

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan judul tugas akhir yang diangkat, terdapat beberapa referensi yang memiliki topik serupa yang telah diteliti sebelumnya. Referensi-referensi tersebut akan menjadi acuan dan sebagai bahan pertimbangan masalah-masalah yang nanti akan muncul. Adapun referensi-referensi tersebut adalah :

1. Menurut Wahyu Sunarlik Tahun 2013 tentang *Prinsip Kerja Generator Sinkron* “Generator merupakan mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Tenaga mekanik tersebut dapat bersumber dari panas, uap, air, dll. Energi listrik yang dihasilkan dapat berupa listrik AC maupun listrik DC”.
2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Irnanda Priyadi Tahun 2012 yang berjudul *Analisi Pengaruh Eksitasi Terhadap Efek Harmonisa Pada Hubungan Belitan Generator Sinkron Dengan Beban LHE* mengatakan bahwa “Konstruksi dari generator sinkron secara garis besar terdiri atas: penguatan DC, rotor dan stator.”
3. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh R. Gerha Terimanda, Nasrun Hariyanto, Syahrial Tahun 2016 yang berjudul *Studi Pengaturan Arus Eksitasi untuk Mengatur Tegangan Keluaran Generator di PT Indonesia Power UBP Kamojang Unit 2* mengatakan “Nilai tegangan terminal yang ada pada generator bergantung dari nilai pembebanan, semakin besar nilai pembebanan yang ada maka akan semakin kecil tegangan terminal pada generator, begiu sebaliknya bila tegangan pembebanan kecil maka tegangan terminal pada generator akan besar”.
4. Menurut Jerkovic, et.al. tahun 2010 tentang *Excitation System Models Of Synchronous Generator* “Eksitasi adalah bagian dari sistem generator yang

berfungsi untuk membentuk atau menghasilkan fluksi yang berubah terhadap waktu, sehingga dihasilkan suatu GGL induksi”.

5. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Imron Ridzki Tahun 2013 yang berjudul *Analisis Pengaruh Perubahan Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator* mengatakan “Pada generator terdapat hubungan antara tegangan terminal (V_t) dengan daya reaktif (Q). Ketika muatan lambat ditambahkan pada generator sinkron, maka mengakibatkan tegangan terminalnya akan turun. Sebaliknya, apabila muatan utama ditambahkan pada generator sinkron maka akan membuat tegangan terminal yang ada naik”.
6. Menurut Aditya Kurniawan Tahun 2015 tentang *Analisis Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Pembebanan Di PLTA Cirata Unit 2* “Tegangan terminal dan arus eksitasi yang ada berkaitan dengan pembebanan. Seperti yang diketahui bahwa apabila nilai dari pembebanan naik maka tegangan jaringan serta tegangan terminal akan turun. Karena itu perlu dilakukan penambahan dari arus eksitasi yang bertujuan untuk menjaga tegangan terminal pada generator tetap dalam keadaan nominalnya”.
7. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Dwi Septian Tahun 2017 tentang *Studi Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron Di Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Musi Bengkulu* menjelaskan bahwa “Arus jangkar sebanding dengan arus eksitasi. Pada saat kondisi tegangan terminal pada generator sedang turun maka dibutuhkan injeksi arus eksitasi pada generator. Kondisi injeksi arus eksitasi tersebut berarti naiknya nilai arus eksitasi yang mengakibatkan nilai dari arus jangkar juga akan naik”.
8. Menurut Sepannur Bandri Tahun 2013 tentang *Analisa Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron* “Generator dapat menghasilkan energi listrik tergantung dari besar nilai arus eksitasinya. Sistem eksitasi yang baik dapat menjaga dan mempertahankan sistem dari gangguan serta dapat meningkatkan kestabilan.”

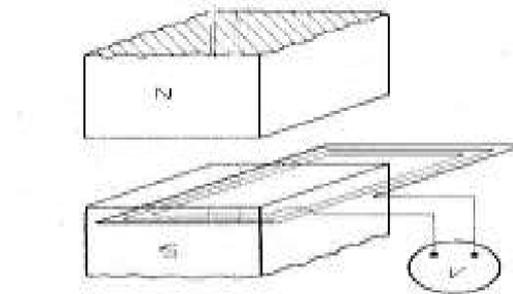
9. Menurut Basofi, Ir.Syamsul Amin Tahun 2014 tentang *Studi Pengaruh Arus Eksitasi Pada Generator Sinkron Yang Bekerja Pararel Terhadap Perubahan Faktor Daya* “Apabila arus eksitasi diubah maka tidak akan mengubah faktor daya yang ada tetapi akan mengubah tegangan, berbeda dengan generator yang bekerja secara paralel, apabila arus eksitasi diubah maka akan mengubah faktor daya dan tegangan akan tetap.”.
10. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Feliks A. Tiantoro tentang *Analisis Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron Tiga Fasa 67 MVA Di PT Indonesia Power PLTA Panglima Besar Soediran Unit Bisnis Pembangkit Mica Banjarnegara* menjelaskan bahwa “ Daya reaktif yang akan disalurkan ke generator sebanding dengan arus eksitasi. Apabila nilai arus eksitasi naik maka akan membuat nilai daya reaktif yang disalurkan akan naik, sebaliknya apabila nilai dari arus eksitasi turun atau sedikit maka akan membuat nilai dari daya reaktif akan turun.”

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian Generator

Generator arus bolak-balik memiliki nama lain yang biasa disebut dengan alternator ataupun generator sinkron, dimana generator ini memiliki peranan yang penting dalam proses mengubah energi menjadi bentuk energi yang bermanfaat.

Generator sinkron merupakan suatu mesin listrik yang memiliki fungsi untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik (Armansyah,2016). Generator bekerja berdasarkan hukum faraday yang secara garis besar menyatakan besar dari gaya listrik yang diinduksikan akan berbanding lurus dengan nilai laju perubahan jumlah dari garis gaya yang melalui kumparan.



