

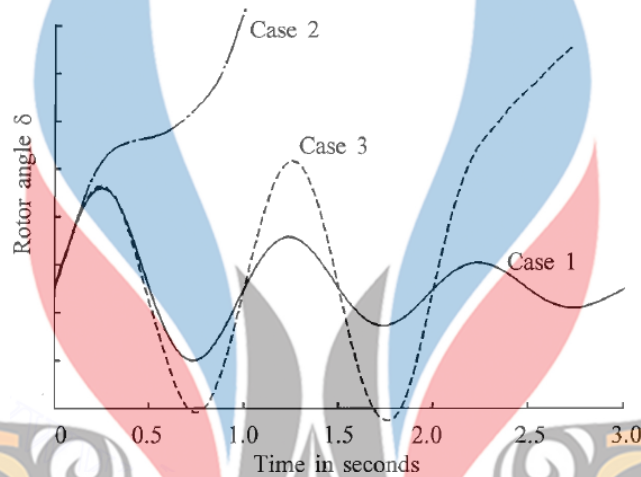
BAB 2  
www.itk.ac.id  
TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Kestabilan Transien Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga dengan kondisi *steady state* dianggap konstan dan dapat dilakukan analisis. Ketika beroperasi dalam kondisi *steady state* jika terjadi perubahan beban secara tiba-tiba, maka sistem telah mengalami gangguan dari kondisi stabilnya, kondisi *steady state*. Pada kestabilan terdapat gangguan besar dan gangguan kecil. Gangguan besar merupakan salah satu persamaan nonlinier yang menggambarkan dinamika sistem tenaga yang tidak mampu dilinearisasi untuk keperluan analisis. Gangguan pada sistem transmisi, perubahan beban yang mendadak, pelepasan unit pembangkit, dan penggantian saluran adalah contoh gangguan besar. Gangguan kecil yang terjadi berupa perubahan *gain* dari pengatur tegangan otomatis dalam sistem eksitasi dari unit pembangkit yang besar atau fluktuasi permintaan beban. Sistem dapat dikatakan stabil apabila dapat kembali ke kondisi *steady state* setelah gangguan kecil. Jika gangguan besar, kondisi *steady state* yang dicapai dikatakan stabil secara sementara. (Grainger & Stevenson, 1994).

Studi kestabilan transien menggunakan gangguan besar. Kestabilan transien berdasarkan ayunan pertama. Stabilitas transien ayunan pertama studi menggunakan model generator yang cukup sederhana yang terdiri dari tegangan internal  $E$  sementara dan reaktansi transien  $X_d$ . Dalam studi tersebut sistem eksitasi dan sistem kontrol yang mengatur turbin dari unit pembangkit diabaikan. Biasanya, periode waktu dalam studi kestabilan adalah detik pertama setelah terjadi gangguan. Jika mesin-mesin dari sistem tidak mengalami osilasi pada sudut rotor, pada dasarnya dalam sinkronisasi dalam detik pertama sistem dianggap stabil secara sementara. Studi stabilitas *multiswing* diperpanjang selama periode studi yang lebih lama, dan karena itu efek dari sistem kontrol unit pembangkit harus dipertimbangkan karena dapat mempengaruhi kinerja dinamis unit selama periode yang diperpanjang (Grainger & Stevenson, 1994).

Gambar 2.1 merupakan skema dari alur kejadian transien saat mengalami gangguan hubung singkat. Titik 1 merupakan titik kerja awal (sebelum terjadi gangguan). Pada poin 2 timbul gangguan yang mengakibatkan daya *output* generator turun secara drastis. Selisih antara daya *output* listrik tersebut dan daya mekanis turbin mengakibatkan rotor generator mengalami percepatan, sehingga sudut rotor bertambah besar (Kundur, 1994).



Gambar 2.1 Respon sudut rotor terhadap gangguan transien (Kundur, 1994)

Gambar 2.1 merepresentasikan perilaku mesin sinkron untuk kondisi stabil dan tidak stabil. Gambar 2.1 menunjukkan respons sudut rotor untuk kasus stabil dan untuk dua kasus tidak stabil. Pada kasus 1, sudut rotor meningkat ke maksimum, kemudian berkurang dan berosilasi dengan amplitudo menurun hingga mencapai kondisi stabil. Pada kasus 2, sudut rotor terus meningkat sampai sinkronisasi hilang. Ketidakstabilan ini disebut sebagai ketidakstabilan ayunan pertama (*first swing*) dan disebabkan oleh torsi sinkronisasi yang kurang mampu menahan osilasi saat gangguan. Pada kasus 3, sistem stabil pada ayunan pertama tetapi menjadi tidak stabil akibat osilasi yang meningkat. Bentuk ketidakstabilan ini umumnya terjadi ketika kondisi *steady state* setelah gangguan sinyal kecil yang menyebabkan sudut rotor menjadi tidak stabil (Kundur, 1994).

Dalam studi stabilitas transien, waktu studi yang dijadikan acuan biasanya dibatasi dari 3 hingga 5 detik setelah gangguan, akan tetapi ada juga yang melebihi 10 detik untuk sistem yang sangat besar dengan mode osilasi interarea yang dominan (Kundur, 1994).

## 2.2 Aliran Daya *Newton-Raphson*

Karena konvergensi kuadratnya, metode *Newton-Raphson* secara matematis lebih unggul daripada metode *Gauss Seidel* dan hasil yang diperoleh kurang rentan terhadap divergensi dengan masalah yang tidak terkondisikan. Untuk sistem kelistrikan yang besar, metode *Newton-Raphson* lebih efisien dan praktis. Semakin tinggi jumlah iterasi yang dilakukan, semakin akurat hasil yang didapat. Karena dalam masalah aliran daya, daya aktif dan besarnya tegangan ditentukan untuk bus yang dikendalikan tegangan. Persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Persamaan dapat ditulis dalam bentuk matriks admitansi bus (Saadat, 1999).

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.1)$$

Dari persamaan di atas dapat diketahui  $j$  termasuk bus is. Jika persamaan diubah ke dalam polar maka didapat

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.2)$$

Daya kompleks pada bus  $I$  dapat dirumuskan sebagai

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.3)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2) ke dalam persamaan (2.3), akan didapat persamaan

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.4)$$

Untuk mendapatkan nilai daya aktif dan daya reaktif, maka daya aktif dan daya reaktif dapat dipisahkan menjadi persamaan baru seperti persamaan (2.5) dan (2.6).

