



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Dalam penelitian yang akan dilakukan terdapat beberapa referensi terkait dengan analisa pengaruh penggunaan *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)* terhadap rugi-rugi daya dan meningkatkan jatuh tegangan dalam upaya meningkatkan kestabilan sistem pada jaringan transmisi 150 kV Riau. Dalam penelitian yang dibuat oleh peneliti terdahulu antara lain:

Penelitian terkait pertama berjudul “Optimasi Rating SVC dan TCSC Untuk Mengurangi Rugi-rugi Daya pada Sistem 150 kV Jamali Menggunakan metode *Particle Swarm Optimization (PSO)*”. Pada penelitian ini nilai parameter fungsi tujuan rating dari SVC sebesar -200 Mvar dan TCSC sebesar 0,2 pu. Penempatan SVC pada lokasi bus dan TCSC pada lokasi saluran dapat menurunkan rugi-rugi daya total sistem dari 136,545 MW menjadi 128,6324 MW dan rugi-rugi daya reaktif dari 1.223,011 MVAR menjadi 979,2013 MVAR.[12]

Penelitian terkait kedua berjudul “Studi Analisa Kestabilan Tegangan Sistem 150 kV Berdasarkan Perubahan Tegangan (aplikasi PT. PLN Batam)”. Pada penelitian ini menggunakan software EDSA untuk simulasi studi aliran daya berdasarkan beban puncak pada tanggal 1 Maret 2012 dengan beban puncak sebesar 238 MW dilihat dari analisa kurva P-V dan Q-V bahwa kondisi pada jaringan masih dalam kondisi handal dengan penambahan beban sebesar 25% dari beban puncak penurunan tegangan hanya terjadi sebesar 1,87%.

Penelitian terkait ketiga berjudul “Studi Pengaruh Penggunaan TCSC dan SVC Terhadap Biaya Operasi Tahunan di Sistem Jawa Bali 500 kV”. Dalam penelitian ini jenis FACTS yang digunakan adalah TCSC dan SVC dengan metode *Particle Swarm Optimization (PSO)*. Penelitian ini hanya membahas tentang penempatan TCSC-SVC, hasil dari penelitian ini adalah penempatan SVC pada lokasi bus dan TCSC pada lokasi saluran dapat menurunkan rugi-rugi daya total sistem dari 136,545 MW menjadi 128,6324 MW dan rugi daya reaktif dari 1.223,011 MVAR menjadi 979.2013 MVAR.[4]

Penelitian terkait keempat berjudul “evaluasi rugi daya saluran Transmisi 150 kV pada penyulang Kebonagung-Sengkaling” pada penelitian ini menggunakan metode Newton-Raphson dan software aplikasi EDSA. Hasil dari penelitian ini adalah rugi daya saluran transmisi antara Kebonang dan Sengkaling terjadi rugi-rugi daya yang cukup besar



disaat beban puncak, yaitu 42,781 kW pada siang hari dan 96, 973 kW pada malam hari dan penurunan tegangan berkisar antara 2,136% pada siang hari dan 2,864% pada malam hari.[5]

Penelitian terkait kelima berjudul “ optimasi penempatan multi FACTS Devices pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan menggunakan Algoritma Genetika” pada penelitian ini jenis FACTS yang digunakan adalah TCSC dan SVC dengan simulasi *software Matlab* versi 7.04. hasil dari penelitian ini adalah bahwa penggunaan TCSC untuk *single type devices* mampu meningkatkan *loadability* sistem sulawesi sebesar 109% dan SVC mampu meningkatkan sebesar 158% dengan demikian SVC lebih efektif dalam meningkatkan *loadability* bila dibandingkan dengan TCSC.[6]

Dari beberapa penelitian yang terkait diatas, maka penulis melakukan penelitian tentang menganalisis peningkatan kestabilan sistem saluran transmisi 150 kV Riau menggunakan TCSC. Penelitian ini dilakukan pada P3B Sumatera dengan menggunakan *software Matlab* untuk menganalisa aliran daya. Studi aliran dayanya menggunakan *Power System Analisis Toolbox (PSAT)* yang terdapat pada *software Matlab*. Metode perhitungan aliran dayanya menggunakan metode *Newton-Raphson*. Keunggulan metode ini adalah lebih praktis dalam sistem tenaga yang lebih besar dan iterasi yang dibutuhkan lebih sedikit. Yang menjadi pembeda penelitian ini dari penelitian sebelumnya adalah pemasangan TCSC dalam upaya peningkatan kestabilan dan melakukan perhitungan aliran daya dari bus ke bus. Menentukan rating TCSC yang akan dipasang pada jaringan transmisi 150 kV Riau. Data yang digunakan adalah data *real* beban yang terpasang pada jaringan transmisi 150 kV Riau dengan kondisi beban puncak.

2.2 Sistem Tenaga Listrik

sistem tenaga listrik adalah sekumpulan pusat listrik dan gardu induk yang mana saling dihubungkan antara satu dengan yang lainnya sehingga menjadi suatu kesatuan. Batasan untuk suatu sistem kelistrikan yang kompleks memiliki tiga unsur, yaitu sistem pembangkit, sistem penyaluran dan sistem instalasi beban/pengguna tenaga listrik. sistem tenaga listrik dimulai dari bagian pembangkit kemudian disalurkan ke gardu induk penaik tegangan. Sebelum disalurkan ke jaringan transmisi tegangan yang dibangkitkan oleh pembangkit yaitu sebesar 20 kV dinaikan menjadi 150 kV. Setelah dinaikan menjadi 150 kV selanjutnya disalurkan melalui jaringan transmisi ke Gardu Induk (GI) penurunan



tegangan hingga menjadi 20 kV kembali. Setelah itu barulah disalurkan ke konsumen melalui jaringan distribusi.

