

Analisis Implementasi *Fixed Capacitor*, *SVC*, dan *STATCOM* untuk Perbaikan Performansi Stabilitas Tegangan pada Sistem Petrochina

Sigi Syah Wibowo, Hadi Suyono, dan Rini Nur Hasanah

Abstrak – Petrochina adalah salah satu perusahaan tambang minyak yang menggunakan hampir 94% dari pasokan listriknya untuk mencatu beban motor ESP (*Electrical Submersible Pump*) yang bersifat sangat induktif. *Starting* motor-motor tersebut dapat mengakibatkan gangguan terhadap stabilitas tegangan dalam sistem. Jika tegangan sistem berubah lebih dari +/- 10% dari nilai *rating*nya, proteksi tegangan atas/bawah akan bereaksi, sehingga beberapa motor dapat menjadi padam. Untuk mengatasi permasalahan tersebut kompensator dapat diterapkan. Dalam penelitian ini dikaji penerapan *fixed capacitor bank*, *SVC* dan *STATCOM*.

Berdasarkan hasil analisis aliran daya diketahui bahwa kondisi tegangan terburuk sebesar 0,81656 p.u terjadi pada bus Jaya, sehingga bus ini menjadi target penempatan kompensator. Penempatan *fixed capacitor bank* sebesar 1171 KVAR dapat meningkatkan tegangan hingga mencapai 1,0097 p.u (19,314%). Penerapan *SVC* dalam kisaran dari +11,78 KVAR hingga - 4,713 KVAR dapat meningkatkan tegangan sistem menjadi 0,99p.u (18,114%). Sementara itu, penggunaan *STATCOM* dalam kisaran dari +11,78 KVAR hingga -2,36 KVAR dapat menaikkan tegangan sistem sampai 0,99 pu (18,114%).

Berdasarkan hasil kajian respon *steady-state* dan dinamik dapat disimpulkan bahwa *STATCOM* memberikan redaman terhadap *overshoot* yang lebih baik dibandingkan dengan *SVC* dan *Fixed Capacitor Bank*.

Kata Kunci : Kompensator, Stabilitas tegangan, *SVC* dan *STATCOM*.

I. PENDAHULUAN

PETROCHINA Bermuda Ltd. merupakan salah satu perusahaan tambang minyak yang berlokasi di Sorong Papua mempunyai pembangkit sendiri (*islanding operation*) yakni *Walio Power Plant* dengan kapasitas 10x2,5 MW dan *Kasim Marine Terminal (KMT) power plant* dengan kapasitas 10x2,5 MW menggunakan penggerak mula turbin gas. *Walio Power Plant* sebagai obyek penelitian menggunakan hampir 94% pasokan listriknya untuk mencatu beban motor ESP yang bersifat induktif. Kapasitas pembangkitan total di lokasi *Walio* adalah 25 MW. Tegangan generator 4,16 kV dinaikkan menjadi 34,5 kV

menggunakan transformator *step-up*. Daya kemudian ditransmisikan sejauh kira-kira 6 km melalui kabel feeder ACSR (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*) 2/0, 34,5 kV. Selanjutnya untuk memenuhi kebutuhan pasokan motor pompa ESP sebanyak kurang lebih 220 motor, level tegangan pada masing-masing sumur diturunkan menjadi 2.3/1.919/1.15/1 kV (tergantung pada tegangan nominal motor ESP) melalui trafo *step-down*.

Generator dengan total kapasitas 22,5 MW (9 generator @ 2.5MW)) idealnya dibebani 80% yakni sekitar 18 MW agar tidak terjadi permasalahan ketidakstabilan dan drop tegangan. Permasalahan muncul ketika 9 generator dioperasikan sementara pembebanan sudah mencapai 94%. Ketidakstabilan tegangan seringkali terjadi terutama saat terjadi hubung singkat atau sambaran petir. Tegangan transien yang terjadi pada salah satu zona atau seksi akan menyebabkan beberapa motor ESP harus mati atau OFF karena setiap motor dilengkapi pengaman *under* dan *over-voltage*, serta *under* dan *over-current*. Saat terjadi hubung singkat maka satu zona akan padam. Untuk pengaktifan kembali maka akan terjadi *starting* motor secara bersamaan. Permasalahan ketidakstabilan tegangan kembali terjadi ketika *starting* lagi karena pengaman *under* dan *over-voltage* kembali bekerja karena ketika terjadi transien *setting* tegangan berada pada nilai sekitar $\pm 10\%$ dari tegangan nominal

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis perilaku kompensator statis, *SVC* dan *STATCOM* berikut unjuk kerjanya baik secara individu sistem maupun dalam jaringan. Analisis statis dan dinamis sistem ini disimulasikan dengan *open source software* PSAT.

