

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Sinkron

Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik. Generator sinkron (*alternator*) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan *stator* dan *rotornya*. (Zuhail "Dasar Tenaga Listrik" ITB, Bandung, 1991)

Generator sinkron dengan definisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya *sinkron* dengan putaran mekanis generator tersebut. *Rotor* generator sinkron yang diputar dengan penggerak mula (*prime mover*) yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putar yang sama dengan putaran rotor tersebut. Hubungan antara medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada *stator* ditunjukkan pada persamaan 2.1 dibawah ini :

$$f = \frac{ns \times p}{120} \quad (2.1)$$

Dimana :

f : frekuensi listrik (Hz)

ns :kecepatan putar medan magnet atau kecepatan putar rotor (Rpm)

p : jumlah kutub

Generator sinkron sering kita jumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik (dengan kapasitas yang relatif besar). Misalnya, pada PLTA, PLTU, PLTD dan lain-lain. Selain generator dengan kapasitas besar, kita mengenal juga generator dengan kapasitas yang relatif kecil, misalnya

generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut Generator Set atau generator cadangan. (Marsudi, Djiteng "Operasi System Tenaga Listrik" Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006).



Gambar 2.1 *Generator sinkron merk Deutz Power system*

2.1.1 Komponen Generator Sinkron

Generator sinkron mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik bolak-balik secara elektromagnetik. Energi mekanik berasal dari penggerak mula yang memutar rotor, sedangkan energi listrik dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan-kumparan *stator*. Secara umum generator sinkron terdiri atas stator, rotor dan celah udara. Stator merupakan bagian dari generator *sinkron* yang diam sedangkan *rotor* adalah bagian yang berputar dimana diletakkan kumparan medan yang disuplai oleh arus searah dari *Eksiter*. Celah udara adalah ruang antara *stator* dan *rotor* dibawah ini merupakan komponen utama generator sinkron yaitu :

1. Stator

Bagian yang diam (stator) terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

a. Inti stator

Bentuk dari inti stator ini berupa cincin laminasi-laminasi yang diikat serapat mungkin untuk menghindari rugi-rugi arus eddy (*eddy current losses*). Pada inti ini terdapat slot-slot untuk menempatkan konduktor dan untuk mengatur arah medan magnetnya.

b. Belitan stator

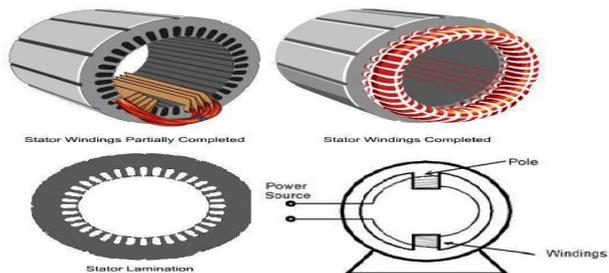
Bagian stator yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang terdapat di dalam slot-slot dan ujung-ujung kumparan. Masing-masing slot dihubungkan untuk mendapatkan tegangan induksi.

c. Alur stator

Merupakan bagian stator yang berperan sebagai tempat belitan stator yang ditempatkan.

d. Rumah stator

Bagian dari *stator* yang umumnya terbuat dari besi tuang yang berbentuk silinder. Bagian belakang dari rumah *stator* ini biasanya memiliki sirip-sirip sebagai alat bantu dalam proses pendinginan.



Gambar 1. Stator

2. Rotor

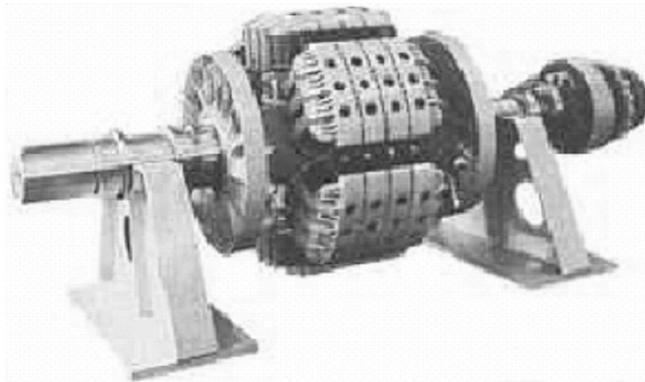
Rotor adalah bagian generator yang bergerak atau berputar. Antara *rotor* dan *stator* dipisahkan oleh celah udara (*air gap*). Rotor terdiri dari dua bagian umum yaitu :

a. Inti kutub

Pada bagian inti kutub terdapat poros dan inti rotor yang memiliki fungsi sebagai jalan atau jalur fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan medan. Pada kumparan medan ini juga terdapat dua bagian, yaitu bagian penghantar sebagai jalur untuk arus pemacuan dan bagian yang diisolasi. Isolasi pada bagian ini harus benar-benar baik dalam hal kekuatan mekanisnya, ketahanannya akan suhu yang tinggi dan ketahanannya terhadap gaya sentrifugal yang besar. Konstruksi rotor untuk generator yang memiliki nilai putaran relatif tinggi biasanya menggunakan konstruksi rotor dengan kutub silindris atau "*cylindrica poles*" dan jumlah kutubnya relatif sedikit (2, 4, 6). Konstruksi ini dirancang tahan terhadap gaya-gaya yang lebih besar akibat putaran yang tinggi.

b. Kumparan Medan (Kumparan rotor)

Kumparan medan merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah (DC) dari sumber eksitasi tertentu. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa *salient pole* (kutub menonjol) dan *non salient pole* (kutub silinder).



Gambar 2. Rotor

a. Jenis Kutub Menonjol (*Salient Pole*)

Pada jenis salient pole, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubung seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh *Eksiter*, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan. Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400 rpm). Generator *sinkron* biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. *Rotor* kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang karena :

1. Kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.
2. Konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

b. Jenis Kutub Silinder (*Non Salient Pole*)

Pada jenis *non salient pole*, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-

alur terbuat di sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya dan terhubung seri dengan *Eksiter*. Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 atau 3000 rpm) seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap. *Rotor* silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena :

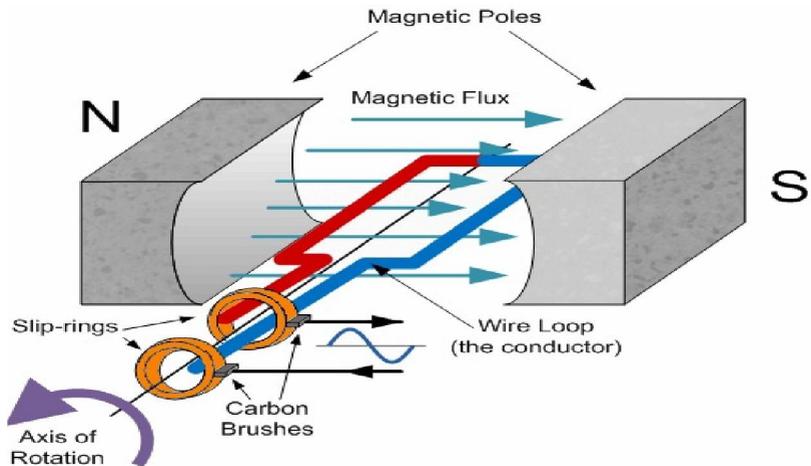
1. Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi.
2. Distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

2.1.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Adapun prinsip kerja dari generator *sinkron* secara umum adalah sebagai berikut :

1. Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan. Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan maka akan menimbulkan fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.
2. Penggerak mula (*Prime Mover*) yang sudah terkopel dengan *rotor* segera dioperasikan sehingga *rotor* akan berputar pada kecepatan nominalnya.
3. Perputaran *rotor* tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga pada kumparan jangkar yang terletak di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya

terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut.



Gambar 2.1.2 Prinsip kerja generator AC

Pada hukum Faraday, mengenai induksi elektromagnetik sebagai fenomena dasar yang diterapkan pada generator. Hukum Faraday menyebutkan jika terjadi perubahan garis gaya magnet pada sebuah kumparan kawat, maka akan timbul gaya gerak listrik (ggl) pada kawat tersebut. Jika kumparan kawat dihubungkan dengan rangkaian listrik tertutup, maka akan timbul pula arus listrik yang mengalir pada rangkaian. Generator *sinkron* tiga fasa, menggunakan tiga kumparan jangkar yang ditempatkan di *stator* yang disusun dalam bentuk tertentu, sehingga susunan kumparan jangkar yang sedemikian akan membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kumparan jangkar yang besarnya sama tapi berbeda fasa 120° satu sama lain. Setelah itu ketiga terminal kumparan jangkar siap dioperasikan untuk menghasilkan

energi listrik. (Marsudi, Djiteng "Operasi System Tenaga Listrik" Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006).

