

BAB III

MEKANISME KESTABILAN

Pada bab yang terdahulu telah diuraikan mengenai prinsip kerja generator sinkron dan rele-rele proteksi yang digunakan untuk mengamankan generator terhadap gangguan-gangguan yang mungkin terjadi. Gangguan-gangguan yang terjadi pada suatu generator ataupun gangguan yang berasal dari luar dapat menyebabkan generator kehilangan sinkronisasinya dan menjadi tidak stabil.

Batas waktu maksimum suatu generator dapat beroperasi dalam keadaan gangguan tanpa menimbulkan ketidakstabilan sangat penting dalam penentuan nilai setting dari rele-rele proteksi.

Untuk itu pada bab berikut ini akan diuraikan mengenai teori tentang pengertian kestabilan dan ketidakstabilan pada suatu generator.

3.1 Pengertian kestabilan

Kestabilan suatu sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan sistem tersebut kembali kepada operasi normal atau stabil setelah mengalami suatu gangguan. Bila pada suatu keadaan tertentu sistem tidak dapat kembali pada suatu titik keseimbangan maka sistem tersebut dikatakan tidak stabil.

Keadaan stabil dan tidak stabilnya sistem hanya berlaku pada keadaan tertentu atau dengan kata lain suatu sistem yang stabil pada keadaan tertentu belum tentu

stabil pada keadaan lain. stabilitas dalam suatu sistem tenaga dapat dibagi ke dalam tiga jenis kestabilan dan tergantung pada sifat dan besarnya gangguan, yaitu:

- a. Stabilitas keadaan mantap (*Steady State Stability*)
- b. Stabilitas dinamis (*Dinamic Stability*)
- c. Stabilitas transien (*Transient Stability*)

Stabilitas keadaan mantap pada dasarnya merupakan kemampuan suatu sistem tenaga sewaktu-waktu beroperasi pada kondisi yang berubah-ubah secara berangsur-angsur untuk tetap mempertahankan sinkronisasi apabila mengalami gangguan-gangguan kecil seperti perubahan beban atau pembangkitan yang terus menerus. Dalam menganalisa kestabilan mantap digunakan suatu model generator yang sangat sederhana yang memperlakukan generator tersebut sebagai suatu sumber tegangan yang konstan.

Stabilitas dinamis pada dasarnya adalah sama dengan stabilitas mantap karena sifat keduanya adalah sama yaitu menyangkut kestabilan dari tempat kedudukan dari titik-titik kerja sistem yang pada dasarnya berada dalam keadaan mantap sehingga stabilitas kadang-kadang hanya dibagi atas stabilitas mantap dan transien.

Perbedaan antara stabilitas dinamis dengan stabilitas tetap yaitu pada analisa stabilitas dinamis model generator sinkron bersama-sama dengan sistem penguatan dan sistem pengatur pengemudian turbin (sistem governor) sedangkan stabilitas mantap menggunakan model generator yang sangat sederhana.

Stabilitas transien adalah kemampuan sistem untuk kembali berada dalam keadaan sinkron setelah adanya gangguan-gangguan yang besar pada sistem. Hal ini

merupakan pendekatan analisis yang utama untuk studi dari kelakuan dinamis elektromekanis suatu sistem daya.

Kestabilan transien atau peralihan dapat dibagi atas kestabilan ayunan pertama dan ayunan majemuk. Kestabilan ayunan pertama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana tanpa memasukkan sistem penguatannya. Periode yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem dan bila generator dalam sistem didapatkan tetap berada dalam keadaan sinkron sebelum berakhirnya detik pertama maka sistem tersebut dikatakan stabil. Kestabilan ayunan majemuk meliputi periode waktu yang lebih lama karena harus mempertimbangkan juga pengaruh dari sistem penguatan generator terhadap perilaku generator.