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.5)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.6)$$

Persamaan (2.5) dan (2.6) merupakan persamaan aljabar nonlinier dengan variabel independen, besarnya tegangan dalam *per-unit*, dan sudut fasa dalam radian. Persamaan untuk setiap bus beban diberikan oleh persamaan (2.5) dan (2.6) dan

satu persamaan untuk setiap *bus voltage control*, yang diberikan oleh persamaan (2.5). Penjabaran persamaan (2.5) dan persamaan (2.6) dalam matriks seri *Taylor* tentang perkiraan awal dengan mengabaikan semua hasil persyaratan urutan, maka didapat bentuk matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

dalam persamaan (2.7), *bus 1* diasumsikan sebagai *slack bus*. Matriks *Jacobian* memberikan hubungan linier antara perubahan kecil dalam sudut tegangan  $\Delta \delta_i^{(k)}$  dan besarnya tegangan  $\Delta |V_i^{(k)}|$  dengan perubahan kecil dalam daya aktif dan daya reaktif,  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$ . Elemen dari matriks *Jacobian* adalah turunan parsial dari 3 dan 5, dievaluasi  $\Delta \delta_i^{(k)}$  dan  $\Delta |V_i^{(k)}|$ . Dalam penyederhanaannya, dapat ditulis sebagai berikut (Saadat, 1999).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Untuk *bus* tegangan, besaran tegangan diketahui. Oleh karena itu, jika *bus m* dari sistem adalah *bus* tegangan, persamaan *m* yang melibatkan  $\Delta Q$ ,  $\Delta V$ , dan kolom yang sesuai dari matriks *Jacobian* dihilangkan. Dengan demikian, batasan daya aktif  $n - 1$  dan batasan daya reaktif  $n - 1 - m$ , dan matriks *Jacobian* adalah orde  $(2n - 2 - m) \times (2n - 2 - m)$ . Elemen  $J_1$  adalah urutan  $(n - 1) \times (n - 1)$ ,  $J_2$  adalah urutan  $(n - 1) \times (n - 1 - m)$ ,  $J_3$  adalah urutan  $(n - 1 - m) \times (n - 1)$ , dan  $J_4$  adalah urutan  $(n - 1 - m) \times (n - 1 - m)$ . Maka elemen diagonal dan luar diagonal dari  $J_1$  adalah

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.10)$$

Elemen diagonal dan luar diagonal dari  $J_2$

[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.12)$$

Elemen diagonal dan luar diagonal dari  $J_3$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.14)$$

Elemen diagonal dan luar diagonal dari  $J_4$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.16)$$

Istilah  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  adalah perbedaan antara nilai yang dihitung, dikenal sebagai residu daya, diberikan oleh

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.17)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.18)$$

Persamaan untuk nilai tegangan baru pada *bus* adalah

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.19)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.20)$$

Adapun langkah-langkah untuk mengerjakan aliran daya dengan metode *newton-raphson* adalah sebagai berikut:

[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)

1. Untuk *Load bus*, di mana  $P_i^{sch}$  dan  $Q_i^{sch}$  yang telah ditentukan, besaran tegangan dan sudut fase diatur sama dengan nilai *slack bus*, atau 1,0 dan 0,0, yaitu,  $|V_i^{(k)}| = 1,0$  dan  $\delta_i^{(0)} = 0$ . Untuk *bus voltage control*, dimana  $|V_i|$  dan  $P_i^{sch}$  telah ditentukan, maka sudut fase diatur sama dengan sudut *slack bus* atau bernilai 0,  $\delta_i^{(0)} = 0$ .
2. Untuk *Load bus*,  $P_i^{(k)}$  dan  $Q_i^{(k)}$  dihitung menggunakan persamaan (2.5) dan (2.6). Untuk mencari nilai  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  dapat dihitung menggunakan persamaan (2.5) dan (2.17).
3. Pada *bus voltage controlled*,  $P_i^{(k)}$  dan  $\Delta P_i^{(k)}$  dihitung menggunakan persamaan (2.4) dan (2.5) secara berurutan.
4. Elemen dari matrix Jacobian ( $J_1, J_2, J_3, J_4$ ) dicari dari persamaan mulai dari persamaan (2.9) sampai persamaan (2.16).
5. persamaan simultan linier (2.8) diselesaikan secara langsung dengan faktorisasi segitiga tersusun secara optimal dan eliminasi *gaussian*
6. Nilai besaran tegangan dan sudut fasa yang baru dapat dihitung menggunakan persamaan (2.19) dan (2.20).
7. Proses dilanjutkan sampai nilai daya residu  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  kurang dari akurasi atau eror yang ditentukan

$$|\Delta P_i^{(k)}| \leq \epsilon \quad (2.21)$$

$$|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \epsilon \quad (2.22)$$

### 2.3 Per-unit Impedansi

Saluran transmisi daya dioperasikan pada tingkat tegangan dimana *kilovolt* (kV) adalah unit yang paling sering digunakan untuk mengekspresikan tegangan. Karena besarnya jumlah daya yang ditransmisikan, *kilowatt* atau *megawatt* dan *kilovoltampere* atau *megavoltampere* memiliki satuan yang sama. Namun, jumlah ini serta *ampere* dan *ohm* sering dinyatakan sebagai persen atau *per-unit* dari basis (*base*) atau nilai referensi yang ditentukan untuk masing-masing satuan. Misalnya,

jika tegangan dasar 120 kV dipilih, tegangan 108 kV, 120kV, dan 126 kV menjadi 0,90, 1,00, dan 1,05 *per-unit*. Pada nilai *per-unit* kuantitas apa pun didefinisikan sebagai perbandingan jumlah terhadap basisnya. Rasio dalam persen adalah 100 kali nilai dalam per unit. Baik metode perhitungan persen dan *per-unit* akan lebih sederhana dan seringkali lebih informatif daripada penggunaan *ampere*, *ohm*, dan *volt*. Metode *per-unit* memiliki keunggulan dibandingkan metode persen karena produk dari dua metode ini dinyatakan dalam *per-unit* itu sendiri. Tetapi produk dari dua metode pu yang dinyatakan dalam persen harus dibagi menjadi 100 untuk mendapatkan hasilnya dalam persen (Grainger & Stevenson, 1994).

$$I_{Base} = \frac{kVA_{base}}{kV_{base}} \quad (2.23)$$

$$Z_{Base} = \frac{I_{Base}}{V_{base}} \quad (2.24)$$

$$Z_{Base} = \frac{(kV_{base})^2 \times 1000}{kVA_{base}} \quad (2.25)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}} \quad (2.26)$$

Impedansi *per-unit* komponen suatu sistem dinyatakan pada *base*. Karena semua impedansi dalam salah satu bagian sistem harus dinyatakan pada *base* impedansi yang sama, maka perlu adanya metode untuk mengkonversi impedansi *per-unit* dari satu *base* ke *base* lainnya. Dengan mensubstitusikan *base* impedansi yang diberikan oleh persamaan (2.25) pada impedansi *base* ke dalam persamaan (2.26) akan diperoleh (Grainger & Stevenson, 1994).

