

ANALISIS PENGGUNAAN TCSC SEBAGAI KONTROL TEGANGAN DENGAN *THREE-PHASE CURRENT INJECTION METHOD* (TCIM) PADA JARINGAN DISTRIBUSI PRIMER 20 kV

Ni Putu Agustini

Abstrak: Penelitian ini menyajikan model pengembangan secara matematis dari *Thyristor Controlled Series Compensator* (TCSC) sebagai peralatan kontrol tegangan yang sesuai digunakan dengan *Three-Phase Current Injection Method* (TCIM) untuk perhitungan aliran daya listriknya. TCIM adalah suatu metode yang didasarkan pada aturan Newton dimana persamaan dituliskan dalam bentuk koordinat persegi yang menghasilkan matrik jacobian ber-orde $6n \times 6n$. Keberadaan perangkat pengendali daya tersebut memerlukan suatu sistem sisipan tambahan untuk menggabungkan hubungan antara setiap aksi pengendali dan variabel yang akan dikendalikan dan hasilnya tercakup dalam suatu matrik jacobian sisipan. Sistem distribusi yang diuji adalah penyulang Kebon Waris dengan 80 bus yang merupakan salah satu penyulang G.I Pandaan di PT PLN (Persero) cabang Pandaan dan hasilnya dapat meningkatkan transfer daya sekaligus meminimalisir rugi-rugi daya saluran serta memperbaiki profil tegangan.

Kata kunci: TCSC, TCIM, aliran daya, radial.

Perkembangan industri daya listrik saat ini telah banyak mengalami kemajuan dikarenakan terjadinya perubahan radikal dalam pasar energi, khususnya dalam hal ini pengoperasian sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik tersebut dirancang. Selain tambahan sebagai tujuan ekonomis kemunculan teknologi elektronika daya dan perangkat *FACTS (Flexible AC Transmission System)* memerlukan pengembangan model-model yang tepat dan algoritma baru untuk perhitungan karakteristik jaringan listrik tersebut untuk tujuan perencanaan jaringan listrik selanjutnya (S.Gerbex, 2001). Sekalipun peralatan *FACTS* khususnya *TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)* sudah dipahami untuk aplikasi pada sistem transmisi, tetapi juga teknologi ini diharapkan dapat digunakan pada sistem jaringan distribusi primer khususnya sistem distribusi radial sebagai peralatan control tegangan (Paulo, 2001).

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan dan mendistribusikan tenaga

listrik ke pusat-pusat beban atau konsumen (Paula.A,2001) (Maesudi,1990). Permasalahan yang dihadapi jaringan distribusi adalah bagaimana menyalurkan daya listrik dengan baik pada saat tertentu maupun dimasa yang akan datang dengan kualitas dan kontinuitas yang terjamin, karena disamping tersedianya energi listrik yang mencukupi, konsumen juga menuntut peningkatan kualitas energi listrik yang baik. Untuk meningkatkan kualitas energi listrik maka perlu dilakukan analisa yang tepat, yaitu menggunakan studi analisa aliran daya. Hasil analisa aliran daya memberikan informasi mengenai besar tegangan, aliran daya serta rugi-rugi daya pada sistem yang dianalisis (Stevenson, 1980).

Banyak riset-riset yang telah dilakukan dalam upaya mengetahui performansi sistem distribusi primer dengan menggunakan studi aliran daya (Paula A,2000) dan (Maesudi,1990). Namun untuk meningkatkan kualitas performansi sistem distribusi radial khususnya untuk sistem tak seimbang tiga fasa perlu dilakukan

untuk mereduksi rugi-rugi saluran dengan meningkatkan profile tegangan sehingga akan meningkatkan transfer daya saluran distribusi tersebut. Hal ini dapat dilakukan dengan melakukan analisis kontrol tegangan dengan menggabungkan metode aliran daya tiga fasa tak seimbang dengan peralatan kompensasi TCSC.

Penelitian ini akan menganalisis aliran daya pada saluran distribusi primer tipe radial yang mempunyai beban tidak seimbang sehingga dapat diketahui tegangan dan aliran daya serta rugi-rugi daya setiap fasa dan keadaan sistem setelah terpasang TCSC.

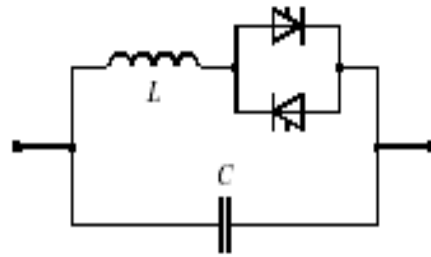
Didalam pengoperasian sistem tenaga listrik, parameter-parameter listrik yang perlu diperhatikan sehubungan dengan analisa aliran daya adalah besarnya magnitude tegangan $|V|$, sudut fasa tegangan θ , daya nyata P, dan daya reaktif Q. Daya nyata P mempunyai ketergantungan yang kuat dengan sudut fasa tegangan dan daya reaktif Q mempunyai ketergantungan yang kuat dengan besarnya tegangan $|V|$. Bila P dan Q berubah maka θ dan $|V|$ berubah pula dan demikian sebaliknya.

Studi aliran daya sangat penting dalam rencana perluasan dan penentuan operasi terbaik dari suatu sistem. Adapun tujuan mempelajari aliran daya ini dilakukan untuk menentukan: (1) Aliran daya aktif dan reaktif pada cabang-cabang rangkaian, (2) Menghitung nilai tegangan $|V|$ dan sudut fasa tegangan pada rel beban atau *P-Q bus*, (3) Tidak ada rangkaian yang mempunyai beban lebih dari tegangan busbar dalam batas-batas yang dapat diterima. (4) Mengetahui pengaruh penambahan atau perubahan beban terhadap sistem yang ada. (5) Mengetahui daya yang mengalir pada setiap bus.

TCSC

TCSC terdiri dari kapasitor seri dan paralel dengan sebuah katup *thyristor* dan induktor seri. Sistem kompensasi yang

lengkap dibangun dari deretan modul-modul dan biasanya ditambahkan kapasitor konvensional.



