

Analisa Stabilitas Transient STL Minahasa Menggunakan Metode Kriteria Luas Sama

Frietz Andrew Rotinsulu⁽¹⁾, Maickel Tuegeh, ST., MT.⁽²⁾, Lili S. Patras, ST., MT.⁽³⁾
 (1)Mahasiswa (2)Pembimbing 1 (3)Pembimbing 2

Jurusan Teknik Elektro-FT, UNSRAT, Manado-95115, Email: frietz.andrew@gmail.com

Abstrak

Listrik adalah bentuk energi sekunder yang paling praktis penggunaannya oleh manusia, Kebutuhan listrik di masyarakat semakin meningkat seiring dengan meningkatnya pemanfaatan tenaga listrik. Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem tenaga yang dapat melayani beban secara kontinyu tegangan dan frekwensi 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. 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 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. Kondisi peralihan dari sistem tenaga listrik pada saat gangguan dilukiskan secara matematis melalui persamaan diferensial. Teknik analisa data dilakukan dengan melakukan simulasi perhitungan dengan menggunakan matlab.

Mengambil permodelan dari Sistem Tenaga Listrik Minahasa pada PLTA Tonselama – GI Tonselama yang terdiri dari sebuah mesin dan 1 bus infinite dengan saluran transmisi ganda dimana gangguan terjadi pada salah satu saluran, dengan menggunakan metode kriteria luas sama dan matlab. Dapat dianalisa bahwa sistem tersebut mempunyai sudut kerja awal $14,605^{\circ}$, sudut pemutus kritis $108,381^{\circ}$, sudut ayunan maksimum 165.063° .

Kata Kunci : Analisa Sistem Tenaga Listrik, Metode Kriteria Luas Sama, Sistem Tenaga Listrik Minahasa, Stabilitas Transient.

Abstract

Electricity is a secondary form of energy most practical usage by humans, need for electricity in the community has increased along with the increasing use of electricity. Electric power system that is both power system that can serve as a continuous load voltage and constant frequency, voltage and frequency fluctuations that occur must be within the tolerance limits permitted that consumer electrical appliances can work well and safely. Therefore we need a power system

analysis to determine whether the system is stable or not in case of interruption. Transient stability based on the first swing stability conditions with periods of investigation in the first second disruption.

Taking modeling of Electric Power System Minahasa on hydropower Tonselama – Tonselama substation consisting of an engine and one infinite bus with multiple transmission channels where interference occurs on one channel, by using the same broad criteria and matlab. Can be analyzed that the system has a initial power angle $14,605^{\circ}$, critical clearing angle $108,381^{\circ}$, and maximum angle swing 165.063° .

Keywords: Electricity Power System of Minahasa, Equal Area Criterion, Power System Analysis, Transient Stability.

I. PENDAHULUAN

Listrik adalah bentuk energi sekunder yang paling praktis penggunaannya oleh manusia, dimana listrik dihasilkan dari proses konversi energi sumber primer seperti batubara, minyak bumi, gas, panas bumi, potensial air dan energi angin.

Kebutuhan listrik di masyarakat semakin meningkat seiring dengan meningkatnya pemanfaatan tenaga listrik pada peralatan-peralatan rumah tangga, kantor dan sebagainya, sehingga pasokan listrik harus ditambah yakni dengan pembangunan pembangkit listrik baru.

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 yang seketika, biasanya terjadi akibat adanya gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik, 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 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.

Metode kriteria luas sama (*Equal Area Criterion, EAC*) merupakan contoh metode langsung untuk memperoleh waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing time*), yang mana hanya terbatas untuk satu mesin saja dengan bus infinite (*Single Machine Infinite Bus, SMIB*). Kurva ayunan merupakan alat evaluasi 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. Untuk itu maka judul penulisan tugas akhir ini adalah “Analisa Stabilitas Transient STL Minahasa Menggunakan Metode Kriteria Luas Sama”.