Kestabilan transien digunakan untuk menganalisa perubahan-perubahan besar dan tiba-tiba dalam generator yang disebabkan oleh gangguan-gangguan seperti :

- Bertambah atau berkurangnya tenaga yang disuplai ke dalam sistem dalam jumlah yang besar dan terjadi dalam waktu yang singkat, misalnya terpisahnya generator yang besar dan terjadi secara tiba-tiba. Misalnya terpisah atau terhubungnya suatu beban industri yang besar.
- Perubahan pengaliran daya pada jaringan transmisi yang terjadi dalam waktu singkat. Misalnya pada saat terjadinya hubungan singkat yang diikuti dengan pemutusan suatu bagian saluran transmisi.

Faktor-faktor utama yang mempengaruhi stabilitas transien dalam sistem tenaga antara lain adalah:

- a. Karakteristik dan kemampuan jaringan transmisi yang menghubungkan sumber pembangkit dengan pusat beban sistem.
- b. Karakteristik sistem pembangkit, yaitu:
 - Sistem mekanis, seperti momen inersia turbin generator.
 - Sifat elektrisnya seperti reaktansi bagian yang transiennya serta karakteristik kejenuhan mesin.
- c. Besarnya waktu untuk melepaskan bagian yang terganggu (dengan menggunakan pemutus rangkaian)
- d. Cepatnya reaksi sistem penguatan untuk dapat mengembalikan ke tingkat tegangan semula serta sistim pengaturan kecepatan untuk mengembalikan frekuensi pada keadaan semula.

Stabilitas transien mengenal tiga tingkatan waktu, yaitu: saat pra gangguan, dan saat setelah gangguan.

Siiasumsikan bahwa sebelum terjadi gangguan. Sistem beroperasi pada keadaan normal dan disebut berada pada tingkatan pra gangguan. Bila gangguan terjadi pada salah satu bagian dari jaringan sistem maka keadaan operasi sistem akan berubah. Selama saat peralihan parameter-parameter listrik pada sistem akan berubah. Ini disebut saat gangguan. Setelah sepersekian detik bagian yang terganggu akan terpisah dari sistem dan gangguan berakhir. Saat-saat mulai dari gangguan mulai teratasi disebut saat sesudah gangguan. Tentu saja pada saat pra gangguan bahkan parameter-parameter ini akan terus berubah pada saat sesudah gangguan.

Stabilitas transien berfungsi untuk menganalisa perubahan parameter-parameter ini, apakah dapat kembali pada keadaan stabil atau sinkron pada saat setelah gangguan atau tidak.

3.2 Kestabilan Generator

Stabilitas satu sistem pada dasarnya bertujuan untuk menentukan apakah rotor generator dari sistem yang terganggu dapat kembali ke keadaan kerja dengan kecepatan serempak atau tidak. Ini berarti bahwa kecepatan rotor telah menyimpang dari kecepatan serempak setidaknya-tidaknnya untuk sementara waktu.

Untuk memudahkan pada semua studi-studi kestabilan dibuat tiga pengandaian dasar yang berlaku pada sistem, yaitu:

- a. Dalam gulungan-gulungan stator dan sistem daya, hanya diperhitungkan arus-arus pergeseran frekwensi serempak. Karena itu arus-arus pergeseran DC dan komponen-komponen harmonisa semuanya diabaikan.
- b. Komponen-komponen simetris digunakan dalam representasi gangguan-gangguan tidak seimbang.
- c. Tegangan yang dibangkitkan dianggap tidak mempengaruhi oleh perubahan-perubahan kecepatan mesin.

