

SIMULASI STABILITAS TRANSIEN SISTEM TENAGA LISTRIK SULSELBAR MENGGUNAKAN PWS Transient Stability simulation of Sulselbar Electrical power sistem using PWS

Haripuddin

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sistem tenaga listrik Sulselbar dalam keadaan stabil atau tidak stabil jika terjadi gangguan ditinjau dari besarnya nilai sudut maksimum rotor generator, waktu, dan sudut pemutusan kritis. Studi kestabilan yang dilakukan ketika terjadi gangguan tiga fasa simetris di masing – masing bus beban pada sistem tenaga listrik Sulselbar dengan 9 (sembilan) pembangkit, di mana lama studi yang dilakukan adalah 2 detik dan gangguan dihilangkan setelah 0.2 detik. Hasilnya berupa perilaku pembangkit-pembangkit dalam sistem tenaga setelah terjadi gangguan ditampilkan dalam bentuk respon sudut rotor generator.

Kata Kunci: Sistem tenaga, Respon sudut rotor generator

ABSTRACT

This study aims to determine Sulselbar power systems are stable or unstable in the event of a disruption in terms of the value of the maximum angle rotor generator, time, and the critical point of termination. Stability studies are conducted when there is interference in each three-phase symmetrical bus load of the power system Sulselbar with 9 (nine) plants, in which the old studies conducted is 2 seconds and the disturbance is removed after 0.2 seconds. The result of the behavior of power plants in the power system after disruption is displayed in the form of the generator rotor angle response.

Keywords: Power system, Generator rotor angle response

Pendahuluan

Pertumbuhan kebutuhan energi listrik selalu mengikuti kebutuhan masyarakat. Demikian juga sistem pengoperasian dan kontinuitas pelayanan terus berkembang. Melihat begitu besarnya permintaan tenaga listrik oleh konsumen maka pihak PT. PLN (Persero) sebagai perusahaan yang diberikan kewenangan untuk mengelola energi listrik harus memberikan pelayanan yang baik, karena pada sistem pengoperasian tenaga listrik terdapat kondisi operasi normal dan abnormal. Karena itu dalam hal pemenuhan kebutuhan listrik, PT. PLN (Persero) harus dapat menjamin keamanan, kenyamanan dan keandalan pengoperasiannya.

Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem tenaga yang dapat melayani beban secara kontinyu tegangan dan frekuensi yang konstan. Fluktuasi tegangan dan frekuensi yang terjadi harus berada pada batas toleransi yang diizinkan agar peralatan listrik konsumen dapat bekerja dengan baik dan aman. Kondisi sistem yang benar-benar mantap sebenarnya tidak pernah ada. Perubahan beban selalu terjadi dalam sistem. Penyesuaian oleh pembangkit akan dilakukan

melalui governor dari penggerak mula dan eksitasi generator.

Perubahan kondisi sistem yang seketika, biasanya terjadi akibat adanya gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik, dan pelepasan atau penambahan beban yang secara tiba-tiba. Akibat adanya perubahan kondisi kerja dari sistem maka keadaan sistem akan berubah dari keadaan lama ke keadaan baru. Periode singkat di antara kedua keadaan tersebut disebut periode peralihan atau *transient*. Oleh karena itu, diperlukan suatu analisis sistem tenaga listrik untuk menentukan apakah sistem tersebut stabil atau tidak jika terjadi gangguan. Stabilitas *transient* didasarkan pada kondisi kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dengan periode waktu penyelidikan pada detik pertama terjadi gangguan.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan kestabilan suatu sistem tenaga listrik apabila mengalami gangguan adalah metode kriteria luas sama. Walaupun metode ini tidak dapat dipergunakan untuk sistem multimesin namun sangatlah membantu untuk memahami faktor-faktor dasar yang mempengaruhi stabilitas *transient* sistem tenaga listrik.

Stabilitas Dalam Sistem Tenaga Listrik.

Keadaan operasi yang stabil dari sistem tenaga listrik memberikan keseimbangan antara daya *input* mekanis pada *prime mover* dengan daya *output* listrik (beban listrik) pada sistem. Dalam keadaan seperti ini semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Hal ini terjadi bila setiap kenaikan dan penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya *input* mekanis pada *prime mover* dari generator-generator.

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah suatu kemampuan sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem. Batas stabilitas sistem adalah daya-daya maksimum yang mengalir melalui suatu titik dalam sistem tanpa menyebabkan hilangnya stabilitas. Berdasarkan sifat gangguan masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas:

1. Stabilitas tetap (*steady state*).
2. Stabilitas peralihan (*transient*).
3. Stabilitas sub peralihan (dinamis).

Stabilitas *steady state* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil (fluktuasi beban).

Bila daya *input* mekanis tidak cepat mengikuti dengan perubahan beban dan rugi-rugi sistem maka kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal terutama jika terjadi gangguan, maka sesaat terjadi perbedaan yang besar antara daya *input* mekanis dan daya *output* listrik dari generator. Kelebihan daya mekanis terhadap daya listrik mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya, bila gangguan tersebut tidak dihilangkan segera maka percepatan (*acceleration*) dan perlambatan (*deceleration*) putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem.