Pada sistem pembangkit tenaga listrik di Indonesia sebagian besar berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Pada umumnya PLTA dalam jumlah yang besar memerlukan air yang banyak sehingga bendunganpun harus besar. Sebab dari bendungan yang besar adalah dibangunlah PLTA yang jauh dari pusat perkotaan. Dengan jauhnya pusat pembangkit dari konsumen memerlukan sebuah jaringan penyaluran/pendistribusian yang sangat panjang. Klarifikasi sistem penyaluran tenaga listrik di Indonesia mulai dari saluran tegangan ekstra tinggi (200-500 kV), saluran tegangan tinggi (30-150 kV), saluran tegangan menengah (6-30 kV) dan saluran tegangan rendah (220/380 V).

2.2.1 Sistem Jaringan Listrik Sumatera

Sistem jaringan tenaga listrik Sumatera adalah sistem jaringan terbesar kedua di Indonesia setelah Sistem jaringan Jawa-Bali. Daerah jaringan listrik Sumatera merupakan Sistem interkoneksi mulai dari Subsistem Aceh sampai dengan Subsistem Lampung. Daerah pelayanan jaringan listrik sumatera dibagi dalam sembilan daerah yaitu: [7]

- a. Banda Aceh, yaitu meliputi Tragi Langsa dan Tragi Banda Aceh.
- b. Medan, yaitu meliputi Tragi Glugur, Tragi Paya Pasir, Tragi Sei Rotan dan Tragi Binjai.
- c. Pematang Siantar, yaitu meliputi Tragi Kisaran, Tragi Sidikalang, Tragi Sibolga, Tragi Toba.
- d. Pekanbaru, yaitu meliputi Tragi Teluk Lembu dan Tragi Duri.
- e. Padang, yaitu meliputi Tragi Padang, Tragi Pariaman, Tragi Bukittinggi, Tragi Payakumbuh dan Tragi Kiliran Jao.
- f. Jambi, yaitu meliputi Tragi Aur Duri Jambi dan Tragi Muaro Bungo.
- g. Bengkulu, yaitu meliputi Tragi Pekalongan dan Tragi Lahat.
- h. Palembang, yaitu meliputi Tragi Keramasan, Tragi Boom Baru, Tragi Prabumulih dan Tragi Borang.
- i. Tanjung Karang, yaitu meliputi Tragi kota Bumi, Tragi Tegineneng dan Tragi Tarahan.

Sistem jaringan transmisi Sumatera sampai saat ini dengan klasifikasi tegangan yang digunakan oleh PT. PLN (Persero) wilayah bagian Sumatera adalah sebagai berikut:



- a. Sistem tegangan 70 kV.
- b. Sistem tegangan 150 kV.

2.3 Aliran Daya Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan gabungan dari beberapa generator, transformator, elemen beban pasif dan aktif, dan semua perlengkapan-perlengkapan lainnya yang diinterkoneksi satu sama lain melalui suatu jaringan transmisi antara bus-bus yang jumlahnya relative sangat banyak. Studi aliran beban bertujuan untuk mengetahui besar aliran daya, baik daya aktif maupun daya reaktif. Studi aliran beban juga bertujuan untuk mengetahui besar tegangan sistem pada terminal atau bus tertentu dan besar frekuensi yang diizinkan pada batas-batas tertentu. Secara umum tujuan daripada studi aliran beban adalah sebagai berikut[9].

1. Untuk mengetahui besar tegangan dan sudut phasa pada setiap bus.
2. Untuk mengetahui batas kemampuan peralatan yang digunakan dalam sistem dan mengetahui keefektifan serta efisiensi pemilihan peralatan yang digunakan.
3. Untuk mengetahui kondisi awal bagi studi-studi selanjutnya seperti studi hubung singkat, studi rugi-rugi transmisi dan studi stabilitas.

Aliran daya tenaga listrik merupakan suatu penyaluran daya yang berpengaruh pada kinerja sistem tenaga dan sangat berpengaruh pada beban/konsumen. Kualitas aliran daya dipengaruhi oleh besarnya impedansi saluran dan banyaknya dalam penggunaan beban yang bersifat induktif. Dalam sistem aliran daya terdapat 3 macam bus pada jaringan transmisi yaitu[9].

- a. *Slack Bus* (Bus Berayun)

Slack Bus merupakan *bus* yang memiliki kapasitas pembangkitan daya besar. Besaran yang diketahui dari *bus* ini adalah tegangan (V) dan sudut tegangan (δ). Besaran yang dapat dihitung dari *bus* ini adalah daya aktif dan daya reaktif.

- b. Bus Generator (PV)

Pada bus ini yang diketahui adalah daya aktif (P) dan tegangan (V). Tegangan dari bus ini dapat dikontrol dengan kapasitas daya reaktif yang dibangkitkan. Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah daya reaktif (Q) dan sudut tegangan (δ).

- c. *Load Bus* (Bus Beban)

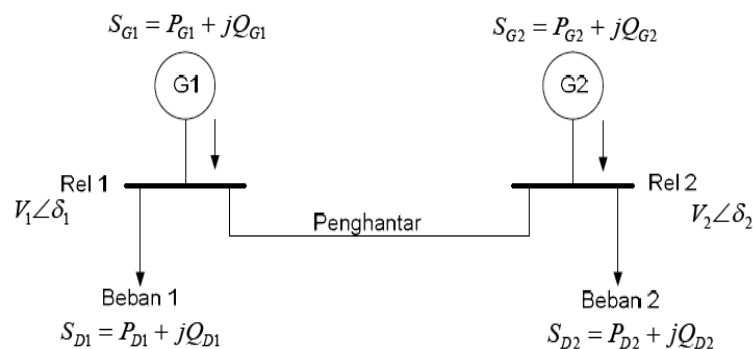
Pada bus ini yang dapat diketahui adalah daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah tegangan (V) dan sudut Tegangan (δ).

Didalam studi aliran daya, pada tiap-tiap bus terdapat 4 (empat) macam besaran yaitu :

1. Daya real atau daya aktif, simbolnya adalah (P) dengan satuan Watt.
2. Daya reaktif, simbolnya adalah (Q) dengan satuan Var.
3. Harga skalar tegangan, simbolnya adalah (V) dengan satuan Volt.
4. Sudut fasa tegangan dengan simbol (θ).