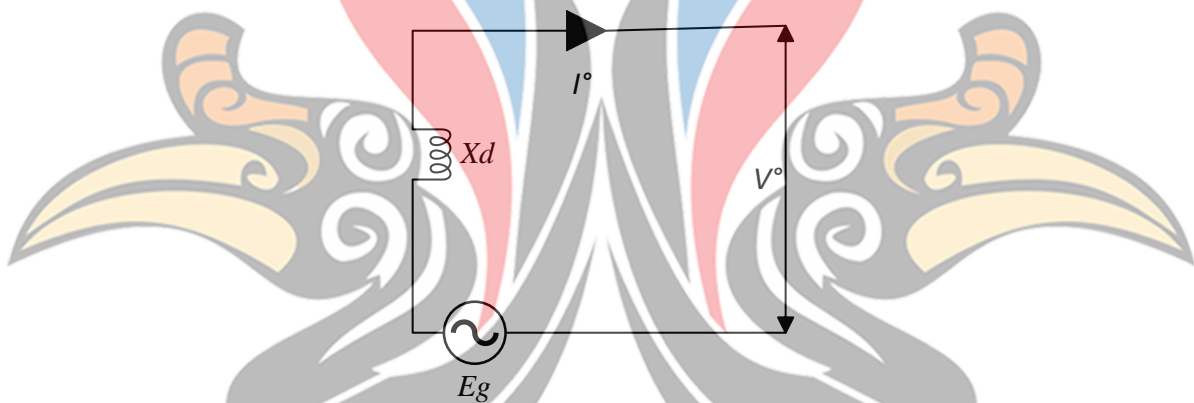
$$Z_{pu} = \frac{(Z_{actual}) \times (kVA_{base})}{(kV_{base})^2 \times 1000} \quad (2.27)$$

Persamaan (2.27) menunjukkan bahwa *per-unit* impedansi berbanding lurus dengan *ampere base*, *kilovolt base* dan berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan *base*. Oleh karena itu, untuk mengubah dari impedansi *per-unit* pada *base* tertentu ke impedansi *per-unit* pada *base* baru, persamaan berikut berlaku (Grainger & Stevenson, 1994).

$$Z_{new} = Z_{old} \left( \frac{kV_{old}}{kV_{new}} \right)^2 \left( \frac{kVA_{new}}{kVA_{old}} \right) \quad (2.28)$$

## 2.4 Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa pada mesin sinkron berbeban

Gangguan hubung singkat 3 fasa merupakan gangguan yang jarang terjadi, namun gangguan tersebut adalah gangguan yang sangat berbahaya yang berlangsung dengan sangat cepat jika terjadi disuatu sistem kelistrikan. Gambar 2.2 menunjukkan model rangkaian generator sinkron yang beroperasi dibawah kondisi stabil. Generator memberikan arus ke beban sebesar  $I^\circ$  ke bus pada tegangan terminal  $V$ .  $E_g$  adalah tegangan emf terinduksi dalam kondisi berbeban dan  $X_d$  adalah reaktansi sinkron langsung dari mesin (Nagrath & Kothari, 1987).



Gambar 2.2 Model rangkaian ekivalen mesin sinkron berbeban (Nagrath & Kothari, 1987)

Untuk menghitung tegangan internal generator dalam kondisi transien maupun subtransien, gambar 2.3 merepresentasikan permodelan persamaan maka diperoleh (Nagrath & Kothari, 1987).

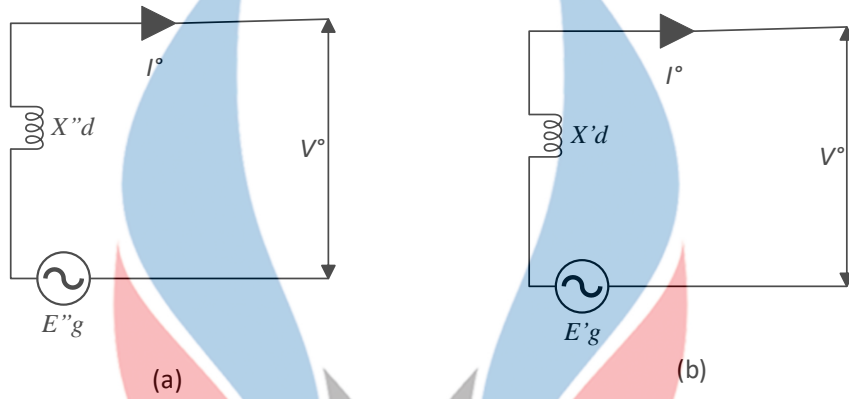
$$E_g'' = V + jX_d'' I^\circ \quad (2.29)$$

$$E_g' = V + jX_d' I^\circ \quad (2.30)$$

Dimana  $E_g''$  merupakan tegangan internal generator dengan subtransien reaktansi dan  $E_g'$  merupakan tegangan internal generator dengan transien reaktansi.  $V$  adalah tegangan kerja pada generator,  $X_d''$  adalah reaktansi subtransien langsung

