



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator

Generator adalah salah satu jenis mesin listrik yang digunakan sebagai alat pembangkit energi listrik dengan cara menkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik. Pada generator, energi mekanik didapat dari penggerak mula yang bisa berupa mesin diesel, turbin, baling-baling dan lain-lain. Pengoperasian generator dituntut suatu kestabilan agar kinerja generator menjadi optimal. Kestabilan generator dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu beban, arus eksitasi, faktor daya, jumlah putaran generator, dan lain sebagainya. Perubahan besar tegangan terminal akibat dihubungkan ke beban akan menyebabkan ketidakstabilan generator. Jenis generator berdasarkan putaran medan dibagi menjadi generator asinkron dan generator sinkron.

2.1.1 Prinsip Kerja Generator

- Generator bekerjanya berdasarkan hukum Faraday.(kaidah tangan kanan).
- Apabila suatu batang penghantar digerakkan didalam suatu medan magnet, yang mempunyai garis gaya magnet dari arah kutub utara ke kutub selatan.
- Maka pada batang penghantar akan memotong-motong garis-garis gaya magnet, sehingga akan menimbulkan ggl (Gaya gerak listrik) atau EMF (*Electro Motive Force*) atau voltage AC.

2.1.2 Jenis-jenis generator

- Dilihat dari letak kutub:
 - a. Kutub dalam berputar pada rotor.
 - b. Kutub Luar diam dipasang pada stator.
- Dilihat dari putaran medan terhadap rotor:
 - a. Generator sinkron (serempak): Kecepatan putaran medan magnet stator



- (Ns) sama dengan putaran medan rotor (Nr).
- b. Generator Asinkron (tidak serempak) : Kecepatan medan magnet stator (Ns) tidak selalu sama dengan putaran medan rotor (Nr).
- Dilihat dari jenis arus yang dibangkitkan:
 - a. Generator arus searah (DC).
 - b. Generator arus bolak-balik (AC).
 - Dilihat dari Phasa:
 - a. Generator AC 1 phasa.
 - b. Generator AC 3 phasa.
 - Dilihat dari bentuk rotor:
 - a. Rotor kutub menonjol (salient pole): Digunakan pada pembangkit RPM rendah seperti PLTA, PLTD.
 - b. Rotor kutub rata (silindris): Digunakan pada pembangkit RPM tinggi seperti pada PLTG, PLTU.^[1]

2.2 Generator Asinkron

Generator asinkron atau generator induksi adalah generator yang menggunakan prinsip induksi elektromagnetik dalam pengoperasiannya. Generator ini dapat bekerja pada putaran rendah serta tidak tetap kecepatannya, sehingga generator induksi banyak digunakan pada pembangkit listrik dengan daya yang rendah seperti pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro atau pembangkit listrik tenaga baru.

2.3 Generator Sinkron

Generator sinkron adalah (sering disebut alternator) adalah mesin listrik bolak – balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak – balik (*alternating current/AC*). Generator sinkron bekerja dengan cara mengubah energi mekanik

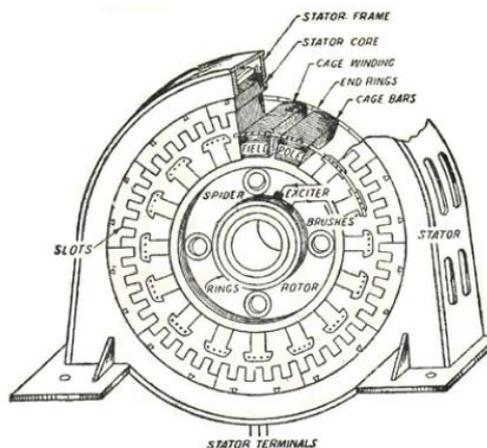
¹ Sumber : <http://www.masuklis.com/2014/05/pengertian-generator-prinsip-kerja.html>



(gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Yang dimaksud dengan pergerakan relatif adalah terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator) karena pergerakan medan magnet terhadap kumparan jangkar atau sebaliknya. Alasan kenapa alternator ini disebut generator sinkron (sinkron = serempak) adalah karena kecepatan perputaran rotor generator. Alternator ini menghasilkan energi listrik bolak – balik (*alternating current*, AC) dan biasa diproduksi untuk menghasilkan listrik AC 1-fasa atau 3-fasa.²

2.3.1 Konstruksi 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. Pada Gambar 2.1 dapat dilihat bentuk penampang sederhana dari sebuah generator sinkron.



Gambar 2.1. Konstruksi Generator Sinkron

Secara umum generator sinkron terdiri atas stator, rotor, dan celah udara. Stator merupakan bagian dari generator sinkron yang diam sedangkan rotor adalah

² Hal 1 Sumber : Zuriman Anthony , *Mesin Listrik Arus Bolak Balik*,



bagian yang berputar dimana diletakkan kumparan medan yang disuplai oleh arus searah dari Eksiter. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor.

1. Stator

Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

A. Rangka Stator

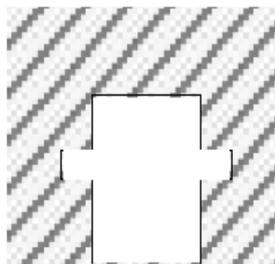
Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator.

B. Inti Stator

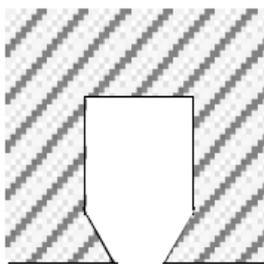
Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang terpasang ke rangka stator.