Gambar 2.1 GGL yang diinduksikan setiap lilitan kumparan

(Armansyah, 2016)

Kecepatan putaran rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar memiliki kecepatan yang sama dengan medan putar stator, hal menjadi sumber dari kecepatan sinkron pada generator itu sendiri. Rotor generator terdiri dari belitan medan yang disuplai oleh arus searah dan akan menghasilkan medan magnet yang memiliki kecepatan serta arah putar yang sama dengan putaran dari rotor tersebut. Hubungan antara medan magnet mesin dengan frekuensi listrik generator dapat dijelaskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$f = \frac{n.p}{120} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana: f = Frekuensi listrik (Hz)

n = Kecepatan putar rotor atau kecepatan putar medan magnet (rpm)

p = Jumlah kutub

Generator sinkron itu sendiri sering dijumpai di pusat pembangkitan listrik misalnya pada PLTU, PLTA, PLTG, dll. Sering juga dijumpai generator yang memiliki kapasitas kecil , misalnya generator yang digunakan dalam keadaan darurat untuk penerangan yang disebut Generator Set atau generator cadangan.

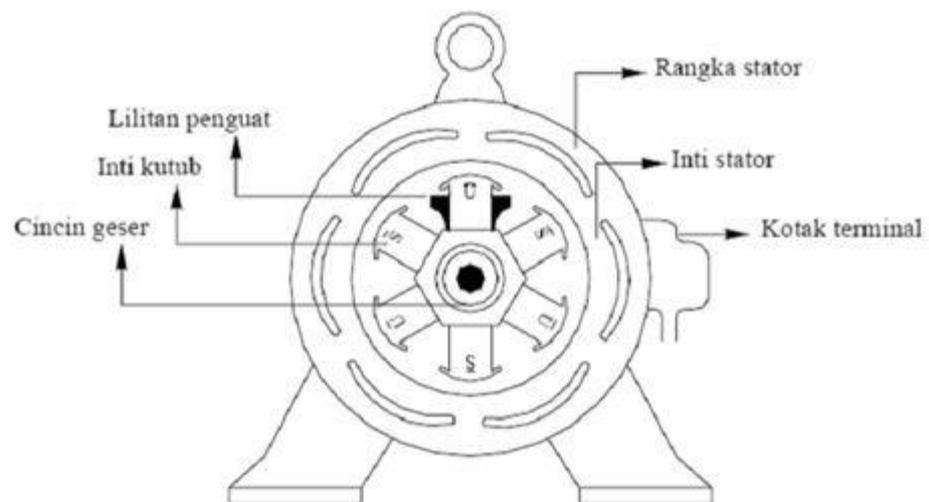
2.2.2 Komponen Generator Sinkron

Generator sinkron memiliki fungsi menghasilkan energi listrik dengan cara mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik bersumber dari penggerak awal yang memutar rotor, sedangkan energi listrik itu sendiri bersumber dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan-kumparan stator (Feliks, 2009).

Struktur kumparan pada generator sinkron ada dua yaitu kumparan yang berfungsi untuk mengalirkan penguatan DC serta kumparan jangkar yang berfungsi sebagai tempat dibangkitkannya GGL arus bolak-balik.

Secara garis besar bagian-bagian generator sinkron itu terdiri dari :

1. Stator merupakan bagian diam dari generator.
2. Rotor merupakan bagian dari generator yang bergerak.
3. Celah udara merupakan ruang yang berada diantara stator dan rotor.

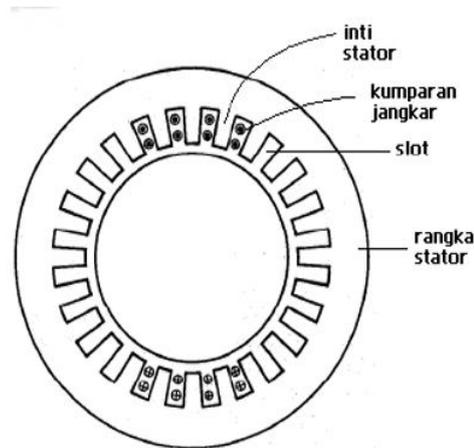


Gambar 2.2 Konstruksi Generator Sinkron

(Wahyu, 2013)

1. Stator

Stator merupakan bagian yang diam atau tidak bergerak pada generator. yang di dalamnya terdapat belitan jangkar (*Armature Wending*) (Wahyu, 2013).



Gambar 2.3 Penampang Stator
(Ridzki, 2013)

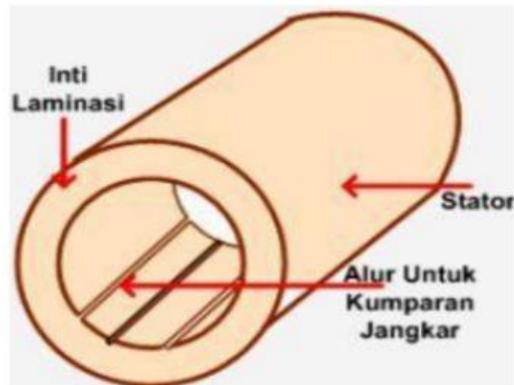
Komponen dari stator terdiri dari rangka stator, inti stator, alur (gigi) dan gigi, kumparan stator (kumparan Jangkar).

a. Rangka Stator

Rangka stator memiliki sebagai rumah kerangka, yaitu sebagai penyangga atau tempat melekatnya inti jangkar pada generator. Pada rangka stator ini terdapat lubang yang berfungsi sebagai pendingin yang berasal dari udara serta gas yang disirkulasikan. Rangka stator ini biasanya terbuat dari plat baja yang dibentuk sedemikian rupa sehingga memiliki bentuk yang sesuai dengan kebutuhan.

b. Inti Stator

Inti stator terbuat dari besi magnetic khusus yang melekat pada rangka stator. Tiap laminasi yang ada diberi isolasi serta diantara laminasi-laminasi tersebut di bentuk celah yang berfungsi sebagai tempat aliran udara. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk memperkecil kemungkinan atau nilai dari rugi arus *eddy*.

