

ANALISIS PENEMPATAN STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) PADA SISTEM INTERKONEKSI SUMUT-ACEH 150 KV MENGGUNAKAN METODE *BUS PARTICIPATION FACTOR*

Runaldy Sahputra¹⁾ dan Syukriyadin²⁾

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Darussalam, Banda Aceh, Indonesia
e-mail : runaldy_sahputra@yahoo.com, syukri_2504@unsyiah.net

ABSTRAK

Static Var Compensator (SVC) merupakan perangkat FACTS yang berfungsi menyerap atau membangkitkan daya reaktif untuk meningkatkan kestabilan tegangan sistem tenaga listrik. Mode sistem terlemah ditentukan berdasarkan nilai *eigen* yang terkecil. Sedangkan bus yang terlemah diidentifikasi menggunakan metode *bus participation factor*. Bus yang memiliki nilai faktor partisipasi terbesar merupakan bus terlemah yang akan diletakkan SVC. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan lokasi optimal penempatan SVC pada sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV. Berdasarkan perhitungan menggunakan MATLAB diperoleh mode sistem ke 6 sebagai mode sistem terlemah dengan nilai *eigen* 1.6117. Sedangkan nilai faktor partisipasi terbesar terdapat pada bus nomor 8 dengan nilai 0.9220. Untuk meningkatkan kestabilan tegangan mode sistem ke 6, dilakukan penempatan SVC pada bus 8. Setelah penempatan SVC, diperoleh nilai *eigen* mode sistem ke 6 meningkat menjadi 4.8250. Kurva Q-V menunjukkan peningkatan kemampuan bus 8 dalam melayani daya reaktif beban setelah penempatan SVC, sebelumnya 0 p.u telah berada pada kondisi kritis tegangan menjadi 0.30 p.u.

Kata Kunci: kestabilan tegangan, Static Var Compensator (SVC), *bus participation factor*, nilai eigen.

ANALYTICAL PLACES FOR STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) OF INTERCONNECTION SYSTEM SUMUT-ACEH 150 KV BY USING BUS PARTICIPATION FACTOR METHOD

ABSTRACT

Along with the development of technology in electric power systems, FACTS devices have been widely used for power flow flexibility. Static Var Compensator (SVC) is a FACTS device that serves to absorb or generate reactive power to improve power system voltage stability. In this study the method of analysis of capital used to predict the stability of the bus voltage on the transmission system. Stability predictions obtained from the eigenvalues (λ) Jacobian matrix of the system. The weakest system mode is determined by the smallest eigenvalue of the system. While for the weakest bus is identified using the bus participation factor. Buses that have the greatest value of participation factor is to be placed SVC bus. The study was conducted to determine the optimal placement of SVC location in North Sumatra -Aceh interconnection system 150 kV. Based on the calculations obtained using the MATLAB system mode to mode 6 as the weakest system with eigenvalues 1.6117. While the biggest value of participation factor found in bus number 8 with a value of 0.9220. To improve the voltage stability of the system mode number 6 made the placement of SVC at bus 8. After placement of SVC the eigenvalues obtained mode the system to 6 increased to 4.8250. QV curves showed an increase in bus capacity to serve 8 in reactive power load SVC after placement, previously 0 pu has been in critical condition to 0:30 p.u.

Keywords: voltage stability, Static Var Compensator (SVC), *bus participation factor*, eigenvalue

1) Mahasiswa tugas akhir, 2) Dosen pembimbing utama. Karya ilmiah ini telah di-review oleh komite pembahas dan disetujui untuk dipublikasikan pada tanggal 27 Maret 2012.

I. PENDAHULUAN

Pada sistem transmisi tenaga listrik, aliran daya aktif dan daya reaktif merupakan parameter yang sangat penting dalam stabilitas sistem. Ketidakstabilan sistem berkaitan dengan profil tegangan, dapat berupa *voltage drop*, *voltage dip* dan *voltage collapse*. Sewaktu-waktu sistem membutuhkan daya reaktif kapasitif pada saat beban induktif terlalu besar dalam menjaga tegangannya tidak jatuh (*collapse*). Sumber utama daya reaktif ini berasal dari generator. Apabila generator sudah tidak mampu menyuplai daya reaktif, maka dibutuhkan sumber daya reaktif lain yang dapat membangkitkan maupun menyerap daya reaktif pada sistem transmisi.

Flexibel AC Transmission System (FACTS) merupakan peralatan listrik yang berfungsi membangkitkan atau menyerap daya reaktif pada sistem tenaga listrik secara fleksibel. Salah satu peralatan FACTS diberi nama *Static Var Compensator* (SVC) yang berfungsi sebagai pemelihara kestabilan sistem tenaga listrik.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan penempatan optimal SVC pada jaringan interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV, yaitu pada salah satu Gardu Induk antara Langsa s/d Banda Aceh, yang dilihat dari bus terlemah menggunakan metode *bus participation factor* dalam meningkatkan kestabilan tegangan pada sistem.

