتور در نظر گرفته شده است. معادلات توان اکتیو و راکتیو در (3) بیان شده است.

$$T_e = 2Hp \frac{w_r}{w_b} + T_L$$
(2)

$$P_{ac} = P_{dc} + P_{loss} \quad (8)$$

$$PV_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(d-q) - \frac{G_c}{C} V_{dc} - \frac{R}{C} \frac{I^2}{V_{dc}} \quad (9)$$

پارامترهای بکار رفته در این رابطه در شکل (3) نشان داده شده است. با توجه به بلوک کنترلی نشان داده شده در شکل (4) می توان معادله دیفرانسیل تغییرات اندیس مدولاسیون و زاویه فاز ولتاژ ترمینال STATCOM را بدست آورد که این روابط در (10) و (11) آمده است [9].

$$Pm = \frac{K_p}{T_i} (V_{ref} - V) - \frac{\Delta m}{T_i} \quad (10)$$

$$P\Delta a = \frac{K_p}{T_i} (V_{dcref} - V_{dc}) - \frac{\Delta a}{T_i} \quad (11)$$

4- نتایج شبیه سازی

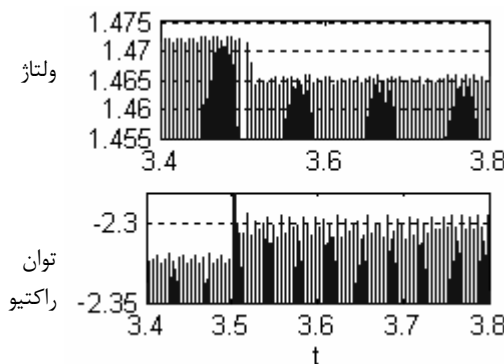
در این قسمت به ترتیب به شبیه سازی ژنراتور در دو حالت متصل به شبکه و خود تحریک پرداخته و در هر مورد بکارگیری SVC و STATCOM را تحت شرایط دینامیک زیر بررسی می کنیم:

1. افزایش 25 درصدی بار
2. اتصال کوتاه متقارن

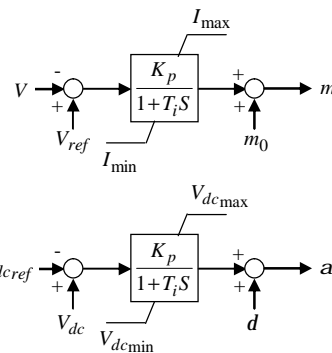
4-1- ژنراتور القایی متصل به شبکه GCIG

الف) ژنراتور بدون جبران کننده

در شکل (5) شکل موج ولتاژ و توان راکتیو جذب شده از شبکه در شرایط اضافه بار 25 درصدی در $t < 3/5^s$ نشان داده شده است. مقدار دامنه ولتاژ قبل از اضافه بار $1/472$ و پس از اضافه بار به مقدار $1/465$ رسیده است. در شکل (6) شکل موج ولتاژ و منحنی لغزش در شرایط اتصال کوتاه آمده است. این شکل نشان می دهد که ژنراتور در زمان اتصال کوتاه $0/2$ ثانیه ای در $3/7^s < t < 3/5^s$ به میزان $0/002$ پریونیت افزایش سرعت داشته و پس از $0/045$ ثانیه به سطح ولتاژ دائمی خود رسیده است.



شکل (5) عملکرد ماشین متصل به شبکه در شرایط اضافه بار



شکل (4) بلوک دیاگرام یک کنترلر ولتاژ PWM در یک STATCOM

در شکل (3) m اندیس مدولاسیون، d زاویه فاز ولتاژ شبکه و a زاویه فاز ولتاژ ترمینال STATCOM است.

3- شبیه سازی

متغیرهای حالت، شارهای محورهای dq و سرعت روتور بوده و برای ژنراتور به همراه خازن، ولتاژ خازن نیز در نظر گرفته شده است. متغیر حالت در SVC، تغییرات زاویه آتش و در مورد STATCOM ولتاژ باس DC، اندیس مدولاسیون PWM و زاویه فاز ولتاژ اینورتر می باشد.

