

BAB II

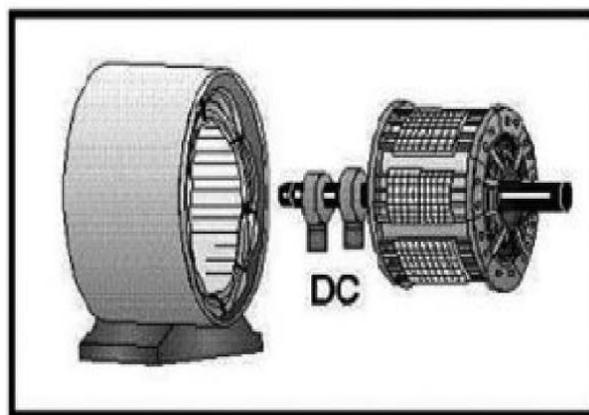
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Sinkron²

Generator sinkron (alternator) adalah mesin listrik arus bolak-balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (*Alternating Current, AC*) yang bekerja dengan cara merubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan relatif adalah terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator) karena pergerakan medan magnet terhadap kumparan jangkar atau sebaliknya. Alternator ini disebut generator sinkron (sinkron = serempak) karena kecepatan perputaran medan magnet yang terjadi sama dengan 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.

2.1.1 Konstruksi Generator Sinkron

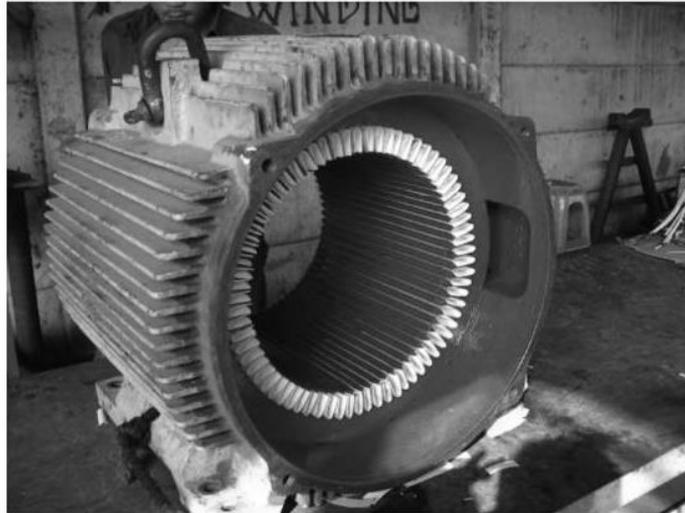
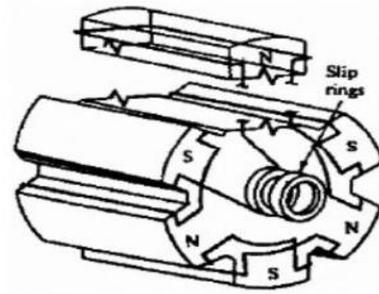
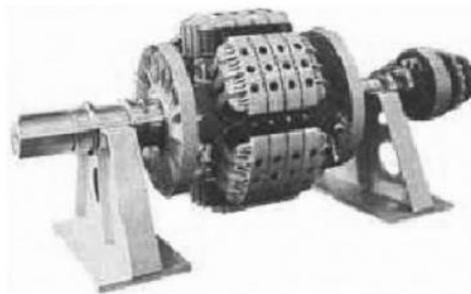
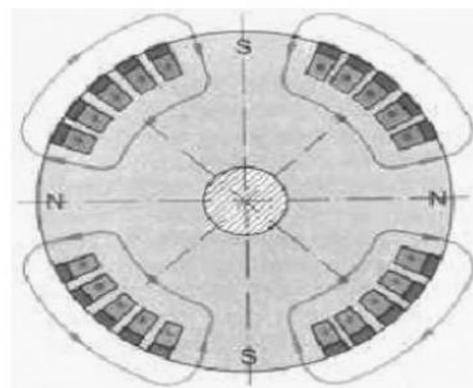
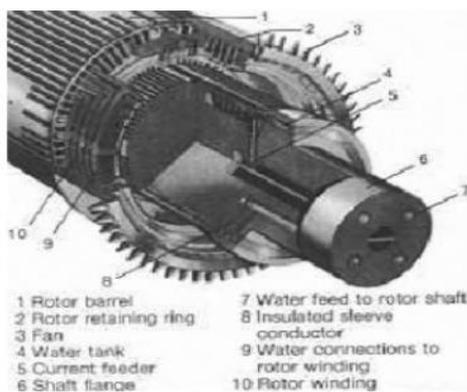
Generator ini mempunyai dua komponen utama yaitu stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak). Bentuk gambaran sederhana konstruksi generator sinkron diperlihatkan pada Gambar 2.1, Gambar 2.2, dan Gambar 2.3.



Gambar 2.1 Bentuk sederhana konstruksi generatos sinkron²

² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.1.

² Ibid, hlm.2.

Gambar 2.2 Stator pada generator sinkron²(a) Rotor *salient* (kutub menonjol) pada generator sinkron

(b) Rotor silindris (silinder) (c) Penampang rotor kutub silindris

Gambar 2.3 Rotor pada generator sinkron²

² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.2.

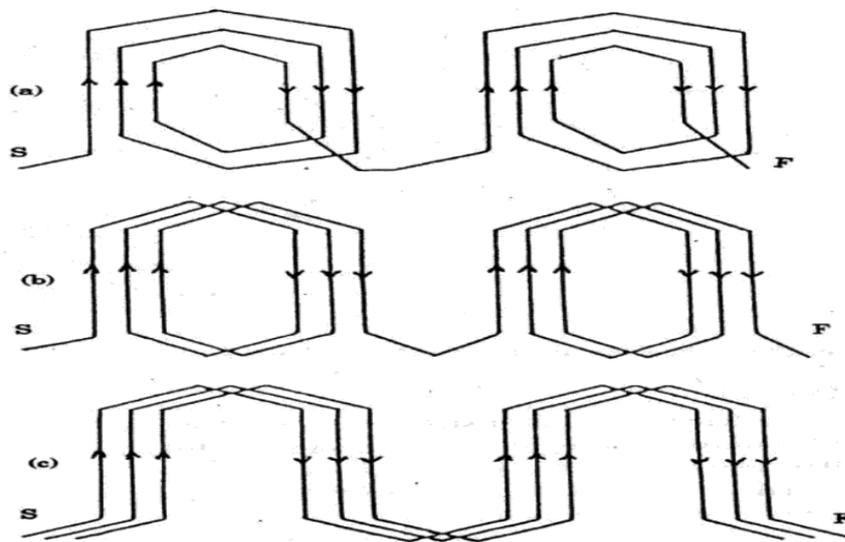
² Ibid, hlm.3.