C. Alur (slot) dan Gigi

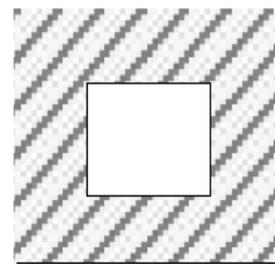
Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada 3 (tiga) bentuk alur stator yaitu terbuka, setengah terbuka, dan tertutup. Ketiga bentuk alur (slot) tersebut tampak seperti pada Gambar 2.2 berikut :



Tertutup



Setengah Tertutup



Tertutup

Gambar 2.2. Bentuk-Bentuk Alur

D. Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)

Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.



2. Rotor

Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

A. Slip Ring

Slip ring merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasangkan ke slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (brush) yang letaknya menempel pada slip ring.

B. Kumparan Rotor (kumparan medan)

Kumparan medan merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

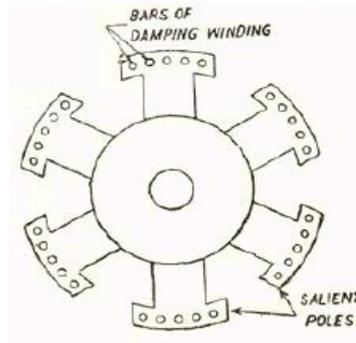
C. Poros Rotor

Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah terbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

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).

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. Bentuk kutub menonjol generator sinkron tampak seperti pada Gambar 2.3 berikut



Gambar 2.3. Rotor Kutub Silinder

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 :

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

2.3.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

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

1. Kumpanan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumpanan medan. Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumpanan 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 kumpanan 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.

Untuk generator sinkron tiga fasa, digunakan 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.

2.3.3 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. Model reaksi jangkar tampak pada Gambar 2.5.

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 ($\cos\phi = 0$ lag)

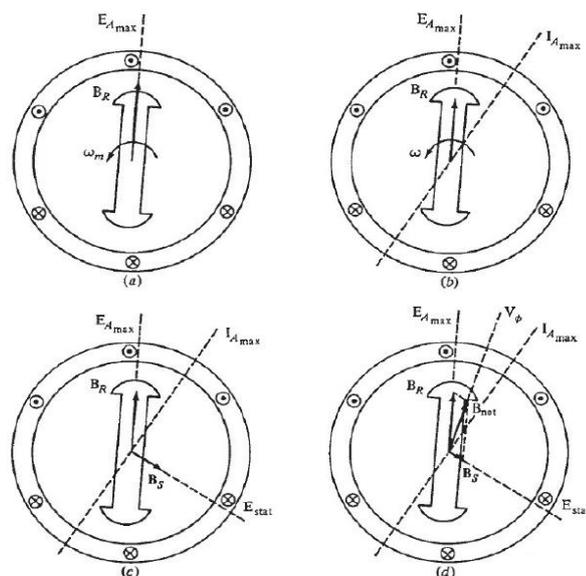
Arus akan tertinggal sebesar 90° dari tegangan. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan melawan fluksi arus medan. Dengan kata lain reaksi jangkar akan demagnetising artinya pengaruh reaksi jangkar akan melemahkan fluksi arus medan.

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/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.



Gambar 2.4. Model Reaksi Jangkar



Keterangan gambar :

- a) Medan magnet yang berputar akan menghasilkan tegangan induksi E_{Amax}
- b) Tegangan resultan menghasilkan arus lagging saat generator berbeban induktif
- c) Arus stator menghasilkan medan magnet sendiri B_S dan tegangan E_{stat} pada belitan stator.
- d) Vektor penjumlahan B_S dan B_R yang menghasilkan B_{net} dan penjumlahan E_{stat} dan E_{Amax} menghasilkan $V\Phi$ pada outputnya.³

2.3.4 Generator Sinkron Tanpa Beban

Pada generator sinkron keadaan jalan tanpa beban mengandung arti bahwa arus armatur $I_a = 0$. Dengan demikian besar tegangan terminal adalah :

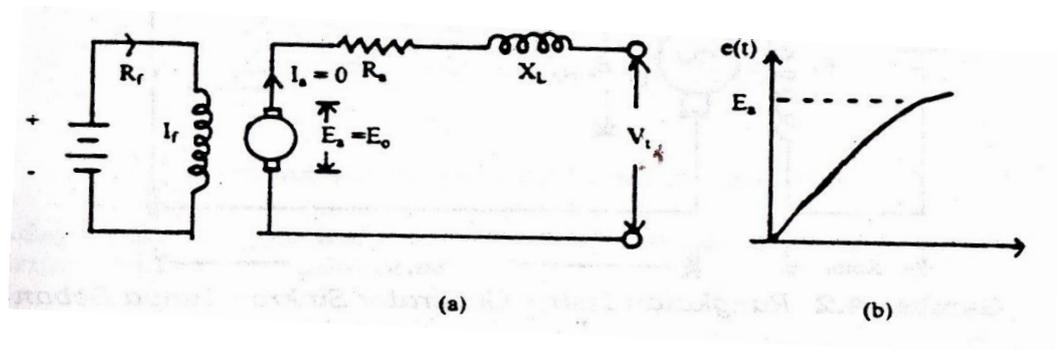
$$V_t = E_a = E_o \dots\dots\dots (2.1)$$

Oleh karena besar ggl armatur adalah merupakan fungsi dari flux magnet, maka ggl armatur dapat juga ditulis :

$$E_a = f \phi \dots\dots\dots (2.2)$$

Dari persamaan diatas, jika arus penguat medan diatur besarnya maka akan diikuti kenaikan flux dan akhirnya juga pada ggl armatur. Pengatur arus penguat medan pada keadaan tertentu besarnya, akan didapatkan besar ggl armatur tanpa beban dalam keadaan saturasi. Secara grafik hubungan antara penguat medan I_f dan E_a terlukis pada gambar 2.5.

