

MAKALAH

ANALISA KESTABILAN SISTEM TENAGA

OLEH :

Ir. Usman Harahap

NIP : 131 661 427



**Disajikan Pada Penataran Dosen PTS Dalam Rangka Peningkatan
Tenaga Bidang Teknik Elektro Kopertis WIL I – XII Angkatan I**

**Kerja Sama DIKTI Dengan Jurusan Teknik Elektro UGM Yogyakarta
Yogyakarta 09 – 15 JULI 2000**

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan taufik dan hidayah-Nya, sehingga penulis mendapatkan kelapangan waktu dan kesehatan untuk dapat membuat makalah yang berjudul " **Analisa Kestabilan Sistem Tenaga** ". Yang disajikan pada penataran dosen PTS dalam rangka peningkatan tenaga bidang Teknik Elektro Kopertis WIL I - XII, angkatan - I dari tanggal 09 Juli sampai dengan 15 Juli 2000 di Universitas Gajah Mada Yogyakarta.

Penulis sadar bahwa makalah ini masih jauh dari sempurna, karena itu penulis mengharapkan masukan - perbaikan atas makalah ini.

Akhirnya Allah SWT jualah yang dapat meridhoi segala kegiatan ini.

Medan, Juli 2000

Wassalam

(Ir. Usman Harahap)

DAFTAR ISI

	Hal.
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
BAB I PENDAHULUAN	1
BAB II KOMPONEN-KOMPONEN SIMETRIS SISTEM	
TENAGA LISTRIK	5
II.1. Sistem Phasor Tak Simetris Dari Komponen Simetris	5
II.2. Operator a	10
II.3. Sistem Tiga Fasa	14
II.4. Komponen-komponen Simetris Pada Phasor Tak Simetris	16
BAB III GANGGUAN - GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM TENAGA LISTRIK	20
III.1. Umum	20
III.2. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Pada Sistem Daya	26
III.3. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Pada	

Sistem Daya	28
III.4. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah	30
III.5. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah Pada Sistem Daya.....	32
BAB IV STABILITAS TRANSIEN SISTEM TENAGA LISTRIK	36
IV.1. Umum.....	36
IV.2. Representasi Sistem Tenaga dan Sistem Satuan	37
IV.2.1. Representasi Sistem Pada Studi stabilitas Transient	38
IV.2.2. Sistem Satuan	40
IV.3. Persamaan Stabilitas Transien	41
IV.4. Persamaan Ayunan	45
IV.4.1. Konstanta-konstanta Inersia Dari Mesin	48
IV.5. Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Stabilitas Transien	52
BAB V KESIMPULAN	55
DAFTAR PUSTAKA	57

BAB I

PENDAHULUAN

Suatu sistem tenaga listrik merupakan kumpulan komponen atau alat-alat listrik seperti halnya Generator, Transformator, saluran transmisi dan beban yang dihubungkan antara satu dengan yang lainnya sehingga membentuk suatu sistem.

Pada suatu sistem tenaga dimana gangguan yang terjadi dapat mengakibatkan kerusakan peralatan-peralatan dan kegagalan kerja dari keseluruhan sistem.

Gangguan yang terjadi tidak dapat kita hindarkan hanya saja kita dapat memperkecil dari gangguan tersebut seminimum mungkin yaitu dengan perencanaan sistem yang baik sesuai operasi dan pemeliharaannya yang tepat.

Hal ini dapat di mengerti karena selain panjang dari jaringan dan besarnya sistem, maka gangguan-gangguan yang mungkin terjadi dipengaruhi juga oleh alam yang tidak dapat kita control.

Gangguan-gangguan yang menimbulkan arus lebih harus diamankan dengan bekerjanya Circuit Breaker (CB) yaitu untuk melepaskan

bagian yang terganggu dan menghubungkan kembali sesudah gangguan tersebut dihilangkan.

Pada sistem tenaga yang besar hubungannya adalah di lakukan secara Interkoneksi yaitu untuk melayani beban yang terbesar dan luas, masalah yang paling utama yang perlu mendapat perhatian adalah masalah stabilitas sistemnya.

Gangguan-gangguan yang timbul dapat mengakibatkan terganggunya stabilitas sistem dan dapat merugikan terhadap kontinuitas pelayanan.

Kestabilan suatu sistem merupakan syarat pada sistem daya yang terdiri dari atas dua atau lebih dari mesin sinkron dimana mesin-mesin ini akan menghasilkan daya output yang disalurkan melalui jaringan transmisi ke pusat-pusat beban.

Istilah kestabilan dimaksudkan yaitu suatu sifat dari mesin-mesin serempak untuk tetap mempertahankan kedudukan relatif sudut rotor antara yang satu dengan yang lain tetap dalam keadaan konstan setelah gangguan tak berulang.

Berbicara tentang stabilitas, dalam pemeliharaan dan keserempakan pada sistem tenaga arus bolak-balik, maka kita berhubungan dengan energi mekanis pada massa yang berputar dari

semua turbin, generator dan motor-motor sinkron yang dirangkai pada suatu jaringan.

Massa tiap mesin adalah tetap, karena itu kecepatan sesaat akan menunjukkan jumlah energi yang tersimpan pada mesin-mesin tertentu. Ukuran yang sesuai untuk kecepatan-kecepatan yang berbeda dari mesin adalah frekuensinya.

Pada kondisi steady-state frekuensinya ini adalah sama untuk semua mesin.

Perubahan kondisi jaringan yang kadang-kadang terjadi, dipergunakan oleh energi yang tersimpan pada masing-masing mesin untuk mencapai kondisi baru.

Oleh karena itu frekuensi akan naik atau turun secara individual pada tiap mesin.

Perbedaan frekuensi dari mesin ini menyebabkan perbedaan aliran daya pada jaringan. Jika perubahan aliran ini menuju suatu kondisi baru yang seimbang dengan frekuensi yang sama untuk setiap mesin maka sistem tersebut dikatakan stabil, tetapi jika terjadi sebaliknya dimana dilain pihak bahwa sudut fasa diantara mesin-mesin tersebut terus naik maka sistem tidak stabil.

Dalam jaringan sistem tenaga gangguan-gangguan yang sering terjadi adalah gangguan hubung singkat, dimana gangguan ini bila terjadi

antara kawat-kawat, tiga kawat, dua kawat ke tanah dan satu kawat ke tanah.

Umumnya kestabilan sistem terbagi dua yaitu : stability transient (kestabilan peralihan) dan steady-state (keadaan tetap), dimana kestabilan peralihan tujuannya adalah untuk menentukan apakah sistem itu akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadinya gangguan-gangguan yang berarti. :

- Terputusnya unit-unit pembangkit.
- Perubahan-perubahan beban yang mendadak.
- Gangguan-gangguan sistem transmisi.
- Proses pemutusan saklar pada saluran.

Sedangkan kestabilan tetap ruang lingkupnya tidak begitu luas dan hanya membahas satu atau beberapa mesin yang mengalami perubahan-perubahan keadaan kerja secara berangsur-angsur. Disini penulis memfokuskan permasalahan pada gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dan akan menghitung sudut kritis dan waktu kritis dari sistem tersebut dengan menggunakan metode Equal-area criterion.

BAB II

KOMPONEN-KOMPONEN SIMETRIS

SISTEM TENAGA LISTRIK

II.1. Sistem Fasa Tak Simetris Dari Komponen Simetris

Dari tahun 1918 salah satu sarana yang paling ampuh untuk mengerjakan rangkaian fasa majemuk tak seimbang dibahas oleh C.L. FORTESQUE pada suatu pertemuan Lembaga Insinyur Listrik Amerika.

Sejak saat itu metode komponen simetris menjadi sangat penting dan merupakan pokok pada berbagai artikel dan penyelidikan-penyelidikan ilmiah.

Hasil karya FORTESQUE membuktikan bahwa suatu sistem tak seimbang yang terdiri dari fasa-fasa yang berhubungan dapat diuraikan menjadi n sistem-sistem fasa yang seimbang, yang disebut komponen-komponen fasa asli. N buah fasa pada setiap himpunan komponen-komponennya sama panjang dan sudut-sudut diantara fasa-fasa yang bersebelahan dalam himpunan itu adalah sama besarnya.

Meskipun metode ini berlaku untuk setiap sistem fasa majemuk tak seimbang pada suatu sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga sistem fasor yang seimbang.

Himpunan-himpunan seimbang komponen-komponen itu adalah :

1. Komponen-komponen urutan positif terdiri dari tiga fasor yang mana sama besarnya, tetapi antara satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° dan mempunyai urutan yang sama seperti fasa-fasa aslinya.
2. Komponen-komponen urutan negatif terdiri dari tiga fasa yang sama besarnya, terpisah antara satu dengan lainnya dalam fasa 120° dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor-fasor aslinya.
3. Komponen-komponen urutan nol terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lain.

Telah menjadi kebiasaan umum dalam menyelesaikan suatu persoalan dengan menggunakan komponen-komponen simetris bahwa ketiga fasa dari sistem dinyatakan sebagai a, b, dan c dengan cara yang demikian sehingga urutan fasa tegangan-tegangan dan arus-arus dalam sistem adalah abc.

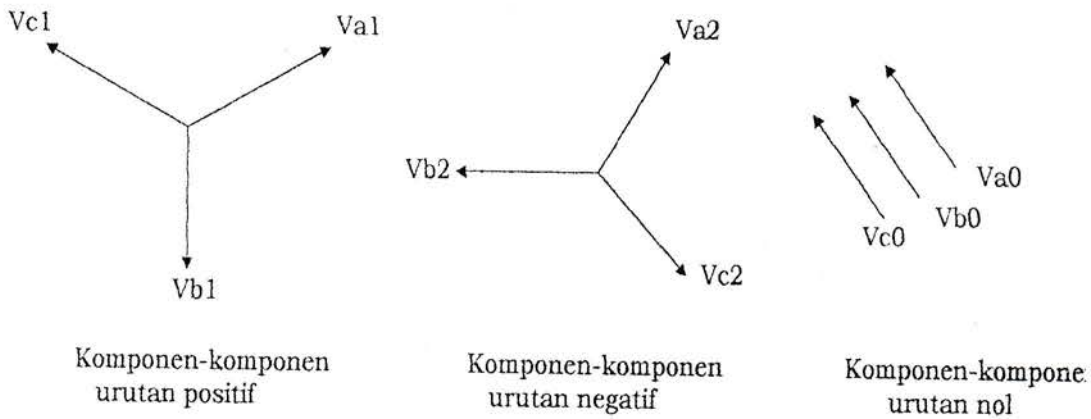
Jadi urutan fasa dari komponen-komponen urutan positif dari fasor-fasor tak seimbang itu adalah abc, sedangkan urutan fasa dari komponen-komponen urutan negatif adalah acb. Jika fasor aslinya adalah tegangan-tegangan, maka tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan V_a , V_b dan V_c .