Pemodelan jaringan secara statis dilakukan untuk mengetahui perilaku jaringan saat pembebanan normal, sedangkan pemodelan dinamis digunakan untuk mengetahui perilaku tegangan bus saat *starting* motor ESP atau saat hubung singkat. Pengujian unjuk kerja statis dilakukan menggunakan analisis aliran daya untuk mengetahui kondisi bus yang lemah yakni bus dengan drop tegangan paling besar. Pemasangan kompensator *fixed capacitor*, *SVC* dan *STATCOM* pada bus terlemah tersebut dikaji dan dilihat pengaruhnya terhadap tegangan pada bus jaringan. Unjuk kerja dinamis penerapan kompensator juga dikaji saat kondisi *starting*, serta saat tanpa dan dengan gangguan.

Sigi Syah Wibowo adalah mahasiswa program Magister Teknik Elektro Universitas Brawijaya, Minat Sistem Tenaga Listrik. (sigi.wibowo@gmail.com) dan Dosen Politeknik Negeri Malang.

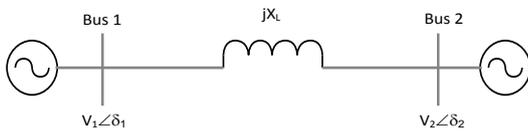
Hadi Suyono (hadis@ub.ac.id) dan Rini Nur Hasanah (rini.hasanah@ub.ac.id) adalah Dosen Program Magister Teknik Elektro Universitas Brawijaya.

II. KOMPENSASI DAYA REAKTIF

Pada sistem transmisi, drop tegangan terjadi dikarenakan saluran transmisi terlalu panjang atau sifat beban yang terlalu reaktif. Kompensasi drop tegangan sistem transmisi yang disebabkan karena alasan diatas dapat dilakukan dengan kontrol penggerak mula dan eksitasi generator, pensaklaran bank kapasitor, reaktor shunt dan sistem VAR statis, kontrol pengubah tap dan regulasi transformator, serta teknologi kompensasi berbasis FACTS. Tiga kompensator yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fixed capacitor*, SVC dan STATCOM

A. Prinsip dasar kompensasi daya dalam sistem transmisi.

Dua jaringan listrik dihubungkan oleh saluran transmisi yang diasumsikan tanpa rugi-rugi dan diwakili oleh reaktansi X_L , $V_1 \angle \delta_1$ dan $V_2 \angle \delta_2$ merupakan fasor tegangan dari dua bus jaringan listrik dengan sudut $\delta = \delta_1 - \delta_2$ antara keduanya.



Gambar 1. Model Sistem Transmisi daya

Komponen aktif dan reaktif [1] aliran daya pada bus 1 adalah:

$$P_1 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \tag{1}$$

$$Q_1 = \frac{V_1(V_1 - V_2 \cos \delta)}{X_L} \tag{2}$$

Aliran daya aktif akan mencapai maksimum ketika sudut fase δ adalah 90° . Dalam prakteknya, faktor daya harus diatas 0,85 s.d 0.9 sehingga sudut daya nilainya kecil (sekitar 25°). Hal ini ditujukan untuk menjaga sistem stabil dari transien dan osilasi dinamis.[2] Oleh karena itu sudut daya berpengaruh langsung terhadap aliran daya aktif (persamaan 1) sedangkan aliran daya reaktif dipengaruhi oleh perubahan tegangan antar bus, karena $\cos \delta$ mendekati 1 (persamaan 2).

B. Kontrol Daya Reaktif

Secara diagram fasor dapat digambarkan sebagai berikut, pada kondisi belum ada kompensasi maka tipikal saluran transmisi adalah beban induktif dimana arus tertinggal (lagging) terhadap tegangannya. Garis beban sistem digambarkan seperti gambar 2, apabila beban sistem semakin induktif maka arus semakin tertinggal sedangkan Q juga semakin besar artinya semakin menyerap daya reaktif, sebaliknya apabila semakin kapasitif maka arus mendahului (*leading*) terhadap tegangan V dan menyuplai daya reaktif Q.

$$\Delta V = E - V = Z_s \cdot I \tag{3}$$

dimana

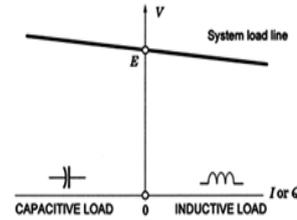
I arus beban ; E tegangan referensi

Z_s impedansi saluran ; ΔV drop tegangan

Daya kompleks beban per fasa didefinisikan dengan persamaan :

$$I = \frac{P-jQ}{V} \tag{4}$$

dan jika $V = V + j0$ diambil sebagai phasor referensi , kita dapat menuliskan



Gambar 2 Garis beban sistem

$$\Delta V = (R_s + jX_s) \left(\frac{P-jQ}{V} \right) + j \left(\frac{R_s P + X_s Q}{V} \right) - j \left(\frac{X_s - R_s Q}{V} \right) \tag{5}$$

$$\Delta V = \Delta VR \tag{6}$$

dan

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{X_s Q}{V^2} \approx \frac{Q}{S} \tag{7}$$

maka

$$V \approx \left(1 - \frac{Q}{S} \right) \tag{8}$$

Artinya bahwa dengan mengubah nilai Q maka akan berpengaruh terhadap tegangan Bus. Semakin besar nilai Q yang disuplai maka tegangan V juga akan naik.[3]