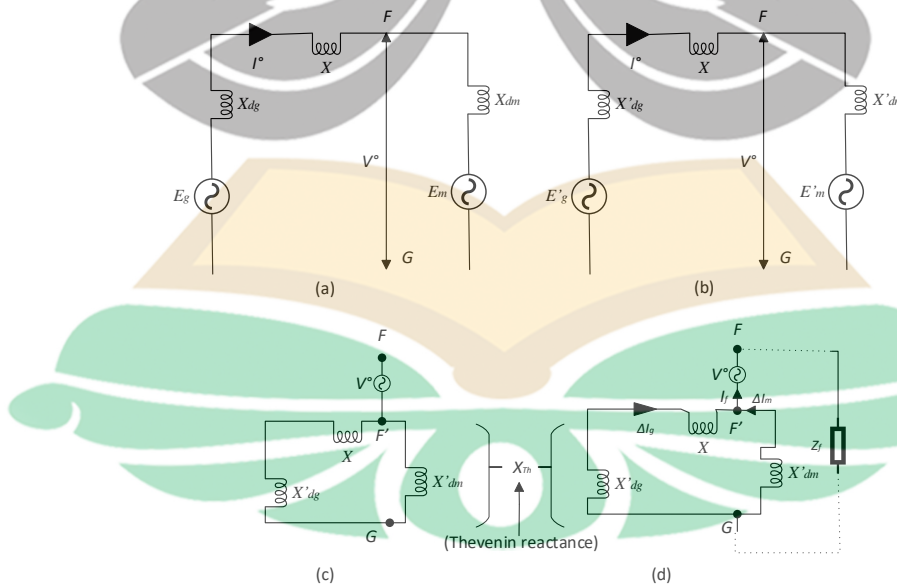


antara generator ke *infinite bus* atau sumber tegangan yang terhubung.  $X'_d$  adalah reaktansi transien langsung antara generator ke *infinite bus* atau sumber tegangan yang terhubung.  $I^\circ$  adalah arus yang mengalir menuju *infinite bus*. Rangkaian generator dapat dilihat pada gambar 2.4 (Nagrath & Kothari, 1987).



Gambar 2.3 Rangkaian generator ekuivalen saat hubung singkat berbeban (Nagrath & Kothari, 1987)

Metode yang digunakan untuk menyederhanakan nilai reaktansi saat terjadi hubung singkat 3 fasa pada rangkaian kelistrikan yang besar adalah teorema *Thevenin*. Metode ini lebih cepat dan praktis untuk menyederhanakan impedansi hubung singkat di sistem yang besar (Nagrath & Kothari, 1987).



Gambar 2.4 Rangkaian akibat gangguan hubung singkat 3 fasa dengan teorema *Thevenin* (Nagrath & Kothari, 1987)

Pada Gambar 2.4, dimana mesin sinkron direpresentasikan dengan reaktansi transiennya. Titik lokasi gangguan terletak pada EG pada gambar 2.4 poin b, rangkaian ekuivalen *thevenin*. Kemudian rangkaian disederhanakan seperti gambar 2.5 poin c. Pada gambar 2.5 poin d, terdapat impedansi gangguan  $Z^f$ . Jika dimodelkan akan diperoleh persamaan berikut

$$I^f = \frac{V}{jX_{Th} + Z^f} \quad (2.31)$$

Arus generator saat gangguan hubung singkat 3 fasa

$$\Delta I_g = \frac{X'_{dm}}{X'_{dg} + X + X'_{dm}} I^f \quad (2.32)$$

Arus motor yang saat gangguan hubung singkat 3 fasa

$$\Delta I_m = \frac{X'_{dg} + X}{X'_{dm} + X + X'_{dg}} I^f \quad (2.33)$$

Arus generator dan arus motor setelah gangguan hubung singkat 3 fasa

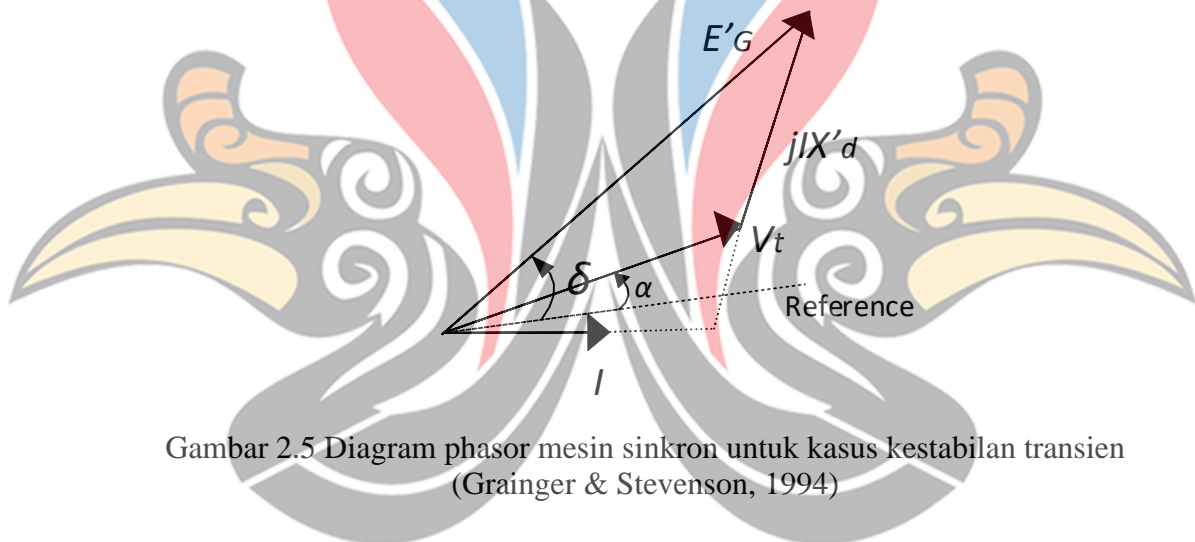
$$I_g^f = I + \Delta I_g \quad (2.34)$$

$$I_m^f = -I + \Delta I_m \quad (2.35)$$

## 2.5 Persamaan Ayunan

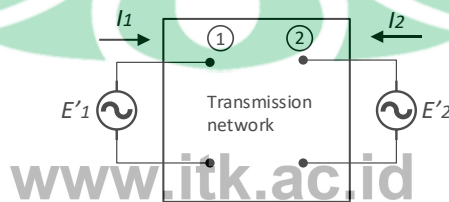
Dalam persamaan ayunan untuk generator, input daya mekanis dari penggerak utama,  $P_m$  akan dianggap konstan. Karena  $P_m$  adalah konstan, output daya listrik  $P_e$  akan menentukan apakah rotor berakselerasi, melambat, atau tetap pada kecepatan sinkron. Ketika  $P_e$  sama dengan  $P_m$ , mesin beroperasi pada kecepatan sinkron yang stabil. Ketika  $P_e$  berubah dari nilai awal, rotor menyimpang dari kecepatan sinkron. Perubahan  $P_e$  ditentukan oleh kondisi pada jaringan transmisi dan distribusi serta beban pada sistem dimana generator menyuplai daya. Gangguan jaringan listrik yang dihasilkan dari perubahan beban yang besar atau operasi pemutus sirkuit dapat menyebabkan output generator  $P_e$  berubah dengan

cepat. Dalam hal akan timbul ini transien elektromekanis. Asumsi mendasar dari transien adalah bahwa pengaruh variasi kecepatan mesin terhadap tegangan yang dihasilkan dapat diabaikan sedemikian rupa. Perubahan  $P_e$  ditentukan oleh persamaan aliran daya yang berlaku untuk keadaan jaringan listrik. Setiap mesin sinkron dalam studi stabilitas merepresentasikan tegangan internal sementara  $E'_G$  yang terhubung secara seri dengan reaktansi transien  $X'_d$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar (2.5). Dimana  $V_t$  adalah tegangan terminal. Hal ini sesuai dengan representasi *steady-state*. Resistansi jangsan dapat diabaikan dalam banyak kasus. Karena setiap mesin harus dianggap relatif terhadap sistem yang merupakan bagiannya, sudut fasor jumlah mesin diukur sehubungan dengan referensi sistem pada umumnya (Grainger & Stevenson, 1994).