Stabilitas *transient* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan (*swing*) pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis belum bekerja.

Pengertian hilangnya sinkronisasi adalah ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan beban menimbulkan suatu keadaan *transient* yang menyebabkan rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi yang mengakibatkan percepatan

atau perlambatan pada rotor tersebut. Ini terjadi bila torsi tersebut cukup besar, maka salah satu atau lebih dari mesin sinkron tersebut akan kehilangan sinkronisasinya, misalnya terjadi ketidakseimbangan yang disebabkan adanya daya pembangkit yang berlebihan, maka sebagian besar dari energi yang berlebihan akan diubah menjadi energi kinetik yang mengakibatkan percepatan sudut rotor bertambah besar, walaupun kecepatan rotor bertambah besar, tidak berarti bahwa sinkronisasi dari mesin tersebut akan hilang, faktor yang menentukan adalah perbedaan sudut rotor atau daya tersebut diukur terhadap referensi putaran sinkronisasi.

Dinamika Rotor Dan Persamaan Ayunan.

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Dalam sistem unit-unit MKS (*Meter Kilogram Second*) dan untuk generator serempak, persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \dots \dots \dots (1)$$

Di mana :

- J = Momen kelembaman total darimassa rotor dalam $kg \cdot m^2$
- θ_m = Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam (*stationary*), dalam radian mekanis
- t = Waktu, dalam detik
- T_a = Momen putar percepatan bersih, dalam Nm
- T_m = Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran, dalam Nm
- T_e = Momen putar elektrik atau elektromagnetis bersih, dalam Nm

Sudut θ_m diukur terhadap sumbu pedoman yang diam pada stator maka θ_m adalah ukuran absolut sudut rotor. Karena itu pula θ_m akan terus bertambah dengan waktu bahkan pada kecepatan serempak yang konstan. Karena kita menaruh perhatian pada kecepatan rotor relatif terhadap kecepatan serempak adalah lebih mudah untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan serempak. Dengan demikian,

$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m$ (2)
 dengan ω_{sm} = Kecepatan serempak mesin dalam radius mekanis per detik

δ_m = Pergeseran sudut rotor dalam radius mekanis dari sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan serempak.

Penurunan persamaan (2) terhadap waktu adalah

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \dots\dots\dots(3)$$

dan

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \dots\dots\dots(4)$$

dengan :

$\frac{d\theta_m}{dt}$ = Kecepatan sudut rotor dalam radian mekanis per detik

$\frac{d\delta_m}{dt}$ = Penyimpangan kecepatan rotor dari keadaan rotor keadaan serempak dan unit ukurannya adalah radian mekanis per detik.

Persamaan (4) memberikan kecepatan rotor yang diukur dalam radian mekanis per detik pangkat dua. Dengan mensubstitusikan persamaan (3) dan (4) diperoleh,

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e Nm \dots\dots\dots(5)$$

Notasinya dapat dengan mudah dituliskan dalam bentuk,

$$\omega_{sm} = \frac{d\theta_m}{dt} \dots\dots\dots(6)$$

Daya adalah perkalian antara momen putar dengan kecepatan sudut maka

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e Nm \dots\dots\dots(7)$$

di mana :

P_m = Masukan daya poros ke mesindikurangi dengan rugi-rugi perputaran dalam Watt.

P_e = Daya listrik pada celah udaranya dalam Watt.

P_a = Daya percepatan yang memperjelasketidakseimbangan antara kedua daya dalam Watt.

$J \omega_m$ = Momentum sudut rotor pada kecepatan serempak.

Biasanya rugi-rugi perputaran dan rugi-rugi $|I^2| \cdot R$ jangkar dapat diabaikan sehingga P_m dapat dianggap sebagai daya

yang dicatu oleh penggerak mula P_e sebagai keseluruhan daya listrik.

Koefisien $J \omega_m$ adalah momentum sudut (*angular momentum*) rotor pada kecepatan serempak ω_{sm} . Momen ini dapat dinyatakan dengan M dan disebut konstanta kelembaman (*inertia constant*) dari mesin tersebut. Jelas bahwa unit-unit yang menyatakan M harus sesuai dengan unit untuk J dan ω_m . Dengan meneliti unit pada masing-masing suku persamaan (7) maka diperoleh M yang dinyatakan dalam *joule-detik per-radian* dan dapat dituliskan dengan

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e W \dots\dots\dots(8)$$

Meskipun menggunakan M dalam persamaan ini, koefisien tersebut bukanlah suatu konstanta dalam arti yang sebenarnya karena ω_m tidak sama dengan kecepatan serempak pada semua keadaan kerja, tetapi dalam praktik ω_m tidak berlaku berbeda dari kecepatan serempak bila mesin stabil dan karena daya lebih memudahkan perhitungan dari momen putar, persamaan (8) lebih banyak dipilih. Dalam data mesin yang diberikan untuk keperluan studi kestabilan, suatu konstanta yang hubungannya dengan kelembaman, konstanta dinamakan H yang didefinisikan sebagai :

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam mega joule pada kecepatan serempak}}{\text{Rating dalam MVA}}$$

dan

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}} = MJ / MVA \dots\dots(9)$$

di mana :

S_{mac} = Batas kemampuan kerja (*rating*) tiga fasa dalam MVA.