Ketiga himpunan komponen-komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk komponen-komponen urutan positif, 2 untuk komponen-komponen urutan negatif dan 0 untuk komponen-komponen urutan nol. Komponen-komponen urutan positif dari V_a , V_b dan V_c adalah V_{a1} , V_{b1} dan V_{c1} .

Demikian pula, komponen-komponen urutan negatif adalah V_{a2} , V_{b2} dan V_{c2} , sedangkan komponen-komponen urutan nol adalah V_{a0} , V_{b0} dan V_{c0} .

Gambar : II.1 Menunjukkan Tiga Komponen - komponen Simetris sedangkan fasor-fasor arus akan dinyatakan dengan I dengan subskrip-subskrip seperti untuk tegangan.





Gambar : II.1 Tiga himpunan fasor-fasor seimbang yang merupakan komponen simetris dari tiga fasor-fasor tak seimbang.

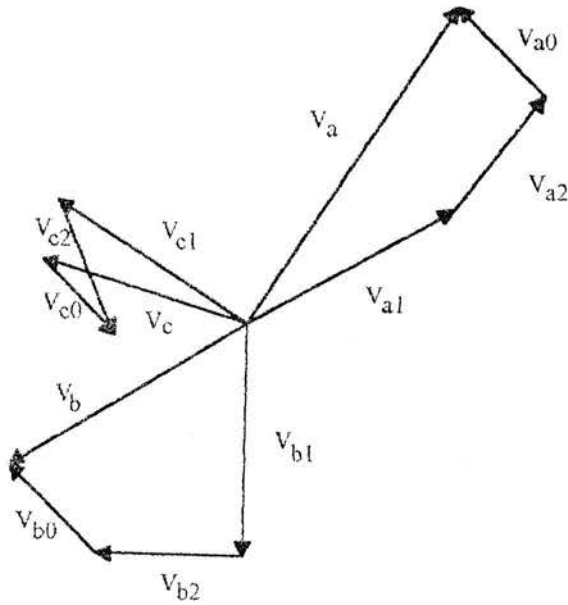
Karena setiap fasor tak seimbang, yang asli adalah jumlah dari komponen-komponennya, fasor-fasor asli yang dinyatakan dalam suku-suku komponennya adalah :

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \dots\dots\dots (II.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \dots\dots\dots (II.2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \dots\dots\dots (II.3)$$

Dari persamaan diatas dapat kita buat suatu penjumlahan secara grafis yaitu seperti Gambar : II.2.



Gambar : II.2. Penjumlahan secara Grafis komponen-komponen pada gambar II.1. dan persamaan II.1, II.2 dan II.3 untuk mendapatkan tiga fasor-fasor tak seimbang.

Beragam-macam keuntungan dari analisis sistem-sistem tenaga dengan metoda komponen-komponen simetris akan berangsur-angsur menjadi jelas bila kita menerapkan metoda ini untuk studi gangguan tidak simetris pada sistem-sistem yang lepas dari gangguan tersebut adalah simetris cukup untuk kita sebutkan disini bahwa metode ini terdiri dari komponen-komponen simetris arus pada gangguan.

Kemudian nilai-nilai dari arus dan tegangan pada berbagai titik dalam sistem diperoleh, metoda yang cukup sederhana ini dapat memberikan ramalan-ramalan yang seksama tentang sistem itu.

II.2. Operator a

Oleh karena pergeseran fasa komponen simetris pada tegangan dan arus dalam suatu sistem tiga fasa akan mempermudah jika kita mempunyai suatu metode ringkas untuk menunjukkan perputaran suatu fasor sebesar 120° .

Hasil kali dua buah bilangan kompleks adalah hasil kali besar bilangan riellya dan jumlah dari sudut-sudut fasanya.

Jika suatu bilangan kompleks yang menyatakan suatu fasor dikalikan dengan suatu bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya θ , bilangan kompleks yang dihasilkan adalah sebuah fasor yang sama besar dengan fasor aslinya tetapi bergeser fasanya dengan sudut θ .

Bilangan kompleks dengan besar satu dan sudut θ adalah sebuah operator yang memutar fasor yang dikenakannya melalui sudut θ . Kita sudah mengenal dengan operator j , yang menyebabkan perputaran sebesar 90° , dan operator -1 , yang menyebabkan perputaran sebesar 180° .

Penggunaan operator j sebanyak dua kali berturut-turut akan menyebabkan perputaran melalui $90^\circ + 90^\circ$, yang membawa kita pada kesimpulan bahwa $j \times j$ menyebabkan perputaran sebesar 180° , dan karena itu ingat kembali bahwa j^2 adalah sama dengan -1 .

Huruf a biasanya digunakan untuk menunjukkan operator yang menyebabkan suatu perputaran sebesar 120° dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam. Operator semacam ini adalah suatu bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya 120° dan didefinisikan sebagai berikut :

$$a = 1 \angle 120^\circ = 1 \cdot e^{j2\pi/3} = -0,5 + j 0,866$$

Jika operator a dikenakan pada suatu fasor dua kali berturut-turut, fasor itu akan diputar dengan sudut sebesar 240° . Untuk fasor tiga kali berturut-turut fasor akan diputar dengan 360° jadi :

$$\begin{aligned} a^2 &= a \times a = 1 \angle 120^\circ \times 1 \angle 120^\circ = 1 \angle 240^\circ \\ &= 1 e^{j4\pi/3} = -0,5 - j 0,866 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a^3 &= a^2 \times a = 1 \angle 240^\circ \times 1 \angle 120^\circ = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ \\ &= 1 e^{j4\pi/3} = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a^4 &= a^3 \times a = 1 \angle 0^\circ \times 1 \angle 120^\circ = 1 \angle 120^\circ \\ &= 1 e^{j4\pi/3} = -0,5 + j 0,866 \end{aligned}$$

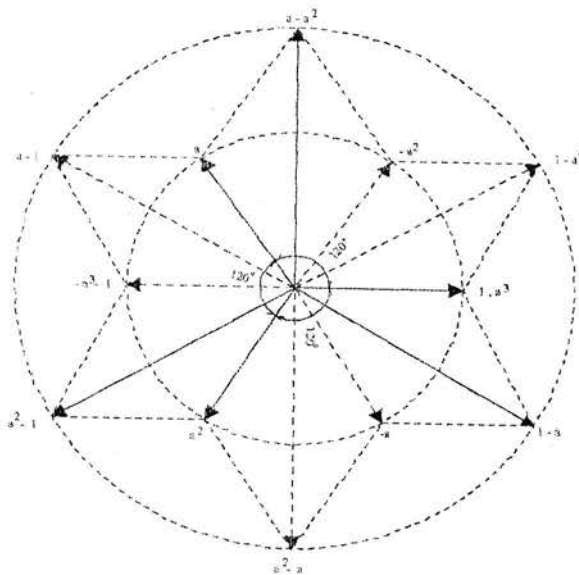
$$\begin{aligned} a^5 &= a^3 \times a^2 = 1 \angle 0^\circ \times 1 \angle 240^\circ = 1 \angle 240^\circ \\ &= 1 e^{j4\pi/3} = -0,5 - j 0,866 \end{aligned}$$

$$a^6 = a^3 \times a^3 = 1 \angle 0^\circ \times 1 \angle 0^\circ = 1 \angle 0^\circ$$

$$= 1 e^{j0} = 1$$

$$a^{n+3} = a^3 \times a^n = a^n$$

Maka diagram fasor bermacam-macam pangkat dari operator a adalah sebagai berikut :



Gambar : II.2.1. Diagram fasor untuk beberapa macam operator a .

Suatu perbedaan penting yang harus diperhatikan antara penggunaan operator j dengan operator a , dimana operator j mempunyai satu sudut $+90^\circ$, dan operator $-j$ berarti bahwa bilangan kompleks $-j$ diubah oleh sebuah sudut 270° atau -90° dan bentuk polarnya dapat ditulis sebagai berikut ini.

$$j = 1 \angle 90^\circ \quad \text{dan} \quad -j = 1 \angle 270^\circ = 1 \angle -90^\circ$$

Maka kadang-kadang dikatakan bahwa $+j$ menunjukkan perputaran sebesar $+90^\circ$ sedangkan untuk operator a mengalami perputaran sebesar $+120^\circ$.

Untuk menjelaskan keadaan, andaikan bahwa suatu bilangan kompleks yaitu $P + jQ$ sama dengan $1 \angle \theta$, suatu operator yang menyebabkan perputaran sebesar sudut positif, dimana besar $\theta = \text{arc tg } (Q/P)$ sedangkan untuk imajiner negatif yaitu $P - jQ$ dengan $1 \angle \theta$ maka besar, $-\theta = \text{arc tg } (-Q/P)$.

Dari Gambar : II.2. yaitu diagram fasor maka kita dapat membuat bentuk tabel : 2.1 sebagai fungsi operator a .

Tabel : 2.1. Daya dan Fungsi dari Operator a.

Fungsi atau Daya	Bentuk Polar	Bentuk Kompleks
a	$1 \angle 120^\circ$	$-0,5 + j 0,866$
a ²	$1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ$	$-0,5 - j 0,866$
a ³	$1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ$	$1,0 + j 0,0$
a ⁴	$1 \angle 120^\circ$	$-0,5 + j 0,866 = a$
1 + a	$1 \angle 60^\circ$	$0,5 + j 0,866 = -a^2$
1 - a	$\sqrt{3} \angle -30^\circ$	$1,5 - j 0,866$
1 + a ²	$1 \angle 60^\circ$	$0,5 - j 0,866 = -a$
1 - a ²	$\sqrt{3} \angle 30^\circ$	$1,5 + j 0,866$
a - 1	$\sqrt{3} \angle 150^\circ$	$-1,5 + j 0,866$
a + a ²	$1 \angle 180^\circ$	$-1,0 + j 0,0$
a - a ²	$\sqrt{3} \angle 90^\circ$	$0,0 + j 1,732$
a ² - a	$\sqrt{3} \angle -90^\circ$	$0,0 - j 1,732$
a ² - 1	$\sqrt{3} \angle -150^\circ$	$-1,5 - j 0,866$
1 + a + a ²	$0 \angle 0^\circ$	$-1,0 + j 0,0$

II.3. Sistem Tiga Fasa

Dalam sistem tiga fasa kita kenal selalu menghadapi tiga besaran tegangan yaitu : Va, Vb dan Vc sedangkan untuk besaran arus adalah : Ia, Ib dan Ic.