Gambar 1 *Thyristor Controlled Series Compensator*

Model operasi ekstrim dari modul TCSC adalah *blocking thyristor*, dimana dalam kasus ini bertindak sebagai kapasitor konvensional, atau thyristor yang ekuivalen dengan induktansi kecil. Antara dua model operasi ini ada kontrol “*vernier*” yang dapat digunakan untuk meningkatkan reaktansi dalam daerah induktif maupun kapasitif.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, alat TCSC ini bisa memiliki salah satu dari dua kemungkinan karakteristik yaitu induktif dan kapasitif. Ma-sing-masing untuk mengurangi atau penambahan reaktansi pada garis X_L dengan model tiga elemen penghubung paralel yaitu kapasitansi, induktansi dan jenis kabel. Kapasitansi dan induktansi merupakan variabel sedangkan nilai kapasitansi dan induktansi adalah fungsi reaktansi dari saluran dimana alat ditempatkan. Dimana untuk menghindari resonansi, hanya satu dari tiga elemen yang bisa dihubungkan waktu. Lebih dari itu tidak mengkompensasi saluran, nilai maksimum pada kapasitansi ditetapkan $0,8 X_L$. Sedangkan untuk induktansi nilai maksimumnya adalah $0,2 X_L$ (S.Gerbex,2001).Persamaan kendali secara linier dituliskan dengan persamaan sebagai berikut^[1] :

$$\Delta V_k^s = \frac{V_{rk}^s}{V_k^s} \Delta V_{rk}^s + \frac{V_{mk}^s}{V_k^s} \Delta V_{mk}^s \dots (1)$$

Untuk suatu sistem yang secara umum mempunyai suatu perangkat TCSC yang terhubung dari bus i menuju j sehingga

tegangan tetap konstan pada busbar k , sistem ditambahkan dengan persamaan berikut (Paulo,2001) :

a.) Sub matrik X dan Y akan mengalami modifikasi menjadi:

$$X = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{mj}^a}{\partial \Delta b_{ij}^{aa}} & & & \\ & \frac{\partial \Delta I_{mj}^b}{\partial \Delta b_{ij}^{bb}} & & \\ & & \frac{\partial \Delta I_{mj}^c}{\partial \Delta b_{ij}^{cc}} & \\ \frac{\partial \Delta I_{ri}^a}{\partial \Delta b_{ij}^{aa}} & & & \\ & \frac{\partial \Delta I_{ri}^b}{\partial \Delta b_{ij}^{bb}} & & \\ & & \frac{\partial \Delta I_{ri}^c}{\partial \Delta b_{ij}^{cc}} & \end{bmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{mj}^a}{\partial \Delta b_{ij}^{aa}} & & & \\ & \frac{\partial \Delta I_{mj}^b}{\partial \Delta b_{ij}^{bb}} & & \\ & & \frac{\partial \Delta I_{mj}^c}{\partial \Delta b_{ij}^{cc}} & \\ \frac{\partial \Delta I_{ri}^a}{\partial \Delta b_{ij}^{aa}} & & & \\ & \frac{\partial \Delta I_{ri}^b}{\partial \Delta b_{ij}^{bb}} & & \\ & & \frac{\partial \Delta I_{ri}^c}{\partial \Delta b_{ij}^{cc}} & \end{bmatrix} \quad \dots\dots(3)$$

Dimana :

$$\frac{\partial \Delta I_{mj}^s}{\partial b_{ij}^{ss}} = V_{rj}^s - V_{ri}^s \quad \dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial \Delta I_{rj}^s}{\partial b_{ij}^{ss}} = V_{mi}^s - V_{mj}^s \quad \dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial \Delta I_{mj}^s}{\partial b_{ij}^{ss}} = V_{ri}^s - V_{rj}^s \quad \dots\dots(6)$$

$$\frac{\partial \Delta I_{rj}^s}{\partial b_{ij}^{ss}} = V_{mj}^s - V_{mi}^s \quad \dots\dots(7)$$

b.) Variabel kondisi Δa_{ij}^{abc} menjadi persamaan berikut :

$$\Delta b_{ij}^{abc} = \begin{bmatrix} \Delta b_{ij}^{aa} \\ \Delta b_{ij}^{bb} \\ \Delta b_{ij}^{cc} \end{bmatrix} \quad \dots\dots(8)$$

Untuk perangkat TCSC pada model aliran daya, persamaan kontrolnya menjadi :

$$\Delta P_{ij}^s = (P_{ij}^s)^{sp} - (P_{ij}^s)^{cole} \quad \dots\dots(9)$$

Dimana :

$$s = \{a,b,c\}$$

$(P_{ij}^s)^{sp}$ aliran daya sktif khusus pada fasa s di percabangan i - j

$(P_{ij}^s)^{cale}$ menghitung aliran daya aktif pada fasa s pada percabangan i - j

Sehingga didapatkan persaman :

$$(P_{ij}^s)^{cole} = g_{ij}^s [(V_{ri}^s)^2 + (V_{mj}^s)^2] - g_{ij}^s (V_{ri}^s V_{rj}^s + V_{mi}^s V_{mj}^s) - b_{ij}^s (V_{mi}^s V_{rj}^s - V_{ri}^s V_{mj}^s) \quad \dots\dots(10)$$

Linierisasi persamaan 10 menjadi :

$$\Delta P_{ij}^s = -\frac{\partial P_{ij}^s}{\partial V_{ri}^s} \Delta V_{ri}^s - \frac{\partial P_{ij}^s}{\partial V_{mj}^s} \Delta V_{mj}^s - \frac{\partial P_{ij}^s}{\partial V_{rj}^s} \Delta V_{rj}^s - \frac{\partial P_{ij}^s}{\partial V_{mi}^s} \Delta V_{mi}^s - \frac{\partial P_{ij}^s}{\partial b_{ij}^{ss}} \Delta b_{ij}^{ss} \quad \dots\dots(11)$$

Dimana :

$$\frac{\partial P_{ij}^s}{\partial V_{ri}^s} = 2g_{ij}^{ss} V_{ri}^s - g_{ij}^{ss} V_{rj}^s - b_{ij}^{ss} V_{mj}^s \quad \dots\dots(12)$$

$$\frac{\partial P_{ij}^s}{\partial V_{mi}^s} = 2g_{ij}^{ss} V_{mi}^s - g_{ij}^{ss} V_{mj}^s - b_{ij}^{ss} V_{rj}^s \quad \dots\dots(13)$$

$$\frac{\partial P_{ij}^s}{\partial V_{ri}^s} = -g_{ij}^{ss} V_{ri}^s - b_{ij}^{ss} V_{mi}^s \quad \dots\dots(14)$$

$$\frac{\partial P_{ij}^s}{\partial V_{ri}^s} = -g_{ij}^{ss} V_{mi}^s + b_{ij}^{ss} V_{ri}^s \quad \dots\dots(15)$$

$$\frac{\partial P_{ij}^s}{\partial V_{ri}^s} = V_{ri}^s V_{mj}^s - V_{mi}^s V_{rj}^s \quad \dots\dots(16)$$

Elemen g_{ij}^{ss} dalam (12)-(16) adalah cabang induktansi seri

Dengan mengasumsikan bahwa TCSC dipergunakan untuk mengendalikn daya aktif pada percabangan i - j, sistem linier dari persamaan tertulis seperti pada persamaan berikut di bawah yang menunjukkan sub matrik X dan Y berasal dari persamaan (12) dan (13).