روابط شارهای محور dq با در نظر گرفتن پدیده اشباع در (4) آمده است [8].

$$y_{mq} = X_{aq} \left(\frac{y_{qs}}{X_{ls}} + \frac{y_{qr}}{X_{lr}} \right) - \frac{X_{aq}}{X_M} f(y_{mq}) \quad (4)$$

$$y_{md} = X_{ad} \left(\frac{y_{ds}}{X_{ls}} + \frac{y_{dr}}{X_{lr}} \right) - \frac{X_{ad}}{X_M} f(y_{md})$$

که تابع f توسط رابطه (5) بیان شده است [10].

$$f(y_m) = y_m - \tan^{-1}(y_m) \quad (5)$$

روابط ولتاژ و جریان خازن نیز به شکل زیر است.

$$i_{qc} = \omega C v_{ds} + C p v_{qs} \quad (6)$$

$$i_{dc} = \omega C v_{qs} + C p v_{ds}$$

روابط بکار گرفته شده در شبیه سازی SVC به صورت زیر است.

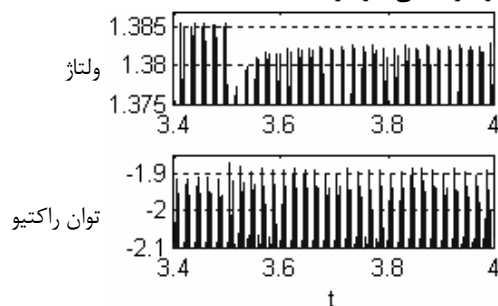
$$a = \Delta a + \frac{p}{2}$$

$$B_e = B_0 \left[2 - \frac{(2a - \sin 2a)}{p} \right] \quad (7)$$

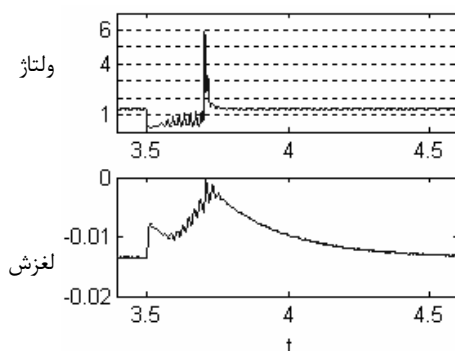
$$p\Delta a = \frac{k_p}{T_i} (V - V_{ref}) - \frac{\Delta a}{T_i}$$

مدل STATCOM بر اساس قانون بقای انرژی در هر لحظه بدست می آید که توسط رابطه (8) بیان شده است. معادله ولتاژ باس dc در STATCOM از (9) بدست می آید.

شده است. ژنراتور در زمان اتصال کوتاه 0/2 ثانیه ای به میزان 0/0013 پریونیت افزایش سرعت داشته و پس از 0/19 ثانیه به سطح ولتاژ دائمی خود رسیده است



شکل (9) عملکرد ژنراتور به همراه STATCOM در شرایط اضافه بار

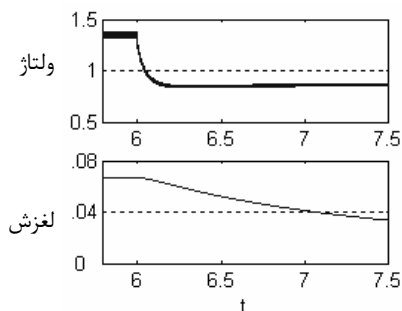


شکل (10) عملکرد عملکرد ژنراتور به همراه STATCOM تحت شرایط اتصال کوتاه

2-4- ژنراتور القایی خود تحریک SEIG

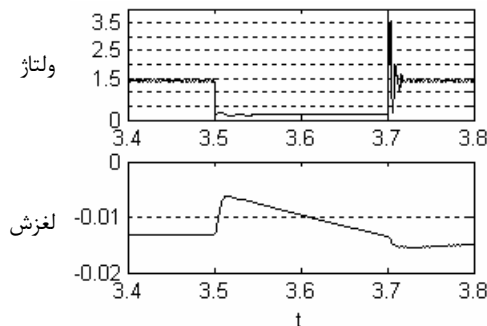
الف) ژنراتور بدون جبران کننده

در شکل (11) عملکرد ژنراتور خود تحریک در شرایط اضافه بار 25 درصدی در $t < 6/0$ آمده است.