H = Konstanta yang berhubungan dengan kelembaman.

Penyelesaian untuk M pada persamaan (9) diperoleh,

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} MJ/radian mekanis \dots\dots(10)$$

Memasukkan persamaan (10) ke dalam persamaan (8) diperoleh,

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \dots\dots(11)$$

Sudut δ_m pada pembilang persamaan (11) dinyatakan dalam radian mekanis sedangkan ω_m pada penyebut dinyatakan dalam radian mekanis per detik. Oleh karena itu dapat ditulis,

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ per unit } \dots (12)$$

di mana:

ω_s = Kecepatan serempak dalam satuan listrik untuk suatu sistem dengan frekuensi sebesar Hz

Asal saja baik δ maupun ω_s mempunyai satuan konsisten yang mungkin dalam derajat mekanis, listrik, atau radian. H dan t mempunyai satuan konsisten karena megajoule per megavoltampere adalah dalam satuan detik dan P_a, P_m , dan P_e harus dalam satuan dengan dasar yang sama seperti H . Bila subskrip M dihubungkan pada ω , ω_s , dan δ , itu berarti bahwa yang digunakan adalah satuan mekanis, jika tidak demikian yang dimaksud adalah daya listrik. Persamaan (12) menjadi

$$\frac{H}{\pi \cdot f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ per unit } \dots (13)$$

bila δ dinyatakan dalam radian listrik, sedangkan

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ per unit } \dots (14)$$

berlaku bila δ dinyatakan dalam radian listrik.

Persamaan (14) disebut persamaan ayunan mesin merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) putar mesin serempak. Dalam studi kestabilan persamaan tersebut adalah persamaan differensial orde kedua yang dapat dituliskan sebagai dua buah persamaan differensial orde-pertama.

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \text{ per unit } \dots (15)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \dots (16)$$

di mana ω , ω_s dan δ adalah menyangkut radian listrik dan derajat listrik.

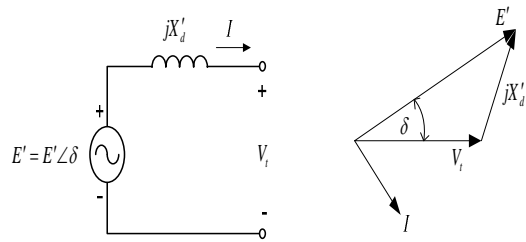
Pemodelan Mesin Sinkron untuk Studi Kestabilan

Gambar 2 memperlihatkan sebuah model sederhana dari mesin sinkron, disebut dengan model klasik. Untuk studi-studi kestabilan transien setiap mesin sinkron direpresentasikan oleh tegangan-dalam transiennya E' dan terhubung seri dengan reaktansi transien poros langsung X'_d . Dari gambar V_t adalah tegangan terminal generator dan arus generator adalah :

$$I = \frac{E'e^{j\delta} - V_t}{jX'_d} \dots (17)$$

Besarnya tegangan-dalam mesin :

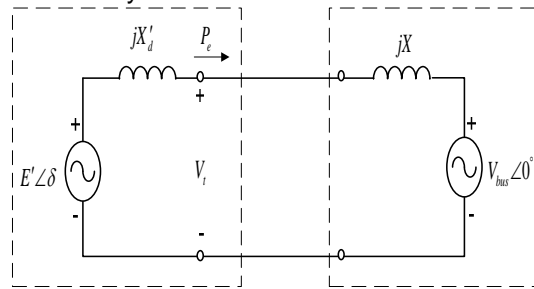
$$E' = V_g + jX'_d I_a \dots (18)$$



(a) Diagram rangkaian (b) Diagram fasor

Gambar 2 Pemodelan mesin sinkron untuk studi kestabilan transient

Setiap generator dalam pemodelan dihubungkan ke suatu sistem yang terdiri dari saluran transmisi, transformator, beban-beban dan mesin-mesin lainnya yang direpresentasikan melalui sebuah infinite bus dan terhubung seri dengan reaktansi sistem jX . Sebuah infinite bus merupakan sumber tegangan ideal dimana besar tegangan dan frekuensinya konstan.



Synchronous generator System equivalent

Gambar 3. Generator sinkron dihubungkan ke persamaan sistem

Gambar 3 memperlihatkan sebuah generator sinkron yang dihubungkan ke suatu persamaan sistem. Besarnya tegangan V_{bus} dan fasanya 0° pada infinite bus konstan. Sudut fasa δ dari tegangan-dalam mesin adalah sudut daya mesin terhadap infinite bus.