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta V_{mj}^{abc} \\ \Delta V_{rj}^{abc} \\ \vdots \\ \Delta V_{mj}^{abc} \\ \Delta V_{rj}^{abc} \\ \vdots \\ \Delta P_{ij}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & (Y_{ii}^{abc}) & \dots & Y_{ij}^{abc} & \dots & X \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & Y_{ji}^{abc} & \dots & (Y_{jj}^{abc}) & \dots & Y \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & Z & \dots & U & \dots & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta V_{rj}^{abc} \\ \Delta V_{mj}^{abc} \\ \vdots \\ \Delta V_{rj}^{abc} \\ \Delta V_{mj}^{abc} \\ \vdots \\ \Delta V_{ij}^{abc} \end{bmatrix} \dots(17)$$

Dan untuk sub matrik Z, U, dan W adalah:

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_{ij}^p}{\alpha_i^a} & & & & & \\ & \frac{\alpha_{ij}^b}{\alpha_j^b} & & & & \\ & & \frac{\alpha_{ij}^p}{\alpha_i^a} & & & \\ & & & \frac{\alpha_{ij}^b}{\alpha_j^b} & & \\ & & & & \frac{\alpha_{ij}^p}{\alpha_i^a} & \\ & & & & & \frac{\alpha_{ij}^b}{\alpha_j^b} \end{bmatrix} \dots(18)$$

$$U = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_{ij}^p}{\alpha_j^a} & & & & & \\ & \frac{\alpha_{ij}^b}{\alpha_j^b} & & & & \\ & & \frac{\alpha_{ij}^p}{\alpha_j^a} & & & \\ & & & \frac{\alpha_{ij}^b}{\alpha_j^b} & & \\ & & & & \frac{\alpha_{ij}^p}{\alpha_j^a} & \\ & & & & & \frac{\alpha_{ij}^b}{\alpha_j^b} \end{bmatrix} \dots(19)$$

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_{ij}^p}{\alpha_j^a} \\ \frac{\alpha_{ij}^{aa}}{\alpha_j^a} \\ \frac{\alpha_{ij}^b}{\alpha_j^b} \\ \frac{\alpha_{ij}^{bb}}{\alpha_j^b} \\ \frac{\alpha_{ij}^p}{\alpha_j^a} \\ \frac{\alpha_{ij}^{cc}}{\alpha_j^c} \end{bmatrix} \dots(20)$$

METODE

Pengumpulan data

Data kuantitatif, yaitu data yang dapat dihitung antara lain: Data saluran, meliputi

jenis penghantar, luas penampang, tahanan penghantar, jarak antar konduktor dan jarak antar saluran. Data pembebanan, meliputi daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada tiap-tiap bus. Data kualitatif, yaitu data yang berbentuk diagram. Dalam hal ini adalah *single line* diagram penyulang.

Simulasi

Analisa perhitungan tegangan, rugi-rugi daya dan aliran daya pada tiap-tiap saluran sebelum dan sesudah dipasang TCSC menggunakan *Three-Phase Current Injection Method (TCIM)* yang disimulasikan dengan program komputer yaitu program *software Matlab*.

Algoritma

Algoritma Pemecahan Masalah

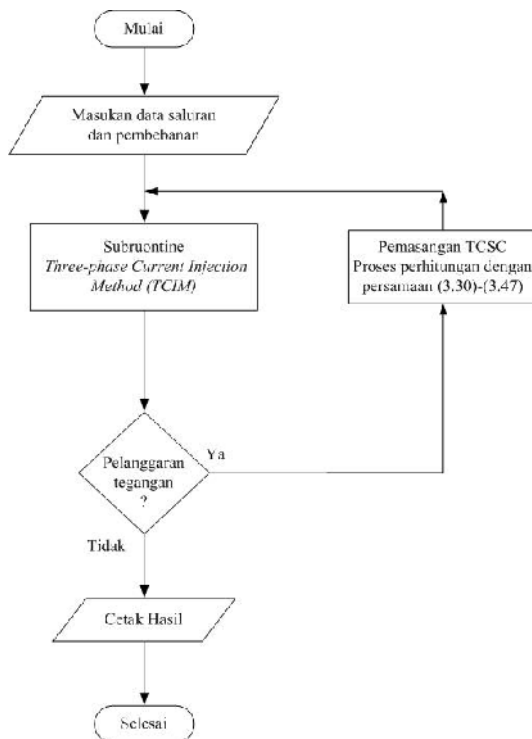
1. Masukkan data saluran dan pembebanan yaitu jarak antar konduktor, panjang saluran tiap *node*, tegangan dasar, daya aktif dan daya reaktif.
2. *Subroutine* program (proses perhitungan menggunakan *Three-Phase Current Injection Method*).
3. Mengecek, apakah terjadi pelanggaran tegangan ?
 - a. "Ya": proses pemasangan TCSC, persamaan (10)-(17), kemudian proses kembali ke langkah 2.
 - b. "Tidak": proses selanjutnya
4. Cetak hasil.

Algoritma Subroutine Perhitungan TCIM

1. Baca data saluran dan data pembebanan.
2. Pembentukan Z saluran, persamaan (1)-(5).
3. Bentuk Y admitansi.
4. Hitung *power injection*, persamaan (6) dan (7).