Bila kita lihat untuk komponen simetris pada operator a dimana yang menjadi patokan kita ambil pada fasa a oleh sebab itu maka dari Gambar : II.1 kita peroleh komponen simetris untuk urutan positif, negatif dan urutan nol baik itu untuk tegangan maupun untuk arus.

$$V_{b1} = a^2 V_{a1} \dots\dots\dots (II.4.)$$

$$V_{c1} = a V_{a1} \dots\dots\dots (II.5.)$$

$$V_{b2} = a V_{a2} \dots\dots\dots (II.6.)$$

$$V_{c2} = a^2 V_{a2} \dots\dots\dots (II.7.)$$

$$V_{b0} = V_{c0} = V_{a0} \dots\dots\dots (II.8.)$$

Apabila persamaan (II-2) dan (II-3) disubstitusi dengan persamaan (II-4) sampai (II-8) maka kita peroleh :

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \dots\dots\dots (II.9)$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \dots\dots\dots (II.10)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \dots\dots\dots (II.11)$$

Dimana bentuk persamaan (II.9) sampai persamaan (II.11) dapat kita buat dalam bentuk matrik yaitu :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.12)$$

Pada analisa untuk arus I_a , I_b dan I_c sama dengan analisa tegangan V_a , V_b dan V_c .

II.4. Komponen-komponen Simetris Pada Fasa Tak Simetris

Telah kita lihat gambar : II.2 sintesa tiga fasor tak simetris dari tiga himpunan fasor-fasor simetris, sintesa itu di buat sesuai dalam persamaan : (II.1), (II.2) dan persamaan (II.3).

Sekarang baiklah kita periksa persamaan-persamaan tersebut yaitu untuk menentukan bagaimana menguraikan ketiga fasor-fasor tak simetris itu menjadi komponen-komponen simetris.

Mula-mula kita perhatikan bahwa banyaknya kuantitas yang tidak diketahui dapat dikurangi dengan menyatakan masing-masing komponen V_b dan V_c sebagai suatu hasil kali dari suatu fungsi dari operator a dan suatu komponen dari V_a dengan berpedoman pada Gambar : II.1 seperti yang dijelaskan pada sistem tiga fasa. Untuk mempermudah penganalisaan dari persamaan (II.12) maka kita misalkan.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.13)$$

Dari matrik bujur sangkar A diatas kita peroleh matrik baru yang disebut Invers dari matrik A yang ditulis sebagai berikut :

$$A^{-1} = \frac{adj(A)}{|A|} \dots\dots\dots(II.14)$$

Maka dari persamaan (II.13) dan (II.14) bila diselesaikan akan diperoleh, invers dari matrik A itu adalah :

$$A^{-1} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.15)$$

Dimana kita lihat persamaan (II.12) :

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va0 \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Va0 \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.16)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (II.15) ke dalam persamaan (II.16) kita peroleh :

$$\begin{bmatrix} Va0 \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.17)$$

Yang menunjukkan pada kita bagaimana menguraikan tiga fasor tak simetris menjadi simetris. Hubungan-hubungan ini demikian pentingnya sehingga akan kita tuliskan disini masing-masing persamaan itu dalam bentuknya yang biasa. Persamaan ini kita peroleh dari persamaan (II.17).

$$Va0 = 1/3 (Va + Vb + Vc) \dots\dots\dots (II.18)$$

$$V_{a1} = 1/3 (V_a + aV_b + a^2V_c) \dots\dots\dots (II.19)$$

$$V_{a2} = 1/3 (V_a + a^2V_b + aV_c \dots\dots\dots (II.18)$$

Sedangkan untuk komponen-komponen V_{b0} , V_{b1} , V_{b2} , V_{c0} , V_{c1} dan V_{c2} dapat kita peroleh dari persamaan (II.4) sampai persamaan (II.8).

Persamaan-persamaan diatas sebenarnya dapat pula ditulis untuk setiap himpunan fasor-fasor yang berhubungan, dan kita pula melukiskannya untuk arus-arus sebagai ganti dari tegangan-tegangan. Persamaan-persamaan tersebut dapat diselesaikan baik secara analitis maupun secara grafis.

Karena beberapa persamaan yang terdahulu tersebut adalah sangat mendasar, berikut dituliskan ringkasannya untuk arus.

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \dots\dots\dots (II.21)$$

$$I_b = a^2I_{a1} + aI_{a2} + I_{a0} \dots\dots\dots (II.22)$$

$$I_c = aI_{a1} + a^2I_{a2} + I_{a0} \dots\dots\dots (II.23)$$

$$I_{a0} = 1/3 (I_a + I_b + I_c) \dots\dots\dots (II.24)$$

$$I_{a1} = 1/3 (I_a + aI_b + a^2I_c) \dots\dots\dots (II.25)$$

$$I_{a2} = 1/3 (I_a + a^2I_b + aI_c) \dots\dots\dots (II.26)$$

Pada dasarnya dalam suatu sistem tiga fasa bahwa jumlah arus saluran adalah sama dengan arus I_n dalam jalur kembali lewat netral jadi :

$$I_a + I_b + I_c = I_n \dots\dots\dots (II.27)$$

Bila persamaan (II.21) sampai dengan persamaan (II.23) disubstitusikan terhadap persamaan (II.27) maka kita peroleh harga dari I_n adalah :

$$I_n = (I_{a1} + Ia_2 + I_{a0}) + (a^2 I_{a1} + a Ia_2 + I_{a0}) + (a I_{a1} + a^2 Ia_2 + I_{a0})$$

$$I_n = 3I_{a0} \dots\dots\dots (II.28)$$

Dari persamaan (II.28) ternyata arus dari tanah yang mengalir ke titik netral dari suatu rangkaian tidak mempunyai komponen-komponen positif dan negatif melainkan dia tergantung pada komponen urutan nolnya saja, dimana besar arus netralnya adalah tiga kali besar arus yang mengalir pada komponen urutan nolnya. Maka apabila ada suatu beban dengan hubungan Δ dimana tidak ada menyediakan jalur kenetral dan karena itu arus-arus saluran yang mengalir kesuatu beban yang dihubungkan Δ tidak dapat mengandung urutan nolnya.

BAB III

GANGGUAN-GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

III.1. Umum

Pada umumnya gangguan-gangguan yang timbul pada sistem daya adalah gangguan-gangguan tidak simetris yang terdiri dari gangguan hubung singkat tak simetris, yaitu gangguan tak simetris melalui Impedansi atau penghantar-penghantar terbuka. Gangguan-gangguan tak simetris timbul sebagai gangguan saluran ganda ketanah.

Jalur arus gangguan dari saluran kesaluran atau dari saluran ke tanah dapat mengandung atau tidak mengandung Impedansi.

Satu atau dua saluran terbuka dapat menimbulkan gangguan tidak simetris, baik karena putusnya satu atau dua kawat penghantar maupun karena kerja sekering atau peralatan-peralatan lainnya yang tidak membuka ketiga fasa saluran itu terganggu.

Pada setiap gangguan simetris menyebabkan mengalirnya arus tidak seimbang dalam sistem, metode komponen-komponen simetris berguna sekali dalam suatu analisis untuk menentukan arus dan

tegangan-tegangan disemua bagian sistem setelah terjadinya gangguan.

Dimana kita ketahui bahwa pada umumnya gangguan hubung singkat ada beberapa macam yaitu :

- a. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.
- b. Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.
- c. Gangguan hubung singkat fasa ke fasa.
- d. Gangguan hubung singkat tiga fasa.

Dari jenis gangguan-gangguan hubung singkat diatas, maka gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa ketanah dan antara fasa dengan fasa sangat jarang terjadi tetapi kalau untuk gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah ini bahwa faktor kemungkinannya hampir mencapai 70% sampai 80% kemungkinan terjadi dari gangguan hubung singkat yang ada pada suatu sistem.

Dalam perhitungan gangguan hubung singkat dapat dilakukan dengan mudah apabila sistemnya sederhana dan jenis gangguan yang terjadi akibat ketidak-seimbangan, maka perhitungan-perhitungan akan lebih sulit.

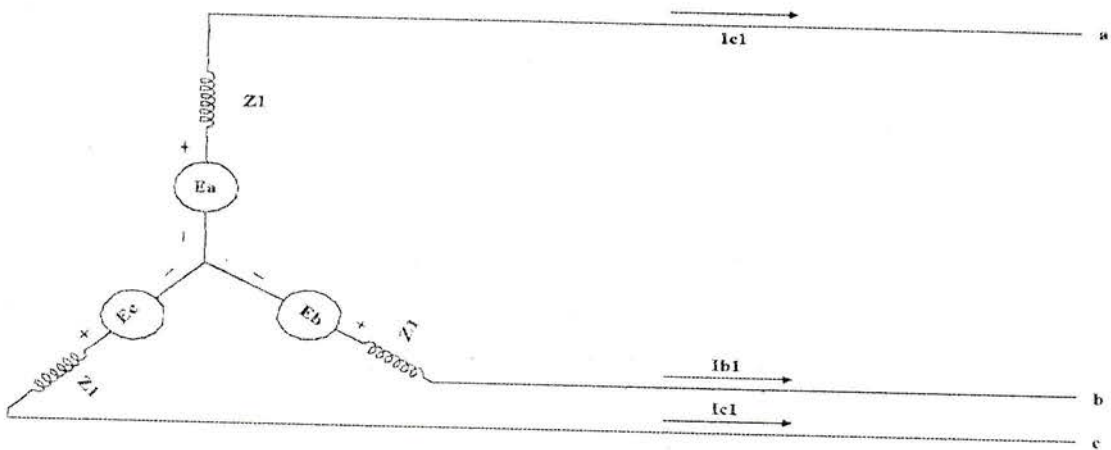
Tetapi dengan menggunakan teorema komponen simetris perhitungan ketidak-seimbangan ini dapat dijelaskan dengan mudah.

Bagian dari jala-jala saluran transmisi untuk mendapatkan nilai-nilai impedansi urutan pada suatu sistem daya adalah menunjukkan kita untuk menyusun jala-jala urutan, bagi suatu sistem yang lengkap.