3.2.1 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (T_a) adalah hasil kali dari momen kelembaban (J) rotor dengan percepatan sudutnya:

$$T_a = T_m - T_e = J \frac{d^2 \Theta_m}{dt^2} \quad (\text{Nm}) \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana :

- J : Momen kelembabab total dari massa rotor, dalam Kg-m².
- Θ_m : Pergesaram sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam dalam radian mekanis.
- T : Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang momen putar perlambatan yang disebabkan oleh rugi-rugi perbuatan. (N-m).
- T_e : Momen putar elektrik atau elektromagnetis bersih (N-m).
- T_a : Momen putar percepatan bersih (N-m)

Momen putar mekanis (T_m) dan momen putar elektrik dianggap positif untuk generator serempak. Hal ini berarti T_m adalah resultan momen putar polos yang mempercepat rotor dalam arah putaran Θ_m yang positif. Pada generator yang bekerja dalam keadaan tetap, T_m dan T_e adalah sama sehingga T_a sama dengan nol. Pada keadaan ini tidak ada percepatan ataupun perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan serempak. Massa-massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan penggerak mula dikatakan dalam keadaan serempak dengan generator lain yang bekerja pada kecepatan serempak dalam sistem tenaga tersebut. Dalam hal ini T_m dianggap baik karena governor tidak akan bekerja sebelum dirasakan adanya perubahan kecepatan dan tidak efektif untuk selang waktu yang dibutuhkan untuk suatu studi kestabilan tentang dinamika rotor.

Momen putr elektrik T_e bersesuaian dengan daya bersih celah udara pada generator. Yang berarti merupakan daya keluaran total dari generator ditambahkan dengan I^2R dalam gulungan-gulungan jsngkar.

Karena θ_m diukur terhadap suatu sumbu pedoman yang diam pada stator maka θ_m bersifat absolut dari sudut rotor dan akan turut bertambah sebanding dengan waktu, bahkan juga pada kecepatan serempak yang konstan. Karena kecepatan rotor relatif terhadap kecepatan serempak maka perlu diketahui posisi sudut rotor terhadap sumbu pedoman dengan kecepatan serempak sebagai berikut:

$$\theta_m = W_{sm} t + \delta_m \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana :

$W_{sm} t$: Kecepatan mesin, dalam radian mekanis perdetik

δ_m : Pergeseran sudut rotor dalam radian mekanis dari sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan bergerak.

Dengan menurunkan persamaan (3.2) maka kan diporeh persamaan yang munjukkan sudut rotor terhdapa sumbu refrence yang berputar dengan s\kecepatata serempak sebagai berikut:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = W_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \dots\dots\dots (3.3)$$

Dengan percepatan sudut rotor adalah :

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

pada persamaan (3.3) terlihat bahwa kecepatan sudut rotor akan konstan dan sama dengan kecepatan serempak bila $d\delta_m/dt$ sama dengan nol. Karena itu $d\delta_m/dt$ merupakan penyimpangan kecepatan rotor dari kecepatan serempak dalam radian mekanis perdetik.

Dengan memasukkan persamaan (3.4) kedalam persamaan (3.1), maka diperoleh:

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \text{ (Nm)} \dots\dots\dots (3.5)$$

Kecepatan sudut rotor adalah :

$$\frac{d \delta_m}{dt} = W_m \dots\dots\dots (3.6)$$

dari dinamika dasar diketahui bahwa daya adalah sama dengan momen putar kali kecepatan sudut dan karena itu dengan mengalikan persamaan (3.5) dengan W_m diperoleh :

$$J \frac{W_m d^2 \delta_m}{dt^2} T_a W_m = T_m W_m - T_e W_m$$

$$J \frac{W_m d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ (watt)} \dots\dots\dots (3.7)$$

Dimana :

P_m : Adalah masukan daya poros ke mesin dikurangi rugi-rugi perputaran

P_e : Adalah daya listrik pada celah udara

P_a : Adalah daya percepatan yang menyalurkan ketidakseimbangan antara daya P_m dan P_e

Biasanya rugi-rugi perputaran dan rugi jangkar I^2R diabaikan sehingga P_m dianggap daya yang dicatu oleh penggerak mula dan P_e sebagai keluaran daya listrik.