Dengan memperhatikan gambar 2.1 dan 2.2 maka konstruksi stator ini terdiri dari:

1. Kerangka atau gandar dari besi tuang untuk menyangga inti jangkar.
2. Inti jangkar dari besi lunak/baja silikon.
3. Alur/parit/slot dan gigi tempat meletakkan belitan (kumparan) bentuk alur ada yang terbuka, setengah tertutup, dan tertutup.
4. Belitan jangkar terbuat dari tembaga yang diletakan pada alur.

Gambaran bentuk lilitan stator dalam membentuk kutub magnet pada stator untuk menyesuaikan dengan kutub magnet rotor diperlihatkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rangkaian belitan jangkar di stator generator sinkron²

Kumparan jangkar yang ada di stator biasanya disebut belitan stator atau kumparan stator. Untuk generator 3 fasa biasanya kumparan dapat dirangkai dalam 2 jenis sebagai berikut :

1. Belitan satu lapis (*single layer winding*), dengan 2 macam bentuk, yaitu:
 - a. Mata rantai (*cocertis or chain winding*)
 - b. Gelombang (*wave*)
2. Belitan dua lapis (*double layer winding*), dengan 2 macam bentuk pula, yaitu:

² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.4.

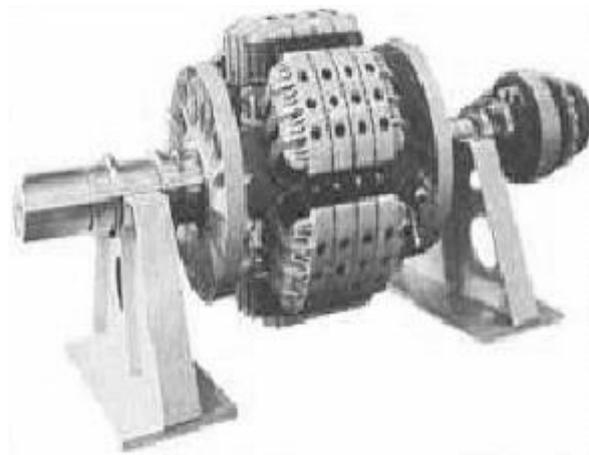


- a. Jenis gelombang (*wave*)
- b. Jenis gelung (*lap*)

Pada generator sinkron yang berkapasitas besar, arus DC diberikan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor, sedangkan kumparan jangkar tempat terbangkitnya tegangan terletak di stator. Rotor ini diputar oleh *prime mover* (penggerak mula) agar terjadi perpotongan medan magnet yang berubah-ubah pada kumparan jangkar di stator. Adanya perpotongan medan magnet yang berubah-ubah maka timbul tegangan induksi pada kumparan jangkar generator. Ada 2 jenis bentuk kutub magnet generator sinkron pada rotornya yang dapat dijabarkan sebagai berikut (lihat Gambar 2.3):

1. Rotor kutub sepatu atau menonjol (*salient*).

Kutub menonjol terdiri dari inti kutub, badan kutub, dan sepatu kutub. Kumparan medan dililitkan pada badan kutub. Pada sepatu kutub juga dipasang kumparan peredam (*damper winding*). Kumparan kutub dari tembaga, badan kutub, dan sepatu kutub dari besi lunak.



Gambar 2.5 Rotor Kutub Menonjol Generator Sinkron²

2. Rotor kutub silindris (*non salient*).

Kutub ini terdiri dari alur-alur dan gigi yang dipasang untuk menempatkan kumparan medan. Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar penggerak mula, frekuensi, dan rating daya generator. Pada kutub sepatu (*salient*),

² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.3.



kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Rotor kutub sepatu ini biasanya digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub. Biasanya rotor ini digerakkan dengan kecepatan yang rendah karena kutub rotornya banyak. Pada kutub silindris (*non salient*), konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor yang membentuk seperti silinder. Rotor silinder ini umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub. Rotor ini biasanya digerakkan dengan kecepatan tinggi sehingga genetor yang menggunakan kutub ini biasanya disebut juga dengan turbo generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dengan rating daya sekitar 10 MVA biasanya menggunakan rotor silinder. Sementara itu, untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka digunakan rotor kutub sepatu. Generator-generator ini biasanya membentuk medan magnet dengan bantuan kumparan yang dililitkan pada rotornya. Kemudian kumparan ini diberi sumber DC dengan sistem pengaturan yang baik sehingga besar arus yang melewati kumparan dapat diatur untuk mengatur kuat medan yang akan dihasilkan rotor.