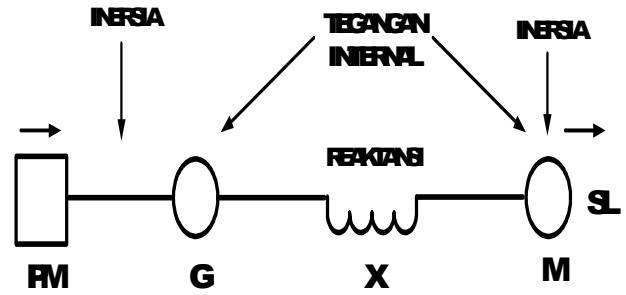
II. LANDASAN TEORI

A. Stabilitas Dalam Sistem Tenaga Listrik

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 dapat diklasifikasikan dalam beberapa tipe. Berikut tipe stabilitas sistem tenaga listrik.

Stabilitas Tetap (Steady State)

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



Gambar 1. Diagram Faktor-Faktor Utama Dalam Masalah Kestabilan

Keterangan :
 PM = Prime Mover
 G = Generator sinkron
 X = Reaktansi saluran
 SL = Sumbu beban

Stabilitas Peralihan (Transient)

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 sub-Peralihan (Dinamis)

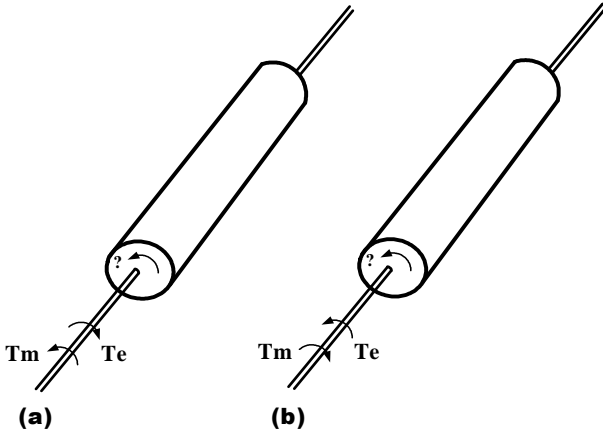
Stabilitas dinamis adalah bila setelah ayunan pertama (periode stabilitas *transient*) sistem mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru (stabilitas *transient* bila AVR dan *governor* bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisis)

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.

Masalah dalam stabilitas dapat dipengaruhi berbagai faktor yang dapat dilihat pada gambar 1. Faktor –faktor tersebut terbagi dalam faktor mekanis dan faktor listrik.

B. 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.



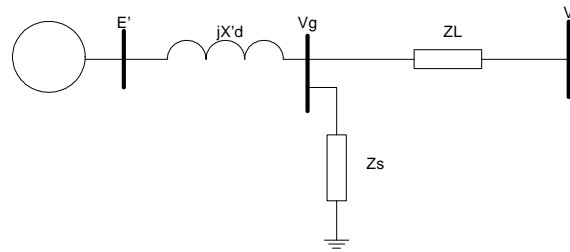
Gambar 2. Representasi Suatu Rotor Mesin Yang Membandingkan Arah Perputaran Serta Momen Putar Mekanis Dan Listrik Untuk Generator Dan Motor

Momen putar mekanis T_m dan momen putar listrik T_e dianggap positif untuk generator serempak. Ini berarti bahwa T_m adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah putaran θ_m yang positif seperti ditunjukkan Gambar 2a. Untuk generator yang bekerja dalam keadaan tetap, T_m dan T_e adalah sama sedangkan momen putar T_a sama dengan nol. Dalam keadaan ini tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan serempak. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan penggerak mula dikatakan dalam keadaan serempak dengan mesin lainnya yang bekerja pada kecepatan serempak dalam sistem daya tersebut. Penggerak mulanya mungkin berupa suatu turbin air atau turbin uap dan untuk masing-masing turbin sudah ada model dengan bermacam-macam tingkat kesulitan untuk melukiskan pengaruh pada T_m .

T_m dianggap konstan pada setiap keadaan kerja yang diberikan. Anggapan ini cukup baik untuk beberapa generator meskipun masukan dari penggerak mulanya diatur oleh regulator (*governor*). Regulator tidak bekerja sebelum dirasakan perubahan pada kecepatan. Momen putar listrik T_e bersesuaian dengan daya bersih celah udara mesin. Dengan demikian adalah daya keluaran total dari generator ditambah dengan rugi-rugi $|I^2| R$ dalam gulungan jangkar. Dalam motor serempak arah aliran daya berlawanan dengan generator. Oleh karena itu untuk motor, T_e dan T_m akan terbalik tandanya seperti ditunjukkan dalam Gambar 2b. Di sini T_e adalah daya celah udara yang diberikan oleh sistem tenaga listrik untuk menggerakkan rotor, sedangkan T_m merupakan momen putar tandingan (*counter torque*) beban dan rugi putaran yang cenderung untuk memperlambat rotor.

