

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH ARUS EKSITASI TERHADAP DAYA REAKTIF PADA GENERATOR KAPAL YANG BEKERJA PARALEL Di PT.WARUNA SHIPYARD INDONESIA

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Elektro Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

DISUSUN OLEH:

AULIA RAHMAN SARAGIH

2007220053



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2024**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Aulia Rahman Saragih
NPM : 2007220053
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Pada Generator Yang Bekerja Paralel PT. Waruna Shipyard Indonesia

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 16 Agustus 2024

Mengetahui dan menyetujui:

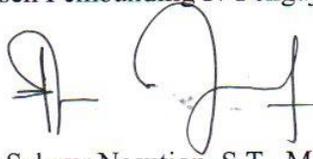
Dosen Pembimbing I / Penguji



(Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T)

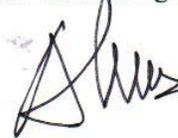
Dosen Pembimbing II / Peguji

Dosen Pembanding I / Penguji



Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

Dosen Pembanding II / Peguji



Dr. Sudirman Lubis, S.T., M.T



Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Aulia Rahman Saragih
Tempat /Tanggal Lahir : Bah Birung Ulu/17 Maret 2002
NPM : 2007220053
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

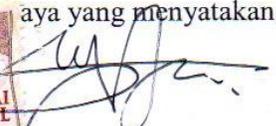
“Analisis Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Pada Generator Yang Bekerja Paralel PT.Waruna Shipyards Indonesia”

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Sipil/Mesin/Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 16 Agustus 2024

aya yang menyatakan,

Aulia Rahman Saragih



ABSTRAK

Salah satu kendala dalam pengoperasian generator ketika dihubungkan paralel adalah ketidakstabilan tegangan antar generator yang menyebabkan fluktuasi pada tegangan *output* generator. Hal ini akan berpengaruh terhadap daya reaktif dan faktor daya saat generator dihubungkan paralel. Untuk itu, regulator tegangan diperlukan untuk menjaga tegangan keluaran generator tetap konstan dengan mengatur arus eksitasi generator tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perubahan arus eksitasi terhadap daya reaktif pada generator kapal yang sedang paralel di PT. Waruna Shipyard Indonesia untuk melihat seberapa besar pengaruh yang dihasilkan dari perubahan arus eksitasi terhadap variasi tegangan, daya reaktif, dan $\cos\phi$ pada generator saat paralel. Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif dengan mengukur parameter yang diperlukan. Selanjutnya parameter tersebut akan dihitung untuk mendapatkan hasil akhir dari penelitian. Hasil menunjukkan bahwa pengaturan arus eksitasi pada generator mempengaruhi nilai tegangan GGL induksi (EA). Semakin besar arus eksitasi maka tegangan induksi generator akan semakin besar. Perubahan besar kecilnya arus eksitasi juga mempengaruhi besarnya daya reaktif yang dihasilkan. Semakin besar arus eksitasi, maka semakin besar daya reaktif generator. Perubahan arus eksitasi sebesar 5,7 A menyebabkan daya reaktif meningkat menjadi 571,8 KVAR pada generator 1 dan perubahan arus eksitasi sebesar 4,4 A menyebabkan daya reaktif meningkat menjadi 376,2 KVAR pada generator 2. Selain itu, pengaruh naiknya daya reaktif berpengaruh signifikan terhadap jatuhnya faktor daya generator. Ketika daya reaktif mencapai 571 KVAR, mengakibatkan penurunan faktor daya ini sebesar 0,57 pada generator 1 dan ketika daya reaktif mencapai 376,2 KVAR, mengakibatkan penurunan faktor daya sebesar 0,721 pada generator 2.

Kata kunci : Generator, arus eksitasi, tegangan, daya reaktif

ABSTRACT

One of the obstacles in operating generators when connected in parallel is the instability of the voltage between generators which causes fluctuations in the generator output voltage. This will affect the reactive power and power factor when the generator is connected in parallel. For this reason, a voltage regulator is needed to maintain the generator output voltage constant by regulating the generator excitation current. This research aims to analyze the effect of changes in excitation current on reactive power on parallel ship generators at PT. Waruna Shipyard Indonesia to see how much influence the change in excitation current has on variations in voltage, reactive power and $\cos\phi$ on the generator when parallel. The analytical method used in this research is a quantitative method by measuring the required parameters. Next, these parameters will be calculated to obtain the final results of the research. The results show that the excitation current setting in the generator affects the value of the induced EMF voltage (EA). The greater the excitation current, the greater the generator induced voltage. Changes in the size of the excitation current also affect the amount of reactive power produced. The greater the excitation current, the greater the reactive power of the generator. A change in excitation current of 5.7 A causes reactive power to increase to 571.8 KVAR in generator 1 and a change in excitation current of 4.4 A causes reactive power to increase to 376.2 KVAR in generator 2. In addition, the effect of increasing reactive power is significant impact on the fall of the generator power factor. When the reactive power reaches 571 KVAR, this results in a decrease in the power factor of 0.57 on generator 1 and when the reactive power reaches 376.2 KVAR, it results in a decrease in the power factor of 0.721 on generator 2.

Keyword : *Generator, excitation current, voltage, reactive power*

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Analisis Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Pada Generator Kapal Yang Bekerja Paralel PT.Waruna Shipyard Indonesia” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Orang tua penulis : Ibu Siti Aisyah Lubis dan Bapak Sampei Saragih, yang tak henti-hentinya mendo'akan dan memberikan dukungan serta nasehat setiap harinya.
2. Bapak Prof. Dr. Agussani, M.A.P, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Dr. Ade Faisal, M.sc, P.hd, selaku Wakil Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Affandi, S.T, M.T, selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T, M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, sekaligus Dosen Pembimbing yang telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi.
7. Ibu Elvy Sahnur Nasution., S.T, M.Pd., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, sekaligus dosen penguji 1.

8. Bapak Dr. Sudirman Lubis, S.T., M.T., selaku dosen teknik mesin, sekaligus dosen penguji 2
9. Seluruh Bapak/ibu Dosen di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah memberikan ilmu ketekniklistrikan kepada penulis.
10. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
11. Teman-teman seperjuangan Teknik Elektro A3 Malam Stambuk 2020 yang telah menemani perjalanan kuliah penulis.

Laporan Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi dunia konstruksi teknik Elektro.

Medan, 16 Agustus 2024

Aulia Rahman Saragih

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB 2	4
TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Generator Sinkron	4
2.2 Komponen Penyusun Generator Sinkron	6
2.2.1 Stator.....	6
2.2.2 Rotor	7
2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron	9
2.3.1 Generator Tanpa Beban	12
2.3.2 Generator Dengan Beban.....	13
2.4 Rangkaian Ekuivalen Generator.....	18
2.5 Diagram Fasor Generator Sinkron	21
2.6 Kurva Kapabilitas.....	24
2.6.1 Batas Daya Generator	27

2.6.2	Batas Arus Stator (<i>Armature Current Limit</i>)	27
2.6.3	Batas Arus Rotor (<i>Field Current Limit</i>)	28
2.6.4	Batas Pemanasan Ujung Inti Stator (<i>Stator-End Region Heating Limit</i>)..	28
2.7	Segitiga Daya.....	29
2.7.1	Daya Aktif / Nyata (P)	29
2.7.2	Daya Reaktif (Q).....	30
2.7.3	Daya Semu (S)	31
2.8	Faktor Daya	31
2.8.1	Faktor Daya Bernilai Satu (<i>Unity</i>)	32
2.8.2	Faktor Daya Mendahului (<i>Leading</i>)	33
2.8.3	Faktor Daya Terbelakang (<i>Lagging</i>).....	33
2.9	Sistem Eksitasi Generator	34
2.9.1.	Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Sikat (<i>Brush Excitation</i>).....	37
2.9.2.	Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (<i>Brushless Excitation</i>).....	39
2.10	Kerja Paralel Generator	44
2.10.1	Syarat-Syarat Paralel Generator	45
2.10.2.	Prosedur Umum Paralel Generator	47
2.11.	Peralatan Sinkronisasi Generator	47
2.11.1	<i>Synchroscope</i>	48
2.11.2	Volt Meter	50
2.11.3	Frekuensi Meter	51
2.11.4	<i>Automatic Synchronizer</i>	52
2.11.5	Automatic Voltage Regulation (AVR).....	53
BAB 3	55

METODOLOGI PENELITIAN.....	55
3.1. Tempat dan Waktu	55
3.2. Lokasi Penelitian	55
3.3. Data Penelitian.....	55
3.3.1. Data Spesifikasi Generator	56
3.3.2. Data Operasi Generator	56
3.4. Alat dan Bahan	57
3.5. Metode Penelitian.....	57
3.6. Perancangan Penelitian.....	58
3.7. Flowchart.....	59
BAB 4	60
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	60
4.1. Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Variasi Tegangan Keluaran Dan Cos ϕ Generator.	60
4.1.1 Proses Pembangkitan Dan Suplai Generator	60
4.1.2 Pengujian dan Pengukuran Bebas Paralel Generator	63
4.1.3 Perhitungan Tegangan Induksi E_a	68
4.1.4 Perhitungan Daya Semu dan Cos ϕ	73
4.2. Pengaruh Daya Reaktif (VAR) Terhadap Faktor Daya (Cos ϕ)	78
BAB 5	84
PENUTUP.....	84
5.1. Kesimpulan.....	84
5.2. Saran.....	85
DAFTAR PUSTAKA	86

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik sudah menjadi hal yang sangat penting di dalam kehidupan manusia sekarang ini, baik digunakan dalam kebutuhan kecil seperti kebutuhan pribadi hingga dalam kebutuhan yang besar seperti perusahaan-perusahaan besar. Energi listrik dihasilkan dari sistem pembangkit yang bekerja sepanjang waktu tanpa henti sesuai dengan kebutuhan dan kapasitas pembangkit tersebut. Untuk mencukupi kebutuhan tenaga listrik tersebut, diperlukan berbagai macam peralatan untuk mensuplay energy listrik salah satunya adalah generator.

Generator sinkron yang biasanya disebut dengan alternator adalah mesin listrik arus bolak balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak balik (alternating current, AC) yang bekerja dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet (Anthony, 2018). Generator pada unit pembangkit listrik dikawal dilakukan pengoprasian secara paralel pada jaringan interkoneksi saat dibutuhkan.

Salah satu permasalahan di dalam operasi generator saat paralel melalui jaringan interkoneksi adalah ketidakstabilan tegangan, hal ini mengakibatkan fluktuasi tegangan keluaran generator. Ketika keluaran tegangan generator tidak konstan hal ini berdampak pada ketidakstabilan sistem tenaga listrik yang mana akan mengganggu stabilitas pembagian arus pada sistem tenaga listrik.

Untuk menjaga tegangan keluaran generator tetap stabil pada tegangan yang diizinkan walaupun terjadi perubahan beban diperlukan suatu pengaturan tegangan, yaitu dengan dilakukan pengaturan arus dan tegangan eksitasi pada generator. Dengan mengatur besar kecilnya arus dan tegangan eksitasi tersebut maka dapat mengatur pula besar kecilnya tegangan keluaran pada generator.

Tegangan keluaran generator saat paralel akan berpengaruh pada daya reaktif yang dihasilkannya. Besar daya reaktif akan membuat $\text{Cos } \phi$ (faktor daya) semakin

kecil, begitu pula sebaliknya (Hana, 2017). Oleh karena itu diperlukan pengaturan atau regulator yang mengatur besar kecilnya tegangan terminal serta daya reaktif yang dihasilkan generator.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh perubahan tegangan dan arus eksitasi terhadap tegangan keluaran dan daya reaktif guna memaksimalkan kualitas daya pada generator saat paralel terhadap perubahan beban guna meningkatkan efisiensi dari generator pada kapal di PT.Waruna Shipyard Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam tugasakhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menganalisa pengaruh perubahan arus eksitasi terhadap tegangan keluaran dan $\text{Cos } \phi$ generator?
2. Bagaimana menganalisa pengaruh perubahan daya reaktif terhadap $\text{Cos } \phi$ pada pembagian beban saat generator bekerja paralel ?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya membahas peranan sistem eksitasi dalam sistem kerjanya terhadap keluaran tegangan generator. Tidak membahas mekanik putaran (RPM) mesin yang berjalan memutar generator.
2. Pada saat generator mensuplay beban secara paralel, pengaruh perubahan faktor daya disebabkan oleh perubahan daya reaktif antar generator. Penelitian ini tidak membahas satu per satu beban yang disuplay oleh generator.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menganalisa pengaruh arus eksitasi terhadap variasi tegangan keluaran dan $\text{Cos}\phi$ generator.
2. Untuk menganalisa pengaruh daya reaktif (VAR) terhadap faktor daya ($\text{Cos}\phi$) saat generator bekerja secara paralel.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan pokok-pokok permasalahan di atas, manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Untuk meningkatkan pengetahuan mengenai pengaruh sistem eksitasi terhadap tegangan keluaran generator.
2. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan dan pengetahuan bagi pihak yang membutuhkan khususnya di bidang ketenagalistrikan dan perusahaan, sehingga dapat mengetahui permasalahan pada faktor daya saat generator kapal bekerja secara paralel.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron adalah mesin sinkron yang mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik. Dikatakan mesin sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Generator bekerja berdasarkan prinsip kerja induksi elektromagnetik atau fluksi yang kemudian mengubah energi listrik. Azas generator yang bekerja berdasarkan Hukum Induksi Faraday :

Apabila jumlah garis gaya yang melalui kumparan diubah, maka gaya gerak listrik diinduksikan dalam kumparan itu. Besarnya gaya gerak listrik yang diinduksikan berbanding lurus dengan laju perubahan jumlah garis gaya melalui kumparan (Puspitaputri et al., 2021).

Generator sinkron mempunyai kumparan jangkar pada stator dan kumparan medan pada rotor. Kumparan medan rotor diberi arus searah sehingga mendapatkan tarikan dari kutub medan stator hingga turut berputar dengan kecepatan yang sama.

Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak diantara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga mekanik, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau flux yang bersifat bolak-balik atau flux putar. Flux putar ini akan memotong kumparan stator sehingga pada stator akan timbul gaya gerak listrik (GGL) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor.

Generator sinkron dengan definisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang diputar dengan penggerak mula (*prime mover*) yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putar yang sama dengan putaran rotor tersebut (Teknik & Listrik, 2020).

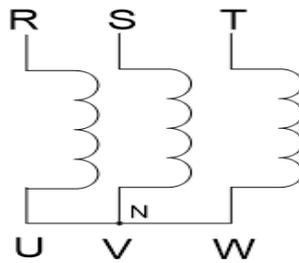
Dua istilah yang biasa digunakan untuk menggambarkan belitan pada suatu mesin adalah belitan medan dan belitan jangkar. Secara umum, istilah "belitan medan" berlaku untuk belitan yang menghasilkan medan magnet utama dalam suatu mesin, dan istilah "belitan jangkar" berlaku untuk belitan di mana tegangan utama diinduksi. Untuk mesin sinkron, belitan medan berada pada rotor, sehingga "belitan rotor" dan "belitan medan" digunakan secara bergantian. Demikian pula, istilah "belitan stator" dan "belitan alam" digunakan secara bergantian (Iverson & Dervan, n.d.).

Rotor generator sinkron pada dasarnya adalah elektromagnet besar. Kutub magnet pada rotor dapat berupa konstruksi menonjol atau tidak menonjol. Istilah menonjol berarti "terjulang" atau "mencuat", dan kutub menonjol adalah kutub magnet yang menonjol dari permukaan rotor. Di samping itu kutub tidak menonjol adalah kutub magnet yang dibuat rata dengan permukaan rotor.

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.

Tegangan yang dihasilkan dari induksi GGL pada ujung kumparan tersebut adalah tegangan arus bolak balik 3 fasa, oleh karena itu generator sinkron disebut juga generator AC (*Alternating Current*).

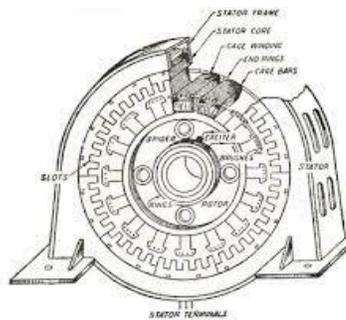
Ujung-ujung kumparan stator dari generator sinkron dihubungkan ke jepitan pada generator sehingga ada enam jepitan. Jepitan-jepitan ini diberi kode R, S, T dan U, V, W. Pada kode U, V, dan W dihubungkan jadi satu titik netral karena generator sinkron biasanya terhubung bintang (Y).



Gambar 2.1 Ujung-Ujung Kumpan Stator Generator Sinkron.

2.2 Komponen Penyusun Generator Sinkron

Secara garis besar, generator sinkron terdiri dari stator, rotor, dan celah udara. Stator adalah bagian yang diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor.



Gambar 2.2 Konstruksi Generator Sinkron

2.2.1 Stator

Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

1. Rangka Stator
Rangka stator adalah penyangga inti jangkar generator.
2. Inti Stator
Inti stator terdiri dari laminasi-laminasi yang terpasang pada rangka stator.
3. Alur (slot) dan Gigi
Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator.

4. Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)

Merupakan tempat terjadinya ggl induksi.

2.2.2 Rotor

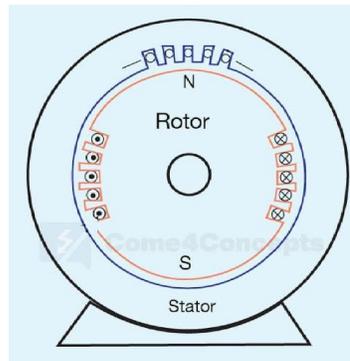
Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

1. Slip Ring

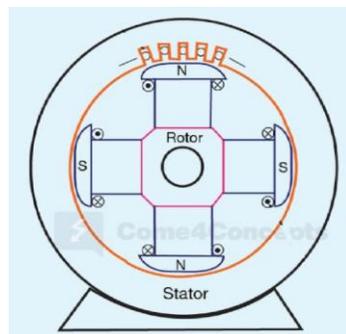
Slip ring adalah cincin logam yang melingkari seluruh poros mesin tetapi terisolasi darinya. Salah satu ujung belitan rotor DC diikatkan pada masing-masing dua slip ring pada poros mesin sinkron. dan sikat stasioner menempel pada setiap slip ring. Sebuah "sikat" adalah blok senyawa karbon mirip grafit yang menghantarkan listrik dengan bebas namun memiliki gesekan yang sangat rendah. agar tidak merusak slip ring. Jika ujung positif sumber tegangan dc dihubungkan ke salah satu sikat dan ujung negatif dihubungkan ke sikat yang lain, maka tegangan dc yang sama akan diterapkan pada belitan medan sepanjang waktu tanpa memandang posisi sudut atau kecepatan belitan medan. rotor.Kumparan medan merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

2. 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).



Gambar 2.3 Generator non salient pole (kutub silinder)



Gambar 2.4 Generator salient pole (kutub menonjol)

Sistem eksitasi menggunakan sikat, sumber tegangan listrik berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*. Untuk mengalirkan arus eksitasi dari rotor generator digunakan *slip ring* dan sikat arang (Alam & Taryana, 2015). Kutub medan magnet rotor dapat berupa *salient* (kutub menonjol) dan *non salient* (rotor silinder).

2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Menurut (Supena et al., 2018) Suatu mesin listrik akan berfungsi apabila memiliki :

1. Kumparan medan magnet menghasilkan medan magnet.
2. Kumparan jangkar, untuk mengimbaskan ggl pada konduktor-konduktor yang terletak pada alur-alur jangkar.
3. Celah udara yang memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet.

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

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

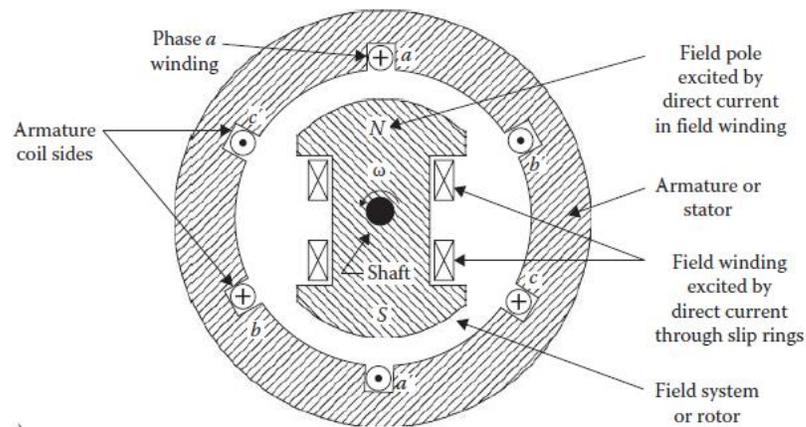
Untuk generator sinkron tiga fasa, digunakan tiga kumparan jangkar yang ditempatkan di stator yang disusun dalam bentuk tertentu, sehingga susunan kumparan jangkar yang sedemikian akan membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kumparan jangkar yang besarnya sama tapi berbeda fasa 120° satu sama lain. Setelah itu ketiga terminal kumparan jangkar siap dioperasikan untuk menghasilkan energi listrik (Farhan, 2021).

Kecepatan rotor dan frekuensi dari tegangan yang dibangkitkan berbanding secara langsung. Diasumsikan rotor berputar searah jarum jam, maka flux medan rotor bergerak sesuai lilitan jangkar. Satu putaran rotor dalam satu detik menghasilkan satu siklus per detik atau 1 *Hertz* (Hz). Bila kecepatannya 60 *revolution* per menit (Rpm), frekuensi 1 Hz.

Untuk frekuensi $f = 60$ Hz, maka rotor harus berputar 3600 Rpm. Untuk kecepatan rotor n rpm, rotor harus berputar pada kecepatan $n/60$ *revolution* per detik (rps). Bila rotor mempunyai lebih dari 1 pasang kutub, misalnya P kutub maka masing-masing *revolution* dari rotor menginduksikan $P/2$ siklus tegangan dalam lilitan stator. Frekuensi dari tegangan induksi sebagai sebuah fungsi dari kecepatan rotor.

$$f = \frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60} \text{ Hz, (Sunarlik, 2017)}$$

Untuk generator sinkron tiga fasa, harus ada tiga belitan yang masing-masing terpisah sebesar 120 derajat listrik dalam ruang sekitar keliling celah udara seperti diperlihatkan pada kumparan $a - a'$, $b - b'$ dan $c - c'$ pada gambar berikut.