2.1.3 Reaksi Jangkar Generator Sinkron

Saat generator sinkron bekerja pada beban nol tidak ada arus yang mengalir melalui kumparan jangkar (*stator*), sehingga yang ada pada celah udara hanya fluksi arus medan *rotor*. Namun jika generator sinkron diberi beban, arus jangkar (*I_a*) akan mengalir dan membentuk fluksi jangkar. Fluksi jangkar ini kemudian mempengaruhi fluksi arus medan dan akhirnya menyebabkan berubahnya harga tegangan terminal generator sinkron. Reaksi ini kemudian dikenal sebagai reaksi jangkar. Pengaruh yang ditimbulkan oleh fluksi jangkar dapat berupa distorsi, penguatan (*magnetising*), maupun pelemahan (*demagnetising*) fluksi arus medan pada celah udara. Perbedaan pengaruh yang ditimbulkan fluksi jangkar tergantung kepada beban dan faktor daya beban, yaitu :

- a. Untuk beban resistif ($\cos\phi = 1$)
Pengaruh fluksi jangkar terhadap fluksi medan hanyalah sebatas mendistorsinya saja tanpa mempengaruhi kekuatannya (*cross magnetising*).
- b. Untuk beban induktif murni ($\cos\phi = 0$ lagging)
Arus akan tertinggal sebesar 90° dari tegangan. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan melawan fluksi arus medan. Dengan kata lain reaksi jangkar akan *demagnetising* artinya pengaruh reaksi jangkar akan melemahkan fluksi arus medan.
- c. Untuk beban kapasitif murni ($\cos\phi = 0$ lead)
Arus akan mendahului tegangan sebesar 90°. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan searah dengan fluksi arus medan sehingga reaksi jangkar yang terjadi

akan *magnetising* artinya pengaruh reaksi jangkar akan menguatkan fluksi arus medan.

- d. Untuk beban tidak murni (induktif atau kapasitif)
Pengaruh reaksi jangkar akan menjadi sebagian *magnetising* dan sebagian *demagnetising*. Saat beban adalah kapasitif, maka reaksi jangkar akan sebagian *distortif* dan sebagian *magnetising*. Sementara itu saat beban adalah induktif, maka reaksi jangkar akan sebagian *distortif* dan sebagian *demagnetising*, namun pada prakteknya beban umumnya adalah induktif.

2.1.4 Generator (*alternator*) tanpa beban

Dengan memutar *alternator* pada kecepatan *sinkron* dan *rotor* diberi arus medan (IF), maka tegangan (E_a) akan terinduksi pada kumparan jangkar *stator*. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut :

$$E_a = c \cdot n \cdot \phi \quad (2.2)$$

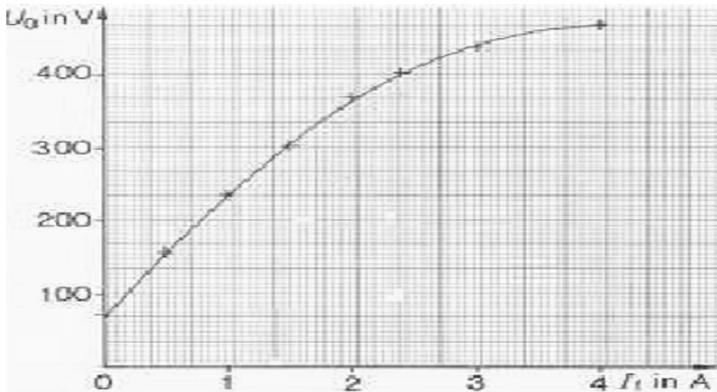
Dimana :

c = konstanta mesin

n = putaran sinkron (rpm)

ϕ = fluks yang dihasilkan oleh IF

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada *stator*, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (IF) diubah-ubah harganya, akan diperoleh harga E_a seperti yang terlihat pada kurva sebagai berikut. diperlihatkan pada gambar berikut ini :



Gambar 2.1.4 Karakteristik tanpa beban generator sinkron

2.1.5 Generator (*alternator*) Berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi magnetisasi (X_m). Reaktansi pemagnet (X_m) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi *sinkron* (X_s). Persamaan tegangan pada generator adalah:

$$E_a = V + I.R_a + j.I.X_s \quad (2.3)$$

$$X_s = X_m + X_a \quad (2.4)$$

Dimana :

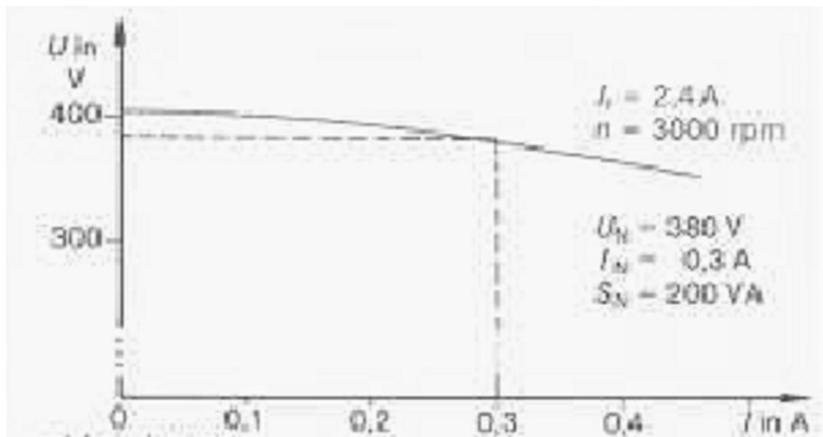
E_a = tegangan induksi pada jangkar (volt)

V = tegangan terminal output (volt)

R_a = resistansi jangkar (ohm)

X_s = reaktansi sinkron (ohm)

Karakteristik pembebanan dan diagram vektor dari generator atau *alternator* berbeban induktif (faktor kerja terbelakang) dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.1.5 Karakteristik alternator berbeban induktif

2.1.6 Kerja *Paralel Generator (alternator)*

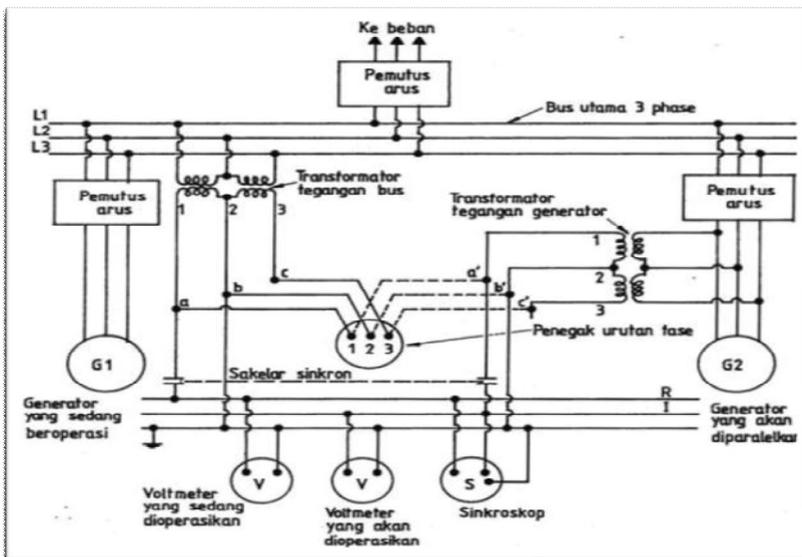
Untuk melayani beban yang berkembang, maka diperlukan tambahan sumber daya listrik. Agar sumber daya listrik yang baru (*new alternator*) bisa digunakan bersama, maka dilakukan penggabungan alternator dengan cara mempararelkan dua atau lebih *alternator* pada sistem tenaga dengan maksud memperbesar kapasitas daya yang dibangkitkan pada sistem. Selain untuk tujuan di atas, kerja paralel juga sering dibutuhkan untuk menjaga kontinuitas pelayanan apabila ada mesin (*alternator*) yang harus dihentikan, misalnya untuk istirahat atau reparasi, maka alternator lain masih bisa bekerja untuk mensuplai beban yang lain. Untuk maksud mempararelkan ini, ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, yaitu:

1. Harga sesaat ggl kedua alternator harus sama dalam kebesarannya, dan bertentangan dalam arah, atau harga sesaat ggl generator harus sama dalam

kebesarannya dan bertentangan dalam arah dengan harga efektif tegangan jala-jala.