Dengan menambahkan impedansi kompensasi atau kompensator terpasang parallel dengan beban , maka sangat mungkin untuk menjaga $|V| = |E|$. Pada kompensator daya reaktif , daya reaktif beban digantikan dengan jumlah $Q_s = Q + Q_\gamma$ dan daya reaktif kompensator Q_γ diatur sedmikian rupa sehingga memutar phasor ΔV sehingga $|V| = |E|$.

$$|E|^2 = \left[V + \frac{R_s P + X_s Q_s}{V} \right]^2 + \left[\frac{X_s P + R_s Q_s}{V} \right]^2 \tag{9}$$

C. Kontrol Tegangan dengan SVC

SVC adalah pembangkit/beban VAR statis yang tersambung shunt dimana outputnya diatur untuk pertukaran arus induktif atau kapasitif dengan tujuan untuk menjaga atau mengontrol sistem daya yang dapat divariasi. TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) pada frekuensi fundamental dapat diperlakukan sebagaimana induktansi variabel

$$X_v = X_L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \tag{10}$$

Dimana, X_v adalah reaktansi variabel SVC sedangkan X_L adalah reaktansi yang disebabkan oleh frekuensi fundamental tanpa kontrol thyristor dan α adalah sudut penyulutan sehingga impedansi ekivalen total dari kontroler dapat dinyatakan dalam :

$$X_e = X_C \frac{\pi / r_x}{\sin 2\alpha - 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{1}{r_x} \right)} \tag{11}$$

Nilai $r_x = X_C / X_L$ adalah batas kontroler diberikan oleh batas sudut penyulutan yang bernilai tetap sesuai dengan desain. Hukum kontrol *steady-state* tipikal SVC yang terdapat pada karakterestik V-I gambar 3 adalah

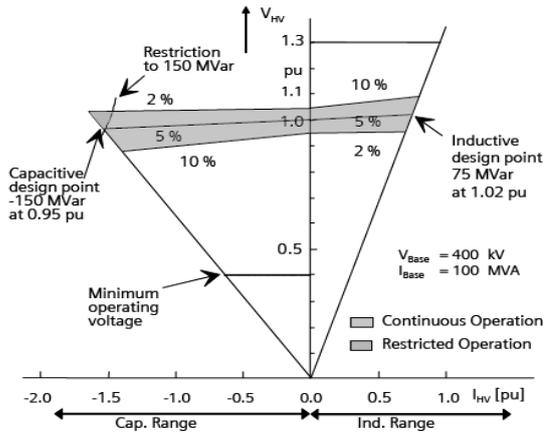
$$V = V_{ref} + X_{SL} I \tag{12}$$

Diamana V dan I adalah magnitudo tegangan dan arus rms dan V_{ref} adalah tegangan referensi. Nilai tipikal untuk slope X_{SL} adalah 1 s.d 5%, terhadap basis SVC; nilai tersebut diperlukan untuk menghindari melewati batas dari variasi tegangan bus yang kecil . Nilai tipikal kisaran tegangan yang dikontrol $\pm 5\%$ dari V_{ref} . [4]

Pada batas kapasitif, SVC menjadi kapasitor shunt.

Pada batas induktif, SVC menjadi reaktor shunt (arus atau daya reaktif juga bisa dibatasi, parameter SVC harus ditentukan sesuai dengan persyaratan kompensasi. Dengan kapasitas SVC Q_{SVC} dan tegangan bus V_{BUS} , nilai dari kapasitas dan induktansi TCR adalah

$$X_C = \frac{V_{bus}^2}{Q_{SVC}} \text{ dan } X_L = \frac{X_C}{2} \quad (13)$$



Gambar 3 Karakteristik V-I SVC dalam *steady state* dan dinamik

D. Kontrol Tegangan dengan STATCOM [3]

STATCOM adalah *Voltage-Source Inverter* (VSI), yang mengubah tegangan input DC kedalam tegangan output AC untuk mengkompensasi daya aktif dan reaktif yang diperlukan oleh sistem.

Prinsip operasi dasar pembangkit daya reaktif dengan VSI adalah mirip dengan mesin sinkron konvensional. Arus reaktif yang ditarik oleh tegangan kompensator sinkron tergantung pada besarnya tegangan sistem V, yakni konverter V_0 dan reaktansi rangkaian keseluruhan (reaktansi bocor transformator plus reaktansi kopling trafo) X:

$$I = \frac{V - V_0}{X} \quad (14)$$

Pertukaran daya reaktif Q dinyatakan dengan

$$Q = \frac{1 - \frac{V_0}{V}}{X} V^2 \quad (15)$$

III. PEMODELAN DAN SIMULASI

Ada beberapa skenario pemodelan dan simulasi yang akan diujikan :

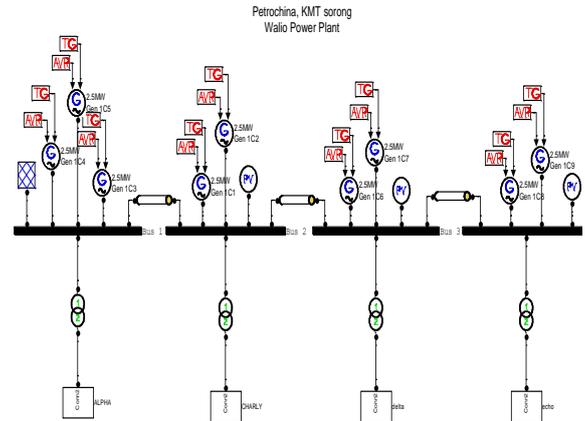
1. Aliran daya pada kondisi Normal
2. Alran daya pada kondisi Transien
3. Analisis trasien saat starting motor
4. Analisis saat terjadi hubung singkat 3 fasa pada bus dekat pada bus jauh dari generator.
5. Analisis transien saat SVC dan STATCOM diterapkan pada kedua kondisi diatas saat starting motor dan hubung singkat

Dari kedua perangkat FACTS kemudian dibandingkan apakah respon transien pada BUS yang paling lemah apakah dapat diperbaiki tegangannya.

A. Konfigurasi Sistem Daya

Sistem *Walio Power Plant* mempunyai kapasitas 10×2.5 MW atau 3,125 MVA generator dengan penggerak mula turbin gas. Kapasitas pembangkitan total di lokasi adalah 25 MW. Empat saluran transmisi

udara 34,5 kV Alpha, Charly, Delta dan Echo melalui transformator Step Up 4,16/34,5 kV. Sistem distribusi disuplai melalui trafo *step-down* 2.3/1.919/1.15/1 kV untuk beban mayoritas beban sekitar 200 motor ESP.



Gambar 4 Diagram satu garis sistem *Walio Power Plant*

TABEL I
DATA PEMBEBANAN

	HP	MVA	MW
Alpha	4870	5.190029	3.63302
Main	150	0.159857	0.1119
A2	1545	1.646529	1.15257
A3	1335	1.422729	0.99591
A4	680	0.724686	0.50728
A5	1160	1.236229	0.86536
Charly	7305	7.785043	5.44953
Main	530	0.564829	0.39538
D	645	0.687386	0.48117
F	2270	2.419171	1.69342
G	1295	1.3801	0.96607
J	2565	2.733557	1.91349
Wakamuk	815	0.868557	0.60799
Delta	5390	5.7442	4.02094
Main	225	0.239786	0.16785
B	755	0.804614	0.56323
C	1505	1.6039	1.12273
E	2125	2.264643	1.58525
EX	780	0.831257	0.58188
Echo	8117	8.650403	6.055282
Main	810	0.863229	0.60426
Kasim10	3512	3.742789	2.619952
Kasim1	1170	1.246886	0.87282
Jaya	2625	2.7975	1.95825

B. Skenario Studi Kasus pada Kondisi sistem Tenaga Listrik di PT. Petrochina.

Skenario yang diujikan untuk mengetahui karakterestik steady state dan transien adalah sebagai berikut,

- Skenario 1 : Analisis Steady State

Berdasarkan diagram satu garis dan data – data sistem daya pada Gambar 4, maka hasil simulasi aliran daya di Pembangkit Walio dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis stabilitas sistem daya. Dalam melakukan simulasi aliran daya didefinisikan bahwa bus 1 adalah *slack bus* dengan tegangan $1 \angle 0^\circ$ p.u dan bus 2,3,4 adalah PV bus.

- Kasus 1: Kondisi Normal 9 Generator Saat Beban Puncak

Simulasi dengan menggunakan PSAT

dirangkum dalam Tabel II. Simulasi dilakukan dengan kondisi saat beban puncak tanggal 23 juni 2011 yakni sekitar 21150 MW atau 94% dari kapasitas pembangkitan dari total kapasitas generator $9 \times 2,5 \text{ MW} = 22.5 \text{ MW}$. Hasil simulasi dengan PSAT adalah

Total pembangkitan	Daya Nyata [pu]	0.21152
	Daya Reaktif [pu.]	0.13907
Total beban	Daya Nyata [pu]	0.21138
	Daya Reaktif [pu]	0.10582
Total rugi daya	Daya Nyata [pu]	0.00014
	Daya Reaktif [pu]	0.03325

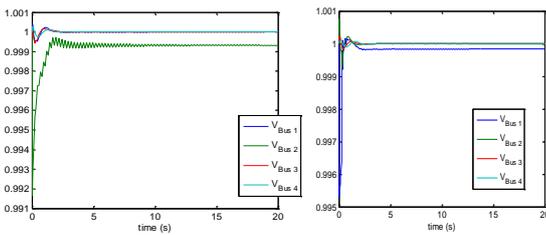
Dari data tersebut bisa dilihat bahwa pembebanan generator mendekati maksimal. Dengan analisis *power flow* profil tegangan bisa diketahui kondisi tegangan pada masing-masing bus seperti terlihat pada tabel 2 .