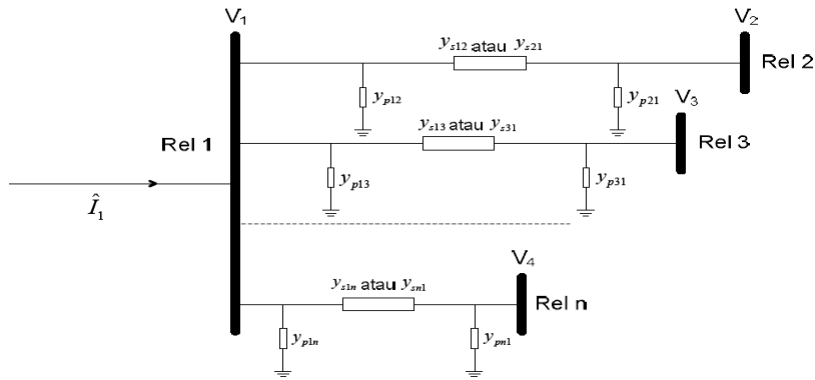
2.3.1 Perhitungan Aliran Daya Dengan Metode *Newton-raphson*

Persamaan aliran daya dapat dilakukan dengan 3 metode perhitungan yaitu metode *newthon-raphson*, *accelerated gauss-sceidel*, dan *fast decoupled*[8]. Masing-masing metode ini mempunyai kelebihan dan keunggulan tersendiri. Perhitungan aliran daya dengan menggunakan metode *accelerated gauss-sceidel* lebih cocok digunakan pada sistem tenaga yang kecil dengan jumlah iterasinya lebih banyak. Sedangkan *fast decoupled* juga lebih cocok pada sistem tenaga yang kecil. Sementara keunggulannya parameter yang digunakan lebih sedikit. Perhitungan aliran daya pada penelitian ini dihitung dengan menggunakan metode *newton-raphson* yang memiliki kelebihan yaitu lebih praktis dan efisien jika digunakan dalam sistem tenaga yang besar dan cepat dalam perhitungan tetapi membutuhkan banyak nilai masukkan dan parameter. Dalam metode *newton-raphson* persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Persamaan aliran daya dapat dilihat pada gambar 2.1. Pada setiap bus (rel) memiliki generator dan beban. Bus 1 dan bus 2 dihubungkan oleh penghantar.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Dengan 2 Bus Beban [8]

Studi aliran daya digambarkan dengan aliran beban, yang menjadi dasar untuk analisa sistem tenaga listrik. Dalam studi aliran daya bus-bus jaringan dikelompokkan menjadi, *slack bus*, bus generator dan bus beban.



Gambar 2.2 Model Bus Beban Pada Jaringan Transmisi [8]

Dalam algoritma perhitungan aliran daya dengan metode *newton-raphson*, langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut :

- a. Besaran-besaran yang diketahui :
 1. Daya nyata P dan daya reaktif Q pada simpul P Q diketahui.
 2. Daya nyata P dan besarnya tegangan |V| pada simpul P V diketahui.
 3. Besar tegangan |V| dan sudut fasa tegangan δ dari simpul referensi (*Slack Bus*) diketahui.
- b. Kemudian dicoba nilai tertentu bagi besaran sebagai berikut :
 1. Besarnya tegangan |V| beserta sudut fasanya δ pada semua simpul P Q
 2. Besarnya sudut fasa tegangan pada semua simpul P V
- c. Berdasarkan nilai yang dicoba tersebut pada poin B, dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan :

$$P_i(\text{daya nyata}) = |V_i| \sum_{j=i}^{j=n} |V_j| |V_{ij}| \cos (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

$$i = 1,2,3, \dots \dots \dots, n, \dots \dots \dots$$

(2.1)

atau persamaan berikut :

$$Q_i(\text{daya reaktif}) = -|V_i| \sum_{j=i}^{j=n} |V_j| |V_{ij}| \sin (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

$$i = 1,2,3, \dots \dots \dots, n, \dots \dots \dots$$

(2.2)

Untuk mendapatkan :

1. Nilai P dan Q yang dihitung untuk simpul-simpul P Q
2. Nilai P yang dihitung untuk simpul Q
- d. Nilai P dan Q yang diketahui pada A dikurangi dengan nilai P dan Q yang didapat dari perhitungan pada C disebut nilai residu dari P dan Q. Nilai residu ini harus mendekati nol, atau $< \varepsilon$ seperti yang disebutkan dalam ketidaksamaan pada persamaan :

$$\Delta x_i^r < \varepsilon \quad (2.3)$$

$$\text{untuk } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

ε adalah suatu angka yang ditentukan untuk mencapai suatu ketelitian perhitungan yang diinginkan. Apabila nilai residu P dan Q ini belum $< \varepsilon$, harus dilakukan iterasi dengan menggunakan persamaan :

$$x^{(r+1)} = x^r + \Delta x^r \quad (2.4)$$

Secara umum untuk iterasi $(r + 1)$ dicoba nilai x.

- e. Proses iterasi dilakukan dengan mengkoreksi nilai yang dicoba bagi $|V|$ dan δ seperti yang disebutkan dalam poin B.

Dengan mengingat persamaan :

$$f^o = -j^o \Delta x \quad (2.5)$$

yang dijabarkan dari persamaan :

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (2.6)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

maka uraian pada poin A sampai dengan D dapat dinyatakan sebagai berikut : f_i untuk daya nyata ditulis sebagai f_{iP} dan f_i untuk daya reaktif ditulis sebagai f_{iQ} , selanjutnya didapati :

$$f_{iP}(|V|, \delta) = P_i(\text{diketahui}) - P_i = 0 \quad (2.7)$$

$$f_{iQ}(|V|, \delta) = Q_i(\text{diketahui}) - Q_i = 0 \quad (2.8)$$

dimana : P_i didapat melalui persamaan (2.1) dan Q_i didapat melalui persamaan (2.2)

Untuk suatu nilai yang dicoba bagi $|V|$ dan δ , vektor nilai residu dari persamaan 8 disini adalah:

$$f_{iP} = P_i(\text{diketahui}) - P_i(\text{dihitung}) = \Delta P_i \quad (2.9)$$

$$f_{iQ} = Q_i(\text{diketahui}) - Q_i(\text{dihitung}) = \Delta Q_i \quad (2.10)$$