II. DASAR TEORI

2.1 Aliran Daya

Studi aliran daya adalah penentuan atau perhitungan tegangan, arus dan daya yang terdapat pada berbagai titik suatu jaringan pada keadaan pengoperasian normal, baik yang sedang berjalan maupun yang akan datang. Meskipun metode tegangan-node banyak memiliki bentuk dari beberapa analisa sistem power maka arus node dapat dispesifikasikan dari hasil perhitungan linear dapat diselesaikan dengan tegangan node. Untuk itu, nilai perhitungan dari aliran daya dapat diketahui dari perhitungan arus, perubahan menjadi nonlinear dan menggunakan teknik iterasi. Dalam analisis aliran daya, bus-bus yang digunakan dapat diklarifikasikan kedalam tiga kategori, yaitu:

1. Bus Beban
2. Bus Generator
3. Bus Slack (Bus Referensi)

2.2 Metode *Fast Decoupled*

Metode aliran daya *fast decoupled* diawali dengan memperkirakan nilai awal dari semua variabel yang tidak diketahui (besar tegangan dan sudut di bus beban dan sudut tegangan pada generator bus). Persamaan dari metode ini adalah suatu sistem persamaan linear yang dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = -J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dengan menggunakan bentuk koordinat kutub maka solusi permasalahan diperoleh yaitu dengan cara

mengasumsikan elemen-elemen sub matriks J2 dan J3 dalam matriks Jacobian adalah nol:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Delta P = J_1 \Delta \delta = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \Delta \delta \quad (3)$$

$$\Delta Q = J_4 \Delta |V| = \left[\frac{\partial Q}{\partial |V|} \right] \Delta |V| \quad (4)$$

2.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan sistem tenaga listrik yaitu kemampuan suatu sistem tenaga listrik dalam mempertahankan kondisi operasi yang seimbang dan kemampuan sistem tersebut kembali pada kondisi operasi normal setelah terjadi gangguan. Sistem akan menjadi tidak stabil ketika terjadi gangguan, peningkatan beban dan terjadinya drop tegangan pada jaringan. Ketidakstabilan tegangan sistem tenaga listrik dapat berupa *voltage drop*, *voltage dip*, dan *voltage collapse*.

Voltage collapse biasanya terjadi ketika tegangan sudah melewati tegangan kritis dan telah melebihi batas toleransi, sehingga perlu dilakukan pemadaman (P. Kundur, 1994). Ada beberapa faktor yang dapat menyebabkan *voltage collapse* diantaranya:

1. *Stress* pada sistem : pembebanan daya aktif yang besar pada sistem
2. Ketidakseimbangan sumber daya reaktif
3. Tidak bekerjanya relai proteksi dengan baik

2.4 Metode *Modal Analysis*

Dalam metode *Modal Analysis* mesti dihitung nilai *eigen value* dari masing-masing bus dan nilai *eigen vektor* dari matriks Jacobian Reduksi sistem. Modal analysis didasarkan pada matriks Jacobian Reduksi yang diperoleh dari analisa aliran daya :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dengan asumsi $\Delta P = 0$

$$0 = J_{11} \Delta \theta + J_{12} \Delta V \quad (6)$$

$$\Delta \theta = -J_{11}^{-1} J_{12} \Delta V \quad (7)$$

$$\Delta Q = J_{21} \Delta \theta + J_{22} \Delta V \quad (8)$$

Substitusi persamaan (7) dan (8), diperoleh:

$$\Delta Q = J_R \Delta V$$

Dimana:

$$J_R = [J_{22} - J_{21} J_{11}^{-1} J_{12}] \quad (9)$$

Metode yang digunakan dalam analisa aliran daya yaitu *Fast Decoupled*, sehingga elemen matriks J_{12} dan J_{21} adalah nol. Komponen matriks Jacobian Reduksinya menjadi:

$$J_R = [J_{22}]$$

J_R adalah matriks Jacobian Reduksi dari sistem, sehingga persamaan (9) dapat dituliskan menjadi (P.Kundur, 1994):

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (10)$$

Matriks J_R merepresentasikan hubungan yang linier antara perubahan tegangan terhadap perubahan daya reaktif pada suatu bus.

Eigenvalue dan *eigenvector* dari matriks Jacobian Reduksi J_R digunakan untuk analisis kestabilan tegangan pada suatu sistem. Kestabilan dapat diidentifikasi dari bentuk eigenvalue dari matriks J_R . Analisis dari hasil eigenvalue sebagai berikut:

$$J_R^{-1} = \Phi \Lambda^{-1} \Gamma \quad (11)$$

dengan $\Phi \Gamma = 1$

Dengan ketentuan :

- Jika $\lambda_i > 0$, tegangan sistem dalam keadaan stabil (osilasi teredam),
- Jika $\lambda_i = 0$, tegangan akan jatuh karena perubahan daya reaktif, perubahan tegangan menjadi tak berhingga,
- Jika $\lambda_i < 0$, tegangan sistem dalam keadaan tidak stabil (amplitudo osilasi meningkat).

2.5 Bus Participation Factor

Faktor partisipasi bus (*bus participation factor*) dapat menentukan bus yang memiliki osilasi jatuh tegangan paling besar dari sebuah sistem. Jumlah dari semua nilai faktor partisipasi bus harus sama dengan satu, karena nilai vektor *eigen* kiri (Γ_i) dan vektor *eigen* kanan (Φ_i) telah dinormalisasi. Nilai faktor partisipasi bus dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$P_{ki} = \Phi_{ki} \Gamma_{ik} \quad (12)$$

Untuk nilai *eigen* yang kecil, bus partisipasi faktor memberi gambaran seberapa dekatnya bus untuk menjadi tidak stabil. Node atau bus ke-k dengan nilai faktor partisipasi terbesar adalah merupakan bus yang memiliki kontribusi paling besar untuk memiliki tegangan yang tidak stabil.