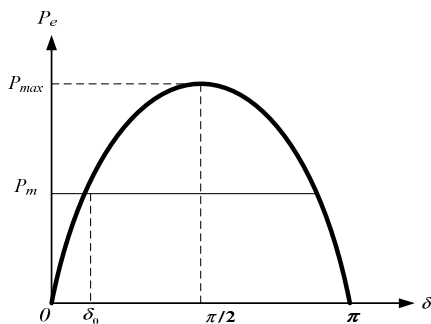
Persamaan ini merupakan bentuk persamaan aliran daya (load flow) yang paling sederhana dan merupakan dasar untuk mempelajari dari semua masalah stabilitas. Hubungan ini menunjukkan besar kecilnya daya tergantung pada besar reaktansi dan sudut antara kedua tegangan. Kurva P_e terhadap δ dikenal sebagai kurva sudut daya (power angle curve). Gambar 4 melukiskan grafik persamaan (21). Daya maksimum terjadi pada $\delta = 90^\circ$, yang dinyatakan dengan

$$P_{max} = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \dots \dots \dots (22)$$

sehingga persamaan daya listrik dalam bentuk P_{mak} adalah

$$P_e = P_{max} \sin \delta \dots \dots \dots (23)$$

δ lebih dari 90° karena upaya memperoleh lebih dari P_{max} maka kenaikan δ menyebabkan output daya lebih kecil dan mesin tersebut menjadi tidak stabil dan kehilangan sinkronisasi.



Gambar 4 Kurva sudut daya

Batas kestabilan terjadi pada $\delta = 90^\circ$ dan disebut batas kestabilan keadaan-tunak (*steady-state stability limit*). Jika memungkinkan rotor berosilasi lebih dari 90° beberapa kali akibat adanya suatu perubahan besar tiba-tiba dalam kondisi-kondisi yang telah ada, dinamakan batas kestabilan transien (*transient stability limit*). Jika osilasi atau ayunan-ayunan ini lenyap, maka mesin menjadi stabil.

Kriteria Luas Sama (Equal-Area Criterion). Studi stabilitas transient meliputi penentuan tercapai atau tidaknya keserempakan setelah mesin mengalami gangguan. Gangguan tersebut dapat berupa pembebanan tiba-tiba, kehilangan pembangkit, kehilangan beban yang besar, ataupun gangguan pada sistem.

Untuk memprediksi stabilitas yang cepat adalah metode kriteria luas sama. Metode ini hanya dapat dipakai untuk suatu sistem satu mesin yang terhubung ke infinite bus. Persamaan (13) dapat digunakan untuk menurunkan metode kriteria luas sama sebagai berikut :

$$\frac{H}{\pi \cdot f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a$$

P_a adalah daya percepatan. Dari persamaan di atas di dapatkan

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e)$$

Kedua sisi kiri dan kanan dari persamaan di atas dikalikan dengan

$$2 \frac{d\delta}{dt}, \text{ didapatkan}$$

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{2\pi f_0}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt}$$

dapat ditulis dalam bentuk yang lain,

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f_0}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt}$$

atau

$$d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f_0}{H} (P_m - P_e) d\delta$$

Integrasi kedua sisi kiri dan kanan menghasilkan

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \frac{2\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta$$

Atau

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right) = \sqrt{\frac{2\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \dots \dots \dots (24)$$

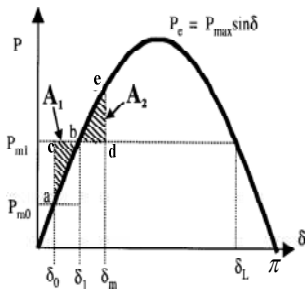
Persamaan (24) di atas, jika kecepatannya menjadi nol sesaat setelah gangguan maka didapatkan kriteria luas sama sebagai berikut

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \dots \dots \dots (25)$$

Mesin bekerja pada titik setimbang δ_0 . Pada titik ini daya input mekanik $P_{m0} = P_{e0}$ seperti ditunjukkan pada gambar 5. Penambahan daya input tiba-tiba yang dinyatakan oleh garis horizontal P_{m1} . Dengan $P_{m1} > P_{e0}$, daya percepatan pada rotor adalah positif dan sudut daya δ bertambah. Kelebihan energi yang tersimpan pada rotor selama percepatan awal adalah :

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = \text{luas abc} = \text{luas } A_1 \dots \dots \dots (26)$$

Penambahan δ , daya listrik bertambah, dan pada saat $\delta = \delta_1$ maka daya input yang baru adalah P_{m1} . Walaupun daya percepatan adalah nol pada titik ini, rotor berputar di atas kecepatan serempak. Oleh karena itu sudut daya δ dan daya listrik P_e bertambah secara kontinyu.



Gambar 5 Kriteria luas sama pada perubahan beban mendadak

Sekarang $P_m < P_e$ yang menyebabkan motor diperlambat ke arah kecepatan serempak hingga $\delta = \delta_m$, maka kelebihan energi yang tersimpan pada rotor selama perlambatan adalah

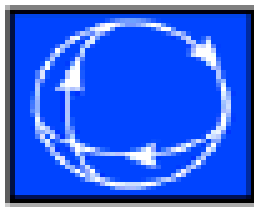
$$\int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{luas bde} = \text{luas } A_2 \dots (27)$$

Persamaan (26) dan (27) di atas dapat dibuat suatu hubungan

$$|\text{luas } A_1| = |\text{luas } A_2| \dots (28)$$

Persamaan (28) dikenal sebagai kriteria luas sama.