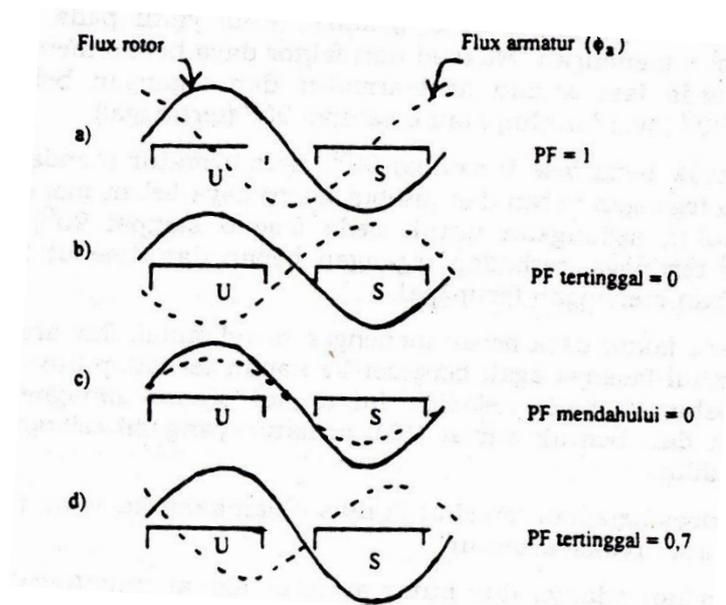
³ Sumber : <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/20111/3/Chapter%20II.pdf> (26 Maret 2014, 15:57:22)



Gambar 2.5 Generator sinkron tanpa beban

2.3.5 Generator Sinkron Berbeban

Dengan adanya beban yang terpasang pada output generator sinkron, maka segera mengalir arus armatur I_a ; dengan adanya arus armatur ini, pada kumparan armatur atau kumparan jangkar timbul flux putar jangkar. Flux putar jangkar ini bersifat mengurangi atau menambah flux putar yang dihasilkan oleh kumparan rotor. Hal ini tergantung pada faktor daya beban. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar 2.6.



Gambar 2.6 Pengaruh faktor daya beban terhadap flux rotor



Dari gambar 2.6 (a) pada faktor daya beban (PF) = 1, berarti arus armatur sefase dengan tegangan beban. Pada keadaan ini, flux putar jangkar (fluxputar armatur) adalah tertinggal 90° terhadap flux putar utama (flux putar rotor). Interaksi dari kedua flux putar baru cacat (sinyal flux baru tidak sinus murni). Akibatnya tegangan keluaran generator juga tidak sibus murni. Kejadian ini harus dihindarkan.

Gambar 2.6 (b) adalah pada faktor daya beban tertinggal (PF) = 0, hal ini berarti arus armatur tertinggal 90° terhadap tegangan beban. Keadaan ini menyebabkan flux putar jangkar berbeda phase 180° (posisi ϕ_a pada PF = 1 digeser kekiri/tertinggal 90° lagi, jadi $90^\circ + 90^\circ$) terhadap flux putar rotor. Interaksi dari kedua flux putar tersebut menyebabkan terjadinya pengurangan besar flux rotor, dan kejadian ini disebut “*Demagnetisasi*”. Jika proses *demagnetisasi* terjadi, maka GGL armatur yang dihasilkan oleh generator akan berkurang. Untuk menjaga agar GGL armatur besarnya tetap, maka arus penguat medan (I_f) harus diperbesar.

Dari gambar 2.6 (c) yaitu pada PF = 0 mendahului, berarti arus armatur mendahului 90° terhadap tegangan beban. Jika hal ini terjadi, maka flux putar armatur akan sefase dengan flux putar rotor (posisi ϕ_a pada PF = 1 digeser kekanan 90°). Akibat interaksi dari kedua flux ini dihasilkan flux baru yang bertambah besar terhadap flux rotor. Proses ini disebut “*Magnetisasi*”. Jika *magnetisasi* terjadi, maka GGL armatur yang ditimbulkan akan bertambah besar. Untuk menjaga GGL armatur tetap besarnya, maka arus penguat medan harus dikurangi.

Untuk kejadian terakhir gambar 2.2 (d) yaitu pada faktor daya beban menengah. Maksud dari faktor daya beban menengah adalah beda fase antara arus armatur dan tegangan beban 0 sampai 90° (mendahului) atau 0 sampai 90° (tertinggal).

Pada faktor daya beban menengah mendahului, flux armatur yang timbul fasenya agak bergeser ke kanan terhadap flux putar rotor. Sehingga pada kejadian



ini terjadi proses dimagnetisasi sebagian dan bentuk sinyal GGL armatur yang dihasilkan ada cacat sedikit.

Proses kejadian tersebut diatas dinamakan kejadian reaksi jangkar atau reaksi armatur.