2. Frekuensi kedua generator atau frekuensi generator dengan jala-jala harus sama.
3. Fasa kedua generator harus sama.
4. Urutan fasa kedua generator harus sama.

Bila sebuah generator akan dipararellkan dengan jala-jala, maka mula-mula generator diputar oleh penggerak mula mendekati putaran sinkronnya, lalu penguatan IF diatur hingga tegangan terminal generator tersebut sama dengan jala-jala. Untuk mendekati frekuensi dan urutan fasa kedua tegangan (generator dan jala-jala) digunakan alat pendeteksi yang dapat berupa *indikator sinkronoskop*. yang diperlihatkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.1.6 Rangkaian Sinkronisasi (*Paralell*) Generator

2.2 Pengaturan Putaran

Putaran adalah salah satu faktor yang penting yang memberi pengaruh besar terhadap tegangan yang timbul oleh arus bolak-balik (*alternating current*). Frekuensi listrik yang dihasilkan oleh generator sinkron harus sebanding dengan kecepatan putar generator tersebut. Dalam hal ini, rotor sebagai bagian yang bergerak terdiri atas rangkaian-rangkaian elektromagnet dengan arus searah (DC) sebagai sumber arusnya. Medan magnet rotor akan bergerak sesuai dengan arah putaran *rotor*. Untuk menjaga putaran tetap konstan, maka pada penggerak mula (*prime mover*) dilengkapi *governor*. *Governor* itu sendiri adalah suatu alat yang berfungsi mengatur putaran tetap konstan pada keadaan yang bervariasi. (Marsudi, Djiteng "Operasi System Tenaga Listrik" Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006). Besar kecepatan putaran generator dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.5)$$

Dimana :

n = kecepatan putaran (rpm)

f = frekuensi (Hz)

p = jumlah kutub

Tegangan dan arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan oleh generator umumnya mempunyai frekuensi diantara 50 Hz–60 Hz. Untuk menentukan jumlah pasang kutub (p) atau kecepatan putar rpm (n), besarnya frekuensi harus sebanding dengan jumlah kutub dan kecepatan putarannya.

2.3 Pengaturan Tegangan

Tegangan generator sinkron dalam keadaan berbeban akan lebih rendah nilainya dari pada tegangan generator

sinkron dalam keadaan tanpa beban. Nilai relatif, yaitu nilai selisih antara tegangan dalam keadaan berbeban penuh dengan keadaan tanpa beban biasanya disebut dengan regulasi tegangan atau *voltage regulation* (VR).

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100 \% \quad (2.6)$$

Dimana :

VR = Regulasi tegangan (*voltage regulation*)

V NL = Tegangan tanpa beban (*no load voltage*)

V FL = Tegangan penuh beban (*full load voltage*)

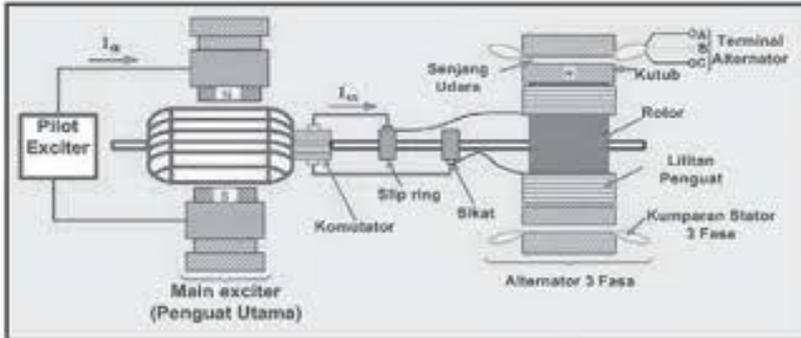
Generator-generator sekarang dirancang dan dibuat untuk tegangan yang bervariasi akibat dari adanya variasi arus jangkar atau variasi beban yang menimbulkan turunnya tegangan (*voltage drop*) pada kumparan jangkar yang bervariasi pula. Jatuhnya tegangan impedansi tersebut tergantung kepada besar arus dan faktor daya beban. Dengan pengaturan arus eksitasi, tegangan dapat diatur sesuai dengan kebutuhan. Untuk menaikkan tegangan, arus eksitasi dapat ditambah dan berlaku juga sebaliknya. Yang dimaksud dengan eksitasi atau biasa disebut sistem penguatan adalah suatu perangkat yang memberikan arus penguat (If) kepada kumparan medan generator arus bolak-balik (*alternating current*) yang dijalankan dengan cara membangkitkan medan magnetnya dengan bantuan arus searah. Sistem penguatan dapat digolongkan berdasarkan cara penyediaan tenaganya, yaitu: (Marsudi, Djiteng "Operasi System Tenaga Listrik" Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006).

1. Sistem penguatan sendiri
2. Sistem penguatan terpisah

Untuk generator berkapasitas besar umumnya digunakan sistem penguatan sendiri. Sistem penguatan ini digunakan pada generator tanpa sikat (*brushless alternator*). Generator

tanpa sikat ini mempunyai *exiter* yang kumparan jangkarnya pada rotor dan kumparan medannya pada stator. Arus penguatan didapat dari induksi magnet sisa (*remanensi*) pada stator generator utama yang diberikan oleh stator generator penguat. Arus tersebut diatur terlebih dahulu oleh AVR (*Automatic Voltage Regulator*) yang merupakan alat pengatur tegangan yang bekerja secara otomatis. AVR dalam hal ini melakukan pengaturan tegangan. Arus yang dihasilkan oleh rotor generator penguat akan disearahkan dengan menggunakan dioda putar (*rotating diode*) yang ikut berputar dengan kedua rotor generator yang berputar. Sistem penguatan sendiri dipasang pada ujung poros generator utamanya. Sebagai salah satu contoh sistem eksitasi penguatan sendiri yang dipakai adalah sistem eksitasi penguatan sendiri dengan menggunakan magnet permanen (*permanent magnet generator excited-AVR controlled generators*). Dalam hal ini, generator magnet permanen (PMG) berperan memberikan suplai untuk sistem eksitasi melalui AVR dimana AVR berperan sebagai alat untuk mengontrol tingkat eksitasi yang disediakan untuk medan exiternya. AVR akan memberikan respon terhadap sinyal tegangan yang dirasakannya melalui transformator berisolasi (*isolating transformer*) dari kumparan stator utama. PMG berputar seiring dengan berputarnya rotor. PMG sebagai pembangkit tegangan atau arus bolak-balik (AC) yang di searahkan kemudian dimasukkan pada AVR (*Automatic Voltage Regulator*) untuk dikontrol. Karena tegangan atau arus AC pada PMG sangat kecil, arus bolak-balik (AC) yang sudah disearahkan dimasukkan pada eksiter untuk membangkitkan tegangan bolak-balik (AC) yang lebih besar. Arus bolak-balik (AC) keluaran eksiter di searahkan oleh *rotating diode*. Untuk memberikan arus eksitasi pada rotor, sehingga pada rotor terdapat medan magnet. Medan magnet tersebut menabrak kumparan – kumparan pada stator yang menghasilkan fluks listrik. Sehingga dari situ didapatkan tengangan keluaran yang dihasilkan oleh generator terebut. Hal tersebut terjadi

berulang-ulang setiap generator beroperasi. Sehingga tidak diperlukan sumber tegangan DC untuk eksitasi pada generator ini. Keluaran generator tersebut diambil melalui stator karena lebih mudah mengambil tegangan pada bagian yang diam dari pada mengambil tegangan pada bagian yang berputar (rotor). Secara singkat dapat digambarkan seperti ini :



Gambar 2.3 *Permanent Magnet Generator (PMG)*

Dengan mengendalikan suplai yang rendah dari medan eksitasinya, kontrol untuk suplai yang tinggi yang diperlukan pada medan exiter dapat terpenuhi melalui keluaran penyearah dari stator eksitasi. Sistem ini menghasilkan sumber eksitasi yang konstan dan mampu menyediakan start motor yang tinggi dan juga memiliki kekebalan terhadap gangguan berbentuk gelombang (*waveform distortion*) pada keluaran stator utama yang dapat terjadi karena adanya beban yang non linear. AVR akan merasakan tegangan dua fasa rata-rata mendekati regulasi tegangan yang diinginkan. AVR ini juga mampu mendeteksi perubahan kecepatan mesin dan dapat mengatasi tegangan turun sebagai akibat turunnya kecepatan putaran mesin dibawah frekuensi yang telah ditentukan sehingga dapat menghindari eksitasi berlebih pada saat kecepatan mesin rendah dan memperhalus dampak dari perubahan beban (*load switching*) untuk menghindari

kerusakan mesin. Sistem ini juga menyediakan proteksi untuk eksitasi berlebih yang bekerja dengan waktu tunda tertentu ketika terjadi lonjakan tegangan medan eksitasi.