Gambar 2.5 Diagram fasor mesin sinkron untuk kasus kestabilan transien (Grainger & Stevenson, 1994)

Gambar (2.6) merupakan diagram skema studi kestabilan. Gambar tersebut akan dimodelkan ke dalam persamaan untuk mendapatkan persamaan sudut daya. Tegangan peralihan generator dimisalkan  $ET_1$  dan tegangan motor dimisalkan  $ET_2$ . Namun reaktansi generator, jaringan transmisi, dan reaktansi motor akan dijadikan satu (Grainger & Stevenson, 1994).



Gambar 2.6 Diagram skema studi kestabilan (Grainger & Stevenson, 1994)

Dari gambar (2.6) di atas maka diperoleh:

[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Berikut merupakan persamaan umum aliran daya

$$P_k - jQ_k = V_k \sum_{n=1}^N (Y_{kn} V_n)^* \quad (2.37)$$

Kemudian dengan membuat nilai k dan N berturut-turut sama dengan 1 dan 2, serta mengganti variabel V dengan E' maka dapat memperoleh persamaan:

$$P_1 - Q_1 = E'_1 (Y_{11} E'_1)^* + E'_1 (Y_{12} E'_2)^* \quad (2.38)$$

Persamaan 2.36 didefinisikan sebagai berikut:

$$E'_1 = |E'_1| \angle \delta_1 \quad E'_2 = |E'_2| \angle \delta_2 \quad (2.39)$$

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad Y_{12} = |Y_{12}| \angle \theta_{12} \quad (2.40)$$

Sehingga dapat diperoleh:

$$P_1 = |E'_1|^2 |G_{11}| + |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \cos(\delta_1 - \delta_{11} - \theta_{12}) \quad (2.41)$$

$$Q_1 = -|E'_1|^2 |B_{11}| + |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \sin(\delta_1 - \delta_{11} - \theta_{12}) \quad (2.42)$$

Persamaan serupa berlaku di bus 1 dengan mengganti subskrip 1 untuk 2 dan 2 untuk 1 dalam dua persamaan sebelumnya. Kemudian dimisalkan:

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (2.43)$$

Lalu dapat didefinisikan sudut baru sebagai berikut

$$\gamma = \theta_{12} - \frac{\pi}{2} \quad (2.44)$$

Dari persamaan (2.41) dan (2.42) akan diperoleh:

$$P_1 = |E'_1|^2 |G_{11}| + |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \sin(\delta - \gamma) \quad (2.45)$$

$$Q_1 = -|E'_1|^2 |B_{11}| - |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \cos(\delta - \gamma) \quad (2.46)$$

Jika disederhanakan maka didapatkan:

$$P_e = P_c + P_{max} \sin(\delta - \gamma)$$

$$(2.47)$$

Dimana

$$P_c = |E'_1|^2 |G_{11}| \quad P_{max} = +|E'_1| |E'_2| |Y_{12}|$$

$$(2.48)$$

Pada persamaan (2.47) di atas,  $P_e$  merepresentasikan daya elektrik generator, dimana rugi-rugi pada *armature* generator diabaikan. Parameter  $P_c$ ,  $P_{max}$ , dan  $\gamma$  adalah konstanta untuk konfigurasi jaringan, besaran tegangan  $|E'_1|$  dan  $|E'_2|$  merupakan sebuah konstanta. Resistansi pada rangkaian diabaikan dan semua elemen dari matriks  $Y_{bus}$  merupakan susceptansi sehingga  $G_{11}$  dan  $\gamma$  keduanya bernilai nol. Oleh karena itu persamaan (2.48) yang didapat akan diperoleh (Grainger & Stevenson, 1994).

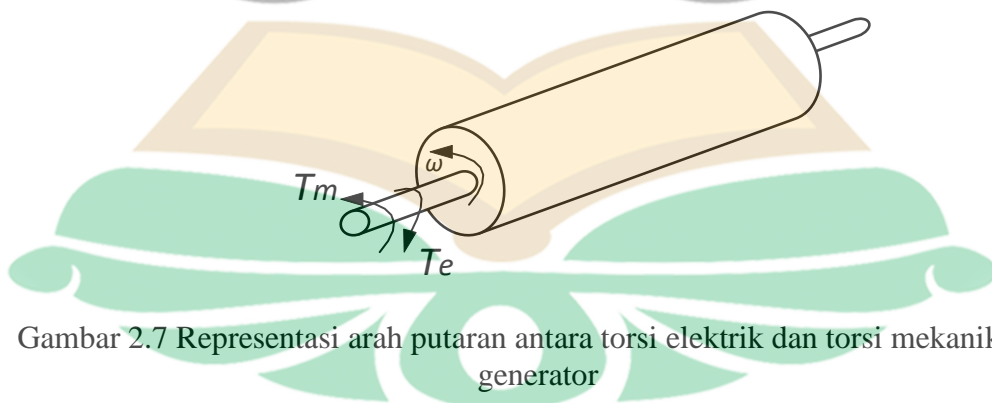
$$P_e = P_{max} \sin(\delta)$$

$$(2.49)$$

$$P_e = \frac{|E'_1| |E'_2|}{X} \sin(\delta)$$

$$(2.50)$$

Pada dasarnya persamaan ayunan generator yang digunakan adalah menggunakan hukum *newton*. Gambar 2.7 merupakan gambar ilustrasi untuk mendapatkan persamaan ayunan (*swing equation*) (Grainger & Stevenson, 1994).



