

ANALISIS PENGARUH PEMASANGAN SHUNT REACTOR TERHADAP SISTEM TENAGA LISTRIK

Aksan¹⁾, Satriani Said²⁾

^{1,2)}Dosen Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang

ABSTRACT

This research aims to analyze the effect of installing a shunt reactor on the parameters of the electric power system. The installation of the shunt reactor results in changes in the performance of the electric power system such as system voltage, system power factor, frequency, electric generator rotational speed and generator excitation system. The performance of the transmission line, especially the medium and longer distances, can be improved by reactive compensation both in series and in parallel. Series compensation consists of a capacitor bank (SVC) placed in series in each phase conductor of a line. Shunt reactor with the placement of inductors from each phase of the line to neutral to reduce the effect of voltage changes on the receiver side against load changes. The effect of changes in voltage affects the performance of the electric power system from power plants to electrical loads. The installation of the shunt reactor stabilizes the voltage within a tolerance limit of $\pm 5\%$ of the nominal voltage, the system frequency is within the tolerance range of $\pm 1\%$ of the nominal frequency and the system power factor is > 0.85 lagging or < 0.9 leading.

Keywords: Transmission, Electric Load, Shunt Reactor, Compensated Capacitor, Power Factor, Voltage

1. PENDAHULUAN

Kinerja suatu saluran transmisi, khususnya jarak menengah dan yang lebih panjang, dapat ditingkatkan dengan *reactive compensation* (kompensasi reaktif) baik secara seri maupun parallel. *Series compensation* terdiri dari kapasitor bank (SVC (*Static Var Compensator*)) yang ditempatkan secara seri di setiap fase konduktor dari suatu saluran. *Shunt compensation* terkait dengan penempatan induktor dari setiap fase saluran ke netral untuk mengurangi pengaruh perubahan tegangan, perubahan frekuensi dan perubahan kinerja system pembangkit tenaga listrik dan mengurangi perubahan pada sisi penerima terhadap perubahan beban (PT PLN (persero), 2014).

Shunt reactor (atau disebut SVC) adalah peralatan listrik untuk menyediakan kompensasi *fast-acting reactive power* pada jaringan transmisi listrik tegangan tinggi. SVC adalah bagian dari sistem peralatan AC transmisi yang fleksibel, pengatur tegangan dan menstabilkan sistem. Jika daya sistem beban reaktif kapasitif (*leading*), SVC akan menaikkan daya reaktor untuk mengurangi VAR dari sistem sehingga tegangan sistem turun. Pada kondisi reaktif induktif (*lagging*), SVC akan mengurangi daya reaktor untuk menaikkan VAR dari sistem sehingga tegangan sistem akan naik. Pada SVC pengaturan besarnya VAR dan tegangan dilakukan dengan mengatur besarnya kompensasi daya reaktif induktif pada reaktor, sedangkan kapasitor bank bersifat statis.

Kebutuhan daya reaktif pada sistem dapat dipasok oleh unit pembangkit, sistem transmisi, reaktor dan kapasitor. Karena kebutuhan daya reaktif pada sistem bervariasi yang disebabkan oleh perubahan beban. SVC dapat dengan cepat memberikan supply daya reaktif yang diperlukan dari sistem sehingga besarnya tegangan pada gardu induk dapat dipertahankan sesuai dengan standar yang diizinkan. Kestabilan tegangan pada gardu induk akan meningkatkan kualitas tegangan yang sampai kekonsumen, mengurangi losses dan juga dapat meningkatkan kemampuan penghantar untuk mengalirkan arus.

Salah satu solusi yang sering digunakan untuk mengatasi masalah pemasangan shunt reaktor yang berlebih adalah dengan menggunakan pengatur eksitasi pembangkit secara otomatis dan pengatur kecepatan putar pembangkit secara otomatis. Pengatur otomatis ini memiliki kemampuan untuk mengatur besarnya arus eksitasi pembangkit dan pengatur kecepatan putar pembangkit sehingga dapat mengikuti irama atau ayunan perubahan beban secara tiba-tiba atau pemasangan kompensator yang berlebih. Dengan kestabilan pemasangan shunt reaktor diharapkan tegangan system tenaga listrik berkisar antara -10% sampai +5% dari tegangan nominal dan frekuensi system berkisar antara -5% sampai +5% dari frekuensi nominal serta factor daya system diatas 0,85.