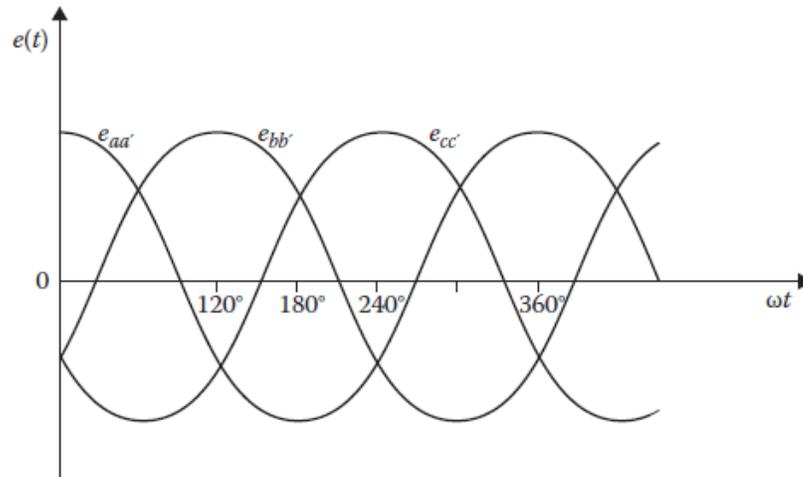
Gambar 2.5 Skema belitan Generator 3 fasa

Masing-masing lilitan akan menghasilkan gelombang Fluksi sinus satu dengan lainnya berbeda 120 derajat listrik. Dalam keadaan seimbang besarnya fluksi sesaat :

$$\Phi_A = \Phi_m \cdot \sin \omega t$$

$$\Phi_B = \Phi_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$\Phi_C = \Phi_m \cdot \sin(\omega t - 240^\circ)$$



Gambar 2.6 Gelombang sinus Generator 3 phasa

Besarnya ggl induksi (E_a) rata-rata yang dihasilkan kumparan jangkar alternator ini dapat dilihat dalam persamaan sebagai berikut :

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot \varphi \cdot T \dots \dots \dots (2.1)$$

Jika $f = \frac{n \cdot p}{120}$, maka :

$$E_a = 4,44 \cdot \frac{n \cdot p}{120} \cdot \varphi \cdot T$$

$$E_a = \frac{44,4 \cdot n \cdot p \cdot \varphi \cdot T}{120}$$

Jika $C = \frac{44,4 \cdot p \cdot T}{120}$, maka :

$$E_a = C \cdot n \cdot \varphi$$

Dimana :

E_a = GGL induksi (Volt)

C = Konstanta

P = Jumlah kutub

n = Putaran (rpm)

f = Frekuensi (Hz)

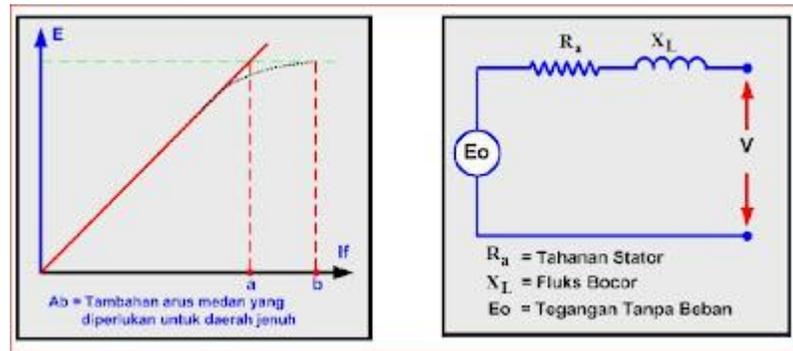
φ = Fluks magnetik (weber)

T = Banyaknya lilitan per fasa

2.3.1 Generator Tanpa Beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai generator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban (E_o), yaitu :

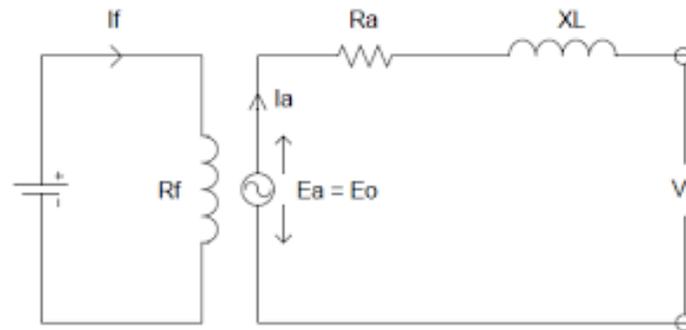
$$E_o = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \varphi_m \cdot T \text{ Volt (Sunarlik, 2017).}$$



Gambar 2.7 Kurva dan Rangkaian Ekuivalen Generator Tanpa Beban

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluk hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Bila besarnya arus medan dinaikkan, maka tegangan output juga akan naik sampai titik saturasi (jenuh).

2.3.2 Generator Dengan Beban



Gambar 2.8 Rangkain Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban

Bila Generator diberi beban yang berubah-ubah maka besarnya tegangan terminal V akan berubah-ubah pula. Hal ini disebabkan adanya kerugian tegangan pada:

1. Resistansi jangkar R_a
2. Reaktansi bocor jangkar X_L
3. Reaksi Jangkar X_a

Resistansi Jangkar Resistansi jangkar/phase R_a menyebabkan terjadinya tegangan jatuh (Kerugian tegangan) / phase $I \cdot R_a$ yang sephase dengan arus jangkar. Reaktansi Bocor Jangkar Saat arus mengalir melalui penghantar jangkar, sebagian fluk yang terjadi tidak mengimbas pada jalur yang telah ditentukan, hal seperti ini disebut fluk bocor.

Reaksi Jangkar Adanya arus yang mengalir pada kumparan jangkar saat generator dibebani akan menimbulkan fluksi jangkar (ϕ_A) yang berintegrasi dengan fluksi yang dihasilkan pada kumparan medan rotor (ϕ_F), sehingga akan dihasilkan suatu fluksi resultan sebesar : $\phi_R = \phi_F + \phi_A$.

Dengan adanya flux putar armatur akibat timbulnya arus armatur, maka pada kumparan timbul reaktansi pemagnet X_m . Reaktansi pemagnet bersama-sama dengan reaktansi bocor dikenal dengan naman reaktansi sinkron (X_s) dan secara matematis dapat ditulis : $X_s = X_L + X_m$, (Iverson & Dervan, n.d.)

Dan persamaan terminal generator sinkron dapat ditulis :

$$E_a = V_t + j X_a \cdot I_a + j X_L \cdot I_a + R_a \cdot I_a \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron, atau $X_s = X_a + X_L$ dapat dilihat pada gambar 2.8 maka persamaan menjadi :

$$E_a = V_t + j X_s \cdot I_a + R_a \cdot I_a \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

E_a = GGL yang dibangkitkan generator sinkron (Volt)

V_t = Tegangan Per Fasa (Volt)

R_a = Resistansi Jangkar

X_a = Reaktansi Reaksi Jangkar (Ohm)

X_L = Reaktansi Fluks Bocor (Ohm)

X_s = Reaktansi Sinkron (Ohm)

I_a = Arus Jangkar (Ampere)

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*).

2.3.2.1 Beban Resistif

Beban resistif sangat mirip dengan sifat resistor (R). Apabila arus listrik melintasi beban ini, maka nilai arus nominalnya akan tetap konstan, sehingga mencegah fluktuasi. Beban resistif, dilambangkan dengan simbol R, hanya terdiri dari komponen

yang mempunyai hambatan ohmik, Perlengkapan penerangan yang menggunakan lampu pijar merupakan salah satu contoh perangkat yang menggunakan komponen pemanas. Hanya beban aktif yang digunakan pada beban ini yang mempunyai faktor daya 1. Tegangan dan arusnya berada dalam fase yang sama.

Dalam menentukan nilai tahanan pada lampu pijar, Peneliti menggunakan hukum Ohm untuk menetapkan hubungan antara tegangan, arus, dan hambatan dalam suatu rangkaian listrik. (George Simon Ohm, 1791- 1854) merumuskan hubungan antara intensitas arus listrik (I), impedansi (Z), dan beda potensial (V) yang biasa dikenal dengan hukum Ohm. Deskripsi matematis tentang hubungan antara tegangan, arus, dan hambatan dalam suatu rangkaian listrik diberikan oleh:

$$V = I \times Z \dots\dots\dots(2.4)$$

persamaan tersebut adalah hukum ohm. sehingga untuk menghitung nilai tahanan pada suatu hambatan pada generator sinkron dinyatakan

$$Z = \frac{V/\sqrt{3}}{I} \dots\dots\dots(2.5)$$

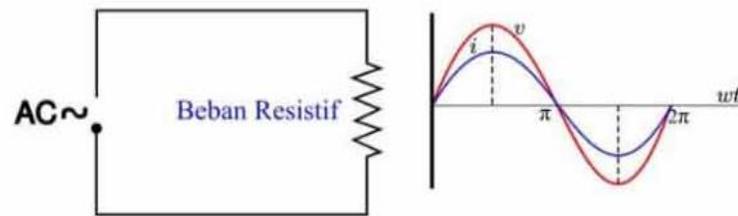
Keterangan : V = Tegangan (Volt)

 I = Arus (Ampere)

 Z = Impedansi/hambatan (Ohm)

Hukum Ohm menjelaskan hubungan antara tegangan listrik (V) dan arus (I). Untuk memahami hubungan antara kedua besaran fisis ini, diperlukan pemahaman yang mendalam tentang arus listrik.

Arus listrik adalah banyaknya muatan listrik yang mengalir melintasi suatu rangkaian dalam jangka waktu tertentu. Migrasi muatan positif atau proton menentukan orientasi arus listrik. Dalam konteks konduktor logam, penting untuk diingat bahwa muatan bergerak yang bertanggung jawab atas arus listrik adalah muatan negatif, yang juga dikenal sebagai elektron. Oleh karena itu, arah rambat arus listrik berlawanan dengan arah gerak muatan listrik tersebut (Safari, 2023).



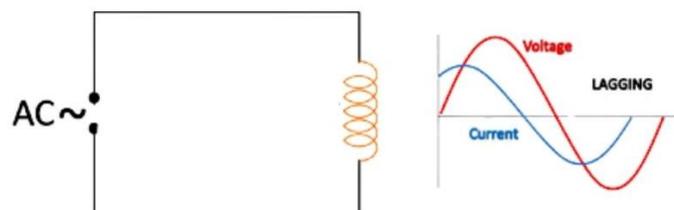
Gambar 2.9 Grafik gelombang beban Resistif

2.3.2.2 Beban Induktif

Beban induktif terdiri dari komponen yang memiliki sifat induktansi, seperti kumparan atau motor listrik. Ketika arus listrik mengalir melalui beban induktif, medan magnet yang dihasilkan oleh arus tersebut menyebabkan energi tersimpan dalam medan tersebut. Akibatnya, saat arus berubah atau diputus, energi ini dilepaskan kembali ke sirkuit.

Salah satu karakteristik utama beban induktif adalah adanya pergeseran fase antara tegangan dan arusnya. Ini disebabkan oleh efek induktansi yang menyebabkan arus mengalami penundaan dibandingkan dengan tegangan. Pergeseran fase ini dapat diukur dalam derajat dan dapat menyebabkan efek seperti faktor daya yang rendah pada sistem kelistrikan.

Beban yang bersifat induktif atau kapasitif dapat menggeser titik persilangan nol antara tegangan dan arus. Bila bebannya merupakan beban induktif persilangan nol gelombang arus muncul beberapa saat setelah persilangan nol gelombang tegangan muncul. Hal ini biasa dikatakan sebagai arus tertinggal (Kilinskiĭ et al., 2021)



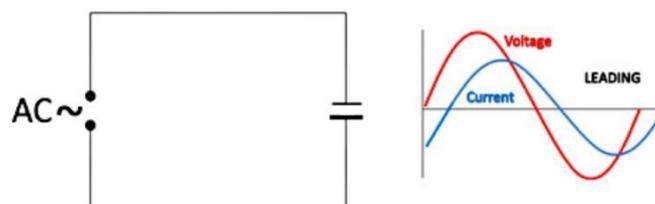
Gambar 2.10 Grafik gelombang beban Induktif

2.3.2.3 Beban Kapasitif

Beban kapasitif terdiri dari komponen yang memiliki sifat kapasitansi, seperti kapasitor atau kondensator. Ketika arus mengalir melalui beban kapasitif, energi listrik disimpan dalam medan elektrostatis yang dibangun di sekitar kapasitor. Ketika arus berubah atau diputus, energi ini dilepaskan kembali ke sirkuit.

Sama seperti beban induktif, beban kapasitif juga menunjukkan pergeseran fase antara tegangan dan arusnya. Namun, dalam kasus ini, pergeseran fase menyebabkan arus mendahului tegangan. Pergeseran fase ini juga dapat menyebabkan efek faktor daya yang rendah pada sistem kelistrikan.

Untuk arus beban yang bersifat kapasitif, persilangan nol gelombang arus akan muncul beberapa saat sebelum persilangan nol gelombang tegangan. Hal ini biasa dikatakan sebagai arus mendahului tegangan. Sebuah kapasitor daya atau yang dikenal dengan nama kapasitor bank harus mempunyai daya Q_c yang sama dengan daya reaktif dari sistem yang akan diperbaiki faktor dayanya. Jika keadaan ini dipenuhi, kapasitor akan memperbaiki faktor daya menjadi bernilai maksimum atau faktor daya = 1 (Kilinskiĭ et al., 2021)



Gambar 2.11 Grafik gelombang beban Kapasitif

2.4 Rangkaian Ekuivalen Generator

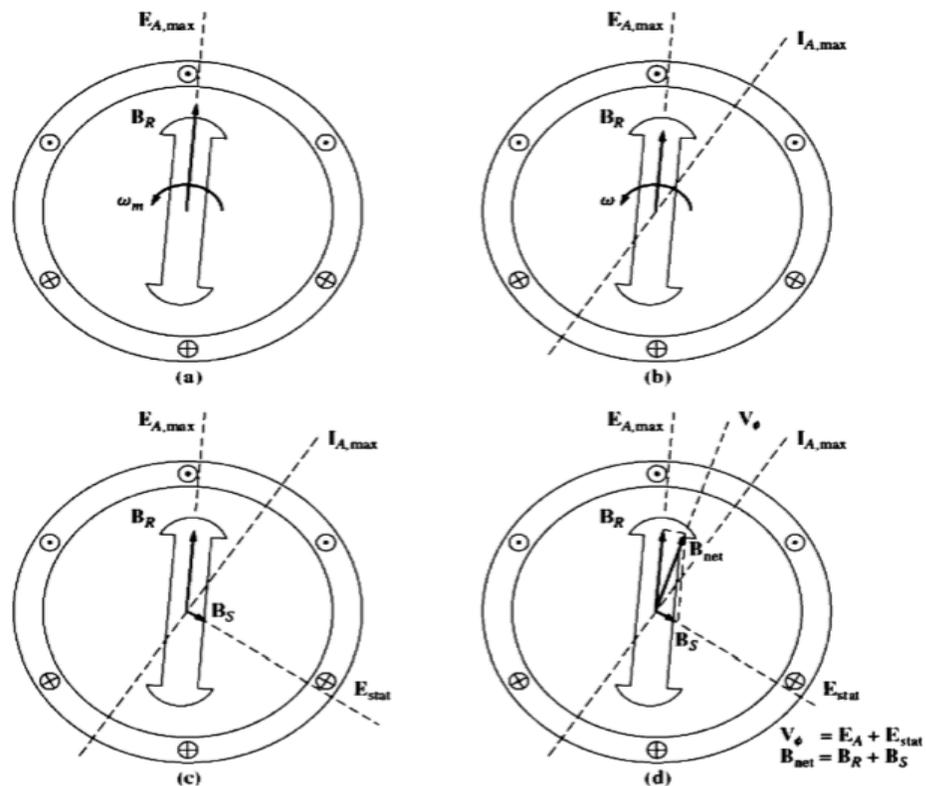
Tegangan induksi dibangkitkan pada phasa generator sinkron. Tegangan ini biasanya tidak sama dengan tegangan yang muncul pada terminal generator. Tegangan induksi sama dengan tegangan output, hanya ketika tidak ada arus jangkar yang mengalir pada mesin. Beberapa faktor yang menyebabkan perbedaan antara tegangan induksi dengan tegangan terminal adalah (Nurdin et al., 2018):

1. Distorsi medan magnet pada celah udara oleh mengalirnya arus pada stator, disebut reaksi jangkar.
2. Induktansi sendiri kumparan jangkar.
3. Resistansi kumparan jangkar.
4. Efek permukaan rotor kutub sepatu

Ketika rotor generator sinkron diputar, tegangan EA diinduksikan pada belitan stator generator. Jika suatu beban dihubungkan pada terminal generator, arus akan mengalir. Namun aliran arus stator tiga fasa akan menghasilkan medan magnet tersendiri pada mesin. Medan magnet stator ini mendistorsi medan magnet rotor asli, mengubah tegangan fasa yang dihasilkan. Efek ini disebut reaksi jangkar karena arus (stator) mempengaruhi medan magnet yang menghasilkan arus tersebut.

Arus yang mengalir pada belitan stator menghasilkan medan magnet tersendiri. Medan magnet stator ini disebut B_s dan arahnya diberikan di sebelah kanan.

Saat generator sinkron beroperasi dalam keadaan beban nol atau tanpa beban, maka yang terjadi ialah tak ada arus yang mengalir melewati kumparan jangkar stator, sehingga yang ada pada celah udara hanyalah fluksi arus medan rotor. Berbeda dengan apabila generator bekerja dalam keadaan berbeban, dimana arus jangkar akan mengalir dan membentuk fluksi jangkar. Fluksi tersebut akan memengaruhi fluksi medan sehingga akhirnya menyebabkan harga tegangan terminal pada generator sinkron berubah. Reaksi ini kemudian dikenal dengan reaksi jangkar. Fluksi jangkar menimbulkan akibat seperti distorsi penguatan maupun pelemahan atau magnetising dan demagnetising. Pengaruh dari fluksi jangkar bergantung pada beban dan juga faktor daya beban (Harahap Muchsin dkk., 2021).



Gambar 2.12 Pengembangan model reaksi jangkar

Keterangan gambar:

- Medan magnet yang berputar menghasilkan tegangan internal E_A .
- Tegangan yang dihasilkan menghasilkan aliran arus lagging ketika dihubungkan ke beban lagging.
- Arus stator menghasilkan medan magnet sendiri (B_S) yang menghasilkan tegangan stator (E_{stat}) sendiri pada belitan stator mesin.
- Medan B_S menggunakan medan rotor (B_R), mendistorsinya menjadi magnet sepenuhnya (B_{net}). Tegangan yang ditambahkan dari tegangan stator (E_{stat}) ke tegangan internal (E_A), menghasilkan tegangan (V_ϕ) pada keluaran fase.

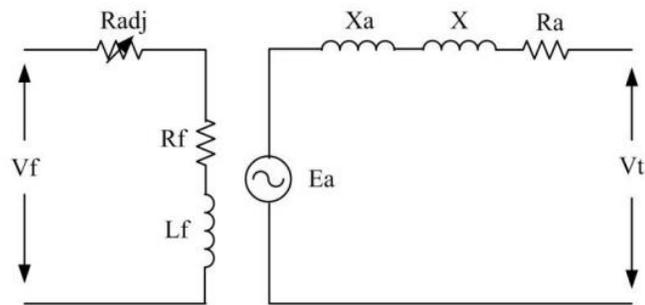
Dengan adanya dua tegangan pada belitan stator, tegangan total dalam suatu fasa hanyalah jumlah dari tegangan internal yang dihasilkan (E_A). dan tegangan reaksi jangkar (E_{stat}):

$$V\phi = E_A + E_{stat} \dots \dots \dots (2.6)$$

Medan magnet sepenuhnya (B_{net}), hanyalah jumlah medan magnet rotor dan stator:

$$B_{net} = B_R + B_S \dots \dots \dots (2.7)$$

Stator merupakan group belitan jangkar yang terbuat dari tembaga. Belitan belitan inidiletakkan pada alur-alur (slot), dimana suatu belitan konduktor akan mengandung tahanan (R) dan induktansi (L), maka belitan stator akan mengandung tahanan stator (R_a) dan induktansi sendiri (L_f). Akibat adanya pengaruh reaktansi reaksi jangkar X_a dan reaktansi bocor jangkar X maka rangkaian ekivalen suatu generator sinkron dapat dibuat seperti gambar berikut:



Gambar 2.13 Rangkaian ekivalen generator sinkron

Dari gambar di atas, tegangan generator sinkron dirumuskan sebagai berikut:

$$E_a = V_t + jX_a I_a + jX I_a + R_a I_a \dots \dots \dots (2.8)$$

Dan persamaan terminal generator sinkron dapat ditulis:

$$V_t = E_a - jX_a I_a - jX I_a - R_a I_a \dots \dots \dots (2.9)$$

dengan :

V_f = Tegangan Eksitasi (Volt)

R_f = Tahanan Belitan Medan (Ohm)

L_f = Induktansi Belitan Medan (Henry)

R_{Adj} = Tahanan Varibel (Ohm)

E_a = Ggl yang dibangkitkan generator sinkron (Volt)

V_t = Tegangan terminal generator sinkron (Volt)

X_t = Reaktansi Armatur (Ohm)

X = Reaktansi Bocor (Ohm)

X_s = Reaktansi Sinkron (Ohm)

I_a = Arus Jangkar (Ampere)

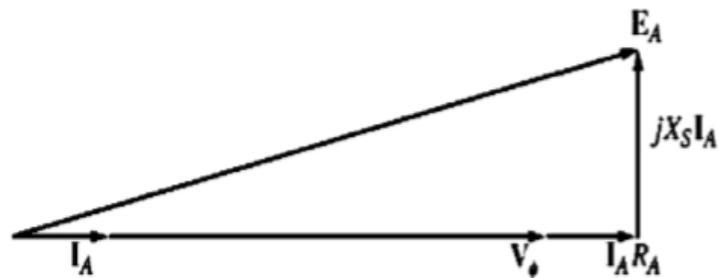
2.5 Diagram Fasor Generator Sinkron

Satu fakta penting yang harus diingat ketika rangkaian ekivalen per fasa digunakan adalah rangkaian tiga phase mempunyai tegangan dan arus yang sama jika beban yang diberikan padanya seimbang. Jika beban generator tidak seimbang maka diperlukan teknik analisis yang lebih canggih.

Karena tegangan pada generator sinkron adalah tegangan ac, maka tegangan tersebut biasanya dinyatakan sebagai fasor. Diagram Fasor adalah penggambaran hubungan antara fluks magnetik, tegangan dan arus yang mengalir dalam bentuk

vektor. Karena fasor mempunyai besaran dan sudut, hubungan antara keduanya harus dinyatakan dalam plot dua dimensi.

Ketika tegangan dalam suatu fasa ($V_t = E_a - jX_a I_a - R_a I_a$) dan I_a dalam fase tersebut diplot sedemikian rupa untuk menunjukkan hubungan di antara mereka, plot yang dihasilkan disebut diagram fasor.



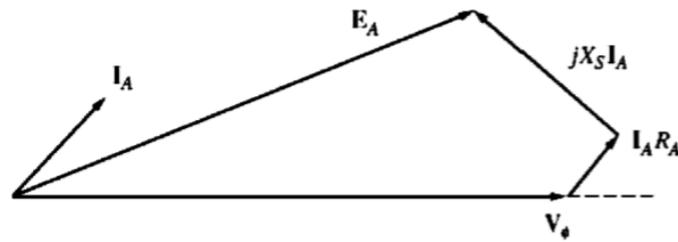
Gambar 2.14 Diagram fasor generator sinkron pada faktor daya satu.

Gambar di atas menunjukkan hubungan disaat generator menyuplai beban dengan faktor daya satu (beban resistif murni).

Diagram fasor ini dapat dibandingkan dengan diagram fasor generator yang beroperasi pada faktor daya *lagging* dan *leading* dengan contoh gambar sebagai berikut:



Gambar 2.15 Diagram fasor generator sinkron pada saat *lagging*.



Gambar 2.16 Diagram fasor generator sinkron pada saat *leading*.