Dengan adanya flux putar armatur akibat timbulnya arus armatur, maka pada kumparan timbul reaktans pemagnet X_m . Reaktans pemagnet bersama-sama dengan reaktans bocor dikenal dengan nama reaktans sinkron X_s dan secara magnetis ditulis :

$$X_s = X_L + X_m \dots \dots \dots (2.3)$$

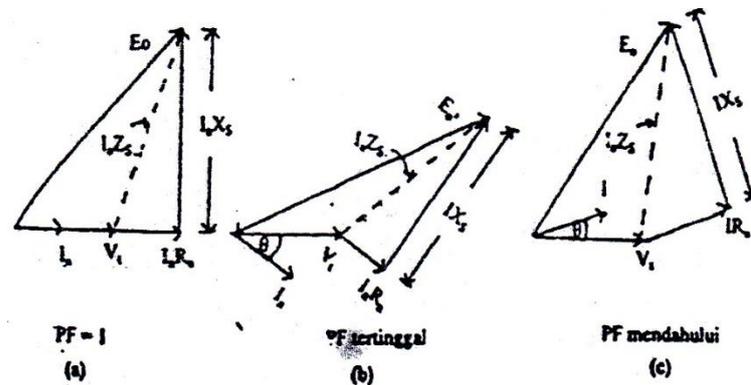
Pada generator sinkron berbeban, maka pada kumparan armatur timbul I_a dan X_m akibatnya timbul penurunan GGL armatur tanpa beban. E_o menjadi $E_a = E_o - j I_a X_m$ dan tegangan terminal menjadi $(V_t)_{bp}$. GGL armatur tanpa beban (E_o) besarnya adalah :

$$\frac{E_o}{ph} = V_t + I_a (R_a + j X_s) \dots \dots \dots (2.4)$$

Atau

$$\frac{E_o}{ph} = V_t + I_a Z_s \dots \dots \dots (2.5)$$

Secara vektoris besar GGL armatur tanpa beban (E_o) pada faktor daya beban = 1, PF tertinggal dan mendahului terlihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Pengaruh Faktor Daya Beban Terhadap GGL Armatur Tanpa Beban

Dari gambar 2.7 besar GGL armatur tanpa beban (E_o) adalah :

PF = 1

$$E_o = \sqrt{(V_t + I_a \cdot R_a)^2 + (I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots\dots (2.6)$$

PF = tertinggal

$$E_o = \sqrt{(V_t \cdot \cos \theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \cdot \sin \theta + I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots (2.7)$$

PF = mendahului

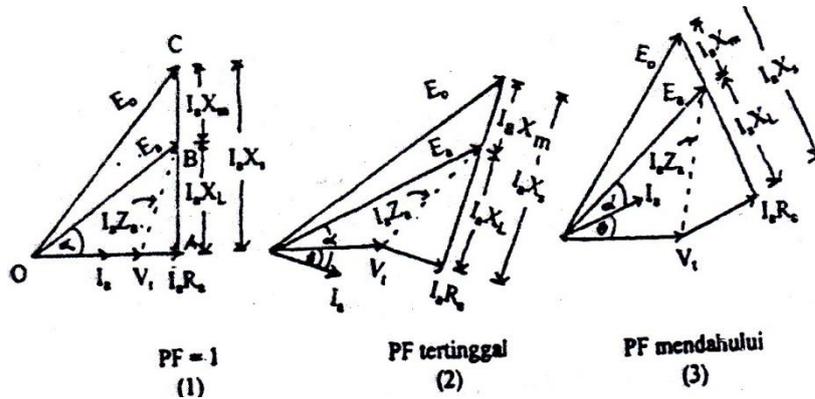
$$E_o = \sqrt{(V_t \cdot \cos \theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \cdot \sin \theta - I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots (2.8)$$

Adapun besar impedansi sinkron Z_s adalah :

$$Z_s = \sqrt{(R_a)^2 + (X_s)^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Oleh karena pada generator sinkron berbeban timbul reaktans pemagnet (X_m), maka timbul jatuh tegangan GGL pada armatur tanpa beban sebesar $I_a X_m$. Sehingga besar GGL armatur pada generator berbeban adalah :

$$E_a = E_o - I_a X_m \dots\dots\dots (2.10)$$



Gambar 2.8 GGL Armatur Berbeban Secara Vektoris

Secara vektoris besar GGL armatur berbeban (E_a) pada PF = 1 dan PF tertinggal dan mendahului, digambarkan pada gambar 2.8.

Dari gambar 2. Segitiga OAB dan OAC. Karena $X_s = X_L + X_m$, sedangkan $AC = X_s$ dan $BC = X_m$, maka $AB = X_L$. Dengan demikian besar GGL armatur berbeban (E_a) adalah :

Pada PF = 1

$$E_a = E_0 - I_a X_m \dots\dots\dots (2.11)$$

Atau

$$E_a = \sqrt{(V_t + I_a \cdot R_a)^2 + (I_a \cdot X_L)^2} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan demikian besar GGL armatur berbeban (E_a) untuk faktor daya beban tertinggal dan mendahului (gambar 2. Dan 2.) adalah :

$$E_a = \sqrt{(V_t \cdot \cos \theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \cdot \sin \theta + I_a \cdot X_L)^2} \dots\dots(2.13)$$