Koefisien JW_m pada persamaan (3.7) adalah momen sudut rotor pada kecepatan serempak W_{sm} momen ini dinyatakan dengan M dan disebut dengan *Konstanta Kelembaman* dari generator, yang dinyatakan dalam radian mekanis dan persamaan (3.7) menjadi :

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} P_a = P_m - P_e \dots\dots\dots (3.8)$$

dalam data mesin yang diberikan untuk studi stabilitas sistem tenaga sering dijumpai suatu konstanta yang ada hubungannya dengan kelembaman. Konstanta itu disebut sebagai konstanta H , yang didefinisikan sebagai berikut:

$$H = \frac{\text{Daya Kinetis yang disimpan dalam MJ pada Kec. Serempak}}{\text{Rating mesin dalam MVA}}$$

Dan :

$$H = \frac{0,5 J W_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{0,5 M W_{sm}}{S_{mach}} \dots\dots\dots (3,9)$$

Dimana :

S_{mach} : adalah rating tiga fase dalam MVA

Sehingga didapatkan :

$$M = \frac{2 H}{W_{sm}} S_{mach} (MJ / \text{radian mekanis}) \dots\dots\dots (3.10)$$

Dengan memasukkan persamaan (3.10) kedalam persamaan (3.8) maka diperoleh :

$$\frac{2H}{W_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{Pa}{S_{mach}} = \frac{(P_m - P_e)}{S_{mach}} \dots\dots\dots (3.11)$$

Persamaan (3.11) dapat dituliskan :

$$\frac{2H}{W_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = Pa = P_m - P_e \dots\dots\dots (3.12)$$

Dengan W_s adalah kecepatan serempak dalam suatu listrik. Unruyk suatu frekuensi sebesar f Hertz persamaan (3.12) menjadi :

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = Pa = P_m - P_e \quad (P.u) \dots\dots\dots (3.14)$$

berlaku bila δ dinyatakan dala derajat listrik. Persamaan (3.12) disebut *Persamaan Ayunan Mesin* yang merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika pemutusan dari mesin.

Persamaan ayunan orde dua diatas dapat dituliskan dalam bentuk persamaan orde pertama yaitu :

$$\frac{2H}{W_s} \frac{dw}{dt} = P_m - P_e \quad (p.u) \dots\dots\dots (3.15)$$

Sesuai dengan persamaan (3.3), yaitu:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_m}{dt} - W_{sm}$$

Maka :

$$\frac{d\delta}{dt} W - W_s \dots\dots\dots (3.15)$$

Dimana W , W_2 dan δ adalah menyangkut radian listrik atau derajat listrik.

Dalam suatu studi stabilitas untuk sistem yang besar dengan generator serempak yang banyak jumlah yang secara geografis tersebar dalam suatu daerah yang besar, adalah perlu untuk mengatasi banyaknya persamaan ayunan yang harus diselesaikan seminimal mungkin. Hal ini dapat dilakukan bila gangguan tersebut mempengaruhi generator-generator didalam suatu pembangkit sedemikian rupa sehingga rotornya-rotornya berayun bersama-sama.

Generator-generator pada pembangkit itu dapat digabungkan menjadi satu generator-ekivalen saja seakan-akan rotor-rotornya digandengkan secara mekanis, dan hanya ada satu persamaan ayunan yang perlu diperhatikan, yaitu:

$$H_{\text{evikalen}} = H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_n$$

$$P_{m_{\text{vikalen}}} = P_{m_1} + P_{m_2} + P_{m_3} + \dots + P_m$$

$$P_{e_{\text{vikalen}}} = P_{e_1} + P_{e_2} + P_{e_3} + \dots + P_{e_n}$$

Dimana n dilanjutkan jumlah mesin dalam suatu stasiun pembangkit apabila data H yang diperoleh dari suatu mesin merupakan data yang disesuaikan dengan rating mesin tersebut maka untuk mendapatkan nilai H pada MVA dasar sistem digunakan persamaan sebagai berikut :

$$H = \frac{H_{\text{Mesin}} S_{\text{mesin}}}{\text{dasarMVA sistem}}$$

Dimana :