C. Pemodelan Mesin Serempak Untuk Studi Kestabilan

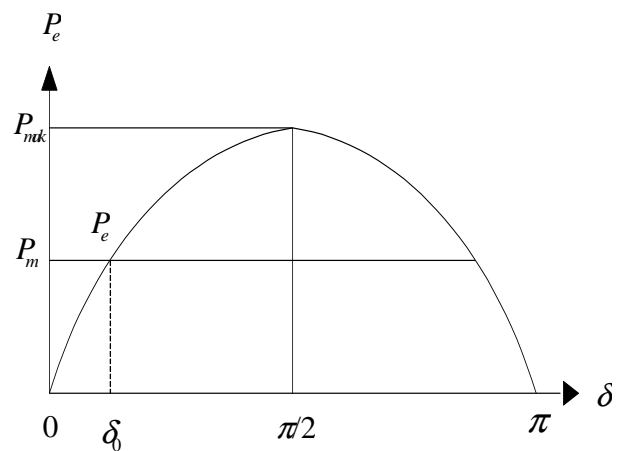
Sebuah generator dihubungkan ke infinite bus, seperti yang dapat dilihat pada gambar 3. Dimana Tegangan generator adalah konstan dengan reaktansi transient sumbu langsung X'_d . Representasi titik tegangan terminal generator V_g dapat dieliminasi dengan



Gambar 3. Generator Dihubungkan Dengan Infiinite Bus

Dimana :

- P_e = Daya listrik
- E' = EMF generator
- V = Tegangan infinite bus
- X_{12} = Reaktansi saluran
- $\sin \delta$ = Sudut daya



Gambar 4. Kurva Sudut Daya

mentransformasikan impedansi dari hubungan Y ke hubungan Δ .

Melalui gambar 3 dapat diturunkan sebuah persamaan, yang dapat dilihat pada persamaan 1

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \sin \delta \tag{1}$$

Dari persamaan 1 dapat diperoleh hubungan bahwa daya yang ditransmisikan tergantung pada reaktansi X_{12} dan sudut δ yang dikenal sebagai kurva sudut daya yang diperlihatkan oleh gambar 4.

Daya maksimum dapat dipandang sebagai batas stabilitas keadaan mantap (*Steady State Stability Limit*), terjadi pada sudut 90° . Maka persamaan 1 berubah menjadi persamaan 2

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \tag{2}$$

Sehingga diperoleh persamaan daya listrik dalam bentuk P_{max} seperti ditunjukkan oleh persamaan 3

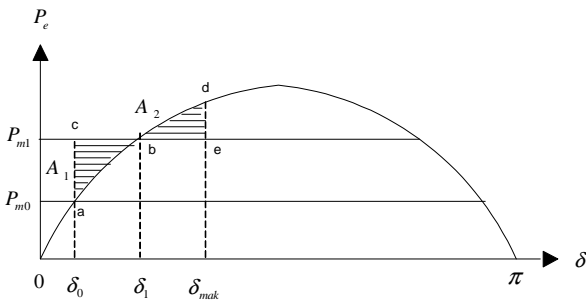
$$P_e = P_{max} \sin \delta \tag{3}$$

Dimana P_{max} adalah Daya maksimum

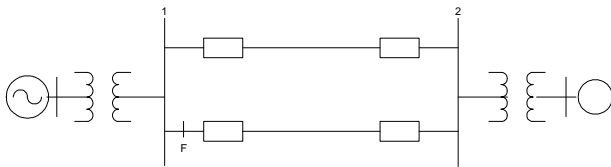
Jika Jika generator tiba-tiba terhubung singkat, maka tegangan E' dapat dihitung menggunakan persamaan 4

$$E = V_g + jX'_d I_a \tag{4}$$

Dengan I_a adalah arus generator sebelum gangguan.