Dan

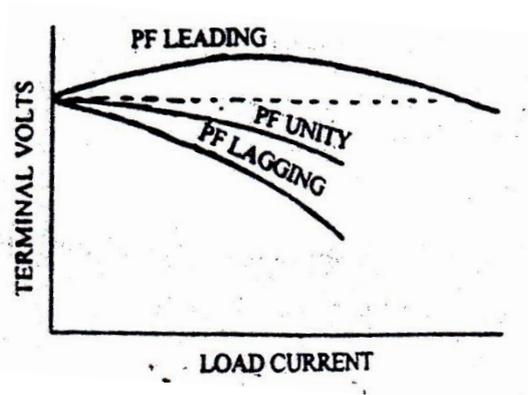
$$E_a = \sqrt{(V_t \cdot \cos \theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \cdot \sin \theta - I_a \cdot X_L)^2} \dots\dots(2.14)$$

Dari gambar 2, besar impedansi armatur (Z_a) adalah :



$$Z_a = \sqrt{(R_a)^2 + (X_L)^2} \dots\dots\dots(2.15)$$

Adapun karakteristik generator sinkron pada berbagai faktor daya, ditunjukkan pada gambar 2.9.⁴



Gambar 2.9 Karakteristik Generator AC Pada Berbagai Faktor Daya

2.4 Frekuensi Pada Generator Sinkron

Kecepatan perputaran generator sinkron akan mempengaruhi frekuensi listrik yang dihasilkan generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC untuk membentuk medan magnet pada rotor. Medan magnet rotor ini bergerak pada searah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada rotor dengan frekuensi listrik pada stator adalah :

$$f_e = \frac{N_r \cdot p}{120} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

f_e = frekuensi listrik (Hz)

N_r = kecepatan putar rotor (rpm)

⁴ Hal 211, Sumber Drs. Yon Rijono, *Dasar Teknik Tenaga Listrik Edisi Revisi*, Penerbit Andi Yogyakarta



p = jumlah kutub magnet pada rotor

Dari rumus diatas terlihat bahwa frekuensi yang dihasilkan generator sinkron sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran rotor dan jumlah kutub magnet pada generator. Jika beban generator berubah, akan mempengaruhi kecepatan rotor generator. Perubahan kecepatan rotor ini secara langsung akan mempengaruhi frekuensi yang dihasilkan generator.

Kecapatan perputaran rotor pada generator sinkron akan sama dengan kecepatan medan magnet generator. Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnetnya, maka generator ini disebut generator sinkron atau lebih dikenal dengan nama alternator. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz (sesuai standart suatu negara, di Indonesia adalah 50 Hz), maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub magnet yang telah ditentukan yang dapat dihitung melalui persamaan 2.3. Sebagai contoh untuk membangkitkan frekuensi 50 Hz pada generator dua kutub, maka harus berputar dengan kecepatan 300 rpm, atau untuk membangkitkan frekuensi 50 Hz pada generator empat kutub, maka rotor harus berputar pada kecepatan 1500 rpm.⁵

2.5 Pengaturan Generator

Jika beban ditambahkan pada generator ac yang sedang bekerja pada kepesatan konsta dengan eksitasi medan konstan, tegangan terminal akan berubah. Besarnya perubahan akan bergantung pada rancangan mesin dan pada faktor daya beban. Pengaruh dari faktor daya yang berbeda dan perubahan tegangan terminal dengan perubahan beban pada generator.

Pengaturan generator ac didefinisikan sebagai persentase kenaikan tegangan terminal ketika beban dikurangi dari arus beban penuh ternilai sampai nol, dimana kepesatan dan eksitasi medan dijaga konstan, atau :

⁵ Hal 21 Sumber : Zuriman Anthony, *Mesin Listrik Arus Bolak Balik*



$$= \frac{\text{tegangan tanpa beban} - \text{tegangan beban penuh}}{\text{tegangan beban penuh}} \times 100 \dots (2.17)$$

Faktor – faktor yang mempengaruhi pengaturan generator adalah sebagai berikut :

1. Penurunan tegangan IR pada lilitan jangkar
2. Penurunan tegangan IX_L pada lilitan jjangkar
3. Reaksi jangkar (pengaruh magnetisasi dari arus jangkar)

Dalam generaor dc, ggl E yang dibangkitkan merupakan jumlah dari tegangan terminal V_t dan penurunan tegangan IR pada rangkaian jangkar. Dalam generator ac, penurunan tegangan karena reaktansi induktif lilitan harus diperhitungkan. Maka ggl yang dibangkitkan generator ac sama dengan tegangan terminal ditambah penurunan tegangan IR maupun IX_L dalam lilitan jangkar.

2.6 Pengatur Tegangan Generator

Karena tegangan terminal generator ac banyak berubah dengan berubahnya beban, maka untuk operasi hampir semua peralatan listrik diperlukan usaha untuk menjaga agar tegangannya konstan. Cara yang biasa dilakukan untuk ini adalah menggunakan alat pembantu yang disebut *pengatur tegangan* (voltage regulator) untuk mengendalikan besarnya eksitasi medan dc yang dicatukan pada generator. Bila tegangan terminal generator turun karena perubahan beban, pengatur tegangan secara otomatis menaikkan pembangkitan medan sehingga tegangan kembali normal. Sama halnya bila tegangan terminal naik karena perubahan beban, pengatur mengembalikan nilai tegangan normalnya dengan mengurangi eksitasi medan.

Hampir semua pengatur tegangan mengendalikan eksitasi medan generator secara tak langsung yaitu dengan mengoperasikan rangkaian pegeksitasi



medan. Arus yang harus ditangani oleh pengatur jauh lebih kecil dalam rangkaian medan pengeksitasi daripada dalam rangkaian medan generator.