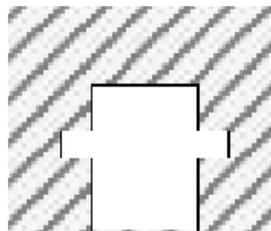


Gambar 2.4 Inti Stator

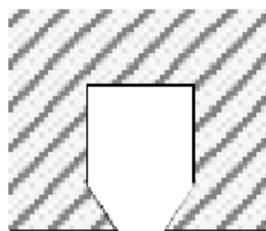
(Wahyu, 2013)

c. Alur (slot) dan Gigi

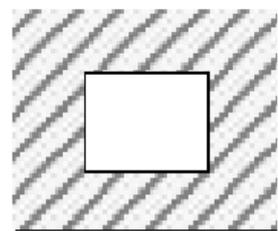
Slot merupakan tempat dilteakkannya konduktor atau kumparan stator dimana letaknya berada pada bagian dalam di sepanjang keliling stator. Bentuk dari slot ini terdapat 3 jenis, yaitu *slot* terbuka, *slot* setengah terbuka, dan *slot* tertutup.



terbuka



setengah terbuka



tertutup

Gambar 2.5 Bentuk-Bentuk Slot

(Ennopati, 2009)

d. Kumpanan Stator

Kumpanan stator atau kumpanan jangkar merupakan tempat timbulnya GGL induksi. Kumpanan stator ini biasanya terbuat dari jangkar

2. Rotor

Rotor merupakan elemen yang berputar pada generator, dimana pada rotor terdapat kutub-kutub magnet yang terbentuk akibat adanya medan eksitasi yang dialirkan pada belitan-belitan rotor tersebut. Pada rotor terdapat 3 komponen utama yaitu *slip ring*, kumparan rotor (kumparan medan), dan poros rotor.

a. Slip Ring

Slip ring atau cincin geser biasanya terbuat dari kuningan ataupun dari tembaga, dimana *slip ring* tersenut dipasang melingkar pada poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal rotor dipasangkan ke *slip ring* kemudian di hubungkan ke sumber arus searah melalui *brush* yang letaknya terhubung pada *slip ring*. *Slip ring* ini kemudian akan berputar bersama-sama dengan poros dan rotor.

b. Kumparan Rotor (Kumparan Medan)

Kumparan rotor atau kumparan medan ini merupakan kumparan yang mendapatkan arus searah yang berasal dari sistem eksitasi tertentu. kumparan rotor ini memiliki peranan penting dalam menghasilkan medan magnet.

c. Poros Rotor

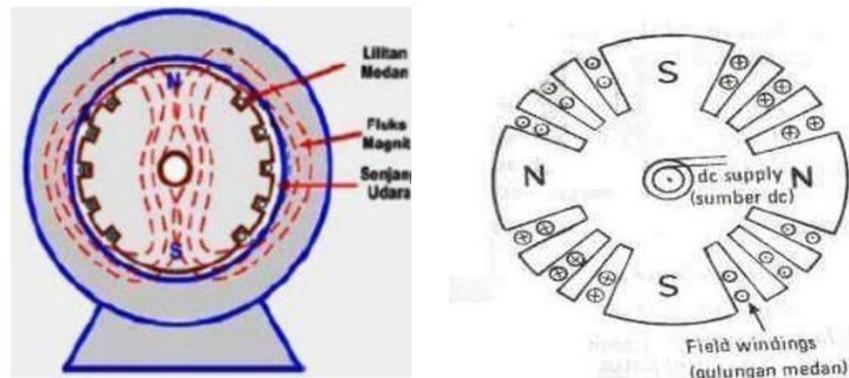
Poros rotor merupakan tempat yang memiliki fungsi untuk meleakkan kumparan medan, dimana poros rotor tersebut telah membentuk slot-slot yang secara paralel terhadap poros rotor.

Untuk medan motor sendiri tergantung dari kecepatan mesin yang di gunakan. Kutub medan magnet yang digunakan ada 2 yaitu dapat berupa salient pole (kutub menonjol) dan dapat pula non salient pole (kutub silinder) (Sepannur, 2013).

a. Kutub Silinder (Non Salient Pole)

Jenis kutub silinder ini terbuat dari baja yang berbentuk silinder serta memiliki jalur-jalur yang terdapat pada sisi luarnya. Alir-alaur tersebut memiliki fungsi untuk menjadi tempat pemasangan belitan-belitan medan dan dihubung

seri dengan slip yang terhubung dengan sistem eksitasi. Kutub silinder memiliki konstruksi dimana kutub magnet rata dengan permukaan rotor.



Gambar 2.6 Rotor Kutub Silinder (Non Salient Pole)

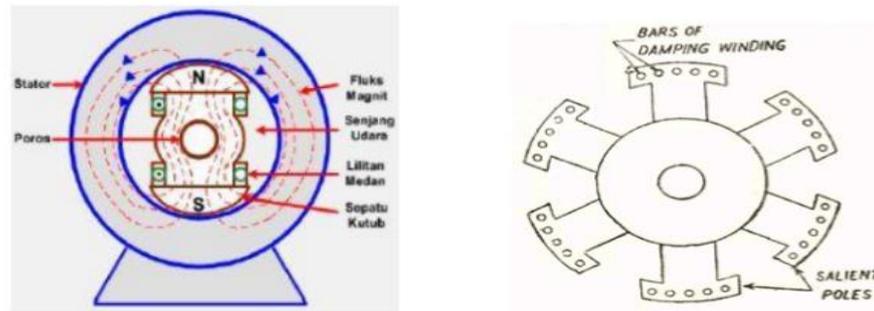
(Feliks, 2009)

Rotor jenis silinder ini baik digunakan pada kecepatan tinggi (1500-3000 rpm), karena:

- Memiliki konstruksi mekanik yang baik serta beroperasi baik dengan kecepatan tinggi.
- Bentuk gelombang yang dihasilkan saat kondisi distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk sinus.

b. Kutub Menonjol (Salient Pole)

Rotor kutub menonjol atau salient pole ini memiliki jumlah yang banyak serta putaran yang rendah serta belitan-belitan yang ada terhubung seri. Pada jenis rotor ini memiliki kutub magnet yang terlihat menonjol keluar dari permukaan rotor. Rotor tipe kutub menonjol ditandai dengan ukuran rotor yang besar serta memiliki panjang sumbu yang pendek. Apabila belitan medan diberi arus eksitasi, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub yang saling berlawanan. Bentuk dari rotor jenis kutub menonjol ini dapat dilihat dari gambar berikut :



Gambar 2.7 Rotor Kutub Menonjol (Salient Pole)

(Feliks, 2009)

Rotor jenis kutub menonjol ini baik digunakan untuk putaran rendah ataupun putaran sedang (120-400 rpm), karena :

- Rotor jenis kutub menonjol tidak dapat menahan tekanan mekanis yang dihasilkan apabila rotor diputar dengan kecepatan tinggi karena konstruksinya yang tidak cukup kuat.
- Pada saat rotor jenis kutub menonjol ini diputar dengan kecepatan tinggi maka akan menghasilkan rugi-rugi angin yang besar serta akan bersuara bising.