Gambar 2.7 Representasi arah putaran antara torsi elektrik dan torsi mekanik dari generator

Perkalian antar momen kelembaman dan percepatan sudut sama dengan jumlah torsi. Persamaan dapat dituliskan sebagai berikut

$$www.itk.ac.id$$

$$J\alpha = \Sigma T \quad (2.51)$$

www.itk.ac.id

Apabila persamaan (2.51) dijabarkan berdasarkan gambar (2.7) akan diperoleh

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.52)$$

$J$  adalah Momen kelembaman total dari massa rotor ( $kgm^2$ ).  $\theta_m$  adalah pergeseran sudut dari rotor terhadap sumbu diam dalam radian mekanis ( $rad$ ).  $T_a$  adalah momen putar percepatan ( $Nm$ ).  $T_e$  adalah momen putar listrik ( $Nm$ ).  $T_m$  merupakan momen putar mekanis yang dihasilkan oleh *prime mover* yang mengalami perlambatan akibat rugi putaran ( $Nm$ ), torsi mekanik dari rotor generator yang sifatnya cenderung mempercepat putaran rotor (Grainger & Stevenson, 1994).

$$\theta_m = \omega_m t + \delta_m \quad (2.53)$$

$\delta_m$  adalah pergeseran sudut rotor dalam radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan (2.53) terhadap waktu menghasilkan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.54)$$

Kemudian didapat persamaan percepatan rotor dengan menurunkan persamaan (2.54) terhadap waktu yaitu

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.55)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.55) ke dalam persamaan (2.52) kemudian dikalikan dengan  $\omega_m$  maka didapat persamaan

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.56)$$

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.57)$$

www.itk.ac.id

Koefisien  $J\omega_m$  merupakan momentum sudut rotor generator.  $\omega_{sm}$  merupakan kecepatan sinkron yang dilambangkan dengan simbol  $M$  atau disebut konstanta inersia mesin dengan satuan *joule-seconds*.

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.58)$$

Nilai Inersia konstan mesin sinkron yaitu  $H$ , sehingga jika dimodelkan secara matematika dirumuskan:

$$H = \frac{\text{Energi kinetik (MegaJoules) pada kecepatan sinkron}}{\text{Rating mesin satuan MVA}} \quad (2.59)$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}} \quad (2.60)$$

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \quad (2.61)$$

Kemudian dengan mensubstitusikan persamaan (2.61) ke dalam persamaan (2.58) dan kemudian dibagi dengan  $S_{mach}$  diperoleh

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_m}{S_{mach}} - \frac{P_e}{S_{mach}} \quad (2.62)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \text{ per unit} \quad (2.63)$$

Dalam penyederhanaan persamaan (2.63) untuk mendapatkan sudut rotor persamaan akan menjadi

$$\delta_m = \frac{\omega_s P_m}{4H} t^2 + \delta_0 \quad (2.64)$$

Persamaan *swing equation* dapat diterapkan pada sistem dua mesin, namun persamaan ini merupakan persamaan yang sederhana untuk satu mesin dan *infinite bus*. Persamaan *swing equation* untuk mesin yang terhubung ke *bus* diperoleh dari persamaan (2.64) sebagai berikut (Grainger & Stevenson, 1994).

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.65)$$

Selanjutnya mengalikan  $\frac{d\delta_m}{dt}$  ke persamaan (2.65) maka diperoleh

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \frac{d\delta_m}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.66)$$

Kemudian persamaan (2.66) dikalikan dengan  $\frac{2}{M}$  sehingga didapat

$$\frac{1}{2} M \frac{d(d\delta_m/dt)^2}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.67)$$

Jika persamaan (2.67) dikalikan dengan  $dt$  maka diperoleh integral

$$\left(\frac{d\delta_m}{dt}\right)^2 = \int_{\delta_0}^{\delta} \frac{2(P_m - P_e)d\delta_m}{M} \quad (2.68)$$

$$\frac{d\delta_m}{dt} = \sqrt{\int_{\delta_0}^{\delta} \frac{2(P_m - P_e)d\delta_m}{M}} \quad (2.69)$$

Dimana  $\delta_0$  merupakan sudut torsi saat mesin dioperasikan secara sinkron sebelum terjadinya gangguan, yang berarti waktu operasi  $\frac{d\delta_m}{dt}$  adalah nol. Sehingga jika dimasukkan ke persamaan (2.69) didapat persamaan kriteria sama-luas sebagai berikut (Grainger & Stevenson, 1994).

$$\int_{\delta_0}^{\delta} P_m d\delta_m = \int_{\delta_0}^{\delta} P_e d\delta_m \quad (2.70)$$

Luas dibawah  $P_m$  sama dengan luasan di bawah  $P_e$  dengan batas dari  $\delta_0$  sampai dengan  $\delta$  (Grainger & Stevenson, 1994).

Jika inersia pada mesin sinkron adalah konstan, maka inersia mesin harus diubah menjadi inersia baru berdasarkan *base* baru pada mesin, maka persamaan inersia baru (Saadat, 1999).

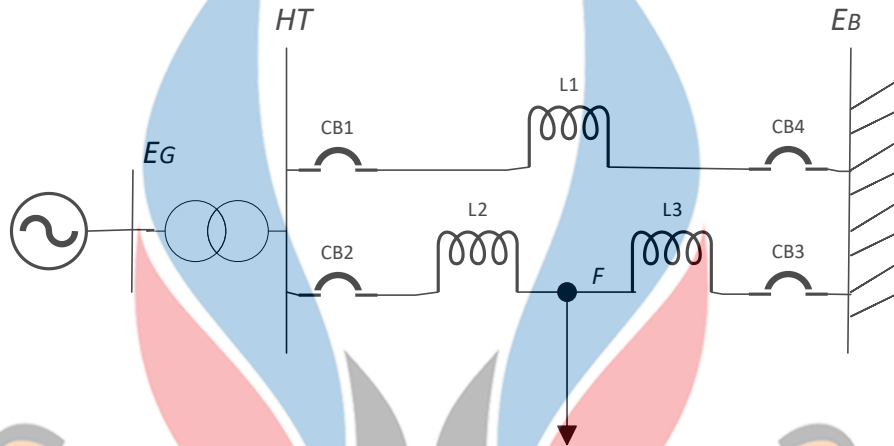
$$H_{new} = \frac{S_{rated}}{S_{Base}} H_{base} \quad (2.71)$$

Dengan jumlah generator yang lebih dari satu dan terhubung pada satu busbar, maka nilai inersia konstan dari mesin ekuivalen adalah



$$H_n = \frac{S_r}{S_B} H_1 + \frac{S_r}{S_B} H_2 + \dots + \frac{S_r}{S_B} H_n \quad (2.72)$$

Persamaan (2.72) untuk mendapatkan nilai inersia konstan pada mesin yang berada pada satu bus (Nagrath & Kothari, 1987).