Salah satu tipe pengatur tegangan generator adalah jenis tahanan geser kerja langsung (direct-acting rheostatic type). Pada dasarnya pengatur ini terdiri dari tahanan variabel yang dikendalikan secara otomatis dalam rangkaian medan pengeksitasi. Elemen tahanan geser yang dihubungkan seri dengan pengeksitasi medan terdiri dari tumpukan blok tahanan atau wafer bukan logam, ditumpuk sehingga tahanan dari tumpukan dapat diubah jika dimiringkan kedepan atau kebelakang oleh elemen kopel.

Prinsip kerja pengatur tegangan statik sama seperti jenis tahanan geser kerja langsung, yaitu tegangan generator ac diatur dengan megubah tahanan efektif dalam rangkaian medan pengeksitasi, yang selanjutnya megubah keluaran tegangan dari pengeksitasi tersebut.

2.7 Eksitasi Tegangan

Setelah generator ac mencapai kepesatan yang sebenarnya oleh penggerak mulanya, medannya dieksitasi dari catu dc. Ketika kutub lewat dibawah konduktor jangkar yang berada pada stator, fluksi medan yang memotong konduktor menginduksikan ggl kepadanya. Ini adalah ggl bolak balik, karena kutub dengan polaritas yang berubah-ubah terus-menerus melewati konduktor tersebut. Karena tidak menggunakan komutator, ggl bolak-balik yang dibangkitkan keluar pada terminal lilitan stator.

Besarnya ggl yang dibangkitkan bergantung pada laju pemotongan garis gaya atau dalam hal generator, besarnya ggl bergantung pada kuat medan dan kepesatan rotor. Karena generator kebanyakan bekerja pada kepesatan konstan, maka besarnya ggl yang dibangkitkan menjadi bergantung pada eksitasi medan. Ini berarti bahwa besarnya ggl yang dibangkitkan dapat dikendalikan dengan mengatur besarnya eksitasi medan yang diberikan pada generator. Eksitasi medan



dapat langsung dikendalikan dengan mengubah besarnya tegangan eksitasi yang dikenakan pada medan generator.⁶

2.8 GGL Induksi Pada Generator

GGL induksi (E_a) pada generator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator (misalnya kumparan jangkar ditempatkan distator) bila rotor diputar disekitar stator (misalnya kumparan medan dirotor). Besarnya GGL induksi internal (E_a) yang dihasilkan kumparan jangkar alternator ini dapat diserhanakan dalam bentuk rumus sebagai berikut :

$$E_a = 4,44 K_C \cdot K_d \cdot f \cdot \Phi \cdot T \cdot (\text{volt/fase}) \dots\dots\dots (2.18)$$

Atau disingkat menjadi :

$$E_a = c \cdot N_r \cdot \Phi \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana :

K_C = faktor kisar

K_d = faktor distribusi

f = frekuensi dalam Hz atau cps

Φ = fluks/kutub dalam Weber

T = banyaknya lilitan/fase = $Z/2$

Z = banyak sisi kumparan (1 lilit adalah 2 sisi kumparan)

c = konstanta mesin

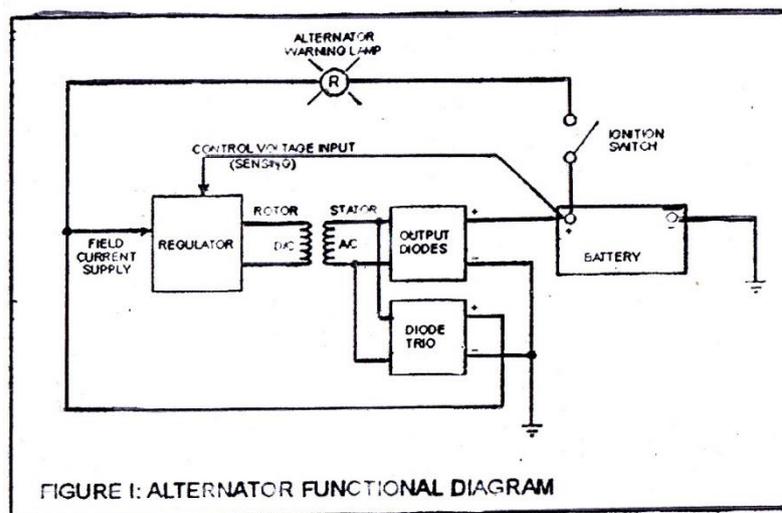
N_r = kecepatan putaran rotor (rpm)

⁶ Hal 201-204, Sumber : Lister, *Mesin Dan Rangkaian Listrik Edisi Keenam 1998*, Penerbit Erlangga

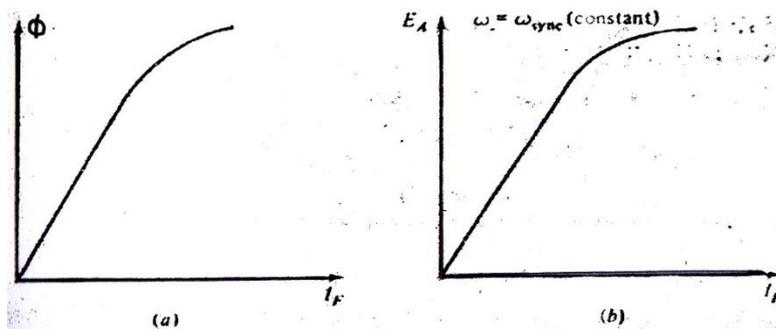


ϕ = fluks yang dihasilkan oleh kumparan medan (wb)

arus medan (I_f) pada alternator biasanya diatur dengan menggunakan rangkaian kontrol, agar diperoleh pembangkitan (E_a) yang sesuai dengan kebutuhan. Bentuk gambaran pengaturan sederhana arus medan (I_f) terhadap E_a yang dibangkitkan alternator diperlihatkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.10 Diagram fungsi pengaturan arus medan pada alternator