Gambar di atas menerangkan bahwa, untuk tegangan fasa dan arus jangkar tertentu, tegangan pembangkitan internal (E_A) yang lebih besar diperlukan untuk beban *lagging* dibandingkan untuk beban *leading*. Oleh karena itu diperlukan arus medan yang lebih besar dengan beban *lagging* untuk mendapatkan tegangan terminal yang sama, karena:

$$E_a = K \phi \omega$$

dan ω harus berjalan konstan agar menjaga frekuensi tetap stabil.

Maka dari gambar 2.14, gambar 2,15 dan gambar 2.16 dapat diperoleh (Iverson & Dervan, n.d.) :

1. Untuk faktor daya *unity* :

$$E_a = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a X_s)^2} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$E_a = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a (X_a + X_l))^2} \dots\dots\dots(2.11)$$

2. Untuk faktor daya *lagging* :

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \varphi + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \varphi + I_a X_s)^2} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \varphi + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \varphi + I_a (X_a + X_l))^2} \dots\dots\dots(2.13)$$

3. Untuk faktor daya *leading* :

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

Sedangkan X_s dalam $\Omega = 1.81 \times Z \dots\dots\dots(2.15)$

Dengan :

E_a = Tegangan beban terinduksi yang merupakan tegangan terinduksi setelah terdapat reaksi jangkar.

V_t = Tegangan terminal (tegangan per fasa) yang secara vektor lebih kecil daripada E_0 sebesar $I_a Z_s$ atau lebih kecil daripada E sebesar $I_a Z_s$ dimana :

Z = Impedansi

R_a = Resistansi Jangkar

X_a = Reaktansi Reaksi Jangkar (Ohm)

X_L = Reaktansi Fluks Bocor (Ohm)

X_s = Reaktansi Sinkron (Ohm)

I_a = Arus Jangkar (Ampere)

Alternatifnya, untuk arus medan tertentu dan besaran arus beban, tegangan terminal lebih rendah untuk beban *lagging* dan lebih tinggi untuk beban *leading*. Pada mesin sinkron yang sebenarnya, reaktansi sinkron jauh lebih besar daripada resistansi belitan (R_A), jadi R_A sering diabaikan dalam studi kualitatif variasi tegangan. Untuk hasil numerik yang akurat, R_A tentu saja harus dipertimbangkan.

2.6 Kurva Kapabilitas

Kurva kapabilitas generator memberikan batasan jumlah pembangkitan daya aktif dan daya reaktif dari generator. Kurva kapabilitas generator digunakan untuk menentukan batas pengoperasian stabilitas steady state generator dan menentukan setting sistem proteksi yang digunakan. Selain itu digunakan juga untuk batasan operasi Optimal Power Flow (OPF) dan batasan pengoperasian yang aman dari unit generator (Rusilawati, 2020).

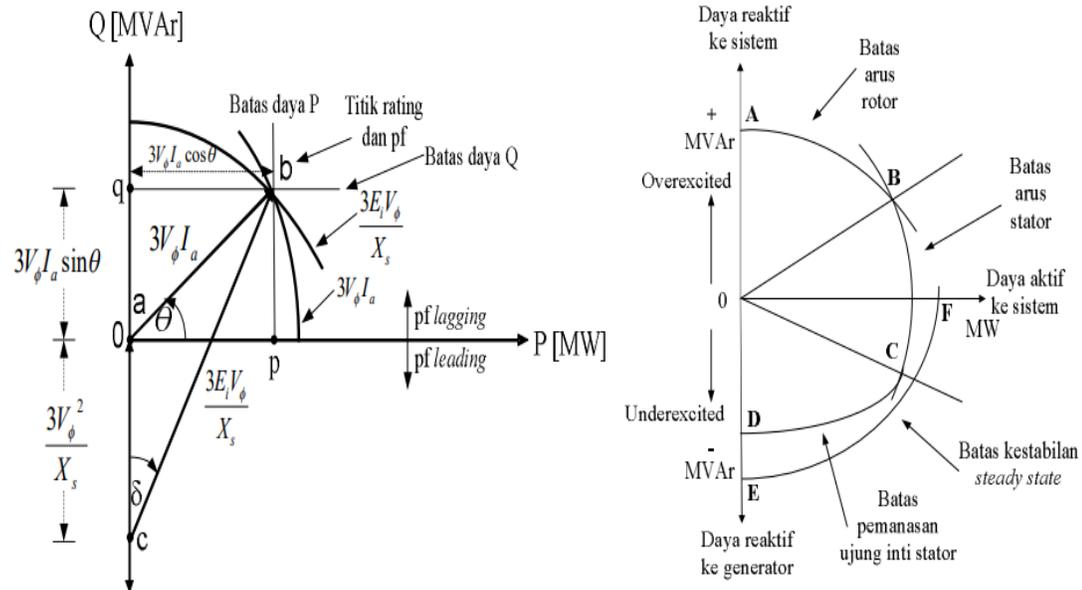
Pada kurva ini terdapat empat konstrain yang membatasi pengoperasian generator, yaitu :

1. Kemampuan maksimum prime mover, umumnya lebih kecil dari daya aktif maksimum yang dibatasi oleh arus stator generator.
2. Kemampuan maksimum dari eksitasi generator.
3. Kemampuan maksimum arus armature generator untuk menghasilkan daya.
4. Batas minimum dalam kondisi under eksitasi.

Kurva kapabilitas setiap unit generator biasanya sudah disediakan oleh pabrikan generator. Tetapi dalam prakteknya, dapat terjadi generator ternyata sudah mencapai batas maksimum pembebanannya sebelum mencapai batas maksimum yang terdapat pada kurva kapabilitas yang disediakan pabrikan generator. Hal ini mungkin terjadi karena letak beban yang jauh dari pembangkit atau besarnya nilai pembebanan yang berubah-ubah sehingga nilai batas pembangkitan maksimum atau batas kestabilan steady state generator juga menjadi lebih kecil dari nilai yang diberikan pada kurva kapabilitas generator dari pabrikan. Apabila OPF dilakukan dengan menggunakan batasan kurva kapabilitas generator yang disediakan pabrikan generator, akan terjadi pembebanan yang melebihi batas kestabilan steady state generator tersebut yang dapat mengakibatkan ketidakstabilan dalam pengoperasian unit pembangkit yang dapat berakibat pada ketidakstabilan sistem pembangkit secara keseluruhan.

Umumnya setiap generator memiliki kurva kapabilitas, Kurva ini menunjukkan besarnya kapasitas pembangkit dalam pengoperasiannya, di dalamnya terdapat pula besarnya pembangkitan daya pembangkit dengan faktor daya dan sifatnya (lagging atau leading). Kurva kapabilitas pada generator sinkron dibentuk berdasarkan batas-batas tertentu yang dimiliki oleh generator. Batas-batas tersebut adalah batas penggerak mula, batas pemanasan arus stator, batas pemanasan arus rotor dan batas pemanasan daerah ujung stator (Ranisa et al., 2015).

Contoh kurva kapabilitas:



Gambar 2.17 Diagram kurva kapabilitas.

Keterangan gambar 2.17:

$3V_{\phi} I_a \cos \theta$: Batas daya aktif [MW]

$3V_{\phi} I_a \sin \theta$: Batas daya reaktif [MVA_r]

$3V_{\phi} I_a$: Batas arus stator [A]

$\frac{3E_i V_{\phi}}{X_s}$: Batas arus rotor [A]

Titik b : Rating generator [MVA]

Menurut (Kambey et al., 2014), batas kemampuan operasi generator dalam mengirim daya ke sistem digambarkan seperti pada gambar 2.17 yang menunjukkan batas-batas berikut:

2.6.1 Batas Daya Generator

Daya aktif (P) generator dihasilkan dengan mengatur kecepatan penggerak mula generator (prime mover). Batas daya aktif generator dinyatakan oleh :

$$P = 3V\phi I_a \cos \theta \dots\dots\dots(2.16)$$

Secara visual batas daya aktif generator ditunjukkan pada gambar 2.17:

1. Dengan menarik garis vertikal dari titik b ke p yang sejajar terhadap sumbu Q.
2. Jarak titik operasi sumbu daya aktif P (MW) dinyatakan oleh $3V\phi I_a \cos \theta$.

Daya reaktif generator dihasilkan dengan mengatur sistem eksitasi generator, yakni arus penguat medan (I_f). Batas daya reaktif (Q) generator dinyatakan oleh :

$$Q = 3V\phi I_a \sin \theta \dots\dots\dots(2.17)$$

Secara visual batas daya reaktif generator ditunjukkan pada gambar 2.17:

1. Dengan menarik garis horizontal dari titik b ke q yang sejajar terhadap sumbu P.
2. Jarak titik operasi sumbu daya reaktif Q (MVA) dinyatakan oleh $3V\phi I_a \sin \theta$.

Batas daya kompleks atau daya rating generator dinyatakan oleh :

$$S = 3 V \phi I_a \dots\dots\dots(2.18)$$

Secara visual batas daya kompleks generator ditunjukkan pada gambar 2.17:

1. Titik b merupakan titik rating generator (MVA)
2. Jarak rating generator dinyatakan oleh $3V\phi I_a$

2.6.2 Batas Arus Stator (Armature Current Limit)

Arus jangkar / armature (I_a) yang mengalir pada belitan stator mengakibatkan rugi daya (I^2R). Rugi daya ini dapat mengakibatkan peningkatan suhu konduktor dan lingkungan terdekat. Jika dibiarkan, peningkatan suhu ini dapat terjadi secara terus-menerus. Oleh karena itu, salah satu batasan dalam kerja generator yaitu besar arus maksimum yang dapat dibawa oleh jangkar tanpa melebihi batas pemanasan yang diizinkan.

Secara visual batas arus stator ditunjukkan pada gambar 2.17:

1. Digambarkan sebagai lingkaran $3V\phi I_a$
2. Pusat titik lingkaran : pada titik a (0,0)

3. Panjang jari-jari lingkaran : panjang garis a-b = $3V\phi I_a$, merupakan rating generator.

2.6.3 Batas Arus Rotor (*Field Current Limit*)

Akibat adanya pemanasan yang dihasilkan dari rugi-rugi tembaga pada belitan rotor, maka arus rotor juga menentukan batas dalam operasi generator. Batas arus rotor dipengaruhi oleh arus eksitasi. Dimana arus eksitasi dapat dipertahankan konstan dengan mempertahankan arus searah I_f dibelitan medan konstan. Secara visual batas arus rotor ditunjukkan pada gambar 2.17:

1. Digambarkan sebagai lingkaran : $\frac{3E_i V \phi}{X_s}$
2. Pusat titik lingkaran: pada titik c: $\left(0, -\frac{3V^2 \phi}{X_s}\right)$
3. Panjang jari-jari lingkaran: panjang garis c-b : $\left(0, -\frac{3E_i V \phi}{X_s}\right)$

2.6.4 Batas Pemanasan Ujung Inti Stator (*Stator-End Region Heating Limit*)

Pemanasan ujung inti stator menentukan batas operasi generator dalam daerah eksitasi lemah (daerah dibawah sumbu P). Pemanasan ujung inti stator disebabkan oleh fluks bocor di celah udara. Fluks bocor tersebut merupakan hasil penjumlahan vektor fluks arus beban di belitan stator dan fluks arus searah pada belitan rotor. Sebagian besar fluks bocor melewati celah udara antara belitan stator dan rotor dan sebagian kecil fluks bocor tetap berada pada bagian akhir dari belitan stator.

Pada saat generator beroperasi dalam kondisi eksitasi lebih maka arus medan tinggi, sehingga di cincin penahan (*retaining ring*) akan mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang kecil. Pada saat beroperasi dalam kondisi eksitasi lemah maka arus medan kecil, sehingga di cincin penahan tidak mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang tinggi.

Batas pemanasan ujung inti stator (*stator end region heating limit*) digambarkan sebagai lingkaran C-D pada gambar 2.17:

1. Pusat lingkaran : $\left(0, K_1 \frac{V\phi^2}{X_s}\right)$
2. Jari-jari lingkaran : $\left(K_2 \frac{V\phi}{X_d}\right)$

Dimana:

$$K_1 = -\frac{(NaNf - N^2f)}{(N^2a + N^2f - 2NaNf)} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{\Delta T}{Kt(N^2f + N^2a - 2NaNf)}} \dots\dots\dots(2.20)$$

Keterangan:

- Na dan Nf : jumlah belitan stator dan rotor
 ΔT : suhu maksimum yang diijinkan pada bagian ujung inti stator dan rotor (*end core region*)
 K1 : konstanta penghubung pemanasan dengan fluks magnetik

2.7 Segitiga Daya

Daya listrik secara vektoris digambarkan sebagai tiga buah komponen daya yaitu daya semu atau kapasitas daya terpasang (S), daya aktif atau daya terpakai (P) dan daya reaktif (Q).

2.7.1 Daya Aktif / Nyata (P)

Daya nyata / aktif memiliki satuan Watt (W). Daya aktif merupakan daya yang dibutuhkan oleh beban resistif, dimana daya ini akan menunjukkan adanya aliran energi listrik dari pembangkit ke beban. Secara umum daya ini sering digunakan oleh konsumen dan sebagai satuan yang digunakan untuk daya listrik. Dalam kehidupan sehari-hari energi listrik yang disalurkan dari PLN ke rumahrumah, maka daya yang

tertulis pada kWh meter merupakan daya aktif dan itu merupakan daya yang akan dibayarkan oleh pelanggan. Rumus daya aktif (P) untuk sistem 3 fasa :

$$P = \sqrt{3} \times VL \times IL \times \cos \varphi \dots\dots\dots(2.21)$$

Ket :

P = Daya aktif (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Amper)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

2.7.2 Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif memiliki satuan (VAR). Daya reaktif merupakan daya yang tidak dimanfaatkan oleh konsumen, termanfaatkan oleh konsumen, namun hanya dapat dimanfaatkan khususnya pada pembangkitan dan pabrik/industri karena terdapat beban tertentu seperti motor listrik, yang memerlukan bentuk lain dari daya, yaitu daya reaktif (VAR) untuk membuat medan magnet atau dengan kata lain daya reaktif adalah daya yang terpakai sebagai energi pembangkitan flux magnetik sehingga timbul magnetisasi dan daya ini dikembalikan ke sistem karena efek induksi elektromagnetik itu sendiri, sehingga daya ini sebenarnya merupakan beban (kebutuhan).

Rumus daya reaktif (Q) untuk sistem 3 fasa :

$$Q = \sqrt{3} \times VL \times IL \times \sin \varphi \dots\dots\dots(2.22)$$

Ket :

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Amper)

$\sin \varphi$ = Faktor daya

2.7.3 Daya Semu (S)

Daya semu memiliki satuan Volt-Ampere (disingkat VA), menyatakan kapasitas peralatan listrik, seperti yang tertera pada peralatan generator dan transformator.

Rumus daya semu (S) untuk sistem 3 fasa :

$$S = \sqrt{3} \times VL \times IL \dots \dots \dots (2.23)$$

Ket :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Amper)

2.8 Faktor Daya

Faktor daya atau power factor (pf) merupakan rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya nyata (VA). Faktor daya mempunyai nilai range antara 0 – 1 dan dapat juga dinyatakan dalam persen.

Faktor daya sangat besar pengaruhnya terhadap kualitas dari sumber listrik dan kinerja dari alat-alat listrik. Akibat pemakaian KVARH yang tinggi menyebabkan pembentukan sudut faktor daya yang besar. Hasil dari melebarnya sudut daya tersebut berdampak pada rendahnya nilai faktor daya, kerugian-kerugian terhadap daya listrik dan menurunnya daya kerja efektif dari sumber listrik. Faktor daya yang lebih rendah dari < 0,99 atau 0,86 menurunkan efisiensi kerja alat listrik. Daya kerja (KW) tidak dapat berkerja secara optimal atau sebanding dengan daya yang tersedia (Putri & Pasaribu, 2018).

$$\begin{aligned} \text{Faktor Daya (Fahmi Hakim, 2014)} &= \text{Daya Aktif (P) / Daya Nyata (S)} \\ &= \text{kW/kVA} \\ &= V.I \text{ Cos } \varphi / V.I \\ &= \text{Cos } \varphi \end{aligned}$$

Faktor daya menggambarkan sudut fasa antara daya aktif dan daya semu yang terdapat pada segitiga daya. Faktor daya juga merupakan besar nilai yang didapati dari hasil perbandingan antara nilai daya aktif dengan nilai daya semu yang ada dalam sebuah rangkaian listrik (Agustianingsih et al., 2020).

Pada suatu sistem tenaga listrik memiliki 3 jenis faktor daya (Pasaribu et al., 2021), yaitu :

1. Faktor daya bernilai satu (unity): keadaan saat nilai $\cos \phi$ adalah bernilai satu dan tegangan sumber sefasa dengan arus ke beban. Faktor daya unity akan terjadi bila jenis beban adalah resistif murni.
2. Faktor daya mendahului (leading): keadaan faktor daya saat memiliki kondisi beban listrik yang beban bersifat kapasitif.
3. Faktor daya terbelakang (lagging): keadaan faktor daya saat memiliki kondisi beban atau peralatan listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif.

Sementara itu, beban listrik terdiri dari dua jenis yaitu beban linear dan beban nonlinear. Suatu beban disebut linear bila arusnya berbanding lurus terhadap tegangan sehingga bentuk gelombang arus yang mengalir ke beban akan sama dengan bentuk gelombang tegangan dari sumber. Sedangkan untuk beban nonlinear, bentuk gelombang arus tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan.

2.8.1 Faktor Daya Bernilai Satu (*Unity*)

Faktor daya unity adalah keadaan saat nilai $\cos \phi$ adalah satu dan tegangan sefasa dengan arus. Faktor daya unity akan terjadi bila jenis beban adalah resistif murni

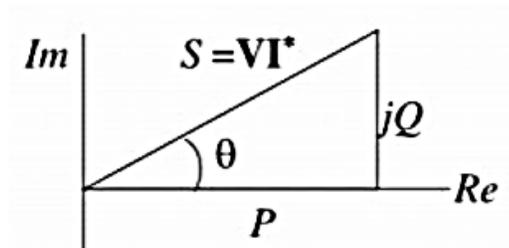


Gambar 2.18 Arus sefasa dengan tegangan

Pada gambar diatas terlihat nilai $\cos \phi$ sama dengan 1 yang menyebabkan jumlah daya nyata yang dikonsumsi beban sama dengan daya semu.

2.8.2 Faktor Daya Mendahului (*Leading*)

Faktor daya mendahului (*leading*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi beban atau peralatan listrik memberikan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat kapasitif. Apabila arus mendahului tegangan maka faktor daya ini dikatakan “*leading*”.

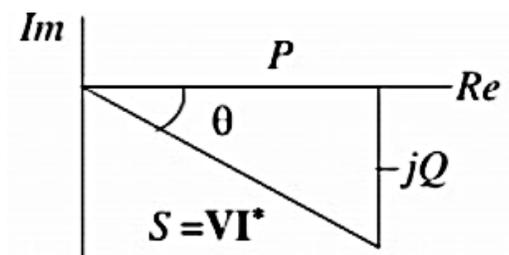


Gambar 2.19 Arus mendahului tegangan sebesar sudut phi

Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa arus mendahului tegangan maka daya reaktif tertinggal dari daya semu, berarti beban memberikan daya reaktif kepada sistem.

2.8.3 Faktor Daya Terbelakang (*Lagging*)

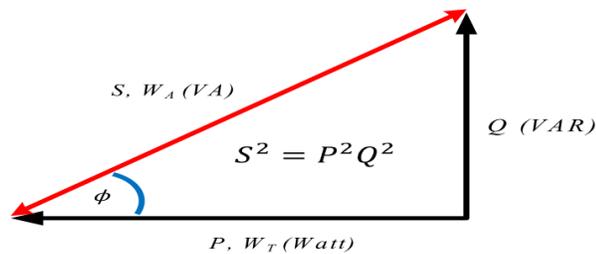
Faktor daya terbelakang (*lagging*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi beban atau peralatan listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif. Apabila tegangan mendahului arus, maka faktor daya ini dikatakan “*lagging*”.



Gambar 2.20 Tegangan mendahului arus sebesar sudut phi

Berdasarkan gambar di atas terlihat bahwa arus tertinggal dari tegangan maka daya reaktif mendahului daya semu, berarti beban membutuhkan atau menerima daya reaktif dari sistem.

Dan ketiga pengelompokan faktor daya dapat dianalogikan dengan menggambarannya dalam bentuk segitiga daya, maka daya tampak S direpresentasikan oleh sisi miring sedangkan daya nyata dan daya reaktif direpresentasikan oleh sisi-sisi segitiga yang saling tegak lurus, seperti ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.21 Diagram daya.

Maka daya nyata atau daya aktif dan daya reaktif dapat diambil saja dari bagian real dan bagian imajiner dari S .

$$\text{Daya nyata } P = V \times I \times \cos \phi \dots \dots \dots (2.24)$$

$$\text{Daya Reaktif } Q = V \times I \times \sin \phi \dots \dots \dots (2.25)$$

2.9 Sistem Eksitasi Generator

Eksitasi atau penguatan adalah sistem pasokan arus searah ke rotor generator sebagai penguat medan magnet. Arus eksitasi dialirkan pada kutub magnetik yang besarnya dapat diatur untuk memperoleh nilai tegangan output generator dan daya reaktif yang sesuai (Sari & Darwanto, 2021).

Eksitasi pada generator sinkron adalah proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip el-ektromagnet yaitu apabila suatu konduktor berupa kumparan dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan

menghasilkan fluks- fluks magnet. Apabila kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar yang terdapat pada stator akan terinduksi oleh fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan sehingga dihasilkan tegangan listrik bolak- balik. Besarnya te-gangan yang dihasilkan tergantung kepada besarnya arus eksitasi dan putaran yang diberikan pada rotor, semakin besar arus eksitasi dan putaran, maka akan semakin besar tegangan yang akan dihasilkan oleh sebuah generator (Farhan, 2021).

Eksitasi atau penguatan medan merupakan bagian yang penting dari sebuah generator sinkron. Tidak hanya untuk menjaga tegangan terminal tetap konstan tetapi juga harus merespon terhadap perubahan beban yang tiba-tiba. Eksitasi pada generator sinkron adalah pemberian arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip elektromagnet, apabila suatu konduktor yang berupa kumparan yang dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan menghasilkan fluks-fluks magnet. Apabila kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar yang terdapat pada stator akan terinduksi oleh fluksfluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan sehingga akan menghasilkan tegangan bolak-balik. Besarnya tegangan yang dihasilkan tergantung kepada besarnya arus eksitasi dan putaran yang diberikan pada rotor. Semakin besar arus eksitasi dan putaran, maka akan semakin besar tegangan yang dihasilkan oleh sebuah generator.

Sistem eksitasi mempunyai berbagai fungsi. Fungsi tersebut antara lain :

1. Mengatur tegangan keluaran generator agar tetap konstan (stabil).
2. Mengatur besarnya daya reaktif.
3. Menekan kenaikan tegangan pada pelepasan beban (load rejection).

Karena mempunyai fungsi seperti di atas maka sistem eksitasi harus mempunyai sifat antara lain:

1. Mudah dikendalikan.

2. Dapat mengendalikan dengan stabil/ sifat pengendalian stabil.
3. Mempunyai respon/tanggapan yang cepat.
4. Tegangan yang dikeluarkan harus sama dengan tegangan yang diinginkan.