TABEL II

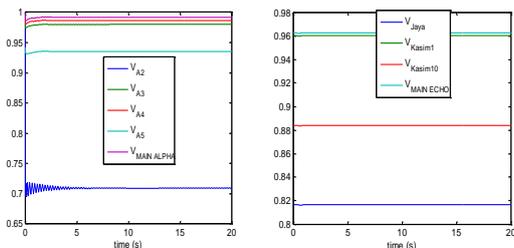
DATA ALIRAN DAYA 9 GENERATOR SAAT BEBAN PUNCAK 94%

No	Bus	V	θ	P gen	Q gen	P beban	Q beban
		(p.u.)	(rad)	(p.u.)	(p.u.)	(p.u.)	(p.u.)
1.	Bus 1	1	0	0.0615	0.03	0	0
2.	Bus 2	1	-0.011	0.05	0.0268	0	0
3.	Bus 3	1	-0.026	0.05	0.0295	0	0
4.	Bus 4	1	-0.044	0.05	0.0528	0	0
5.	CHARLY	0.9981	-0.003	0	0	0.0508	0.03
6.	ALPHA	0.9983	-0.014	0	0	0.0465	0.0267
7.	DELTA	0.9981	-0.028	0	0	0.046	0.0292
8.	ECHO	0.9967	-0.048	0	0	0.0683	0.0525

- Simulasi Analisis starting Alpha pada Bus A2
 Simulasi dinamik yang dilakukan meliputi analisis starting pada salah satu zona dan pengaruhnya pada zona yang lain. Pada **Error! Reference source not found.5** bisa dilihat bahwa saat zona Alpha dikoneksikan ke jaringan dengan posisi autostart maka pengaruh pada bus 1,2,3,4.



Gambar 5 Respon Bus 1,2,3,4 saat starting bus 1 dan bus 2

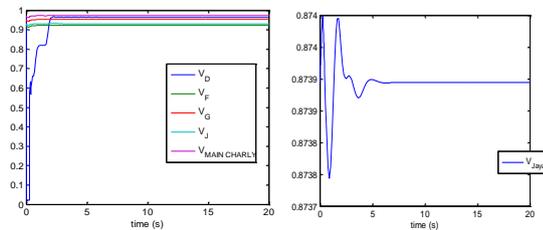


Gambar 6 Respon tegangan saat Starting Bus Alpha

Karena proses starting terjadi pada zona alpha maka pengaruhnya pada bus 1 atau bus 2 jelas terlihat dibanding bus lainnya. Pengaruh starting bus Alpha pada Bus terjadi penurunan tegangan.

Dari hasil simulasi pada gambar 6 bisa dilihat bahwa saat starting motor pada Bus A2 tegangan drop yang terjadi sampai 0.7 p.u sedangkan pada bus yang lain yakni Bus Jaya, Kasim1 dan Kasim10 tidak dipengaruhi. Hal ini tidak boleh terjadi, seharusnya saat *starting* kondisi *steady state* harus kembali pada set-poinnya. Hal tersebut karena pasokan daya dari generator sangat terbatas karena beban mencapai 94%

- Hubung singkat jauh dari Generator di CHARLY
 Simulasi dinamik yang dilakukan meliputi analisis starting pada salah satu zona dan pengaruhnya pada zona yang lain. Dari Gambar 7 bisa dilihat bahwa terjadi *undershoot* sampai dengan 0.995 Pengaruh hubung singkat pada CHARLY Bus D adalah tegangan akan turun mendekati 0 p.u saat hubung singkat kemudian trasien sampai nilai *steady state* dalam waktu 3 detik. Sedangkan pengaruh terhadap bus jaya adalah tegangan sempat *undershoot* sampai 0.8738 p.u kemudian *overshoot* 0,874 baru ke kondisi *steady state* sekitar 0.8739.