2.2.3 Prinsip kerja Generator Sinkron

Generator merupakan mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengkonversi energi mekanik hingga menjadi energi listrik. Suatu mesin itu sendiri dapat bekerja apabila memiliki kumparan medan yang akan menghasilkan medan magnet, kumparan jangkar yang berfungsi untuk menyalurkan GGL pada konduktor yang berada pada jalur-jalur jangkar, serta memiliki celah udara yang memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet (Irnan, 2012).

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

1. Sumber eksitasi yang telah dihubungkan pada rotor akan mensuplai arus searah ke kumparan medan. Arus searah yang mengalir pada medan kumparan tersebut akan menimbulkan yang nilainya tetap terhadap waktu.
2. Penggerak mula (*prime mover*) yang terkopel dengan rotor dioperasikan sehingga membuat rotor tersebut berputar dengan kecepatan yang diinginkan.
3. Rotor yang berputar tersebut akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Kumparan jangkar akan diinduksikan oleh medan putar dari rotor sehingga pada kumparan jangkar yang berada pada stator akan menghasilkan fluks magnetik yang besarnya akan berubah-ubah terhadap waktu. Perubahan fluks magnetik yang terjadi akan menimbulkan GGL induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut, hal ini sesuai dengan persamaan berikut :

$$E_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$$E = -N \frac{d\phi_{maks} \sin \omega t}{dt} \quad (\omega = 2\pi f)$$

$$= -N\omega\phi_{maks} \cos \omega t$$

$$= -N(2\pi f)\phi_{maks} \cos \omega t \quad (f = \frac{np}{120})$$

$$= -N(2\pi \frac{np}{120})\phi_{maks} \cos \omega t$$

$$= -N(2 \times 3.14 \frac{np}{120})\phi_{maks} \cos \omega t$$

$$E_{maks} = N(2 \times 3.14 \frac{np}{120}) \phi_{maks}$$

$$E_{eff} = \frac{e_{maks}}{\sqrt{2}} = \frac{N(2 \times 3.14 \frac{np}{120})\phi_{maks}}{\sqrt{2}} = \frac{4.44Npn\phi}{120} \quad (\frac{4.44Np}{120} = C)$$

$$E_{eff} = Cn\phi \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan : E = Gaya gerak listrik (volt)

C = Konstanta

N = Jumlah lilitan

ϕ = Fluks magnetik (Weber)

n = Nilai putaran sinkron (rpm)

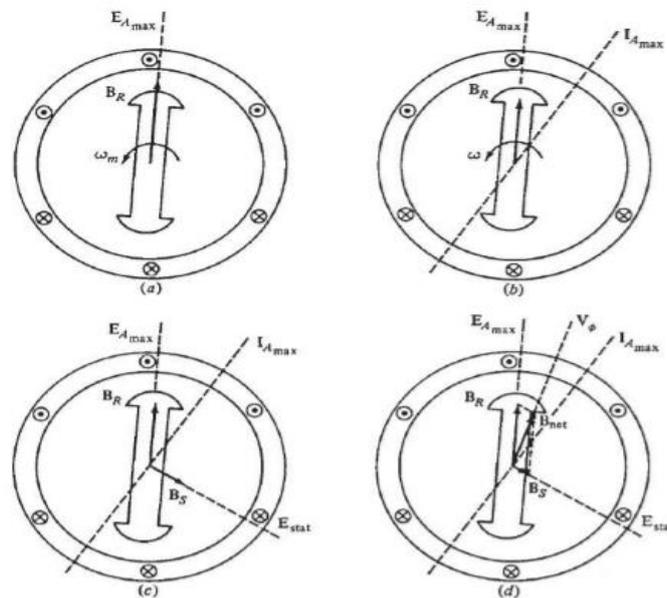
Generator sinkron tiga fasa digunakan tiga buah kumparan yang posisinya tersebut diletakkan pada stator dan disusun dengan bentuk tertentu, sehingga ketiga kumparan jangkar ini dapat menghasilkan tegangan induksi dengan nilai yang sama tetapi tiap kumparan memiliki beda fasa sebesar 120^0 (Dwi, 2017).

Generator memiliki beberapa syarat agar dapat dilakukan penyinkronan yaitu tegangan pada kedua generator sama, frekuensi yang dimiliki kedua generator juga sama, serta memiliki urutan dan sudut fase yang sama (Basofi, 2014)

2.2.4 Reaksi Jangkar pada Generator Sinkron

Reaksi jangkar adalah kondisi dimana arus mengalir pada jangkar yang berada pada medan magnet (Aditya, 2015).

Pada celah udara generator hanya akan terjadi arus medan rotor apabila generator sinkron yang ada bekerja pada beban nol sehingga tidak ada arus yang mengalir dan melalui kumparan jangkar (stator). Saat kondisi generator sinkron diberi beban maka yang terjadi adalah arus jangkar (I_a) akan mengalir dan membentuk fluks jangkar. Fluks inilah yang akan mengubah nilai terminal pada generator sinkron karena mempengaruhi fluksi arus medan yang ada. Reaksi jangkar ini dapat dilihat dari gambar berikut :



Gambar 2.8 Model Reaksi Jangkar

(Wahyu, 2013)

Gambar diatas terlihat bahwa :

1. Saat medan magnet yang ada berputar maka akan menghasilkan suatu nilai berupa E_{Amax} .
2. Saat generator berbeban induktif maka arus lagging akan dihasilkan oleh tegangan resultan.
3. Arus stator yang ada akan menghasilkan tegangan stator berupa E_{stat} pada belitan stator serta menghasilkan medan magnetnya sendiri berupa B_S .
4. Bagian output terdapat B_{net} akan dihasilkan dari penjumlahan vektor B_S dan B_r serta V_f akan dihasilkan dari penjumlahan faktor antara E_{stat} dengan E_{Amax} .