1.1. Shunt Reactor

¹ Korespondensi penulis : Aksan,ST,MT, HP 081244315151, aksansubarjo@gmail.com

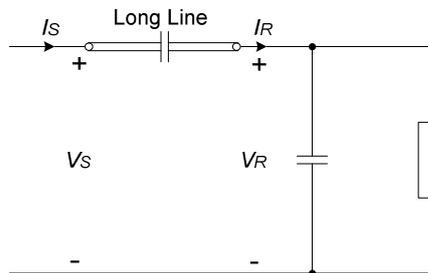
Shunt reactor dipasang untuk mengkompensasi tegangan yang tidak diinginkan akibat kapasitansi saluran (*line capacitance*). Sejumlah kompensasi reaktor dibutuhkan pada saluran transmisi untuk menjaga tegangan pada sisi penerima sesuai dengan kebutuhan.

1.2. Shunt Capacitor Compensation

Shunt capacitor digunakan ketika kondisi beban besar yang menyebabkan power faktor lagging dan penurunan tegangan yang besar. Capacitor ini dapat dipasang secara langsung di bus bar atau pada belitan tersier transformator daya, sehingga dapat mengurangi rugi-rugi dan penurunan tegangan.

1.3. Series Capacitor Compensation

Series capacitor dihubungkan secara seri dengan saluran, biasanya lokasi pemasangan di tengah seperti ditunjukkan pada gambar 1, yang bertujuan untuk mengurangi reaktansi seri antara titik pengirim daya listrik dan beban. Hasilnya memperbaiki stabilitas transient dan *steady-state*, pembeban yang lebih ekonomis, dan mengurangi penurunan tegangan pada bus beban.



Gambar 1. *Shunt dan series capacitor compensation*

Secara sederhana, kebutuhan kompensasi reaktif (ΔQ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 1:

$$\Delta Q = \left\{ Q = P\sqrt{1 - pf^2} \right\} = P \left\{ \sqrt{1 - pf_{DESIRED}^2} - \sqrt{1 - pf_{PRESENT}^2} \right\} \quad (1)$$

Keterangan $\cos \varphi = \frac{P}{S}$; dimana $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Pada penelitian ini ditempatkan variable pengumpulan data meliputi frekuensi system, factor daya system, tegangan system, kecepatan putar generator dan arus eksitasi generator sinkron. sedangkan variabel bebasnya yaitu beban resistif R dan beban induktif L serta kapasitor Bank C.

Pengumpulan data dilakukan terhadap frekuensi system, factor daya system, tegangan system, kecepatan putar generator dan arus eksitasi generator terhadap berbagai variasi beban resistif dan beban resistif induktif serta pemasangan *shunt reactor* sebagai acuan dalam proses pengiriman daya aktif dan reaktif dari generator sinkron dan variasi berbagai beban. Menganalisis pengaruh pemasangan *shunt reactor* terhadap system tenaga listrik mulai sumber generator sinkron, transmisi, distribusi serta beban-beban listrik lainnya. Kompesator jaringan listrik pada umumnya terjadi pada jaringan menengah dan panjang atau pemasangan khusus (SVC) pada jaringan yang sering mengalami penurunan tegangan. Pemasangan kompensator jaringan ini akan mengakibatkan terjadinya perubahan kinerja system tenaga listrik seperti kestabilan tegangan sistem, factor daya system, frekuensi, kecepatan putar pembangkit listrik dan system eksitasi pembangkit.

2.1. Modul Simulator Power System

Digunakan sebagai simulator power system sebagai sumber listrik (generator dan sumber PLN), model jaringan distribusi / transmisi, dan beban variasi resistif, induktif dan kapasitif.