Gambar 5. Kriteria Luas Sama Pada Perubahan Beban Mendadak



Gambar 6. Sistem Satu Mesin Terhubung Ke Infinite Bus, Gangguan Tiga Fasa Pada F

D. Menentukan Stabilitas Transient Dengan Menggunakan 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.

Secara keseluruhan, metode kriteria luas sama dapat dilihat pada gambar 5. Mesin bekerja pada titik setimbang δ_0 . Pada titik ini daya input mekanik $P_{m0} = P_{e0}$ seperti ditunjukkan oleh 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 dapat dihitung dengan persamaan 5.

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = \text{luas abc} = \text{luas } A_1 \tag{5}$$

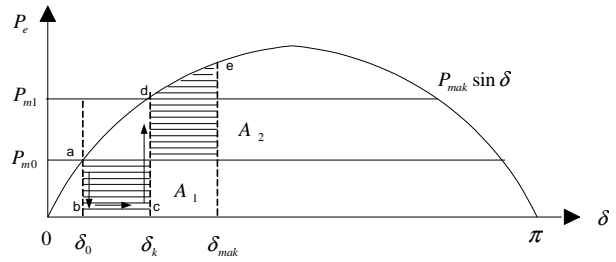
Dengan penambahan δ , daya listrik bertambah, dan pada saat $\delta = \delta_1$ maka daya input yang baru adalah P_{m1} . Walaupun daya percepatan adalah nol pada titik ini, rotor berputar di atas kecepatan serempak. Oleh karena itu sudut daya δ dan daya listrik P_e bertambah secara kontinyu.

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 dapat dihitung menggunakan persamaan 6.

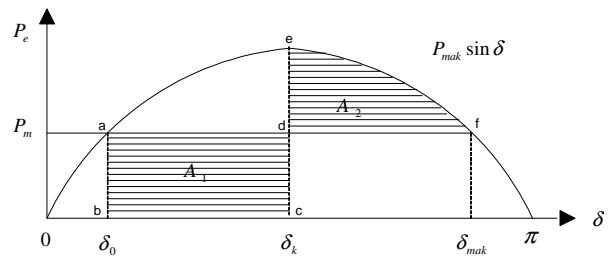
$$\int_{\delta_1}^{\delta_{mak}} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{luas bde} = \text{luas } A_2 \tag{6}$$

Dari persamaan 5 dan persamaan 6 diperoleh persamaan 7 yang dikenal sebagai kriteria luas sama.

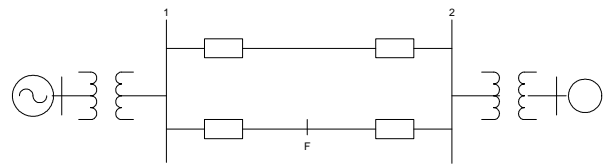
$$|\text{luas } A_1| = |\text{luas } A_2| \tag{7}$$



Gambar 7. Kriteria Luas Sama Untuk Gangguan Tiga Fasa Pada Ujung Kirim



Gambar 8. Kriteria Luas Sama untuk mencari sudut pemutus kritis akibat gangguan tiga fasa pada ujung kirim



Gambar 9. Sistem satu mesin terhubung ke infinite bus, gangguan tiga fasa pada F

E. Aplikasi Pada Gangguan Tiga Fasa

Gangguan pada sistem tenaga listrik ada berbagai jenis dan yang paling jarang terjadi adalah gangguan 3 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.

Sebuah generator di hubungkan ke infinite bus melalui dua kawat paralel seperti yang terlihat pada gambar 6, 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 dan daya yang dialirkan ke sistem dengan sudut δ_0 .

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 yang dapat dilihat pada gambar 7. Pada gambar 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 persamaan 8, dan kurva daya menjadi gambar 8

$$\cos \delta_k = \frac{P_{in}}{P_{mak}} (\delta_{mak} - \delta_0) + \cos \delta_{mak} \tag{8}$$

Lokasi gangguan F yang terpisah (jauh) dari sisi kirim, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 9. Jika daya ditransfer sebelum gangguan adalah $P_{mak} \sin \delta$, maka selama gangguan daya di transfer adalah $r_1 P_{2mak} \sin \delta$. Dengan menggunakan kriteria luas sama dapat ditentukan sudut pemutus kritis menggunakan persamaan 9.

$$\cos \delta_k = \frac{(P_m / P_{mak})(\delta_{mak} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{mak} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \tag{9}$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Waktu pelaksanaan pengumpulan data dilakukan pada bulan february 2013 sampai bulan juni 2014. Pengambilan data ini dilakukan di PT.PLN (persero) Wilayah Suluttenggo AP2B Sistem Minahasa (Jl. Raya Tomohon Tondano) Tomohon.