Sistem yang banyak digunakan saat ini baik dengan generator sinkron tipe kutub sepatu (*salient pole*) maupun tipe rotor silinder (*non-salient pole*) adalah sistem tanpa sikat. Pengeksitasi ac mempunyai jangkar yang berputar, keluarannya kemudian disearahkan oleh penyearah dioda silikon yang juga dipasang pada poros utama.

Keluaran yang telah disearahkan dari pengeksitasi ac, diberikan langsung dengan hubungan yang diisolasi sepanjang poros ke medan generator sinkron yang berputar. Keluaran dari pengeksitasi ac, dan berarti tegangan yang dibangkitkan oleh generator sinkron, dapat dikendalikan dengan mengubah kekuatan medan pengeksitasi ac. Jadi sistem eksitasi tanpa sikat tidak mempunyai komutator, cincin-slip atau sikat-sikat yang sangat menyederhanakan pemeliharaan mesin.

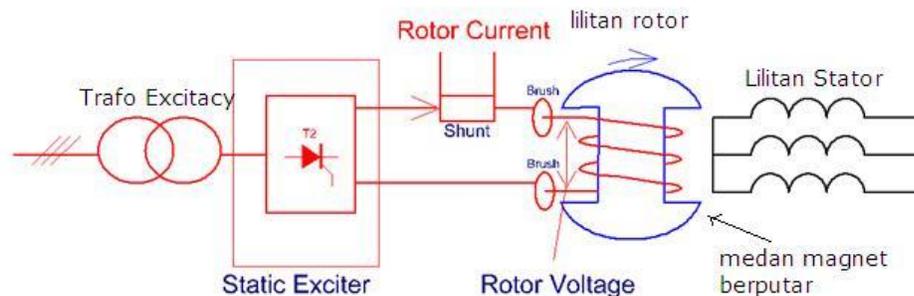
Setelah generator ac mencapai kepesatan yang sebenarnya oleh penggerak mulanya, medannya dieksitasi dari catu dc. Ketika kutub lewat di bawah konduktor jangkar yang berada pada stator, fluksi medan yang memotong konduktor menginduksikan ggl kepadanya. Ini adalah ggl bolak-balik, karena kutub dengan polaritas yang berubah-ubah terusmenerus 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 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 dikenakan pada medan generator. Sistem ini merupakan sistem yang vital pada proses pembangkitan listrik karena sistem eksitasi adalah awal dari pembangkitan listrik.

Pada perkembangannya, sistem eksitasi pada generator listrik ini dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu :

1. Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*)
2. Sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*).

2.9.1. Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Sikat (*Brush Excitation*)

Pada sistem eksitasi menggunakan sikat, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan rectifier. Jika menggunakan sumber listrik listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan permanent magnet generator (PMG), medan magnetnya adalah magnet permanen. Untuk mengalirkan arus eksitasi dari *exciter* utama ke rotor generator, menggunakan slip ring dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari pilot exciter ke *main exciter*.



Gambar 2.22 Skema Sistem Eksitasi Dengan Sikat (*Brush Excitation*)

2.9.1.1. Prinsip Kerja pada Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*)

1. Sistem eksitasi konvensional

Untuk sistem eksitasi yang konvensional, arus searah diperoleh dari sebuah generator arus searah berkapasitas kecil yang disebut dengan *exciter*. Generator arus searah tersebut terkopel dengan generator sinkron dalam satu poros, sehingga putaran generator arus searah sama dengan putaran generator sinkron. Tegangan yang dihasilkan oleh *exciter* diberikan ke belitan rotor generator sinkron melalui sikat karbon

dan slip ring. Akibatnya arus searah mengalir ke rotor dan menimbulkan medan magnet yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan arus bolak-balik pada kumparan utama yang terletak di stator generator sinkron.

2. Sistem Eksitasi Statis Statis

Sistem eksitasi statis merupakan sistem eksitasi yang menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (*static*), yang berarti peralatan eksitasi tersebut tidak ikut berputar bersama dengan rotor generator sinkron. Sistem eksitasi statis (*static excitation system*) ini biasa disebut juga dengan *self excitation* yang merupakan sistem eksitasi yang tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator sinkron tersebut. Sumber eksitasi pada sistem eksitasi statis ini berasal dari tegangan output generator itu sendiri yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan penyearah thyristor.

Pada mulanya pada rotor terdapat sedikit sisa magnet, magnet sisa ini akan menimbulkan tegangan pada stator, tegangan ini akan masuk dalam penyearah dan dimasukkan kembali ke rotor. Akibatnya medan magnet yang dihasilkan makin besar dan tegangan AC akan naik. Biasanya penyearah itu juga mempunyai pengatur yang dilakukan oleh peralatan yang disebut dengan AVR (*Automatic Voltage Regulator*).

Sistem eksitasi statis, apabila dibandingkan dengan sistem eksitasi konvensional memang sudah jauh lebih baik karena tidak ada generator arus searah (yang keandalannya rendah) dan beban pada penggerak utama berupa generator arus searah dihilangkan. Pada sistem eksitasi statis ini, untuk keperluan eksitasi awal pada generator sinkron saat belum mampu menghasilkan tegangan keluaran, maka energi yang digunakan untuk sistem eksitasi diambil dari baterai. Dan proses ini dinamakan dengan proses *field flashing*. Di mana pada proses *field flashing* ini baterai menginjeksikan arus eksitasi ke rotor generator. Hal ini dibutuhkan karena generator sinkron tidak memiliki sumber arus dan tegangan sendiri untuk mensuplai kumparan medan. Dengan adanya arus eksitasi ini maka generator akan menghasilkan tegangan keluaran (Zulhakim et al., 2023).

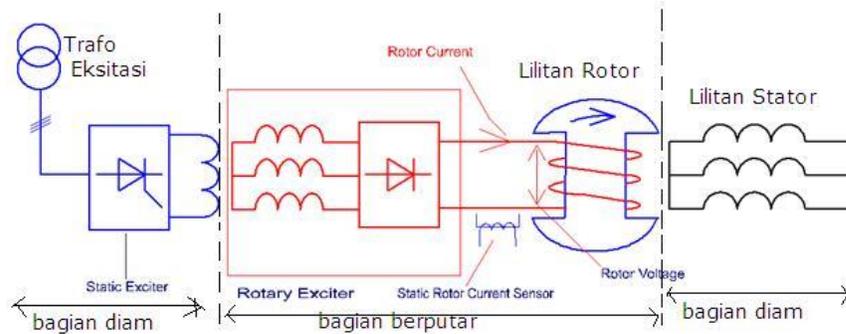
2.9.2. Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Penggunaan sikat atau slip ring untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*).

Pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak akan terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada farnish akibat sikat arang. Mengurangi kerusakan (*trouble*) akibat udara buruk (*bad atmosfere*) sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup. Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung kontiniu pada waktu yang lama. Pemutus medan generator (*generator field breaker*), *field* generator dan bus exciter atau kabel tidak diperlukan lagi. Biaya pondasi berkurang, sebab aluran udara dan bus exciter atau kabel tidak memerlukan pondasi (Nurdin et al., 2018).

Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*), antara lain adalah:

1. Energi yang diperlukan untuk eksitasi diperoleh dari poros utama (*main shaft*), sehingga keandalannya tinggi.
2. Biaya perawatan berkurang karena pada sistem eksitasi tanpa sikat tidak terdapat sikat, komutator dan slip ring.
3. Pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada farnish akibat sikat arang.
4. Mengurangi kerusakan akibat udara buruk sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup
5. Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.
6. Pemutus medan generator (*Generator field breaker*), *field* generator dan bus exciter atau kabel tidak diperlukan lagi
7. Biaya pondasi berkurang, sebab aluran udara dan bus exciter atau kabel tidak memerlukan pondasi



Gambar 2.23 Skema sistem eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

2.9.2.1. Prinsip Kerja Pada Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Generator penguat pertama disebut pilot exciter dan generator penguat kedua disebut *main exciter* (penguat utama). *Main exciter* adalah generator arus bolak-balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak-balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros *main exciter* (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus penguat generator utama. Pilot *exciter* pada generator arus bolak-balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar menginduksi pada lilitan stator. Tegangan bolak-balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub-kutub magnet yang ada pada stator *main exciter*. Besar arus searah yang mengalir ke kutub *main exciter* diatur oleh pengatur tegangan otomatis (*Automatic Voltage Regulator/AVR*).

Besarnya arus berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan oleh *main exciter*, maka besarnya arus *main exciter* juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama.

Pada sistem Eksitasi tanpa sikat, permasalahan timbul jika terjadi hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan jika ada sekering lebur dari dioda berputar yang putus, hal ini harus dapat dideteksi. Gangguan pada rotor yang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan vibrasi (getaran) berlebihan pada unit pembangkit.

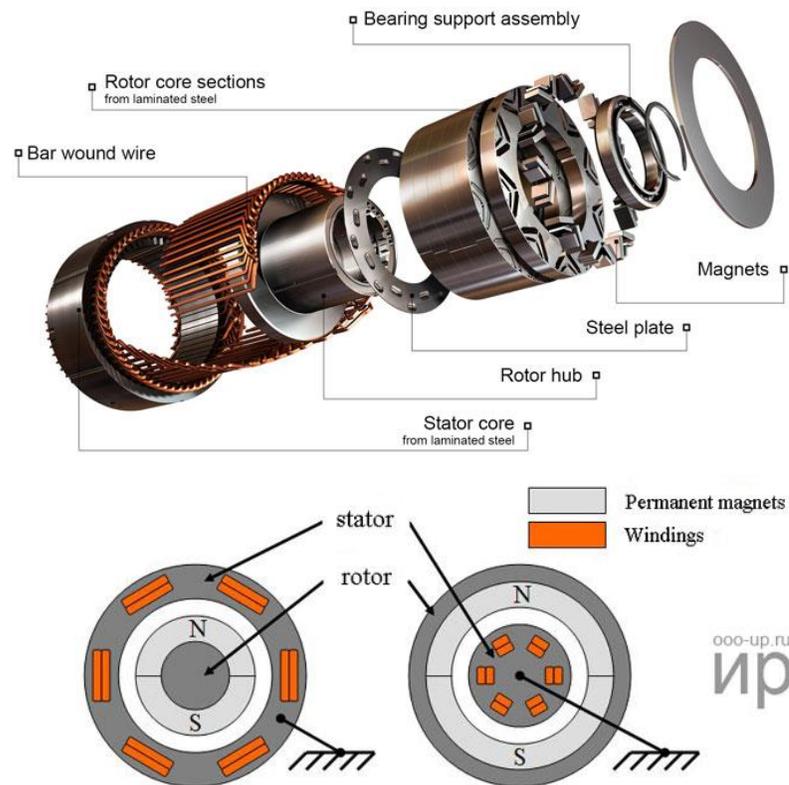
2.9.2.2. Bagian Utama Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Bagian-bagian utama dari sistem eksitasi tanpa sikat antara lain :

1. *Permanent Magnet Generator (PMG)*

Permanent Magnet Generator (PMG) adalah generator sinkron yang sistem eksitasinya menggunakan magnet permanen pada rotornya. Pada sistem eksitasi tanpa sikat digunakan PMG sebagai penyedia daya untuk eksitasi *AC exciter/main exciter* dan komponen regulator. PMG terdiri dari magnet permanen berputar dan jangkar yang diam dililit untuk output 3 fasa. PMG berputar seiring dengan berputarnya rotor. PMG sebagai pembangkit tegangan/arus AC yang disearahkan kemudian dimasukkan pada AVR (*Automatic Voltage Regulator*) untuk dikontrol. Karena tegangan/arus AC pada PMG sangat kecil, arus AC yang sudah disearahkan dimasukkan pada *exciter* untuk membangkitkan tegangan AC yang lebih besar. Arus AC keluaran *exciter* disearahkan oleh rotating diode untuk memberikan arus eksitasi pada rotor, sehingga pada rotor terdapat medan magnet.

Medan magnet tersebut menabrak kumparan – kumparan pada stator yang menghasilkan fluks listrik. Sehingga dari situ didapatkan tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator tersebut. Hal tersebut terjadi berulang – ulang setiap generator beroperasi. Sehingga tidak diperlukan sumber tegangan DC untuk eksitasi pada generator ini. Keluaran generator tersebut diambil melalui stator karena lebih mudah mengambil tegangan pada bagian yang diam dari pada mengambil tegangan pada bagian yang berputar (rotor).

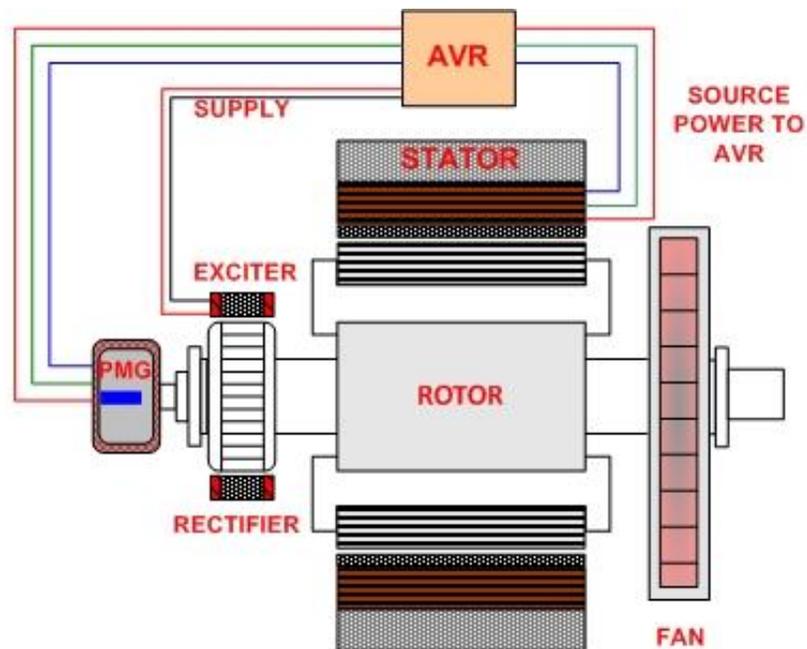


Gambar 2.24 Gambar permanen magnet generator

2. *AC exciter*

AC exciter adalah jenis yang sama dengan generator sinkron konvensional. Rotor *AC exciter* ditempatkan pada poros yang sama dengan rotating rectifier. *AC exciter* sendiri mendapatkan eksitasi pada statornya dari PMG setelah disalurkan dalam AVR. Penggunaan *AC exciter* ini bertujuan untuk memperbesar arus eksitasi agar bisa digunakan untuk mengeksitasi generator utama, setelah disalurkan dulu oleh rotating rectifier.

Rotating rectifier terdiri dari dioda silikon, fuse dan resistor. Bagian ini merupakan bagian yang digunakan untuk menyearahkan arus yang akan menuju ke rotor generator utama sebagai arus eksitasi. Berdasarkan fungsi kerjanya, ada 2 rangkaian penyearah yang digunakan pada *brushless exciter*, yaitu penyearah statis dan penyearah berputar. Karena kumparan medan generator utama terletak pada rotor, maka dioda ikut berputar dengan poros generator sehingga disebut *rotating rectifier*.



Gambar 2.25 Rotor, Kumparan AC *exciter*, Rotating Diode dan PMG yang Terletak Satu Poros

3. *Automatic Voltage Regulator*

AVR merupakan bagian yang sangat penting dalam pengaturan arus eksitasi generator. Arus keluaran dari PMG disalurkan dan diatur besarnya di AVR. Unit AVR (*Automatic Voltage Regulator*) berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator. Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan pada *exciter*. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator maka AVR akan memperbesar arus penguatan (*excitation*) pada *exciter*. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (*excitation*) pada *exciter*.

2.10 Kerja Paralel Generator

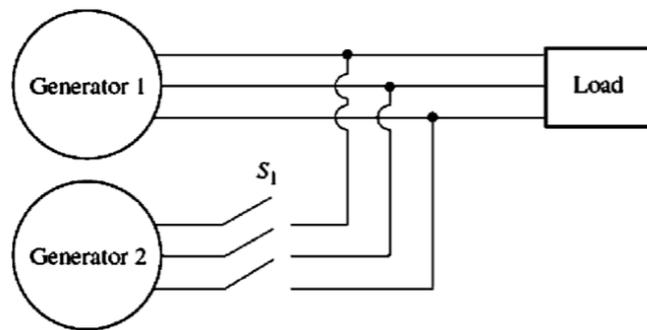
Dewasa sekarang ini, menemukan generator sinkron yang bekerja secara independen sangat jarang ditemukan. Untuk pengaplikasian generator sinkron ini biasanya terdapat lebih dari satu generator yang mensuplay daya yang dibutuhkan beban. Situasi generator sinkron bekerja secara independen biasanya Cuma dapat ditemukan pada beberapa aplikasi *out-of-the-way* seperti generator darurat. Contoh ekstrim dari situasi ini adalah jaringan listrik Amerika, dimana ribuan generator berbagi beban pada sistemnya (Iverson & Dervan, n.d.).

Ada beberapa keuntungan ketika generator sinkron dioperasikan secara parallel yaitu:

1. Beberapa generator dapat menyuplai beban yang lebih besar daripada satu mesin saja.
2. Memiliki banyak generator akan meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik, karena kegagalan salah satu generator tidak menyebabkan hilangnya daya total pada beban.
3. Memiliki banyak generator yang beroperasi secara paralel memungkinkan satu atau lebih generator dipindahkan untuk dimatikan dan dapat dilakukan pemeliharaan preventif pada generator yang tidak digunakan

Jika hanya memakai satu generator di sistem pembangkit pada beban yang sedikit dari kapasitas generator tentunya relatif tidak efisien. Dengan beberapa mesin yang lebih kecil secara paralel, hanya sebagian kecil saja yang dapat dioperasikan. Yang beroperasi mengoperasikan mendekati beban penuh sehingga lebih efisien.

2.10.1 Syarat-Syarat Paralel Generator



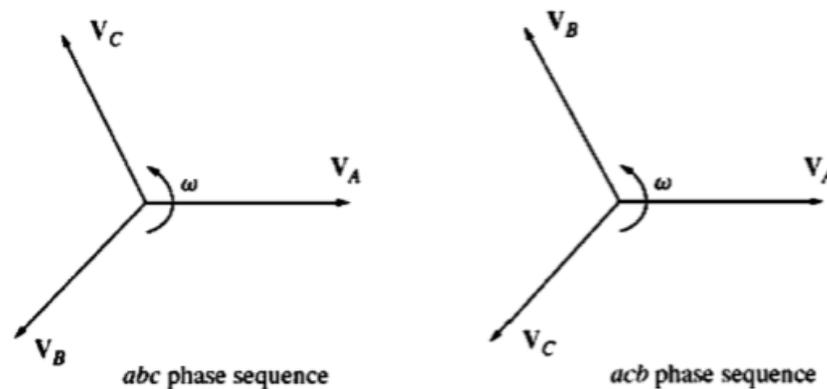
Gambar 2.26 Sebuah generator diparalelkan dengan sistem tenaga yang sedang berjalan (Iverson & Dervan, n.d.)

Gambar 2.26. menunjukkan sebuah generator sinkron G1 menyuplai daya ke suatu beban, dengan generator G2 yang lain akan diparalelkan dengan G1 dengan menutup saklar S1. Kondisi apa yang harus dipenuhi sebelum saklar dapat ditutup dan kedua generator dihubungkan?

Jika saklar ditutup sembarangan pada suatu saat, generator dapat mengalami kerusakan parah, dan beban dapat kehilangan daya. Jika tegangan pada masing-masing penghantar yang diikat tidak sama persis, maka akan terjadi aliran arus yang sangat besar ketika saklar ditutup. Untuk menghindari masalah ini, masing-masing dari ketiga fasa harus mempunyai besar tegangan dan sudut fasa yang sama persis dengan konduktor yang dihubungkan. Dengan kata lain, tegangan pada fasa a harus sama persis dengan tegangan pada fasa a', dan seterusnya untuk fasa b-b' dan c-c'. Untuk mencapai kecocokan ini, kondisi paralel berikut harus dipenuhi :

1. Tegangan saluran RMS (*Root Mean Square*) dari kedua generator harus sama.
2. Dua generator harus mempunyai urutan fasa yang sama.
3. sudut fasa dari masing masing fasa harus sama besar.
4. Frekuensi pertama generator baru yang akan diparalel harus sedikit lebih tinggi dari frekuensi sistem yang sedang berjalan.

Kondisi paralel ini memerlukan penjelasan lebih lanjut. Kondisi no.1 jelas agar dua rangkaian tegangan menjadi identik, tentu saja keduanya harus mempunyai besaran tegangan RMS yang sama. Tegangan dalam fasa a dan a' akan selalu identik jika besar dan sudutnya sama, yang menjelaskan kondisi no.3.



Gambar 2.27 Dua kemungkinan urutan fasa dari sistem tiga fasa

Kondisi 2 memastikan bahwa urutan puncak tegangan fasa pada kedua generator adalah sama. Jika urutan fasa berbeda (seperti ditunjukkan pada gambar 2.22), maka meskipun sepasang tegangan (fasa a) sefase, dua pasang tegangan lainnya berada di luar fasa sebesar tersebut sebesar 120° .

Jika generator dihubungkan dengan cara ini, tidak akan ada masalah dengan fasa a, namun arus yang besar akan mengalir di fasa b dan c, sehingga merusak kedua generator. Untuk memperbaiki masalah urutan fasa, cukup tukar koneksi pada dua dari tiga fasa di salah satu generator.

Jika frekuensi generator tidak hampir sama ketika fasa dihubungkan bersamaan, transien daya yang besar akan terjadi sampai generator stabil pada frekuensi yang sama. Frekuensi kedua mesin harus hampir sama, namun tidak bisa sama persis. Perbedaannya harus sedikit sehingga sudut fasa mesin yang melaju akan berubah secara perlahan terhadap sudut fasa sistem yang sedang berjalan. Dengan cara ini, sudut antara tegangan dapat diamati dan jaringan interkoneksi antar fasa dapat disatukan ketika sistem berada dalam fasa yang tepat.

2.10.2. Prosedur Umum Paralel Generator

Berikut adalah langkah-langkah yang harus diambil untuk menyelesaikan proses paralel generator:

1. Pertama dengan menggunakan voltmeter. Arus medan generator yang akan dihubungkan harus disesuaikan hingga tegangan sepenuhnya sama dengan tegangan saluran sistem yang sedang berjalan.
2. Kedua, urutan fasa generator yang akan dihubungkan harus dibandingkan dengan urutan fasa sistem yang sedang berjalan. Urutan fasa dapat diperiksa dengan beberapa cara berbeda. Salah satu caranya adalah dengan menghubungkan motor induksi kecil secara bergantian ke terminal masing-masing kedua generator. Jika motor berputar ke arah yang sama, maka urutan fasa kedua generator sama. Jika motor berputar berlawanan arah, maka urutan fasanya berbeda, dan dua konduktor pada generator masuk harus dibalik. Di dunia industri sekarang sudah menggunakan *Phase Rotation Indicator* untuk menentukan arah urutan fasa dan masih banyak alat lain yang bias menentukan putaran fasa generator.
3. Selanjutnya, frekuensi generator yang akan dihubungkan diatur menjadi sedikit lebih tinggi dari frekuensi sistem yang sedang berjalan. Hal ini dilakukan terlebih dahulu dengan mengamati pengukur frekuensi hingga frekuensinya mendekati dan kemudian dengan mengamati perubahan fasa antar sistem. Generator yang akan dihubungkan diatur ke frekuensi yang sedikit lebih tinggi sehingga ketika dihubungkan, ia akan mengalir ke saluran yang menyuplai daya sebagai generator, untuk mencegah generator menjadi motor saat diparalelkan.