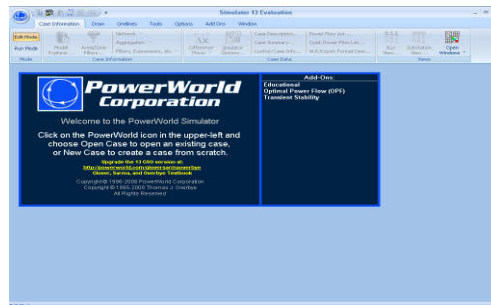
Power world Simulator. Power World Simulator adalah program simulasi, perancangan dan analisis sistem tenaga listrik seperti analisis aliran daya, analisis kontingensi, studi hubung singkat. Program PWS ini seperti program aplikasi lainnya juga terus mengalami perkembangan dan penambahan program-program lainnya. Pada PWS Versi 13 yang akan digunakan sudah dilengkapi dengan program analisis stabilitas transien dan optimasi aliran daya. Selain itu software ini juga dilengkapi dengan program simulasi yang memungkinkan penggunaanya melihat kondisi sistem yang telah dirancangnya.



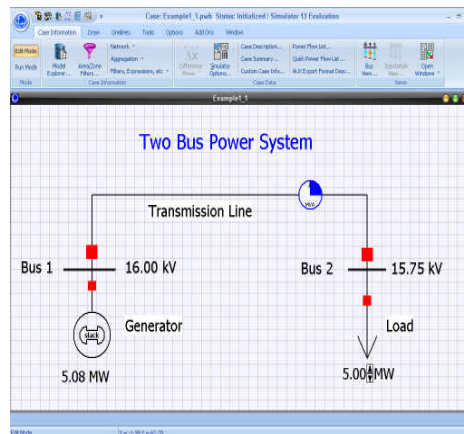
Gambar 6 Icon Power World Simulator

Memulai Power World Simulator. Memulai Power World Simulator, klik dua kali icon PWS, dan jendela kerja PWS akan muncul dan program siap untuk dijalankan. Jendela kerja dari PowerWorld Simulator terdiri dari dua modus yaitu *Edit Mode* dan *Run Mode*. *Edit Mode* digunakan untuk merancang simulasi

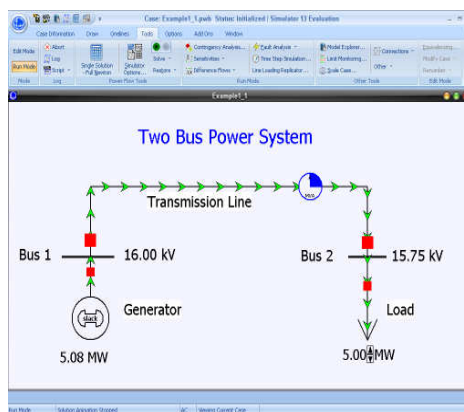
sistem tenaga listrik yang baru atau untuk memodifikasi sistem dari kasus-kasus yang telah ada, sedangkan *Run Mode* digunakan untuk menjalankan simulasi sistem tenaga yang telah dirancang dan akan dianalisa. Kita dapat dengan mudah pindah antara modus-modus dengan menggunakan tombol-tombol *Edit Mode* dan *Run Mode* pada *ribbon tabs*.



(a)



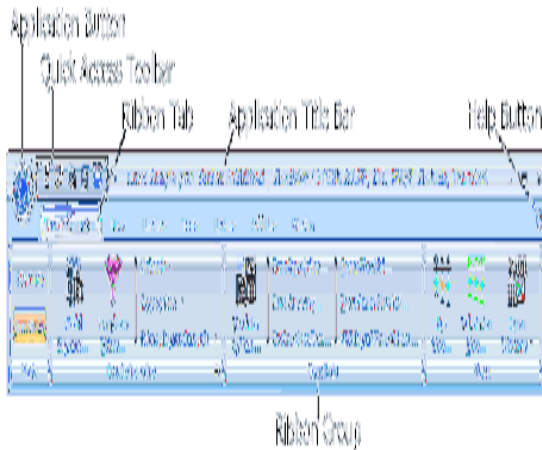
(b)



(c)

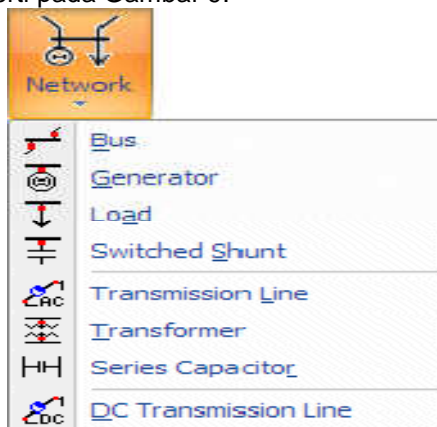
Gambar 7 Tampilan jendela kerja PowerWorld Simulator 13 (a) Jendela kerja sebelum memulai kasus baru (b) *Edit Mode*. (c) *Run Mode*