Sedangkan vektor koreksi pada persamaan (2.5) yaitu x disini adalah persamaan (2.5) yang bentuknya :



$$\Delta|V_i|, \delta_i$$

Nilai residu = -matriks Jacobian x nilai koreksi apabila dipakai dalam perhitungan aliran daya akan berbentuk :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \frac{\partial P_n}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \frac{\partial Q_n}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

2.4 Rugi-rugi Daya Saluran Transmisi

Saluran transmisi mempunyai empat parameter yang mempengaruhi kemampuannya untuk berfungsi sebagai bagian dari suatu sistem tenaga yaitu resistansi, induktansi, konduktansi dan kapasitansi. Pada saluran transmisi selain terjadi *drop* tegangan, juga terjadi rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya merupakan daya yang hilang pada saat disalurkan sehingga mengakibatkan daya yang diterima lebih kecil dari daya yang dikirim dari sisi pengirim.

Pada umumnya beban yang terdapat pada saluran sistem tenaga listrik bersifat resisif-induktif. Beban tersebut akan menyerap daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) yang dihasilkan oleh komponen induktif yang akan menyebabkan terjadinya jatuh tegangan pada tegangan yang disuplai oleh bus pengirim (generator). Akibatnya nilai tegangan disisi penerima akan berbeda dari nilai tegangan disisi pengirim. Sehingga dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_s^2 = (V_r + \Delta V_p)^2 + (\Delta V_q)^2 \tag{2.12}$$

Dengan:

- V_s = tegangan disisi pengirim
- V_r = tegangan disisi penerima
- ΔV_p = jatuh tegangan
- $\Delta V_p = IR \cos \theta + IX \sin \theta$
- $\Delta V_q = IX \cos \theta - IR \sin \theta$



Apabila dimisalkan bahwa saluran yang menghubungkan antara bus p dan q memiliki admitansi seri y_{pq} dan admitansi shunt total y'_{pq} , maka arus yang mengalir pada saluran tersebut akan diberikan oleh:

$$I_{pq} = (V_p - V_q)y_{pq} + V_p \frac{y'_{pq}}{2} \quad (2.13)$$

Sehingga aliran daya dari bus p ke q diberikan oleh:

$$P_{pq} + jQ_{pq} = V_p I_{pq} [(V_p - V_q)y_{pq} + V_p \frac{y'_{pq}}{2}] \quad (2.14)$$

Dengan cara yang sama, aliran daya dari bus q ke p diberikan oleh :

$$P_{qp} + jQ_{qp} = V_q I_{qp} [(V_q - V_p)y_{pq} + V_q \frac{y'_{pq}}{2}] \quad (2.15)$$

Rugi-rugi daya pada saluran transmisi antara bus p dan q diberikan oleh:

$$S_{loss,pq} + jQ_{loss,pq} = (P_{pq} + jQ_{pq}) + (P_{qp} + jQ_{qp}) \quad (2.16)$$

2.5 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk mencapai kondisi kesetimbangan kembali setelah mengalami gangguan pada sistem tenaga tersebut. Sistem tenaga merupakan sebuah sistem *nonlinier* yang kompleks dimana kondisinya selalu berubah, seperti beban, keluaran dari generator, dan parameter lainnya. Setelah gangguan transien, sistem tenaga dikatakan stabil apabila sistem mencapai suatu kesetimbangan baru dengan kondisi semua komponen masih terhubung. Kestabilan sistem tenaga listrik diklarifikasikan menjadi 3 bagian, yaitu [10]:

a. Stabilitas Sudut Rotor (*Rotor Angle Stability*)

Stabilitas sudut rotor adalah kemampuan dari generator yang interkoneksi untuk tetap selalu tersinkronisasi pada saat kondisi normal dan setelah terjadinya gangguan. Stabilitas sudut rotor tergantung pada kemampuan untuk menjaga kesetimbangan antar torka elektromagnetik dan torka mekanikal pada setiap generator. Ketidakstabilan sudut rotor menyebabkan hilangnya sinkronisasi antar generator sehingga menyebabkan sudut fasa output dari generator tidak seimbang.

b. Stabilitas Frekuensi (*Frekuensi Stability*)

Stabilitas frekuensi adalah kemampuan suatu sistem tenaga untuk menjaga frekuensi dalam batas nominal setelah terjadi gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan antara pembangkit dan beban. Salah satu gangguan yang terjadi



adalah gagalnya operasi salah satu generator pembangkit. Sehingga berpengaruh pada frekuensi pada generator pembangkit lain karena beban lebih.

c. Stabilitas Tegangan (*Voltage Stability*)

Stabilitas tegangan adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk menjaga tegangan dalam kondisi normal pada semua bus, pada sistem setelah terjadi gangguan. Sistem dapat mengalami ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, kenaikan beban atau perubahan kondisi sistem yang mengalami peningkatan beban dan tidak terkontrolnya kenaikan tegangan dan penurunan tegangan pada beberapa bus. Faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan tegangan adalah tidak mampunya sistem tenaga listrik dalam menjaga keseimbangan antara kebutuhan daya reaktif dan respon dari kontrol/kompensator tegangan.

Tegangan sistem dikatakan stabil apabila semua bus sistem pada saat operasi tidak mengalami penurunan dan kelebihan tegangan yang sesuai dengan standar PLN yaitu (+5% dan -10%). Sedangkan sistem dikatakan tidak stabil apabila terjadi penurunan tegangan dan kenaikan tegangan yang tidak sesuai dengan standar PLN. Salah satu cara dalam mengatasi ketidakstabilan tegangan adalah dengan cara mengkompensasikan daya reaktif/ injeksi daya reaktif pada saluran transmisi.