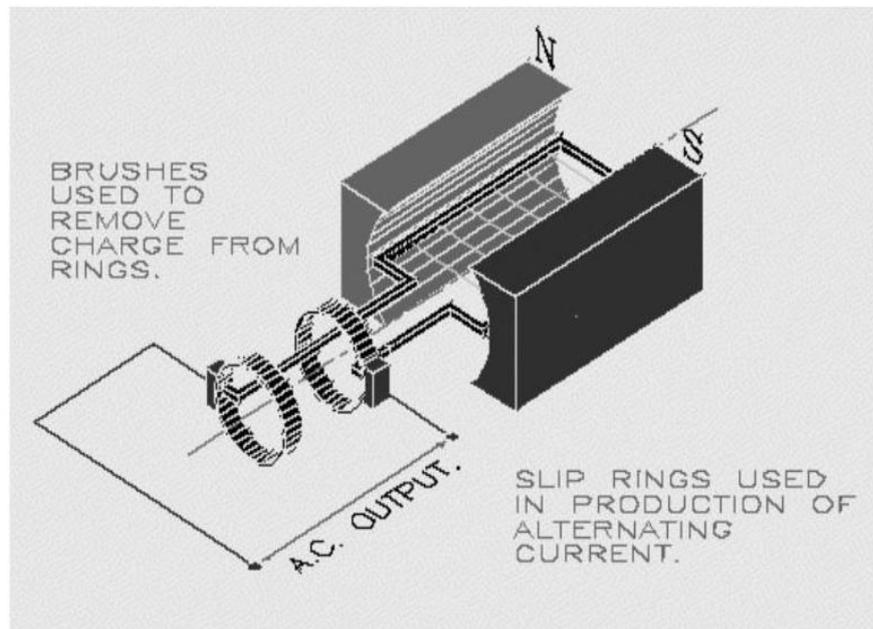
Gambar 2.6 Rotor Kutub *Silinder* Generator Sinkron²

² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.3.



2.1.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron²

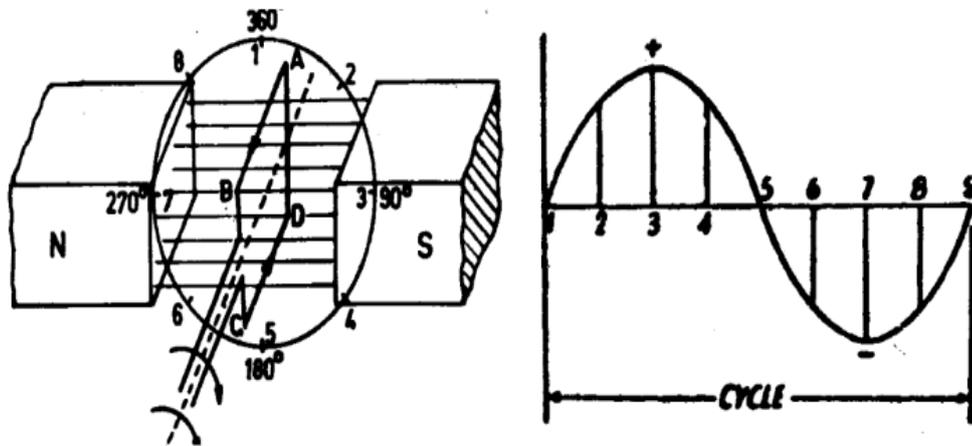
Generator sinkron sering juga disebut sebagai alternator. Generator ini dapat menghasilkan energi listrik karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet homogen terhadap kumparan jangkar pada generator (magnet yang bergerak dan kumparan jangkar diam atau sebaliknya magnet diam dan kumparan jangkar bergerak). Jadi, jika sebuah kumparan diputar dalam kecepatan konstan pada medan magnet homogen maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet homogen ini bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet tetap. Tegangan yang dihasilkan generator ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan pergerakan relatif antara kumparan jangkar dengan medan magnet, kuat medan magnet, dan banyak lilitan pada kumparan jangkar generator. Contoh bentuk gambaran sederhana proses pembangkitan energi listrik pada generator sinkron dapat diperlihatkan seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Kumparan jangkar pada rotor berputar di sekitar medan magnet yang dihasilkan stator²

² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.21.

² Ibid, hlm.22.



Gambar 2.8 Proses terbentuknya gelombang AC pada generator sinkron²

Pada Gambar 2.7 diperlihatkan contoh sederhana sebuah kumparan rotor berputar di sekitar medan magnet homogen yang dihasilkan stator. Kemudian, tegangan keluaran pada rotor diambil/dilewatkan melalui sepasang *slip ring* (cincin sikat) yang bisa dihubungkan ke beban. Proses terbentuknya gelombang arus bolak-balik (*Alternating Current, AC*) yang dihasilkan pada keluaran rotor ini lebih jelasnya diperlihatkan pada Gambar 2.8.

Dengan memperhatikan Gambar 2.7 dan Gambar 2.8, proses timbulnya GGL induksi pada generator dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Kumparan tembaga BADC berputar diantara magnet permanen N - S.
2. Kedua ujung kumparan dihubungkan dengan slip ring (cincin sikat).
3. GGL induksi akan menghasilkan arus (karena adanya beban pada generator) yang mengalir melalui sikat - sikat arang ke beban yang tersambung dengan generator.

Ketika kumparan BADC dari Gambar 2.7 diputar ke kanan, satu sisi kumparan dari kutub warna merah (kita anggap sisi kumparan warna merah) bergerak ke atas sedang sisi lainnya (kumparan dari sisi kutub warna biru dianggap kumparan warna biru) bergerak ke bawah (perhatikan Gambar 2.8). Kumparan mengalami perubahan garis gaya magnet yang makin sedikit sehingga pada kedua

² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.23.



sisi kumparan akan dibangkitkan tegangan yang semakin sedikit pula. Apabila alternator diberi beban maka akan mengalir pula arus listrik yang semakin mengecil mengitari kumparan hingga mencapai posisi kumparan vertikal dengan arus menjadi nol karena tegangan yang dibangkitkan juga nol (lihat Gambar 2.8). Pada posisi vertikal kumparan tidak mengalami perubahan garis gaya magnet sehingga tidak ada listrik yang mengalir pada kumparan (gelombang listrik AC berada pada posisi No. 1 pada Gambar 2.8).

Jika kumparan ini terus berputar hingga sisi merah bergerak ke kanan (sisi selatan, S) dan sisi biru bergerak ke kiri (sisi utara, N). Kumparan mengalami perubahan garis gaya magnet dari minimum ke maksimum, tetapi dengan arah yang berlawanan dari posisi sebelumnya (perhatikan bentuk gelombang pada Gambar 2.8) sehingga pada setiap sisi kumparan akan dibangkitkan tegangan maksimum (posisi kumparan horizontal dan gelombang berada pada titik No. 3).

Kumparan terus berputar hingga sisi merah bergerak terus ke bawah dan sisi biru bergerak ke atas. Saat ini, kumparan mengalami perubahan garis gaya magnet maksimum ke minimum sehingga tegangan yang dibangkitkan pada kumparan melemah hingga mendekati nol (pada posisi No. 5).

Kemudian kumparan BADC terus berputar ke arah kutub utara (N) sehingga terjadi pembalikan arah gelombang (posisi No. 6 dan 7). Bila kumparan terus berputar sehingga kumparan BADC kembali berada pada posisi di atas maka gelombang tegangan akan berubah menjadi posisi No. 8 dan 9. Dari sini terlihat terbentuknya gelombang AC karena proses perputaran kumparan di dalam medan magnet yang terbentuk dalam kumparan jangkar ini adalah gelombang tegangan. Arus listrik akan mengalir saat terminal keluaran generator diberi beban seperti lampu atau beban yang lainnya.

Untuk generator berkapasitas kecil, medan magnet dapat diletakkan pada stator (disebut generator kutub eksternal/ *external pole generator*) yang mana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor. Jika cara ini digunakan untuk generator berdaya besar maka hal ini dapat menimbulkan kerusakan pada slip ring dan karbon sikat. Untuk mengatasi permasalahan ini maka pada generator berkapasitas besar digunakan tipe generator dengan kutub internal (*internal pole generator*), yang



mana medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator. Tegangan yang dihasilkan akan sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan. Bagian dari kumparan generator yang membangkitkan tegangan disebut kumparan jangkar, sedangkan bagian dari kumparan generator yang membangkitkan medan magnet disebut kumparan medan.

2.2 Jenis-jenis Generator

A. Berdasarkan letak kutubnya:

1. Generator Kutub Dalam

Generator kutub dalam mempunyai medan magnet yang terletak pada bagian yang berputar rotor.

2. Generator Kutub Luar

Generator kutub luar mempunyai medan magnet yang terletak pada bagian yang diam stator.

B. Berdasarkan putaran medan:

1. Generator Sinkron

2. Generator Asinkron

C. Berdasarkan jenis Arus yang dibangkitkan:

1. Generator Arus searah (DC)

2. Generator Arus bolak – balik (AC)

D. Berdasarkan dilihat dari Fasanya:

1. Generator satu Fasa

2. Generator tiga Fasa

E. Berdasarkan Bentuk Rotornya:

1. Generator rotor kutub menonjol biasa digunakan pada generator dengan rpm rendah seperti PLTA dan PLTD.

2. Generator rotor kutub rata (*silindris*) biasa digunakan pada pembangkit listrik atau generator dengan putaran rpm tinggi seperti PLTG dan PLTGU.



2.3 Frekuensi Pada Generator Sinkron

Kecepatan perputaran generator sinkron akan memengaruhi 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 searah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada rotor dengan frekuensi listrik pada stator adalah:

$$f_c = \frac{N_r \cdot p}{120} \dots\dots\dots (2.1)^2$$

Keterangan:

f_c = frekuensi listrik (Hz)

N_r = kecepatan putar rotor (rpm)

p = jumlah kutub magnet pada rotor

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

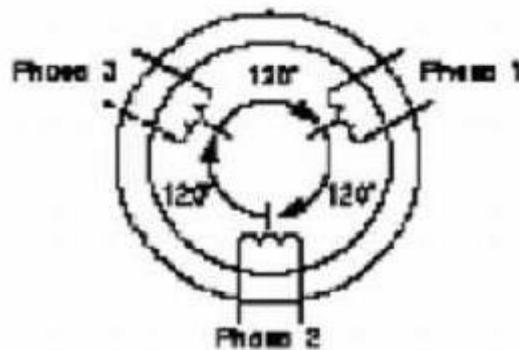
Kecepatan perputaran rotor pada generator sinkron akan sama dengan kecepatan medan magnet generator. Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnetnya maka generator ini disebut generator sinkron atau lebih dikenal dengan nama Alternator. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz (sesuai standar suatu negara, di Indonesia adalah 50 Hz) maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub magnet yang telah ditentukan dan dapat dihitung melalui persamaan (2.1). Sebagai contoh untuk membangkitkan frekuensi 50 Hz pada generator dua kutub maka rotor harus berputar dengan kecepatan 3000 rpm atau untuk membangkitkan frekuensi 50 Hz pada generator empat kutub maka rotor harus berputar pada kecepatan 1500 rpm.

² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.26.

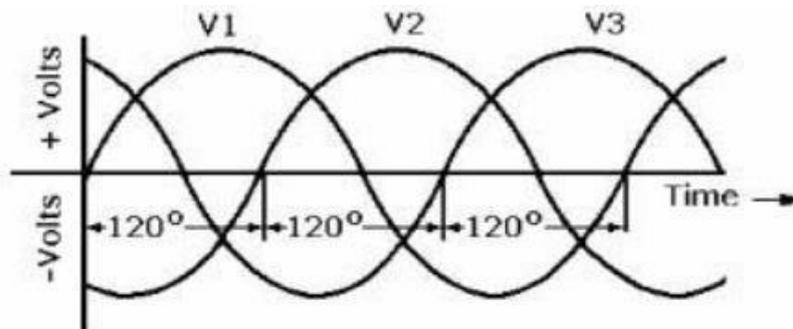


2.4 Alternator 3 Fasa²

Alternator 3 fasa mempunyai 3 kumparan jangkar yang tersusun sedemikian rupa sehingga dapat membangkitkan tegangan 3 fasa yang berbeda fasa sebesar 120° . Bentuk gambaran sederhana hubungan kumparan 3 fasa dengan tegangan yang dibangkitkan alternator ini diperlihatkan pada gambar 2.9 dan 2.10. Ke tiga kumparan jangkar alternator 3 fasa ini biasa dihubungkan secara bintang (Y) atau delta (segitiga), seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.9 Skema kumparan tiga fasa



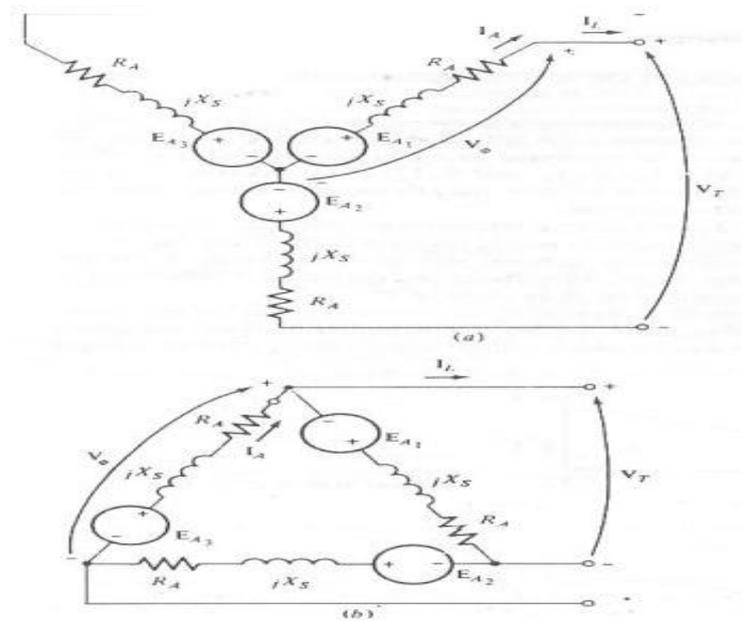
Gambar 2.10 Grafik Tegangan generator sinkron 3 fasa

Untuk mempermudah cara menganalisa alternator sistem 3 fasa dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian ekuivalen analisa perfasa dari rangkaian ekuivalen alternator 3 fasa. Bentuk rangkaian ekuivalen alternator 3 fasa ini diperlihatkan pada gambar 2.12, dimana gambar 2.12a merupakan rangkaian

² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.37.



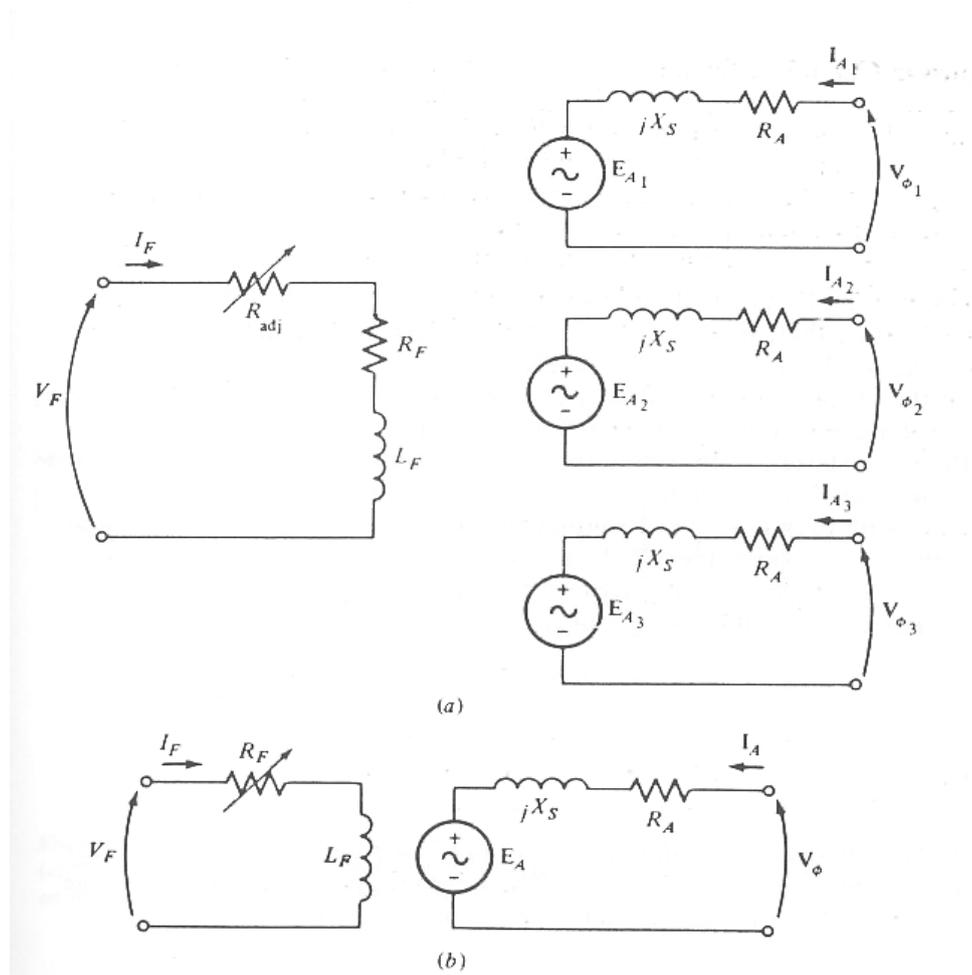
ekivalen sistem 3 fasanya dan gambar 2.12b merupakan rangkaian ekivalen perfasanya.



Gambar 2.11 Bentuk hubungan kumparan alternator²

Besarnya tegangan terminal perfasa (tegangan fasa) pada alternator yang diterapkan pada gambar 2.12b tergantung dari bentuk hubungan kumparan alternator yang digunakan pada gambar 2.11. Tegangan terminal perfasa yang dilambangkan dengan V_ϕ pada gambar 2.12b adalah merupakan tegangan pada kumparan jangkar alternator atau disebut juga dengan tegangan fasa. Besarnya tegangan fasa pada rangkaian 2.12b tergantung dari jenis hubungan kumparan alternator. Bila alternator terhubung Y (perhatikan gambar 2.11) maka tegangan fasanya adalah sebesar tegangan fasa ke netral ($V_\phi = V_{LN}$), tetapi bila alternator terhubung delta maka tegangan fasa adalah tegangan antar fasa ($V_\phi = V_{LL}$) dari sistem 3 fasa.

² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.38.



Gambar 2.12 (a) Rangkaian Ekuivalen generator sinkron 3 fasa,

(b) Rangkaian ekuivalen generator sinkron per fasa.²

Keterangan,

 V_f = Tegangan Medan I_f = Arus Medan R_f = Resistansi Medan X_f = Reaktansi E_a = GGL induksi jangkar I_a = Arus jangkar V_a = Tegangan Jangkar.² Zuriman Anthony. *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik – Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2019, hlm.39.



2.5 Pembebanan Pada Generator

2.5.1 Generator Tanpa Beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai alternator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban (E_0). Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f).

2.5.2 Generator Berbeban

Tiga macam sifat beban generator, yaitu : beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Akibat pembeban ini akan berpengaruh terhadap tegangan beban dan faktor dayanya. Jika beban generator bersifat resistif mengakibatkan penurunan tegangan relatif kecil dengan faktor daya sama dengan satu. Jika beban generator bersifat induktif terjadi penurunan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya terbelakang (*lagging*). Sebaliknya, Jika beban generator bersifat kapasitif akan terjadi kenaikan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya mendahului (*leading*). GGL armatur tanpa beban (E_0) besarnya adalah :

$$E_0 / \text{ph} = V_t + I_a \cdot Z_s \dots\dots\dots (2.2)^4$$

2.6 Karakteristik Generator Sinkron

2.6.1 Karakteristik Tanpa Beban

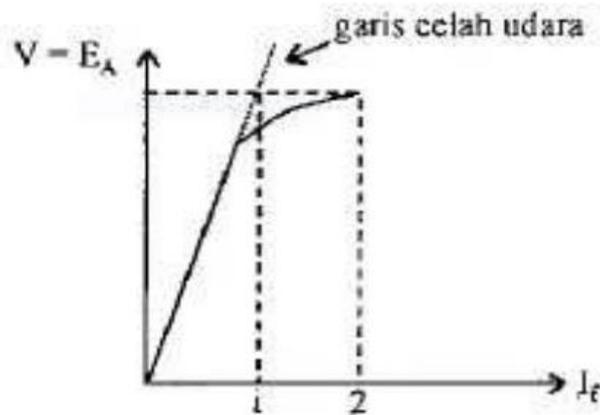
Grafik karakteristik beban nol dtunjukkan pada gambar 2.13. Untuk mengetahui karakteristik tanpa beban pertama mengatur pada kecepatan nominal, dimana terminalnya tidak dibebani serta mengatur arus medan juga nol.

Akan terlihat arus medan meningkat secara bertahap, pada saat yang bersamaan timbul tegangan induksi pada kumparan jangkar stator generator yang juga semakin meningkat. Peningkatan arus medan (I_f) sebanding dengan fluksi (Φ) yang timbul. Perubahan arus medan dan tegangan induksi tersebut dicatat bersamaan untuk melihat hubungan antara keduanya. Pada saat tidak dibebani arus

⁴ Yon Rijono. *Dasar Teknik Tenaga Listrik Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2004, hlm.215.



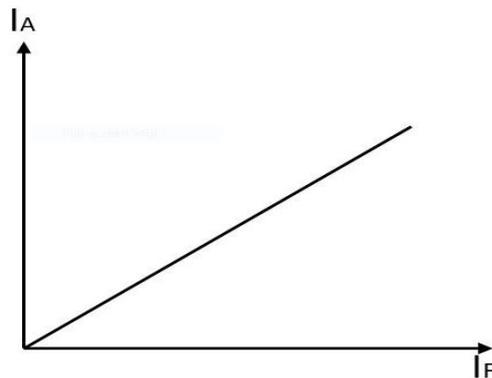
jangkar (I_A) sama dengan nol, sehingga tegangan terminalnya (V) sama dengan GGL (E_A).



Gambar 2.13 Karakteristik tanpa beban⁵

2.6.2 Karakteristik Hubung Singkat

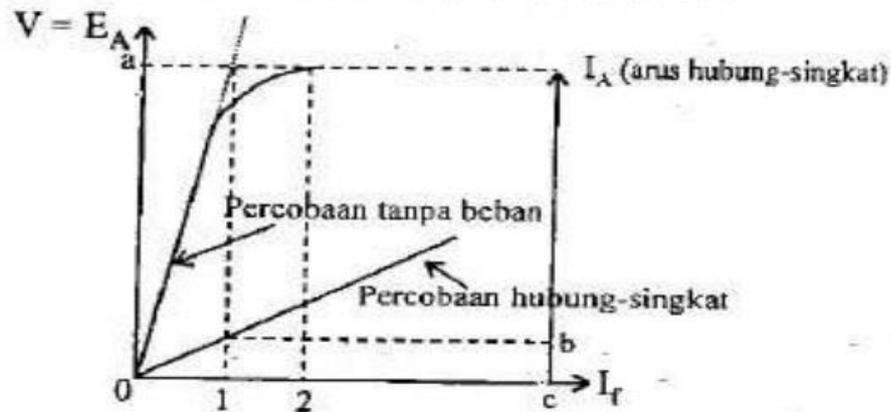
Prosedur percobaan ini adalah dengan mengatur generator pada kecepatan nominal, dimana terminalnya dihubung-singkat melalui amperemeter serta mengatur arus medan hingga nol. Setelah ini akan terlihat arus medan meningkat secara bertahap, begitu pula dengan arus jangkarnya. Besarnya arus medan (I_F) dan arus jangkar (I_A) diukur bersamaan dan hasilnya dapat digambar pada grafik.



Gambar 2.14 Karakteristik hubung singkat⁵

⁵ Mochtar Wijaya. *Dasar-Dasar Mesin Listrik*, Jakarta: Djambatan, 2001, hlm,228.

⁵ Ibid, hlm.229.

Gambar 2.15 Karakteristik Generator Sinkron⁵

2.7 Daya

Daya dalam tegangan AC pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga arus dan tegangan pada saat itu. Jika arus dan tegangan bolak-balik satu fasa, maka daya dalam satu periode sama dengan perkalian dari arus dan tegangan efektif. Tetapi jika ada reaktansi dalam rangkaian arus dan tegangan tidak satu fasa sehingga selama siklusnya biasa terjadi arus negatif dan tegangan positif.