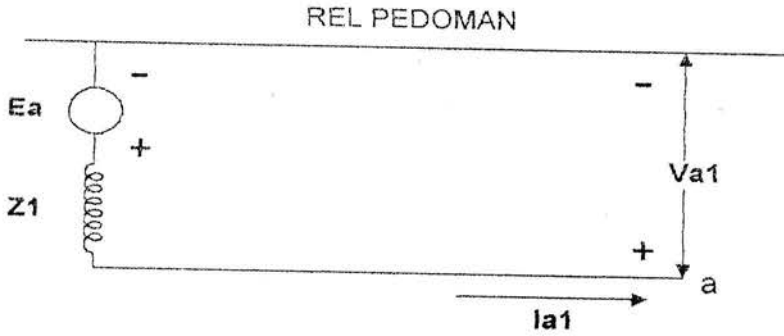
Jala-jala urutan tertentu menunjukkan semua jalur untuk aliran arus pada urutan ini dalam sistem-sistem tersebut.

Penyusunan jala-jala urutan dari komponen-komponen simetris dan tegangan fasa terhadap tanah dalam bentuk impedansi urutan dimana urutan ini adalah sebagai berikut :

Gambar : III.1. Jalur-jalur untuk arus pada setiap urutan dalam suatu generator dan jala-jala urutan yang bersesuaian.



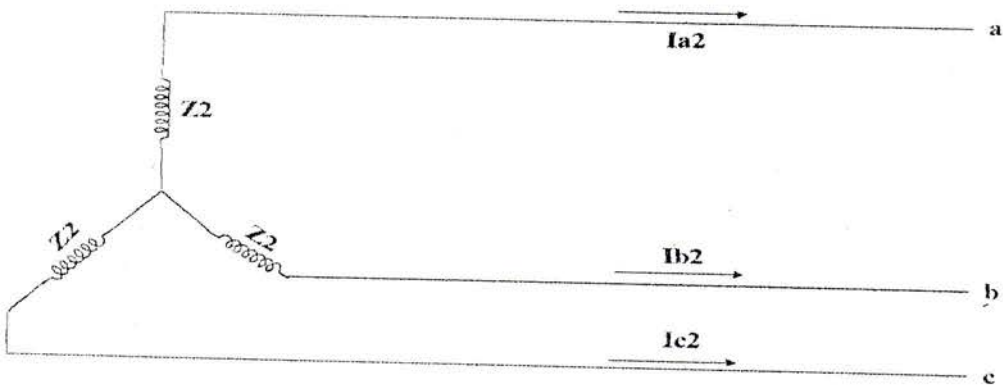
Gambar III.1a. Jalur arus urutan positif.



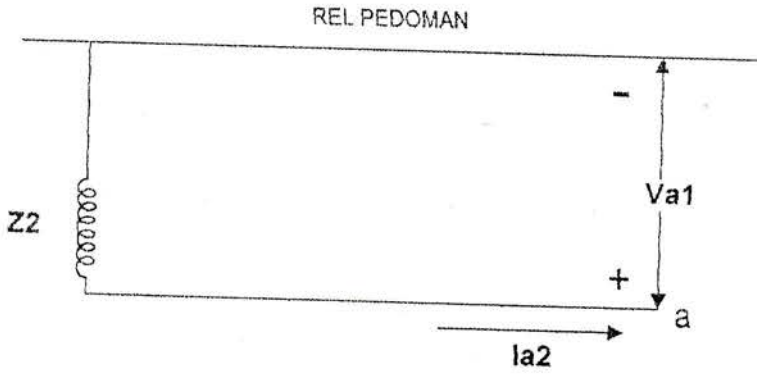
Gambar III.1b. Jala urutan positif

Dari rangkaian jala-jala urutan positif diatas dapat kita buat persamaan-persamaan untuk komponen-komponen jatuh tegangan dari tegangan dari titik a fasa a ke rel pedoman (tanah) adalah :

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} \cdot Z_1 \dots\dots\dots (III.2)$$



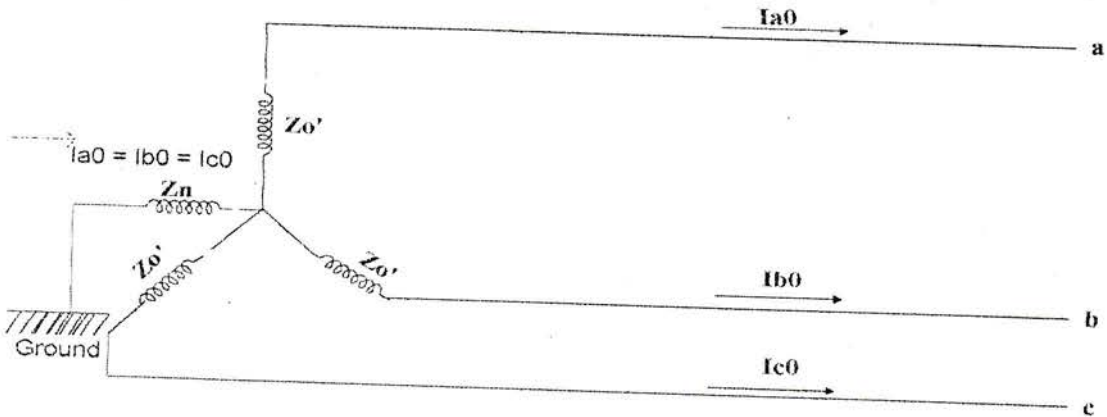
Gambar III.1c. Jalur-jalur urutan negatif.



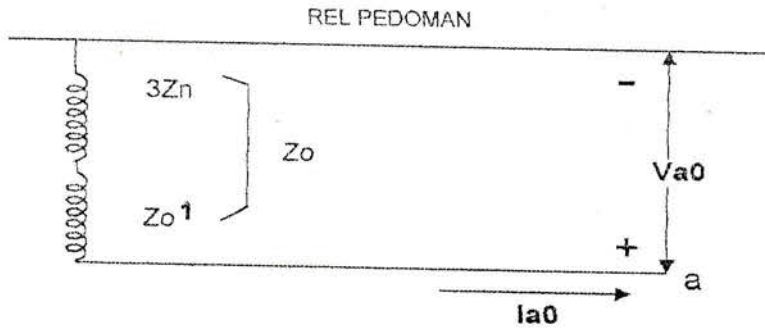
Gambar III.1d. Jala-jala urutan negatif.

Dari rangkaian jala-jala urutan negatif diatas dapat kita buat persamaan-persamaan untuk komponen-komponen jatuh tegangan dari titik a fasa a ke rel pedoman (tanah) adalah :

$$V_{a2} = -I_{a2} \cdot Z_2 \dots\dots\dots (III.3)$$



Gambar III.1e. Jalur-jalur urutan nol.



Gambar III.1f. Jala-jala urutan nol.

Dari rangkaian jala-jala urutan nol diatas dapat kita buat persamaan-persamaan untuk komponen-komponen jatuh tegangan dari titik a fasa a ke rel pedoman (tanah) adalah :

$$V_{a0} = -I_{a0} \cdot Z_0 \dots\dots\dots (III.4)$$

dimana

$$Z_0 = 3 Z_n + Z_{01} \dots\dots\dots (III.5)$$

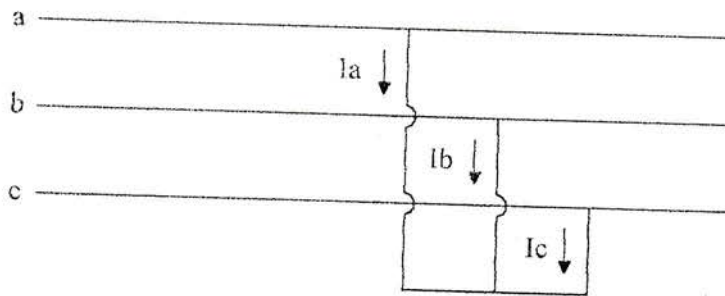
Arus yang mengalir pada impedansi Z_n diantara netral dan tanah adalah $3I_{a0}$ dengan berpedoman pada gambar : III.1e, kita lihat bahwa jatuh tegangan urutan nol dari titik a ke tanah adalah seperti persamaan (III.3) dimana Z_{01} adalah Impedansi urutan nol perfasa pada Generator.

Pada persamaan (III.1) kita lihat bahwa E_a adalah tegangan tanpa beban urutan positif ke netral, Z_1 dan Z_2 adalah Impedansi-Impedansi urutan positif dan negatif generator.

Persamaan-persamaan diatas berlaku untuk setiap generator yang mengalirkan arus yang tidak seimbang adalah merupakan titik tolak untuk persamaan-persamaan komponen arus dari macam jenis gangguan hubung singkat pada suatu sistem yang terganggu baik di generator, maupun di jala-jala dari saluran sistem daya listrik.

III.2. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Pada Sistem Daya

Untuk suatu gangguan saluran tiga fasa tonggak-tonggak dihubungkan seperti yang diberikan pada gambar dibawah ini :



Dari gambar : III.2. diatas didapat persamaan kondisi :

$$V_a = V_b = V_c \dots\dots\dots (III.5)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \dots\dots\dots (III.6)$$

Dari persamaan kondisi diatas bila kita substitusikan terhadap persamaan-persamaan pada komponen-komponen simetris pada fasa tak simetris maka kita akan peroleh persamaan arus gangguan tiga fasa I_f .

$$V_{a0} = 1/3 (V_a + V_b + V_c)$$

$$V_{a0} = V_a \dots\dots\dots (III.7)$$

$$V_{a1} = 1/3 (V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_{a1} = 0 \dots\dots\dots (III.8)$$

$$V_{a2} = 1/3 (V_a + a^2V_b + aV_c)$$

$$V_{a2} = 0 \dots\dots\dots (III.9)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (III.2) dengan persamaan (III.9) dan persamaan (III.8) dengan persamaan (III.1) akan kita peroleh.

$$I_{a2} = 0 \dots\dots\dots (III.10)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1} \dots\dots\dots (III.11)$$

$$I_{a0} = 0 \dots\dots\dots (III.12)$$

Untuk memperoleh persamaan arus hubung singkat tiga fasa maka kita harus mensubstitusikan persamaan (III.10), (III.11) dan persamaan (III.12) dengan persamaan pada komponen-komponen simetris pada fasa tak simetris.