2.4 GPC (*Generator Paralelling Controller*)

GPC adalah suatu alat yang berfungsi sebagai pengontrol dan pengaman generator. GPC akan mengeluarkan semua kebutuhan serta tugas-tugas untuk mengontrol dan memproteksi operasi sebuah generator tanpa harus memperhatikan penggunaan generator tersebut. Hal ini berarti GPC dapat digunakan untuk berbagai tipe aplikasi seperti:

1. Satu generator (generator tunggal)
2. Kontrol beragam beban generator
3. Beban utama yang tetap (dasar beban)

2.4.1 Kontrol Fungsi

Kontrol fungsi dari GPC ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Dinamik sinkronisasi.
 - a. Perubahan frekuensi.
 - b. Check tegangan.
 - c. Kompensasi waktu tunda pemutus.
 - d. Pemeriksaan urutan fasa.
2. Beban tetap (dasar beban) jalannya generator.
3. Berjalannya frekuensi yang tetap pada generator yang berdiri sendiri.
4. Pembagian beban antar generator dengan beban beragam serta pengontrol frekuensi.
5. Output rele untuk speed governor.
6. Output rele untuk menutup dan membukanya pemutus generator.

7. Mengatur *ramp-up* dan *ram-down* dari beban generator.
8. Output rele untuk start-stop generator berikutnya (berdasarkan tinggi rendahnya beban).

2.4.2 Fungsi Proteksi Generator

Proteksi terhadap generator yang terdapat pada operasi sistem GPC dapat dibagi atas dua kelompok yaitu proteksi untuk :

1. Daya balik (*reverse power*)
2. *Over current* (dengan 2 level)

Fungsi proteksi terhadap generator dapat dipilih untuk mengaktifkan salah satu dari empat rele yang dapat disusun. Opsi A dan Opsi B tidak dapat dipilih pada waktu yang bersamaan diantara fungsi keduanya.

a. Opsi A

1. Vector jump
2. $\frac{df}{dt}$ (rocof)
3. Over voltage (2 level)
4. Low voltage (2 level)
5. Over frekuensi (2 level)
6. Low frekuensi (2 level)

b. Opsi B Bus Proteksi

1. Over voltage (2 level)
2. Low voltage (2 level)
3. Over frekuensi (2 level)
4. Low frekuensi (2 level)

c. Opsi D Tegangan, VAR atau *Power Factor Control*

Pemilihan yang dipilih pada opsi D dapat diaktifkan dengan cara pemilihan mode dari GPC itu sendiri (mode input 4, 5 dan 6).

d. Opsi E, *Analog Governor* dan *Output AVR Control*

Pemilihan opsi E memerlukan papan tambahan yang akan diletakkan pada slot #4 yaitu pada terminal 65–72 dimana ada dua output analog hadir berkisar ± 20 mA. Output ini diberi penguatan terpisah. Bagian GPC yang terakhir adalah output aktif (tidak memerlukan tambahan tegangan dari luar).

e. Opsi F1, 2x Transducer Output

Pemilihan opsi F1, berarti ada sebuah papan tambahan yang akan ditambahkan pada slot #6 (terminal 90 – 97) dimana terdapat dua output analog (0 – 20 mA). Output diberi penguatan terpisah dan di GPC terakhir outputnya adalah output aktif (tidak memerlukan tambahan tegangan dari luar). Unit GPC dikemas dalam papan-papan slot. Beberapa ada yang telah standar (tidak dapat diubah-ubah) dan ada juga beberapa yang dapat diubah-ubah untuk tiap opsi-opsinya.

Slot #1 standard	terminal 1 - 28
Slot #2	terminal 29 – 34
Slot #3	terminal 37 – 64
Slot #4	terminal 65 – 72
Slot #5 standard	terminal 73 – 89
Slot #6	terminal 90 – 97
Slot #7 tidak digunakan	terminal 98 – 125
Slot #8	terminal 126 – 133

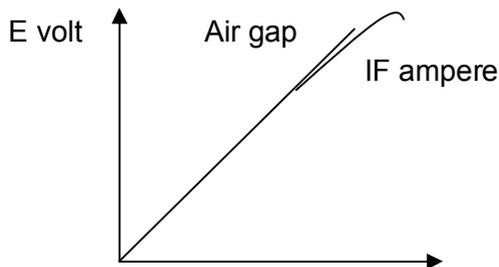
Di samping slot-slot ini, terdapat sebuah papan komunikasi tambahan (Rs 232 PC servis) tempat berlangsungnya pemrograman dari set point, waktu, display dan sebagainya.

2.5 Identifikasi dan Penentuan Parameter Generator Sinkron

Parameter generator sinkron dibutuhkan pada dasarnya untuk menggambarkan rangkaian ekivalen beserta karakteristiknya. Parameter yang dibutuhkan pada penulisan ini yaitu impedansi sinkron Z_s , reaktansi sinkron X_s , tahanan jangkar urutan positif r_{j1} , tahanan jangkar urutan negatif r_{j2} dan tahanan jangkar urutan nol r_{j0} . Sehingga untuk memperoleh parameter-parameter tersebut maka diperlukan identifikasi ataupun pengujian-pengujian sebagai berikut :

a. Pengujian Beban Nol

Pengujian beban nol terkait dengan karakteristik beban nol yaitu hubungan antara tegangan induksi E_a dengan arus penguat/eksitasi I_f . Pada pengujian beban nol, rotor generator diputar pada kecepatan nominal dan terminal jangkar dalam keadaan terbuka. Arus medan I_f diatur bertahap dari nol hingga diperoleh harga tegangan induksi E_a berkisar kurang lebih 125% dari tegangan nominal generator. Pada kondisi ini arus jangkar $I_a=0$ dan tegangan induksi $E_a=V_t$. Pembacaan tegangan induksi jangkar dengan pengaruh variasi medan eksitasi digambarkan dalam sebuah kurva yang ditunjukkan oleh Gambar 2.5.a



Gambar 2.5.a Karakteristik beban nol

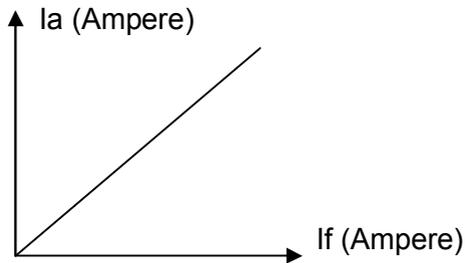
Dari gambar diatas tampak bahwa kurva tersebut memiliki garis linear sampai diperoleh harga saturasi dari arus medan. Pada keadaan belum jenuh (*unsaturated*), rangka (*frame*) besi mesin sinkron memiliki reluktansi yang besarnya beberapa ribu kali lebih kecil dibandingkan dengan reluktansi celah udara, sehingga pada mulanya hampir semua ggl melalui celah udara, sebagai akibatnya fluks meningkat secara linear. Ketika pada akhirnya inti besi tersebut jenuh, reluktansinya meningkat secara dramatis, sehingga peningkatan fluks jauh lebih lambat daripada peningkatan ggl (hal ini yang digambarkan oleh kurva melengkung). Garis linear pada kurva tersebut disebut juga sebagai karakteristik celah udara (*air gap*).

b. Pengujian Hubung Singkat

Pengujian hubung singkat terkait dengan karakteristik hubung singkat yaitu hubungan antara arus jangkar I_a dengan arus penguat/eksitasi I_f . Pada pengujian hubung singkat, mula-mula arus medan dibuat menjadi nol dan terminal jangkar dihubung singkat melalui amperemeter. Lalu arus jangkar diperbesar dengan menaikkan secara bertahap arus medan hingga tercapai nilai arus jangkar maksimum yang masih aman sekitar 125% - 150% dari arus nominal jangkar. Karakteristik hubung singkat merupakan garis lurus. Pada kondisi hubung singkat, tegangan terminal $V_t = 0$ dan arus jangkar sama dengan arus hubung singkat ($I_a = I_{sc}$), sehingga dapat dirumuskan :