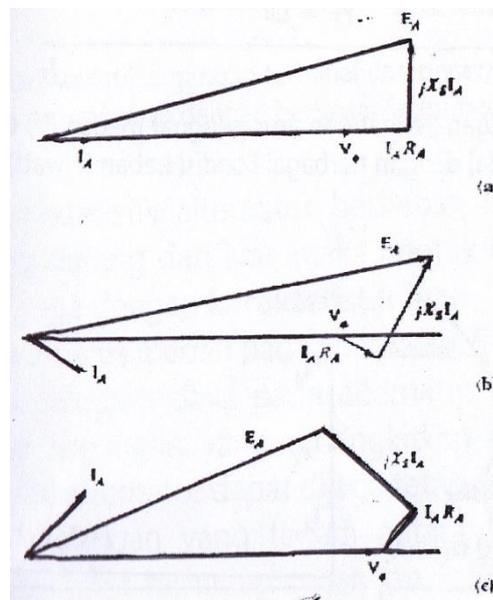
Gambar 2.11 Karakteristik hubungan pengaruh arus medan terhadap fluks dan E_a pada alternator

Apabila karakteristik pengaruh arus beban (I_f) terhadap fluks dan GGL yang dihasilkan alternator digambarkan bila kondisi kecepatan tetap, maka keadaan ini dapat digambarkan seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.11.



2.9 Karakteristik Alternator Berbeban dan Sudut Daya

Alternator dapat dibebani dengan berbagai macam bentuk beban listrik seperti R, L, dan C. Gabungan dari ketiga beban ini dapat berupa : R (seperti lampu pijar), R dan L (seperti lampu TL), R dan C atau gabungan R, L, dan C. Bentuk hubungan beban ini akan mempengaruhi arus yang mengalir pada generator. Arus ini bisa menjadi sefasa (beban C atau R dan C) dari tegangan, tergantung dari jenis beban yang diberikan pada terminal alternator. Bentuk hubungan secara vektor antara tegangan yang terjadi pada alternator terhadap bebannya diperlihatkan pada gambar 2.12.

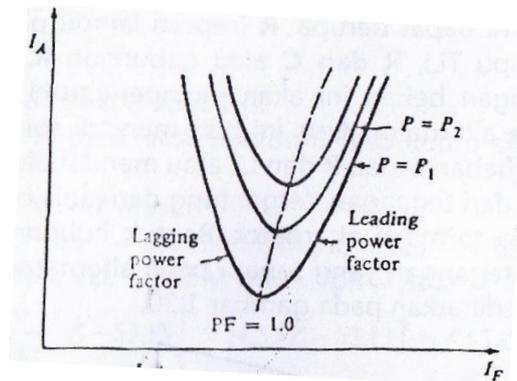


Gambar 2.12 Hubungan berbagai kondisi beban terhadap arus dan tegangan yang terjadi pada alternator (a) beban R (paling atas), (b) beban R dan L (ditengah), dan (c) beban R dan C (paling bawah)

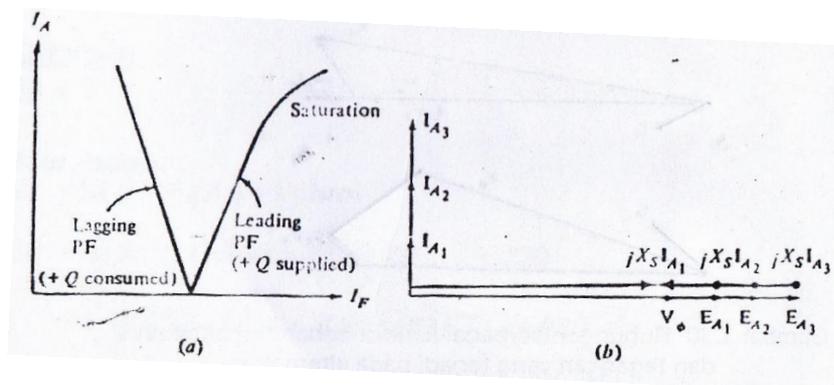
Sudut yang dibentuk antara E_a dengan V disebut sudut daya. Sudut daya ini tergantung dari besar dan jenis beban pada alternator. Sudut daya ini tidak boleh lebih dari 90° . Bila sudut daya lebih dari 90° maka alternator ini akan menjadi beban (menjadi seperti motor listrik) dan dapat merusak sistem tenaga yang lain jika alternator ini paralel dengan sistem tenaga listrik yang lain.



Perubahan beban pada alternator memerlukan pengaturan pembangkitan daya dari alternator dengan cara mengatur arus penguat medannya. Karakteristik arus medan terhadap perubahan beban dapat dilihat pada gambar 2.13 dan 2.14.