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_a = I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1} \dots\dots\dots (III.13)$$

$$I_b = a^2I_{a1} + aI_{a2} + I_{a0}$$

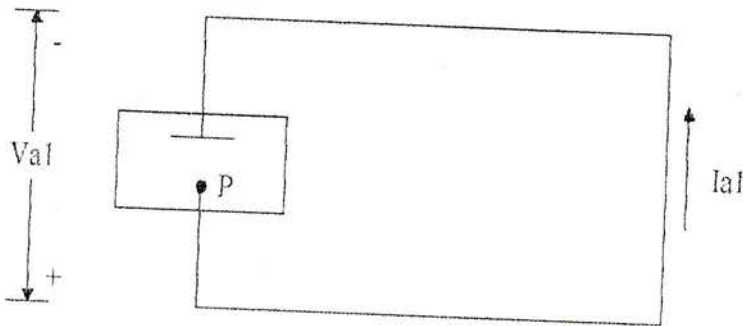
$$I_b = a^2I_{a1} = a^2 \frac{E_a}{Z_1} \dots\dots\dots (III.14)$$

$$I_c = a^2 I_{a1} = a^2 I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_c = a^2 I_{a1} = a \cdot \frac{E_a}{Z_1} \dots\dots\dots (III.15)$$

Sehingga besar $I_F = I_a + I_b + I_c$

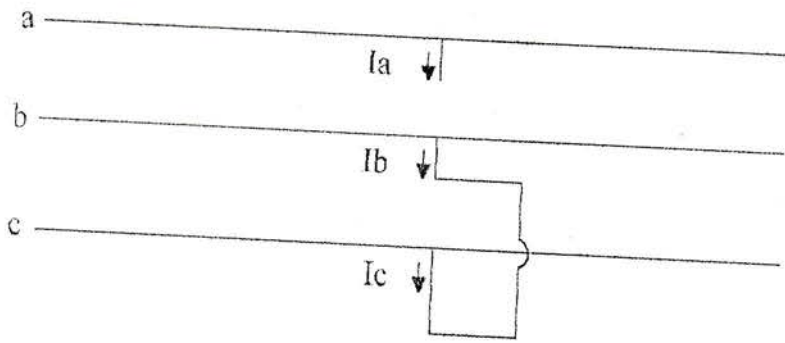
$$I_F = \frac{E_a}{Z_1} (1 + a + a^2) \dots\dots\dots (III.16)$$



Gambar : III.3. Gambar blok diagram rangkaian ekivalen dari gangguan tiga fasa dengan titik gangguannya adalah titik P.

III.3. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Pada Sistem Daya

Untuk suatu antar saluran, tonggak-tonggak hipotesis pada ketiga saluran pada gangguan tersambung seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar : III.4. Diagram sambungan batang-batang hipotesis untuk suatu gangguan antar saluran.

Dari gambar : III.4. diatas didapat persamaan kondisi :

$$I_a = 0 \quad I_b = -I_c \quad V_b = V_c \dots\dots\dots (III.17)$$

Dari ketiga persamaan kondisi diatas adalah sama seperti yang dipakai untuk suatu gangguan antar saluran pada suatu generator yang terisolir. Persamaan-persamaan ini bersama dengan komponen-komponen simetris pada fasa tak simetris, bila disubstitusikan akan kita peroleh arus gangguan yaitu :

$$V_{a1} = V_{a2} \dots\dots\dots (III.18)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_a + Z_2} \dots\dots\dots (III.19)$$

$$I_{a0} = 0 \dots\dots\dots (III.20)$$

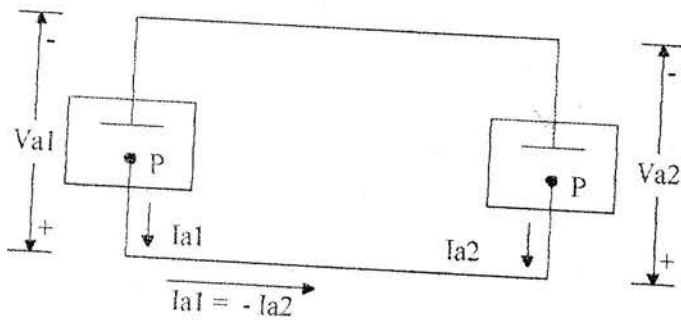
Maka dari persamaan (III.19), (III.20) dan persamaan (III.17) dengan persamaan pada komponen-komponen simetris pada fasa tak

simetris akan kita peroleh persamaan arus hubung singkat (IF) yaitu :

$$I_f = I_b = -I_c = \sqrt{3} \cdot I_{a1} \angle 90^\circ$$

$$I_f = I_b = -I_c = \sqrt{3} \cdot \frac{E_a \angle 90^\circ}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (III.21)$$

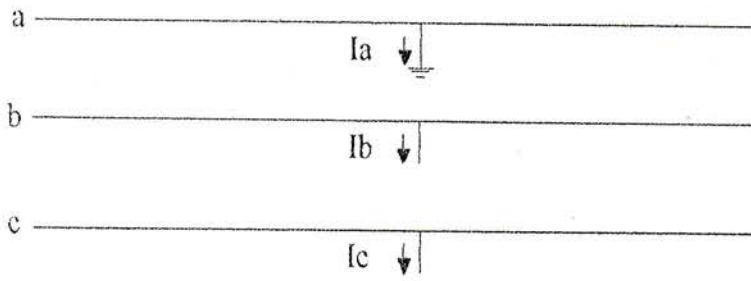
Rangkaian ekuivalen gangguan dua fasa pada fasa b dan fasa c dengan urutan jala-jala positif dan jala-jala negatif yang dihubungkan secara paralel seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar : III.5. Gambar blok diagram rangkaian ekuivalen dari gangguan dua fasa dengan titik gangguannya adalah titik P.

III.4. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Untuk sudut gangguan saluran tunggal ke tanah, tonggak-tonggak hipotesis pada ketiga saluran dihubungkan seperti yang nampak pada gambar : III.6



Gambar : III.6. Diagram sambungan batang-batang hipotesis untuk suatu gangguan dari saluran ketanah.

Dari gambar : III.6. diatas didapat persamaan kondisi :

$$I_b = 0 \quad I_c = 0 \quad V_a = 0 \dots\dots\dots (III.22)$$

Dari ketiga persamaan kondisi diatas adalah sama seperti yang dipakai untuk suatu gangguan dari saluran ke tanah pada suatu Generator tunggal. Persamaan-persamaan ini bersama dengan persamaan komponen-komponen simetris pada fasa tak simetris bila disubtitusikan akan kita peroleh arus gangguan yaitu :

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \dots\dots\dots(III.23)$$

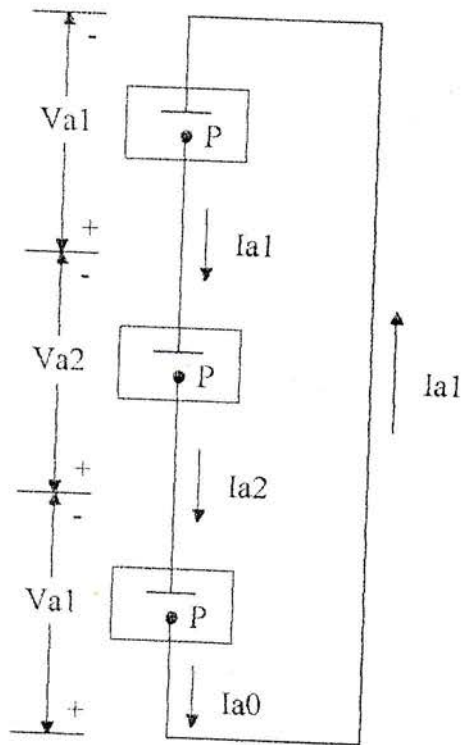
$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots\dots\dots (III.24)$$

$$I_f = I_a = 3I_1$$

$I_f = I_a = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots\dots\dots(III.25)$

Rangkaian ekivalen gangguan satu fasa ke tanah pada fasa a, dengan

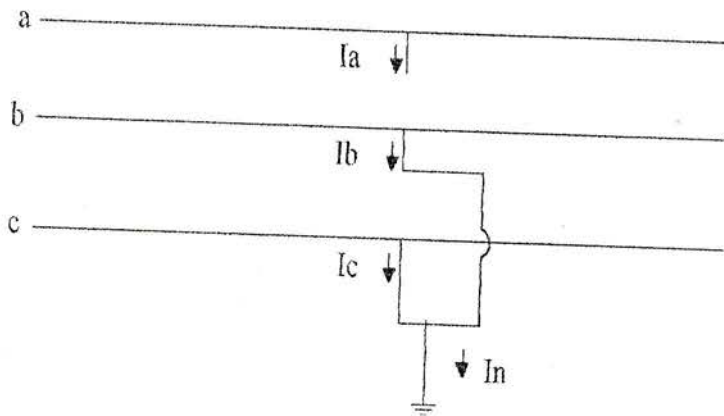
urutan positif, negatif dan jala-jala urutan nol dapat dilihat dibawah ini.



Gambar : III.7. Gambar blok rangkaian ekuivalen dari satu fasa ke tanah titik gangguannya adalah titik P.

III.5. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah Pada Sistem Daya

Sistem suatu sistem gangguan saluran ganda ke tanah, tonggak-tonggak dihubungkan seperti yang diberikan pada gambar dibawah ini, hubungan-hubungan berikut timbul pada gangguan dua fasa ke tanah.



Gambar : III.8. Diagram sambungan batang-batang hipotesis untuk suatu gangguan antar saluran ke tanah.