شکل (11) عملکرد ژنراتور خود تحریک در شرایط اضافه بار

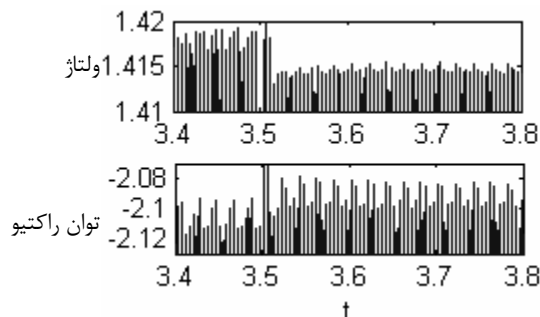
دامنه ولتاژ قبل از اضافه بار 1/35 و پس از اضافه بار به مقدار 0/855 رسیده است. همچنین فرکانس قبل از اضافه بار 46/2 و بعد از آن 48/5 هرتز می باشد بنابراین ژنراتور پاسخگوی این اضافه بار نبوده و به دلیل افت ولتاژ ترمینال جریان بار کاهش یافته و در نتیجه جریان استاتور و گشتاور مقاوم کاهش یافته و باعث افزایش فرکانس به میزان 2/3 هرتز شده است. در شکل (12) عملکرد ژنراتور در حالت اتصال کوتاه نشان داده شده است.



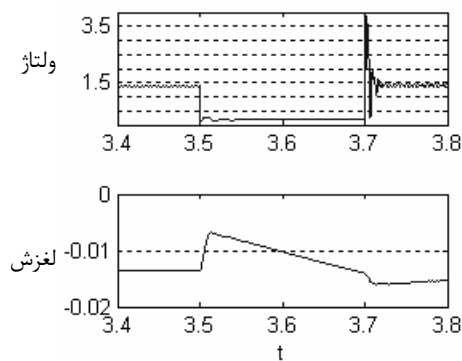
شکل (6) عملکرد ماشین متصل به شبکه تحت شرایط اتصال کوتاه

ب) ژنراتور به همراه SVC

در شکل (7) عملکرد ماشین متصل به شبکه به همراه SVC آمده است. مقدار دامنه ولتاژ قبل از اضافه بار 1/419 و پس از اضافه بار به مقدار 1/415 رسیده است. در شکل (8) عملکرد ژنراتور در حالت اتصال کوتاه نشان داده شده است. ژنراتور در زمان اتصال کوتاه 0/2 ثانیه ای به میزان 0/0017 پریونیت افزایش سرعت داشته و پس از 0/040 ثانیه به سطح ولتاژ دائمی خود رسیده است.



شکل (7) عملکرد ژنراتور به همراه SVC در شرایط اضافه بار

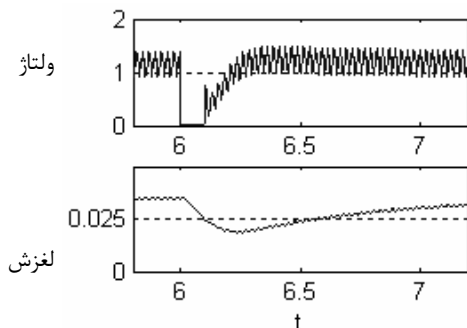


شکل (8) عملکرد ژنراتور به همراه SVC تحت شرایط اتصال کوتاه

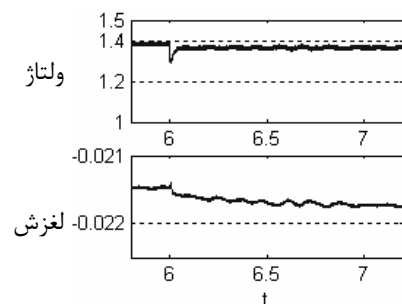
ج) ژنراتور به همراه STATCOM

در شکل (9) عملکرد ماشین متصل به شبکه به همراه STATCOM آمده است. مقدار مؤثر ولتاژ قبل از اضافه بار 1/385 و پس از اضافه بار به مقدار 1/382 رسیده است. در شکل (10) عملکرد ژنراتور در حالت اتصال کوتاه نشان داده شده است.

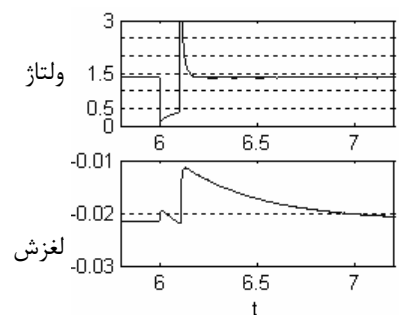
حالت اتصال کوتاه نشان داده شده است. ژنراتور در زمان اتصال کوتاه 0/1 ثانیه ای به میزان 0/01 پریونیت افزایش سرعت داشته و پس از 0/08 ثانیه به سطح ولتاژ دائمی خود رسیده است.