2.6 Prinsip Dasar Kompensasi Daya Reaktif

Aliran daya aktif dan daya reaktif pada jaringan transmisi tenaga listrik tidak berkaitan secara langsung satu dengan yang lain karena masing-masing dipengaruhi dan diatur oleh besaran yang berbeda. Walaupun pengaruh kompensasi seri akan meningkatkan keduanya. Pengaturan daya aktif amat erat hubungannya dengan pengaturan frekuensi, dan daya reaktif dapat diatur melalui pengaturan tegangan. Frekuensi dan tegangan adalah besaran yang penting dalam penentuan kualitas catu daya dalam sistem tenaga, sehingga pengaturan daya aktif dan daya reaktif menjadi penting untuk menunjukkan penampilan sistem tenaga listrik. Tegangan dan frekuensi pada setiap titik beban diharapkan konstan dan bebas dari harmonik serta besar faktor daya satu. Kemampuan sistem tenaga untuk mendekati kondisi ideal diatas merupakan ukuran kualitas suatu pengiriman daya[8].

Agar efisiensi dan kemampuan operasi sistem tenaga meningkat, pengaturan tegangan dan daya reaktif harus memenuhi sasaran sebagai berikut :

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

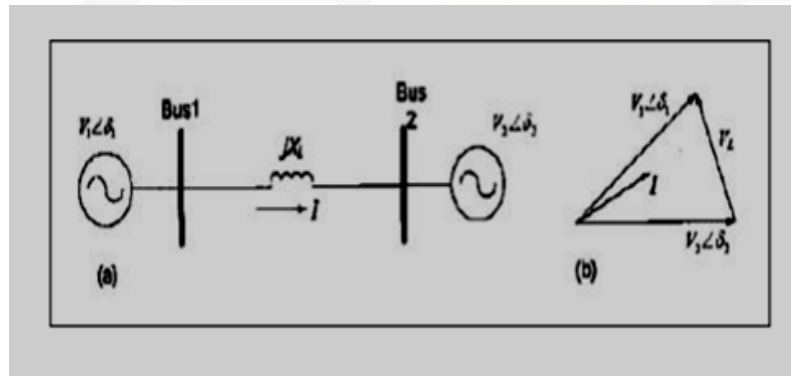
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Tegangan yang dipakai pada terminal-terminal peralatan dalam sistem tersebut harus dalam batas yang diizinkan. Jika menggunakan tegangan diluar batas kemampuan, akan mengakibatkan efek yang buruk bagi suatu peralatan.
2. Meningkatkan stabilitas sistem sampai mendekati nilai maksimalnya agar dicapai suatu keadaan yang mendekati ideal.
3. Mengurangi susut energi untuk memaksimalkan penyaluran energi pada Saluran Transmisi Tenaga Listrik (STTL). Karena daya reaktif tidak dapat ditransmisikan dalam jarak yang jauh, maka diperlukan peralatan tambahan untuk mengatasinya.

Kompensasi artinya proses penggantian kerugian atau cara untuk mengganti kerugian. Secara sederhana bias juga diartikan sebagai proses pengimbangan. Kompensasi pada STTL pada dasarnya adalah memasukkan atau menyisipkan dengan sengaja peralatan penghasil /penyerap daya reaktif pada sistem tenaga listrik. Kompensasi artinya proses penggantian kerugian atau cara untuk mengganti kerugian. Kompensasi pada STTL pada dasarnya adalah memasukkan atau menyisipkan dengan sengaja peralatan penghasil/penyerap daya reaktif pada sistem tenaga listrik.



Gambar 2.3 Model Sistem Transmisi Daya [8].

Gambar (2.3) diatas menunjukkan model sederhana dari sistem transmisi daya. Dua buah jaringan daya dihubungkan dengan sebuah saluran transmisi yang dimisalkan tidak mengandung rugi daya (*losses*) dan dinyatakan dengan reaktansi X_L . V_1/δ_1 dan V_2/δ_2 menyatakan phasor tegangan dari dua buah power grid bus, dengan sudut diantara keduanya $\delta = \delta_1 - \delta_2$. Sedangkan diagram phasor tegangan dan arus dinyatakan pada gambar (b).

Besaran arus pada saluran transmisi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$I = \frac{V_L}{X_L} = \frac{|V_1 \angle \delta_1 - V_2 \angle \delta_2|}{X_L} \tag{2.17}$$

Komponen aktif dan komponen reaktif dari aliran arus pada bus 1 adalah:

$$I_{d1} = \frac{V_2 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } I_{q1} = \frac{V_1 - V_2 \sin \delta}{X_L} \quad (2.18)$$

Daya aktif dan daya reaktif pada bus 1 adalah:

$$P_1 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } Q_1 = \frac{V_1 (V_2 - V_1 \cos \delta)}{X_L} \quad (2.19)$$

Selanjutnya, hal yang sama komponen aktif dan reaktif dari arus pada bus 2 adalah:

$$I_{d2} = \frac{V_1 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } I_{q2} = \frac{V_2 - V_1 \sin \delta}{X_L} \quad (2.20)$$

Daya aktif dan reaktif pada bus 2, adalah:

$$P_2 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } Q_2 = \frac{V_2 (V_2 - V_1 \cos \delta)}{X_L} \quad (2.21)$$

Dengan:

- V_L = tegangan line transmisi
- V_1 dan V_2 = tegangan pada bus 1 dan bus 2
- δ_1 dan δ_2 = phasor tegangan bus 1 dan bus 2
- δ = perbedaan phasor bus 1 dan bus 2
- I = arus line transmisi
- I_{d1} dan I_{d2} = arus komponen aktif pada bus 1 dan 2
- I_{q1} dan I_{q2} = arus komponen reaktif pada bus 1 dan 2
- P_1 dan P_2 = daya aktif pada bus 1 dan 2
- Q_1 dan Q_2 = daya reaktif pada bus 1 dan 2

Dari persamaan (2.13) sampai dengan (2.17) terlihat bahwa untuk mengontrol daya arus aktif dan reaktif dapat dilakukan dengan mengatur tegangan, sudut fasa dan impedansi dari saluran transmisi.