B. Bahan dan Peralatan

Berikut adalah peralatan yang digunakan dalam penelitian:

Personal Computer (PC)

Personal Computer (PC) merupakan perangkat keras (*hardware*) yang berfungsi sebagai tempat untuk mengolah data dan menyusun laporan penelitian.

Microsoft Office Word 2007

Microsoft Office Word 2007 merupakan perangkat lunak (*software*) yang digunakan dalam menyusun laporan penelitian.

Internet (Interconnection-Networking)

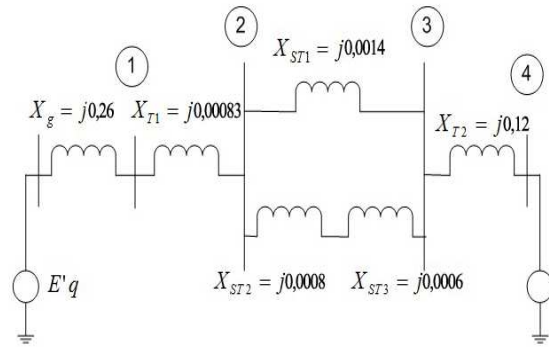
Internet atau kependekan dari *interconnection-networking* merupakan media yang digunakan dalam mencari referensi yang berhubungan dengan pengolahan data dan laporan penelitian.

MATLAB R2009a

MATLAB R2009a merupakan perangkat lunak (*software*) yang berupa bahasa pemrograman untuk mengolah data yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian.

C. Data Teknis

Data – data yang akan digunakan dalam penelitian antara lain.



Gambar 10. Diagram Reaktansi Saluran PLTA Tonselama – GI Tonselama

PLTA Tonselama

Unit 1

Kapasitas (MVA)	= 5,55
Daya terpasang (MW)	= 4,44
Daya mampu (MW)	= 2,8
Tegangan (kV)	= 15
X source (pu)	= 1

Unit 2

Kapasitas (MVA)	= 5,63
Daya terpasang (MW)	= 4,5
Daya mampu (MW)	= 3,7
Tegangan (kV)	= 6,3
X source (pu)	= 0,13

Unit 3

Kapasitas (MVA)	= 6,8
Daya terpasang (MW)	= 5,44
Daya mampu (MW)	= 3
Tegangan (kV)	= 6,3
X source (pu)	= 0,13

Transformator

PLTA Tonselama

Tegangan (kV)	= 30/70
MVA	= 12
X (pu)	= 0,000833

PLTA Tonselama Unit 1

Tegangan (kV)	= 15/30
MVA	= 5,5
X (pu)	= 0,0001

PLTA Tonselama Unit 2

Tegangan (kV)	= 6/30
MVA	= 6
X (pu)	= 0,0001

PLTA Tonselama Unit 3

Tegangan (kV)	= 6/30
MVA	= 6,8
X (pu)	= 0,0001

GI Tonselama

Tegangan (kV)	= 70/20
MVA	= 20
X (pu)	= 0,12

Jaringan Transmisi

GI Tonselama – PLTA Tonselama

- R (pu) = 0,007
- X (pu) = 0,14
- Panjang saluran (km) = 0,387

Sedangkan diagram reaktansi saluran dapat dilihat pada gambar 10

D. Flowchart Program

Flowchart Program dapat dilihat pada gambar 11

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Besaran Per Unit (pu)

Daya Terpasang Pembangkit

- Daya Terpasang total = 4,44 + 4,5 + 5,44 = 10,38 MW
- Besaran dasar daya = 5,55 + 5,63 + 6,8 = 17,98 MVA

$$\text{Daya Terpasang (pu)} = \frac{10,38\text{MW}}{17,98\text{MVA}} = 0,57 \text{ pu}$$

Daya Mampu Pembangkit

Daya mampu total = 2,8 + 3,7 + 3 = 9,5 MW

$$\text{Daya Mampu (pu)} = \frac{9,5\text{MW}}{17,98\text{MVA}} = 0,52 \text{ pu}$$