2.2. Modul Power Meter dan Multimeter

Modul power meter dipakai pada percobaan ini adalah PM800. Power meter ini digunakan untuk mengukur daya, factor daya dan frekuensi system. Multimeter yang digunakan pada pengukuran ini adalah multimeter digital (elektronik) yang dapat digunakan untuk mengukur arus dan tegangan.

2.3. Generator Sinkron

Generator sinkron adalah mesin listrik yang digunakan untuk mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Alternator ini disebut generator sinkron (sinkron = serempak) karena kecepatan perputaran medan magnet yang terjadi sama dengan kecepatan perputaran rotor generator. Alternator ini menghasilkan energi listrik bolak balik (*alternating current, AC*) dan biasa diproduksi untuk menghasilkan listrik AC 1-fasa atau 3-fasa.

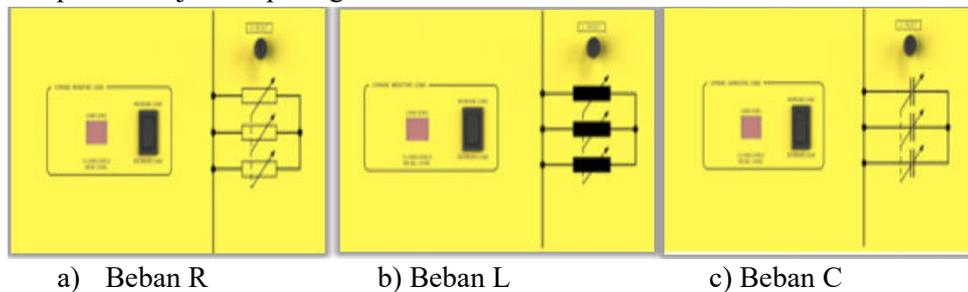
2.4. Modul Shunt Reactor

Shunt reactor yang digunakan pada penelitian ini adalah modul *shunt reactor* dari kapasitif dan induktif. Besarnya nilai kapasitif dan inductor pada shunt reactor bervariasi, sehingga dapat dilakukan berbagai percobaan dalam eksperimen tersebut.

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

3.1. Model Beban Sistem Tenaga Listrik

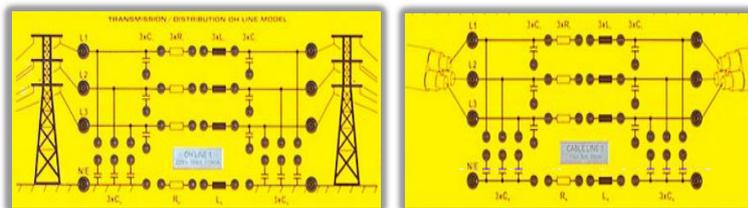
Beban yang digunakan pada system tenaga listrik untuk penelitian ini terdiri dari beban R, beban L, dan beban C. Masing-masing beban mempunyai kapasitas beban berbeda, setiap beban mempunyai kapasitas R= 160 W dan L= 200 Var, dan C= 200 Var. Adapun beban system tenaga listrik yang digunakan untuk pengambilan data seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Model Beban R, L, dan C

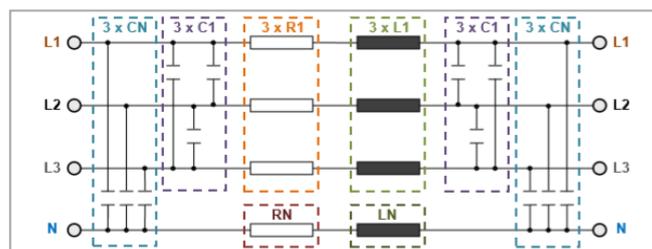
3.2. Model Jaringan Transmisi Sistem Tenaga Listrik