Gambar 2.13 Hubungan pengaturan arus penguat medan (I_f) terhadap arus beban (I_a) dengan berbagai kondisi beban P (Watt)

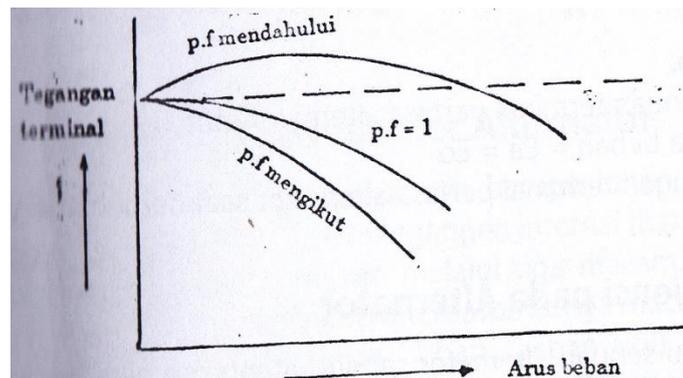


Gambar 2.14 Hubungan pengaturan arus penguat medan (I_f) terhadap arus beban (I_a) dengan berbagai kondisi beban Q (VAR)

Beban yang diberikan ke alternator akan mempengaruhi kecepatan rotor alternator. Makin besar beban yang diberikan pada alternator, maka makin turun pula kecepatan rotor. Hal tersebut dikarenakan pengaruh medan magnet yang diperbesar pada jangkar (reaksi jangkar) akibat pusaran arus beban pada jangkar alternator. Turunnya kecepatan rotor akan mengakibatkan frekuensi yang



dihasilkan alternator juga turun. Untuk menaikkan kembali frekuensi yang dihasilkan alternator, maka perlu dinaikkan juga kecepatan penggerak mula yang menggerakkan rotor. Bentuk karakteristik alternator berbeban ini dapat dilihat pada gambar 2.15



Gambar 2.15 Karakteristik tegangan terminal dari generator serempak versus arus beban dengan berbagai faktor beban

Karena karakteristik alternator berbeban ini dipengaruhi oleh beban yang datang dari luar, maka bentuk karakteristik ini kadang disebut juga dengan karakteristik luar.

Pengaturan arus medan pada alternator disamping untuk mengontrol pengeluaran daya pada alternator, juga berfungsi untuk mengatur tegangan yang dibangkitkan alternator agar tegangan keluaran alternator dapat dijaga tetap stabil. Presentasi besarnya *drop* tegangan yang terjadi antara tegangan yang dibangkitkan alternator terhadap tegangan keluaran alternator disebut Regulasi Tegangan (*Voltage Regulation, VR*) yang dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$VR = \frac{E_a - V_t}{V_t} \times 100\% \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana :

VR = regulasi tegangan

V_t = tegangan terminal per fasa pada alternator



E_a = tegangan internal per fasa yang dibangkitkan alternator

Karena tegangan E_a dapat diukur pada tegangan terminal saat alternator tanpa beban, maka persamaan 2. Dapat diubah menjadi sebagai berikut :

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana :

V_{NL} = tegangan terminal per fasa alternator saat tanpa beban = $E_a = E_o$

V_{FL} = tegangan terminal per fasa alternator saat berbeban = V_t

2.10 Efisiensi Pada Alternator

Mutu sebuah alternator sangat ditentukan oleh besarnya efisiensi alternator tersebut. Makin besar efisiensi sebuah alternator, maka dikatakan alternator tersebut makin bagus. Efisiensi alternator dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran alternator terhadap daya masukan awal alternator, yang dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{P_{OUT}}{P_N} \times 100\% \dots\dots\dots (2.22)$$

Dan :

$$P_{OUT} = V_{ph} \times I_{ph} \times \cos \phi \dots\dots\dots (2.23)$$

$$P_{CU} = I_A^2 \times R_A \dots\dots\dots (2.24)$$

$$P_{IND} = P_{OUT} + P_o \dots\dots\dots (2.25)$$

$$P_N = P_{IND} + P_{ROT} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana :

P_{OUT} = daya keluaran per fasa pada terminal alternator (Watt)



V_{ph} = tegangan perfasa pada terminal alternator (Volt)

I_{ph} = arus pada beban perfasa alternator (Ampere)

P_{CU} = rugi-rugi tembaga perfasa pada alternator (Watt)

P_{ROT} = rugi-rugi untuk memutar rotor (Watt)

P_{IND} = daya perfasa yang dibangkitkan alternator (Watt)

P_{IN} = daya masukan perfasa pada rotor alternator (Watt)

$\cos \phi$ = faktor daya pada beban

Jika alternator yang digunakan adalah alternator 3-fasa, maka semua daya dan rugi-rugi daya per fasa diatas dikalikan dengan 3.⁷

2.11 Kerja Paralel Generator Sinkron (Alternator)

Untuk melayani beban berkembang, ada kalanya kita harus memparalelkan dua atau lebih alternator dengan maksud memperbesar kapasitas daya yang dibangkitkan.

Selain untuk tujuan diatas, kerja paralel juga sering dibutuhkan untuk menjaga kontinuitas pelayanan apabila ada mesin (alternator) yang harus dihentikan, misalnya untuk istirahat atau reparasi. Untuk maksud memparalelkan ini, ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, yaitu :

- Harga sesaat ggl kedua alternator harus sama dalam kebesarannya, dan bertentangan fdalam arah. Atau harga sesaat ggl alternator harus sama dalam kebesarannya dan bertentangan dalam arah dengan harga efektif tegangan jal-jala.
- Frekuensi kedua alternator atau alternator dengan jala-jala harus sama.

⁷ Hal 41-44 Sumber : Zuriman Anthony, *Mesin Listrik Arus Bolak Balik*



- Fasa kedua alternator harus sama dengan bertentangan setiap saat.
- Urutan fasa kedua alternator harus sama.⁸

⁸ Hal 134, Sumber : Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya 1995*, Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta