

ANALISIS STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK MENGUNAKAN BERBASIS MATLAB

Erwin Syahputra¹, Zulfadli Pelawi², Arnawan Hasibuan³

***)Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar Medan**

****Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara
Medan**

*****Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Malikussalaeh
Lhokseumawe**

email : arnawan@unimal.ac.id.com

ABSTRAK

Dalam sistem tenaga listrik yang melayani beban secara kontinyu sebaiknya tegangan dan frekuensi harus tetap konstan, namun apabila terjadi gangguan pada salah satu pembangkit atau pada rel maka hal ini tidak dipungkiri akan terjadi gangguan pada penyaluran daya. Untuk itu perlu dilakukan Penelitian tentang Stabilitas Sistem Tenaga yang berkaitan dengan Penentuan Sudut Pemutus Kritis dan Waktu Pemutus Kritis pada generator, guna mengetahui berapa besar Sudut Pemutus Kritis dan berapa besar Waktu Pemutus Kritis. Dalam penelitian ini digunakan Metode Step by Step dengan bantuan software Matlab. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini memperlihatkan bahwa metode step by step dengan menggunakan Matlab sangat akurat dalam menentukan waktupemutus kritis dalam sistem tenaga listrik yang mengalami gangguan hubung singkat sesuai besar dan lama terjadinya gangguan.

Kata kunci : Sudut Kritis, Waktu Pemutus Kritis, Runge Kutta, Stabilitas

1.Pendahuluan

Suatu sistem kelistrikan umumnya memiliki beberapa pusat pembangkit yang terdiri pusat pembangkit listrik tenaga air, pusat pembangkit listrik tenaga uap, pusat pembangkit listrik tenaga disel dan jenis pusat pembangkit lainnya. Semua unit pembangkit yang ada tersebut terhubung satu sama lain melalui jaringan transmisi untuk mensuplai kebutuhan listrik bagi para konsumen.

Selain tersedianya pembangkitan yang cukup, hal lain yang juga harus ditentukan adalah apakah kondisi *transient* jika terjadi gangguan akan mengganggu operasi normal sistem atau tidak. Hal ini akan berhubungan dengan kualitas listrik yang sampai ke konsumen berupa kestabilan frekuensi dan tegangan.

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 tenaga listrik biasanya terjadi akibat adanya gangguan seperti sambaran petir, gangguan hubung singkat, dan pelepasan atau penambahan beban yang benar secara tiba-tiba. Akibat adanya perubahan kondisi kerja dari sistem ini, 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 sama luas. Walaupun metode ini tidak dapat dipergunakan untuk sistem multimesin namun sangatlah membantu untuk memahami faktor-faktor dasar yang mempengaruhi stabilitas *transient* sistem tenaga listrik.

Metode kriteria sama luas (*Equal Area Criterion, EAC*) merupakan contoh metode langsung untuk memperoleh sudut pemutus kritis (*Critical Clearing angle*), Kurva ayunan merupakan alat elevasi suatu kestabilan sistem yang digunakan kestabilan-kestabilan *transient* sistem tenaga listrik.

Alat bantu dalam studi analisa sistem tenaga listrik adalah komputer, karena peranan komputer dalam Analisis Sistem Tenaga mempunyai

keuntungan diantaranya fleksibel (dapat digunakan untuk menganalisis hampir semua persoalan), teliti, cepat dan ekonomis. *Software* komputer yang digunakan adalah Matlab, karena Matlab merupakan bahasa canggih untuk komputasi teknik. Dan Matlab merupakan integrasi dari komputasi, visualisasi dan pemrograman dalam suatu lingkungan yang mudah digunakan, karena permasalahan dan pemecahannya dinyatakan dalam notasi matematika biasa.

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang dapat dikemukakan dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana menggunakan Kriteria Luas Sama untuk menentukan kestabilan sistem tenaga listrik di PLTU Sicanang Belawan dalam keadaan peralihan (*transient*).
2. Berapa besarnya sudut pemutus kritis (*Critical Clearing Angle*) untuk menentukan kestabilan Sistem Tenaga Listrik di PLTU Sicanang Belawan dalam keadaan peralihan (*transient*).

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan pembangkitan generator merupakan salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik pada setiap saat akan selalu terjadi perubahan kapasitas dan letak beban dalam sistem. Perubahan tersebut mengharuskan setiap pembangkit menyesuaikan daya keluarannya melalui kendali governor maupun eksitasi mengikuti perubahan beban sistem. Jika hal ini tidak dilakukan maka akan menyebabkan keseimbangan daya dalam sistem terganggu dan efisiensi pengoperasian sistem menurun menyebabkan kinerja sistem memburuk.

Kecepatan pembangkit memberi reaksi terhadap perubahan yang terjadi dalam sistem menjadi faktor penentu kestabilan sistem. Kestabilan mesin pembangkit sangat tergantung pada kemampuan sistem kendalinya. Sistem kendali yang andal jika mampu mengendalikan mesin tetap beroperasi normal mengikuti perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem. Jika semua mesin tetap beroperasi dalam kondisi normal meskipun ada gangguan, maka sistem tersebut akan benar-benar stabil.

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung dengan saluran untuk melayani beban. Sistem tenaga listrik yang memiliki banyak mesin biasanya menyalurkan daya ke beban melalui saluran interkoneksi. Tujuan utama dari sistem saluran interkoneksi adalah untuk menjaga kontinuitas dan ketersediaan tenaga

listrik terhadap kebutuhan beban yang terus meningkat. Semakin berkembang sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan lemahnya performansi sistem ketika mengalami gangguan. Salah satu efek gangguan adalah osilasi elektromekanik yang jika tidak diredam dengan baik maka sistem akan terganggu dan dapat keluar dari area kestabilannya sehingga mengakibatkan pengaruh yang lebih buruk seperti pemadaman total (*black out*).

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan karakteristik sistem tenaga yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem pada operasi normal dan dapat kembali dalam keadaan seimbang setelah terjadi gangguan. Secara umum permasalahan stabilitas sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (*Rotor Angle Stability*) dan kestabilan tegangan (*Voltage Stability*). Klasifikasi ini berdasarkan rentang waktu dan mekanisme terjadinya ketidakstabilan. Kestabilan sudut rotor di klasifikasikan menjadi *Small Signal Stability* dan *Transient Stability*. *Small Signal Stability* adalah kestabilan sistem untuk gangguan-gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromekanik yang tak teredam, sedangkan *Transient Stability* dikarenakan kurang sinkronnya torsi dan diawali dengan gangguan-gangguan besar.

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 (*dynamism*).

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

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.

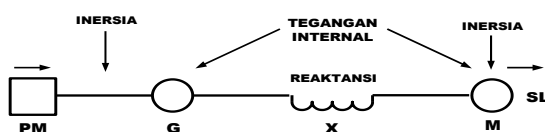
Stabilitas *dynamism* adalah bila setelah ayunan pertama (periode stabilitas *transient*) sistem mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru (stabilitas *transient* bila AVR dan *governor* bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisis).

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.

Faktor-faktor utama dalam masalah stabilitas adalah:

1. Faktor mekanis dapat berupa:
 - a. Torsi *input prime* beban.
 - b. Inersia dari *prime mover* dan generator.
 - c. Inersia motor dan sumbu beban.
 - d. Torsi input sumbu beban.
2. Torsi listrik berupa:
 - a. Tegangan internal dari generator sinkron.
 - b. Reaktansi sistem.

Tegangan internal dari motor sinkron.



Gambar 2.1 Diagram faktor-faktor utama dalam masalah kestabilan

2.2. Stabilitas Transient Sistem Tenaga Listrik

Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan atau beban besar hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus semacam itu stabilitas *transient* harus cukup kuat untuk

mempertahankan diri terhadap kejutan (*shock*) atau perubahan beban yang relatif besar yang terjadi. Stabilitas *transient* adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron (sebelum terjadi aksi dari kontrol governor) yang mengikuti gangguan pada sistem.

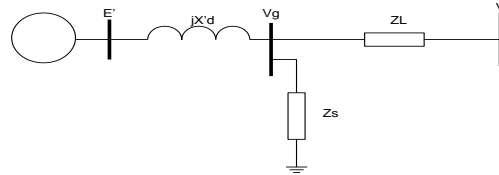
Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba-tiba, keseimbangan antara energi input dan output listrik pada sistem akan hilang. Jika energi input tidak lagi mencukupi, inersia rotor mesin yang masih bekerja, pada periode yang singkat, akan melambat. Apabila beban hilang maka energi input pada sistem akan melebihi beban listrik, dan mesin akan bergerak semakin cepat.

Berbagai macam faktor mempengaruhi stabilitas sistem, seperti kekuatan pada jaringan transmisi didalam sistem dan saluran pada sistem yang berdekatan, karakteristik pada unit pembangkitan, termasuk inersia pada bagian yang berputar, dan properti listrik seperti reaktansi *transient* dan karakteristik saturasi magnetik pada besi stator dan rotor. Faktor penting lainnya adalah kecepatan pada saluran atau perlengkapan yang terjadi gangguan dapat diputus (*disconnect*) dan, dengan *reclosing* otomatis pada saluran transmisi, yang menentukan seberapa cepat saluran dapat beroperasi lagi. Sebagaimana pada stabilitas *steady-state*, kecepatan respon pada sistem eksitasi generator merupakan faktor yang penting dalam mempertahankan stabilitas *transient*. Gangguan pada sistem biasanya diikuti oleh perubahan tegangan yang cepat pada sistem, dan pemulihan kembali tegangan dengan cepat menuju ke kondisi normal merupakan hal yang penting dalam mempertahankan stabilitas.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, stabilitas *transient* adalah kemampuan untuk tetap pada kondisi sinkron selama periode terjadinya gangguan dan sebelum adanya reaksi dari governor. Pada umumnya ayunan pertama pada rotor mesin akan terjadi selama satu detik setelah gangguan, tetapi waktu yang sebenarnya bergantung pada karakteristik mesin dan sistem transmisi. Setelah periode ini, governor akan mulai bereaksi, biasanya sekitar 4 hingga 5 detik, dan stabilitas dinamis akan efektif. Ayunan dinamis juga akan dipengaruhi oleh osilasi tegangan, penguatan pada sistem eksitasi, dan waktu pada frekuensi jaringan.

2.3. Pemodelan Mesin Serempak Untuk Studi Kestabilan

Sebuah Generator dihubungkan ke Infinite bus sebagaimana dinyatakan pada gambar 2.3 :



Gambar 2.2 Sebuah generator dihubungkan ke infinite bus
 (Cekdin.2006:232)

Tegangan generator adalah konstan dengan reaktansi transient sumbu langsung X'_d . Representasi titik tegangan terminal generator V_g dapat dieliminasi dengan mentransformasikan impedansi dari hubungan Y ke hubungan Δ , sehingga admitansi yang dihasilkan adalah :

$$y_{10} = \frac{Z_L}{jX'_d Z_S + jX'_d Z_L + Z_L Z_S}$$

$$y_{20} = \frac{jX'_d}{jX'_d Z_S + jX'_d Z_L + Z_L Z_S} \quad (2.17)$$

$$y_{20} = \frac{Z_S}{jX'_d Z_S + jX'_d Z_L + Z_L Z_S}$$

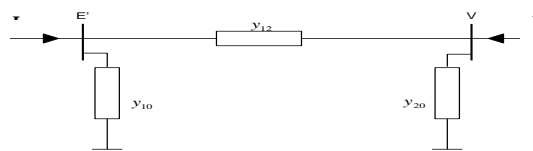
Rangkaian ekuivalen dengan tegangan dinyatakan oleh titik 1 dan infinite bus oleh titik 2 dapat diperlihatkan pada gambar 2.4 Penulisan persamaan node (titik simpul) adalah :

$$I_1 = (y_{10} + y_{12})E - y_{12}V \quad (2.18)$$

$$I_2 = -y_{12}E + (y_{20} + y_{21})V$$

Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk matriks admitansi sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ V \end{bmatrix} \quad (2.19)$$



Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen satu mesin terhubung ke infinite bus
 (Cekdin.2006:233)

Elemen diagonal dari matriks admitansi bus adalah $Y_{11} = y_{10} + y_{12}$, dan $Y_{22} = y_{20} + y_{12}$, elemen bukan diagonal adalah $Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}$, dengan menyatakan tegangan dan admitansi dalam bentuk polar, maka daya nyata pada titik 1 diberikan oleh:

$$P_e = R[E' x I_1^*]$$

$$P_e = R[E' \angle \delta (|Y_{11}| \angle -\theta_{11} + |E'| \angle -\delta + |Y_{12}| \angle -\theta_{12} |V| \angle 0)]$$

Atau

$$P_e = |E'|^2 |Y_{11}| \cos \theta_{11} + |E'| |V| |Y_{12}| \cos(\delta - \theta_{12}) \quad (2.20)$$

Jika harga $\theta_{11} = \theta_{12} = 90^\circ$, dan $Y_{12} = B_{12} = \frac{1}{X_{12}}$, sehingga persamaan (2.20),

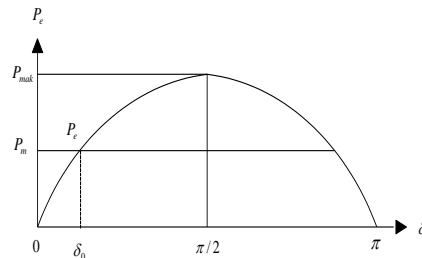
menjadi:

$$P_e = |E'| |V| |B_{12}| \cos(\delta - 90^\circ)$$

Atau

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \sin \delta \quad (2.21)$$

Dari persamaan (2.21) di atas dapat dinyatakan bahwa hubungan daya yang ditransmisikan tergantung pada reaktansi X_{12} dan sudut δ dikenal sebagai kurva sudut daya yang dapat diperlihatkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.4 Kurva sudut daya (Cekdin.2006:233)

Daya maksimum dapat dipandang sebagai batas stabilitas keadaan mantap (*Steady State Stability Limit*), terjadi pada sudut 90° yang dinyatakan dengan:

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \quad (2.22)$$

Sehingga persamaan daya listrik dalam bentuk P_{mak} adalah:

$$P_e = P_{mak} \sin \delta \quad (2.23)$$

Jika generator tiba-tiba terhubung singkat, maka tegangan E' dapat dihitung dengan:

$$E = V_g + jX'_d I_a \quad (2.24)$$

Dengan I_a adalah arus generator sebelum gangguan.

2.4 Menentukan Stabilitas Transient Dengan Metode Kriteria Luas Sama

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.

Suatu metode yang dapat digunakan 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 atau sistem dua mesin. Persamaan (2.13) dapat digunakan untuk menurunkan metode kriteria luas sama sebagai berikut:

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

Dengan P_a adalah daya percepatan. Dari persamaan di atas di dapatkan:

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

Jika kedua sisi kiri dan kanan dari persamaan di atas dikalikan dengan $2d\delta/dt$, 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 sebagai berikut:

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

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

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right) = \sqrt{\frac{2\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (2.25)$$

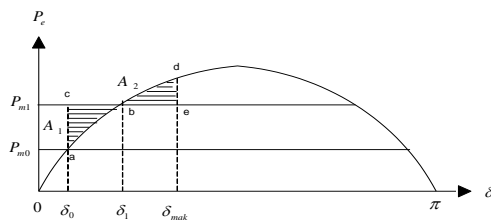
Bila pada persamaan (2.25) kecepatannya menjadi nol sesaat setelah gangguan, maka di dapatkan kriteria luas sama sebagai berikut:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.26)$$

Mesin bekerja pada titik setimbang δ_0 . Pada titik ini daya input mekanik $P_{m0} = P_{e0}$ seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. 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 :

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = \text{luas abc} = \text{luas } A_1 \quad (2.27)$$

Dengan 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 2.5 Kriteria luas sama pada perubahan beban mendadak (Cekdin.2006:235)

Sekarang $P_m < P_e$ yang menyebabkan motor diperlambat ke arah kecepatan serempak hingga $\delta = \delta_{mak}$, maka kelebihan energi yang tersimpan pada rotor selama perlambatan adalah sebagai berikut :

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{mak}} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{luas bde} = \text{luas } A_2 \quad (2.28)$$

Dari persamaan (2.27) dan (2.28) didapatkan suatu hubungan :

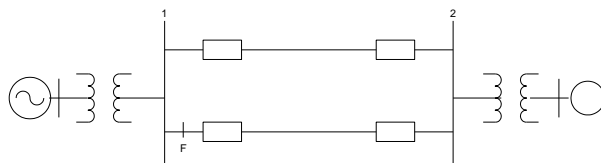
$$|\text{luas } A_1| = |\text{luas } A_2| \quad (2.29)$$

Persamaan (2.29) dikenal sebagai kriteria luas sama.

2.5 Aplikasi Pada Gangguan Tiga Fasa

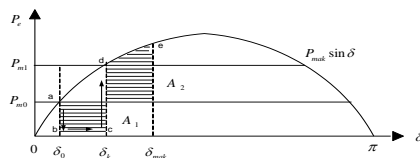
Untuk keandalan yang sempurna, suatu sistem harus dirancang untuk kestabilan peralihan terhadap gangguan tiga fasa pada lokasi yang menimbulkan pengaruh terburuk, dan ini sudah merupakan praktek yang dijalankan secara universal (Stevenson.1996:373).

Perhatikan gambar 2.7 di mana sebuah generator di hubungkan ke infinite bus melalui dua kawat paralel. Gangguan tiga fasa sesaat terjadi pada salah satu saluran dekat bus1. anggap bahwa daya masukan mekanis P_m adalah konstan dan mesin beroperasi dalam keadaan stabil. Daya yang dialirkan ke sistem dengan sudut δ_0 seperti ditunjukkan pada gambar 2.8



Gambar 2.6 Sistem satu mesin terhubung ke infinite bus, gangguan tiga fasa pada F

Bila gangguan berada pada ujung sisi kirim, yaitu pada titik F, tidak ada daya yang dikirim ke Infinite bus. Selama gangguan terjadi, daya listrik P_e adalah nol. Sementara masukan daya mekanis P_m tidak berubah seperti terlihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.7 Kriteria Luas sama untuk gangguan tiga fasa pada ujung kirim (Cekdin.2006:236)

Pada gambar 2.7 sudut motor maju dari δ_0 ke sudut pemutus kritis δ_k yang berarti berubah dari titik b ke titik c. bila gangguan dihilangkan pada sudut δ_k , keluaran daya listrik mendadak naik ke titik d pada lengkung sudut daya. Pada titik d, keluaran daya listrik P_e melebihi masukan daya mekanis P_m sehingga daya Percepatan P_a adalah negative. Akibatnya kecepatan rotor menurun sementara P_e berubah dari titik d ke titik e. pada titik e kecepatan rotor kembali serempak meskipun sudut rotor sudah maju sampai δ_{mak} . Sudut δ_{mak} ditentukan dari kriteria luas sama yaitu $A_1 = A_2$.

Sudut pemutus kritis δ_k (*Critical Clearing Angle*) ini dapat dicari dengan menggunakan kriteria luas sama seperti ditunjukkan pada gambar 2.9 sebagai berikut:

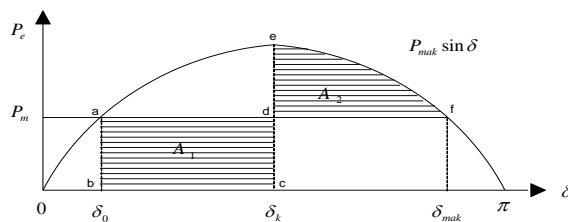
$$\int_{\delta_0}^{\delta_k} P_m d\delta = \int_{\delta_k}^{\delta_{mak}} (P_{mak} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (2.30)$$

Dengan mengintegrasikan kedua sisi kiri dan kanan didapatkan:

$$P_m (\delta_k - \delta_0) = P_{mak} (\cos \delta_k - \cos \delta_{mak}) - P_m (\delta_{mak} - \delta_k)$$

Penyelesaian untuk harga δ_k adalah:

$$\cos \delta_k = \frac{P_{in}}{P_{mak}} (\delta_{mak} - \delta_0) + \cos \delta_{mak} \quad (2.31)$$



Gambar 2.8 Kriteria Luas Sama untuk mencari sudut pemutus kritis akibat gangguan tiga fasa pada ujung kirim (Cekdin.2006:237)

Untuk menentukan waktu pemutus kritis t_k , diperlukan penyelesaian persamaan ayunan non linear. Dalam hal ini, dimana daya listrik selama gangguan adalah nol, penyelesaian analitik untuk waktu pemutus kritis (*Critical Clearing Time*) dapat ditentukan. Dari persamaan ayunan yang diberikan oleh persamaan (2.13) dapat ditentukan waktu pemutus kritis, dimana selama gangguan terjadi $P_e = 0$, sehingga waktu pemutus kritis dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\frac{H}{\pi \cdot f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m \quad (2.32)$$

Atau

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f_0}{H} P_m \quad (2.33)$$

Integrasi kedua sisi kiri dan kanan menghasilkan:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f_0}{H} P_m \int_0^t dt = \frac{\pi \cdot f_0}{H} P_m t \quad (2.34)$$

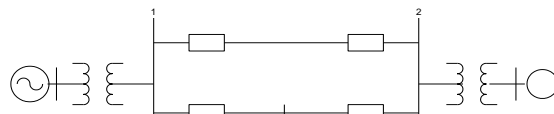
Dengan mengintegrasikan sekali lagi didapatkan:

$$\delta = \frac{\pi \cdot f_0}{H} P_m t + \delta_0 \quad (2.35)$$

Kemudian δ_k adalah sudut pemutus kritis (*Critical Clearing Angle*) yang hubungannya dengan waktu pemutus kritis adalah:

$$t_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 P_m}} \quad (2.36)$$

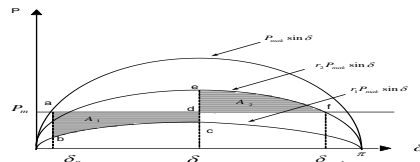
Sekarang perhatikan lokasi gangguan F yang terpisah (jauh) dari sisi kirim, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Sistem satu mesin terhubung ke infinite bus, gangguan tiga fasa pada F

Jika daya ditransfer sebelum gangguan adalah $P_{\max} \sin \delta$, selama gangguan daya di transfer adalah $r_1 P_{2\max} \sin \delta$. Dengan menggunakan kriteria luas sama dari gambar 2.11 dapat ditentukan sudut pemutus kritis sebagai berikut:

$$P_m (\delta_k - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_k} r_1 P_{\max} \sin \delta d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} r_2 P_{\max} \sin \delta d\delta - P_m (\delta_{\max} - \delta_k) \quad (2.37)$$



Gambar 2.10 Kriteria Luas sama untuk sudut pemutus kritis akibat gangguan tiga fasa yang jauh dari ujung kirim (Cekdin.2006:238)

Dengan mengintegrasikan kedua sisi kiri dan kanan akhirnya didapatkan sudut pemutus kritis δ_k sebagai berikut:

$$\cos \delta_k = \frac{(P_m / P_{mak})(\delta_{mak} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{mak} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \quad (2.38)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

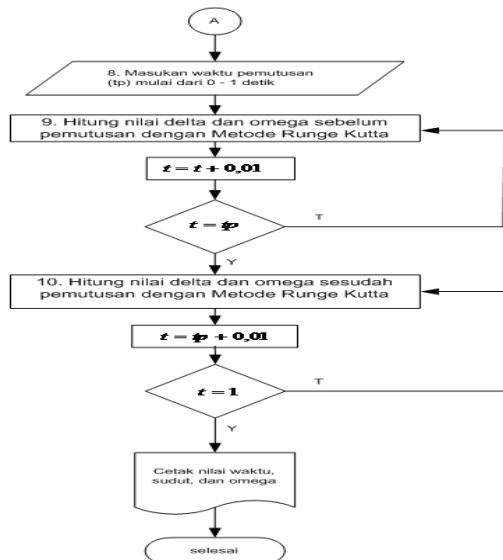
3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini direncanakan akan dimulai dari bulan Maret 2016 s/d Oktober 2016, sejak mulai penetapan disetujuinya proposal ini, lalu pengambilan data sampai publikasi. Penelitian ini merupakan aplikasi perhitungan penentuan sudut pemutusan kritis dan waktu pemutusan kritis ada sistem satu mesin. Adapun lokasi yang digunakan sebagai objek penelitian adalah PT. PLN (Persero) Pembangkitan Sumatera Bagian Utara Sektor Pembangkitan Belawan Jl. P. Sicanang Belawan-Medan 2016.

3.2. Alat Penelitian

Alat yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah satu set PC dengan kemampuan cukup untuk mengoperasikan perangkat lunak Matlab versi 5.3. Spesifikasi minimum memiliki RAM 32 MB dan *processor* P100 ke atas, untuk pengolahan data dan menjalankan program Matlab.

3.3. Diagram Alir



Gambar 3.1 Alir Penelitian

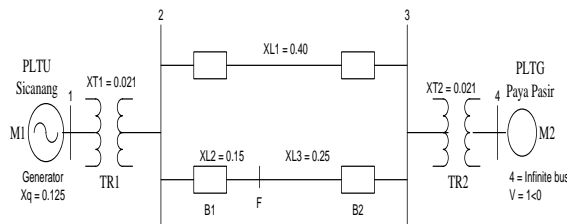
Pengujian

- a) Bila waktu pemutusan (breaker terbuka) dengan nilai sudut clearing (*clearing angle*) sama dengan atau lebih kecil dari nilai sudut pemutus kritis ($\delta_p \leq \delta_k$) akan didapat kestabilan kembali dalam sistem tenaga listrik.
- b) Bila waktu pemutusan (breaker terbuka) dengan nilai sudut clearing (*clearing angle*) lebih besar dari nilai sudut pemutus kritis ($\delta_p > \delta_k$) tidak akan didapatkan kestabilan sistem tenaga listrik.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Single Line Pada Saluran

Model sistem tenaga listrik yang menyangkut masalah stabilitas ini diambil dari *single line* yang ada di PLTU Sicanang sampai ke PLTG Paya Pasir. Dalam sistem tenaga listrik terdiri dari dua buah mesin yang mana mesin 1 sebagai pembangkit daya (generator) di PLTU sicanang dan mesin 2 dipasang pada bus *Infinite* yaitu di PLTG Paya Pasir, dua buah *Transformator* masing-masing trafo 1 sebagai penaik tegangan (*Step Up*) di PLTU Sicanang dan trafo 2 sebagai penaik tegangan (*Step Up*) di PLTG Paya Pasir.



Gambar 4.1 Single line pada saluran transmisi dari PLTU Sicanang sampai ke PLTG Paya Pasir

Keterangan Gambar :

M1, M2 = Generator dan *Infinite bus*

TR1, TR2 = Transformator daya

B 1, B2 = Circuit *Breaker*

F = Saluran yang mengalami gangguan

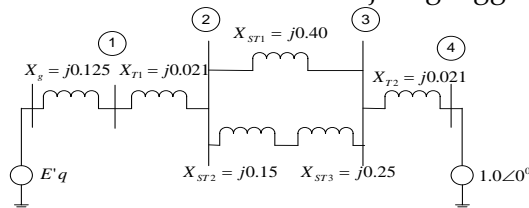
Tabel 4.1 Reaktansi pada saluran

No	Parameter-parameter	Reaktansi (X) p.u.
1.	Reaktansi generator (Xq)	j0,125
2.	Reaktansi Trafo 1 (XT1)	j0,021
3.	Reaktansi Trafo 2 (XT2)	j0,021
4.	Reaktansi Saluran Transmisi 1 (XL1)	j0,40
5.	Reaktansi Saluran Transmisi 2 (XL2)	j0,15
6.	Reaktansi Saluran Transmisi 3 (XL3)	j0,25
7.	Tegangan referensi beban	1,0∠0°

Dengan bus *infinite* (bus 4) pada sistem ini menyerap daya sebesar $S = 1,0 + j0,2$ maka kita akan menentukan sudut pemutusan kritis (*Clearing Critical Angle*) dan waktu pemutusan kritis (*Clearing Critical Time*) dengan Asumsi bahwa $H = 4,37$ MJ/MVA.

4.2 Menghitung Reaktansi Pada Saluran

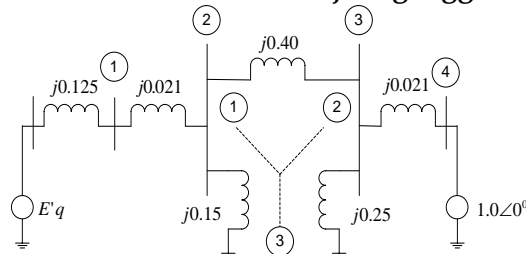
1. Menghitung reaktansi saluran sebelum terjadi gangguan



Gambar 4.2 Diagram reaktansi saluran sebelum terjadi gangguan

$$\begin{aligned}
 jX &= X_q + X_{T1} + \frac{(X_{ST1})(X_{ST3} + X_{ST2})}{X_{ST1} + X_{ST3} + X_{ST2}} + X_{T2} \\
 jX &= j0,125 + j0,021 + \frac{(j0,40)(j0,15 + j0,25)}{j0,40 + j0,25 + j0,15} + j0,021 \\
 &= j0,125 + j0,021 + j0,2 + j0,021 \\
 &= j0,367 pu
 \end{aligned}$$

4.3 Menghitung reaktansi saluran saat terjadi gangguan



Gambar 4.3 Diagram reaktansi selama gangguan semua saluran ditanahkan dan dihubung Y untuk mencari impedansi pengganti

$$Z_1 = \frac{(X_{ST1})(X_{ST2})}{X_{ST1} + X_{ST3} + X_{ST2}}$$

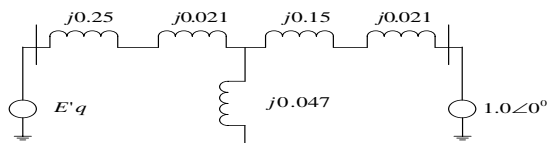
$$Z_1 = \frac{(j0,40)(j0,15)}{j0,40 + j0,25 + j0,15} = \frac{-0,06}{j0,80} = j0,075 pu$$

$$Z_2 = \frac{(X_{ST1})(X_{ST3})}{X_{ST1} + X_{ST3} + X_{ST2}}$$

$$Z_2 = \frac{(j0,40)(j0,25)}{j0,40 + j0,25 + j0,15} = \frac{-0,10}{j0,80} = j0,125 pu$$

$$Z_3 = \frac{(X_{ST2})(X_{ST3})}{X_{ST1} + X_{ST3} + X_{ST2}}$$

$$Z_3 = \frac{(j0,15)(j0,25)}{j0,40 + j0,25 + j0,15} = \frac{-0,0375}{j0,80} = j0,047 pu$$



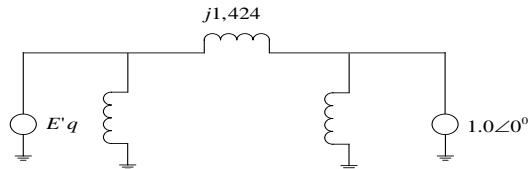
Gambar 4.4 Diagram reaktansi ketika saluran telah dihubung bintang

$$jX = \frac{(X_{ST3} + X_{T1})(Z_3) + (X_{ST3} + X_{T1})(X_{ST2} + X_{T2}) + (X_{ST2} + X_{T2})(Z_3)}{Z_3}$$

$$jX = \frac{(j0,271)(j0,047) + (j0,271)(j0,171) + (j0,171)(j0,047)}{j0,047} =$$

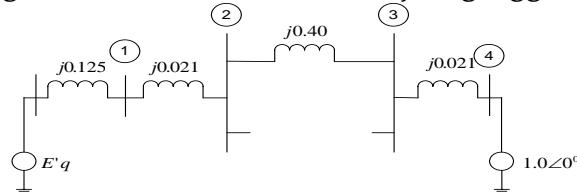
$$j0,271 + j0,171 + \frac{(j0,271)(j0,171)}{j0,047}$$

$$= j1,424 pu$$



Gambar 4.5 Diagram reaktansi setelah ditransformasikan Y-Δ

4.4 Menghitung reaktansi saluran setelah terjadi gangguan



Gambar 4.6 Diagram reaktansi setelah terjadi gangguan B1 dan B2 terbuka

$$jX = X_q + X_{T1} + X_{ST1} + X_{T2}$$

$$= j0,125 + j0,021 + j0,40 + j0,021 = j0.5673 pu$$

5.KESIMPULAN

Pengujian dan analisa program dengan membuka *breaker* dengan sudut pemutus (*Clearing Angle*) lebih kecil dari sudut pemutus kritis dan sebaliknya dengan membuka *breaker* dengan sudut pemutus (*Clearing Angle*) lebih besar dari sudut pemutus kritis.

Pada grafik 4.1. sebelum gangguan, daya yang dapat di pancarkan ialah $P_{maks} \sin \delta$, selama gangguan daya tersebut adalah $r_1 P_{maks} \sin \delta$, sedangkan $r_2 P_{maks} \sin \delta$ dan δ adalah daya yang dapat dipancarkan setelah gangguan tersebut diputuskan dengan saklar pada saluran pada saat $\delta = \delta_{cr}$, seperti pada δ_{cr} adalah sudut pemutusan kritis.

Sudut motor maju dari δ_0 ke sudut pemutus kritis δ_k yang berarti berubah dari titik B ke titik C. bila gangguan dihilangkan pada sudut δ_k , keluaran daya listrik mendadak naik ke titik D pada lengkung sudut daya.

Pada titik D, keluaran daya listrik P_e melebihi masukan daya mekanis P_m sehingga daya Percepatan P_a adalah negatif. Akibatnya kecepatan rotor menurun sementara P_e berubah dari titik D ke titik E. Pada titik E kecepatan rotor kembali serempak meskipun sudut rotor sudah maju sampai δ_{mak} . Sudut δ_{mak} ditentukan dari kriteria luas sama yaitu $A_1 = A_2$.

Dari pengujian program matlab yang ditunjukkan pada gambar 4.7. diatas maka hasil perhitungan sudut pemutus kritis (*critical clearing angle*) dengan metode kriteria sama luas didapat beberapa parameter, yaitu :

- a) Arus yang mengalir ke Inf Bus = 1-0,2i A
- b) Tegangan Internal Transient = 1,1238 V
- c) Sudut Kerja Awal = 17,9319 derajat
- d) Sudut Pemutus Kritis = 97,7832 derajat
- e) Ayunan Sudut Maksimum = 149,6813 derajat

DAFTAR PUSTAKA

- Cekdin Cekmas, 2006, "*Sistem Tenaga Listrik*", Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Dibyو H. L., 2008, "*Studi Kestabilan Transient Sistem Tenaga Listrik Multimesin (Model IEEE 9 Bus 3 Mesin*", Jurnal Teknika No.30 Vol.1 Thn. XV November 2008, Andalas.
- Dibyو H. L., dan Suri A., 2012, "*Studi Kestabilan Peralihan dengan Metoda Kriteria Sama Luas*", Jurnal Teknika Vol.19 No.1 April 2012, Andalas.
- Gross C.A., 1979, "*Power System Analysis*", John Wiley & Sons, New York.
- Hanselman, D., dan B. Littlefield, 2000, "*Matlab Bahasa Komputasi Teknis*", Penerbit Andi, Yogyakarta.
- L Bijang Nathaniel, 2012, "*Analisa Waktu Pemutusan Suatu Sistem Kelistrikan*", Jurnal Ilmiah Sains Vol.12 No.2 Oktober 2012, Politeknik Negeri Manado.
- Ontosena Penangsang dan Sabar Setya Widayat. 2001. "*Alalisa Stabilitas Transient Multimesin Dengan Metode Extended Equal Area Criterion*", PPs ITS Surabaya.
- Priyadi A., Arjana G., dan Penangsang O., 2012, "*Analisis Stabilitas Transient Pada Sistem Tenaga Listrik dengan Mempertimbangkan Beban Non-Linear*", Jurnal Teknik POMITS Vol.1 No.1 2012 PP 1-6, ITS Surabaya.
- Saadat Hadi, 1999, "*Power System Analysis*", Mc Graw Hill, New York.
- Scheid Francis, 1992, "*Analisis Numerik Teori dan Soal-Soal*", Erlangga, Jakarta.
- Stevenson W.D., 1996, "*Analisis Sistem Tenaga Listrik*", Erlangga, Jakarta.

- Sudibya Bambang, 2009, *"Penentuan Sudut Kritis Dan Waktu Kritis Pada Pembangkit Dengan Dua Generator"*, Jurnal Litek Volume 6 Nomor 2, September 2009, Jakarta.
- Sugiharto Aris, 2006, *"Pemrograman GUI dengan Matlab"*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Ulum Misbahul, 2007, *"Studi Stabilitas Transient Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Kriteria Luas Sama Menggunakan Matlab"*, Skripsi, ITS Surabaya.