Gambar 8 juga memperlihatkan beberapa elemen-elemen dasar pada jendela kerja PWS 13 yang akan kita gunakan



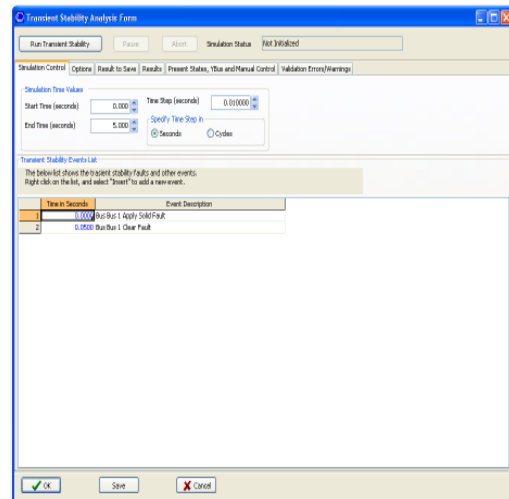
Gambar 8 Elemen-elemen dasar dari jendela kerja PWS 13

Membuat Kasus Baru (New Case). Membuat *online power system* yang baru, klik *Application Button* kemudian pilih *new case*. Dalam membuat diagram garis tunggal sistem tenaga listrik, item atau komponen-komponen yang pertama di masukkan adalah *bus*. Jika komponen bus sudah dimasukkan barulah kita dapat memasukkan komponen-komponen yang lainnya seperti generator, *transmission line*, trafo, beban, dan item-item lainnya. Setiap komponen yang dimasukkan akan tampil jendela kotak *options dialog* yang berfungsi untuk menetapkan parameter-parameter dari komponen sistem tenaga listrik. Untuk menampilkan kotak pilihan dari komponen-komponen yang akan dimasukkan adalah pada *ribbon tab* pilih *draw>network* maka akan muncul jendela kotak pilihan komponen-komponen sistem tenaga listrik seperti pada Gambar 9.



Gambar 9 Jendela Kotak dari b.Analisis Stabilitas Transien Pada PWS

Analisis stabilitas transien pada PWS dilakukan dengan memilih *Add Ons>Transient Stability* pada *ribbon tab* dengan modus *run*, maka akan tampil jendela kotak *Transient Stability Analysis Form* dan tekan *run transient stability* untuk melakukan proses analisis. Namun sebelum menjalankan proses analisis, lakukan beberapa pengaturan yang menjadi tuntutan simulasi dan studi kasus yang disimulasikan. *Network*



Gambar 15 Jendela kotak dari *Transient Stability Analysis Form*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini adalah penelitian kuantitatif yang bersifat deskriptif dimana semua data yang diolah berdasarkan data yang diambil pada PT. PLN (Persero) tanpa dimanipulasi. Parameter-parameter yang disimulasikan dalam penelitian ialah konstanta saluran, impedansi trafo, data pembangkitan, beban tertinggi trafo gardu induk dan sudut pelepasan beban.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Program PWS yang dijalankan dianggap bahwa bus Bakaru dengan level tegangan 150 kV diasumsikan sebagai slack bus, bus Suppa, bus Tello, bus Sengkang, bus Tello A, bus Tello B diasumsikan sebagai bus generator dan sisanya adalah bus beban. Sistem kelistrikan Sulselrabar yang disimulasikan terdiri dari 37 bus di mana diperoleh bahwa besar sudut rotor pada bus Bakaru 31,918 , input mekanis (Mech Input) adalah 40,53, Daya aktif (MW) adalah 42,907 dan daya reaktif (Mvar) adalah 8,647. Tabel 3 memperlihatkan penomoran bus sistem kelistrikan sulselrabar.

Tabel 3 Peomoran Bus Pada PWS untuk Sistem Tengaga Listrik Sulserabar

No Bus	Nama Bus	Teg. Bus	No.Bus	Nama Bus	Teg. Bus
1	Bakaru	150 kV	20	Bone	150 kV
2	Polmas	150 kV	21	Sinjai	150 kV
3	Pinrang	150 kV	22	Bulukumba	150 kV
4	Pare-Pare	150 kV	23	Jeneponto	150 kV
5	Majene	150 kV	24	Tallasa	150 kV
6	Suppa	150 kV	25	Sungguminasa	150 kV
7	Barru	150 kV	26	T. Bunga	150 kV
8	Sidrap	150 kV	27	Tello	70 kV
9	Pangkep	150 kV	28	Daya	70 kV
10	Pangkep A	70 kV	29	Mandai	70 kV
11	Tonasa	70 kV	30	Maros	70 kV
12	Bontoala	70 kV	31	Tello A	30 kV
13	Bosowa	150 kV	32	Tello B	30 kV
14	Tello A	150 kV	33	Borongloe	70 kV
15	T Lama	150 kV	34	Barawaja	30 kV
16	Makale	150 kV	35	Panakukang	150 kV
17	Soppeng	150 kV	36	T lama B	70 kV
18	Palopo	150 kV	37	Mamuju	150 kV
19	Sengkang	150 kV			

Hasil simulasi yang dilakukan dengan power word simulator dapat ditunjukkan pada Tabel4.

Tabel 4. Keadaan generator saat peralihan

Number Of Bus	Name Of Bus	ID	reaName Of Gen	Rotor Angle	Accel.rad/sec ²	Mech Input	MW	Mvar	Gen MVA	Accel MW	Field Voltage,PU	Field Current
1	Bakaru	3	1	-33.39	0.0021	40.53	38.89	-8.15	39.73	1.64	0.9783	0
1	Bakaru	6	1	-33.42	-0.0016	40.53	41.83	-8.57	42.7	-1.3	0.9791	0
3	Pinrang	2	1	-45.08	0.0072	0	-3.61	10.89	11.47	3.61	1.0195	0
6	Suppa	1	1	-44.89	0.0091	10.83	5.39	4.77	7.19	5.44	1.0068	0
6	Suppa	2	1	-44.89	0.0091	10.83	5.39	4.77	7.19	5.44	1.0068	0
6	Suppa	3	1	-44.89	0.0091	10.83	5.39	4.77	7.19	5.44	1.0068	0
6	Suppa	4	1	-44.89	0.0091	10.83	5.39	4.77	7.19	5.44	1.0068	0
6	Suppa	5	1	-44.89	0.0091	10.83	5.39	4.77	7.19	5.44	1.0068	0
6	Suppa	6	1	-45.20	0.0093	8.2	2.59	4.74	5.41	5.61	1.0067	0
14	Tello	1	1	-47.67	-0.0119	15	22.14	5.97	22.93	-7.14	1.0137	0
14	Tello	2	1	-42.23	-0.0026	28	30.31	6.15	30.93	-2.31	1.0399	0
14	Tello	3	1	-42.23	-0.0026	28	30.31	6.15	30.93	-2.31	1.0399	0
14	Tello	4	1	-45.91	-0.0022	7.5	8.82	6.45	10.92	-1.32	1.0614	0
14	Tello	5	1	-49.56	-0.0021	0	1.26	6.53	6.65	-1.26	1.0593	0
14	Tello	6	1	-45.36	-0.0027	8	9.62	6.42	11.56	-1.62	1.0641	0
14	Tello	7	1	-46.38	-0.0026	6	7.58	6.45	9.95	-1.58	1.0629	0
16	Makale	1	1	-45.61	0.0035	4.07	1.99	2.73	3.37	2.08	1.0039	0
18	Palopo	1	1	-46.15	0.0031	1.9	0.05	2.64	2.64	1.85	1.0039	0
18	Palopo	2	1	-45.67	0.0029	6	4.27	2.66	5.03	1.73	1.004	0
18	Palopo	3	1	-45.68	0.0029	5.9	4.17	2.66	4.94	1.73	1.004	0
19	Sengkang	1	1	-23.64	-0.0096	49.27	58.93	-1.31	58.94	-9.66	1.0147	0
19	Sengkang	2	1	-23.64	-0.0096	49.27	58.93	-1.31	58.94	-9.66	1.0147	0

Lanjutan 4 Keadaan generator saat peralihan

Number Of Bus	Name Of Bus	ID	Area Name Of Gen	Rotor Angle	Accel.rad/sec ²	Mech Input	MW	Mvar	Gen MVA	Accel MW	Field Voltage,PU	Field Current
19	Sengkang	3	1	-23.64	-0.0096	49.27	58.93	-1.31	58.94	-9.66	1.0147	0
27	Tello 70kV	1	1	-46.69	-0.0051	7	11.61	-0.45	11.62	-4.61	0.9997	0
31	Tello A	1	1	-43.59	-0.0011	11.97	12.96	0.05	12.96	-0.99	1.0035	0
32	Tello B	1	1	-45.77	0.0017	8.3	5.96	2.23	6.36	2.34	1.0175	0
32	Tello B	2	1	-45.15	-0.0005	10	10.49	2.07	10.69	-0.49	1.0125	0
32	Tello B	3	1	-45.77	0.0017	8.3	5.96	2.23	6.36	2.34	1.0175	0
33	Borongloe	1	1	-49.75	-0.0014	2.9	3.62	-2.28	4.28	-0.72	0.9959	0
33	Borongloe	2	1	-48.54	-0.0013	13.5	14.14	-2.29	14.33	-0.64	0.9962	0
37	Mamuju	2	1	-46.85	0.0073	2.79	-1.56	27.57	27.62	4.35	1.0618	0

Sudut pemutusan dan waktu pemutusan kritis dapat dihitung berdasarkan hasil simulasi dari PWS yang telah diperoleh pada Tabel 4, selanjutnya perhitungannya diperlihatkan di bawah ini.

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \left[\frac{(\pi - 2 \cdot \delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0}{\cos^{-1} [(\pi - 2.0,549) \sin 33,39 - \cos 33,39]} \right]$$

$$\cos^{-1} \left[\frac{(\pi - 1,098) \cdot (0,550 - 0,834)}{0,2897} \right] = 0,2897$$

$$\delta_{cr} = 73,15$$

$$t_{cr} = \frac{\sqrt{4 \cdot H \cdot (\delta_{cr} - \delta_0)}}{\omega_s \cdot pm}$$

$$t_{cr} = \frac{\sqrt{4 \cdot 3 \cdot (73,15 - 33,39)}}{314,16 \cdot 40,53} = 0,223$$

$$\delta_{max} = 180 - \delta_0$$

$$\delta_{max} = 180 - 33,39 = 146,61$$

Sudut dan waktu pemutusan kritis juga dapat diperoleh untuk bus-bus yang lain, seperti yang diperlihatkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Sudut pemutusan, waktu pemutusan dan sudut maksimum generator

No	Nama Bus	Sudut Pemutusan (δ_{cr})	Waktu Pemutusan (t_{cr})	Sudut Maksimum (δ_{max})
1	Bakaru 1	73,15	0,223	146,61
2	Bakaru 2	73,87	0,225	146,58
3	Pinrang	44,67	0	134,923
4	Suppa 1 -5	62,80	8,671	135,115
5	Suppa 6	62,97	0,289	134,977
6	Tello 1	67,62	0,223	132,33

7	Tello 2-3	69,14	137,775	0,234
8	Tello 4	67,50	0,331	134,093
9	Tello 5	66,52	0	130,438
10	Tello 6	67,93	0,328	134,641
11	Tello 7	67,59	0,367	133,625
12	Tello 70 kV	69,43	0,431	133,314
13	Makale	63,02	0,404	134,387
14	Palopo 1	62,65	0,593	134,848
15	Palopo 2	62,81	0,330	-489
16	Palopo 3	62,88	0,333	134,319
17	Sengkang 1-3	93,89	0,301	156,363
18	Tello A	67,64	0,339	136,401
19	Tello B1	82,38	0,502	134,226
20	Tello B2	66,48	0,436	134,85
21	Tello B3	64,43	0,447	134,226
22	Borongloe 1	66,48	0,428	130,255
23	Borongloe 2	86,50	0,299	131,465
24	Mamuju	61,21	0,443	133,155

KESIMPULAN

Besarnya sudut rotor awal yang paling besar adalah sudut generator Sengkang sebesar 23,637, hal ini disebabkan generator berada dekat dengan lokasi gangguan dan yang paling terkecil adalah sudut generator Borongloe 1 sebesar 49,745 ini dikarenakan generator berada jauh pada lokasi gangguan. Sudut maksimum adalah generator sengkang sebesar 156,363 dan sudut minimum adalah generator Borongloe 1 sebesar 130,255. Waktu pemutusan kritis pada saat sudut generator maksimum (generator Sengkang) sebesar 0,301 dan saat sudut minimum generator (Generator Borongloe 1) sebesar 0,428.

DAFTAR PUSTAKA

- Arikunto, Suharsimi. 2005. *Manajemen Penelitian*. Jakarta : PT. Rineka Cipta
- Cekdin, Cekmas. 2007. *Sistem Tenaga Listrik, Contoh Soal dan Penyelesaian Menggunakan MATLAB*. Yogyakarta : C.V Andi Offset.
- Etter, D. M. 1993. *Engineering Problem Solving With MATLAB*. Ney Jersey: Prentice-Hall
- Glover, S. Sarma and Overbye. 2008. *Power System Analysis and Design*. 4th Edition. United States of America : Thomson Learning
- Grigsby, L.L. 2001. *The Electric Power Engineering Handbook*. United States of America : CRC Press LLC
- Gross, Charles A. 1979. *Power System Analysis*. New York : John Wiley & Sons.
- Hanselman, Duane., Bruce Littlefield. *MATLAB Bahasa Komputasi Teknik*. Terjemahan Josep Ediyanto. Yogyakarta : C.V Andi Offset.
- Kundur, Prabha. 1994. *Power System Stability and Control*. United States of America : McGraw-Hill
- Nagath,I.G.,Kothari,D. P. 1987. *Modern Power System Analysis*. New Delhi : Tata McGraw Hill Publishing Company Limited
- Nazir, Moh. 2003. *Metode Penelitian*. Jakarta : Ghalia Indonesia.
- Saadat, Hadi. 1999. *Power System Analysis*. Singapore: WCB McGraw-Hill.
- Stagg, Glenn W., Ahmed H. El-Abjad. 1983. *Computer Methode in Power System Analysis. International Student Edition*. Tokyo, Japan : Togho Printing
- Stevenson, Grainger. 1994. *Power sistem analysis*. New Mc Hill International Edition, New York.
- Stevenson, William.D. 1984. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Edisi 4. Terjemahan Kamal Idris. Jakarta: Erlangga.
- Ulum, Misbahul. 2007. *Studi Stabilitas Transient Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Kriteria Luas Sama dan Menggunakan MATLAB*. Skripsi tidak diterbitkan. Surabaya: JPTE FT Unesa.