شکل (12) عملکرد ژنراتور خود تحریک به همراه SVC تحت شرایط اتصال کوتاه



شکل (13) عملکرد ژنراتور خود تحریک به همراه STATCOM در شرایط اضافه بار

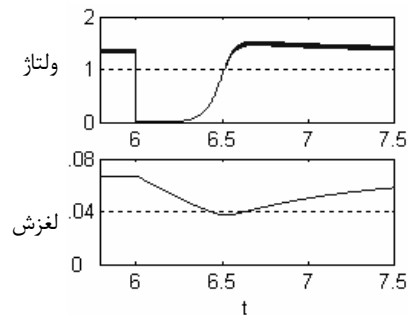


شکل (14) عملکرد ژنراتور خود تحریک به همراه STATCOM تحت شرایط اتصال کوتاه

5- نتیجه گیری

5-1- در حالت متصل به شبکه

در این حالت بدلیل اینکه ژنراتور به باس بینهایت متصل است و مشکلی از نظر تأمین توان راکتیو مورد نیاز خود ندارد، بکارگیری تجهیزات FACTS تنها به جهت جلوگیری از افزایش ولتاژ ترمینال ژنراتور و بانک خازنی و تثبیت آن در مقدار استاندارد قابل توجیه می باشد و در بارگیری از ژنراتور نقش چندانی را ایفا نمی کنند. بدین سبب در مورد GCIG، SVC و STATCOM از نظر عملکرد مزیتی بر یکدیگر

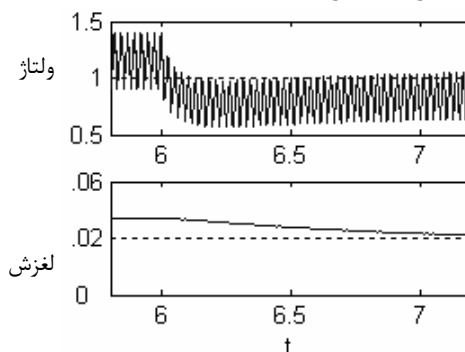


شکل (15) عملکرد ژنراتور خود تحریک تحت شرایط اتصال کوتاه

ژنراتور در زمان اتصال کوتاه 0/1 ثانیه ای در $6/0^s < t < 6/1^s$ به میزان 0/03 پریونیت افزایش سرعت داشته و پس از 2/75 ثانیه به سطح ولتاژ دائمی خود رسیده است. در این حالت به علت افزایش سرعت ژنراتور ولتاژ بازیافت شده دارای یک پیک در $6/65^s$ به اندازه 0/15 داشته و سپس با کاهش سرعت در $8/95^s$ به مقدار قبل از اتصال خود رسیده است.

ب) ژنراتور به همراه SVC

در شکل (13) عملکرد ژنراتور خود تحریک به همراه SVC آمده است. دامنه ولتاژ قبل از اضافه بار 1/391 و پس از اضافه بار به مقدار 1/048 رسیده است.



شکل (16) عملکرد ژنراتور خود تحریک به همراه SVC در شرایط اضافه بار

همچنین فرکانس قبل از اضافه بار 47/5 و بعد از آن 49 هرتز می باشد. در شکل (14) عملکرد ژنراتور در حالت اتصال کوتاه نشان داده شده است. ژنراتور در زمان اتصال کوتاه 0/1 ثانیه ای به میزان 0/03 پریونیت افزایش سرعت داشته و پس از 0/31 ثانیه به سطح ولتاژ دائمی خود رسیده است.

ج) ژنراتور به همراه STATCOM

در شکل (15) عملکرد ژنراتور خود تحریک به همراه STATCOM آمده است. دامنه ولتاژ قبل از اضافه بار 1/3892 و پس از اضافه بار به مقدار 1/3738 رسیده است. همچنین فرکانس قبل از اضافه بار 48/94 و بعد از آن 48/91 هرتز می باشد. در شکل (16) عملکرد ژنراتور به همراه STATCOM در

978-988.

- [6] M. B. C. Salles and W. Freitas and A. Morelato, "Comparative analysis between SVC and DSTATCOM Devices for Improvement of induction generator stability," IEEE Melecon, May 2004.
- [7] Li. Wang and R. Deng, "Transient performance of an isolated induction generator under unbalanced excitation capacitors," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999. pp 887-893
- [8] P.C. Krause, Analysis of electric machinery, New York: McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [9] C. A. Canizares, "Modeling and Implementation of TCR and VSI Based FACTS Controllers," internal report, ENEL and Politecnico di Milano, October 1999.
- [10] Sung-Chun Kuo and Li. Wang, "Dynamic Eigenvalue analysis of a self-excited induction generator feeding an induction motor," IEEE Trans. 0-7803-6672-7/01, pp.1393-1397.