2.11. Peralatan Sinkronisasi Generator

Sinkronisasi merupakan proses penggabungan dua sistem yang bekerja pada tegangan AC, baik pada saat sebuah generator disambungkan ke jaringan tertentu maupun penambahan unit generator yang akan diparalelkan dengan generator yang sebelumnya telah tersambung ke dalam sistem jaringan yang akan diparalelkan (Antono & Khambali, 2013).

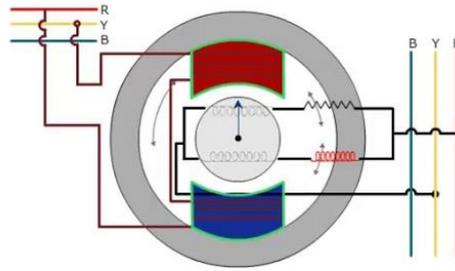
Ada beberapa peralatan yang digunakan untuk membantu proses terjadinya sinkronisasi generator di antaranya adalah:

1. *Synchroscope*
2. Volt meter
3. Frekuensi meter
4. *Automatic Synchronizer*

2.11.1 *Synchroscope*

Prinsip kerja sinkroskop didasarkan pada prinsip motor AC. Synhroscope berputar ketika ada perbedaan frekuensi generator yang masuk dan generator yang sedang berjalan. Ini dirancang sedemikian rupa sehingga frekuensi yang masuk harus lebih besar dari frekuensi yang berjalan. Penunjuk sinkroskop berputar searah jarum jam, hanya ketika frekuensi masuk lebih besar dari frekuensi berjalan. Jika sinkroskop menunjukkan perbedaan fase 0 derajat, maka kedua generator AC berada dalam fase dan disinkronkan satu sama lain. Cara kerja sinkroskop adalah, suplai dua fase ke sinkroskop disediakan oleh alternator. Fase ketiga mesin akan disinkronkan secara otomatis jika dua fase lainnya disinkronkan. Stator sinkroskop mendapat suplai dari alternator yang ada.

Pergeseran fase antara pasokan memberikan perbedaan antara frekuensi dan fase alternator, yang terhubung secara paralel satu sama lain. Kecepatan generator yang masuk ditunjukkan oleh sinkroskop. Itu berarti memeriksa apakah generator yang masuk berjalan cepat atau tidak. Itu mulai bekerja hanya ketika dua alternator atau generator, yang memiliki rentang frekuensi berbeda, terhubung paralel satu sama lain. Rotor dan penunjuk menjadi stasioner hanya jika frekuensi rotor dan stator sama. Jika frekuensi rotor dan stator berbeda, maka rotor mulai berputar dan penunjuk sinkroskop mulai membelok ke arah searah jarum jam atau berlawanan arah jarum jam. Perubahan frekuensi yang diterapkan menentukan kecepatan putaran rotor. Itu berarti, rotor mulai berputar pada kecepatan tinggi ketika perbedaan frekuensi yang diterapkan besar. Demikian pula, kecepatan rotor kurang perbedaan frekuensi suplai kurang.



Gambar 2.28. Konstruksi Synchronoscope

Generator yang masuk memiliki dua kutub yang terhubung melintasi dua fase. Belitan jangkar terdiri dari dua belitan paralel yang terhubung ke fase yang sama dalam sistem bus bar sakelar. Resistansi dihubungkan secara seri ke setengah dari satu belitan. Sedangkan induktansi dihubungkan seri dengan setengah lilitan lainnya seperti terlihat pada gambar di atas. Induktansi membantu untuk menggeser aliran arus pada sudut 90 derajat yang berhubungan dengan aliran arus dalam tahanan. Kedua arus ini disuplai ke belitan jangkar untuk menghasilkan medan magnet yang berputar bersama dengan kutub medan. Polaritas kedua kutub berubah ketika ada perubahan dalam dua fase generator/alternator yang masuk. Medan magnet yang berputar bersama dengan kutub membantu memutar rotor searah atau berlawanan arah jarum jam dan ini menghasilkan putaran penunjuk sinkroskop. Kedua mesin listrik harus memiliki voltase, level frekuensi, dan level fase yang serupa. Pengukur urutan fase membantu mengukur perbedaan fase dari alternator/generator.

Jika penunjuk sinkroskop diputar berlawanan arah jarum jam, maka generator yang masuk akan memiliki frekuensi yang kecil. Jika penunjuk generator sinkroskop berputar searah jarum jam, maka generator yang masuk akan memiliki frekuensi yang lebih banyak.

2.11.2 Volt Meter

Satuan pengukuran tegangan listrik yang digunakan secara internasional adalah Volt. Standar satuan ini pertama kali ditetapkan pada tahun 1893 bersama dengan satuan Ampere dan satuan Ohm. Hasil akhir dari pertemuan internasional tersebut adalah penetapan nilai dari satuan Volt internasional. Volt internasional dijelaskan sebagai *sel Clark* pada 15°C dengan gaya gerak listrik sebesar 1,434 Volt. Pada tanggal 1 Januari 1948 ditetapkan sebuah standar baru yang menjadi standar absolut hingga saat ini. Dalam standar absolut ditetapkan bahwa satu Volt internasional sama dengan nilai dari 1,000330 Volt absolut (Poerwanto, Hidayati, J., dan Anizar, 2012).



Gambar 2.29 VoltMeter

Voltmeter adalah alat ukur tegangan listrik. Voltmeter sering dicirikan dengan simbol V pada setiap rangkaian listrik. Voltmeter harus dipasang paralel dengan ujung-ujung hambatan yang akan diukur beda potensialnya. Satuan beda potensial listrik dalam satuan SI adalah volt atau diberi simbol V. Voltmeter sendiri mempunyai hambatan sehingga dengan disisipkannya voltmeter tersebut menyebabkan arus listrik yang melewati hambatan R sedikit berkurang (Sondang R., M., dan Masdiana S., 2018).

Pada rangkaian listrik, voltmeter merupakan suatu alat untuk mengukur besar tegangan listrik. Pergerakan jarum penunjuk pada voltmeter terjadi karena adanya gaya magnet yang timbul sebagai hasil interaksi antara medan magnet dan kuat arus listrik.

Simpangan yang dihasilkan oleh pergerakan jarum sebanding dengan kuat arus listrik yang mengalir. Arus listrik yang terukur merupakan arus listrik yang melalui kumparan yang diletakkan di antara medan magnet. Peningkatan arus berarti peningkatan simpangan pergerakan jarum sehingga akan menunjuk ke nilai pengukuran tegangan yang lebih besar. Voltmeter dipasang secara paralel dengan komponen yang akan diukur dalam rangkaian listrik.

2.11.3 Frekuensi Meter

Frekuensi merupakan jumlah gelombang dalam satu detik. Frekuensi listrik adalah banyaknya gelombang listrik yang terdapat dalam satu detik. Frekuensi listrik merupakan salah satu parameter gelombang listrik yang dapat mempengaruhi kinerja dari sistem tenaga listrik (Hanif et al., 2020).



Gambar 2.29. Frekuensi Meter

Frekuensi meter digunakan untuk mengetahui frekuensi atau gelombang sinusoidal arus bolak balik yg merupakan jumlah siklus gelombang sinusoidal tersebut perdetiknya (*cycle / second*). Frekuensi meter mempunyai peranan cukup penting untuk mensinkronisasikan (paralelkan) 2 unit mesin pembangkit dan stabilnya frekuensi merupakan petunjuk kestabilan mesin pembangkit (Suriansyah, 2019).

Prinsip kerja frekuensi meter adalah sinyal yang akan diukur frekuensinya diubah menjadi barisan pulsa, satu pulsa untuk setiap siklus sinyal. Kemudian jumlah pulsa yang terdapat pada interval waktu tertentu dihitung dengan *counter* elektronik.

2.11.4 *Automatic Synchronizer*

Proses otomatisasi sinkronisasi generator memegang peran penting dalam mencapai kehandalan dan efisiensi pembangkit listrik untuk bekerja parallel. Kegagalan dalam otomatisasi sinkronisasi, dapat menyebabkan kerusakan pada generator serta mempengaruhi peralatan-peralatan pendukung generator karena akibat adanya reverse power. Pengaturan otomatisasi sinkronisasi dilakukan oleh *Automatic Synchronizer* dengan membandingkan tegangan, frekuensi dan beda sudut fase generator dengan jaringan secara otomatis. *Automatic Synchronizer* memberikan perintah kepada AVR dan governor sehingga tercapai kondisi sinkron dan menutup CB generator.

Automatic Synchronizer umumnya membaca frekuensi listrik yang masuk di antara lebih dari satu generator yang berbeda *output* frekuensinya dan selanjutnya akan disamakan. Cara menyamakan frekuensi tersebut adalah dengan mengatur motor servo (*governor*) pada mesin diesel generator dengan tujuan mendapatkan RPM mesin yang sama antara 2 generator atau lebih. Berikut adalah penampakan dari *Automatic Synchronizer* merek Selco yang terpasang di panel listrik.

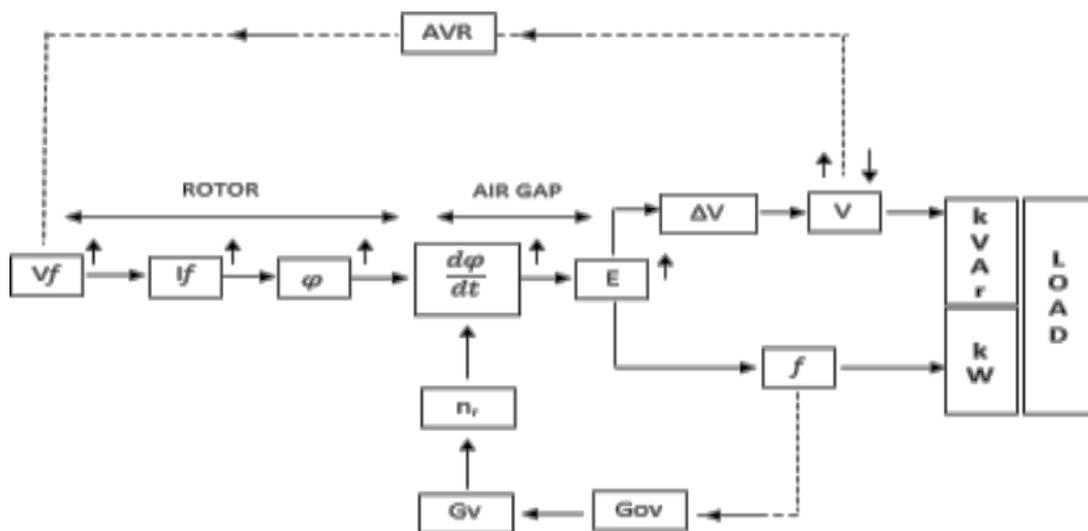


Gambar 2.30. *Automatic Synchronizer*

2.11.5 Automatic Voltage Regulation (AVR)

Regulator tegangan otomatis dapat juga disebut *Automatic Voltage Regulator* (AVR) adalah sebuah peralatan yang sangat penting dalam sistem pembangkit. Peralatan ini digunakan untuk menjaga agar tegangan output generator tetap berada pada nilai nominalnya meskipun terjadi perubahan beban. Tegangan terminal generator akan turun dari keadaan tanpa beban (*no load*) sampai beban penuh (*full load*) bila tidak ada voltage regulator mengatur agar tegangan tersebut konstan (Marpaung et al., 2021).

Generator sebagai penghasil daya listrik mengalirkan arus beban (I_a) atau memberikan daya yang dibutuhkan oleh bebannya (peralatan listrik) yaitu berupa daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). Daya yang dibutuhkan beban pada dasarnya selalu berfluktuasi (naik dan turun), maka frekuensi dan tegangan generator juga akan berfluktuasi pula. Naik dan turunnya frekuensi atau tegangan ini tidak baik bagi peralatan. Oleh sebab itu diperlukan kontrol frekuensi atau putaran (*Governor*) dan kontrol tegangan (*Automatic Voltage Regulator, AVR*), sehingga frekuensi dan tegangan tetap stabil walaupun daya beban berubah-ubah seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.31. Hubungan parameter-parameter generator

Naiknya tegangan output dirasakan oleh sensor tegangan dan sensor meneruskan sinyalnya ke AVR. Sinyal tegangan yang diterima oleh AVR diproses oleh rangkaian AVR dan selanjutnya mengirim sinyal ke U untuk memperkecil tegangan eksitasi (V_f) dan arus eksitasi (I_f) pada kumparan rotor, sehingga menurunkan fluksi medan magnet (\emptyset) yang dihasilkan oleh kumparan stator. Akibatnya, tegangan induksi (E) yang dihasilkan oleh kumparan stator menjadi turun dan pada akhirnya menurunkan kembali tegangan output generator (V) ke nilai yang di setting yaitu pada nilai tegangan normal atau nominal. Demikian juga sebaliknya apabila daya reaktif beban (Q , MVA_r) menurun, tegangan output generator turun (V), tegangan eksitasi (V_f) dan arus eksitasi (I_f) diturunkan oleh AVR, fluksi medan magnet (\emptyset) serta tegangan induksi pada kumparan stator juga ikut turun (E), dan akhirnya menurunkan kembali tegangan output generator (V) ke nilai tegangan settingnya (Marpaung et al., 2021)

Pengaturan tegangan induksi (E) pada kumparan stator dapat dilakukan dengan pengaturan tegangan eksitasi (V_f) atau arus eksitasi (I_f), dimana AVR akan menambah atau mengurangi tegangan eksitasi ke-rotor sesuai dengan yang dibutuhkan, apabila tegangan induksi dan daya reaktif ingin dinaikkan sesuai dengan kenaikan beban maka, AVR yang akan bekerja menstabilkan tegangan ke-kumparan stator, sehingga tegangan induksi dan daya reaktif pun naik sesuai kebutuhan beban, sedangkan pengaturan putar rotor (n_r) untuk mengatur frekuensi dan daya aktif yang diperlukan beban, apabila beban naik dan daya aktifnya naik maka governor berfungsi untuk menambahkan bahan bakar sehingga putaran rotor bertambah dan frekuensi nya naik.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Dalam BAB ini meliputi waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan. Penjelasan rinci akan dipaparkan sebagai berikut:

3.1. Tempat dan Waktu

Waktu Penelitian Waktu pelaksanaan penelitian ini dilakukan dalam waktu 6 bulan dari tanggal 8 Februari 2024 sampai 8 Agustus 2024. Dimulai dengan persetujuan proposal ini sampai selesai penelitian.

3.2. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan pada kapal MT. Double Seven yang merupakan salah satu kapal milik PT.Waruna Shipyard Indonesia, yang beralamat di jln. Bagan Deli Lama, Medan, Belawan 1, Kota Medan, Sumatra Utara 20411.

3.3. Data Penelitian

Data penelitian yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari kapal MT. Double Seven di PT Waruna Shipyard Indonesia. Adapun data yang di ambil di antaranya adalah:

1. Data Spesifikasi Generator
2. Data Operasi Generator

3.3.1. Data Spesifikasi Generator

Kapal ini memiliki 3 buah generator utama dan 1 generator *emergency* yang mana generator yang akan di teliti adalah generator 1 dan generator 2 dengan tipe yang sama antara. Berikut adalah data spesifikasi dari ketiga generator tersebut.

HYUNDAI 3~ SYN.GENERATOR			
1	TYPE	HFCS 506-14K	
2	MOUNTING	B5/b20	
3	IP	23	
4	RAT	CONT	
5	RPM	720	60 HZ
6	P.F	0.8	
7	INSUL.CLASS	F	
8	MAIN	AC 450 1186.7 925	V A KVA
9	EXITER	DC 75 7.5	V A
10	WT	4200	KG

3.3.2. Data Operasi Generator

Data operasi generator berkaitan tentang pengukuran serta perhitungan daya, arus, dan tegangan pada generator. Dalam karya skripsi ini, pengumpulan data operasi akan dilakukan bersamaan dengan pengaturan arus eksitasi pada generator dan akan ditampilkan di bab 4 yang nantinya akan dilakukan perhitungan untuk mengetahui bagaimana pengaruh daya reaktif terhadap tegangan eksitasi generator.

3.4. Alat dan Bahan

Pada proses penelitian ini alat dan bahan yang digunakan adalah:

1. Avometer
2. Tang ampere (*Ampere clamp*)
3. Aplikasi perhitungan
4. 2 unit Generator 925 KVA
5. 3 Phase Power Analyzer

3.5. Metode Penelitian

Pengumpulan data merupakan bagian yang penting dalam sebuah penelitian menyatakan bahwa menyusun instrumen adalah pekerjaan yang penting dalam penelitian akan tetapi mengumpulkan data jauh lebih penting. Adapun metode pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah :

1. Studi Literatur
Dilakukan dengan membaca dari berbagai sumber yang mendukung dalam penyelesaian tugas akhir.
2. Observasi
Observasi dilakukan langsung dilokasi penelitian yang bertujuan untuk mengumpulkan data-data yang dibutuhkan.
3. Analisis
Menghitung dan memahami data yang diperoleh sehingga dapat meyakinkan sistem berjalan dengan baik.

3.6. Perancangan Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa tahap untuk melakukan penelitian diantaranya:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini, penulis melengkapi kosakata konsep dan teori yang melatarbelakanginya dengan mencari dan memahami landasan teori dari berbagai buku, jurnal, artikel, dll. Kemudian menggunakan sumber literatur untuk mendukung pembahasan penelitian ini.

2. Pengolahan Data

Tahap ini dilakukan melalui survei langsung ke lapangan tempat penelitian dan dilakukan pengumpulan data. Data yang dikumpulkan adalah spesifikasi generator serta melakukan pengukuran disaat pengaturan arus eksitasi dilakukan pada generator 1 dan generator 2 di kapal MT. Double Seven.

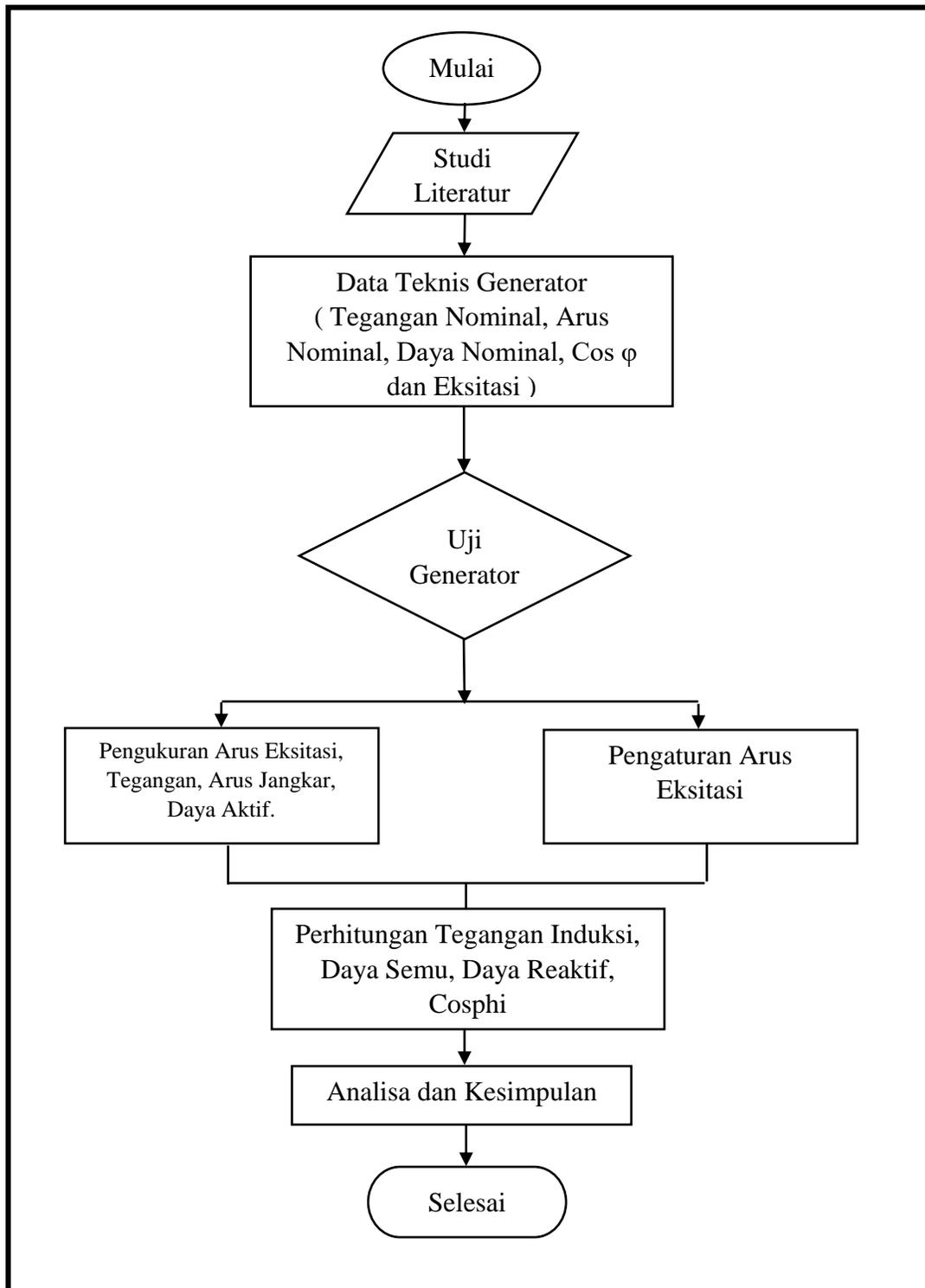
3. Analisa Hasil

Perhitungan Hasil dari pengolahan data akan di analisa untuk mendapatkan nilai faktor daya, daya aktif, semu dan reaktif yang tepat.

4. Pembuatan Laporan

Hasil dari keseluruhan akan dituliskan pada tugas akhir. Pelaporan dilakukan secara sistematis dan sesuai dengan prosedur yang ditetapkan.