Gambar 7 Respon hubung singkat pada Bus

C. Perbaikan Profil Tegangan dengan Kompensator

TABEL III

BUS YANG DIKOMPENSASI

BUS	V(p.u)	Sudut (rad)	P(MW)	Q(M W)	QC (KVAR)	B=QC/V^2
1 C	0.94253	-0.1317	0.0183	0.0113	0.0025	0.0028
2 E	0.94251	-0.1281	0.0157	0.0100	0.0024	0.0027
3 A5	0.94112	-0.1205	0.0119	0.0074	0.0016	0.0018
4 K10	0.89942	-0.2031	0.0241	0.0177	0.0061	0.0075
5 Jaya	0.87394	-0.2496	0.0264	0.0245	0.0117	0.0153

- Analisis Penempatan Kompensator dan Ukuran pada kondisi Normal

Penggunaan kapasitor statis, SVC dan STATCOM pada sistem daya mempunyai kontribusi pada peredaman osilasi pada sistem daya, perbaikan stabilitas transien dan memperbaiki tegangan untuk mencegah ketidakstabilan tegangan. Penempatan dilakukan dengan cara melakukan ranking aliran daya pada bus yang paling lemah. [4]

Contoh perhitungan:

$$Q_c = P * [Tan(\varphi_1) - Tan(\varphi_2)] \tag{16}$$

Dari Tabel III pada bus Jaya daya nyata

$$P = 0.0264 \text{ p.u} ; Q = 0.0245 \text{ p.u}$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{Q}{P} = \tan^{-1} \frac{0.0245}{0.0264} = 0.748 \text{ rad}$$

$$\text{Faktor daya} = \text{Cos } \varphi = \text{Cos } 0.656 = 0.733$$

Untuk beban motor diharapkan $\text{Cos } \varphi = 0.9$

- $\varphi_2 = \cos^{-1} 0.9 = 0.451 \text{ rad}$
Maka besarnya kompensasi kapasitor adalah
 $Q_c = 0.0264 * [\tan(0.748) - \tan(0.451)] = 0.117 \text{ (p.u)}$
Kemudian ditentukan nilai susceptansi(B) untuk penentuan pada PSAT dimana
 $Q = B * V^2 \quad (17)$
maka $B = Q/V^2 = 0.87394^2/0.0117 = 0.15337$.
Nilai Susceptansi yang lain dihitung dengan cara yang sama dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 3
- Analisis Aliran Daya Setelah Penggunaan Fixed Capacitor

TABEL IV
ANALISIS ALIRAN DAYA SETELAH KOMPENSASI FIXED CAPACITOR

	DAYA	Normal	Fixed
Total Pembangkitan	Daya nyata [P.U.]	0.21649	0.21136
	Daya reaktif [P.U.]	0.14844	0.10741
Total Beban	Daya nyata [P.U.]	0.21639	0.21124
	Daya reaktif [P.U.]	0.12585	0.08133
Total Losses	Daya nyata [P.U.]	0.0001	0.00011
	Daya reaktif [P.U.]	0.02259	0.02607

Simulasi aliran daya yang dilakukan meliputi simulasi aliran daya di *Walio Power Plant*, *Petrochina*, dan sistem daya yang sudah dikompensasi.

- Analisis Penggunaan Kompensator SVC terhadap Profil Tegangan
Penentuan KVAR dari SVC [5] dilakukan dengan rumus

$$\Delta V = \frac{\Delta Q}{S_{SC}} \quad (18)$$

dimana, ΔQ = Kapasitas kompensator; S_{SC} = KVA hubung singkat; ΔV = fluktuasi tegangan
 $X_g = 1.71 \text{ p.u}$ diasumsikan x kabel diabaikan maka Total X_{gen} adalah paralel dari 9 generator sehingga

Total $X_g = 1.71/9 = 0.19 \text{ p.u}$
dan $X_{kabel} = 0.0419828$ sepanjang 6.5 km
 $X = 6.5 \times 0.0419828 = 2.7289$

$Z_{base} = KV^2/MVA = 34.5^2/100 = 11.9025 \Omega$

$X_{p.u.} = 2.7289/11.9025 = 0.229 \text{ pu}$

Kemudian diseri dengan trafo $X_T = 0.00503 \text{ p.u}$ maka

$X = 0.19 + 0.00503 + 0.229 = 0.424 \text{ p.u}$

$$KVA_{SC} = KVA_{Base} \times \frac{100}{X\%} = 100.000 \times \frac{100}{42.4} = 235655.7$$

$MVA_{sc} = 235655.7/1000 = 235.6557$;

Untuk batasan daya reaktif kapasitif $\Delta V = 5\%$

$$\Delta Q = \Delta V \times KVA_{SC} = 0.05 \times 235.6557 = 11.78279 \text{ MVAR}$$