Tegangan induksi E_a akan dibangkitkan pada pada belitan stator generator saat generator diputar. Bila beban dihubungkan ke terminal generator maka akan ada arus jangkar (I_a) yang mengalir pada belitan stator (Wahyu, 2013).

Tegangan fasa pada medan magnet rotor akan berubah karena pengaruh dari medan magnet stator (arus jangkar). Karena itu medan magnet pada rotor

harus diperbesar untuk mendapatkan tegangan terminal yang konstan dengan cara meningkatkan arus medan I_f .

Reaktansi generator bergantung dari jenis beban yang terpasang pada generator atau reaktansi generator tersebut bergantung dari sudut fase antara arus jangkar dengan tegangan induksi yang ada (Aditya, 2015).

Arus jangkar akan mengalir dan menimbulkan reaksi jangkar yang bersifat reaktif saat kondisi generator berbeban. Reaktansi ini disebut dengan reaktansi pemagnetan yang bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor disebut sebagai reaktansi sinkron.

Pengaruh yang dapat ditimbulkan oleh fluks jangkar dapat berupa distorsi, penguatan (*magnetising*), maupun pelemahan (*demagnetising*) fluksi arus medan pada celah udara (Sepannur, 2013).

Perbedaan pengaruh oleh arus jangkar bergantung dari jenis beban yang terpasang dan faktor dayanya, yaitu:

1. Beban resistif ($\cos\phi = 1$)

Pada beban resistif ini fluksi jangkar mempengaruhi fluksi medan yang ada hanya sebatas dari medistorsinya saja tanpa mempengaruhi penguatannya (*cross magnetising*).

2. Beban kapasitif murni ($\cos\phi = 0 \text{ lead}$)

Pada beban jenis kapasitif murni ini akan terjadi penguatan (*magnetising*). Hal ini terjadi dikarenakan fluks yang di hasilkan oleh arus jangkar akan searah dengan dengan fluksi medan. Artinya arus jangkar akan menguatkan fluksi medan dimana arus yang ada akan mendahului tegangan sebesar 90° .

3. Beban tidak murni (induktif/kapasitif)

Pada beban jenis ini reaksi jangkar akan menjadi sebagian penguatan (*magnetising*) dan sebagian pelemahan (*demagnetising*). Saat beban kapasitif maka reaksi jangkar akan sebagian *distorsi* dan sebagian *magnetising*. Apabila kondisi beban induktif maka reaksi jangkar yang ada akan sebagian *distorsi* dan sebagian *demagnetising*.

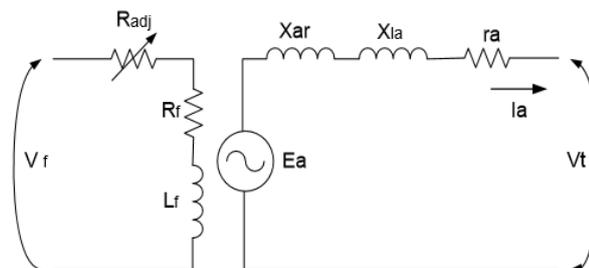
4. Beban induktif murni ($\cos\varphi = 0 \text{ lag}$)

Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar pada beban induktif murni akan melawan fluksi medan. Hal ini akan reaksi jangkar akan melemahkan fluksi arus medan (*demagnetising effect*).

2.2.5 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

Stator terdiri dari belitan konduktor yang berupa tahanan (R_a) dan induktansi (L), dimana saat motor bekerja maka fluks jangkar (Φ_a) akan terbentuk ketika arus mengalir pada konduktor dan akan membangkitkan medan putar, fluks jangkar(Φ_a) ini akan berinteraksi dengan fluks medan (Φ_m) sehingga konversi energi mekanik menjadi energi listrik terjadi. Pada kondisi ini akan ada fluks sisa yang tidak dapat berinteraksi dengan fluks medan yang disebut dengan reaktansi bocor (X_A) (Ramdhani, 2008).

Rangkaian ekivalen dari suatu generator per fasa dapat dilihat dari gambar berikut :



Gambar 2.9 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

(Ramdhani, 2008)

Keterangan : V = Tegangan terminal generator (Volt)

V_f = Tegangan eksitasi (Volt)

R_f = Tahanan belitan eksitasi (Ohm)

L_f = Induksi belitan medan (H)

X_{ar} = Reaktansi reaksi jangkar (Ohm)

X_{la} = Reaktansi bocor belitan jangkar (Ohm)

I_a = Arus jangkar (Ampere)

E = Tegangan induksi (Volt)

R_{adj} = Tahanan Variabel (Ohm)

r_a = Tahanan jangkar (Ohm)

Berdasarkan gambar didapatkan persamaan untuk mencari nilai dari tegangan induksi (E) serta nilai dari tegangan terminal (V) pada generator, sebagai berikut :

$$E = V + jX_{ar}I_a + jX_{la}I_a + r_aI_a \dots\dots\dots(2.3)$$

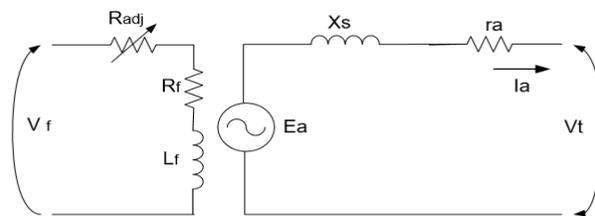
$$V = E - jX_{ar}I_a - jX_{la}I_a - r_aI_a \dots\dots\dots(2.4)$$