S_{mesin} = adalah ranting mesin dalam MVA

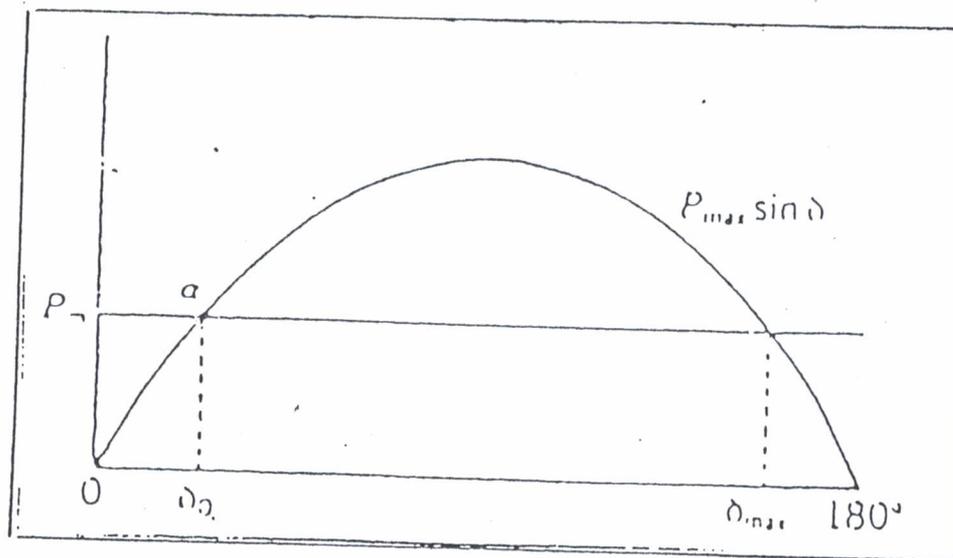
$$H_{\text{evikalen}} = H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_n$$

3.2.2 Pengaruh Gangguan Terhadap Perubahan Sudut Rotor dan Penentuan Waktu Pemutusan

Suatu sistem daya yang sedang beroperasi normal (tanpa gangguan) dimana generator bekerja pada kecepatan serempak, besarnya mekan yang masukan P_m sama dengan daya listrik keluaran P_e .

Apabila terjadi gangguan pada terminal suatu generator sinkron akan menyebabkan daya mesin (P_e) itu menjadi berkurang sedangkan daya input dari turbin (P_m) ke generator masih tetap selama selang waktu yang singkat tersebut sehingga rotor generator berusaha meningkatkan kecepatannya. Rotor akan mengayun sampai kecepatan sudutnya nol dan generator tersebut stabil. Jika gangguan bertahan cukup lama, sudut rotor akan terus bertambah besar dan keadaan sinkron akan lenyap sehingga sistem menjadi tidak stabil.

Kriteria bagi stabilitas suatu mesin dapat dilukiskan dengan kurva $P - \delta$ yang disebut sebagai *Kurva Sudut Daya*.



Gambar 3.1

LENGKUNG SUDUT DAYA GENERATOR

Dimana persamaan untuk kurva diatas disebut persamaan sudut daya, yaitu:

$$P_e = P_{maks} \sin \delta$$

Kriteria dengan menggunakan kurva sudut daya disebut *kriteria sama luas* (*equal-area criterion*) yang dapat digunakan untuk menentukan kestabilan suatu sistem dua mesin tanpa harus menyelesaikan persamaan ayunan.

Bila suatu generator bekerja pada kecepatan serempak dengan sudut rotor sebesar δ_0 dan daya mekanis masukan P_m yang sama dengan daya listrik keluaran P_e , saat terjadi gangguan pada $t = 0$, keluaran daya listrik mendadak menjadi nol sementara daya mekanis masukan tidak berubah. Perbedaan ini harus dapat dijelaskan oleh suatu kecepatan perubahan energi kinetik tersimpan pada massa rotor dan hal ini

dicapai dengan suatu peningkatan kecepatan yang dihasilkan dari daya percepatan Pm yang konstan.