EMF Generator

$$I = \frac{17,98\text{MVA}}{66\text{kV}} = 0,27 \text{ pu}$$

$$E = 0,94 + 0,38153 \cdot 0,27 = 0,94 - 0,1030 = 0,837 \text{ pu}$$

Tegangan Infinite Bus

$$\text{Tegangan Infinite Bus (pu)} = \frac{66\text{kV}}{70\text{kV}} = 0,94 \text{ pu}$$

B. Menghitung Reaktansi Saluran

Dalam menghitung reaktansi saluran, kita akan melakukan penghitungan sebanyak 3(tiga) kali, yaitu

Reaktansi Saluran Sebelum Terjadi Gangguan

Berdasarkan gambar 10, maka reaktansi sebelum gangguan adalah

$$jX = j0,26 + j0,00083 + \frac{(j0,0014)(j0,008 + j0,006)}{j0,014 + j0,008 + j0,006} + j0,12$$

$$= j0,26083 + j0,0007 + j0,12$$

$$= j0,38153 \text{ pu}$$

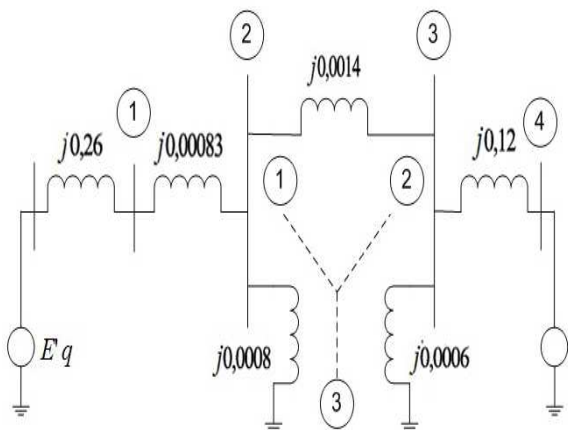
Reaktansi Saluran Saat Terjadi Gangguan

Saat terjadi gangguan, gambar 10 akan menjadi gambar 12

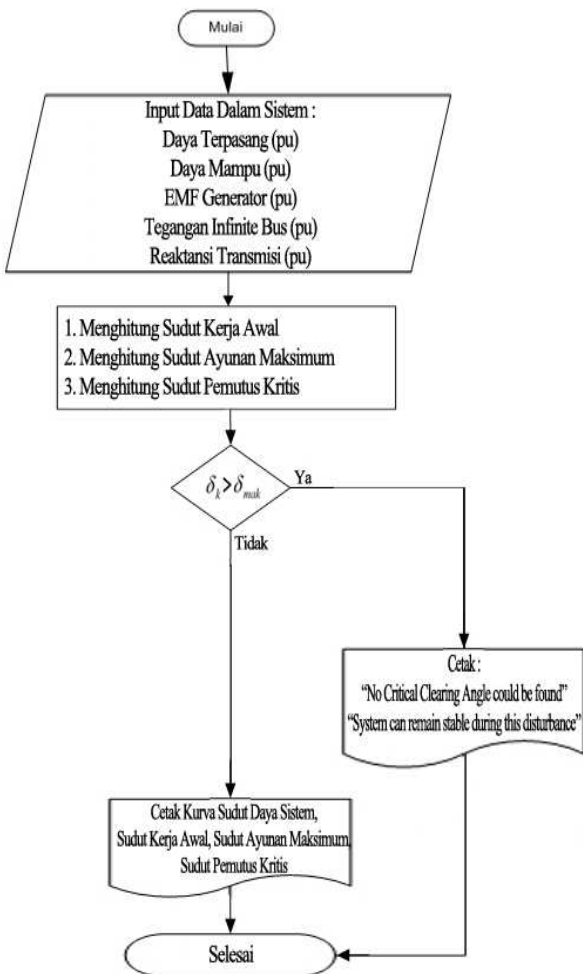
Sedangkan impedansi pengganti saluran adalah

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

$$= \frac{(j0,014)(j0,008)}{j0,014 + j0,008 + j0,006}$$



Gambar 12. Diagram Reaktansi Selama Gangguan Semua Saluran Ditanahkan Dan Dihubung Y Untuk Mencari Impedansi Pengganti