3.7.Flowchart



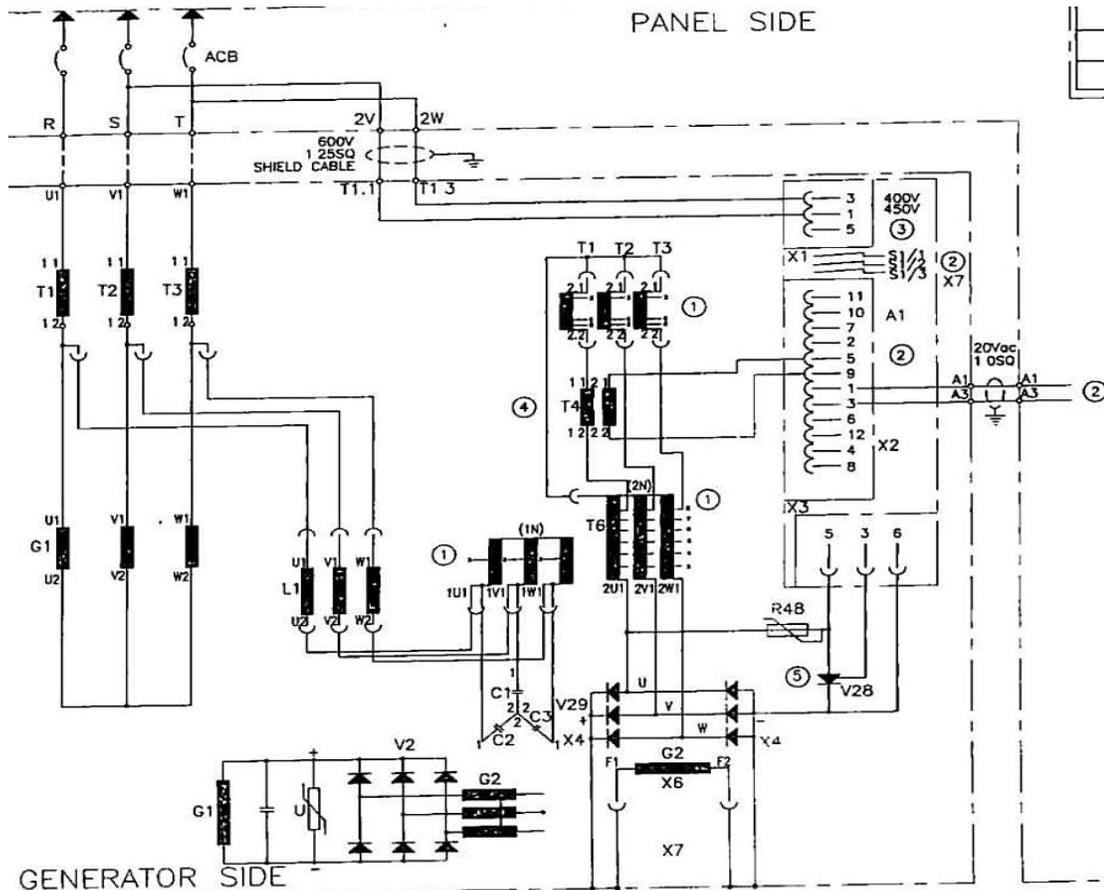
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Variasi Tegangan Keluaran Dan Cos ϕ Generator.

4.1.1 Proses Pembangkitan Dan Suplai Generator

Sebelum pada inti pembahasan, pada sub bab ini akan dijelaskan bagaimana proses pembangkitan yang terjadi pada generator. Setiap sistem pembangkitan generator biasanya berbeda-beda sesuai dengan jenisnya. Berikut adalah proses terjadinya pembangkitan pada generator yang akan dianalisis.



Gambar 4.1. Wiring Diagram AVR (Automatic Voltage Regulator) Kapal
MT.Double Seven

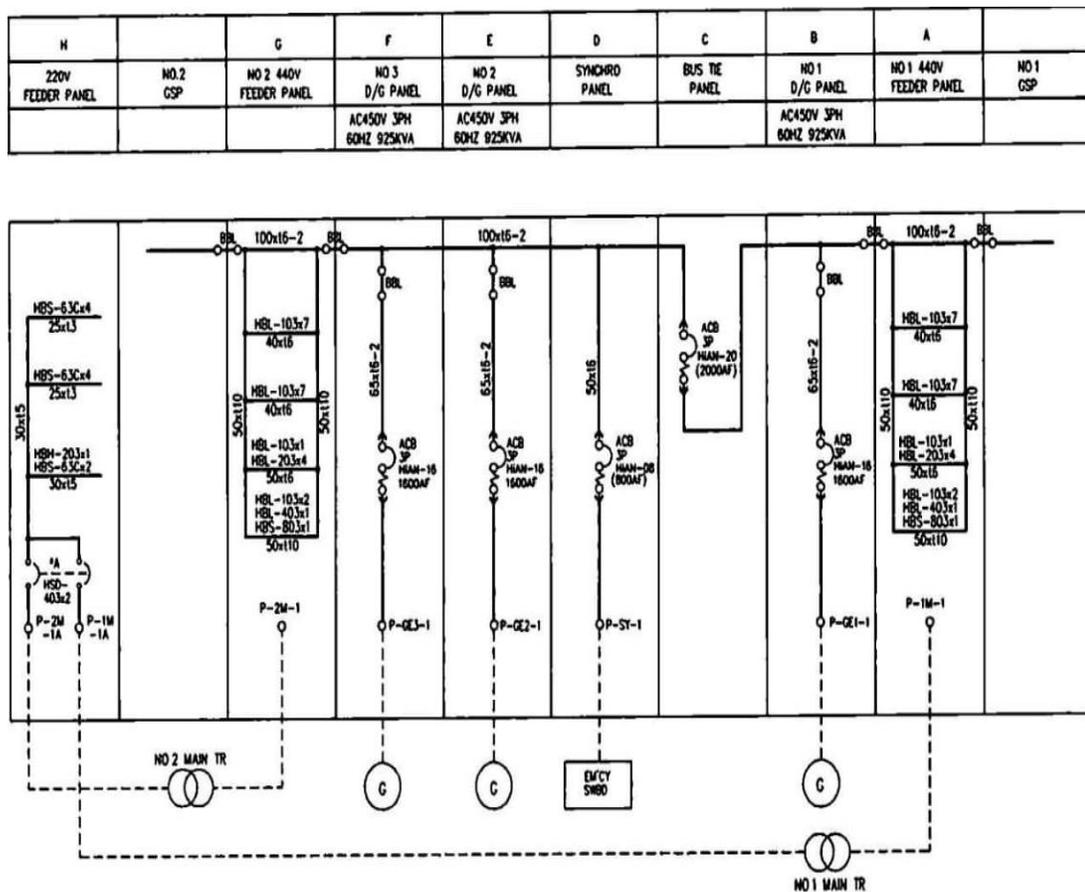
Gambar 4.1 adalah diagram dari sistem eksitasi kapal yang di analisis, dimana sistem eksitasi tersebut menggunakan AVR (*Automatic Voltage Regulator*) sebagai pengontrol sistem eksitasinya.

Sistem *looping* terjadi disini, dimana saat rotor yang digerakkan oleh mesin menginduksi medan magnet ke stator (G1) lalu menghasilkan tegangan jangkar. Pada saat putaran pertama tegangan jangkar tersebut belum mencapai tegangan normal sampai rotor sudah menghasilkan medan magnet lalu menginduksikannya ke stator. Selanjutnya tegangan jangkar tadi di alirkan ke trafo *reactor* (L1) untuk menjaga tegangan tetap konstan. Kemudian tegangan di alirkan ke sisi primer trafo rectifier (T6:1N) parallel dengan kapasitor (C1,C2,C3), sedangkan tegangan dari sisi sekunder trafo rectifier (T6:2N) dihubungkan ke rectifier modul (V29) untuk di searahkan. Setelah tegangan menjadi DC, tegangan akan di hubungkan ke exciter (G2) untuk membangkitkan tegangan listrik pada exciter. Setelah exciter membangkitkan tegangan listrik AC, maka tegangan listrik akan di searahkan lagi denga rotating rectifier (V2) dimana tegangan yang duhasilkan dari exciter tersebut di induksikan ke rotor untuk menghasilkan medan magnet yang akan menginduksi gulungan stator.

Besar kecilnya tegangan dan arus yang keluar dari *rectified modul* di kontrol dengan AVR (*Automatic Voltage Regulator*), dimana AVR membaca arus dan tegangan jangkar lalu mengontrol sistem eksitasi pada exciter agar tegangan keluaran tetap konstan.

Disaat tegangan generator sudah sesuai dengan yang di inginkan akhirnya beban bisa dihubungkan dengan generator. Setelah beban di hubungkan, generator boleh diparalel dengan syarat tegangan kedua generator harus mempunyai amplitudo yang sama, tegangan kedua generator harus mempunyai frekuensi yang sama, tegangan antar generator harus sefase, urutan fasanya harus sama, sudut fasanya harus sama.

Sistem parallel generator pada kapal MT.Double Seven dihubungkan dengan interkoneksi busbar antar generator dengan PMT menggunakan ACB (*Air Circuit Breaker*) sebagai pemutus sekaligus pengaman beban lebih. Sistem interkoneksi generator bisa dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Wiring Diagram Jaringan Interkoneksi Generator di Kapal MT.Double Seven

Gambar 4.2. menunjukkan bahwa kapal memiliki 3 buah generator utama yang dipisahkan oleh ACB (*Air Circuit Breaker*) berkapasitas 1600A dengan mekanikal *interlock* (BBL) dimana 3 generator tersebut bisa mensuplay *feeder panel* 440 V no 1 dan *feeder panel* 440 V no 2 jika ACB (*Air Circuit Breaker*) berkapasitas 2000A pada *bustie* panel dikoneksikan. Jika *bustie* panel tidak dihubungkan maka generator no 1 hanya bisa mensuplay *feeder panel* 440 V no 1 sedangkan generator no 2 dan 3 hanya bisa mensuplay *feeder panel* 440 V no 2 dengan *single* atau *parallel*. Selain itu ada 1 buah *feeder panel* 220 V yang di suplay oleh trafo *stepdown* no 1 dan 2 dimana sumber trafo tersebut diambil dari *feeder panel* 440 V no 1 dan 2. Pada panel 220 V *supply* dari trafo *step down* dipasangkan *interlocking* sehingga tegangan dari masing-masing trafo *stepdown* tidak bertemu satu sama lain.

4.1.2 Pengujian dan Pengukuran Beban Paralel Generator

Berdasarkan model penelitian pada bab 3 pada tugas akhir ini, analisis dilakukan mengenai pengaruh perubahan arus eksitasi terhadap daya reaktif generator yang sedang paralel.

Adapun data hasil penelitian tentang pengaruh perubahan arus eksitasi terhadap daya reaktif generator yang didapatkan dengan melakukan pengujian pada generator dapat terlihat pada tabel 4.1 dan tabel 4.2 di bawah ini.

Tabel 4.1. Hasil pengujian beban paralel generator 1

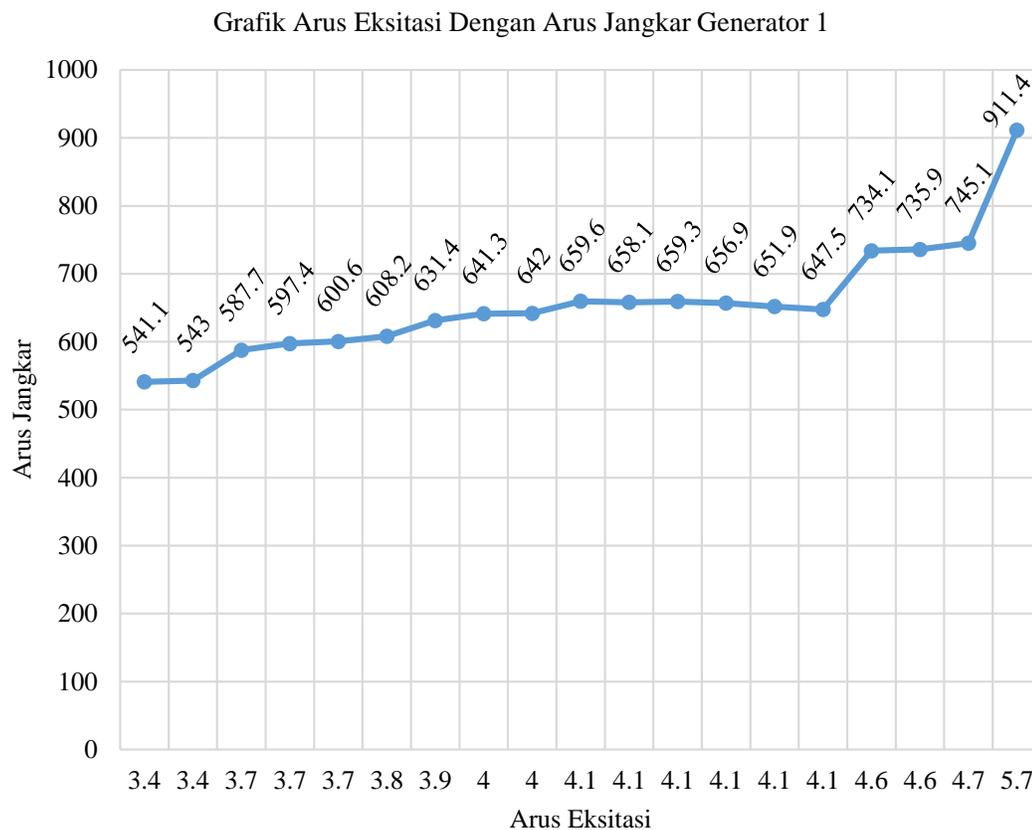
No	Daya aktif (KW)	V out (V)	Arus (A)	Tegangan eksitasi (VDC)	Arus Eksitasi (A)
1	392	441	734,1	39,2	4,6
2	400	441,5	608,2	39,3	3,8
3	394	441	659,6	39,2	4,1
4	399	441,8	641,3	39,6	4
5	402	441,7	541,1	39,6	3,4
6	401	441,8	543	39,7	3,4
7	395	441,4	658,1	39,5	4,1
8	399	441,4	587,7	39,5	3,7
9	398	441,6	735,9	39,5	4,6
10	395	441,2	659,3	39,3	4,1
11	397	441,6	631,4	39,5	3,9
12	391	441,6	745,1	39,5	4,7
13	398	441,1	656,9	39,2	4,1
14	387	441,2	911,4	39,3	5,7
15	394	441,1	651,9	39,3	4,1
16	398	441,1	597,4	39,2	3,7
17	395	441,3	647,5	39,4	4,1
18	394	441,2	642	39,3	4
19	400	440,9	600,6	38,7	3,7

Tabel 4.2. Hasil pengujian beban parallel generator 2

No	Daya aktif (KW)	V out (V)	Arus (A)	Tegangan eksitasi (VDC)	Arus Eksitasi (A)
1	398	441,2	582,8	39,3	3,6
2	395	441,5	620	39,3	3,9
3	392	441	673,4	39,1	4,2
4	397	441,3	589,6	39,6	3,7
5	393	441,4	663,2	39,6	4,1
6	395	441,2	624,1	39,7	3,9
7	395	441,4	578,56	39,5	3,6
8	392	441,4	711,1	39,5	4,4
9	403	441,6	575,2	39,5	3,6
10	399	441,2	585,3	39,3	3,6
11	397	441,6	602,1	39,5	3,8
12	406	441,6	589,7	39,5	3,7
13	403	441,1	586	39,2	3,7
14	396	441,2	606	39,3	3,8
15	404	441,1	584,9	39,3	3,6
16	398	441,1	647,1	39,2	4
17	396	441,3	610,2	39,4	3,8
18	406	441,2	586,4	39,3	3,7
19	398	440,9	602,1	38,9	3,8

Tabel 4.1 dan 4.2 merupakan hasil pengukuran tegangan keluaran generator, arus jangkar, tegangan eksitasi, dan arus eksitasi yang di ukur menggunakan AVO meter dan tang ampere. Sedangkan perngukuran daya aktif (KW) menggunakan KW meter yang telah terkalibrasi dan terpasang pada panel generator. Hasil pengukuran tersebut selanjutnya akan digunakan untuk perhitungan tegangan induksi, daya semu, daya reaktif, dan faktor daya untuk mengetahui seberapa besarnya pengaruh arus eksitasi terhadap daya reaktif generator.

Dari tabel 4.1 dan 4.2 terlihat pengaruh naik turunnya arus eksitasi sangat berpengaruh signifikan pada arus jangkar. Berdasarkan hasil pengukuran pada tabel tersebut, diperoleh hubungan grafik antara arus eksitasi dengan arus jangkar seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.3. Hubungan Arus Eksitasi Dengan Arus Jangkar Pada Generator 1

Gambar 4.3 menunjukkan hubungan antara arus eksitasi dengan arus jangkar bahwa arus jangkar terendah sebesar 541,1 A didapati nilai eksitasi sebesar 3,4 A dan nilai arus jangkar tertinggi sebesar 911,4 A didapati nilai eksitasi sebesar 5,7 A. Data ini menunjukkan bahwa arus magnetisasi berbanding lurus dengan arus jangkar generator sinkron. Pada grafik menunjukkan adanya perubahan pada fluktuasi arus jangkar keluaran generator, hal ini disebabkan karena adanya perubahan nilai arus eksitasi, sehingga terdapat simpangan rata-rata arus jangkar sebesar:

$$SR = \frac{\sum_{i=1}^n |xi-x|}{n} \dots\dots\dots(4.1)$$

dimana:

SR = Simpangan rata-rata

xi = Data ke-i

x = Rata-rata hitung

n = Banyaknya data

hasil:

$$SR = \frac{1}{19} \times 1034,48$$

$$SR = 54,44 \text{ A}$$

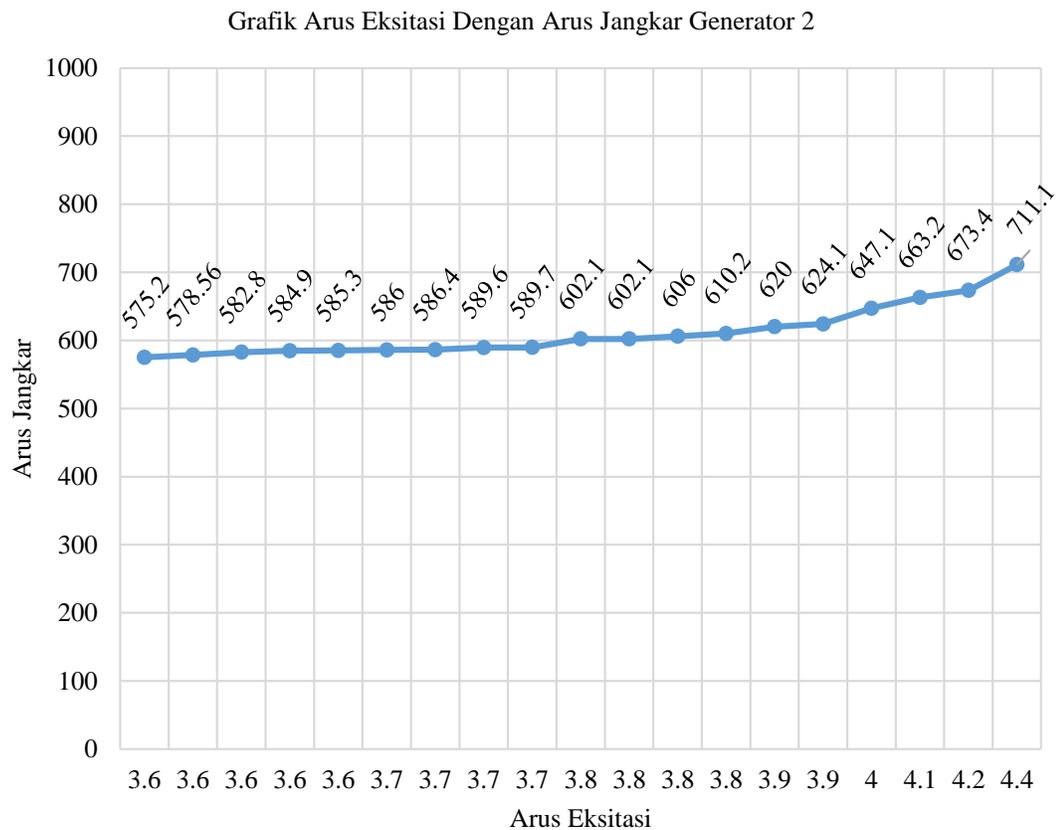
dan simpangan rata-rata arus eksitasi sebesar:

$$SR = \frac{1}{19} \times 6.51$$

$$SR = 0,342 \text{ A.}$$

Rumus simpangan rata-rata dibuat untuk mengetahui seberapa besar pengaruh fluktuasi yang di hasilkan pada arus eksitasi terhadap nilai arus jangkar. Seperti yang pada penjelasan gambar 4.3, bahwa setiap arus eksitasi berfluktuasi sebesar 0,342 A maka akan mempengaruhi nilai arus jangkar sebesar 54,44 A pada gambar 4.3 tersebut.

Pada tahap selanjutnya, hasil simpangan rata-rata akan langsung di tampilkan tanpa menulis ulang rumus yang telah di buat pada penjelasan gambar 4.3.



Gambar 4.4. Hubungan Arus Eksitasi Dengan Arus Jangkar Pada Generator 2

Gambar 4.4 menunjukkan hubungan antara arus eksitasi dengan arus jangkar menunjukkan bahwa arus jangkar terendah sebesar 575,2 A pada nilai eksitasi sebesar 3,6 A dan nilai arus jangkar tertinggi sebesar 711,1 A pada nilai eksitasi 4,4 A. Data ini menunjukkan bahwa arus magnetisasi berbanding lurus dengan arus jangkar generator sinkron. Pada grafik menunjukkan adanya perubahan pada fluktuasi arus jangkar keluaran generator, hal ini disebabkan karena adanya perubahan nilai arus eksitasi sehingga terdapat simpangan rata-rata arus jangkar sebesar 28,44 A pada simpangan rata-rata arus eksitasi sebesar 0,169 A.

4.1.3 Perhitungan Tegangan Induksi Ea

Sebelum bisa mencari berapa tegangan induksi (Ea) yang ada pada sistem eksitasi diperlukan mencari besar tahanan pada Z base sebagai berikut.

$$Z \text{ base} = \frac{V \text{ base}/\sqrt{3}}{I \text{ base}} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$Z \text{ base} = \frac{450/\sqrt{3}}{1186,7}$$

$$Z \text{ base} = 0,21 \Omega$$

Perhitungan Z base digunakan untuk mencari besar nilai Xs dalam ohm yang selanjutnya akan digunakan dalam perhitungan tegangan induksi pada generator.

$$Z \text{ base} = 0,21 \Omega$$

$$Xs \text{ dalam } \Omega = 1.81 \times Z \text{ base} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$Xs = 1.81 \times 0.21$$

$$Xs = 0.38 \Omega$$

Setelah mendapatkan nilai Xs, maka kita dapat mencari tegangan induksi (Ea) dengan rumus sebagai berikut.

$$Ea = V_{out} + jXsI_a \dots\dots\dots(4.4)$$

$$Ea = 441 + j0,38 \times 734,1$$

$$Ea = 441 + j278.95$$

$$Ea = 441 + \sqrt{-1} \times 278,95$$

$$Ea = \frac{7\sqrt{2222809}}{20} <32,31^\circ$$

$$Ea = 521.81 \text{ V } <32,31^\circ$$

Perhitungan nilai Ea dilakukan pada masing-masing generator selama percobaan dan hasil dari perhitungan masing masing tegangan induksi akan ditampilkan di dalam tabel 4.3 dn 4.4.