Jika waktu yang diperlukan untuk memutuskan gangguan dinyatakan dengan tc, sehingga untuk t < tc, percepatannya adalah konstan dan dinyatakan oleh :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{W_s}{2H} P_m \dots\dots\dots (3.17)$$

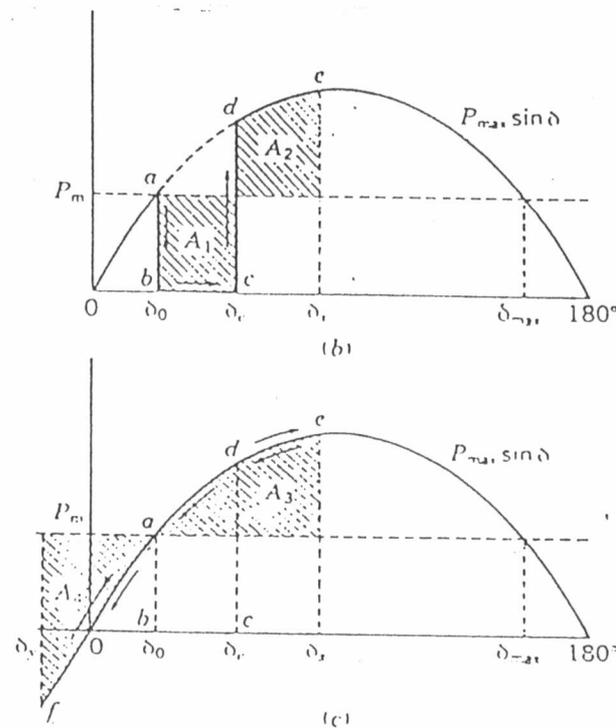
Saat berlangsung gangguan, penambahan kecepatan diatas kecepatan serempak adalah dengan mengintegrasikan persamaan (3.17) menjadi :

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^t \frac{W_s}{2H} P_m dt = \frac{W_s}{2H} P_m t \dots\dots\dots (3.18)$$

Jika diintegrasi lagi y terhadap waktu diperoleh :

$$\delta = \frac{W_s P_m}{4H} t^2 + \delta_0 \dots\dots\dots (3.19)$$

Dan merupakan sudut rotor .



Gambar 3.2

LENGKUNG SUDUT UNTUK GENERATOR

Bila gangguan diputuskan pada sudut δ_c keluaran daya listrik P_e mendadak naik ke suatu nilai yang bersesuaian dengan titik d pada kurva sudut daya. Pada titik d keluaran daya listrik melebihi masukan daya mekanis sehingga percepatan negatif. Akibatnya kecepatan rotor menurun dan P_e berubah dari titik d ke titik e (pada gambar 3.2a). Pada e kecepatan rotor berubah serempak meskipun sudut rotor sudah maju sampai δ_x . Sudut δ_x ditentukan oleh kenyataan bahwa luas A_1 dan A_2 harus sama. Daya percepatan pada e masih negatif (memperlambat) sehingga rotor tidak tetap pada kecepatan serempak dan terus mengurangi kecepatannya. Kecepatan relatif sekarang menjadi negatif dan sudut rotor bergerak kembali dari δ_x pada titik e melalui kurva sudut daya dalam gambar (3.2b) ke titik a dimana kecepatan rotor adalah kurang dari kecepatan serempak. Dari a ke f daya mekanis melebihi daya listrik dan kecepatan rotor naik sehingga sedemikian sehingga luas-luas A_3 , dan A_4

sama. Jika tidak ada redaman rotor akan terus berisolasi dalam urutan f-ae, eaf dan seterusnya, dengan kecepatan serempak terjadi pada e dan f.