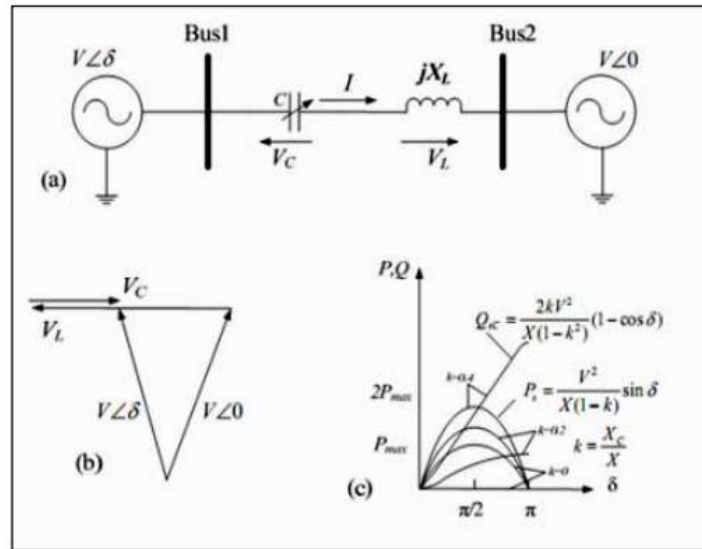
Kompensasi seri dimaksudkan untuk mengontrol langsung semua impedansi seri dari saluran transmisi. Berdasarkan rumus (2.1) sampai dengan rumus (2.5), transmisi daya AC ditentukan oleh impedansi reaktif seri dari saluran transmisi. Suatu sambungan impedansi seri akan menyebabkan drop tegangan yang berlawanan dengan tegangan saluran transmisi, sehingga akan mengurangi impedansi seri saluran.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.4 Sistem Transmisi dengan Kompensasi Seri. (a) Model Sederhana, (b) Diagram Fasa, (c) Kurva Sudut Daya [8]

Gambar diatas menjelaskan gambar sistem transmisi dengan kompensasi seri. Model sederhana dari saluran transmisi dengan kompensasi seri digambarkan pada gambar 2.3a. Besaran tegangan dari kedua bus adalah V dan sudut fasa δ . Saluran transmisi yang dianggap lossless dinyatakan dengan reaktansi X_L . Kapasitor yang terkontrol dipasang secara seri dengan saluran transmisi dengan tegangan V_C . Sedangkan diagram fasanya tercantum pada gambar 2.3b. Dengan mendefinisikan impedansi C merupakan bagian dari reaktansi saluran dengan faktor kelipatan k , maka:

$$X_C = kX_L \quad (2.22)$$

Sehingga keseluruhan impedansi seri pada saluran, adalah :

$$X = X_L - X_C = (1 - k)X_L \quad (2.23)$$

Daya aktif yang ditransmisikan adalah :

$$P = \frac{V^2}{(1-k)X_L} \sin \delta \quad (2.24)$$

Daya reaktif yang diberikan oleh kapasitor dapat dihitung sebagai berikut :

$$Q_C = 2 \frac{V^2}{X_L} \frac{k}{(1-k)^2} \quad (2.25)$$

Gambar 2.3c menunjukkan kurva sudut fasa, dari kurva tersebut dapat dilihat bahwa daya aktif yang ditransmisikan akan bertambah dengan bertambahnya faktor k , dimana k adalah derajat kompensasi seri.

2.7 Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

Permasalahan dalam penyaluran sistem tenaga listrik, yaitu panjang dan jauhnya aliran daya yang akan disalurkan ke konsumen yang menyebabkan tranfer daya yang diinginkan mengalami susut energi (rugi daya), sehingga tidak optimalnya daya yang sampai ke konsumen. Seiring dengan perkembangan teknologi yang signifikan yang menggunakan kompoen elektronika daya, sekarang muncul berbagai jenis *Flexible AC Transmission System* (FACTS) untuk meningkatkan kualitas dalam penyaluran daya sehingga transfer dayanya optimal. Konsep FACTS diperkenalkan pertama kali oleh N.G. Hingorani pada 19 April 1998[8]. Peralatan FACTS ini sangat berperan penting dalam memaksimalkan pemanfaatan energi listrik yang sudah ada, karena FACTS berbasis pada konverter sumber tegangan. FACTS sangat erat perkembangannya dengan aplikasi *Tyristor* untuk elektronika daya. Dengan pemanfaatan peralatan kendali elektronika daya tersebut, maka FACTS lebih diminati karena menyediakan banyak kelebihan dibandingkan dengan *capasitor bank* yang hanya mampu menginjeksikan daya reaktif saja sedangkan peralatan FACTS sendiri mampu menyerap daya reaktif dan menginjeksikan daya reaktif secara *flexible*. TCSC adalah salah satu jenis FACTS yang mampu meningkatkan kestabilan tegangan dan memperkecil reaktansi saluran. Untuk lebih jelasnya dapat lihat tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Jenis FACTS Beserta Fungsinya.[8]

Subjek	Masalah	Tindakan	FACTS
Batas Tegangan	Tegangan tinggi pada beban tinggi	Menyediakan daya reaktif	SVC, STATCOM
		Memperkecil reaktansi saluran	TCSC
	Tegangan tinggi pada beban rendah	Menyerap daya reaktif	SVC, STATCOM
	Tegangan tinggi akibat gangguan	Menyerap daya reaktif, Mencegah beban lebih	SVC, STATCOM
	Tegangan rendah akibat gangguan	Menyediakan daya reaktif, Mencegah beban lebih	SVC, STATCOM
Batas Thermal	Saluran transmisi	Meningkatkan kapasitas	TCSC, SSSC,

Aliran Daya	berbeban lebih	saluran	UPFC
	Distribusi daya pada saluran paralel	Mengatur reaktansi saluran	TCSC, SSSC, UPFC
		Mengatur sudut daya	UPFC, SSSC, PAR
Pembalikkan aliran daya	Mengatur sudut daya	UPFC, SSSC, PAR	
Daya Hubung Singkat	Arus hubung singkat tinggi	Pembatasan arus hubung singkat	TCSC, UPFC
Stabilitas	Daya transmisi terbatas	Mengurangi reaktansi	TCSC, SSSC

TCSC adalah salah satu jenis peralatan FACTS yang merupakan kombinasi antara komponen *Thyristor Controlled Reactor* (TCR) dengan kapasitor [6]. TCR terdiri dari induktor yang terhubung seri dengan *thyristor*. TCSC mampu mengatur reaktansi saluran transmisi dengan melakukan pengaturan sudut penyalaan *thyristor*. Gambar berikut merupakan rangkaian sederhana dari TCSC.