Dari Gambar : III.8. diatas didapat persamaan kondisi :

$$I_a = 0 \qquad V_b = 0 \qquad V_c = 0 \dots\dots\dots (III.26)$$

Dari ketiga persamaan kondisi diatas adalah sama seperti yang dipakai untuk suatu gangguan antar saluran ketanah pada suatu generator tunggal. Persamaan-persamaan ini bersama dengan persamaan komponen-komponen simetris pada fasa tak simetris bila disubtitusikan akan kita peroleh arus gangguan yaitu :

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \dots\dots\dots (III.27)$$

$$I_{a1} = \frac{Z_0 + Z_2}{Z_0 \times Z_2} \times V_{a1} \dots\dots\dots (III.28)$$

Dimana harga I_{a2} dan I_{a0} dapat dinyatakan dalam bentuk I_{a1} yaitu :

$$\begin{aligned}
 I_{a2} &= -\frac{V_{a1}}{Z_2} \\
 &= -I_{a1} \left(\frac{Z_0 \cdot Z_2}{Z_0 + Z_2} \right) \times \left(\frac{1}{Z_2} \right) \\
 I_{a2} &= -I_{a1} \left(\frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} \right) \dots\dots\dots (III.29)
 \end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned}
 I_{a0} &= \left(\frac{V_{a1}}{Z_0} \right) \\
 &= -I_{a1} \left(\frac{Z_0 \cdot Z_2}{Z_0 + Z_2} \right) \times \left(\frac{1}{Z_0} \right) \\
 I_{a0} &= -I_{a1} \left(\frac{Z_2}{Z_0 + Z_2} \right) \dots\dots\dots (III.30)
 \end{aligned}$$

Dari persamaan (III.27) kita dapat memperoleh arus gangguan (If) yaitu :

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \dots\dots\dots (III.31)$$

$$I_{a0} = 1/3 (I_a + I_b + I_c)$$

$$I_{a0} = 1/3 (0 + I_b + I_c)$$

$$I_{a0} = 1/3 (I_f) \longrightarrow I_f = I_n = 3 I_{a0}$$

$$I_f = 3 \cdot (-I_{a1}) \times \left(\frac{Z_2}{Z_0 + Z_2} \right)$$

$$I_f = -3 \cdot \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2} \times I_{a1}$$

\dots\dots\dots (III.32)

Dengan mengubah V_{a1} dari persamaan (III.1) ke dalam persamaan (III.28) maka akan kita peroleh :

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} \cdot Z_1$$

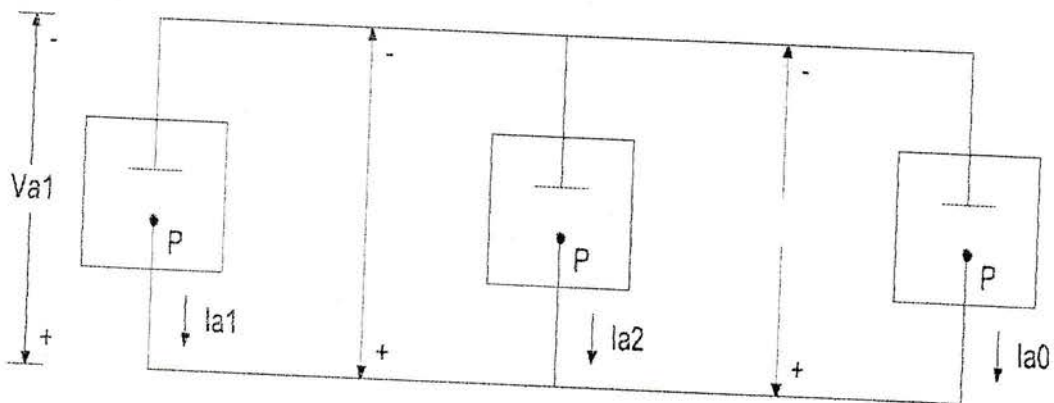
$$I_{a1} \cdot \left(\frac{Z_0 \cdot Z_2}{Z_0 + Z_2} \right) = E_a - I_{a1} \cdot Z_1$$

$$I_{a1} = \frac{Z_0 + Z_2}{Z_0 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2 + Z_0 \cdot Z_1} \cdot E_a \dots\dots\dots (III.33)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (III.16) kedalam persamaan (III.15) maka akan kita peroleh I_f sebagai fungsi E_a .

$$I_f = -3 \cdot E_a \cdot \left(\frac{Z_2}{Z_0 \cdot Z_2 + Z_1 (Z_0 + Z_1)} \right) \dots\dots\dots (III.34)$$

Rangkaian ekivalen gangguan dua fasa ke tanah pada fasa b dan fasa c dengan urutan jala-jala positif, jala-jala negatif dan jala-jala nol dengan hubungan paralel.



Gambar : III.9. Gambar blok diagram rangkaian ekivalen dari gangguan dua fasa ke tanah dengan titik gangguan adalah titik P.

BAB IV

STABILITAS TRANSIEN SISTEM TENAGA LISTRIK

IV.1. Umum

Untuk mengetahui apakah suatu sistem tetap stabil atau tidak, bila pada sistem itu terjadi suatu gangguan maka diperlukan studi stabilitas sistem tenaga.

Apabila pada suatu sistem tenaga terjadi gangguan, maka dari gangguan tersebut ada gaya yang bekerja untuk meniadakan sinkronisasi antara mesin-mesin sinkron yang beroperasi pada sistem tersebut. Dimana gaya ini akan mengakibatkan perubahan-perubahan pada tegangan, arus, frekuensi, putaran dan posisi rotor dari masing-masing mesin sinkron tersebut.

Kecenderungan dari suatu sistem untuk reaksinya terhadap suatu gangguan untuk menjaga sinkronisasi dan keseimbangan sistem itu disebut dengan stabilitas.

Gangguan yang terjadi pada suatu sistem dibedakan atas gangguan yang periodik, seperti penambahan beban secara berangsur-angsur dan gangguan transien yaitu gangguan yang disebabkan oleh

gangguan hubung singkat, proses switching dan penambahan beban secara tiba-tiba.

Stabilitas yang disebabkan adanya gangguan yang periodik disebut dengan stabilitas steady-state dan stabilitas yang disebabkan adanya gangguan transien disebut dengan stabilitas transien.

Dan dalam pembahasan ini penulis memusatkan pada stabilitas transien yaitu yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah karena pada dasarnya gangguan transien yang paling sering dialami suatu sistem dibandingkan dengan gangguan periodik sehingga batas stabilitas transien selalu lebih rendah dari pada stabilitas steady-state.

IV.2. Representasi Sistem Tenaga dan Sistem Satuan

Suatu sistem tenaga listrik adalah kumpulan dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti : Generator, Transformator, transmisi dan beban yang dihubungkan satu dengan yang lain sehingga membentuk suatu sistem tenaga listrik.

Dan untuk memudahkan dalam pembahasan-pembahasan maka komponen-komponen tersebut terlebih dahulu direpresentasikan.

IV.2.1. Representasi Sistem Pada Studi Stabilitas Transien

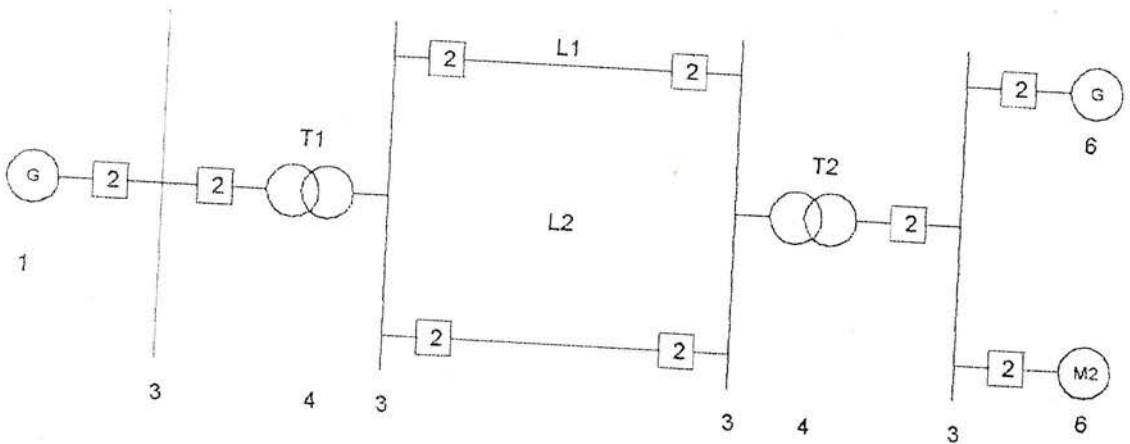
Adapun representasi sistem tenaga untuk studi stabilitas transien adalah :

1. Diagram satu garis (on line diagram)

Suatu sistem tiga fasa yang seimbang selalu dipecahkan persatu fasa dengan menggambarkan beban satu garis.

Maksud diagram satu garis itu adalah untuk memberikan semua informasi yang perlu dan dalam bentuk yang sesuai mengenai sistem itu.

Diagram satu garis dari suatu sistem yang sangat sederhana dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar : IV.2.1. Diagram satu garis

Keterangan gambar :

1. Generator

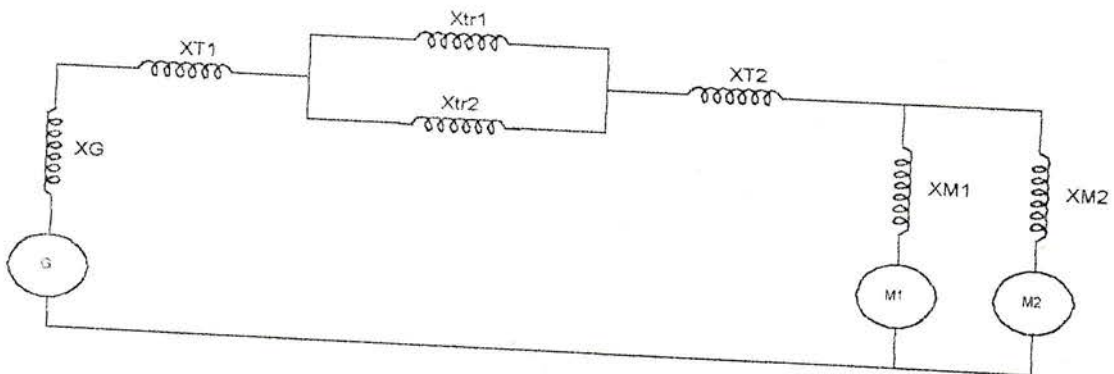
2. Pemutus Daya (Circuit breaker)
3. Rel daya (Bus-bar)
4. Transformator
5. Transmisi
6. Beban

2. Diagram impedansi atau diagram reaktansi

Untuk menganalisa sifat kerja dari suatu sistem dalam keadaan kerja atau dalam keadaan hubung singkat diagram satu garis dari suatu sistem tenaga harus dirubah menjadi diagram reaktansi.

Impedansi atau reaktansi dalam gambar itu menggambarkan impedansi ekivalen dari tiap komponen dalam sistem tenaga itu.

Diagram impedansi atau diagram reaktansi dapat dibuat dari Gambar IV.2.1. yaitu :



Gambar : IV.2.2. Diagram Impedansi atau diagram reaktansi dari Gambar :IV.2.1.

3. Generator sinkron

Generator sinkron direpresentasikan sebagai reaktansi transien yang terhubung seri dengan tegangan dibelakang reaktansi transien.

4. Transformator

Transformator direpresentasikan sebagai reaktansi bocor X .

5. Saluran Transmisi

Saluran transmisi direpresentasikan sesuai dengan kelasnya yaitu :

Pendek, menengah atau panjang.