Perasaan ayunan untuk mesin yang dihubungkan ke suatu rel adalah:

$$\frac{2H}{W_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \dots\dots\dots (3.20)$$

kecepatan sudut rotor relatif terhadap kecepatan serempak sebagai berikut:

$$W_r \frac{d\delta}{dt} = w - w_s \dots\dots\dots (3.21)$$

Didefinisikan terhadap t dan distribusi ke dalam persamaan (3.20) menjadi :

$$\frac{2H}{W_s} \frac{dw_r}{dt} = P_m - P_e \dots\dots\dots (3.22)$$

Bila kecepatan serempak, $W - W_s$ dan $W_r = 0$, dengan mengalihkan kedua persamaan (3.22) dengan $W_r = d\delta/dt$ akan diperoleh :

$$\frac{H}{W_s} 2w_r \frac{d(W_r)}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \dots\dots\dots (3.23)$$

Atau :

$$\frac{H}{W_s} \frac{d(W_r^2)}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \dots\dots\dots (3.24)$$

Dengan mengalihkan dengan dt dan mengintegrasikannya diperoleh :

$$\frac{H}{W_s} (W_{r2}^2 - W_{r1}^2) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta$$

Subskrip-subskrip untuk suku-suku W_r bersesuaian untuk batas-batas δ , yaitu kecepatan rotor W_{r1} dengan kecepatan sudut δ_1 dan W_{r2} dengan δ_2 karena W_r

mewakili penyimpangan kecepatan rotor dari kecepatan serempak maka kecepatan rotor itu serempak pada δ_1 dan δ_2 maka $W_{r1} = W_{r2} = 0$ sehingga persamaan (3,25).

Menjadi :

$$\int_{\delta_2}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta = 0 \dots\dots\dots (3.16)$$

Titik-titik a dan e beresesuaian dengan δ_0 dan δ_x pada gambar. Jika diintegrasikan dalam 2 langkah, maka:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_0}^{\delta_x} (P_m - P_e) d\delta = 0 \dots\dots\dots (3.27)$$

Integral sebelah kiri berlaku pada perioda gangguan sedangkan sebelah kanan periode segera terjadinya gangguan sampai titik ayunan maksimum $6x$.

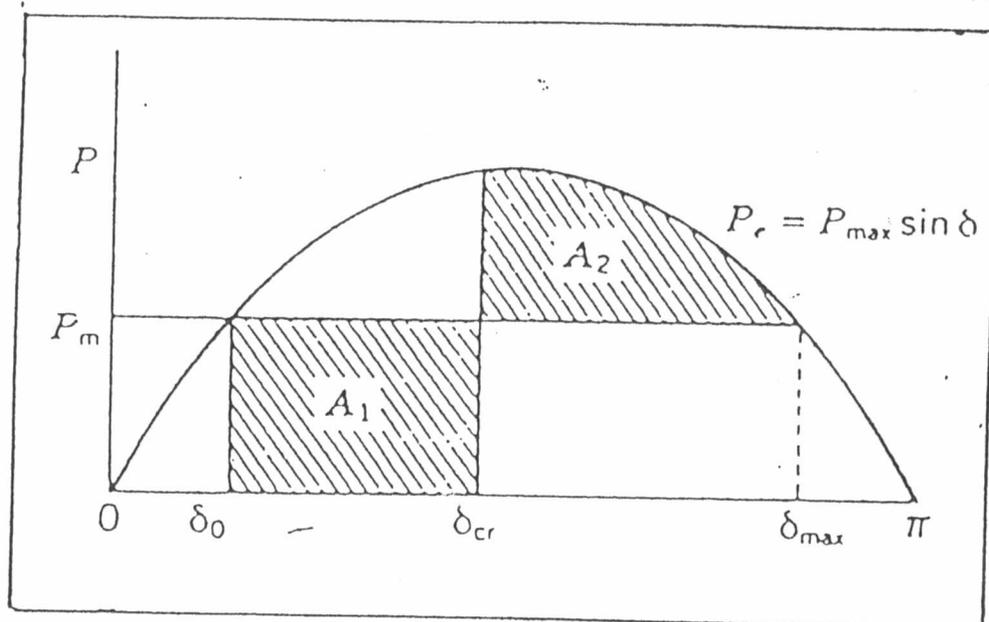
Karena kecepatan rotor pada $6x$ dan juga δ_y pada gambar 3.2b adalah serempak, maka $A_3 = A_4$ luas A_1 dan A dengan kenaikan energi kinetik rotor selama rotor mengalami percepatan sedangkan luas A_2 dan A_3 berbanding dengan penurunan energi kinetik rotor selama rotor itu diperlambat.