Gambar 11. Flowchart Program

$$= \frac{-0.0000112}{j0,028} = j0,004 pu$$

$$Z_2 = \frac{(X_{ST1})(X_{ST3})}{X_{ST1} + X_{ST3} + X_{ST2}} = \frac{(j0,014)(j0,006)}{j0,014 + j0,008 + j0,006} = \frac{-0.000084}{j0,028} = j0,003 pu$$

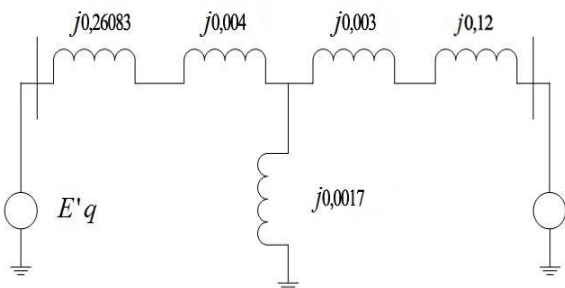
$$Z_3 = \frac{(X_{ST2})(X_{ST3})}{X_{ST1} + X_{ST3} + X_{ST2}} = \frac{(j0,008)(j0,006)}{j0,014 + j0,008 + j0,006} = \frac{-0.000048}{j0,028} = j0,0017 pu$$

Dari impedansi pengganti di atas, gambar 12 berubah menjadi gambar 13, sedangkan reaktansi salurannya adalah

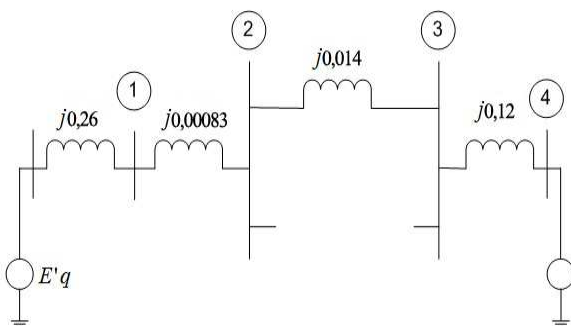
$$jX = \frac{(X_q + X_{T1})(Z_3) + (X_q + X_{T1})(Z_2 + X_{T2}) + (Z_2 + X_{T2})(Z_3)}{Z_3} = \frac{(j0,26083)(j0,004) + (j0,26083)(j0,123) + (j0,123)(j0,0017)}{j0,0017} = j0,26083 + j0,123 + \frac{(j0,26083)(j0,123)}{j0,0017} = j19,25 pu$$

Reaktasi Saluran Setelah Terjadi Gangguan

Setelah terjadi gangguan, gambar 10 akan menjadi gambar 13



Gambar 12. Diagram Reaktansi Ketika Saluran Telah Dihubung Bintang



Gambar 13. Diagram Reaktansi Saluran Setelah Terjadi Gangguan

Dengan reaktansi saluran

$$jX = X_q + X_{T1} + X_{ST1} + X_{T2} = j0,26 + j0,00083 + j0,014 + j0,12 = j0,39 pu$$

C. Pengujian Dan Analisa Program

Setelah menghitung reaktansi saluran sebelum gangguan, saat gangguan dan setelah gangguan. Data-data yang ada dimasukkan ke dalam program *MATLAB R2009a* dan diperoleh hasil.

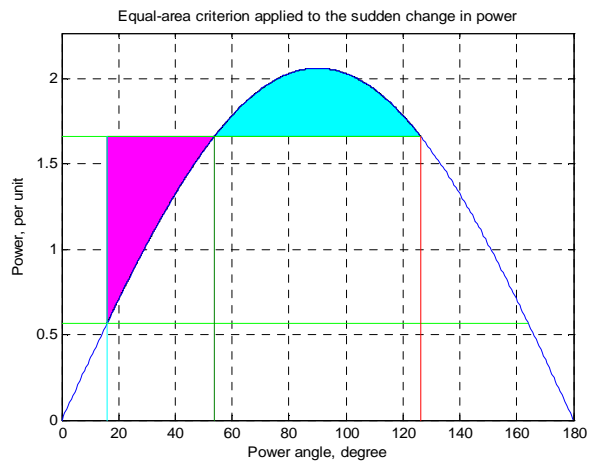
STL Tonselama Sebelum Gangguan

Kurva sudut daya pada STL Minahasa sebelum terjadi gangguan dapat dilihat pada gambar 13 beserta output