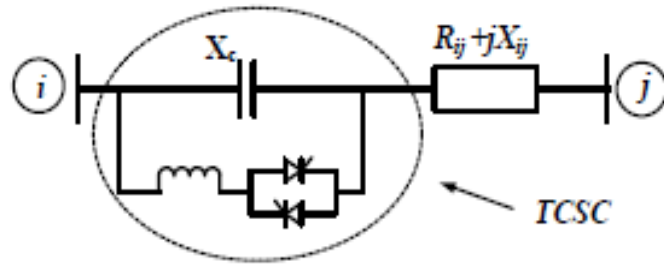
Prinsip dasar dari TCSC adalah kapasitor yang dihubungkan paralel dengan induktor yang dikendalikan oleh *Thyristor* sebagai pengendalinya. Induktor yang dikontrol oleh *thyristor* ini bekerja dengan mensirkulasi arus menuju kapasitor, sehingga tegangannya naik. Thyristor di-trigger satu kali setiap siklus dan memiliki waktu yang lebih pendek dari waktu setengah siklus tegangan line. Dengan mengatur tegangan tambahan yang diberikan proporsional dengan arus line. TCSC memiliki reaktansi yang lebih besar daripada reaktansi fisis kapasitor bank tanpa thyristor.

Fungsi utama dari TCSC adalah untuk mengatur besar beban reaktif pada sistem tenaga listrik, sehingga beban real yang dibutuhkan dapat terpenuhi, penggunaan thyristor membuat TCSC dapat berfungsi untuk:

1. Mengeliminasi resiko resonansi Subsinkron.
2. Meredam osilasi daya aktif.
3. Meningkatkan kestabilan sistem.
4. Mengatur aliran daya secara dinamis.

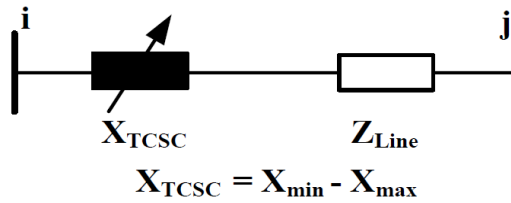
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.4 Rangkaian Sederhana TCSC [9]

Pemodelan TCSC dengan persamaannya yang dapat mengubah nilai reaktansi saluran transmisi dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.5 Model TCSC pada Saluran Transmisi [9]

Hubungan rating TCSC dengan reaktansi pada saluran transmisi dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$X_{total} = X_{saluran} + X_{TCSC} \quad (2.26)$$

$$X_{TCSC} = r_{TCSC} \times X_{saluran} \quad (2.27)$$

Dengan:

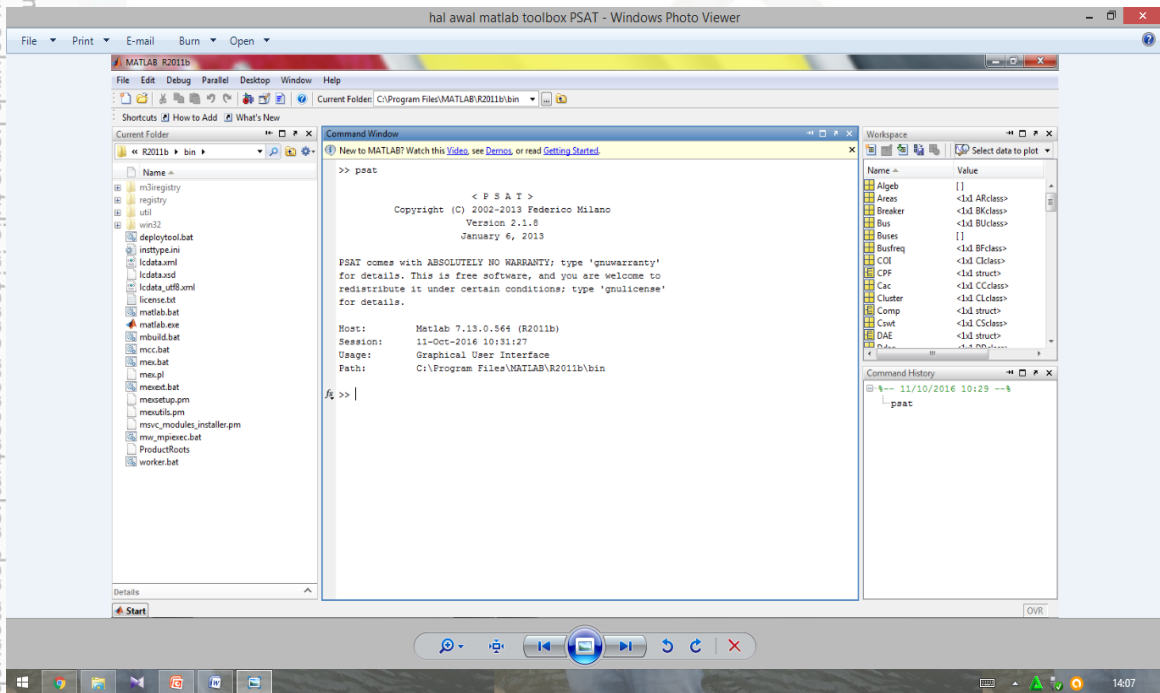
$X_{saluran}$ = reaktansi saluran transmisi