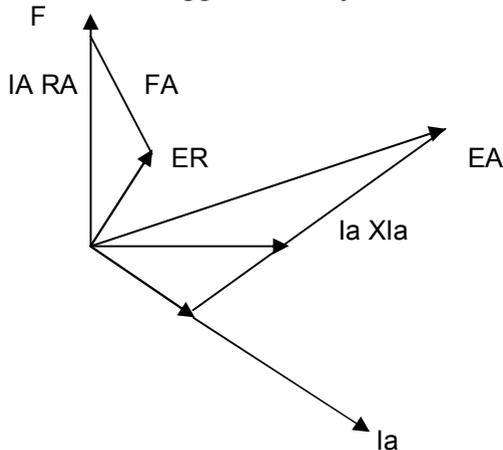
$$I_a = I_{sc} = \frac{E_a}{r_a + jX_s} \quad (2.7)$$

Pembacaan arus jangkar atau arus hubung singkat dengan pengaruh variasi medan eksitasi digambarkan dalam sebuah kurva yang ditunjukkan oleh Gambar 2.5.b



Gambar 2.5.b Karakteristik Hubung Singkat

Kurva tersebut merupakan kurva linier karena tidak adanya efek saturasi. Saat tegangan terminal sama dengan nol, lebih dari 90% tegangan jatuh muncul akibat reaktansi sinkron. Pada Gambar 2.5c terlihat fasor untuk kondisi hubung singkat dimana terlihat arus jangkar I_a tertinggal dari tegangan induksi E_a hampir 90°, dengan kata lain reaksi jangkar yang dihasilkan I_a hampir sepenuhnya melawan fluks (ϕ) medan yang menghasilkan tegangan induksi E_a . Kedua fluksi yang berlawanan tersebut menjaga fluksi resultan celah udara pada tingkat yang rendah sehingga tidak terjadi efek saturasi.



Gambar 2.5.c Diagram Fasor Saat Hubung Singkat

c. Menentukan Impedansi dan Reaktansi Sinkron

Jika tidak terjadi saturasi, impedansi sinkron Z_s akan bernilai tetap. Secara aktual Z_s bervariasi saat terjadi saturasi. Untuk menghitung *voltage regulation*, hanya satu nilai Z_s yang digunakan. Umumnya nilai Z_s yang digunakan tersebut diperoleh dari arus hubung singkat I_{sc} yang terbesar dan besar tegangan induksi beban nol E_{bn} saat terjadi saturasi dengan arus medan penguat/eksitasi I_f yang sama. Nilai impedansi sinkron Z_s dan reaktansi sinkron X_s per fasa dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.8 dan Persamaan 2.9 berikut ini :

$$Z_s = \frac{E_{bn}}{I_{sc}} \quad (2.8)$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 + r_a^2} \quad (2.9)$$

Dimana :

E_{bn} = Tegangan induksi beban nol saat terjadi saturasi (volt)

I_{sc} = Arus hubung singkat pada arus medan yang sama saat saturasi (ampere)

Z_s = Impedansi sinkron (ohm)

X_s = Reaktansi sinkron (ohm)

R_a = Tahanan jangkar (ohm)

d. Pengukuran Tahanan Jangkar Arus Searah

Pengukuran tahanan jangkar arus searah (rdc) biasanya menggunakan metode voltmeter-ampere-meter. Dimana kumparan jangkar dihubungkan kepada sumber tegangan arus searah (dc) ketika mesin dalam keadaan diam lalu diukur besar arus yang mengalir pada kumparan jangkar. Pengukuran dengan menggunakan sumber tegangan dc dimaksudkan bahwa reaktansi kumparan jangkar akan menjadi nol selama proses pengukuran. Arus yang mengalir pada kumparan jangkar diatur pada nilai nominalnya supaya kumparan berada pada temperatur operasi normal. Jika kumparan jangkar terhubung bintang dan netral tidak tersedia maka besar tahanan jangkar arus searah (rdc) per fasa dapat dihitung dengan Persamaan 2.10 Sedangkan jika kumparan

jangkar terhubung delta maka tahanan jangkar arus searah (rdc) per fasa dapat dihitung dengan Persamaan 2.11 seperti berikut :

$$r_{dc} = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}} \quad (2.10)$$

$$r_{dc} = \frac{3V_{dc}}{2I_{dc}} \quad (2.11)$$

Dimana :

V_{dc} = Tegangan arus searah pada kedua terminal jangkar (volt)

I_{dc} = Arus searah yang mengalir kumparan jangkar (ampere)

r_{dc} = Tahanan jangkar arus searah (ohm)

Nilai tahanan jangkar arus searah (rdc) merupakan nilai pendekatan karena saat kumparan jangkar mengalirkan arus bolak-balik maka nilai tahanan jangkar akan meningkat karena adanya efek kulit. Sehingga perlu diketahui nilai tahanan jangkar efektif yang dapat dihitung dengan Persamaan 2.12 berikut ini :

$$R_{a\text{ eff}} = K \cdot r_{dc} \quad (2.12)$$

dengan $K = 1.2$ s/d 1.3

Pengukuran tahanan jangkar arus searah (rdc) pada penulisan ini menggunakan metode voltmeter-ampere-meter dengan kumparan jangkar terhubung bintang.

e. Pengukuran Impedansi Jangkar Urutan Negatif

Saat generator dialiri arus urutan negatif, perilaku putaran medan stator akan mempunyai arah yang berlawanan dengan putaran *rotor* tetapi jumlah putaran tetap sama dengan jumlah putaran rotor (kecepatan *sinkron*) sehingga terdapat slip sebesar 200 % atau $s = 2$ Atau dikatakan bahwa arus urutan negatif yang mengalir pada kumparan jangkar akan menghasilkan medan putar dengan kecepatan sinkron relative terhadap kumparan jangkar dengan arah putar berlawanan dengan medan putar yang dihasilkan dari arus urutan positif. Dan medan putar ini berputar pada dua kali kecepatan sinkronnya relatif terhadap kumparan medan sehingga akan

menyebabkan arus dengan frekuensi dua kali lipat dari frekuensi semula terinduksi pada kumparan kumparan medan (eksitasi). Dimana arus induksi ini akan cenderung mengalir pada kumparan rotor terus melalui damper winding dimana reaktansi paling rendah. Jika dibiarkan terus meningkat maka akan menyebabkan pemanasan berlebihan pada rangka rotor. Dimana untuk mendapatkan arus urutan negatif yaitu dengan cara menukar dua phaasa kumparan jangkar generator uji dengan dua fasa kumparan jangkar generator injeksi sementara itu arus medan tidak diberikan pada generator uji. impedansi jangkar urutan negatif per fasa Z_{j2} dapat dihitung dengan Persamaan 2.13 berikut:

$$Z_{j2} = \frac{V_t / \sqrt{3}}{I_a} \quad (2.13)$$

Dimana :

V_t = Tegangan terminal line to line (volt)

I_a = Arus jangkar (ampere)

Z_{j2} = Impedansi jangkar urutan negatif (ohm)

Sedangkan reaktansi jangkar urutan negatif per fasa X_{j2} dan tahanan jangkar urutan negatif per fasa r_{j2} dapat dihitung dengan Persamaan 2.14 dan Persamaan 2.15 berikut :

$$X_{j2} = Z_{j2} \cdot \sin \varphi_2 \quad (2.14)$$

$$r_{j2} = Z_{j2} \cdot \cos \varphi_2 \quad (2.15)$$

Dimana :

X_{j2} = Reaktansi jangkar urutan negatif (ohm)

r_{j2} = Tahanan jangkar urutan negatif (ohm)

$\cos \varphi_2$ = Faktor daya kumparan jangkar urutan negative

f. Pengukuran Impedansi Jangkar Urutan Nol

Saat generator dialiri arus urutan nol, medan putar akan sama dengan nol dan dapat dikatakan tidak ada fluksi yang terinduksi ke kumparan *rotor* sehingga dianggap tidak ada arus yang terinduksi pada kumparan *rotor*. Dengan identifikasi diatas maka pengukuran impedansi jangkar urutan nol Z_{j0} . Dimana untuk menghasilkan medan putar sama dengan nol maka kumparan jangkar generator uji dihubungkan secara seri

dan disuplai dari salah satu fasa sumber tegangan tiga fasa injeksi sementara itu rotor generator yang uji tidak diputar dan eksitasi tidak diberikan. impedansi jangkar urutan nol $Zj0$ dapat dihitung dengan Persamaan 2.16 berikut :

$$Zj0 = \frac{Vt}{3 Ia} \quad (2.16)$$

Dimana :