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} = \frac{34.5^2}{11.78279} = 101 \Omega$$

sedangkan batasan daya reaktif induktif $\Delta V = 2\%$

$$\Delta Q = 0.02 \times 235.6557 = 4.713 \text{ MVAR}$$

$$X_L = \frac{V^2}{Q_L} = \frac{34.5^2}{4.713} = 252.54 \Omega$$

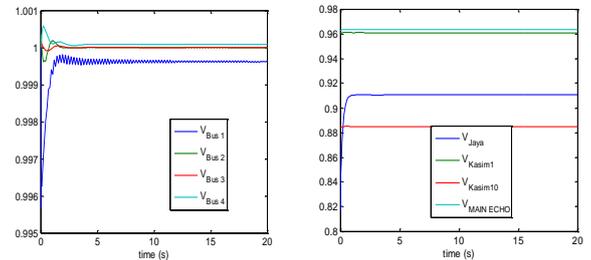
Parameter SVC pada PSAT dinyatakan dalam p.u maka X_C dan X_L adalah

$$X_C = 101/11.9025 = 8.48 \text{ p.u}$$

$$X_L = 252.54/11.9025 = 21.2 \text{ p.u}$$

Respon SVC akibat Arus starting CHARLY pada Bus J

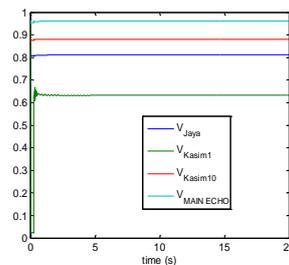
Dari Tabel IV dapat dilihat bahwa daya yang dibangkitkan menjadi berkurang dengan adanya kompensasi SVC dari 0.21649 p.u menjadi 0.21136 p.u. Sedangkan respon tegangan dapat diperbaiki menjadi 0.91 p.u pada bus jaya yang semula 0.837 p.u



Gambar 8 Respon SVC saat starting terhadap tegangan V_{jaya} dan $V_{kasim10}$

- Respon SVC akibat Hubung singkat Generator Pada ECHO

Simulasi dinamik yang dilakukan meliputi analisis starting pada salah satu zona dan pengaruhnya pada zona yang lain.



Gambar 9 Respon SVC terhadap tegangan saat hubung singkat pada Bus ECHO

Sedangkan pengaruh penempatan SVC terhadap tegangan hubung singkat tegangannya bisa mencapai 0.65 p.u dari sebelumnya 0,3 p.u pada bus Kasim1 yang terkena hubung singkat

D. Analisis Penggunaan STATCOM

Penentuan KVAR dari STATCOM [5] ditentukan dengan cara yang sama seperti SVC

$$MVA_{sc} = 235655.7/1000 = 235.6557 \text{ MVA};$$

Untuk batasan daya reaktif kapasitif $\Delta V = 5\%$

$$\Delta Q = \Delta V \times KVA_{SC} = 0.05 \times 235.65 = 11.783 \text{ MVAR}$$

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} = \frac{34.5^2}{11.78279} = 101 \Omega$$

sedangkan batasan daya reaktif induktif $\Delta V = 1\%$

$$\Delta Q = 0.01 \times 235.6557 = 2.3565 \text{ MVAR}$$

$$X_L = \frac{V^2}{Q_L} = \frac{34.5^2}{2.3565} = 505.09 \Omega$$

dinyatakan dalam p.u maka X_C dan X_L adalah

$$X_C = 101/11.9025 = 8.48 \text{ p.u}$$

$$X_L = 505.09/11.9025 = 42.43 \text{ p.u}$$

Parameter STATCOM pada prinsipnya sama dengan SVC tetapi batasannya adalah I_{max} dan I_{min} dimana

$$I = B \times V, \text{ apabila } V = 1.0 \text{ p.u, maka}$$

$$I_{max} = B_{max} = \frac{1}{8.48} = 0.117925 \text{ p.u}$$

$$I_{min} = B_{min} = \frac{1}{42.43} = 0.0235 \text{ p.u}$$

Dengan adanya kompensasi STATCOM respon

tegangan dapat diperbaiki menjadi 1.0.7 p.u pada bus jaya yang semula 0.837 p.u.

Dari hasil simulasi pada gambar 11 bisa dilihat bahwa respon STATCOM pada bus yang satu kelompok saat hubung singkat tidak terjadi tegangan drop akan tetapi terjadi osilasi selama 8 detik menuju steady state, sedangkan pada bus yang lain tidak dipengaruhi.

E. Analisis Komparasi Kompensator terhadap Stabilitas Tegangan

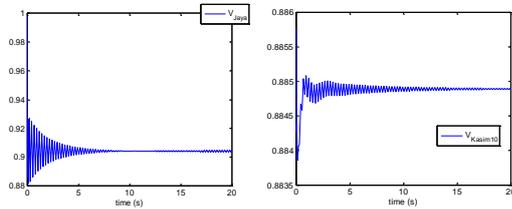
Analisis aliran daya pada kondisi normal, dengan fixed capacitor, SVC dan STATCOM. Dengan adanya pemasangan kompensator maka daya yang dibangkitkan untuk kebutuhan beban SVC memerlukan daya pembangkitan yang lebih kecil 0.1789 p.u dan losses yang paling kecil dibanding fixed capacitor 0.21136 p.u dan STATCOM 0.21152 p.u

TABEL V
ANALISIS KOMPARASI ALIRAN DAYA

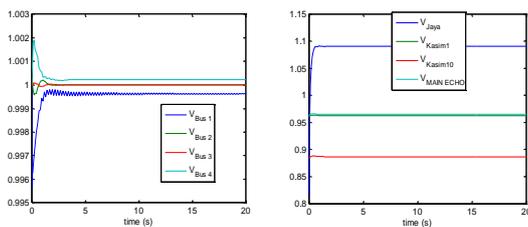
Total Pembangkitan	Normal	Fixed	SVC	STATCOM
Daya nyata [p.u]	0.21649	0.21136	0.17849	0.21152
Daya reaktif [p.u]	0.14844	0.10741	0.11074	0.13907
Total Beban				
Daya nyata [p.u]	0.21639	0.21124	0.1784	0.21138
Daya reaktif [p.u]	0.12585	0.08133	0.08964	0.10582
Total Losses				
Daya nyata [p.u]	0.0001	0.00011	0.9e-005	0.00014
Daya reaktif [p.u]	0.02259	0.02607	0.0211	0.03325

F. Analisis Komparasi Capasitor, SVC dan STATCOM terhadap Starting Motor

Dari hasil simulasi bisa dilihat apabila kelompok motor starting. Simulasi diujikan pada percabangan dari masing-masing bus. Starting bus yang satu tidak mempengaruhi stabiitas tegangan yang lain. Pada saat starting tegangan bus turun sampai dengan level diatas 0,45 s,d 0.7 p.u , seharusnya saat starting maka pada kondisi steady state harus kembali pada set poinnya. Hal tersebut karena pasokan daya dari generator sangat terbatas karena beban mencapai 94%.



Gambar 11 Respon STATCOM pada V_{Jaya} akibat hubung singkat



Gambar 10 Respon STATCOM pada tegangan saat Starting Bus CHARLY

Sedangkan tegangan pada bus uji yakni bus Jaya hasilnya cukup memuaskan fixed capacitor 1.0097/-0.27482 , SVC 0.91046/-0.46632 dan STATCOM 1.06/-0.23713 . Nilai ini tidak mutlak tergantung dari desain dan pemilihan parameter Induktor dan Kapasitornya.

G. Analisis Komparasi Kapasitor, SVC dan STATCOM terhadap Hubung Singkat

Dari simulasi bisa dilihat bahwa ketika terjadi hubung singkat pada bus D tegangan undershoot sampai mendekati nol kemudian transien ke tegangan 0.65 s.d 0.7 tidak kembali ke nilai semula. Pemasangan kompensator pada bus jaya tidak dipengaruhi oleh hubung singkat pada bus lain. Atau sebaliknya pemasangan kompensator tidak mengkompensasi drop tegangan saat undershoot pada bus yang tidak dipasang kompensator.

TABEL VI
ANALISIS KOMPARASI RESPON TEGANGAN

Nama Bus	Normal	Fixed	SVC	STATCOM
Jaya	0.81656/-	1.0097/-	0.91046/-	1.06/-
	0.33175	0.27482	0.46632	0.23713

Pemasangan pada bus yang lemah SVC dan STATCOM dapat mengkompensasi tegangan drop sekaligus meredam osilasi secara cepat.

IV. KESIMPULAN

Penempatan kompensator ditentukan dari hasil analisis aliran daya untuk mengetahui kondisi tegangan terburuk pada bus yakni sebesar 0,81656 p.u (drop tegangan melebihi standar 10%) terjadi pada bus Jaya.

Penempatan fixed capacitor bank pada bus Jaya sebesar 1171 KVAR dapat meningkatkan tegangan hingga mencapai 1,0097 p.u (19.314%).

Penerapan SVC pada bus Jaya dapat meningkatkan tegangan sistem menjadi 0,99 p.u (18,114%) dengan nilai daya reaktif dalam kisaran dari +11,78 KVAR hingga - 4,713 KVAR.

Sementara itu, penggunaan STATCOM dalam kisaran +11,78 KVAR hingga -2,36 KVAR dapat menaikkan tegangan sistem sampai 0,99 pu (18,114%).

STATCOM memberikan redaman overshoot yang lebih baik dibandingkan dengan SVC dan Fixed Capacitor Bank berdasarkan hasil kajian respon steady-state dan dinamik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P.S. Murty, Power System Analysis. Hyderabad, India: B.S Publication, 2007.
- [2] K. R. Padiyar, Facts Controllers In Power Transmission And Distribution. New Delhi: New Age International., 2007
- [3] P. Kundur, P. Power Sistem Stability And Control,. New York: Mc Graw Hill, 2006.
- [4] M.Kamarposhti. "Comparison of SVC and STATCOM in Static Voltage Stability Margin Enhancement." IEEE, 2010: 4.
- [5] R. Vedam, and M.S. Sarma,. Power Quality VAR Compensation in Power System .CRC Press, New York,2009