Model system tenaga listrik yang digunakan pada penelitian ini mulai dari system pembangkitan tenaga listrik yang terdiri dari sumber PLN dan sumber generator lainnya. Beberapa tipe model jaringan dan transmisi antara lain : jaringan transmisi tegangan tinggi 230 kV , jaringan transmisi tegangan menengah 70 kV dan 35 kV serta jaringan distribusi 11 kV. Model jaringan system tenaga listrik ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 3. Model jaringan transmisi system tenaga listrik

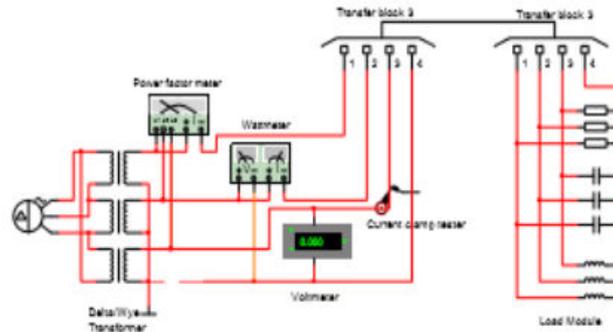
Model jaringan transmisi tegangan menengah system tenaga listrik yang digunakan pada penelitian adalah model *OH LINE* 230 kV, 100 km dan 110 MVA ditunjukkan pada gambar 4. Model jaringan ini mengandung nilai tahanan, induktansi serta reactor shunt capacitiv sepanjang jaringan transmisi baik pada sisi awal dan sisi akhir.



Gambar 4. Model simulasi jaringan transmisi system tenaga listrik

3.3. Model Pengujian Sistem Tenaga Listrik

Pengujian awal yang dilakukan untuk analisis pengaruh pemasangan shunt reactor terhadap system tenaga listrik dilakukan adalah dengan menganalisis pengaruh pemakaian beban R murni, beban L murni, dan beban C murni. Tujuan analisis ini untuk mengetahui pengaruh pemakaian berbagai beban terhadap parameter jaringan distribusi system tenaga listrik. Parameter yang diukur pada pada sisi pengirim dan sisi penerima system tenaga listrik adalah daya aktif, daya reaktif, daya semu, tegangan, arus beban, factor daya. Adapun gambar pengujian jaringan distribusi system tenaga listrik ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Model pengujian system tenaga listrik

3.3.1. Pengujian Sistem Pembangkit Tenaga Listrik

Modul sistem pembangkit tenaga listrik yang digunakan sebagai sumber tenaga listrik adalah generator sinkron yang digerakkan oleh *prime mover* motor induksi. Pengaturan kecepatan putar *prime mover* sebesar $n = 1500$ rpm dan arus eksitasi sebesar I eksitasi = 0,67 A. Hasil pengujian system pembangkit pada keluaran transformator tegangan ditunjukkan pada table 1 dan table 2.

Tabel 1. Pengujian system pembangkit tenaga listrik

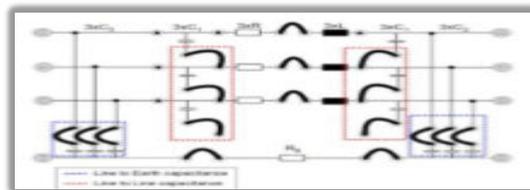
n (rpm)	I eksitasi (A)	V_{L-L} (V)	V_{L-N} (V)	I (A)	P (w)	Q (Var)	S (VA)	pf	f (Hz)
1500	0,71	209,3	121,2	0,198	34	63	72	-0,470	50

Tabel 2. Pengujian keluaran transformator pada sisi pembangkit tenaga listrik

Pengujian Keluaran Transformator (sisi pengirim)							
V_{L-L} (V)	V_{L-N} (V)	I (A)	P (W)	Q (Var)	S (VA)	pf	f (Hz)
379,2	219	0	0	0	0	1	50