$Zj0$ = Impedansi jangkar urutan nol (ohm)

Vt = Tegangan line to line (volt)

Ia = Arus jangkar (ampere)

Sedangkan reaktansi jangkar urutan nol $Xj0$ dan tahanan jangkar urutan nol $rj0$ dapat dihitung dengan Persamaan 2.17 dan Persamaan 2.18 berikut :

$$Xj0 = Zj0 \cdot \sin \varphi 0 \quad (2.17)$$

$$rj0 = Zj0 \cdot \cos \varphi 0 \quad (2.18)$$

Dimana :

$Xj0$ = Reaktansi jangkar urutan nol (ohm)

$rj0$ = Tahanan jangkar urutan nol (ohm)

$\cos \varphi 0$ = Faktor daya kumparan jangkar urutan nol

2.6 Frekuensi (Hz)

Frekuensi adalah jumlah siklus arus bolak-balik (*Alternating Current*) per detik. Beberapa Negara termasuk Indonesia menggunakan frekuensi listrik standar sebesar 50 Hz, sedangkan di Amerika frekuensi standarnya sebesar 60 Hz. Salah satu contoh akibat dari frekuensi listrik yang tidak stabil adalah mengakibatkan tidak stabilnya perputaran motor listrik sebagai penggerak mesin-mesin produksi manufaktur, dimana hal ini akan mengganggu proses produksi. Frekuensi sebesar 1 Hz menyatakan peristiwa yang terjadi satu kali per detik, di mana frekuensi (f) sebagai hasil kebalikan dari periode (T). (Dugan, Roger C, "Electical Power System Quality, McGraw-Hill" New York, 1996) dengan persamaan di bawah ini :

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.19)$$

Dimana :

f = Frekuensi (Hz)

T = Periode (detik)

Gangguan-gangguan yang terjadi pada sistem frekuensi yaitu :

1. Penyimpangan terus-menerus (*Continuous Deviation*)

Yaitu frekuensi berada diluar batasnya pada saat yang lama (secara terus-menerus), frekuensi standar 50 Hz dengan toleransi $\pm 0,5$ Hz atau fluktuasi amplitudonya 49,5 -50,5 Hz.

2. Penyimpangan Sementara (*Transient Deviation*)

Yaitu penurunan atau kenaikan frekuensi secara tiba-tiba dan sesaat.

2.7 ATS (*Automatic Transfer Switch*)

Pengertian *Automatic Transfer Switch* adalah sebuah pemutus atau saklar listrik yang menghubungkan sumber tenaga listrik dari sumber utama ke sumber siaga. Switch dapat dioperasikan secara manual atau secara otomatis. Sebuah *Transfer Switch Otomatis* (ATS) sering dipasang di mana generator cadangan terletak, sehingga generator dapat memberikan daya listrik sementara jika sumber listrik terputus.

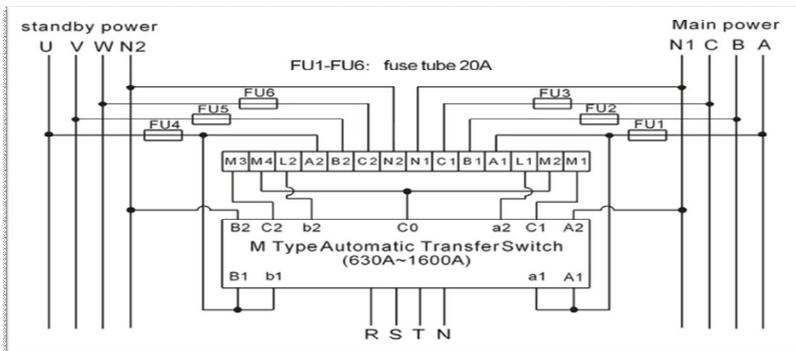
Pengoperasian *Transfer Switch*, Selain mentransfer beban ke generator cadangan, sebuah ATS juga memerintahkan generator cadangan untuk memulai, berdasarkan tegangan yang dipantau pada pasokan utama. *transfer switch* mengisolasi generator cadangan dari PLN, ketika generator hidup dan menyediakan listrik sementara. Kemampuan kontrol dari saklar transfer mungkin secara manual saja, atau kombinasi otomatis dan manual. Transisi beralih modus dari *Tansfer Switch Transisi Terbuka* (OT) (tipe biasa), atau *Transisi Closed* (CT). Misalnya, di sebuah industri dilengkapi dengan generator cadangan dan ATS, ketika pemadaman listrik PLN terjadi, ATS akan memberitahu generator cadangan untuk memulai.

Setelah ATS melihat bahwa generator siap untuk menyediakan tenaga listrik, ATS memutuskan sambungan industri untuk PLN dan menghubungkan generator untuk panel utama listrik industri itu. Generator memasok listrik ke beban listrik industri, tetapi tidak terhubung dengan PLN. Isolasi generator dari sistem distribusi diperlukan untuk melindungi generator dari kelebihan beban dan untuk mencegah hubungan singkat dengan jaringan listrik dari PLN. Ketika kembali listrik kembali hidup, *Transfer Switch* akan mentransfer kembali aliran listrik PLN dan generator dimatikan. Sebuah *Transfer Switch* dapat diatur untuk memberikan daya hanya untuk sirkuit kritis atau seluruh listrik (sub) panel. Beberapa *transfer switch* memungkinkan untuk pelepasan beban atau prioritas sirkuit opsional, seperti pemanasan dan pendinginan peralatan. Lebih kompleks darurat *switchgear* digunakan dalam instalasi generator cadangan yang besar, sehingga beban akan lancar ditransfer dari PLN ke generator sinkron, dan kembali, instalasi tersebut berguna untuk mengurangi permintaan beban puncak dari PLN, berikut ini adalah bentuk panel Automatic Transfer System pada umumnya.



Gambar 2.7 Panel Automatic Transfer System

Dan untuk menerangkan tentang system single line pada Automatic Transfer System dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



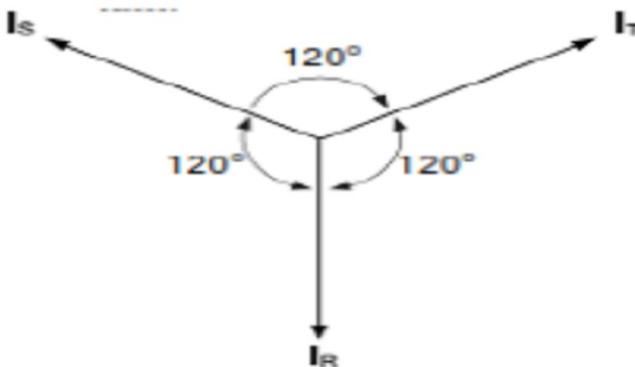
Gambar 2.7 Single line Automatic Transfer System

2.8 Ketidakseimbangan Beban

2.8.1 Pengertian Tentang Beban Tidak Seimbang

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana :

1. Ketiga vektor arus atau tegangan adalah sama besar
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain, seperti yang terlihat pada Gambar 2.8 di bawah ini :

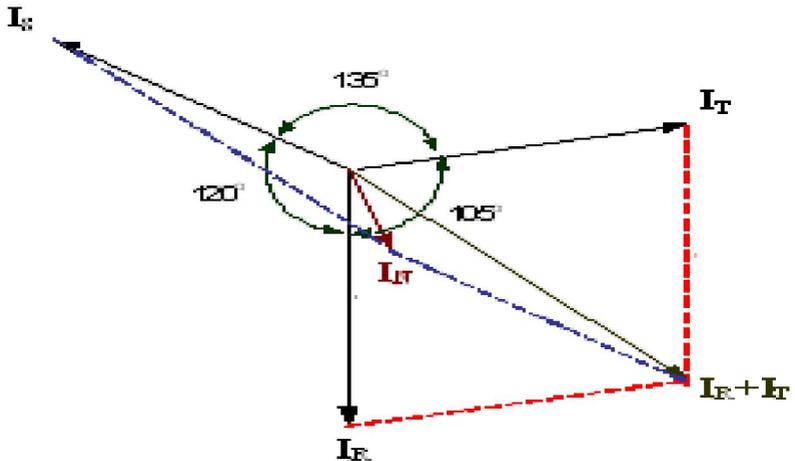


Gambar 2.8 Vektor Diagram Arus Keadaan Seimbang

Dari gambar di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol. Sehingga tidak muncul arus netral. (Kadir, Abdul. *Pengoperasian Sistem Tenaga Listrik*. Edisi ketiga, Penerbit Erlangga. Jakarta. 1994). Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga yaitu :

1. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
2. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.