Tabel 4.3. Hasil perhitungan tegangan induksi generator 1 saat paralel

No	EA (V)	Daya aktif (KW)	V out (V)	Arus (A)	Arus Eksitasi (A)
1	521,82 V < 32,31°	392	441	734,1	4,6
2	498,33 V < 27,63°	400	441,5	608,2	3,8
3	507,25 V < 29,61°	394	441	659,6	4,1
4	504,55 V < 28,88°	399	441,8	641,3	4
5	487,21 V < 24,96°	402	441,7	541,1	3,4
6	487,6 V < 25,03°	401	441,8	543	3,4
7	507,31 V < 29,53°	395	441,4	658,1	4,1
8	494,68 V < 26,83°	399	441,4	587,7	3,7
9	522,69 V < 32,34°	398	441,6	735,9	4,6
10	507,37 V < 29,58°	395	441,2	659,3	4,1
11	502,5 V < 28,51°	397	441,6	631,4	3,9
12	524,57 V < 32,6°	391	441,6	745,1	4,7
13	506,83 V < 29,5°	398	441,1	656,9	4,1
14	560,89 V < 38,13°	387	441,2	911,4	5,7
15	505,9 V < 29,31°	394	441,1	651,9	4,1
16	496,08 V < 27,23°	398	441,1	597,4	3,7
17	505,25 V < 29,14°	395	441,3	647,5	4,1
18	504,15 V < 28,94°	394	441,2	642	4
19	496,46 V < 27,36°	400	440,9	600,6	3,7

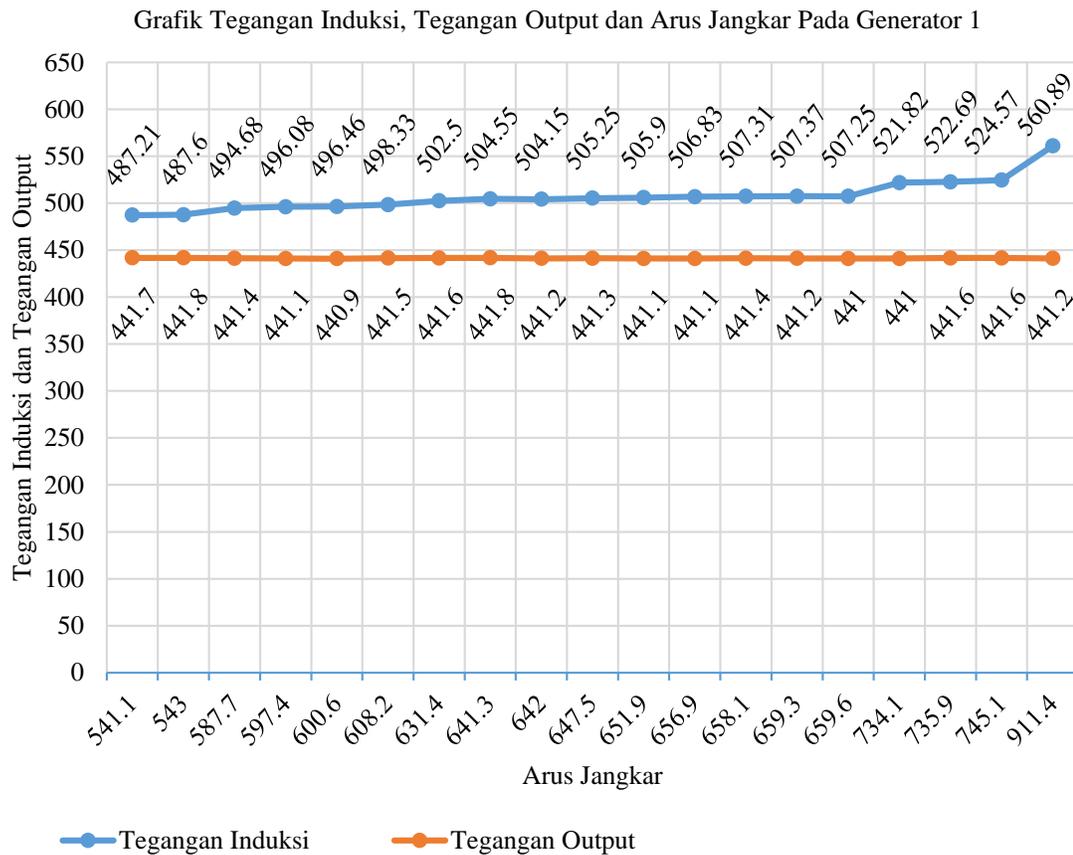
Tabel 4.3 adalah hasil dari perhitungan tegangan induksi generator 1 saat paralel dengan generator 2. Tegangan induksi dihitung satu persatu selama percobaan dilakukan bersamaan dengan generator 2. Dari tabel 4.3 tersebut terlihat bahwa fluktuasi pada arus eksitasi sangat berpengaruh pada besarnya tegangan induksi dan juga arus jangkar, tetapi tidak berpengaruh signifikan terhadap KW (daya aktif) karena daya aktif disini adalah besarnya kapasitas beban yang di suplay generator. Sementara pada tegangan *output* fluktuasi yang dihasilkan lumayan kecil karena regulator tegangan mengatur sistem eksitasi agar tegangan *output* dapat stabil.

Tabel 4.4. Hasil perhitungan tegangan induksi generator 2 saat paralel

No	EA (V)	Daya aktif (KW)	V out (V)	Arus (A)	Arus Eksitasi (A)
1	493,66 V < 26,65°	398	441,2	582,8	3,6
2	500,42 V < 28,08°	395	441,5	620	3,9
3	509,86 V < 30,12°	392	441	673,4	4,2
4	494,91 V < 26,91°	397	441,3	589,6	3,7
5	508,27 V < 29,72°	393	441,4	663,2	4,1
6	500,9 V < 28,25°	395	441,2	624,1	3,9
7	493,12 V < 26,47°	395	441,4	578,56	3,6
8	517,54 V < 31,47°	392	441,4	711,1	4,4
9	492,73 V < 26,33°	403	441,6	575,2	3,6
10	494,09 V < 26,75°	399	441,2	585,3	3,6
11	497,35 V < 27,38°	397	441,6	602,1	3,8
12	495,2 V < 26,9°	406	441,6	589,7	3,7
13	494,24 V < 26,81°	403	441,1	586	3,7
14	497,68 V < 27,56°	396	441,2	606	3,8
15	493,93 V < 26,74°	404	441,1	584,9	3,6
16	505 V < 29,13°	398	441,1	647,1	4
17	498,5 V < 27,71°	396	441,3	610,2	3,8
18	494,27 V < 26,79°	406	441,2	586,4	3,7
19	496,73 V < 27,42°	398	440,9	602,1	3,8

Tabel 4.4 adalah hasil dari perhitungan tegangan induksi generator 2 saat paralel dengan generator 1. Tegangan induksi dihitung satu persatu selama percobaan dilakukan bersamaan dengan generator 1. Tegangan induksi tidak sama dengan tegangan *output* terminal generator atau tegangan jangkar generator, kecuali saat tidak ada arus jangkar yang membuat generator berbeban.

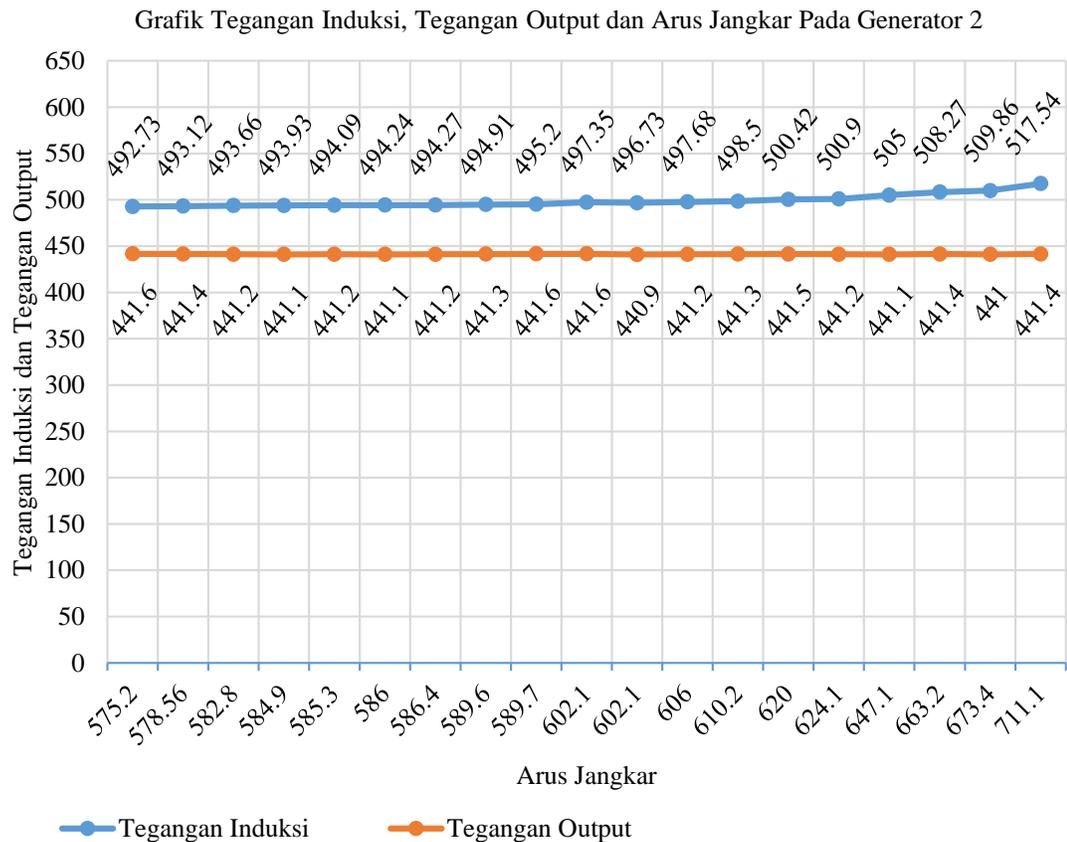
Berdasarkan hasil perhitungan dan pengukuran pada tabel 4.3 dan 4.4 diperoleh hubungan grafik antara tegangan induksi dengan arus jangkar dan tegangan *output* seperti pada gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4.5. Grafik Tegangan Induksi, Tegangan Output dan Arus Jangkar Pada Generator 1

Gambar 4.5 menunjukkan kurva grafik perbedaan tegangan induksi generator pada setiap pengukuran dan perhitungan yang dilakukan. Pada saat pengukuran arus jangkar sebesar 541,1 A didapatkan tegangan induksi sebesar 487,21 volt dan arus jangkar sebesar 911,4 A didapatkan tegangan induksi sebesar 560,89 volt. Sedangkan pada pengukuran arus jangkar sebesar 541,1 A didapatkan tegangan output sebesar 441,7 volt dan pengukuran arus jangkar sebesar 911,4 A didapatkan tegangan output sebesar 441,2 volt.

Dari gambar 4.5 di dapati simpangan rata-rata arus jangkar sebesar 54,44 A, pada tegangan induksi sebesar 10,55 volt, sedangkan pada tegangan *output* hanya memiliki simpangan rata-rata sebesar 0,24 volt.



Gambar 4.6. Grafik Tegangan Induksi, Tegangan Output dan Arus Jangkar Pada Generator 2

Gambar 4.6 menunjukkan kurva grafik perbedaan tegangan induksi generator pada setiap pengukuran dan perhitungan yang dilakukan. Pada saat pengukuran arus jangkar sebesar 575,2 A didapatkan tegangan induksi sebesar 492,73 volt dan arus jangkar sebesar 711,1 A didapatkan tegangan induksi sebesar 517,54 volt. Sedangkan pada pengukuran arus jangkar sebesar 575,2 A didapatkan tegangan output sebesar 441,6 volt dan pengukuran arus jangkar sebesar 711,1 A didapatkan tegangan output sebesar 441,4 volt.

Dari gambar 4.6 di dapati simpangan rata-rata arus jangkar sebesar 28,44 A, pada tegangan induksi sebesar 5,14 volt, sedangkan pada tegangan *output* hanya memiliki simpangan rata-rata sebesar 0,17 volt.

Pada gambar 4.5. dan gambar 4.6. menunjukkan bahwa pengaruh arus jangkar (I) terhadap tegangan induksi atau GGL induksi (E_a) serta tegangan keluaran pada generator 1 dan 2 di kapal PT. Waruna Shipyard Indonesia menunjukkan bahwa terjadi kecenderungan peningkatan nilai dari GGL induksi (E_a) apabila nilai arus jangkar yang dihasilkan semakin besar. Hal tersebut merupakan pengaturan dari sistem eksitasi generator yang menginjeksikan arus eksitasi ke exciter.

4.1.4 Perhitungan Daya Semu dan $\text{Cos } \phi$

Menghitung daya semu (S) diperlukan untuk mengetahui besar $\text{Cos } \phi$ dan besar daya reaktif (Q). Perhitungan daya semu juga dilakukan pada masing-masing pengukuran generator no 1 dan generator no 2 selama percobaan, maka dapat dihitung daya semu generator dengan perhitungan sebagai berikut.

$$S = V \times I \times \sqrt{3} \dots \dots \dots (4.5)$$

$$S = 441 \times 734,1 \times \sqrt{3}$$

$$S = 560,73 \text{ kVA}$$

Pada persamaan 4.4 tersebut, nilai V dan I di dapat dari data no 1 pada tabel 4.3. Setelah menghitung daya semu (S) selama percobaan maka dapat dihitung besar power faktor dari masing-masing generator dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Cos } \phi = \frac{\text{Daya Aktif (P)}}{\text{Daya Semu (S)}} \dots \dots \dots (4.6)$$

$$\text{Cos } \phi = \frac{392}{560,73}$$

$$\text{Cos } \phi = \frac{392}{560,73}$$

Perhitungan nilai daya semu dan $\text{Cos } \phi$ dilakukan pada masing-masing generator selama percobaan dan hasil dari perhitungan masing masing daya semu dan $\text{Cos } \phi$ akan ditampilkan di dalam table 4.5 dan 4.6.

Tabel 4.5. Hasil perhitungan daya semu generator 1 saat parallel

No	Arus Eksitasi (A)	V out (V)	Arus (A)	S (kVA)	Cos ϕ
1	4,6	441	734,1	560,73	0,699
2	3,8	441,5	608,2	465,09	0,86
3	4,1	441	659,6	435,08	0,782
4	4	441,8	641,3	490,73	0,813
5	3,4	441,7	541,1	413,96	0,971
6	3,4	441,8	543	415,51	0,965
7	4,1	441,4	658,1	503,13	0,785
8	3,7	441,4	587,7	449,31	0,888
9	4,6	441,6	735,9	562,87	0,707
10	4,1	441,2	659,3	503,82	0,784
11	3,9	441,6	631,4	482,94	0,822
12	4,7	441,6	745,1	569,9	0,686
13	4,1	441,1	656,9	501,87	0,793
14	5,7	441,2	911,4	696,47	0,57
15	4,1	441,1	651,9	498,05	0,791
16	3,7	441,1	597,4	456,41	0,872
17	4,1	441,3	647,5	494,91	0,798
18	4	441,2	642	490,6	0,803
19	3,7	440,9	600,6	458,65	0,872

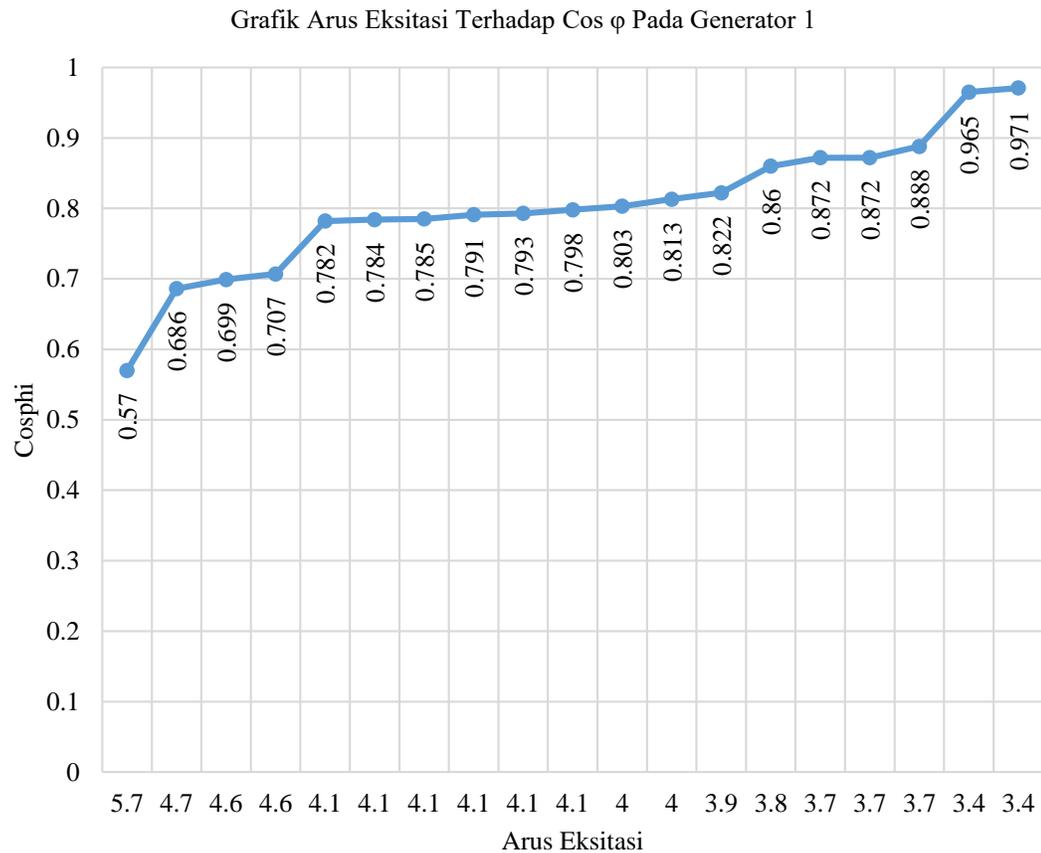
Tabel 4.5 memperlihatkan perhitungan daya semu dan Cos ϕ terhadap arus eksitasi pada generator 1 saat parallel. Dari tabel 4.5 kita bisa melihat bahwa Cos ϕ pada generator 1 berbanding terbalik dengan daya semu (KVA), sedangkan daya semu (KVA) berbanding lurus dengan arus eksitasi. Semakin besar arus eksitasi maka daya semu yang dihasilkan semakin besar.

Tabel 4.6. Hasil perhitungan daya semu generator 2 saat paralel

No	Arus Eksitasi (A)	V out (V)	Arus (A)	S (kVA)	Cos ϕ
1	3,6	441,2	582,8	445,36	0,894
2	3,9	441,5	620	474,11	0,833
3	4,2	441	673,4	514,36	0,762
4	3,7	441,3	589,6	450,66	0,883
5	4,1	441,4	663,2	507,03	0,775
6	3,9	441,2	624,1	476,92	0,824
7	3,6	441,4	578,56	442,32	0,893
8	4,4	441,4	711,1	543,65	0,721
9	3,6	441,6	575,2	439,95	0,916
10	3,6	441,2	585,3	447,27	0,892
11	3,8	441,6	602,1	460,53	0,862
12	3,7	441,6	589,7	451,04	0,9
13	3,7	441,1	586	447,7	0,9
14	3,8	441,2	606	463,09	0,855
15	3,6	441,1	584,9	446,86	0,904
16	4	441,1	647,1	494,38	0,805
17	3,8	441,3	610,2	466,4	0,849
18	3,7	441,2	586,4	448,11	0,906
19	3,8	440,9	602,1	459,8	0,865

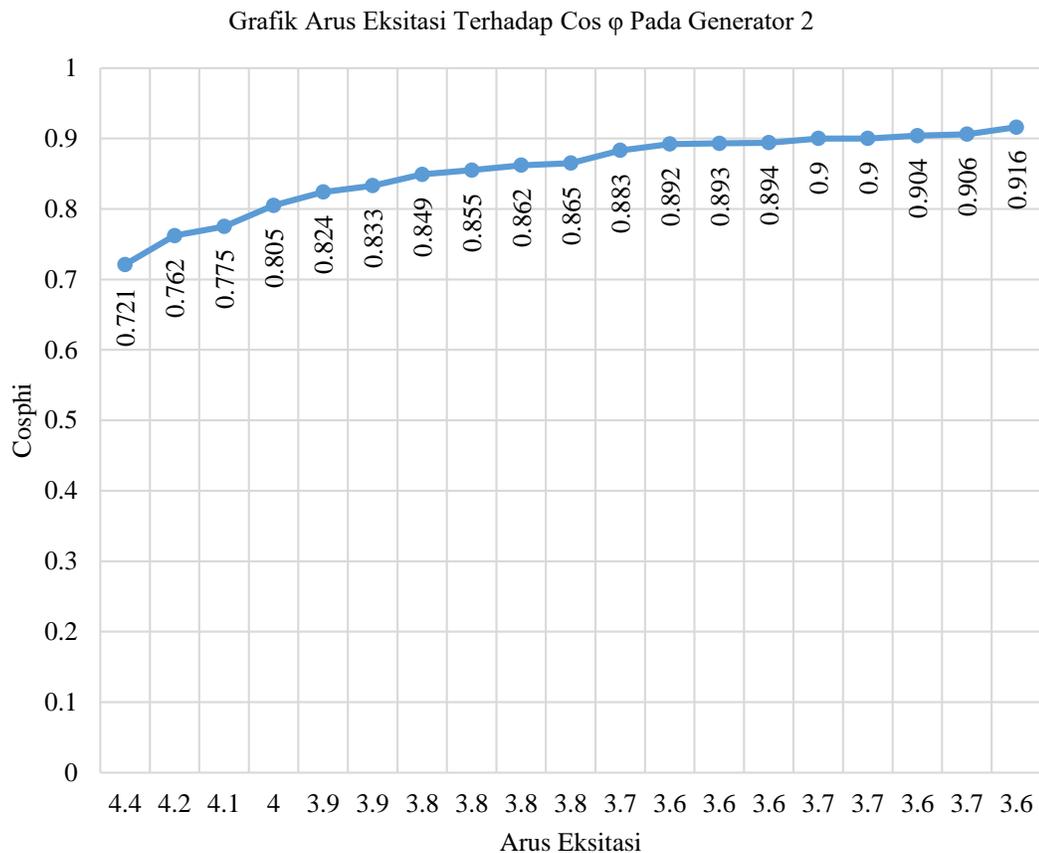
Tabel 4.6 memperlihatkan perhitungan daya semu dan Cos ϕ terhadap arus eksitasi pada generator 2 saat paralel. Bersamaan dengan generator 1, dari tabel 4.6 kita bisa melihat bahwa Cos ϕ pada generator 2 juga berbanding terbalik dengan daya semu (KVA), sedangkan daya semu (KVA) berbanding lurus dengan arus eksitasi. Semakin besar arus eksitasi maka daya semu yang dihasilkan semakin besar juga.

Berdasarkan hasil perhitungan daya semu dan Cos ϕ pada tabel di atas, diperoleh hubungan grafik antara Cos ϕ terhadap arus eksitasi seperti pada gambar 4.7 dan 4.8 berikut.



Gambar 4.7. Grafik Arus Eksitasi Terhadap Cos ϕ Pada Generator 1

Gambar 4.7 di atas menunjukkan perubahan nilai Cos ϕ yang dihasilkan dari naik turunnya arus eksitasi pada generator 1. Arus eksitasi sebesar 5,7 A memperoleh Cos ϕ sebesar 0,57. Sedangkan arus eksitasi sebesar 3,4 A memperoleh Cos ϕ sebesar 0,971. Dari gambar 4.7 dapat disimpulkan bahwa nilai arus eksitasi sangat berpengaruh signifikan pada besarnya Cos ϕ yang dihasilkan pada generator 1. Semakin besar nilai arus eksitasi maka akan menyebabkan Cos ϕ generator semakin rendah dan begitu juga sebaliknya.



Gambar 4.8. Grafik Arus Eksitasi Terhadap Cos ϕ Pada Generator 2

Gambar 4.8 di atas menunjukkan perubahan nilai Cos ϕ yang dihasilkan dari naik turunnya arus eksitasi pada generator 2. Arus eksitasi sebesar 4,4 A memperoleh Cos ϕ sebesar 0,721. Sedangkan arus eksitasi sebesar 3,6 A memperoleh Cos ϕ sebesar 0,916. Dari gambar 4.8 dapat disimpulkan bahwa nilai arus eksitasi sangat berpengaruh signifikan pada besarnya Cos ϕ yang dihasilkan pada generator 2. Semakin besar nilai arus eksitasi maka akan menyebabkan Cos ϕ generator semakin rendah dan begitu juga sebaliknya.