Berdasarkan teori sebelumnya yang menyatakan bahwa reaktansi fluks bocor serta reaktansi jangkar dianggap sebagai reaktansi sinkron atau dengan kata lain $X_s = X_{ar} + X_{la}$, maka dengan itu diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$E = V + jX_s I_a + r_a I_a \dots\dots\dots(2.5)$$

$$V = E - jX_s I_a - r_a I_a \dots\dots\dots(2.6)$$

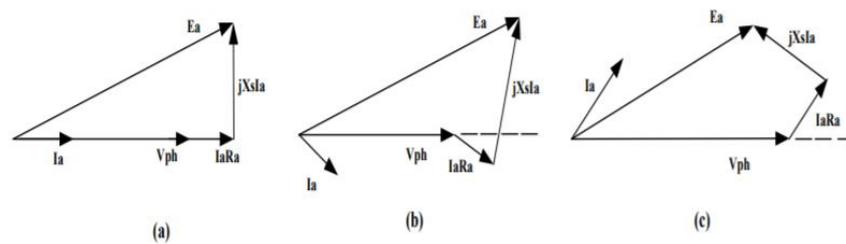
Dari persamaan yang diperoleh tersebut maka gambar dari rangkaian ekuivalen generator dapat disederhanakan sebagai berikut :



Gambar 2.10 Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

(Ramdhani, 2008)

Pada penjelasan sebelumnya secara garis besar dapat ditarik kesimpulan bahwa sifat umum dari generator atau alternator ini berdasarkan sifat beban yang dipikulnya. Arus yang ada dapat bersifat sefasa, mendahului ataupun tertinggal dari tegangan. Berikut adalah diagram fasor pada generator untuk lebih menjelaskan teori tersebut:



Gambar 2.11 Hubungan Berbagai Jenis Beban pada Generator Terhadap Arus dan Tegangan

(Ridzki, 2013)

Keterangan : (a) Beban resistif (sefasa)

(b) Beban induktif (terbelakang)

(c) Beban kapasitif (mendahului)

Gambar 2.12 menunjukkan bahwa pada saat generator melayani beban yang bersifat induktif tegangan induksi (E) yang dibutuhkan lebih besar dibandingkan dengan jenis beban lainnya dimana kondisi arus jangkar serta tegangan terminal sama. Karena itu jenis beban induktif ini membutuhkan arus medan dengan nilai yang besar untuk menghasilkan tegangan terminal yang sama. Hal ini sesuai persamaan berikut :

$$E = Cn\phi \dots \dots \dots (2.7)$$

Kondisi dari n ini dijaga konstan agar menghasilkan nilai frekuensi yang sama.

2.2.6 Sistem Eksitasi pada Generator Sinkron

Sistem eksitasi merupakan suatu sistem penguatan yang terdapat pada generator, dengan cara memberikan arus penguat pada kumparan medan generator yang muncul karena adanya medan magnet yang disebabkan oleh bantuan arus searah.

Arus eksitasi sendiri adalah suatu arus yang yang diberikan pada kutub magnetik, dengan mengatur besar kecil dari nilai arus eksitasi tersebut maka dapat memperoleh nilai tegangan output generator yang diinginkan serta daya reaktifnya (Basofi, 2014).

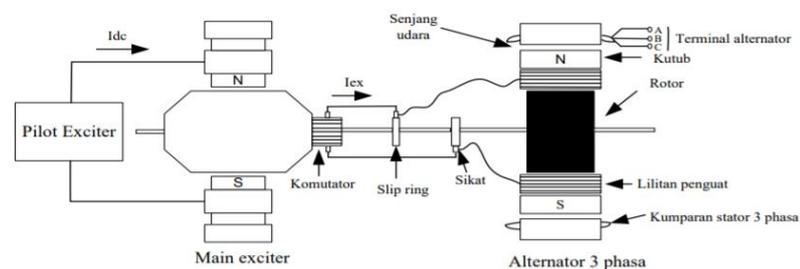
Sistem eksitasi sendiri dibagi menjadi dua tipe yaitu sistem eksitasi dengan *brush* dan tanpa *brush* (*brushless excitation*).

1. Sistem eksitasi dengan *brush*

Sistem eksitasi dengan *brush* ini sendiri terbagi menjadi 2 tipe yaitu sistem eksitasi dinamik dan sistem eksitasi statis.

a. Sistem eksitasi dinamik

Sistem eksitasi dinamik merupakan sistem eksitasi yang arus eksitasinya disuplai oleh mesin eksiter (mesin penggerak). Pada sistem eksitasi ini dapat menggunakan generator DC ataupun generator AC tetapi terlebih dahulu disearahkan oleh *rectifier* karena arus yang digunakan pada sistem eksitasi merupakan arus searah. Arus tersebut akan disalurkan ke slipring kemudian disalurkan ke medan penguat generator kedua.



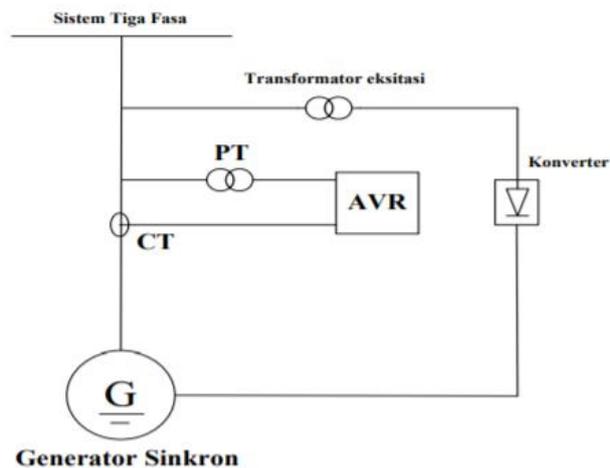
Gambar 2.12 Sistem Eksitasi Dinamik

(Basofi, 2014)

b. Sistem eksitasi statis

Sistem eksitasi statis ini juga disebut sebagai *self excitation* karena sistem eksitasi ini disuplai dari generator sinkron itu sendiri tetapi perlu disearahkan oleh *rectifier* terlebih dahulu.

Pada rotor terdapat sedikit medan magnet yang tersisa dan akan menimbulkan tegangan pada stator. Tegangan tersebut selanjutnya akan dimasukkan kembali ke rotor dimana sebelumnya telah disearahkan oleh *rectifier*, akibatnya medan magnet yang dihasilkan semakin besar dan membuat tegangan terminal yang ada ikut naik.