6. Beban dinamis dan beban statis direpresentasikan dengan Impedansi yang konstan.

IV.2.2. Sistem Satuan

Untuk memudahkan perhitungan atau analisa pada sistem tenaga listrik biasanya dipakai harga-harga dalam satuan atau dalam per-unit. Harga-harga yang dinyatakan dalam satuan ini ialah harga yang sebenarnya yang ada di bagi harga dasar (Base Value). Harga

dasar ini dapat dipilih sembarang, jadi bila arus dinyatakan dalam harga satuan yang disingkat dengan “Pu” demikian juga tegangan, daya dan Impedansi.

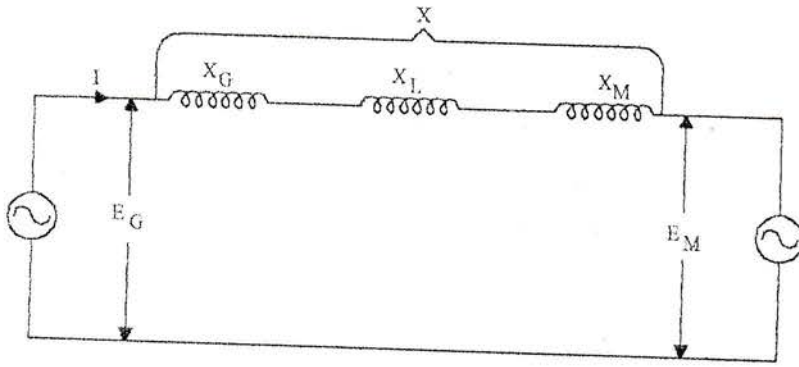
IV.3. Persamaan Stabilitas Transien

Untuk menentukan persamaan stabilitas transien dapat kita tinjau suatu sistem yang sederhana yaitu : terdiri dari sebuah generator sinkron yang mengalirkan daya melalui saluran transmisi yang mempunyai reaktansi induktif X_L ke sebuah motor sinkron, yaitu seperti Gambar : IV.3. dibawah ini :



Gambar : IV.3. Diagram satu garis

Dengan merepresentasikan sistem ini, maka akan diperoleh diagram reaktansi seperti yang ditunjukkan pada gambar IV.4. dibawah ini.



Dari Gambar : IV.4. kita akan memperoleh :

$$E_G = E_M + jX.I \quad \dots\dots\dots (IV.3)$$

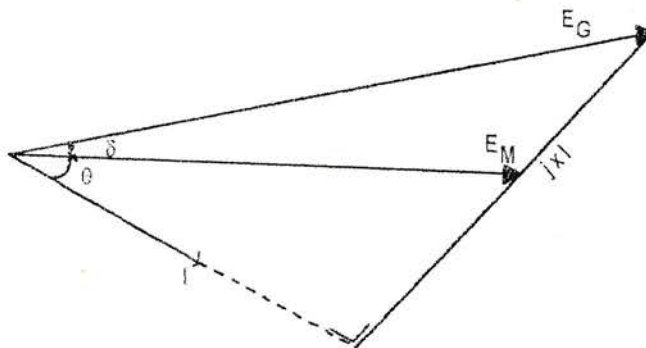
dimana

$$X = X_G + X_L + X_M \quad \dots\dots\dots (IV.4)$$

dari persamaan (IV.3) didapat :

$$I = \frac{E_G - E_M}{jX} \quad \dots\dots\dots (IV.5)$$

Secara vektoris dapat ditunjukkan seperti Gambar : (IV.5) dibawah ini :



Gambar : IV.5. Vektor diagram dari persamaan (IV.3)

Besar Daya Output Generator adalah :

$$P = \text{Re} (\overline{EG} \cdot I) \dots\dots\dots (IV.6)$$

Dimana Re menyatakan bagian real dari daya P, dan \overline{EG} adalah konjugate EG.

Bila persamaan (IV.5) disubtitusikan dengan persamaan (IV.6), maka akan diperoleh :

$$P = \text{Re} \left(\overline{EG} \cdot \frac{E_g - E_M}{jX} \right) \dots\dots\dots (IV.7)$$

Dimisalkan :

$$\begin{aligned} E_M &= |EM| \angle 0^\circ \\ E_G &= |EG| \angle \delta \dots\dots\dots (IV.8) \\ \overline{EG} &= |EG| \angle -\delta \end{aligned}$$

Dengan mensubtitusikan persamaan-persamaan (IV.8) dengan persamaan (IV.7) akan diperoleh :

$$\begin{aligned} P &= \text{Re} \left[EG \angle -\delta \cdot \frac{(EG \angle \delta - EM \angle 0^\circ)}{x 90^\circ} \right] \\ &= \text{Re} \left[\frac{EG^2 \angle 90^\circ}{x} - \frac{EG \cdot EM \angle 90^\circ - \delta}{x} \right] \\ &= \left[\frac{EG^2}{x} \text{COS}(90^\circ) - \frac{EG \cdot EM}{x} \text{COS}(-90^\circ - \delta) \right] \\ &= - \frac{EG \cdot EM}{x} \text{COS} - (90^\circ + \delta) \\ &= - \frac{EG \cdot EM}{x} \text{COS}(90^\circ + \delta) \end{aligned}$$

$$P = - \frac{E_G \cdot E_M}{X} \sin \delta \dots\dots\dots (IV.9)$$

Dimana P adalah daya yang mengikat sistem antara Generator dan mesin, yang harganya ditentukan oleh perubahan sudut sedangkan X adalah reaktansi ekivalen antara Generator dan motor.

Apabila terjadi suatu gangguan pada sistem, maka harga reaktansi X akan berubah sehingga daya P dan pergeseran sudut δ sistem tersebut juga akan berubah.

Suatu sistem dikatakan stabil apabila memenuhi syarat :

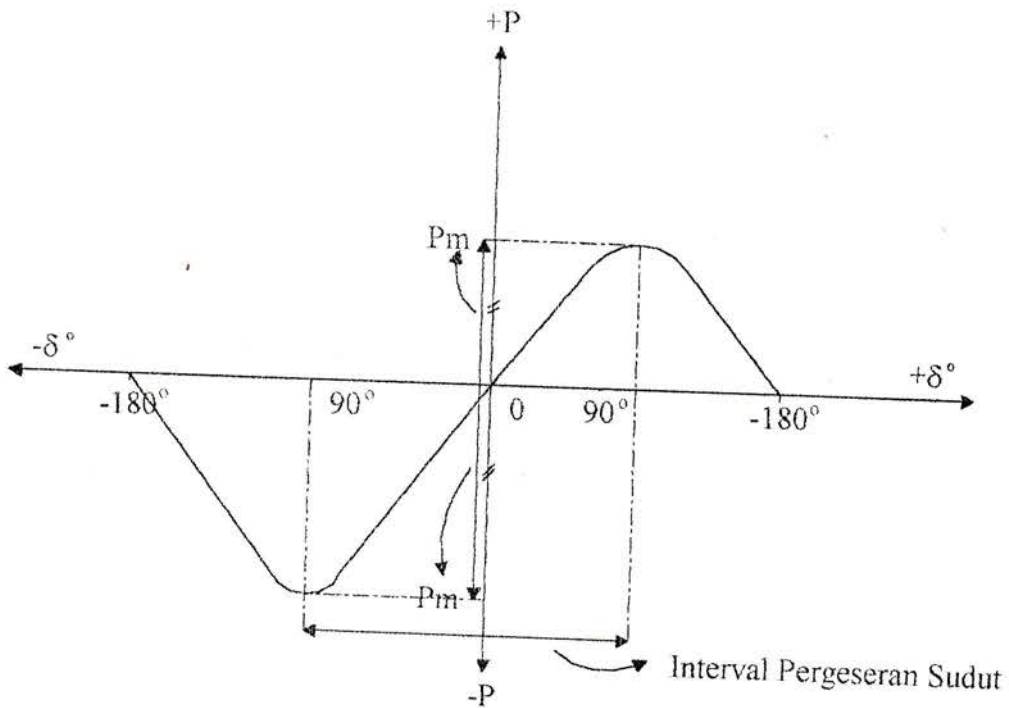
1. Interval pergeseran adalah berkisar pada :

$$- 90^\circ < \delta < 90^\circ$$

2. Turunan pertama dari daya P terhadap sudut δ adalah positif atau :

$$\frac{dp}{d\delta} = \text{positif}$$

Hal ini dapat ditunjukkan oleh kurva sudut daya pada Gambar : IV.6 dibawah ini :



Gambar : IV.6. Kurva sudut daya dari sistem pada Gambar : IV.4.

IV.4. Persamaan Ayunan

Persamaan yang mengatur gerakan rotor dari suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (acceleration torque) adalah hasil kali dari momen kelambanan (Moment of Inertia) rotor dan percepatan sudutnya.

Dimana dalam hal ini harus ditinjau beberapa sifat mekanis mesin-mesin sinkron agar dapat menentukan stabilitas transien (lihat lampiran 1).

Momen yang bekerja pada suatu gerak rotasi adalah :

$$T = I \alpha$$

$$T = I \frac{d^2 \theta}{dt^2} \dots\dots\dots (IV.10)$$

Momen yang bekerja pada rotor terdiri dari momen input mekanis yaitu dari penggerak mula, momen output serta momen yang melawan rugi-rugi baik itu rugi-rugi gesek, angin maupun rugi-rugi inti. Dimana momen mekanis berlawanan arah dengan momen lainnya.

Dengan mengabaikan momen yang melawan rugi-rugi, maka perbedaan antara momen mekanis dengan momen listrik merupakan momen percepatan dari mesin tersebut, atau dengan rumus dapat ditulis.

$$T_a = T_i - T_u \dots\dots\dots (IV.11)$$

dimana

T_a = momen putar percepatan, dalam (N - m)

T_i = momen mekanis, dalam (N - m)

T_u = momen putar listrik, dalam (N - m)

Dalam keadaan normal $T_a = 0$ atau $T_i = T_u$, yang berarti tidak ada percepatan ataupun perlambatan.

Tetapi pada keadaan tidak normal yaitu adanya gangguan maka selama gangguan itu berlangsung harga $T_a \neq 0$ atau $T_i \neq T_u$, yang berarti ada percepatan ataupun perlambatan rotor.