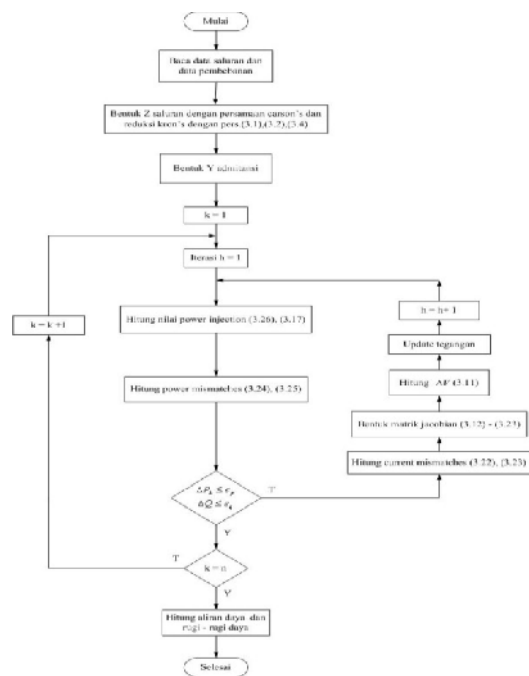
5. Hitung *power mismatches*, persamaan (4) dan (5).
6. Proses pengecekan: $\left\{ \left(\Delta P_k^s \right)^{(h)} \right\} \leq \varepsilon_p$ dan $\left\{ \left(\Delta Q_k^s \right)^{(h)} \right\} \leq \varepsilon_q$ kemudian cetak hasil, apabila belum sesuai dilanjutkan ke langkah 7.
7. Menghitung matrik jacobian.
8. Hitung kenaikan tegangan, persamaan (11).
9. *Update* tegangan, persamaan (8) dan kembali ke langkah 4.

Proses perhitungan dimulai dengan memasukkan data saluran dan data pembebanan pada program komputer (*Matlab*) kemudian menentukan diantara bus manakah TCSC ini akan dipasang. Selanjutnya menjalankan program komputer kemudian proses untuk mendapatkan *load flow awal (base case)* keadaan sistem sebenarnya. Setelah mendapatkan *load flow awal* keadaan sistem sebenarnya kemudian dilanjutkan dengan proses *load flow* keadaan sistem sesudah terpasang TCSC.



Gambar 2. Flowchart pemecahan masalah

Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan diagram alir pemecahan masalah.



Gambar 3. Flowchart subroutine TCIM

Analisa TCSC Sebagai Kontrol Tegangan Menggunakan *Three-Phase Current Injection Method (TCIM)*

Data Perhitungan

Perhitungan aliran daya ini mengambil data dari G.I Pandaan yang melayani 7 (tujuh) buah penyulang dengan tiga buah trafo masing-masing $2 \times 150/20$ kV -30 MVA dan $1 \times 150/20$ kV-15MVA Sistem Distribusi radial G.I Pandaan memakai tegangan distribusi 20 kV.

Agar perhitungan lebih mudah maka digunakan sistem per-unit (pu), dimana dasar yang digunakan : Tegangan dasar : 20 kV dan Daya Dasar : 100 kVA.

Selanjutnya node-node yang ada diklasifikasikan, yaitu busbar G.I Pandaan diasumsikan sebagai slack bus, sedangkan node-node yang lain sepanjang saluran radial dipandang sebagai load bus. Dalam hal ini tidak ada bus generator karena sepanjang saluran tidak terdapat pembangkitan.

Data saluran

Jaringan distribusi primer G.I Pandaan menggunakan saluran kabel udara dengan spesifikasi pada tabel 1.

Tabel 1 Data Penyulang Sistem 20 KV G.I Pandaan

Jenis Konduktor	Penampang nominal (mm ²)	Resistansi Konduktor (r) (/km)	GMR mm
AAAC	150	0.2162	5.2365
AAAC	120	0.2688	4.6837

Adapun data saluran penyulang Kebon Waris terlihat pada tabel 2.

Tabel 2 Data Saluran Penyulang Kebon Waris

No. Saluran	Dari Node	Ke Node	Panjang (m)
1	1	2	534
2	2	3	585
3	2	4	367
4	4	5	409
5	5	6	87

Data Pembebanan

Data pembebanan tampak seperti pada tabel 3.

Tabel 3 Data Pembebanan Penyulang Kebon Waris

No Bus	R		S		T	
	P (kW)	Q (kVA R)	P (kW)	Q (kVA R)	P (kW)	Q (kVA R)
1	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000
2	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000
3	41.8	25.9	46.4	28.81	30.8	19.09
4	16.9	10.4	17.4	10.83	18.9	11.74
5	54.9	34.0	56.0	34.73	58.0	35.98
6	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000

Data pembebanan diperoleh dari mengambil data dari masing-masing trafo dis-

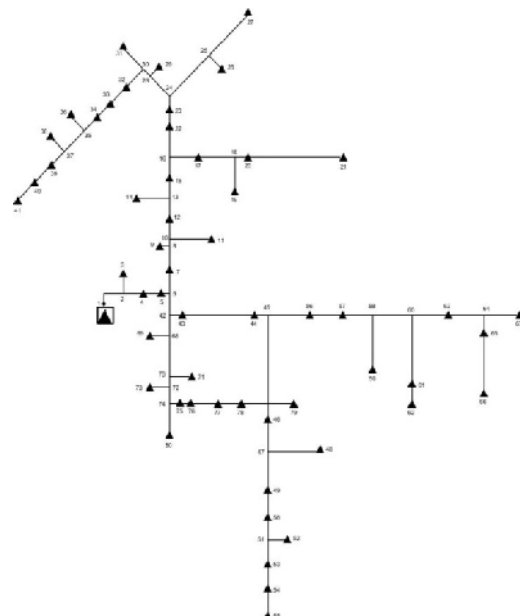
tribusi, dimana besarnya beban pada masing-masing fasa tidak seimbang. Jika besarnya pembebanan adalah nol, maka pada node tidak terdapat trafo distribusi tetapi hanya merupakan simpul. Pada tahap ini rugi-rugi yang terjadi pada trafo distribusi diabaikan.

HASIL

Proses perhitungan diawali dengan melakukan studi aliran daya dengan metode injeksi arus tiga fasa. Untuk memudahkan perhitungan dan analisa pada sistem tenaga dipakai harga satuan per-unit. Harga dasar yang dipilih pada studi ini adalah 20kV dan 100kVA sebagai harga tegangan dasar dan daya dasar. Mengingat bahwa pada jaringan tidak dilakukan pengukuran factor daya maka pada perhitungan ini diambil harga factor daya sebesar 0,85.

Perhitungan Aliran Daya Penyulang

Perhitungan diawali dengan menampilkan single line diagram dari penyulang yang mewakili keadaan sistem sebenarnya.