r_{TCSC} = rating TCSC

2.8 Power System Analisis Toolbox (PSAT)

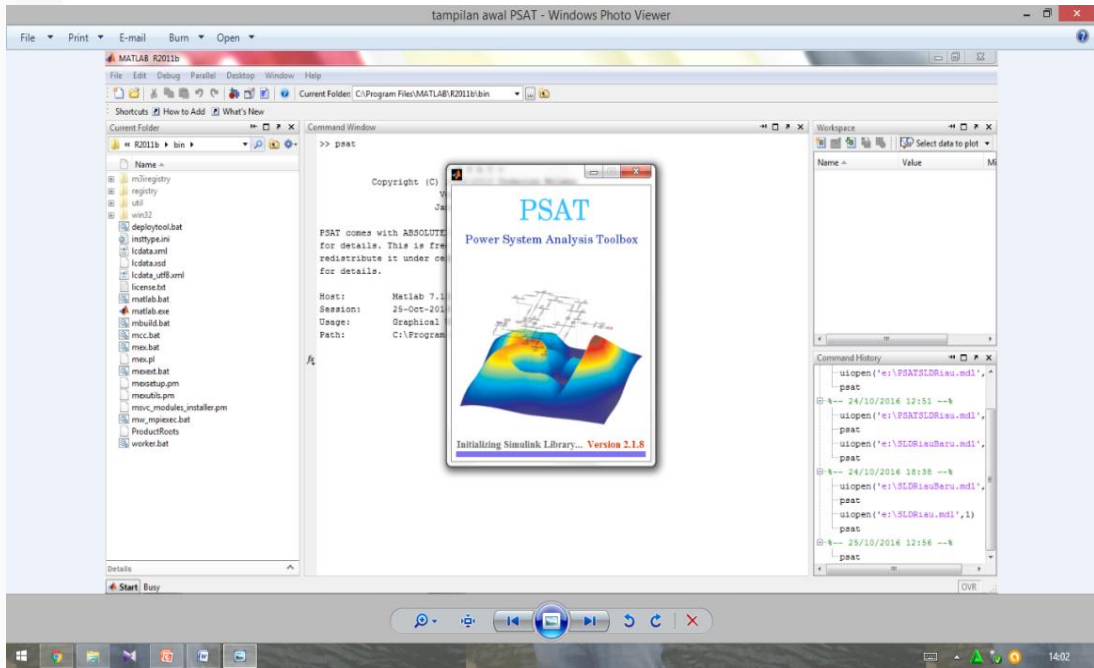
Power system analisis toolbox (PSAT) adalah sebuah *toolbox* untuk analisis dan kontrol sistem daya listrik. PSAT merupakan sebuah perangkat lunak yang dikembangkan oleh Federico Milano dengan memanfaatkan perangkat lunak Matlab. PSAT terdiri dari *power flow*, *continuation power flow* (CPF), *optimal power flow* (OPF), analisis *small signal stability* dan *time domain simulation*[14]. Semua aplikasi dapat diakses dengan menggunakan *graphical user interface* (GUI) dan simulink memudahkan pengguna dalam mendesain jaringan untuk analisis sistem tenaga. Dalam menjalankan PSAT digunakanlah Matlab dasar dan *simulink*, kecuali untuk menyusun *defined models* yang membutuhkan

simbol *toolbox*. Untuk menginstal PSAT kedalam Matlab, maka terlebih dahulu harus mendownload PSAT dan buat dalam folder Setelah itu menjalankan Matlab, kemudian menu file dan mengklik set path. Klik add folder kemudian cari folder PSAT dan klik OK setelah itu klik *save* dan *close*. Setelah setting folder PSAT kedalam path Matlab. Program dapat dijalankan dengan mengetik prompt Matlab (`>> psat`) setelah itu akan tampil seluruh struktur dan variabel secara global yang digunakan oleh *toolbox*. untuk lebih jelasnya dapat lihat gambar-gambar berikut ini[14].

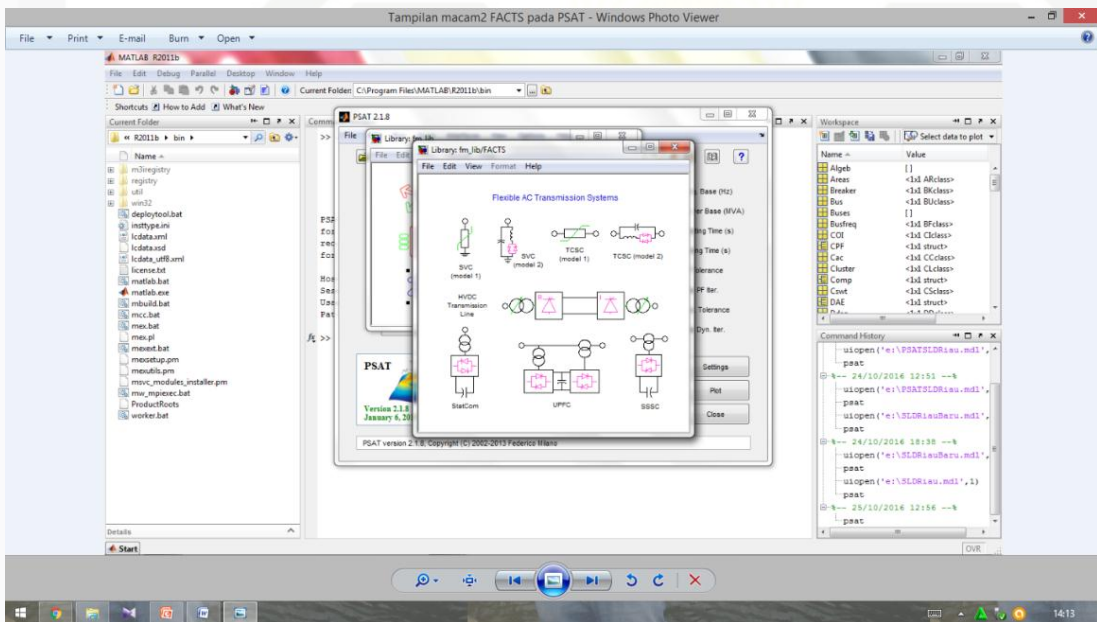


Gambar 2.6 Tampilan Menu Awal PSAT pada Matlab [14]

- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang
1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Diarangi mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.7 Tampilan Awal PSAT pada Matlab [14]



Gambar 2.8 Tampilan Jenis FACTS pada PSAT [14]

Pada gambar 2.6 merupakan langkah awal dalam pembukaan PSAT pada software Matlab. Setelah keluar tampilan ini langkah selanjutnya adalah akan tampil gambar yang terlihat pada gambar 2.7. Pada gambar 2.8 merupakan tampilan jenis FACTS yang ada pada PSAT. Untuk penelitian ini penulis menggunakan FACTS jenis TCSC.