Pergeseran sudut θ berubah-ubah terus-menerus terhadap waktu sehingga dapat ditulis sebagai berikut :

$$\theta = W_0 \cdot t + \delta$$

atau

$$\delta = \theta - W_0 \cdot t \quad \dots\dots\dots (IV.12)$$

dimana :

W_0 = Kecepatan sudut sinkron pada keadaan normal dalam
(radian per detik)

δ = Adalah pergeseran sudut rotor mesin sinkron dalam
(radian)

Turunan kedua terhadap waktu t dari persamaan (IV.12) adalah :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad \dots\dots\dots (IV.13)$$

Bila persamaan (IV.13) disubstitusikan terhadap persamaan (IV.10), akan diperoleh :

$$T = I \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad \dots\dots\dots (IV.14)$$

Dalam hal ini T adalah momen percepatan yang dialami oleh rotor, sehingga :

$$T_a = T_i - T_u = I \frac{d^2\delta}{dt^2} \dots\dots\dots (IV.15)$$

Kemudian persamaan (IV.15) kedua ruasnya dikalikan dengan "W", maka :

$$T_a \cdot W = T_i \cdot w - T_u \cdot w = I \cdot w \frac{d^2\delta}{dt^2} \dots\dots\dots (IV.16)$$

dimana persamaan (IV.16), dapat ditulis menjadi :

$$P_a = P_i - P_u = M \frac{d^2\delta}{dt^2} \dots\dots\dots (IV.17)$$

dimana :

P_a = Daya percepatan dalam (P_u)

P_i = Daya mekanis dalam (P_u)

P_u = Daya elektrik dalam (P_u)

Sedangkan harga M adalah konstanta kelambanan (Inertia Constant) dari mesin dan δ adalah pergeseran sudut rotor mesin dalam sistem tersebut. Persamaan (IV.17) ini, disebut dengan persamaan ayunan.

IV.4.1. Konstanta-konstanta Inersia Dari Mesin

Rotor yang berputar mempunyai energi kinetik sebesar :

$$E_K = W = \frac{1}{2} I \cdot w^2 = \frac{1}{2} M \cdot w \dots\dots\dots (IV.18)$$

karena :

$$I = \frac{WR^2}{32,2} \dots\dots\dots (IV.19)$$

$$w = \frac{2\pi n}{60} \dots\dots\dots (IV.20)$$

dan

$$N = \frac{746}{550} \times 10^{-6} E_k \dots\dots\dots (IV.21)$$

Subtitusikan persamaan (IV.19) & (IV.20) ke persamaan (IV.18) dan hasilnya di subtitusikan lagi ke persamaan (IV.21) maka diperoleh hasilnya adalah :

$$N = \frac{746}{550} \times 10^{-6} \times \frac{1}{2} \left(\frac{WR^2}{32,2} \right) \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

$$N = 2,31 \times 10^{-10} \times WR^2 n^2 \dots\dots\dots (IV.22)$$

Energi kinetik dapat juga ditulis :

$$N = \frac{1}{2} MW_e \dots\dots\dots (IV.23)$$

Maka :

$$M = \frac{2N}{W_e} \dots\dots\dots (IV.24)$$

Sedangkan harga $W_e = 360 \cdot f$, maka persamaan (IV.24), menjadi :

$$M = \frac{N}{180 \cdot f} \dots\dots\dots (IV.25)$$

Kemudian persamaan (IV.22) disubtitusikan ke persamaan (IV.25) dan diperoleh :

$$M = \frac{2,31 \times 10^{-10} WR^2 \cdot n^2}{180 \cdot f}$$

$$M = 1,28 \times 10^{-12} \frac{WR^2 \cdot n^2}{f} \dots\dots\dots (IV.26)$$

karena :

$$n = \frac{120 \cdot f}{P} \dots\dots\dots (IV.27)$$

Maka persamaan (IV.27) disubstitusikan ke persamaan (IV.26) dan diperoleh :

$$M = 1,28 \times 10^{-12} \frac{WR^2 \left(\frac{120 \cdot f}{P}\right)^2}{f}$$

$$M = 1,28 \times 10^{-12} \times 1,44 \times 10^4 \frac{WR^2 \cdot f^2}{p^2 \cdot f}$$

$$M = 1,84 \times 10^{-8} \frac{WR^2 \cdot f}{p^2} \dots\dots\dots (IV.28)$$

Konstanta yang lain yang disebut dengan H yaitu energi yang tersimpan dalam joule dibagi rating volt ampere.

Dimana rumusan dari H dapat dibuat seperti rumusan berikut :

$$H = \frac{\text{Energi tersimpan dalam Mega joule}}{\text{Rating dari mesin dalam Mega Volt Ampere}}$$

$$H = \frac{N (Mj)}{G (MVA)} \dots\dots\dots (IV.29)$$

maka : $N = HG = \frac{1}{2} Mwe$, dimana : $We = 360 \cdot f$

$$M = \frac{2 \cdot HG}{W_e}$$

$$M = \frac{G \cdot H}{180 \cdot f} \dots\dots\dots (IV.30)$$

Harga konstanta inersia M berbeda untuk mesin yang berbeda yang dapat dinyatakan dalam per unit.

Dimana :

- WR² = Momen inersia dalam pound - feet²
- I = Momen inersia dalam slug-feet²
- n = Speed dalam revolutions per minute (rpm)
- w = Speed dalam radian per second
- w_e = Speed dalam elektrical degrees per second
- W = Energi kinetik dalam foot - pounds (ft-lb)
- M = Konstanta inersia dalam Mega joule - second per electrical degree (M j sec/electrical)
- N = Energi kinetik dalam Mega joule (Mj)
- f = Frekuensi dalam cycle per second (Hz)
- P = Number of pole (jumlah kutub)
- G = Rating of machine in Mega Volt Ampere (MVA).

IV.5. Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Stabilitas Transien

Lepas dari macam dan lokasi gangguan, yang mana hal ini tidak dapat dikontrol oleh manusia maka dengan demikian ada beberapa cara untuk menaikkan stabilitas transien dari sistem daya yaitu :

1. Memperbesar konstanta inersia H.

Semakin besar konstanta inersia H maka sistem akan semakin stabil tetapi dengan memperbesar H maka ukuran-ukuran dari mesin harus diperbesar sehingga memerlukan biaya yang besar.

2. Memperbesar tegangan generator.

Dengan memperbesar tegangan generator maka P_{\max} akan semakin besar, ini dapat dilihat dari persamaan stabilitas transien terdahulu yaitu :

$$P_u = \frac{E_G \cdot E_M}{X} \sin \delta$$

Maka jelas dari persamaan diatas bahwa dengan menaikkan tegangan pada EG dan EM maka P_u akan naik sehingga stabilitas sistem akan naik.

3. Memperkecil reaktansi X

Dengan memperkecil reaktansi, maka amplitudo dari kurva sudut daya akan bertambah besar. Salah satu cara membuat kecil reaktansinya adalah dengan membuat beberapa saluran paralel.

Sebagai ganti suatu saluran tunggal digunakan saluran-saluran transmisi paralel. Untuk jenis-jenis gangguan yang lain pada satu saluran, daya yang dipindahkan selama berlangsungnya gangguan adalah lebih besar bila ada dua saluran-saluran yang paralel, dibandingkan dengan daya yang dipindahkan, melalui suatu saluran tunggal yang mengalami gangguan.

Bila ada lebih dari dua saluran yang paralel, daya yang dipindahkan selama gangguan akan menjadi lebih besar lagi. Jadi bertambahnya suatu gangguan berarti makin rendahnya daya percepatan bagi mesin dan bertambahnya kemungkinan untuk kestabilan.

4. Dengan menggunakan alat-alat pemutus yang cepat dan diikuti oleh alat-alat penutup yang cepat pula.

Dengan semakin cepatnya gangguan diisolir maka stabilitas limit akan semakin besar. Dimana kita ketahui gangguan-gangguan fasa tunggal lebih sering terjadi daripada gangguan-gangguan tiga fasa maka rancangan sistem rele yang memungkinkan bekerjanya kutub pemutus rangkaian (circuit breaker pole operation) secara bebas atau selektif yaitu dapat digunakan untuk menentukan fasa yang mengalami gangguan, sementara fasa-fasa yang tidak terganggu sama sekali tidak disinggung oleh gangguan tersebut.

Untuk pemecahan dari swing equation (persamaan ayunan) kita pakai adalah metode konvensional yaitu equal area criterion (kriteria sama luas).

Dimana dengan equal area criterion akan diperoleh sudut kritis yaitu : sudut terbesar yang diperbolehkan sebelum gangguan diisolir sehingga sistem tetap stabil.

Apabila kita sudah memperoleh sudut kritisnya maka akan diperoleh waktu pemutusan kritis dari circuit breaker (t_c) sehingga sistem dayanya tetap stabil.

BAB V

KESIMPULAN

Dari analisa tulisan ini dapat diambil kesimpulan bahwa dari analisa tulisan sistem kestabilan pada sistem tenaga listrik dapat disimpulkan :

1. Dengan memperbesar konstanta inersia H dari mesin, dengan kata lain kapasitas mesin diperbesar, maka kestabilan mesin terhadap gangguan hubung singkat lebih baik (lebih stabil).

2. Dengan memperbesar tegangan generator maka panas akan mengalir besar, dekat dilihat dari persamaan sudut daya, yang mana tegangan generator dibesarkan sementara reaktansi tetap maka daya mengalir besar.

3. Dengan memperkecil reaktansi dari sistem maka amplitudo kurva sudut daya akan bertambah besar, salah satu cara mengecilkan reaktansi sistem ialah dengan cara membuat saluran-saluran paralel.

4. Setelah menghitung waktu pemutusan maka dapat dilihat bahwa mungkin cepat waktu pemutusan dari alat pengaman maka tingkat kestabilan semakin tinggi, tetapi kalau ditentukan waktu pemutusan yang paling cepat maka ada kelemahannya pada sistem, yaitu sistem semakin tidak andal.

DAFTAR PUSTAKA

1. Edward Wilson Kimbark, Sc.D, **Power System Stability**, Volume I, John Wiley and Sons, 1948.
2. Hutauruk, T.S., **Pengantar Sistem Tenaga Listrik**, Departemen Elektro Teknik, Fakultas Teknologi Industri, (ITB), Bandung, 1975.
3. Nagrath, I.J., **Modern Power System Analisis**, Limited New Delhi, 1980.
4. Titareuko, M. And Moskov – Dukelsky I, **Protective Relaying In Electric Power System**, Translated from the Russian by Jákob Fëinberg, Peace Publisher Moskow.
5. Vadhera, S.S, **Power Systems Analysis and Stability**, Khanna Publis Hers, Nai Sarak, 1981.
6. William D Stevanson, Jr., **Analisa Sistem Tenaga**, Edisi keempat, Erlangga, Jakarta, 1984.