Gambar 4. Single Line Diagram Penyulang Kebon Waris

Dari Gambar 4 diperlihatkan single line diagram dari penyulang Kebon Waris. Pada penyulang ini jumlah bus dan jumlah saluran masing-masing adalah : Slack Bus: 1, Load Bus: 79. Total Bus : 80

Dengan mengacu pada gambar 4 maka besarnya impedansi saluran dalam pu menggunakan persamaan carson's dan reduksi kron's, dengan bantuan program komputer dapat ditentukan sebagai berikut :

Impedansi Saluran-1 (dari node-1 ke node-2)

- Panjang saluran = 534 m = 0.33188 mile
- $r = 0,2162 \text{ /km} = 0,3497 \text{ /mile}$
- $GMR = 5,2365 \text{ mm} = 0,0172 \text{ ft}$
- $D_{12} = D_{21} = 0,90 \text{ m} = 2,9528 \text{ ft}$
- $D_{13} = D_{31} = 1,65 \text{ m} = 5,4134 \text{ ft}$
- $D_{23} = D_{32} = 0,75 \text{ m} = 2,4606 \text{ ft}$
- $D_{14} = D_{41} = 1,09 \text{ m} = 3,5978 \text{ ft}$
- $D_{24} = D_{42} = 1,09 \text{ m} = 3,5978 \text{ ft}$
- $D_{34} = D_{43} = 1,56 \text{ m} = 5,1247 \text{ ft}$

Persamaan Carson's

$$z_{ii} = r_i + 0.0953 + j0.12134 \times [\ln(1/GMR_i) + 7.943] \Omega / \text{mile}$$

$$z_{ij} = r_{ij} + 0.0953 + j0.12134 \times [\ln(1/D_{ij}) + 7.943] \Omega / \text{mile}$$

$$Z = \begin{bmatrix} 0.44324 & 0.5800953 & 0.8313 & 0.9530757 & 0.95308074 \\ 0.09530831 & 0.44324 & 0.5800953 & 0.8313 & 0.95308074 \\ 0.09530757 & 0.09530831 & 0.44324 & 0.5800953 & 0.7644 \\ 0.095308074 & 0.095308074 & 0.095307644 & 0.44324 & 0.58 \\ 0.095308074 & 0.095308074 & 0.095307644 & 0.44324 & 0.58 \end{bmatrix} \Omega / \text{mi}$$

Reduksi Kron's

Matrik impedansi saluran dalam pu dengan mengalikan panjang saluran.

$$Z = \begin{bmatrix} 0.1543 & 0.3479 & 0.0387 & 0.1406 & 0.0387 & 0.1162 \\ 0.0387 & 0.1406 & 0.1543 & 0.3479 & 0.0387 & 0.1481 \\ 0.0387 & 0.1162 & 0.0387 & 0.1481 & 0.1543 & 0.3479 \end{bmatrix}$$

Matrik impedansi saluran dalam pu dengan Z dasar 4000 .

$$Z = \begin{bmatrix} 0.3855 & 0.8697 & 0.0967 & 0.3515 & 0.0967 & 0.2905 \\ 0.0967 & 0.3515 & 0.3855 & 0.8697 & 0.0967 & 0.4602 \\ 0.0967 & 0.2905 & 0.0967 & 0.4602 & 0.3855 & 0.8697 \end{bmatrix}$$

Cara yang sama juga dilakukan untuk saluran yang lain. Dengan menggunakan bantuan program komputer untuk analisa aliran daya *Three-Phase Current Injection Method* didapatkan besarnya tegangan dan sudut fasa tiap-tiap node, beserta aliran daya dan rugi-rugi saluran sebelum dan sesudah dipasang TCSC diantara bus 43-44 seperti terlihat pada tabel dibawah :

Tabel 4 Kondisi Tegangan Dan Fasa Tegangan sebelum Dipasang TCSC

Node	Voltage (pu)	Phase (deg)	Voltage (pu)	Phase (deg)	Voltage (pu)	Phase (deg)
43	1.0000	0.0000	0.9999	-0.0000	0.9999	-0.0000
44	1.0000	0.0000	0.9999	-0.0000	0.9999	-0.0000
45	1.0000	0.0000	0.9999	-0.0000	0.9999	-0.0000
46	1.0000	0.0000	0.9999	-0.0000	0.9999	-0.0000
47	1.0000	0.0000	0.9999	-0.0000	0.9999	-0.0000
48	1.0000	0.0000	0.9999	-0.0000	0.9999	-0.0000
49	1.0000	0.0000	0.9999	-0.0000	0.9999	-0.0000
50	1.0000	0.0000	0.9999	-0.0000	0.9999	-0.0000

Tabel 5 Kondisi Tegangan dan Fasa Tegangan sesudah Dipasang TCSC

Bus 1	Bus 2	V1 (kV)	V2 (kV)	Angle 1 (deg)	Angle 2 (deg)	Phase Diff (deg)	
43	44	514.582	321.032	512.475	513.968	447.415	278.853
44	43	-514.014	-319.853	-511.379	-513.161	-447.052	-277.847
44	45	463.402	238.514	453.627	282.226	411.110	354.980
45	44	-463.190	-238.695	-453.555	-282.255	-411.101	-354.874
45	46	311.412	132.942	332.171	153.198	369.750	164.703
45	45	-311.144	-132.450	-331.952	-152.745	-369.552	-164.609
45	56	152.025	34.445	191.333	123.762	145.337	90.136
55	45	-152.012	-34.493	-191.371	-123.669	-145.345	-90.102
45	47	279.329	173.744	245.351	152.535	242.222	150.494
47	46	-279.247	-173.515	-245.325	-152.632	-242.174	-150.289
47	46	35.417	24.449	27.325	17.237	25.512	15.803
48	47	-35.413	-24.444	-27.324	-17.234	-25.511	-15.802
47	45	235.842	149.055	215.452	134.420	216.638	154.483
49	47	-235.705	-148.800	-215.357	-134.149	-216.554	-154.236
49	50	214.292	132.045	190.255	127.597	192.285	112.023
50	49	-214.281	-132.081	-190.246	-127.559	-192.277	-112.057
50	51	171.407	174.530	154.731	96.754	173.380	95.019
51	50	-171.404	-174.493	-154.725	-96.719	-173.277	-95.025
51	52	36.242	22.490	43.322	26.521	41.419	25.043
52	51	-36.241	-22.489	-43.321	-26.521	-41.419	-25.039
51	53	132.162	52.003	112.336	59.557	113.958	69.985
53	51	-132.162	-51.994	-112.325	-59.559	-113.957	-69.977
53	59	55.948	34.592	58.572	12.438	51.502	21.008
54	53	-55.945	-34.585	-58.565	-12.477	-51.500	-21.002
54	55	41.101	24.933	32.392	33.450	34.502	21.472
55	54	-41.181	-24.932	-32.395	-33.447	-34.502	-21.472
55	57	126.403	78.304	153.322	102.525	123.611	62.525
57	55	-126.397	-78.297	-153.277	-102.465	-123.607	-62.507