3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.9 di bawah ini :



Gambar 2.9 Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang
Dari gambar di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah tidak sama dengan nol sehingga muncul suatu besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung pada seberapa besar faktor ketidakseimbangannya. Pada dasarnya ada 3 sumber penyebab terjadinya ketidakseimbangan sistem 3-fasa ini, yaitu :

1. Tidak seimbang tegangan sejak pada sumbernya :
Tegangan tidak simetris pada output generator 3 fasa bisa saja terjadi (walaupun jarang) karena kesalahan teknis pada ketiga berkas kumparan dayanya (jumlah lilitan atau resistansi).
2. Tidak seimbang tegangan pada salurannya :
Hal demikian dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain:

- a. Konfigurasi ketiga saluran secara total tidak seimbang, sehingga total kapasitansinya tidak seimbang. Keadaan demikian dapat terjadi pada penyaluran jarak jauh dan bertegangan tinggi, dimana jarak rata-rata masing-masing saluran fasa terhadap tanah tidak sama.
 - b. Resistansi saluran tidak sama karena jenis bahan konduktor yang berbeda.
 - c. Resistansi saluran tidak sama karena ukuran konduktor tidak sama, besar tahanan (R) dipengaruhi oleh besarnya muatan (Q).
 - d. Resistansi saluran tidak sama karena jarak antara masing-masing saluran fasa dengan beban tidak sama (besar R dipengaruhi oleh jarak l).
3. Tidak seimbang pada resistansi bebannya:

Karena besar I (arus beban) ditentukan oleh besar R (beban), maka pada keadaan 3 fasa (φ) = $(R)R \neq (R)S \neq (R)T$, maka arus bebannya: $(I)R \neq (I)S \neq (I)T$. Akibat lanjutnya adalah : bila resistansi saluran dianggap sama dengan R , maka rugi tegangan yang terjadi pada sistem 3 fasa (φ) adalah $IRR \neq ISR \neq ITR$ atau $(V)R \neq (V)S \neq (V)T$ dan rugi daya $(IR^2)R \neq (IS^2)R \neq (IT^2)R$ atau $(P)R \neq (P)S \neq (P)T$ sehingga $= V(T)R \neq V(T)S \neq V(T)T$ dimana $V(T) =$ tegangan pada sisi terima (konsumen). Kondisi tak seimbang pada tegangan sisi terima akibat tidak seimbang beban ini adalah suatu hal yang paling sering terjadi dalam praktek, antara lain oleh adanya sambungan-sambungan di luar perhitungan dan perencanaan. Upaya teknis memang perlu dilakukan, agar diperoleh keadaan pembebanan yang seimbang. Pada sistem 3 fasa yang menggunakan saluran netral (baca saluran nol), dalam keadaan beban simetris maka arus yang lewat saluran nol adalah benar-benar nol (netral), tetapi bila terjadi keadaan tak simetris, maka sebagian arus (berupa arus resultan) akan lewat saluran netral ini, sehingga saluran tersebut menjadi tidak netral lagi.

2.8.2 Penyaluran Daya Pada Keadaan Arus Seimbang

Daya yang disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-
arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P = \sqrt{3} V_l I \cos \varphi \quad (2.20)$$

Dimana :

P = Daya pada ujung kirim (watt)

V = Tegangan pada ujung kirim (volt)

$\cos \varphi$ = faktor daya

Daya yang sampai ujung diterima akan lebih kecil dari P karena terjadi penyusutan dalam saluran. Hal ini dibuat dengan asumsi bahwa arus pemuatan kapasitif pada saluran cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Dengan demikian besarnya arus di ujung kirim sama dengan arus di ujung terima. Apabila tegangan dan faktor daya pada ujung terima berturut-turut adalah V'' dan $\cos \varphi''$ daya pada ujung terima adalah :

$$P'' = \sqrt{3} V_l I \cos \varphi \quad (2.21)$$

Selisih antara P pada persamaan memberikan susut daya saluran yaitu :

$$P_1 = P - P''$$

$$= \sqrt{3} V_l I \cos \varphi - (V'' I \cos \varphi'') \quad (2.22)$$

Dengan R adalah tahanan kawat penghantar tiap fasa, jadi persamaan berubah

menjadi :

$$P_1 = \sqrt{3} I^2 \cdot R \quad (2.23)$$

Dimana :

P = Daya ujung kirim (watt)

V = Tegangan pada ujung kirim (volt)

I = Arus pada ujung kirim (ampere)

R = Tahanan kawat penghantar (ohm)

2.8.3 Penyaluran Daya Pada Keadaan Arus Tidak Seimbang

Jika arus (I) adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar (P) pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama tetapi dengan keadaan tak seimbang besarnya arus-arus fasa dinyatakan dengan koefisien a , b dan c sebagai berikut :

$$\left. \begin{aligned} (I_R) &= a (I) \\ (I_S) &= b (I) \\ (I_T) &= c (I) \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

dengan I_R , I_S , I_T berturut – turut adalah arus di fasa R, S, T. Telah disebutkan diatas bahwa faktor daya di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda. Dengan anggapan seperti itu besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P = (a + b + c) \cdot (V) \cdot (I) \cdot \cos \varphi \quad (2.25)$$

Apabila persamaan tersebut menyatakan daya yang besarnya sama, maka kedua

persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a , b , c yaitu :

$$a + b + c = 3 \quad (2.26)$$

2.9 Losses Pada Jaringan Distribusi

Yang dimaksud losses adalah perbedaan antara energi listrik yang disalurkan (PS) dengan energi listrik yang terpakai (PP)

$$\text{Losses} = (PS - PP) / PS \quad (2.27)$$

Dimana :

PS = Energi yang disalurkan (*watt*)

PP = Energi yang dipakai (*watt*)

2.9.1 Losses Pada Penghantar Fasa

Jika suatu arus mengalir pada suatu penghantar, maka pada penghantar tersebut akan terjadi rugi-rugi energi menjadi

panas karena pada penghantar tersebut terdapat resistansi. Rugi-rugi dengan beban terpusat di ujung dirumuskan sebagai berikut :

$$\Delta V = \sqrt{3} I \cdot (R \cos \phi + X \sin \phi) \cdot l \quad (2.28)$$

$$\Delta P = 3 I^2 \cdot R \cdot l \quad (2.29)$$

Dimana :

I = Arus per fasa (Ampere)

R = Tahanan pada penghantar (Ohm / km)

X = Reaktansi pada penghantar (Ohm / km)

$\cos \phi$ = Faktor daya beban

l = Panjang penghantar (km)

2.9.2 Losses Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Akibat pembebanan di tiap fasa yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran pentanahan netral terdapat nilai tahanan dan dialiri arus, maka kawat netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada trafo tidak seimbang. Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral sebesar :

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (2.30)$$

Dimana :

P_N = Losses yang timbul pada penghantar netral (watt)

I_N = Arus yang mengalir melalui kawat netral (Ampere)

R_N = Tahanan pada kawat netral (Ohm)

2.9.3 Losses Akibat Arus Netral yang Mengalir ke Tanah

Losses ini terjadi karena adanya arus netral yang mengalir ke tanah., Besarnya dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (2.31)$$

Dimana :

PG = *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (Watt)

IG = Arus netral yang mengalir ke tanah (Ampere)

RG = Tahanan pembumian netral trafo (Ohm)

2.10 Keseimbangan Arus

Arus listrik akan mengalir dari sumbernya melalui penghantar menuju ke beban. Mengalirnya arus listrik tersebut menuju ke beban sangat tergantung pada besarnya konsumsi energi listrik dari beban tersebut. Makin besar konsumsi energi listrik suatu beban, maka makin besar pula arus yang mengalir ke beban tersebut. Untuk sistem dengan sirkuit tiga fasa, akan rentan sekali terjadi ketidakseimbangan besarnya arus yang mengalir di antara penghantar–penghantar ketiga fasanya, yang disebut ketidakseimbangan arus.

Ketidakseimbangan arus tersebut akan terjadi apabila daya beban dari masing–masing fasa dari ketiga fasa transformator tidak seimbang, dalam hal ini apabila impedansi bebannya tidak sama, untuk mengetahui besar ketidakseimbangan arus maka dapat digunakan cara :

1. Mengetahui besarnya arus masing–masing di ketiga fasanya.
2. Menjumlahkan arus–arus tersebut dan kemudian di rata–rata
3. Memilih arus yang memiliki deviasi terbesar dengan rata–rata
4. Nilai dari deviasi tersebut dibagi dengan rata–rata
5. Nilai yang diperoleh dikalikan 100%, Maka diperoleh besar ketidakseimbangan arus dalam %.

$$IU = \frac{ID \text{ maks} - IR}{IR} \times 100\% \quad (2.32)$$

Dimana :

IU = Ketidakseimbangan arus/*Unbalance* (Ampere)

ID maks = Deviasi maks arus perphasa (%)

IR = Arus rata-rata (Ampere)

2.11 Perhitungan Arus Beban Penuh dan Arus Hubung Singkat

Telah diketahui bahwa daya transformator distribusi bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3} V \cdot I \quad (2.33)$$

Dimana :

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Primer Transformator (kV)

I = Arus Jala-jala (Ampere)

Dengan demikian untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$I_{fl} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (2.34)$$

Dimana :

I_{fl} = Arus Beban Penuh (Amper)

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Sekunder Transformator (kV)

Sedangkan untuk menghitung arus hubung singkat pada transformator atau system pendistribusian nya dapat digunakan rumus :

$$I_{sc} = \frac{S \cdot 1000}{\%Z \cdot \sqrt{3} \cdot V} \quad (2.35)$$

Dimana :

I_{sc} = Arus Hubung Singkat (Ampere)

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Sekunder Transformator (kV)

% Z = Persen Impedansi Transformator

Dengan demikian untuk menghitung persentase pembebanannya adalah sebagai berikut :

$$\% b = \frac{I_{ph}}{I_{fl}} 100 \% \quad (2.36)$$

Dimana :

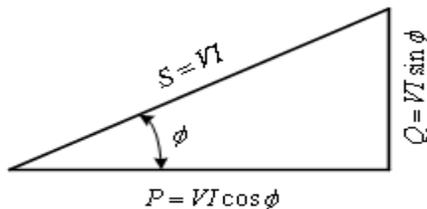
$\% b$ = Persentase Pembebanan (%)

I_{ph} = Arus Fasa (Ampere)

I_{fl} = Arus Beban Penuh (Ampere)

2.12 Faktor Daya

Daya dalam sistem arus bolak-balik (*Alternating Current*) dikenal ada tiga macam, yaitu daya aktif (P) dengan satuan *Watt*, daya reaktif (Q) dengan satuan *Var* dan daya semu (S) dengan satuan *VA*. Daya aktif ditransformasikan untuk menghasilkan kerja berupa panas, cahaya maupun kerja mekanis, sedangkan daya reaktif diperlukan oleh peralatan, peralatan yang bekerja dengan *System Electromagnet*. Kedua daya tersebut (daya aktif dan daya reaktif) membentuk suatu daya total yang disebut dengan daya semu. Hubungan dari ketiga daya tersebut digambarkan dengan sistem segitiga daya seperti yang terlihat pada gambar 2.12 berikut ini :



Gambar 2.12 Segitiga Daya (*Power Triangle*)

Hubungan daya pada gambar segitiga daya dijelaskan dengan persamaan seperti pada tabel 2.1 berikut ini :

Tabel 2.1. Persamaan Segitiga Daya

No.	Daya	Rumus	Satuan
1.	Daya Aktif	$P = V.I. \cos \phi$	Watt
2.	Daya Reaktif (Q)	$Q = V.I. \sin \phi$	VAR
3.	Daya Semu (S)	$S = V.I = P + jQ$	VA

Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif dengan daya semu. Daya aktif digunakan untuk mengoperasikan beban-beban pada pelanggan listrik. Daya semu dihasilkan oleh generator pembangkit yang ditransmisikan ke pelanggan listrik. Bertambahnya daya reaktif berarti menyebabkan turunnya faktor daya listrik. Cara yang mudah dalam mengantisipasi turunnya faktor daya dapat dilakukan dengan memilih beban. Beban yang mempunyai faktor daya besar juga dapat dilakukan dengan memasang kapasitor. Pemasangan kapasitor dapat memperbaiki faktor daya jika faktor daya diperbaiki maka daya reaktif dapat berkurang dan mendekati daya aktif. Suatu beban dengan faktor daya ($\cos \phi$) = 1.0, merupakan beban yang hanya mengandung nilai resistansi murni dan merupakan pembebanan yang paling efisien.

Beban dengan faktor daya rendah ($\cos \phi$) = 1.0, merupakan beban yang mengandung nilai induktansi yang menyebabkan kerugian lebih tinggi di dalam sistem suplai tenaga listrik. Faktor daya yang rendah berhubungan dengan beda fasa antara arus dan tegangan terminal beban dan berkaitan dengan kualitas harmonik atau bentuk gelombang arus yang menyimpang bentuknya. Sudut fase arus beban yang rendah biasanya diakibatkan oleh beban induktif seperti motor induksi, transformator daya, *ballast* lampu, peralatan las ataupun beban elektronik lainnya.

Rendahnya faktor daya pada sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan kerugian seperti meningkatnya arus yang menyebabkan pemanasan pada kabel. Rugi-rugi pada rangkaian sistem tenaga, meningkatnya kebutuhan daya nyata

(KW), menimbulkan drop tegangan yang mengakibatkan beda tegangan antara sisi kirim dengan sisi terima menjadi lebih besar sehingga akan memperburuk prosentase pengaturan tegangan yang sesuai dengan persamaan dapat ditulis:

$$\% \text{Regulasi} = \frac{V_k - V_t}{V_t} \times 100 \% \quad (2.37)$$

Dimana :

V_k = Tegangan sisi kirim (volt)

V_t = Tegangan sisi terima (volt)

Usaha perbaikan faktor daya dapat dilakukan dengan pemasangan suatu kapasitor, besarnya nilai kompensasi kapasitor yang harus dipasang dapat dihitung dengan menggunakan tabel yang dengan sebuah faktor pengali KW. Dengan menggunakan tabel tersebut dapat diperoleh kapasitor yang diperlukan guna memperbaiki faktor daya yang diinginkan. Tabel dibuat berdasarkan hubungan segitiga daya, seperti pada gambar dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\text{Cos}\phi = \text{faktor daya} = \frac{KW}{KVA} \quad (2.38)$$

$$\text{Tan}\phi = \text{faktor daya} = \frac{KVAR}{KW} \quad (2.39)$$

$$\text{Sin}\phi = \text{faktor daya} = \frac{KVAR}{KVA} \quad (2.40)$$

Karena KW pada umumnya konstan kemudian KVA dan VAR berubah-ubah dengan faktor daya, maka persamaan (2.39) lebih mudah untuk digunakan. Persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$KVAR = KW \times \text{tan}\phi \quad (2.41)$$

KVAR yang berada pada faktor daya awal cosinus ϕ_1 dan pada faktor daya yang akan dicapai cosinus ϕ_2 adalah :

$$KVAR \text{ pada faktor daya awal} = KW \times \text{tan}\phi_1 \quad (2.42)$$

$$KVAR \text{ pada faktor daya awal} = KW \times \text{tan}\phi_2 \quad (2.43)$$

Nilai kapasitor yang diperlukan untuk meningkatkan faktor daya mencapai nilai yang dikehendaki adalah perbedaan dari dua nilai ini atau :

$$\text{Kapasitor KVAR} = KW \times (\text{tan}\phi_1 - \text{tan}\phi_2) \quad (2.44)$$

Rumusan ini dapat disederhanakan menjadi sebagai berikut :

$$\text{Kapasitor KVAR} = \text{KW} \times \Delta \tan \quad (2.45)$$

Kapasitor yang dibutuhkan untuk meningkatkan faktor daya dari cosinus ϕ_1 hingga cosinus ϕ_2 disesuaikan dengan pengali dari tabel 2.1 yang dibuat berdasarkan hubungan segitiga daya, untuk memperoleh KVAR yang diperlukan, nilai konstan KW dari sistem harus dikalikan dengan faktor ini.

(Halaman ini sengaja di kosongkan)