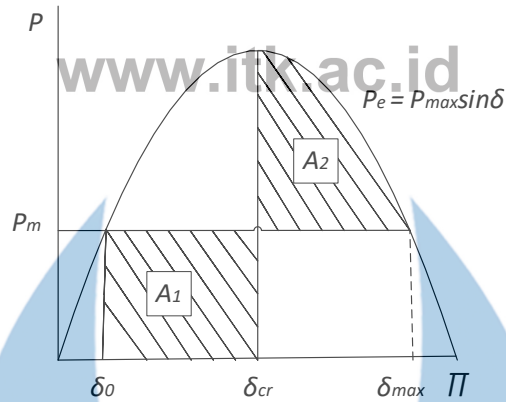
Gambar 2.8 Ilustrasi fenomena kestabilan transien (Kundur, 1994)

Gambar 2.8 mengilustrasikan respon sistem saat gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi pada titik  $F$ . Gangguan dihilangkan dengan membuka CB pada kedua ujung bus yang bergantung pada waktu *setting relay*. Jika gangguan pada titik  $F$  berada di bus  $HT$ , maka tidak ada daya yang mengalir menuju *infinite bus*. Arus hubung singkat dari generator secara langsung mengalir menuju titik gangguan  $F$ . Sehingga daya aktif, daya reaktif, dan torsi menjadi nol (Kundur, 1994).

Selanjutnya, bila lokasi titik gangguan  $F$  berada jauh dari generator atau berlokasi di dekat *infinite bus* pada gambar 2.8, akan ada sedikit daya aktif yang mengalir menuju *infinite bus* saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa (Kundur, 1994).

## 2.6 Penerapan Metode Kriteria Sama-Luas

Pada Gambar (2.9), terdapat sudut kritis (*critical clearing angle*) yang dilambangkan  $\delta_{cr}$ . Gambar (2.9) dapat dijadikan referensi dalam penentuan persamaan luasan, maka diperoleh persamaan sama-luas dari kurva daya-sudut rotor (Grainger & Stevenson, 1994).



Gambar 2.9 Kurva kriteria sama-luas (Grainger & Stevenson, 1994)

Adapun persamaan luasan pada area  $A_1$  adalah sebagai berikut (Grainger & Stevenson, 1994).

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta_m = P_m(\delta_{cr} - \delta_0) \quad (2.73)$$

Sementara untuk luasan area  $A_2$

$$\begin{aligned} A_2 &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (2.74) \\ &= P_{max}(\sin \delta_{cr} - \cos \delta_{max}) - P_m(\delta_{max} - \delta_{cr}) \end{aligned}$$

Karena luasan area  $A_1 = A_2$  dapat diperoleh persamaan sudut rotor

$$\cos \delta_{cr} = (P_m/P_{max})(\delta_{max} - \delta_0) + \cos \delta_{max} \quad (2.75)$$

Berdasarkan dari persamaan kurva sudut rotor yang didapat, disubstitusikan ke persamaan (2.127) sehingga didapat persamaan *critical clearing angle* (sudut kritis)

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}[(\pi - 2\delta_0)\sin \delta_0 - \cos \delta_0] \quad (2.76)$$

Untuk mendapatkan waktu pemutus kritis (*critical clearing time*), persamaan (2.120) akan disubstitusikan dengan  $\delta_{cr}$ .

$$\delta_{cr} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_{cr}^2 + \delta_0 \quad (2.77)$$

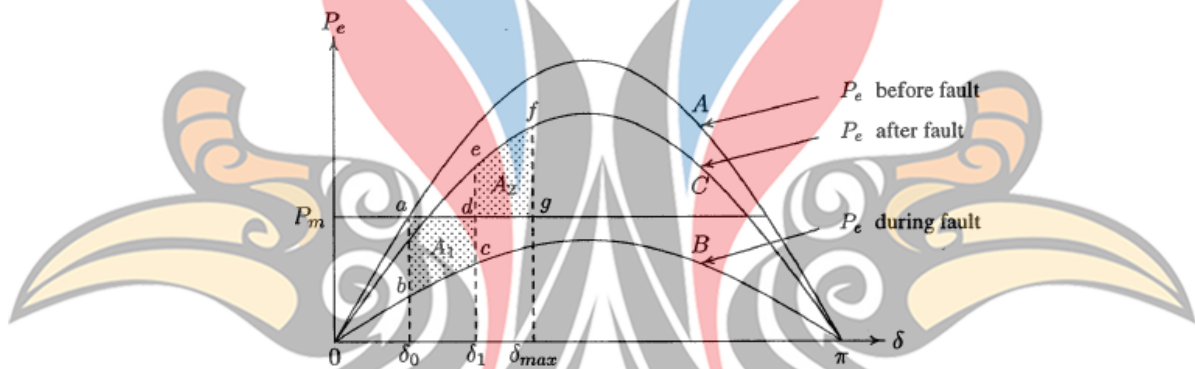
Sehingga diperoleh persamaan *critical clearing time*

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad (2.78)$$

Dengan nilai sudut maksimum adalah

$$\delta_{max} = 180^\circ - \delta_0 \quad (2.79)$$

Pada Gambar 2.13 terdapat lokasi gangguan  $f$  pada jarak tertentu dari ujung pengirim. Asumsikan bahwa daya *input*  $P_m$  adalah konstan dan mesin beroperasi normal. Memberikan daya ke sistem dengan  $\delta_0$  seperti yang ditunjukkan pada gambar 11. Kurva sudut daya yang sesuai dengan kondisi *prefault* diberikan oleh kurva A (Saadat, 1999).