پیوست

مقادیر پایه برای تبدیل (pu)

توان پایه: 660kVA، ولتاژ پایه: 690V

مشخصات ژنراتور	
توان نامی kVA	660
ولتاژ نامی V	690
فرکانس نامی Hz	50
راکتانس مغناطیس کننده Ω	13/8
مقاومت استاتور Ω	0/087
راکتانس استاتور Ω	0/302
مقاومت منتقل شده روتور در فرکانس نامی Ω	0/228
راکتانس منتقل شده روتور در فرکانس نامی Ω	0/302
مقادیر SVC	
X_L	X_C
در حالت NCIG	1pu
در حالت SEIG	3pu
مقادیر STATCOM	
ولتاژ ترمینال AC متصل به ترانس افزایشده	230V
ولتاژ باس DC	400V
جریان نامی	11/9 A
خازن باس DC	470 mF
مشخصات خط انتقال در حالت NCIG	
مقاومت	0/015 pu
راکتانس	0/15 pu
پارامترهای کنترلر	
T_i	K_P
در تمام بلوکها	10

تشکر

با تشکر از زحمات و راهنمایی های استاد محترم، جناب آقای دکتر قاضی که ما را تهیه این مقاله یاری نمودند.

ندارند. در شرایط اتصال کوتاه جبران کننده های فوق اثر قابل ملاحظه ای بر سرعت ولتاژ سازی ندارند و در این مورد SVC تنها توانسته است 0/005 ثانیه این عمل را تسریع بخشد (از 0/045 به 0/040) چرا که در زمان ولتاژ سازی آنچه از SVC در مدار قرار دارد همان خازن ثابت است در حالیکه STATCOM به دلیل نیاز به تأمین شارژ باس DC خود باعث تأخیر 0/19 ثانیه ای شده است.

5-2- در حالت خود تحریک

نقش تجهیزات FACTS در این حالت بسیار قابل توجه است. نشان داده شد که یک SVC در کنترل ولتاژ ژنراتور در شرایط دینامیک و نوسانات بار نقش مهمی داشته و باعث می شود تا ولتاژ ژنراتور کاهش کمی داشته باشد. لازم به ذکر است که در این مقاله تنها افزایش 25 درصدی بار شبیه سازی شد و ملاحظه شد که با وجود SVC نیز ژنراتور پاسخگوی این افزایش بار نیست، اما با توجه به میزان افت ولتاژ در این حالت نسبت به حالت جبران نشده می توان نتیجه گرفت که ژنراتور بارپذیری بهتری نسبت به حالت جبران نشده داشته و این در حالی است که در بکارگیری STATCOM ملاحظه شد که ژنراتور با همان کیفیت حالت GCIG توانست اضافه بار تحمیلی را پاسخگو باشد و از نظر فرکانس دچار مشکل نگردد. از آنجا که مشکلات فرکانسی ژنراتور SEIG ناشی از مشکلات حفظ سطح ولتاژ می باشد، استفاده از STATCOM و پس از آن SVC در یک مزرعه بادی کمک مؤثری در تولید انرژی با کیفیت استاندارد می نماید.

مراجع

- [1] John Brazil, "Stand-alone induction generators for use in small isolated hydro plants", fourth international conference on small hydro water power, 1990
- [2] E. G. Marra and J. A. Pomilio, "Induction-Generator-Based System Providing Regulated Voltage With Constant Frequency," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 47, No.04, August 2000. pp 908-914
- [3] W. Freitas, A. Morelato, W. Xu and F. Sato, "Impacts of ac generators and DSTATCOM devices on the dynamic performance of distributed systems," IEEE Trans. on power delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005. pp. 1493-1501
- [4] B. singh, S. S. Murthy and S. Gupta, "analysis and design of STATCOM-based voltage regulator for self-excited induction generators," IEEE Trans. On Energy Conversion. Vol. 19, No. 4, December 2004, pp. 783-790.
- [5] T. Ahmad, O. Noro, E. Hiraki and M. Nakaoka, "Terminal voltage regulation characteristics by Static VAR Compensator for a three-phase self-excited induction generator," IEEE Trans. On Industry App. Vol. 40, No. 4, July/August 2004, pp.