3.3.2. Pengujian Sistem Pembangkit dan Jaringan Transmisi

Sistem pembangkit dan jaringan transmisi menengah dihubungkan tanpa menggunakan beban. Kapasitansi saluran jaringan transmisi yang terjadi antara fasa ke tanah dan fasa ke fasa dengan model kapasitor pada jaringan transmisi dalam hubungan Y dan Δ yang ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Kapasitansi yang terjadi pada jaringan transmisi

Hasil pengujian ditunjukkan pada table 1 dengan memasukkan sumber tegangan pada system jaringan transmisi tanpa adanya hubungan dengan beban dan reactor shunt pada sisi penerima (sisi beban). Hasil yang diperoleh memperlihatkan terjadinya perubahan tegangan jaringan dan mempengaruhi arus eksitasi pada system pembangkit dan timbulnya arus beban akibat terjadinya sifat kapasitansi pada jaringan transmisi.

Tabel 3. Pengujian Sistem Pembangkit dan Jaringan Transmisi

Sisi Pembangkit										Sisi Pengirim						
n (rpm)	Ieksitasi (A)	V _{L-L} (V)	V _{L-N} (V)	I _{out} (A)	P (w)	Q (Var)	S (VA)	pf	f (Hz)	V _{L-L} (V)	I (A)	P (w)	Q (Var)	S (VA)	pf	f (Hz)
1500	0,45	207	118,6	0,720	45	-245	258	0,176	50	372,2	0,505	5	-325	325	0,01	50

3.3.3. Pengujian Sistem Tenaga listrik dengan Pemasukan beban

Beban system tenaga listrik umumnya mengandung nilai resistif dan induktansi. Beban yang dihubungkan pada jaringan transmisi dengan beban R sebesar 160 W dan induktansi sebesar 200 Var dan 400 Var. Hasil pengujian menunjukkan perubahan parameter system tenaga listrik pada sisi pengirim sumber tenaga listrik dan sisi penerima (beban) akibat perubahan beban ditunjukkan pada table 4. Berdasarkan table 4 jika beban lebih bersifat induktif maka parameter yang berubah pada sisi penerima yaitu factor daya semakin menurun dari 1 sampai 0,45 dan tegangan system semakin menurun dari 377,5 Volt sampai 373,4 Volt serta arus beban semakin naik dari 0,22 A sampai 0,589 A, sedangkan parameter system pada sisi pengirim semakin stabil yaitu factor daya semakin naik dari 0,01 sampai 0,97 dan tegangan system semakin naik dari 372,2 Volt sampai 376,2 Volt serta arus beban semakin turun dari 0,505 A sampai 0,246 A. Arus eksitasi pada sisi pembangkit mengalami kenaikan menuju stabil yaitu dari 0,45A, 0,48A, 0,61A sampai 0,71A.

Tabel 4. Parameter system tenaga listrik akibat pemasukan beban

Sisi Beban			Sisi Pengirim							Sisi Penerima						
R (W)	L (Var)	C (Var)	V _{L-L} (V)	V _{L-N} (V)	I (A)	P (w)	Q (Var)	S (VA)	Pf	V _{L-L} (V)	V _{L-N} (V)	I (A)	P (w)	Q (Var)	S (VA)	pf
0	0	0	372,2	215,2	0,505	5	-325	325	0,01	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	371,3	214,4	0,547	149	-319	352	0,242	377,5	217,9	0,22	44	0	44	1
160	200	0	373,9	215,9	0,33	163	-141	216	0,755	375,2	216,6	0,373	160	182	242	0,659
160	400	0	376,2	217,2	0,246	156	31	160	0,97	373,4	215,5	0,589	154	348	381	0,45