2.6 Nilai Eigen dan Vektor Eigen

Apabila x adalah sembarang vektor, $\{x, Ax\}$ merupakan suatu himpunan yang linear. Jika x adalah vektor *eigen* matriks A , $\{x, Ax\}$ merupakan himpunan tidak linear, yang berarti komponen-komponen x dan Ax sebanding dengan nilai *eigen* (λ) yang menghasilkan vektor *eigen* itu sebagai faktor kesebandingannya. Setiap matriks $n \times n$ setidaknya memiliki 1 dan sebanyak-banyaknya n nilai *eigen* (nyata atau kompleks) yang berbeda. Persamaan matrik nilai *eigen* dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n &= \lambda x_1 \\ a_{21}x_1 + \dots + a_{2n}x_n &= \lambda x_2 \\ &\vdots \\ a_{n1}x_1 + \dots + a_{nn}x_n &= \lambda x_n \end{aligned}$$

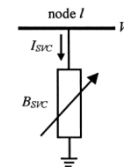
Didalam notasi matriks dapat ditulis sebagai berikut:

$$(A - \lambda I)x = 0 \quad (13)$$

2.7 Static VarCompensator (SVC)

Static Var Compensator (SVC) adalah komponen FACTS dengan hubungan paralel, yang fungsi utamanya untuk mengatur tegangan pada bus tertentu dengan cara mengontrol besaran reaktansi ekuivalen. Dari sudut pandang operasional, SVC bekerja seperti reaktansi variabel shunt, yang bisa menghasilkan atau menyerap daya reaktif untuk mengatur besarnya tegangan pada titik sambungan ke jaringan AC.

Dalam bentuk yang paling sederhana, SVC terdiri dari komponen *fixed capa-citor* (FC) yang terhubung paralel dengan *thyristor-controlled reactor* (TCR). Kontrol sudut penyalan thyristor memungkinkan SVC untuk memiliki kecepatan respon yang hampir seketika. Hal ini digunakan secara luas untuk menyalurkan daya reaktif dan menyediakan *support* regulasi tegangan dengan cepat. Selain itu SVC juga dipakai untuk meningkatkan batas stabilitas sistem dan mengurangi osilasi daya.



Gambar 1. Susceptance model SVC

Persamaan aliran daya untuk SVC adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial P_k^p}{\partial B_{SVC}^{pj}} B_{SVC}^{pj} = -V_k^p V_l^j B_{SVC}^{pj} \sin(\theta_k^p - \theta_l^j) \quad (16)$$

$$\frac{\partial P_k^p}{\partial B_{SVC}^{pj}} B_{SVC}^{pj} = -2(V_k^p V_l^j B_{SVC}^{pj} \sin(\theta_k^p - \theta_l^j)) \quad (17)$$

Matriks baru jacobian dari persamaan linear dapat dibentuk seperti berikut:

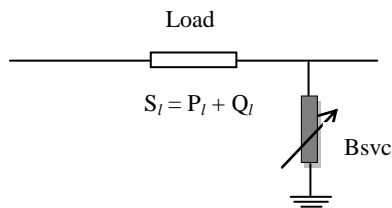
$$\begin{bmatrix} \Delta P_l^p \\ \Delta Q_l^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_l^p}{\partial \theta_j^p} & \frac{\partial P_l^p}{\partial \theta_j^j} V_j^p \\ \frac{\partial Q_l^p}{\partial \theta_j^p} & \frac{\partial Q_l^p}{\partial \theta_j^j} V_j^p \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_l^p \\ \Delta V_l^p / V_l^p \end{bmatrix}^{(i)}$$

Suseptansi SVC dapat diperbaharui dengan menggunakan persamaan berikut:

$$B_{SVC}^p = B_{SVC}^{pj(i-1)} + \left(\frac{\Delta B_k^{pj}}{B_{SVC}^{pj}} \right)^{(i)} B_{SVC}^{pj(i-1)}$$

2.8 Kompensasi Daya Reaktif SVC

Dalam menentukan besarnya suseptansi SVC (B_{svc}) yang akan ditempatkan pada bus beban dapat menggunakan persamaan aliran daya berikut:



Gambar 2. Rangkaian menggunakan SVC

Gambar 2 memperlihatkan suatu beban satu fasa dengan admitansi beban, yaitu :

$$Y_l = G_l + jB_l \quad (18)$$

Arus bebannya adalah :

$$I_l = V \cdot Y_l \quad (19)$$

Daya semu yang diterima oleh beban tersebut adalah:

$$S_l = V \cdot I_l \quad (20)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (18) dan

(19) kedalam persamaan (20) diperoleh:

$$S_l = V^2 G_l - jV^2 B_l \quad (21)$$

$$S_l = P_l + jQ_l \quad (22)$$

Bila SVC dipasang dengan kapasitas Q_{svc} MVA dipasang pada sisi beban, maka faktor dayanya akan membaik menjadi:

$$\cos \theta_l = \frac{P_l}{S_l} \quad (23)$$

Faktor daya semula kita sebut $\cos \theta_1$ dan diperbaiki menjadi $\cos \theta_2$ maka, besarnya daya reaktif Q_{svc} dapat ditentukan sebagai berikut:

$$Q = P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (24)$$

Besar nilai susceptansi B_{svc} yang ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$B_{svc} = \frac{Q_{svc}}{-V_{bus}^2} \quad (25)$$

2.9 Kurva Q-V

Kurva Q-V merupakan kurva yang digunakan untuk melihat batas kestabilan tegangan atau batas kritis bus terhadap daya reaktif. Kurva ini merupakan perbandingan antara daya reaktif terhadap tegangan pada bus yang sama. Sensitifitas dan perubahan tegangan bus terhadap injeksi daya reaktif dapat diketahui secara jelas dengan menggunakan kurva ini. Secara umum kelebihan dari kurva Q-V yaitu:

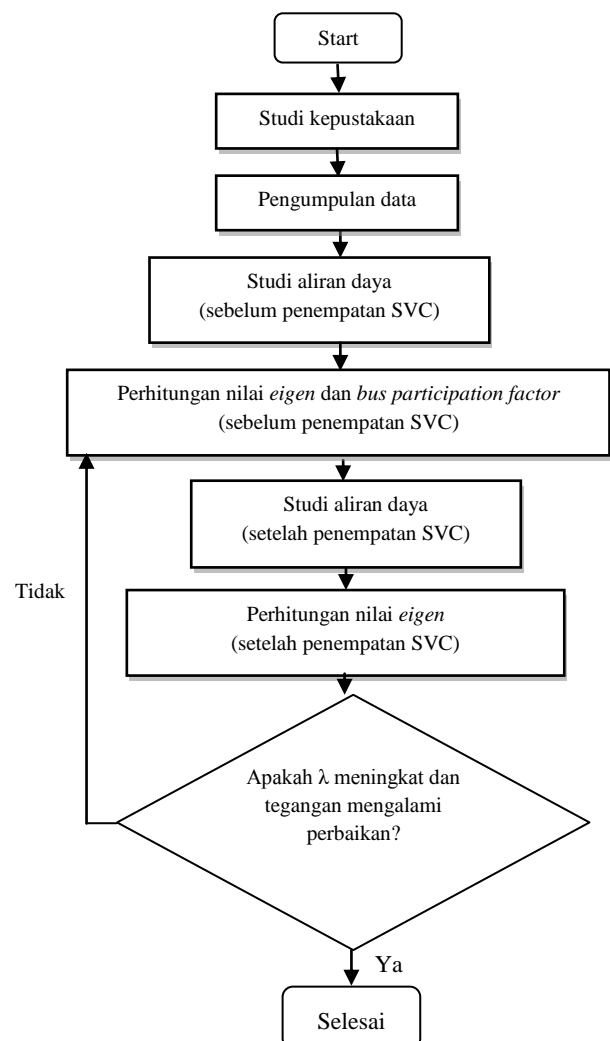
1. Keamanan tegangan sangat berhubungan dengan daya reaktif, dan kurva ini dapat menunjukkan batas daya reaktif yang diijinkan suatu bus hingga titik kritisnya.
2. Karakteristik dari bus yang akan dipasangkan kompensator daya reaktif dapat diplot secara langsung pada kurva Q-V.
3. Kemiringan dari kurva Q-V menandakan keadaan yang rawan dari bus.

III. METODELOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara bertahap, berikut langkah-langkahnya:

1. Studi Kepustakaan.
Mengumpulkan dan mempelajari literatur-literatur
2. Pengumpulan Data
Melakukan pengumpulan data yang diambil dari PT. PLN (Persero) Pembangkitan Sumbagut.
3. Studi Aliran Daya (sebelum penempatan SVC dan setelah penempatan SVC).
Metode aliran daya yang digunakan yaitu *fast decoupled* dengan perhitungan menggunakan *software MATLAB series 7.13.0.564 (R2011b)*
4. Perhitungan Nilai *Eigen* (sebelum penempatan SVC dan setelah penempatan SVC).
5. Perhitungan *Bus Participation Factor*
Nilai ini dihitung untuk menentukan bus terlemah dalam menempatkan SVC
6. Membandingkan Profil Tegangan dan Nilai *Eigen* (λ)

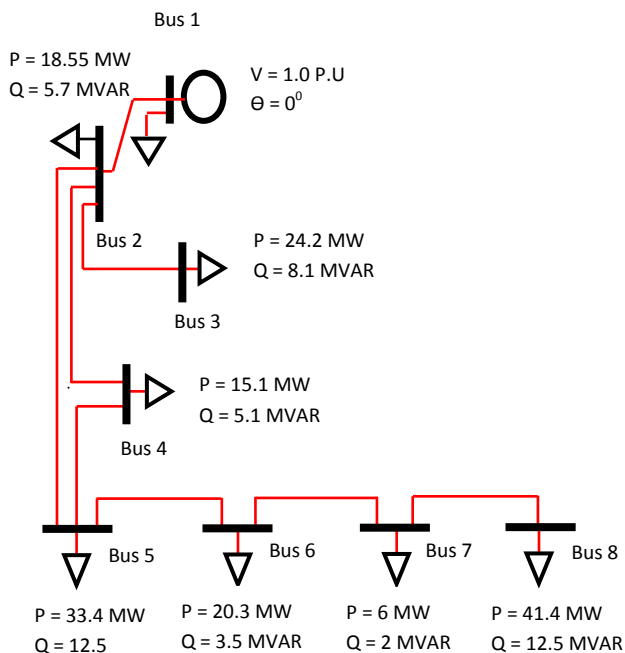
Hasil studi aliran daya dan nilai *eigen* tersebut akan dibandingkan, apakah setelah menggunakan SVC jaringan transmisi mengalami perbaikan tegangan dan sistem menjadi lebih stabil. Bila belum terjadi perbaikan yang signifikan pada bus tersebut, maka akan diulangi pada tahapan pemilihan bus yang memiliki faktor partisipasi paling besar lainnya untuk diletakkan kembali SVC.



Gambar 3. Flowchart tahapan penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Studi Aliran Daya Sistem Interkoneksi Sumut-Aceh 150 kv Sebelum Penempatan SVC



Gambar 4. *Single line* diagram sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV sebelum penempatan SVC

Tabel 1 memperlihatkan profil tegangan pada sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV sebelum penempatan SVC. Diperoleh magnitudo tegangan bus 6, 7 dan 8 memiliki jatuh tegangan diluar batas toleransi $\pm 5\%$ (standard toleransi tegangan AC PLN) yaitu 0.9420 p.u, 0.9282 p.u dan 0.9031 p.u .

Tabel 1. Profil tegangan sebelum penempatan SVC

Bus	Gardu Induk	Magnitudo Tegangan (p.u)	Sudut Tegangan
1	P. Brandan	1	0
2	Langsa	0.9844	-1.7705
3	TL. Cut	0.9643	-4.2388
4	Idie	0.9764	-2.8795
5	Lhokseumawe	0.9648	-3.9443
6	Bireun	0.9420	-6.8626
7	Sigli	0.9282	-8.6442
8	B. Aceh	0.9031	-12.1153

4.2 Perhitungan Nilai *Eigen* dan *Bus Participation Factor* Sebelum Penempatan SVC

Berikut perolehan nilai *eigen* dari perhitungan modal analysis pada tabel 2:

Tabel 2. Nilai *eigen* sebelum penempatan SVC

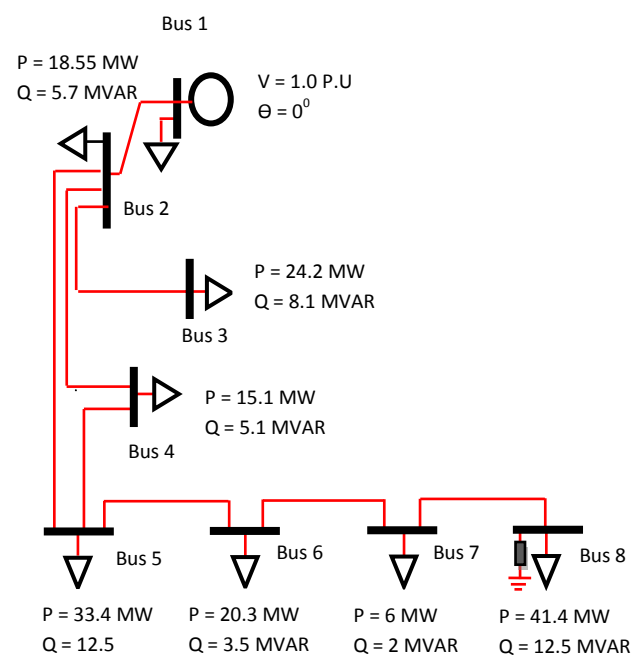
Mode	Nilai <i>Eigen</i> (λ)
1	100.8788
2	46.2388
3	29.1230
4	12.8307
5	8.9791
6	1.6117
7	4.7356

Nilai faktor partisipasi bus yang diperoleh dari perhitungan MATLAB ditunjukkan pada tabel 3. Nilai terbesar terdapat pada bus 8 yaitu 0.9220. Ini menunjukkan bahwa bus 8 memiliki kontribusi paling besar untuk memiliki tegangan tidak stabil yaitu memiliki osilasi tegangan paling besar. Maka pada bus ini akan diletakkan SVC untuk mengontrol permintaan daya reaktif seiring perubahan beban pada sistem.

Tabel 3. Nilai faktor partisipasi bus sistem Sumut-Aceh

Bus	Faktor Partisipasi
2	0.8485
3	0.4695
4	0.4309
5	0.5428
6	0.3083
7	0.5043
8	0.9220

4.3 Studi Aliran Daya Sistem Interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV Setelah Penempatan SVC



Gambar 5. *Single line* diagram sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV setelah penempatan SVC

Besar suseptansi yang dibutuhkan untuk menginjeksikan daya reaktif ke-bus 2:

$$S_{L2} = 41.4 + j12.5 \quad S_{L2} = 43.246 \angle 16.8^\circ$$

$$\cos \Theta_2 = 0.99 > \Theta_2 = 8.1^\circ$$

$$Q_{svc} = P (\tan \Theta_1 - \tan \Theta_2)$$

$$= 41.4 (\tan 16.8 - \tan 8.1)$$

$$= 6.6 \text{ MVAR}$$

$$B_{svc} = \frac{6600}{-(135.465)^2} = -j0.359 \text{ p.u}$$

Hasil perhitungan aliran daya setelah penempatan SVC menggunakan MATLAB dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Profil tegangan setelah penempatan SVC