Tabel 6 Kondisi Aliran Daya S sebelum Dipasang TCSC

Bus 1	Bus 2	P1 (MW)	P2 (MW)	Angle 1 (deg)	Angle 2 (deg)	Phase Diff (deg)	
43	44	514.125	321.032	512.200	513.459	447.025	279.222
44	43	-514.221	-319.803	-511.510	-512.202	-446.952	-277.522
44	45	453.414	238.586	453.632	282.077	410.071	354.543
45	44	-453.402	-238.455	-453.630	-282.045	-410.062	-354.527
45	46	311.415	132.944	332.152	153.170	369.723	164.694
45	45	-311.148	-132.544	-332.111	-152.758	-369.525	-164.295
45	56	152.020	34.434	191.479	123.780	145.341	90.145
55	45	-152.115	-34.500	-191.322	-123.605	-145.325	-90.190
45	47	279.325	173.725	245.429	152.850	242.226	150.468
47	46	-279.252	-173.502	-245.347	-152.659	-242.145	-150.274
47	46	39.417	24.447	27.338	17.240	25.525	15.801
48	47	-39.415	-24.442	-27.337	-17.237	-25.522	-15.799
47	45	239.245	145.033	215.515	134.420	216.636	154.472
49	47	-239.710	-145.782	-215.425	-134.159	-216.532	-154.255
49	50	214.298	132.045	190.267	127.670	192.267	112.295
50	49	-214.283	-132.072	-190.257	-127.612	-192.225	-112.244
50	51	158.412	174.522	155.139	96.775	152.367	95.249
51	50	-158.409	-174.484	-155.136	-96.759	-152.364	-95.215
51	52	36.244	22.487	43.324	26.628	41.416	25.237
52	51	-36.245	-22.487	-43.324	-26.625	-41.416	-25.235
51	53	132.167	51.997	112.332	59.912	112.946	69.975
53	51	-132.165	-51.985	-112.332	-59.901	-112.947	-69.968
53	59	55.949	34.585	58.576	12.456	51.496	21.004
54	53	-55.947	-34.582	-58.572	-12.483	-51.495	-21.007
54	55	40.185	24.932	32.378	33.455	34.477	21.368
55	54	-40.182	-24.932	-32.378	-33.452	-34.475	-21.368
55	57	125.908	78.316	163.316	102.528	123.552	62.513
57	55	-125.900	-78.293	-163.259	-102.475	-123.554	-62.504

Tabel 7 Kondisi Aliran Daya S sesudah Dipasang TCSC

Bus 1	Bus 2	P1 (MW)	P2 (MW)	Angle 1 (deg)	Angle 2 (deg)	Phase Diff (deg)	
43	44	514.125	321.032	512.200	513.459	447.025	279.222
44	43	-514.221	-319.803	-511.510	-512.202	-446.952	-277.522
44	45	453.414	238.586	453.632	282.077	410.071	354.543
45	44	-453.402	-238.455	-453.630	-282.045	-410.062	-354.527
45	46	311.415	132.944	332.152	153.170	369.723	164.694
45	45	-311.148	-132.544	-332.111	-152.758	-369.525	-164.295
45	56	152.020	34.434	191.479	123.780	145.341	90.145
55	45	-152.115	-34.500	-191.322	-123.605	-145.325	-90.190
45	47	279.325	173.725	245.429	152.850	242.226	150.468
47	46	-279.252	-173.502	-245.347	-152.659	-242.145	-150.274
47	46	39.417	24.447	27.338	17.240	25.525	15.801
48	47	-39.415	-24.442	-27.337	-17.237	-25.522	-15.799
47	45	239.245	145.033	215.515	134.420	216.636	154.472
49	47	-239.710	-145.782	-215.425	-134.159	-216.532	-154.255
49	50	214.298	132.045	190.267	127.670	192.267	112.295
50	49	-214.283	-132.072	-190.257	-127.612	-192.225	-112.244
50	51	158.412	174.522	155.139	96.775	152.367	95.249
51	50	-158.409	-174.484	-155.136	-96.759	-152.364	-95.215
51	52	36.244	22.487	43.324	26.628	41.416	25.237
52	51	-36.245	-22.487	-43.324	-26.625	-41.416	-25.235
51	53	132.167	51.997	112.332	59.912	112.946	69.975
53	51	-132.165	-51.985	-112.332	-59.901	-112.947	-69.968
53	59	55.949	34.585	58.576	12.456	51.496	21.004
54	53	-55.947	-34.582	-58.572	-12.483	-51.495	-21.007
54	55	40.185	24.932	32.378	33.455	34.477	21.368
55	54	-40.182	-24.932	-32.378	-33.452	-34.475	-21.368
55	57	125.908	78.316	163.316	102.528	123.552	62.513
57	55	-125.900	-78.293	-163.259	-102.475	-123.554	-62.504

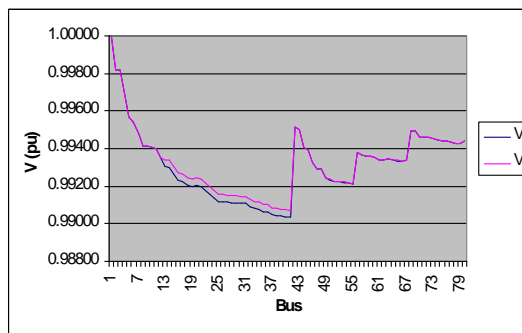
Tabel 8 Rugi-rugi Daya Saluran sebelum Dipasang TCSC

Tabel 9 Rugi-rugi Daya Saluran S sesudah Dipasang TCSC

PEMBAHASAN

Proses perhitungan diawali dengan melakukan studi aliran daya dengan *Three-Phase Current Injection Method (TCIM)*. Untuk memudahkan perhitungan dan analisa pada sistem tenaga dipakai harga satuan per-unit. Harga dasar yang dipilih pada studi ini adalah 20kV dan 100kVA sebagai harga tegangan dasar dan daya dasar. Mengingat bahwa pada jaringan tidak dilakukan pengukuran factor daya maka pada perhitungan ini diambil harga factor daya sebesar 0,85.