Sehingga kriteria sama luas sebenarnya hanya menyatakan bahwa berapapun energi kinetik yang ditambahkan pada rotor setelah terjadinya suatu gangguan harus dihilangkan setelah selesainya gangguan untuk mengebalikan rotor pada kecepatan pada kecepatan serempak

Luas A_1 tergantung pada waktu yang diperlukan untuk memutuskan gangguan. Jika ada keterlambatan dalam pemutusan gangguan ini, sudut δ_0 akan

bertambah demikian pula luas A_1 bertambah dan kriteria sama luas menghendaki A_2 juga meningkat untuk mengembalikan rotor pada kecepatan serempak pada suatu sudut ayunan maksimum δ_x yang lebih besar. Jika keterlambatan tersebut diatas diperpanjang sehingga sudut rotor δ berayun melebihi sudut δ maksimum seperti pada berayung gambar 3.2 maka kecepatan serempak ketika didapatkan lagi daya percepatan positif.

Adanya pengaruh percepatan positif ini, sudut δ akan mengikat tanpa balas dan terjadilah ketidak stabilan. Karena itu ada suatu sudut kritis untuk pemutusan sama luas untuk kestabilan dapat dipenuhi. Sudut ini dinamakan *Sudut Pemutusan Kritis*, seperti tampak pada gambar dibawah:



Gambar 3.3

LENGKUNG SUDUT DAYA YANG MENUNJUKKAN SUDUT PEMUTUSAN KRITIS

Waktu kritis yang bersesuaian dengan δ_{0r} untuk menghilangkan gangguan dinamaman *Waktu Pemutusan Kritis* t_{cr} . Sudut pemutusan kritis dan waktu pemutusan kritis dan waktu pemutusan kritis pada gambar 3.3 dapat dihitung, yakni:

$$\text{Luas : } A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{0r}} P_m d\delta = P_m (\delta_{0r} - \delta_0)$$

Sedangkan luas A_2 adalah :

$$A_2 = \int_{\delta_{or}}^{\delta_{maks}} (P_{mak} \sin \delta) d\delta$$

$$A_2 = P_{mak} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{mak}) - P_m (\delta_{mak} - \delta_{cr})$$

$$\dots\dots\dots (3.30)$$

Dengan menyamakan luas A_1 dan A_2 diperoleh:

$$\cos \delta_{cr} = (P_m/P_{mak}) (\delta_{mak} - \delta_0) + \cos \delta_{mak} \dots (3.31)$$

Pada kurva sudut daya sinusoida :

$$\delta_{mak} = \pi - \delta_0 \text{ rad listrik} \dots\dots\dots (3.32)$$

dan :

$$P_m = P_{mak} \sin \delta_0 \dots\dots\dots (3.32)$$

Dengan memasukkan δ_{mak} dan P_m ke persamaan (3.31) dan menyederhanakan hasilnya diperoleh :

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} [(\pi - 2 \delta_0) \sin \delta_0 \cos \delta_0] \dots\dots\dots (3.34)$$

Untuk sudut pemutusan kritis

Nilai δ_{cr} dihitung dari persamaan ini bila dimasukkan ke dalam sisi sebelah kiri persamaan 3.19, diperoleh:

$$\delta_{cr} = \frac{W_s P_m}{4H} (t_{cr})^2 + \delta_0 \quad \dots\dots\dots (3.35)$$

Dan diperoleh waktu pemutusan kritis :

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{W_s P_m}} \quad \dots\dots\dots (3.36)$$

waktu t_{cr} ini digunakan untuk penentuan setting waktu pada rele proteksi yang digunakan untuk mengamankan generator.