3.3.4. Pengujian Sistem Tenaga listrik dengan pemasangan kapasitor kompensasi

Berdasarkan hasil pengujian table 4, menunjukkan bahwa beban semakin bersifat induktif pada sisi penerima maka parameter system semakin menurun kualitasnya, oleh karena itu untuk menaikkan kinerja parameter system maka dipasang kapasitor kompensasi pada sisi penerima (beban) sebesar 200 Var dan 400 Var. Hasil pengujian pada table 5 menunjukkan bahwa parameter system pada sisi penerima semakin stabil yaitu factor daya semakin naik dari 0,45 sampai 0,997 dan tegangan system semakin naik dari 373,4 Volt sampai 375,6 Volt serta arus beban semakin turun dari 0,589 A sampai 0,246 A, sedangkan parameter system pada sisi pengirim semakin menurun yaitu factor daya semakin turun dari 0,97 sampai 0,46 dan tegangan system turun dari 376,2 Volt sampai 369,7 Volt serta arus beban semakin naik dari 0,246 A sampai 0,562 A. Arus eksitasi pada sisi pembangkit mengalami penurunan yaitu dari 0,71A, 0,59A sampai 0,48A.

Tabel 5. Parameter system tenaga listrik dengan pemasangan kapasitor kompensasi

Sisi Beban			Sisi Pengirim							Sisi Penerima						
R (W)	L (Var)	Kapasitor Kompensasi C (Var)	V _{L-L} (V)	V _{L-N} (V)	I (A)	P (w)	Q (Var)	S (VA)	Pf	V _{L-L} (V)	V _{L-N} (V)	I (A)	P (w)	Q (Var)	S (VA)	pf
160	400	0	376,2	217,2	0,246	156	31	160	0,97	373,4	215,5	0,589	154	348	381	0,45
160	400	200	372,7	215,3	0,336	158	-148	217	0,729	374,2	216,1	0,359	156	172	233	0,669
160	400	400	369,7	213,9	0,562	165	-319	359	0,46	375,6	216,9	0,246	159	5	160	0,997

3.3.5. Pengujian Sistem Tenaga listrik dengan pemasangan shunt reactor

Berdasarkan hasil pengujian table 5, menunjukkan bahwa semakin besar pemasangan kapasitor kompensasi di sisi penerima (beban) maka system pada sisi penerima menjadi lebih kapasitif. Oleh karena itu factor daya dan tegangan system di sisi penerima semakin stabil yaitu pf sebesar 0,997 dan tegangan sebesar 375,6 Volt. Pada sisi pengirim factor daya, tegangan system dan arus eksitasi pembangkit menjadi lebih menurun yaitu pf sebesar 0,46, tegangan sebesar 369,7 volt serta arus eksitasi pembangkit sebesar 0,48 A. Pemasangan kapasitor kompensasi mengakibatkan parameter factor daya dan tegangan sisi penerima semakin stabil sedangkan parameter sisi pengirim mengalami penurunan kestabilan. Oleh karena itu untuk menaikkan kinerja parameter system sisi pengirim dan penerima perlu ditambahkan pemasangan shunt reactor di sisi

penerima. Pemasangan shunt reactor di sisi penerima (beban) sebesar 200 Var, 400 Var dan 600 Var. Hasil pengujian dengan pemasangan shunt reactor ditunjukkan pada table 6, bahwa parameter system di sisi pengirim semakin stabil yaitu factor daya semakin naik dari 0,46 sampai 0,962 dan tegangan system semakin naik dari 369,7 volt sampai 378,8 volt serta arus beban semakin turun dari 0,562 A menjadi 0,276 A dengan arus eksitasi pembangkit normal sebesar $I_{ex} = 0,71$. sedangkan parameter system di sisi penerima mengalami ketidakstabilan/semakin menurun yaitu factor daya semakin turun dari 0,97 menjadi 0,3344 dan tegangan system turun dari 375,6 volt menjadi 369,8 volt serta arus beban semakin naik dari 0,246 A sampai 0,87 A.