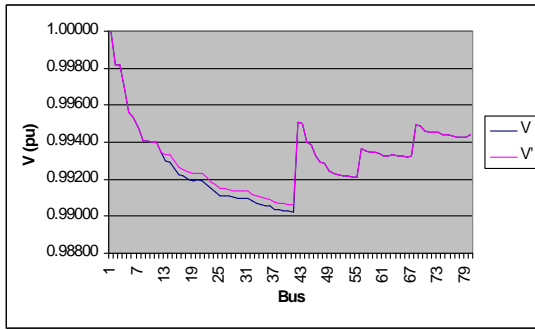
Dengan menggunakan bantuan program komputer untuk analisa aliran daya *Three-Phase Current Injection Method (TCIM)* didapatkan besarnya tegangan dan sudut fasa tiap-tiap *node*, beserta aliran daya dan rugi-rugi saluran sebelum dan sesudah dipasang TCSC diantara bus 12-13 seperti terlihat pada gambar di bawah ini.



V : Keadaan Tegangan Sebelum Terpasang TCSC
 V' : Keadaan Tegangan Sesudah Terpasang TCSC

Gambar 5. Keadaan Tegangan Sebelum dan Sesudah Terpasang TCSC pada Fasa R

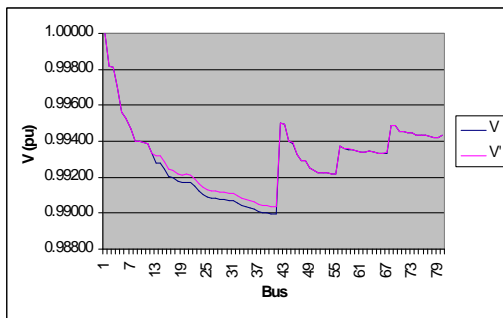
Dari Gambar 5, dapat kita lihat kondisi tegangan sebelum dan sesudah terpasang TCSC pada fasa R. Tegangan yang terendah terjadi pada bus 41 yaitu pada fasa R: 0.99035 pu, dan setelah dipasang TCSC tegangan pada tiap-tiap fasa mengalami kenaikan yaitu pada fasa R menjadi 0.99073 pu , .



V : Keadaan Tegangan Sebelum Terpasang TCSC
 V' : Keadaan Tegangan Sesudah Terpasang TCSC

Gambar 6. Keadaan Tegangan Sebelum dan Sesudah Terpasang TCSC pada Fasa S

Dari Gambar 6 dapat kita lihat kondisi tegangan sebelum dan sesudah terpasang TCSC pada fasa S. Tegangan yang terendah terjadi pada bus 41 yaitu pada fasa S: 0.99025 pu, dan setelah dipasang TCSC tegangan pada tiap-tiap fasa mengalami kenaikan yaitu pada fasa, S: 0.99064 pu.



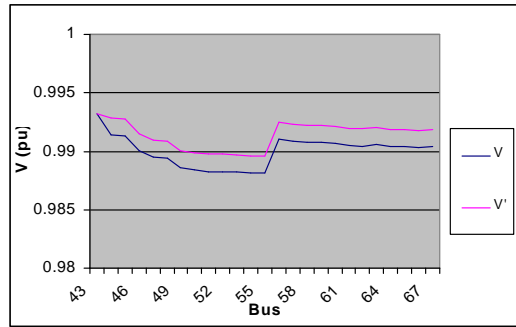
V : Keadaan Tegangan Sebelum Terpasang TCSC
 V' : Keadaan Tegangan Sesudah Terpasang TCSC

Gambar 7. Keadaan Tegangan Sebelum dan Sesudah Terpasang TCSC pada Fasa T

Dari Gambar 7 dapat kita lihat kondisi tegangan sebelum dan sesudah terpasang TCSC pada fasa T. Tegangan yang terendah terjadi pada bus 41 yaitu pada fasa T: 0.98995 pu, dan setelah dipasang TCSC tegangan pada tiap-tiap fasa mengalami kenaikan yaitu pada fasa T: 0.99035 pu. Kondisi aliran daya tiap-tiap fasa pada kondisi sebelum dan sesudah terpasang TCSC, dimana tanda (-) dan (+) menya-

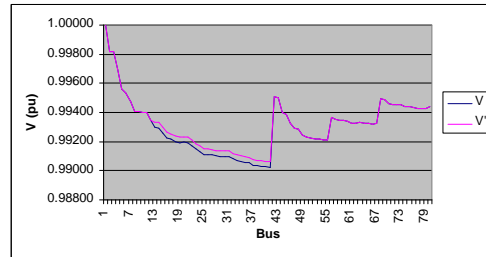
takan arah aliran daya yang mengalir dari satu bus ke bus lainnya, dimana daya aktif mengalami peningkatan dan daya reaktif mengalami penurunan pada tiap-tiap saluran setelah dipasang TCSC.

Berikut gambar keadaan tegangan sebelum dan sesudah terpasang TCSC diantara bus 43-44.