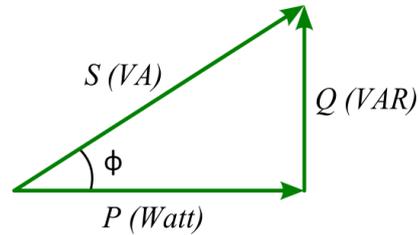
Secara teoritis daya terdiri dari tiga yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya semu yang pengertiannya adalah sebagai berikut :

- a. Daya aktif (P) adalah daya yang diubah menjadi energy, persatuan waktu atau dengan kata lain adalah daya yang benar-benar terpakai yang dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adaah Watt (W).
- b. Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen reaktansi. Daya reaktif ditentukan dari reaktansi yang menimbulkannya, dapat berupa reaktansi induktif (XL) dan reaktasi kapasitif (Xc) , satuannya adalah Volt Ampere Reaktif (VAR).
- c. Daya semu (S) adalah jumlah secara vektoris daya aktif dan daya reaktif yang memiliki satuan Volt Ampere (VA).

⁵ Mochtar Wijaya. *Dasar-Dasar Mesin Listrik*, Jakarta: Djembatan, 2001, hlm,230.



Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar sistem segitiga daya berikut ini :



Gambar 2.16 Segitiga daya

$$P = V.I. \cos\phi \dots\dots\dots(2.3)$$

$$S = V.I \dots\dots\dots(2.4)$$

$$Q = V. I. \sin\phi \dots\dots\dots(2.5)$$

Untuk daya tiga phasa rumus daya aktif, daya reaktif, dan daya semu adalah seperti dibawah ini.

$$P = \sqrt{3}. V_l. I_l. \cos\phi \dots\dots\dots(2.6)$$

$$S = \sqrt{3}. V_l. I_l. \sin\phi \dots\dots\dots(2.7)$$

$$Q = \sqrt{3}. V_l. I_l \dots\dots\dots(2.8)$$

Daya memiliki hubungan dengan usaha yaitu daya merupakan usahayang dilakukan dalam satuan waktu, atau dengan kata lain daya berbanding terbalik dengan waktu sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \frac{W}{t} \dots\dots\dots(2.9)^4$$

Dimana,

P = Daya mekanik (W)

W = Usaha (joule)

t = Waktu (s)

2.8 Rugi-Rugi

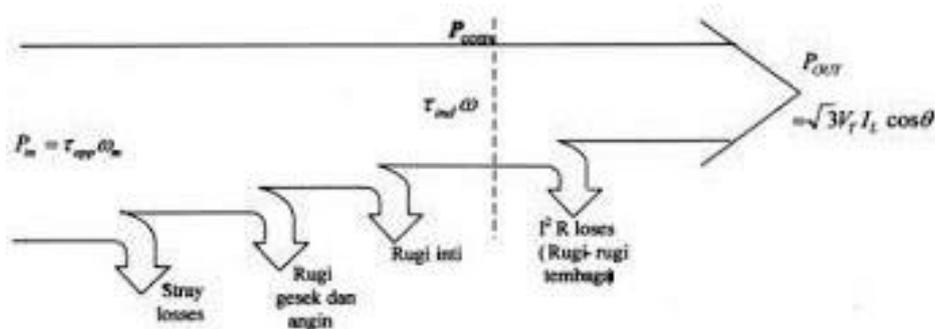
Pertimbangan terhadap rugi-rugi mesin merupakan hal yang penting berdasarkan ketiga alasan berikut:

⁴ Abdul Manaf. *Rangkaian Listrik 1*. Bandung: Pusat Pengembangan Pendidikan Politeknik,1994.hlm.24.



1. Rugi-rugi menentukan efisiensi dan cukup berpengaruh terhadap biaya pemakaiannya.
2. Rugi-rugi menentukan pemanasan mesin sehingga menentukan pula keluaran daya atau ukuran yang dapat diperoleh tanpa mempercepat keausan isolasinya.
3. Jatuhnya tegangan atau komponen arus yang bersangkutan dengan rugi-rugi yang dihasilkan harus diperhitungkan dengan semestinya dalam penampilan mesin.¹

Rugi – rugi total yang terjadi pada generator sinkron terdiri dari rugi – rugi tembaga, rugi besi dan rugi mekanik yang dapat diperhatikan pada gambar diagram dibawah ini :



Gambar 2.17 Diagram rugi-rugi pada generator sinkron³

Dimana tidak semua tenaga mekanik akan menjadi tenaga elektrik keluaran pada generator. Perbedaan antara daya keluaran dan daya masukan diwakilkan oleh rugi-rugi pada generator. Gambar diatas menjelaskan tentang rugi-rugi tersebut. Dimana daya converter dari mekanik ke listrik akan diberikan dengan rumus sebagai berikut :

$$P_{conv} = P_a = 3 \cdot E_0 \cdot I_a \cdot \cos\phi \dots \dots \dots (2.10)^3$$

generator adalah dimana daya converter mewakili rugi-rugi mekanik, rugi inti, dan rugi *Stray* pada generator sinkron yang konstan dan tidak terpengaruh terhadap beban yang ada.

¹ Djoko Achyanto. *Mesin-Mesin Listrik Edisi Keempat*, Jakarta: Erlangga, 1997, hlm.191.

³ Stephen J.Chapman, *Electric Machinery and Power System Fundamentals* 5th ed, 2012, hlm.206.

³ Ibid, 205.



2.8.1 Rugi Listrik

Rugi listrik dikenal juga dengan rugi tembaga yang terdiri dari kumparan armatur, kumparan medan. Rugi – rugi tembaga ditemukan pada semua belitan pada mesin, dihitung berdasarkan pada tahanan dc dari lilitan pada suhu 750°C dan tergantung pada tahanan efektif dari lilitan pada *fluks* dan frekuensi kerjanya.