Bus	Gardu Induk	Magnitude Tegangan (p.u)	Sudut Tegangan
1	P. Brandan	1	0
2	Langsa	0.9923	-1.7944
3	TL. Cut	0.9724	-4.2226
4	Idie	0.9878	-2.8687
5	Lhokseumawe	0.9872	-3.9996
6	Bireun	0.9924	-6.8695
7	Sigli	1.0019	-8.5512
8	B. Aceh	1.0266	-11.6591

Tabel 4 diatas memperlihatkan peningkatan magnitude tegangan pada bus 6, 7 dan 8 yang sebelumnya 0.9420 p.u menjadi 0.9924 p.u, 0.9282 p.u menjadi 1.0019 p.u dan 0.9031 p.u menjadi 1.0266 p.u. Demikian juga magnitude tegangan masing-masing bus 2,3,4 dan 5 berurutan ikut naik sebesar 0.9923 p.u, 0.9724 pu, 0.9878 p.u dan 0.9872 p.u.

Meningkatnya magnitude tegangan bus pada sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV ini menunjukkan bahwa dengan adanya injeksi daya reaktif SVC pada bus 8 (bus yang memiliki tegangan paling tidak stabil) dapat memperbaiki tegangan pada bus lainnya.

4.4 Perhitungan Nilai *Eigen* Setelah Penempatan SVC

Hasil perhitungan nilai *eigen* pada topologi jaringan setelah penempatan SVC dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5 Nilai *eigen* setelah penempatan SVC

Mode	Nilai <i>Eigen</i> (λ)
1	108.7521
2	61.1602
3	41.0814
4	18.7979
5	12.1639
6	4.8250
7	5.7501

Terlihat bahwa adanya peningkatan nilai *eigen* pada mode ke 6 yaitu dari 1.6117 menjadi 4.8250. Hal ini menunjukkan terjadi peningkatan kestabilan pada sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV setelah ditempatkan SVC pada bus 8, yaitu pada GI Banda Aceh.

4.5 Perbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Penempatan SVC

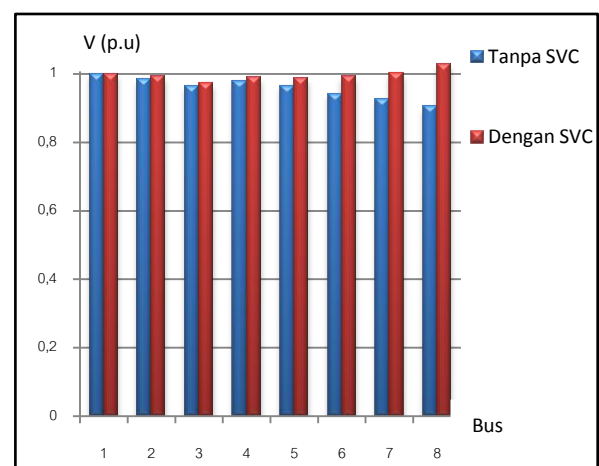
Perbandingan hasil studi aliran daya menggunakan MATLAB untuk mendapatkan magnitude tegangan pada sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV sebelum dan setelah penempatan SVC dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 menunjukkan peningkatan magnitude tegangan setelah ditempatkan SVC pada bus 8. Peningkatan magnitude tegangan terjadi pada semua bus di sistem. Magnitude tegangan bus 6, 7 dan 8 awalnya memiliki jatuh tegangan diluar batas toleransi $\pm 5\%$ (standard toleransi tegangan AC PLN) yaitu 0.9420 p.u, 0.9282 p.u dan 0.9031 p.u, kemudian naik menjadi 0.9924 p.u, 1.0019 p.u dan 1.0266 p.u. Demikian juga dengan bus 2, 3, 4 dan 5 berturut-turut naik menjadi 0.9923 p.u, 0.9724 p.u, 0.9878 p.u dan 0.9872 p.u. Hal ini membuktikan bahwa penempatan SVC pada sistem sangat optimal, karena bus 8 memiliki kontribusi paling besar untuk memiliki tegangan paling tidak stabil.

Tabel 6. Perbandingan profil tegangan sebelum dan setelah penempatan SVC

Bus	Gardu Induk	Magnitude Tegangan (p.u)		Sudut Tegangan	
		Tanpa SVC	Dengan SVC	Tanpa SVC	Dengan SVC
1	P. Brandan	1	1	0	0
2	Langsa	0.9844	0.9923	-1.7705	-1.7944
3	TL. Cut	0.9643	0.9724	-4.2388	-4.2226
4	Idie	0.9764	0.9878	-2.8795	-2.8687
5	Lhokseumawe	0.9648	0.9872	-3.9443	-3.9996
6	Bireun	0.9420	0.9924	-6.8626	-6.8695
7	Sigli	0.9282	1.0019	-8.6442	-8.5512
8	B. Aceh	0.9031	1.0266	-12.1153	-11.6591

Berikut gambar 6 merupakan perbandingan profil tegangan sebelum dan setelah penempatan SVC dalam bentuk grafik.



Gambar 6. Grafik perbandingan profil tegangan sebelum dan setelah penempatan SVC

4.6 Perbandingan Nilai *Eigen* Sebelum dan Setelah Penempatan SVC

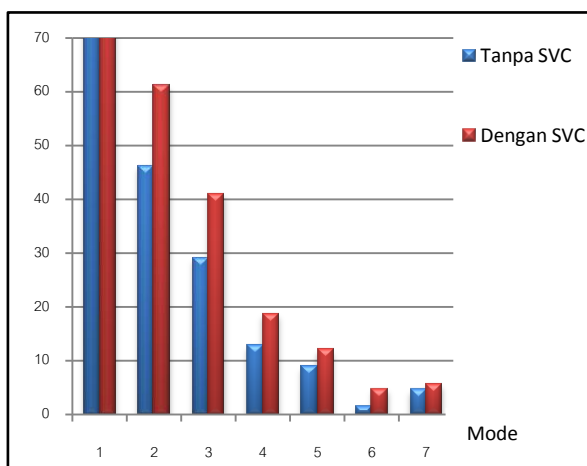
Hasil perhitungan nilai *eigen* sebelum dan setelah penempatan SVC dengan menggunakan MATLAB dapat dibandingkan untuk melihat peningkatan kestabilan tegangan pada sistem.

Dari tabel 7 terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai *eigen* yang signifikan pada mode 6. Sebelum penempatan SVC nilai *eigen* pada mode 6 sebesar 1.6117. Setelah penempatan SVC nilai *eigen* tersebut meningkat menjadi 4.8250, yang berarti terjadi peningkatan stabilitas tegangan pada bus 8.

Peningkatan nilai *eigen* juga terjadi pada mode-mode lainnya. Mode sistem 1, 2, 3, 4, 5 dan 7 meningkat menjadi 108.7521, 61.1602, 41.0814, 18.7979, 12.1639 dan 5.7501. Ini menunjukkan bahwa injeksi daya reaktif SVC membuat pergeseran kestabilan pada sistem menjadi meningkat. Gambar 7 merupakan perbandingan nilai *eigen* sebelum dan setelah penempatan SVC.

Tabel 7. Perbandingan nilai *eigen* sebelum dan setelah penempatan SVC

Mode	Nilai <i>Eigen</i> (λ)	
	Tanpa SVC	Menggunakan SVC
1	100.8788	108.7521
2	46.2388	61.1602
3	29.1230	41.0814
4	12.8307	18.7979
5	8.9791	12.1639
6	1.6117	4.8250
7	4.7356	5.7501



Gambar 7. Perbandingan nilai *eigen* sebelum dan setelah penempatan SVC

4.7 Kurva Q-V Sistem Interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV

Kurva Q-V berfungsi untuk membuktikan injeksi daya reaktif SVC dapat meningkatkan

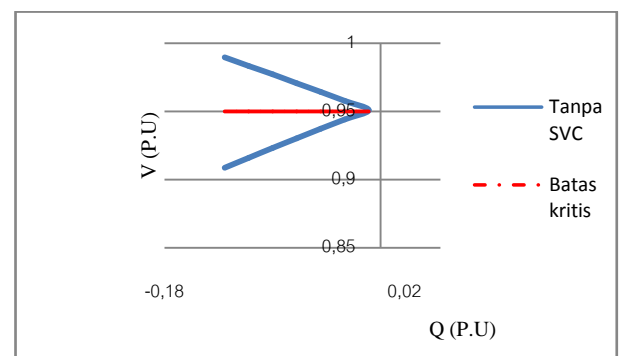
kemampuan bus dalam menambah kapasitas bebannya hingga tegangan mencapai titik kritis yaitu 0.95 p.u.

Pada penelitian ini, akan dilakukan pengujian kemampuan bus 8 dalam melayani penambahan beban reaktif hingga mencapai titik kritisnya dengan daya aktif (P) konstan yaitu 41.4 MVAR. Tabel 8 merupakan perolehan perubahan daya reaktif terhadap magnitude tegangan bus 8 (GI B.Aceh) pada sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV sebelum dan setelah penempatan SVC.

Tabel 8. Nilai Q-V sebelum penempatan SVC

Tanpa SVC	
Q (p.u)	V (p.u)
-0.13	0.9897
-0.11	0.9835
-0.09	0.9772
-0.07	0.9708
-0.05	0.9643
-0.03	0.9577
-0.01	0.9510
0.01	0.9443
0.03	0.9373
0.05	0.9303
0.07	0.9233
0.09	0.9161
0.11	0.9087

Dari perolehan nilai Q-V bus 8 sebelum penempatan SVC diatas memperlihatkan tegangan telah berada pada titik kritis pada saat daya reaktif (Q) masih bernilai 0. Hal ini menunjukkan bus 8 tidak mampu melayani daya reaktif mulai dari 0 p.u (0 MVAR). Untuk lebih jelas dapat dilihat pada kurva Q-V pada gambar 8.



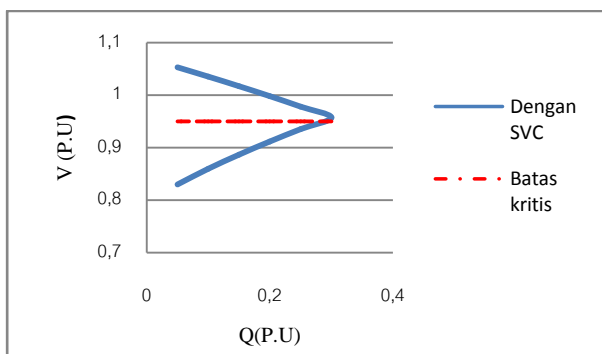
Gambar 8. Kurva Q-V sistem Sumut-Aceh tanpa SVC

Tabel 9 merupakan nilai Q-V bus 8 setelah penempatan SVC. Dilakukan pembebanan daya reaktif mulai dari 0.05 p.u hingga 0.55 p.u. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa bus 8 berada pada batas kritis tegangannya pada saat daya reaktif bernilai 0.30 p.u (Q = 30 MVAR).

Tabel 9 Nilai Q-V setelah penempatan SVC

Dengan SVC	
Q (p.u)	V (p.u)
0.05	1.0533
0.10	1.0356
0.15	1.0173
0.20	0.9982
0.25	0.9783
0.30	0.9574
0.35	0.9353
0.40	0.9118
0.45	0.8867
0.50	0.8596
0.55	0.8298

Hal ini membuktikan bahwa penempatan SVC dapat meningkatkan kemampuan bus 8 dalam melayani permintaan daya reaktif beban. Dimana sebelum penempatan SVC bus 8 berada pada tegangan kritisnya ketika daya reaktif masih 0 p.u (0 MVAR). Setelah penempatan SVC kemampuan bus 8 dalam melayani daya reaktif beban meningkat hingga mencapai 0.30 p.u (Q=30 MVAR). Berikut gambar 9 merupakan kurva Q-V bus 8 setelah penempatan SVC.



Gambar 9. Kurva Q-V sistem Sumut-Aceh menggunakan SVC

V. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan MATLAB dan pembahasan pada sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Bus yang memiliki kontribusi tegangan paling tidak stabil pada sistem terdapat pada bus 8 (GI Banda Aceh), yaitu memiliki nilai faktor partisipasi bus sebesar 0.9220.
2. Penempatan SVC pada bus 8 dapat meningkatkan kestabilan tegangan sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV. Awalnya mode sistem no 6 bernilai 1.6117 menjadi 4.8250.
3. Kurva Q-V dapat menunjukkan peningkatan kemampuan bus 8 dalam melayani permintaan daya reaktif beban setelah penempatan SVC.

Dimana awalnya bus 8 mencapai titik kritis tegangan mulai dari $Q = 0$ p.u. Setelah penempatan SVC kemampuan bus 8 meningkat menjadi 0.30 p.u hingga batas kritis tegangannya.

4. Bus 8 telah berada pada titik kritis tegangannya saat beban reaktif pada bus 8 masih bernilai 0 p.u (0 MVAR).
5. Metode *bus participation factor* dapat mencari titik kestabilan tegangan paling besar pada sistem interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV, agar SVC yang ditempatkan pada salah satu bus akan optimal mengontrol permintaan daya reaktif saat peningkatan beban terjadi.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- Acha, Enrique, A.P, Claudio R, A.C. Caesar, Hugo. (2004). *FACTS : Modelling And Simulation In Power Networks*, New York: John Wiley & Sons, ISBN : 0-407-85271-2.
- Arismunandar. A, DR dan M.A.Sc, Kuwahara. S, DR. (1993). *Teknik Tenaga Listrik*, PT Pradnya Paramita.
- Byerly. R.T, D.T. Poznaniak, dan E.R. Taylor, jr. (1982). *Static Reactive Compensation for Power Transmission System*, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol PAS-101, No. 10.
- Grainger, John. J, Stevenson and William. D. Jr. (1994). *Power System Analysis*, Ch. 16, McGraw-Hill.
- P. Kundur. (1994). *Power System Stability and Control*, Ch. 14, McGraw-Hill.
- Sulistiyono, Dwi, Windarto, Joko dan Karnoto. (2011). *Perbandingan Metode Gauss-Seidel, Metode Newton Raphson dan Metode Fast Decoupled Dalam Solusi Aliran Daya*, Undergraduate thesis, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Undip.
- Syukriyadin dan G. Indar Chaerah. (2005). *Prediksi Voltage Collapse Pada Sistem Interkoneksi Jawa-Bali Menggunakan Metode Modal Analysis*, Jurnal Rekayasa Elektrika, Volume 4 No.2.
- T.J.E. Miller. (1982). *Reactive Power Control In Electric Systems*, New York : John Wiley & Sons.
- Umenz. (2011). *Stabilitas Sistem Tenaga* (<http://sistem-tenaga-listrik.blogspot.com/2011/05/stabilitas-sistem-tenaga.html>, diakses 2011).
- William D. Stevenson, Jr. (1983). *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, Edisi keempat, Erlangga.



Runaldy Sahputra (0704105010084) dilahirkan di Meulaboh pada tanggal 17 Desember 1988. Menamatkan SPMN2 Meulaboh pada tahun 2003 dan SMAN4 Wira Bangsa Meulaboh pada tahun 2006. Aldy sebagai nama panggilan dan merupakan anak kedua dari 3 bersaudara. Selama menjadi mahasiswa aktif sebagai pengurus HIMATEKTRO periode 2008-2009 dan asisten pada Laboratorium Elektronika Daya periode 2009-2012. Prestasi yang pernah dicapai yaitu penerima beasiswa plus PT.Djarum 2009-2010 dan penerima beasiswa *The Society of Petroleum Engineers* (SPE) 2010-2011. Tugas Akhir ini diselesaikan selama enam bulan dengan kelompok riset pada Laboratorium Energi Listrik Teknik Elektro Universitas Syiah Kuala. Selepas lulus program S1, Aldy berkeinginan untuk bekerja di bidang kelistrikan pada perusahaan ternama.