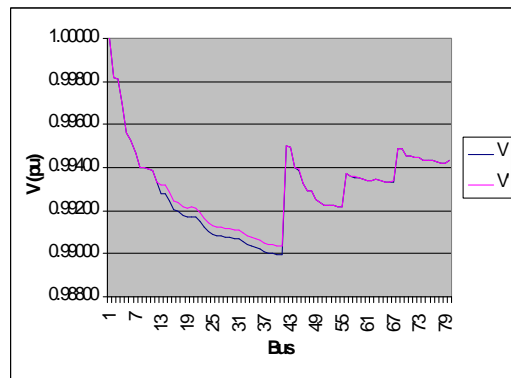
V : Keadaan tegangan sebelum terpasang TCSC
 V' : Keadaan tegangan sesudah terpasang TCSC

Gambar 8. Keadaan Tegangan Sebelum dan Sesudah Terpasang TCSC pada Fasa R



V : Keadaan Tegangan Sebelum Terpasang TCSC
 V' : Keadaan Tegangan Sesudah Terpasang TCSC

Gambar 9. Keadaan Tegangan Sebelum dan Sesudah Terpasang TCSC Pada Fasa S



V : Keadaan Tegangan Sebelum Terpasang TCSC
 V' : Keadaan Tegangan Sesudah Terpasang TCSC

Grafik 10. Keadaan Tegangan Sebelum dan Sesudah Terpasang TCSC Pada Fasa T

Dari gambar 8 dan 9 di atas dapat kita lihat kondisi tegangan sebelum dan sesudah terpasang TCSC pada fasa R, S dan T. Tegangan yang terendah terjadi pada bus 41 yaitu pada fasa R: 0.99035 pu, S: 0.99025 pu dan T: 0.98995 pu, dan setelah dipasang TCSC tegangan pada tiap-tiap fasa mengalami kenaikan yaitu pada fasa R menjadi 0.99073 pu, S: 0.99064 pu dan T: 0.99035 pu.

Kondisi aliran daya tiap-tiap fasa pada kondisi sebelum dan sesudah terpasang TCSC, dimana tanda (-) dan (+) menyatakan arah aliran daya yang mengalir dari satu bus ke bus lainnya, dimana daya aktif mengalami peningkatan dan daya reaktif mengalami penurunan pada tiap-tiap saluran setelah dipasang TCSC.

Total Rugi-rugi daya saluran setelah dan sebelum dipasang TCSC diantar bus 12-13 adalah sebagai berikut.

Rugi-rugi daya total yang terjadi pada tiap-tiap fasa kondisi sebelum dan sesudah dipasang TCSC pada bus 12-13, dimana :

Pada fasa R :

Sebelum terpasang TCSC
 $S = P + jQ = 4.67173 + j11.0413 = 11.9889 \text{ kVA}$.

Sesudah dipasang TCSC menjadi :
 $S = 4.57829 + j10.8188 = 11.7476 \text{ kVA}$
 mengalami penurunan sebesar 2.054 %

Pada fasa S:

Sebelum terpasang TCSC
 $S = P + jQ = 4.1391 + j11.3608 = 12.0913 \text{ kVA}$.

Sesudah dipasang TCSC menjadi :
 $S = 4.05846 + j11.1297 = 11.8465 \text{ kVA}$
 mengalami penurunan sebesar 2.066 %

Pada fasa T :

Sebelum terpasang TCSC
 $S = P + jQ; = 4.63877 + j12.4902 = 13.3237 \text{ kVA}$.

Sesudah dipasang TCSC menjadi :
 $S = 4.52368 + j12.1923 = 13.0044 \text{ kVA}$
 mengalami penurunan sebesar 2.455 %

KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan dapat disimpulkan bahwa : (1) Analisis pemasangan TCSC pada saluran distribusi primer tipe radial tidak seimbang sesuai dilakukan menggunakan *Three-Phase Current Injection Method* baik keadaan sebelum atau pun sesudah terpasang TCSC; (2) Dengan pemasangan TCSC pada sistem distribusi tipe radial tidak seimbang diantara bus 43-44 mampu direduksi rugi-rugi daya saluran pada fasa R sebesar 6.38 %, pada fasa S ; 7.63 %, dan pada fasa T; 4.47 %; (3) Pemasangan TCSC pada saluran distribusi dapat menaikkan profil tegangan pada bus yang berada setelah TCSC dipasang mencapai 0.98961 pu pada bus 55 dari 0.98814 pu pada kondisi awal, atau mengalami kenaikan sebesar 0.147 % dari kondisitegangan sebelum dipasang TCSC; (4) Proses perhitungan dengan program menggunakan komputer *Pentium (R), processor 2.80GHz, RAM 480 MB*, ter-catat dengan waktu perhitungan: Load flow awal sebelum dimasangan TCSC, Jumlah iterasi = 2 kali, Waktu hitung = 14.812 detik, Load flow setelah dipasang TCSC : Jumlah iterasi = 2 kali, Waktu hitung = 14.532 detik.

DAFTAR RUJUKAN

Basri, Hasan,1990. "*Sistem Distribusi*", Balai penerbit dan Humas ISTN, .
 C. S. Cheng and D. Shirmohammadi,1995. "A three-phase power flowmethod for real-time distribution system analysis," IEEE Trans. Power

- Systems, vol. 10, no. 2, pp. 671–679, May.
- Djiteng Maesudi, 1990., "Operasi Sistem Tenaga Listrik", Balai Penerbit dan Humas ISTN.
- G. Glanzmann, G. Andersson, "Coordinated control of FACTS Device based on Optimal Power Flow". Electric Power System Research.
- Jen-Hao TENG, "A Network-Topology-based Three-Phase Load Flow For Distribution Systems" Proc. Sci. Counc. ROC(A) Vol. 24, No. 4, 2000, pp. 259-264.
- K. A. STROUD, Sucipto, Erwin, 1997. "Matematika Untuk Teknik", Penerbit Erlangga edisi keempat.
- M. E. Baran and M.Y. Hsu, 1999. "Volt/var control at distribution substations," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 312–318, Feb
- Paulo Augusto N. Garcia, Jose Luiz R. Pereira and Sandoval Carneiro, "Voltage Control Devices Model for Distribution Power Flow Analysis." *IEEE Trans on power system*, vol. 16, No 4, November 2001.
- Paula A. N. Garcia, Jose luiz R. Pereira, Sandoval Carneiro, Jr., Vander M. da Costa, and Nelson Martin, 2000., "Three-Phase Power Flow Calculations Using Current Injection Method", *IEEE Transaction Power Systems*. Vol. 15, No. 2, May.
- P. A. N. Garcia, J. L. R. Pereira, S. Carneiro, Jr., V. M. da Costa, and N. Martins, 2000., "Three-phase power flow calculations using the current injection method," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 505–514, May.
- Stevenson, William D, Jr, 1990. "Analisis Sistem Tenaga", Penerbit Erlangga edisi keempat.
- S. Gerbex, R. Cherkaoui, J. Germond. 2001. "Optimal location of multi-type FACTS Devices in a power system by means of Genetic Algorithms" *IEEE Transaction On Power Systems*, Vol 16, no. 3.
- SPLN-64, 1985. "Petunjuk pemilihan dan Penggunaan Pelebur Pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah", Perusahaan Umum Listrik Negara.