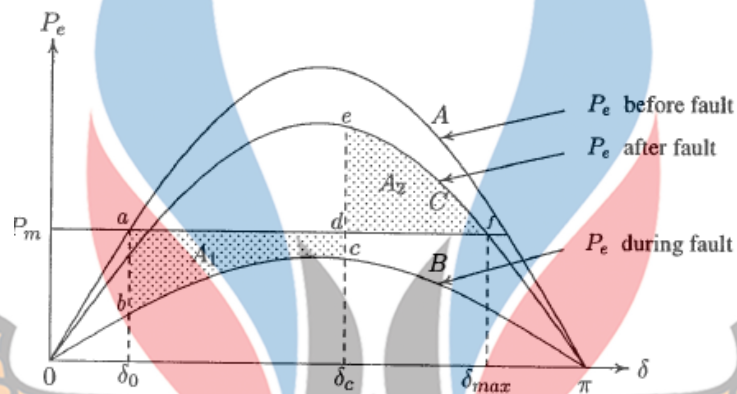


Gambar 2.10 Kurva kriteria sama-luas akibat gangguan 3 fasa jauh dari dengan sumber (Saadat, 1999)

Gambar 2.10 merupakan kurva kriteria sama-luas akibat gangguan 3 fasa dengan lokasi gangguan pada jauh dari ujung pengirim. Dimana reaktansi transfer yang setara antara bus meningkat, menurunkan kemampuan transfer daya dan kurva sudut daya diwakili oleh kurva B. Kurva C merupakan kurva sudut daya setelah gangguan, dengan asumsi saluran dihilangkan. Ketika gangguan tiga fasa terjadi, titik operasi akan bergeser ke titik b pada kurva B. Kelebihan daya mekanis dari generator akan mempercepat rotor, sehingga generator menyimpan energi kinetik berlebih, dan sudut  $\delta$  bertambah. Asumsikan gangguan telah hilang pada  $\delta_1$  dengan mengisolasi saluran yang terkena gangguan. Akibatnya titik operasi akan bergeser ke titik e pada kurva C. Daya elektrik generator akan menurun dan energi kinetik yang disimpan generator sebelumnya akan berkurang menjadi nol pada titik f ketika area yang diarsir (defg) sama dengan area yang diarsir (abcd). Karena  $P_e$  masih

lebih besar dari  $P_m$ , rotor terus akan mengalami perlambatan sepanjang kurva sudut daya melewati titik e. Sudut rotor kemudian akan berosilasi bolak-balik di sekitar e pada frekuensi tertentu. Redaman yang ada di mesin dapat menyebabkan osilasi pada sudut rotor mereda (Saadat, 1999).

Sudut kritis pada gambar 2.11 tercapai ketika terjadi peningkatan pada  $\delta_1$  yang menyebabkan area  $A_2$ , yang mewakili energi perlambatan, menjadi kurang dari area yang mewakili energi percepatan. (Saadat, 1999) .



Gambar 2.11 Kurva kriteria sama-luas akibat gangguan 3 fasa dekat dengan sumber (Saadat, 1999)

Maka nilai kritis sama luas dari gambar 2.11 adalah

$$P_m(\delta_{max} - \delta_0) \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_{2max} \sin \delta d\delta_m = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_{3max} \sin \delta d\delta_m - P_m(\delta_{max} - \delta_{cr})$$

$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_m(\delta_{max} - \delta_0) + P_{3max} \cos \delta_{max} - P_{2max} \cos \delta_0}{P_{3max} - P_{2max}} \quad (2.80)$$

## 2.7 Standar Tegangan dan Frekuensi

Standar tegangan dan frekuensi pada kelistrikan merupakan salah satu faktor penentu baik atau buruknya kualitas daya dari listrik yang dihasilkan pada suatu system (B. DeMetz-Noblat, 1997). Standar EN 50160 dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2.1 Standar tegangan dan frekuensi EN 50160

| Jaringan tegangan menengah atau rendah | Frekuensi      | Tegangan                             |
|--|----------------|--------------------------------------|
| Sistem interkoneksi                    | 50 Hz $\pm$ 1% | 95% tegangan <i>rating</i> $\pm$ 10% |
| sistem non-interkoneksi                | 50 Hz $\pm$ 2% | 95% tegangan <i>rating</i> $\pm$ 10% |

Jaringan sistem interkoneksi memiliki standar  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$  dan standar tegangan  $95\% \pm 10\%$  toleransi. Sedangkan jaringan sistem yang tidak interkoneksi memiliki standar  $50 \text{ Hz} \pm 2\%$  dan standar tegangan  $95\% \pm 10\%$  toleransi (B. DeMetz-Noblat, 1997).

## 2.8 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian ini, diperlukan referensi penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik penelitian yang digunakan. Pada tabel 2.2 adalah rangkuman hasil penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang telah dilakukan.

Tabel 2.2 Penelitian terdahulu

| No | Nama dan Tahun Publikasi | Hasil  |
|----|--------------------------|--|
| 1  | Rezky dkk, 2011          | Metode : Penambahan Pembangkit, pelepasan beban, dan hubung singkat<br>Hasil : <i>Single pole auto reclosing</i> terjadi <i>voltage drop</i> terbesar saat hubung singkat satu fasa ke tanah di Bus Muara Tawar, yaitu mencapai 64,90% saat kondisi beban dasar dan 64,33% saat kondisi beban puncak dalam waktu 0,2 s.  |
| 2  | Sepriawan , 2014         | Metode : Penyebab transien akibat motor <i>strating</i><br>Hasil : Pada kasus motor starting tidak berpengaruh secara signifikan pada stabilitas sistem  |
| 3  | Rotinsulu, 2015          | Metode : Kriteria Luas Sama Menggunakan MATLAB R2009a<br>Hasil : diperoleh <i>initial power angle</i> $14.605^\circ$ , <i>maximum angle swing</i> $165.063^\circ$ , <i>Critical clearing angle</i> $108.381^\circ$ .   |
| 4  | Kumara dkk, 2016         | Metode : Penambahan Pembangkit secara<br>Hasil : nilai <i>Critical clearing time</i> yang didapat adalah 126 ms - 127 ms untuk beban puncak, dan 396 ms -397 ms untuk beban dasar. Sedangkan untuk sistem 2020 adalah 799 ms – 800 ms untuk beban puncak, dan 593 ms – 594 ms. Namun batas membukanya CB dengan cepat untuk sistem transmisi adalah 120 ms – 140 ms. |

Lanjutan (Tabel 2.2 Penelitian terdahulu)

| No | Nama dan Tahun Publikasi | <a href="http://www.itk.ac.id">www.itk.ac.id</a><br>Hasil   |
|----|--------------------------|---|
| 5  | Winarso dkk, 2017        | Metode : Kombinasi Pelepasan Beban dan pengaturan <i>under frequency relay</i><br>Hasil : Frekuensi sistem dapat pulih dengan waktu pemulihan antara 0,69 hingga 2,86 detik setelah terjadi gangguan dan pelepasan beban. |
| 6  | Ihsandri, 2020           | Metode : kriteria sama-luas akibat gangguan hubung singkat 3 fasa<br>Hasil : Nilai waktu pemutus kritis pada kasus pertama hingga kasus keempat berurutan sebesar 0,093 s, 0,161 s, 0,216 s, dan 0,097 s.                 |



[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)