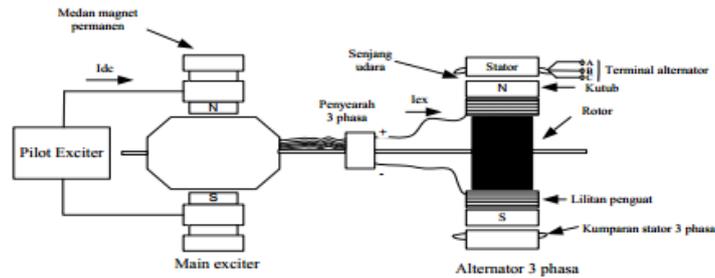


Gambar 2.13 Sistem Eksitasi Statis

(Iranan, 2012)

2. Sistem eksitasi tanpa *brush*

Sistem eksitasi ini mengutamakan kinerja dari *pilot exciter* serta sistem yang akan menyalurkan arus eksitasi pada generator utama. *Pilot exciter* terdiri dari generator arus bolak-balik yang memiliki kumparan tiga fasa pada stator serta medan magnet yang terpasang pada poros rotor. Berikut gambar diagram prinsip kerja pada eksitasi system tanpa *brush* :



Gambar 2.14 Sistem eksitasi tanpa brush

(Ridzki, 2013)

2.2.7 Efek Pengaturan Eksitasi pada Generator Sinkron

Sistem eksitasi yang diubah-ubah maka akan mempengaruhi nilai dari fluks magnetic (ϕ) seiring dengan naiknya nilai dari arus eksitasi tersebut. Hal ini diperjelas dalam persamaan berikut :

$$E = Cn\phi \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan : E = Tegangan induksi (Volt)

ϕ = Fluks magnetic (Weber)

n = Putaran (rpm)

Arus eksitasi yang diatur pada generator yang bekerja secara paralel dimana kondisi dari putaran (n) tetap maka nilai dari fluks magnetik akan naik serta daya reaktif yang dibutuhkan juga akan mengalami kenaikan namun nilai dari daya aktif yang tidak akan berubah sehingga akan mempengaruhi nilai dari factor daya.

Generator yang bekerja paralel (G1 dan G2) akan memasok masing-masing setengah beban dari daya reaktif, jadi tiap generator akan memasok arus sebesar nilai I jadi arus yang harus dipasok pada sistem generator yang bekerja secara paralel adalah senilai $2I$.

Pada generator yang bekerja paralel dan salah satu penguatan generator dinaikkan (misalnya G1), maka akan terjadi kenaikan nilai dari tegangan induksi generator 1 (E_1) yang membuat $E_1 > E_2$ hal ini akan mengakibatkan

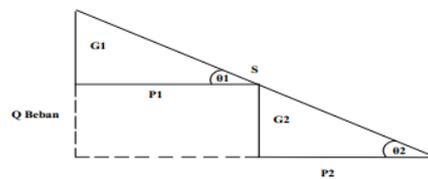
adanya arus sirkulasi (I_s). Arus sirkulasi tersebut memiliki persamaan sebagai berikut :

$$I_s = \frac{E_1 - E_2}{Z_1 + Z_2} \dots \dots \dots (2.9)$$

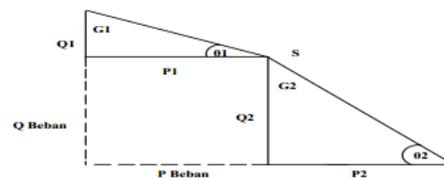
Keterangan : I_s = Arus sirkulasi

E_{12} = Tegangan induksi generator 1 dan 2

Z_{12} = Impedansi generator 1 dan 2



a) Gambar 1

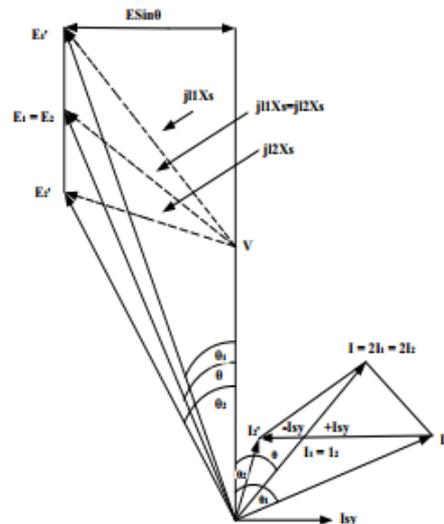


b) Gambar 2

Gambar 2.15 Efek perubahan tegangan terhadap segitiga daya pada generator yang bekerja paralel (Basofi, 2014)

Gambar 1 terlihat kondisi dimana beban yang dilayani oleh generator 1 dan generator 2 (G_1 dan G_2) nilainya sama sehingga menghasilkan segitiga daya yang sama karena pada generator G_1 dan G_2 beban daya aktif dan daya reaktif terbagi rata. Tetapi pada gambar 2 terlihat kondisi dimana penguatan pada G_1 dinaikkan tetapi penguatan pada G_2 tetap, maka akan mengakibatkan pembagian beban daya reaktif tidak rata dan berpengaruh pada nilai factor daya masing-masing generator yang bekerja (G_1 dan G_2).

Pengaruh perubahan eksitasi pada generator dapat lebih jelas dengan bantuan diagram fasor berikut :



Gambar 2.16 Diagram fasor pengaruh pengubahan sistem penguatan (Sepannur, 2013)

Diagram fasor diatas menunjukkan generator yang bekerja secara paralel. Terlihat tegangan induksi E_1 mengalami kenaikan hingga menjadi E_1' hal ini terjadi karena generator 1 (G_1) mengalami kenaikan arus penguatan, dimana kenaikan ini bertujuan untuk meningkatkan tegangan terminal (V). Generator 2 juga mengalami perubahan tetapi perubahan tersebut merupakan penurunan E_2 menjadi E_2' hal ini bertujuan untuk mendapatkan tegangan terminal (V) yang konstan. Perbedaan dari E_1' dan E_2' ini akan menghasilkan arus sirkulasi (I_s) dan arus sirkulasi ini harus ditambahkan pad I_1 tetapi harus dikurangkan dengan I_2 , hal ini akan memperoleh nilai arus jangkar baru berupa I_1' dan I_2' .