Tabel 6. Parameter system tenaga listrik dengan pemasangan shunt reaktor

Sisi Beban			Sisi Pengirim							Sisi Penerima						
R (W)	Shunt Reaktor L (Var)	Kapasitor Kompensasi C (Var)	V _{L-L} (V)	V _{L-N} (V)	I (A)	P (w)	Q (Var)	S (VA)	pf	V _{L-L} (V)	V _{L-N} (V)	I (A)	P (w)	Q (Var)	S (VA)	pf
160	400	400	369,7	213,9	0,562	165	-319	359	0,46	375,6	216,9	0,246	159	5	160	0,997
160	600	400	372,5	215,1	0,354	178	-143	229	0,778	373,7	215,7	0,386	175	177	250	0,7
160	800	400	375,1	216,6	0,276	173	40	179	0,962	371,8	214,6	0,607	170	351	391	0,436
160	1000	400	378,8	218,1	0,450	191	222	294	0,649	369,8	213,6	0,87	186	524	557	0,334

3.3.6. Analisis Dampak Pemasangan Shunt Reactor dan Kapasitor Kompensasi

Dampak pemasangan shunt reactor dan kapasitor kompensasi pada sisi penerima (beban) sangat mempengaruhi ketidakstabilan tegangan system, factor daya system, arus jaringan dan arus eksitasi system pembangkit. Jika pemasangan kapasitor kompensasi melebihi nilai kompensator maka system di sisi penerima bersifat kapasitif sehingga parameter system lebih stabil sedangkan di sisi pengirim sangat menurun ketidakstabilannya, tetapi jika pemasangan shunt reactor melebihi nilai shunt reaktor maka system di sisi penerima bersifat induktif sehingga ketidakstabilan system menurun sedangkan disisi pengirim parameter system lebih stabil. Oleh karena itu untuk pemasangan shunt reaktor dan kapasitor kompensasi di sisi penerima harus memperhatikan daya beban yang dilayani, setting pengaman yang andal, dan setting system pembangkit yang andal.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Sifat kapasitif pada jaringan transmisi sangat mempengaruhi parameter tegangan system, factor daya system, arus jaringan system dan arus eksitasi pembangkit yang mengalami ketidakstabilan. Pemasangan kapasitor kompensasi di sisi penerima mempengaruhi kestabilan parameter system sisi penerima dan sisi pengirim. Disisi pengirim parameter system mengalami kenaikan sedangkan sisi penerima parameter system lebih stabil. Pemasangan shunt reactor di sisi penerima mempengaruhi kestabilan parameter system sisi penerima dan sisi pengirim. Disisi pengirim parameter system lebih stabil sedangkan sisi penerima parameter system mengalami ketidakstabilan. Pemasangan shunt reactor dan kapasitor kompensasi di sisi penerima sangat mempengaruhi ketidakstabilan parameter system disisi penerima dan pengirim, oleh karena itu pemasangan shunt reactor dan kapasitor kompensasi di sisi penerima harus memperhatikan daya beban yang dilayani, setting pengaman, dan setting system pembangkit agar parameter tegangan system dalam batas toleransi $\pm 5\%$ tegangan nominal, frekuensi system dalam batas toleransi $\pm 1\%$ frekuensi nominal dan factor daya $> 0,85$ lagging dan $< 0,9$ leading.

5. DAFTAR PUSTAKA

- (1) Bansal, R.C., "Three-Phase Self-Excited Induction Generators : An Overview", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 20, No. 2. 2005
- (2) Bhim Singh, S.S. Murthy & Sushma Gupta, "Analysis and Design Electronic Load Controller for Self-Excited Induction Generators", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, March 2006. for Self-Excited Induction Generator in Micro-Hydel Application".
- (3) Bhim Singh, S.S. Murthy & Sushma Gupta, "Trasient Analysis of Self-Excited Induction Gnerator With Electronic Load Contrroller (ELC) Supplying Static and Dynamic Loads, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 5, September/October 2005.
- (4) PT PLN (Persero) P3B JB RJTB UJT Malang, ". Instruksi Kerja Pemeliharaan SVC150/7,5 kV. Malang 2014
- (5) PT PLN (Persero) , " Buku Pedoman Pemeliharaan Reaktor. Nomor Dokumen:PDM/PGPGI/05/2014. Jakarta, 2014
- (6) Vedam, R. Sastry, ", *Power Quality Var Compensation in Power Systems*. " New York.2009