Rugi kumparan armatur ($P_{ar} = I_a^2 \cdot R_a$) sebesar sekitar 30 sampai 40% dari rugi total pada beban penuh. Sedangkan rugi kumparan medan *shunt* ($P_{sh} = I_{sh}^2 \cdot R_{sh}$) bersama – sama dengan kumparan medan seri ($P_{sr} = I_{sr}^2 \cdot R_{sr}$) sebesar sekitar 20 sampai 30% dari rugi beban penuh.

Sangat berkaitan dengan rugi $I^2 \cdot R$ adalah rugi – rugi kontak sikat pada cincin slip dan komutator, rugi ini biasanya diabaikan pada mesin induksi dan mesin serempak, dan pada mesin dc jenis industri tegangan jatuh pada sikat dianggap tetap sebesar 2V keseluruhannya jika dipergunakan sikat arang dan grafit dengan *shunt*. Rugi-rugi variabel saat beban penuh dapat dituliskan seperti persamaan berikut:

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (2.11)^5$$

Atau:

$$P_{cu \text{ real load}} = \left(\frac{P_{\text{real load}}}{P_{\text{rating}}} \right)^2 \times P_{cu \text{ full load}} \dots\dots\dots (2.12)^5$$

Keterangan:

$P_{cu \text{ full load}}$ = Rugi variabel saat beban penuh (Watt)

$P_{\text{real Load}}$ = Daya saat pembebanan (Watt)

P_{rating} = Daya aktif pada *namplate* generator

2.8.2 Rugi Besi

Rugi besi disebut juga rugi magnetik yang terdiri dari histerisis dan rugi arus pusar atau arus *eddy* yang timbul dari perubahan kerapatan *fluks* pada besi mesin dengan hanya lilitan peneral utama yang diberi tenaga pada generator sinkron rugi ini dialami oleh besi armatur, meskipun pembentukan pulsa *fluks* yang berasal dari mulut celah akan menyebabkan rugi pada besi medan juga, terutama pada sepatu

⁵ Yon Rijono. *Dasar Teknik Tenaga Listrik Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2004, hlm.146.

⁵ Ibid, hlm.143.



kutub atau permukaan besi medan. Rugi ini biasanya data diambil untuk suatu kurva rugi – rugi besi sebagai fungsi dari tegangan armatur disekitar tegangan ukuran. Maka rugi besi dalam keadaan terbebani ditentukan sebagai harga pada suatu tegangan yang besarnya sama dengan tegangan ukuran yang merupakan perbedaan dari jatuhnya tahanan ohm armatur pada saat terbebani.

2.8.3 Rugi Mekanik

Rugi mekanik terdiri dari :

a. Rugi gesek yang terjadi pada pergesekan sikat dan sumbu. Rugi ini dapat diukur dengan menentukan masukan pada mesin yang bekerja pada kecepatan yang semestinya tetapi tidak diberi beban dan tidak diteral.

b. Rugi angin (*wind loss*) atau disebut juga rugi buta (*stray loss*) akibat adanya celah udara antara bagian rotor dan bagian stator. Besar rugi mekanik sekitar 10 sampai 20% dari rugi total pada keadaan tanpa beban.

2.8.4 Arus Rotor (*Field current*)

Rugi-rugi belitan akhir dan belitan terselubung maksimum per satuan volume didapatkan besaran rugi-rugi maksimum tembaga :

$$P_{cu,s} = I_s^2 \times R_s \dots\dots\dots (2.13)^3$$

Dimana :

$P_{cu,s}$ = Rugi-rugi tembaga rotor (watt)

I_s = Arus medan maksimum (ampere)

R_s = Resistansi belitan medan (ohm)

2.8.5 Arus Stator (*Armature current*)

Oleh karena pemanasan rotor sama dengan pemanasan stator maka persamaan pembatasnya pun mempunyai bentuk yang sama yaitu :

$$P_{cu,r} = 3 \cdot I_a^2 \times R_a \dots\dots\dots (2.14)^3$$

Dan tegangan tembaga per *phase* untuk generator adalah :

$$VT = \frac{VL}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.15)^5$$

³ Stephen J.Chapman, Electric Manhinery and Power System Fundamentals 5th ed, 2012, hlm.455.

⁵ Yon Rijono. *Dasar Teknik Tenaga Listrik Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2004, hlm.249.



Dimana :

$P_{cu,r}$ = Rugi-rugi belitan maksimum belitan armatur (watt)

I_a = Arus armatur maksimum (ampere)

I_L = Arus pada tembaga/ *line* (ampere)

R_a = Resistansi belitan armatur (ohm)

2.9 Efisiensi Generator

Pada umumnya yang disebut dengan efisiensi generator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Seperti halnya dengan mesin-mesin listrik lainnya, maupun transformator, maka efisiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti Persamaan berikut :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.16)^7$$

Atau,

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Sigma R_{ugi-rugi}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.17)^7$$

Dimana,

$$\Sigma R_{ugi-rugi} = (\text{Rugi variabel} + \text{Rugi konstan}) \dots\dots\dots (2.18)^7$$

Menentukan efisiensi maksimum:

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{V_t \times I_L}{V_t \times I_a + I_a^2 \times R_a + P_c} \dots\dots\dots (2.19)^5$$

Atau,

$$P_{saat maks} = P_{rating} \times \sqrt{\frac{P_{konstan}}{P_{cu full load}}} \dots\dots\dots (2.20)^5$$

Keterangan :

P_{Out} = Daya keluaran generator (MW)

P_{In} = Daya masukan generator (MW)

Σ rugi-rugi = Total Rugi-rugi daya (MW)

Rugi variabel = Rugi Tembaga = Rugi listrik ($3 \cdot I_a^2 \times R_a$)

Rugi konstan = Rugi konversi = Rugi besi = Rugi Mekanik

Rugi konstan = $P_{conv} / P_a = 3 \cdot E_0 \cdot I_a$

⁷Zuhal. Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya, Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama,1995,hlm.55.

⁵ Yon Rijono. *Dasar Teknik Tenaga Listrik Edisi Revisi*, Yogyakarta: ANDI, 2004, hlm.146.