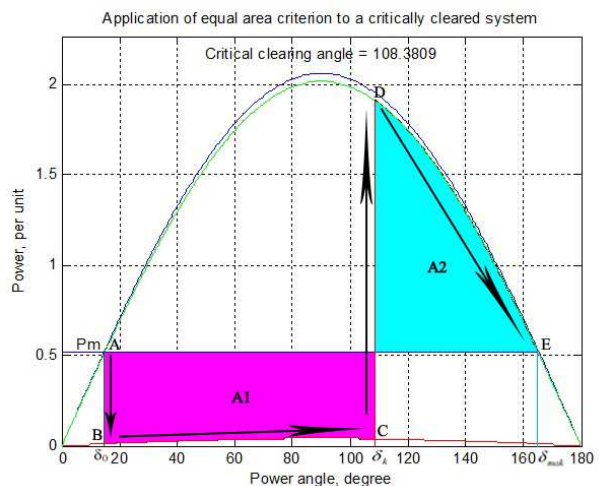
- Initial power* = 0.570 p.u.
- Initial power angle* = 16.046°
- Sudden additional power* = 1.094 p.u.
- Total power for critical stability* = 1.664 p.u.
- Maximum angle swing* = 126.189°
- New operating angle* = 53.811°

STL Tonselama Setelah Gangguan Menggunakan Metode Kriteria Luas Sama

Setelah mengalami gangguan, kurva sudut daya berubah mejadi seperti yang dapat dilihat pada gambar 14 beserta output



Gambar 13. Kurva Sudut Daya STL Tonselama Sebelum Gangguan



Gambar 13. Kurva Sudut Daya STL Tonselama Setelah Gangguan Menggunakan Metode Kriteria Luas Sama

$$\begin{aligned} \text{Initial power angle} &= 14.605^\circ \\ \text{Maximum angle swing} &= 165.063^\circ \\ \text{Critical clearing angle} &= 108.381^\circ \end{aligned}$$

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 $A_1 = A_2$.

V. KESIMPULAN

Dengan menggunakan STL pada PLTA Tonsealama – GI Tonsealama sebagai percontohan STL Minahasa, yang terdiri dari sebuah mesin dan 1 bus infinite dengan saluran transmisi ganda dimana gangguan tiga fasa terjadi pada salah satu saluran maka dengan metode kriteria luas sama menggunakan *MATLAB R2009a* diperoleh *initial power angle* 14.605° , *maximum angle swing* 165.063° , *Critical clearing angle* 108.381° .

Bila *breaker* terbuka dengan sudut clearing (*Clearing Angle*) sama dengan atau kurang dari sudut kritis ($\delta_p \leq \delta_k$) akan didapatkan kestabilan kembali dalam sistem tenaga listrik tersebut. Bila *breaker* terbuka dengan sudut clearing (*Clearing Angle*) lebih besar dari sudut kritis ($\delta_p > \delta_k$) tidak akan didapatkan kestabilan artinya sistem tenaga listrik tersebut mengalami gangguan total. Jika diperoleh luasan A_2 lebih besar dari A_1 ($A_2 > A_1$) maka sistem akan mengalami gangguan permanen yang tidak dapat suatu sistem mencapai suatu kestabilan kembali, tetapi sebaliknya jika diperoleh luasan A_1 lebih kecil atau sama dengan A_2 ($A_1 \leq A_2$) maka sistem akan didapatkan kestabilan kembali dalam sistem tenaga listrik tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.C.Gross, *Power System Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1979,
- [2] C.Cekdin, *Sistem Tenaga Listrik*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2006,
- [3] D.Hanselman, B.Littlefield, *Matlab Bahasa Komputasi Teknis*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2000
- [4] F. Scheid, *Analisis Numerik Teori dan Soal-Soal*. Penerjemah Pantur Silaban Ph.D, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1992,
- [5] J.C.Das, *Transient in Electrical Systems*, McGraw Hill, 2010,
- [6] P.S.R. Murty Prof, *Power System Analysis*, BS Publisher, 2007,
- [7] W. D. Stevenson Jr., *Analisa Sistem Tenaga Listrik*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1984,
- [8] Y.Hase, *Handbook of Power System Engineering*, Wiley, England, 2007.