2.2.8 Daya

Daya dalam sistem tenaga listrik merupakan jumlah energi listrik yang digunakan dalam suatu usaha, dan daya tersebut merupakan nilai suatu perkalian antara tegangan dengan arus yang mengalir (Wahyu, 2013).

Secara sistematis sesuai dengan persamaan berikut :

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan : P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Pada sistem penggunaan arus bolak-balik (AC) 3 fasa, terdapat 4 jenis daya, yaitu daya reaktif (*reactive power*), daya semu/tampak (*apparent power*), daya aktif (*active power*), dan daya kompleks.

1. Daya reaktif (*reactive power*)

Daya reaktif merupakan suatu daya rugi-rugi dengan kata lain merupakan suatu yang tidak diinginkan dan semaksimal mungkin dapat dihindari. Daya ini bersumber dari komponen reaktif dan memiliki satuan VAR.

Dalam perhitungan fasa, daya reaktif ini merupakan perkalian antara tegangan efektif dengan arus efektif serta nilai $\sin \theta$.

Berikut persamaan sistematis pada daya reaktif :

$$Q = V_{eff} \times I_{eff} \times \sin\theta \text{ (untuk 1 fasa)} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$Q = \sqrt{3} \times V_{eff} \times I_{eff} \times \sin\theta \text{ (untuk 3 fasa)} \dots\dots\dots(2.12)$$

2. Daya semu/tampak (*apparent power*)

Daya semu merupakan suatu daya nyata, dengan kata lain daya semu ini adalah daya yang sebenarnya dihasilkan oleh generator.

Daya semu merupakan penjumlahan antara daya aktif dengan daya reakti. Daya semu ini memiliki persamaan yaitu VA

Berikut adalah persamaan sistematis pada daya semu/tampak (*apparent power*):

$$S = V_{eff} \times I_{eff} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots \dots \dots (2.14)$$

3. Daya aktif (*active power*)

Daya aktif adalah daya yang digunakan untuk energi sebenarnya dengan kata lain daya ini merupakan daya yang terpakai atau terserap. Daya aktif ini merupakan daya yang tercatat pada kwh meter yang terdapat di rumah-rumah dan daya tersebut merupakan daya yang harus dibayar oleh pelanggan. Daya aktif ini sendiri memiliki satuan yaitu Watt (W).

Berikut adalah persamaan sistematis pada daya aktif (*active power*):

$$P = V_{eff} \times I_{eff} \times \cos\theta \quad (\text{untuk 1 fasa}) \dots \dots \dots (2.15)$$

$$P = \sqrt{3} \times V_{eff} \times I_{eff} \times \cos\theta \quad (\text{untuk 3 fasa}) \dots \dots \dots (2.16)$$

4. Daya kompleks

Daya kompleks ini merupakan daya hasil penjumlahan antara daya aktif (*active power*) dengan daya reaktif (*reactive power*).

Berikut adalah persamaan sistematis pada daya kompleks:

$$S = P + jQ = V_{eff} \times I_{eff} \times \cos\theta + V_{eff} \times I_{eff} \times \sin\theta \dots \dots \dots (2.17)$$

2.2.9 Faktor Daya

Faktor daya dalam sistem energi listrik merupakan suatu hasil dari perbandingan antara daya aktif dengan daya buta. Sehingga hal tersebut dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{V_{eff} \times I_{eff} \times \cos\theta}{V_{eff} \times I_{eff}} \dots\dots\dots(2.18)$$

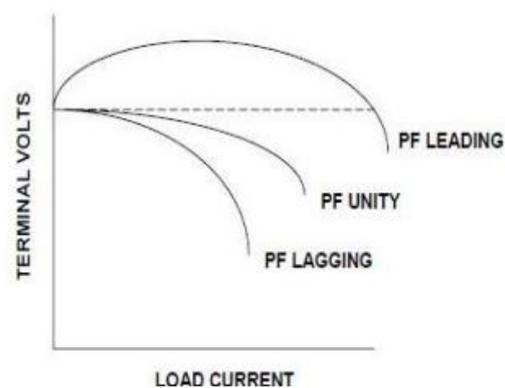
Keterangan : pf = Faktor daya

P = Daya aktif (KW)

S = Daya buta (KVA)

Faktor daya yang ada akan disebut tertinggal apabila kondisi dari arus terlambat terhadap tegangan yang diberikan, dan akan dikatakan mendahului apabila arus yang ada mengarah terhadap tegangan (R. Gerha, 2016).

Berikut adalah gambar karakteristik dari generator sinkron terhadap berbagai faktor daya :

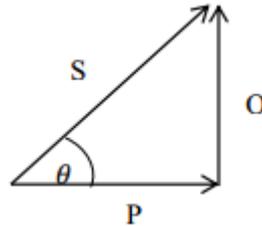


Gambar 2.17 Karakteristik generator sinkron terhadap berbagai faktor daya

(Jerkovic, 2010)

2.2.10 Segitiga Daya

Segitiga daya adalah hubungan antara daya reaktif (Q), daya semu (S), dan daya aktif (P). Hubungan dari daya-daya ini dapat digambarkan dalam bentuk vektor.



Gambar 2.18 Vektor hubungan antara daya reaktif, daya semu, dan daya aktif
(Dwi, 2017)

Rumus untuk daya-daya tersebut adalah sebagai berikut :

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z} = \cos \theta \dots \dots \dots (2.19)$$

$$Q = V_{eff} \times I_{eff} \times \sin \theta = I_{eff}^2 R = \frac{V_{eff}^2}{R} \dots \dots \dots (2.20)$$

$$S = V_{eff} \times I_{eff} = I_{eff}^2 Z = \frac{V_{eff}^2}{Z} \dots \dots \dots (2.21)$$

$$P = V_{eff} \times I_{eff} \times \cos \theta \dots \dots \dots (2.22)$$