Semakin kecil Cos ϕ yang ada pada generator maka akan semakin berkurang nilai efisiensi pada generator tersebut karena semakin rendah nilai Cos ϕ maka besar beban yang akan display generator akan naik dengan beban yang sama.

4.2. Pengaruh Daya Reaktif (VAR) Terhadap Faktor Daya (Cos ϕ)

Untuk selanjutnya dilakukan perhitungan daya reaktif dan cos ϕ . Maka hasil yang di dapat adalah sebagai berikut,

$$\sin \phi = \cos^2 \phi + \sin^2 \phi = \dots\dots\dots(4.7)$$

$$\sin^2 \phi = 1 - \cos^2 \phi$$

$$\sin^2 \phi = \sqrt{1 - (0,699)^2} = 0,715$$

$$Q = V \times I \times \sin \phi \times \sqrt{3} \dots\dots\dots(4.8)$$

$$Q = 441 \times 734,1 \times 0,715 \times \sqrt{3}$$

$$Q = 400,92 \text{ kVAr}$$

Tabel 4.7. Hasil perhitungan sin ϕ dan daya reaktif generator 1 saat paralel

No	Arus Eksitasi (A)	V out (V)	Arus (A)	Cos ϕ	Sin ϕ	Q (kVAr)
1	4,6	441	734,1	0,699	0,715	400,92
2	3,8	441,5	608,2	0,86	0,51	237,19
3	4,1	441	659,6	0,782	0,623	313,88
4	4	441,8	641,3	0,813	0,582	285,6
5	3,4	441,7	541,1	0,971	0,239	98,93
6	3,4	441,8	543	0,965	0,262	108,86
7	4,1	441,4	658,1	0,785	0,619	311,44
8	3,7	441,4	587,7	0,888	0,459	206,23
9	4,6	441,6	735,9	0,707	0,707	397,94
10	4,1	441,2	659,3	0,784	0,62	312,37
11	3,9	441,6	631,4	0,822	0,569	274,79
12	4,7	441,6	745,1	0,686	0,727	414,32
13	4,1	441,1	656,9	0,793	0,609	305,64
14	5,7	441,2	911,4	0,57	0,821	571,8
15	4,1	441,1	651,9	0,791	0,611	304,31
16	3,7	441,1	597,4	0,872	0,489	223,18
17	4,1	441,3	647,5	0,798	0,602	297,94
18	4	441,2	642	0,803	0,595	291,9
19	3,7	440,9	600,6	0,872	0,489	226,52

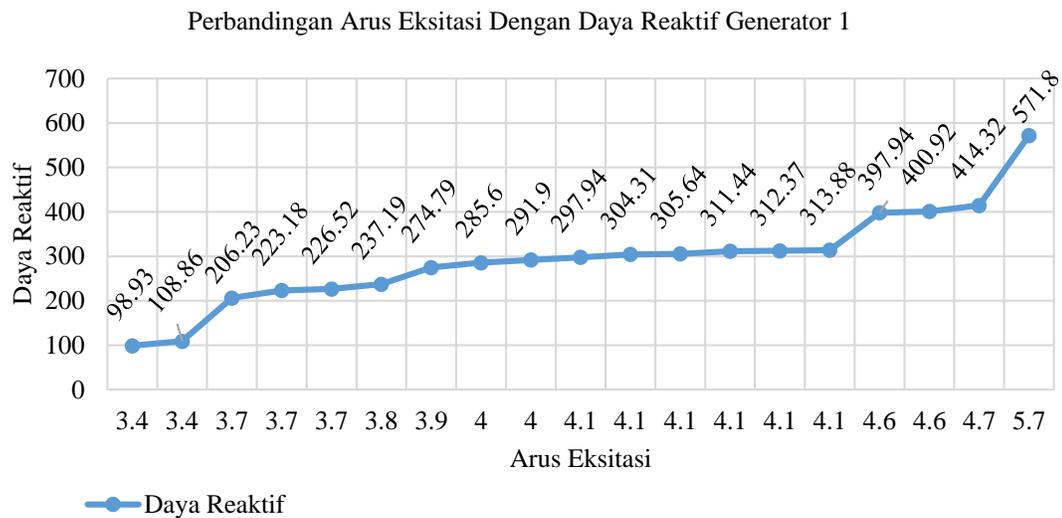
Tabel 4.7 memperlihatkan hasil perhitungan $\sin \phi$ dan daya reaktif generator 1 saat parallel. Dapat disimpulkan bahwa $\sin \phi$ berbanding terbalik dengan $\cos \phi$, sedangkan $\sin \phi$ berbanding lurus dengan daya reaktif yang dihasilkan. Dari tabel tersebut kita bisa melihat bahwa naik turunnya arus eksitasi sangat berpengaruh signifikan terhadap parameter-parameter yang lain kecuali tegangan *output* generator yang berubah tidak terlalu signifikan.

Tabel 4.8. Hasil perhitungan $\sin \phi$ dan daya reaktif generator 2 saat paralel

No	Arus Eksitasi (A)	V out (V)	Arus (A)	$\cos \phi$	$\sin \phi$	Q (kVAr)
1	3,6	441,2	582,8	0,894	0,448	199,52
2	3,9	441,5	620	0,833	0,553	262,18
3	4,2	441	673,4	0,762	0,647	332,79
4	3,7	441,3	589,6	0,883	0,469	211,36
5	4,1	441,4	663,2	0,775	0,631	319,93
6	3,9	441,2	624,1	0,824	0,566	269,94
7	3,6	441,4	578,56	0,893	0,45	199,04
8	4,4	441,4	711,1	0,721	0,692	376,2
9	3,6	441,6	575,2	0,916	0,401	175,59
10	3,6	441,2	585,3	0,892	0,452	202,16
11	3,8	441,6	602,1	0,862	0,506	233,02
12	3,7	441,6	589,7	0,9	0,435	196,2
13	3,7	441,1	586	0,9	0,435	194,75
14	3,8	441,2	606	0,855	0,518	239,88
15	3,6	441,1	584,9	0,904	0,427	190,81
16	4	441,1	647,1	0,805	0,593	293,17
17	3,8	441,3	610,2	0,849	0,528	246,26
18	3,7	441,2	586,4	0,906	0,423	189,59
19	3,8	440,9	602,1	0,865	0,501	230,36

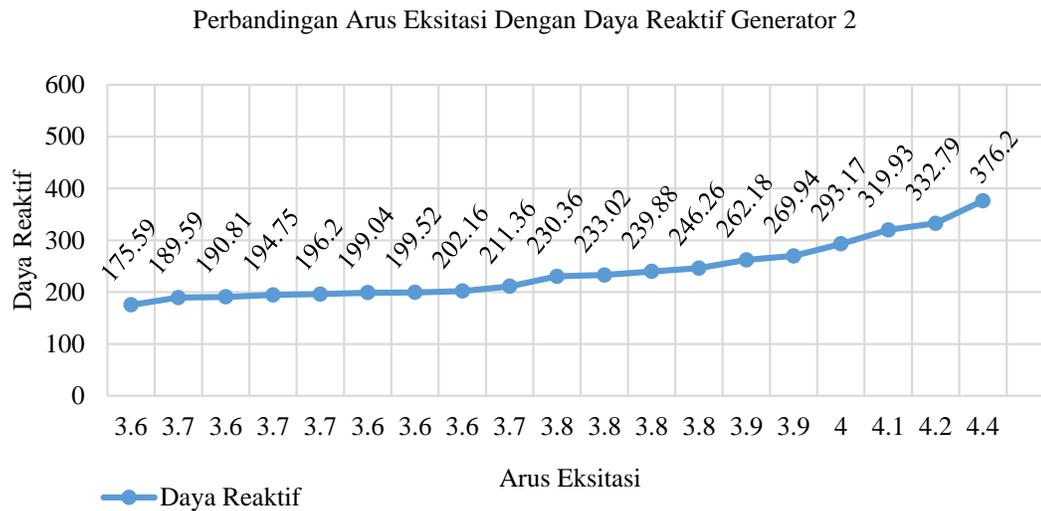
Tabel 4.8 memperlihatkan hasil perhitungan $\sin \phi$ dan daya reaktif generator 2 saat parallel. Dapat disimpulkan bahwa $\sin \phi$ berbanding terbalik dengan $\cos \phi$, sedangkan $\sin \phi$ berbanding lurus dengan daya reaktif yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil perhitungan dan pengukuran pada tabel 4.7 dan 4.8 diperoleh hubungan grafik antara arus eksitasi dengan v_{out} seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.9. Hubungan Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Pada Generator 1

Gambar 4.9 menunjukkan grafik hubungan antara arus eksitasi terhadap daya reaktif generator, dimana daya reaktif berbanding lurus dengan arus eksitasi, maka besarnya daya reaktif generator sangat dipengaruhi oleh besarnya arus eksitasi. Hal ini dilihat ketika arus eksitasi bernilai 3,4 A terhitung daya reaktif sebesar 98,93 kVAR, dan ketika arus eksitasi naik menjadi 5,7 A maka daya reaktif akan naik menjadi 571,8 kVAR. Hal ini dikarenakan untuk mengatur daya reaktif maka dilakukan dengan cara mengatur arus eksitasinya.

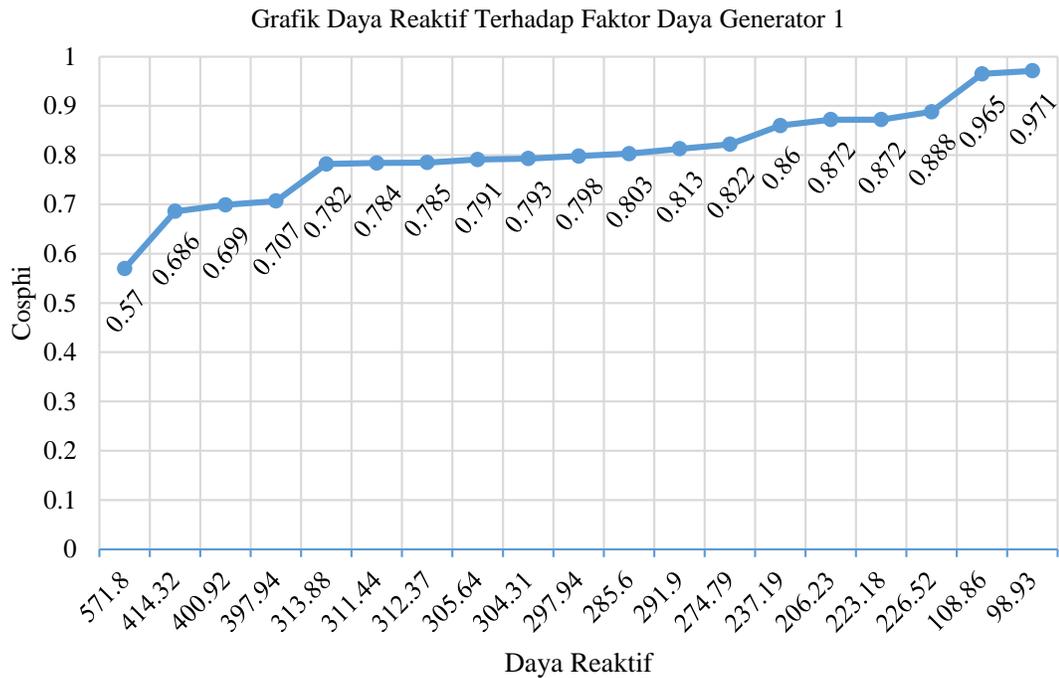


Gambar 4.10. Hubungan Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Pada Generator 2

Gambar 4.10 menunjukkan grafik hubungan antara arus eksitasi terhadap daya reaktif generator, dimana ketika arus eksitasi bernilai 3,6 A, maka daya reaktif bernilai 175,59 kVAR dan ketika arus eksitasi naik menjadi 4,4 A, maka arus eksitasi juga naik menjadi 376,2 kVAR.

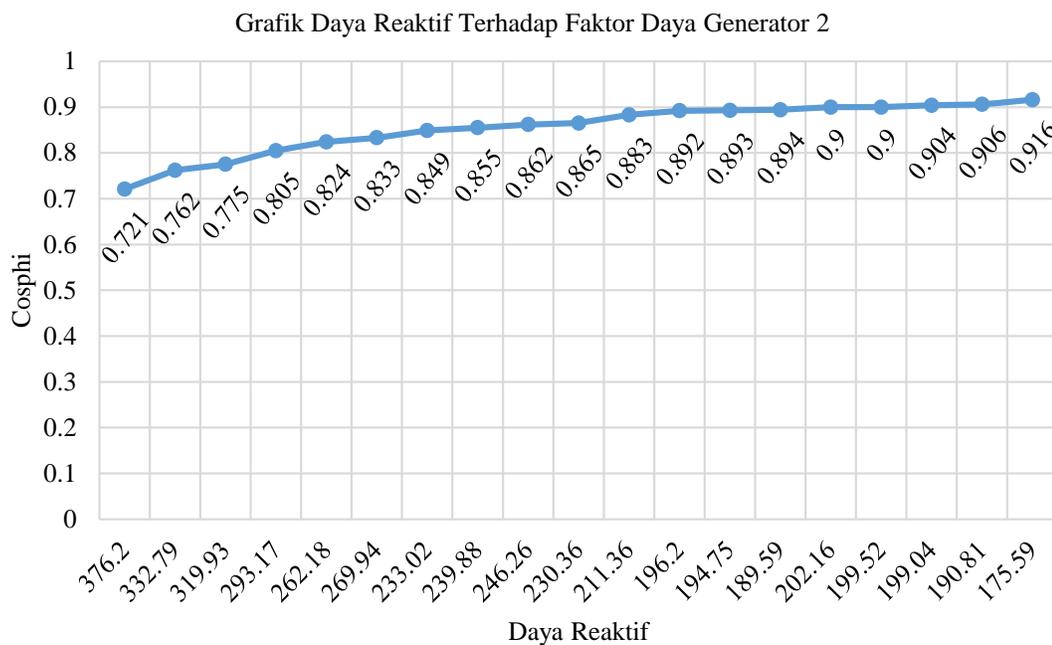
Pada grafik hubungan arus eksitasi terhadap daya reaktif generator 1 terdapat simpangan rata-rata arus eksitasi sebesar 0,55 A dan simpangan rata-rata daya reaktif sebesar 85,78 kVAR. Sedangkan pada grafik hubungan arus eksitasi terhadap daya reaktif generator 2 terdapat simpangan rata-rata arus eksitasi sebesar 0,37 A dan simpangan rata-rata daya reaktif sebesar 52,23 kVAR.

Untuk analisa pengaruh perubahan daya reaktif terhadap faktor daya pada generator 1 dan generator 2 dapat dilihat pada gambar 4.11 dan 4.12.



Gambar 4.11. Hubungan Daya Reaktif Terhadap Faktor Daya (Cospfi) Pada Generator 1

Gambar 4.11. menunjukkan hubungan perubahan daya reaktif dan faktor daya dimana ketika perubahan daya reaktif dalam sistem meningkat, nilai faktor daya menurun. Ketika daya reaktif mencapai 571,8 KVAR, mengakibatkan penurunan faktor daya ini sebesar 0,57 dan faktor daya meningkat sebesar 0,971 ketika daya reaktif beban mencapai nilai terendah sebesar 98,93 KVAR.



Gambar 4.12. Hubungan Daya Reaktif Terhadap Faktor Daya (Cospfi) Pada Generator 2

Gambar 4.12. menunjukkan hubungan perubahan daya reaktif dan faktor daya dimana ketika perubahan daya reaktif dalam sistem meningkat, nilai faktor daya menurun. Ketika daya reaktif mencapai 376,2 KVAR, mengakibatkan penurunan faktor daya ini sebesar 0,721 dan faktor daya meningkat sebesar 0,916 ketika daya reaktif beban mencapai nilai terendah sebesar 175 KVAR.

Perubahan nilai daya reaktif disebabkan oleh perubahan arus eksitasi yang meningkat. Oleh karena itu, ketika nilai arus meningkat, daya reaktif yang diberikan sebanding dan faktor daya berbanding terbalik, menghasilkan daya yang lebih rendah untuk sistem.

BAB 5

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dari perhitungan pengaruh sistem eksitasi terhadap daya reaktif generator dapat di peroleh kesimpulan:

1. Perubahan besar kecilnya arus eksitasi mempengaruhi besarnya daya reaktif yang dihasilkan. Semakin besar arus eksitasi, maka semakin besar daya reaktif generator. Perubahan arus eksitasi sebesar 5,7 A menyebabkan daya reaktif meningkat menjadi 571,8 kVAR pada generator 1 dan perubahan arus eksitasi sebesar 4,4 A menyebabkan daya reaktif meningkat menjadi 376,2 kVAR pada generator 2.
2. Pengaruh naiknya daya reaktif berpengaruh signifikan terhadap jatuhnya faktor daya generator. Ketika daya reaktif mencapai 571 KVAR, mengakibatkan penurunan faktor daya ini sebesar 0,57 pada generator 1 dan ketika daya reaktif mencapai 376,2 KVAR, mengakibatkan penurunan faktor daya ini sebesar 0,721 pada generator 2.

5.2. Saran

1. Melihat dari besarnya pengaruh sistem eksitasi generator membuat sistem eksitasi sebagai hal yang harus diperhatikan, pengaturan arus eksitasi yang tidak sesuai akan mengakibatkan naiknya daya reaktif dan menurunnya faktor daya. Hal tersebut akan mempengaruhi efisiensi dari generator karena mengakibatkan kenaikan arus jangkar yang tidak semestinya.
2. Penelitian ini masih terbatas karena hanya membahas tentang pengaruh besarnya sistem eksitasi terhadap daya reaktif, dan penelitian ini masih dapat dikembangkan dengan mengupas lebih dalam cara kerja dari sistem eksitasi tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustianingsih, W. N., Kurniawan, F., & Setiawan, P. (2020). Analisis Ketepatan Pengukur Daya dan Faktor Daya Listrik Berbasis Arduino Uno R3 328P. *Avitec*, 3(1), 15–27. <https://doi.org/10.28989/avitec.v3i1.794>
- Alam, A. B. D. A., & Taryana, N. (2015). Pemodelan dan Simulasi Automatic Voltage Regulator untuk Generator Sinkron 3 kVA Berbasis Proportional Integral. *Jurnal Reka Elkomika*, 3(2), 97–110.
- Fahmi Hakim, M. (2014). Analisis Kebutuhan Capacitor Bank Beserta Implementasinya Untuk Memperbaiki Faktor Daya Listrik Di Politeknik Kota Malang. *Jurnal ELTEK*, 105–118.
- Farhan, M. (2021). Pengaruh Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi Generator Unit 2 Pltmh Curug. *Jurnal Simetrik*, 11(1), 398–403. <https://doi.org/10.31959/js.v11i1.653>
- Hanif, A., Prasetyo, S. D. P., & Kusharjanta, B. (2020). Penggunaan Amperemeter Dan Voltmeter Dalam Pengukuran Listrik DC. *Penggunaan Amperemeter Dan Voltmeter Dalam Pengukuran Listrik DC*, 1(1), 4–5. https://www.academia.edu/download/63473722/Abdurrahman_Hanif_I0419001_Essay_modul_720200530-88076-1f2amx2.pdf.
- Harahap Muchsin dkk. (2021). Pengaruh Perubahan Variasi Eksitasi Tegangan Terhadap Daya Reaktif Pada Generator. *Universitas Prima Indonesia*, 3(2), 71–76.
- Iverson, B. L., & Dervan, P. B. (n.d.). *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析(Electric Machinery Fundamentals)Title*. 301.
- Kambey, R., Tuegeh, M., Nelwan, A. F., Pakiding, M., Elektro-ft, J. T., & Sinkron, A. G. (2014). *Simulasi Keamanan Kerja Generator PLTP Lahendong 4*. 1.
- Kilinskiĭ, E. L., Gerasimenko, P. P., Kertsman, V. I., & Slavina, L. S. (2021).

- Izmeneniia EKG pri pervichnom al'dosteronizme. *Problemy Endokrinologii*, 17(2), 15–18.
- Marpaung, P. R. H., Eteruddin, H., & Setiawan, D. (2021). Studi Perubahan Beban Terhadap Kinerja AVR pada Generator Sinkron Unit 2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT. Ubjom Tenayan Raya. *Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin*, 1(1), 96–109.
- Nurdin, A., Azis, A., & Rozal, R. A. (2018). Peranan Automatic Voltage Regulator Sebagai Pengendali Tegangan Generator Sinkron. *Jurnal Ampere*, 3(1), 163. <https://doi.org/10.31851/ampere.v3i1.2144>
- Pasaribu, F. I., Evalina, N., & Harahap, P. (2021). Varistor in the Inverter Circuit Starting Energy Saver to Reduce Water Pump Electric Current. *Budapest International Research in Exact Sciences (BirEx) Journal*, 3(4), 244–253. <https://doi.org/10.33258/birex.v3i4.2632>
- Puspitaputri, G. Y., Priananda, C. W., & Syahbana, D. F. (2021). Automatic Voltage Regulator (AVR) Generator dengan Mikrokontroler Menggunakan Metode Hill Climbing. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), 171–176. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i2.67421>
- Putri, M., & Pasaribu, F. I. (2018). Analisis Kualitas Daya Akibat Beban Reaktansi Induktif (XL) di Industri. *Journal of Electrical Technology*, 3(2), 81–85.
- Ranisa, Facta, M., & Karnoto. (2015). Perhitungan pembebanan pembangkit di kompleks PLTU Jabar II Sukabumi, Jawa Barat dengan metode Lagrange Multiplier Dan Kurva Kapabilitas Generator. *Transient*, 4(3), 763–770. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient/article/view/10036>
- Rusilawati, R. (2020). Pembentukan Kurva Kapabilitas Generator Menggunakan Pendekatan Sistem Modified Single Machine to Infinite Bus (M-SMIB) untuk Batasan Optimisasi Sistem Pembangkitan. *Jurnal ELTIKOM*, 4(2), 132–139. <https://doi.org/10.31961/eltikom.v4i2.225>
- Safari, B. F. (2023). *Karakteristik Pembebanan Pada Generator Dengan Variasi*

Beban Resistif. 4(2), 59–65.

- Sari, F., & Darwanto, A. (2021). Analisis Sistem Eksitasi Pada Generator Pararel Terhadap Daya Reaktif. *Jurnal Teknologi, 14(1)*, 10–19. <https://doi.org/10.34151/jurtek.v14i1.3276>
- Sunarlik, W. (2017). Prinsip Kerja Generator Sinkron. *Prinsip Kerja Generator Sinkron, 6.*
- Supena, D., Yunus, R. M., Dewi J, E., & Budiman, H. (2018). Analisis Sistem Kerja Generator Ac (Sinkron) Di Plta Parakan Kondang Sumedang. *Reka Elkomika, 80–85.*
- Suriansyah, B. (2019). RANCANG BANGUN CATU DAYA CADANGAN BERKAPASITAS 100 Ah / 12 V UNTUK LABORATORIUM OTOMASI INDUSTRI. *Jurnal INTEKNA : Informasi Teknik Dan Niaga, 19(2)*, 73–77. <https://doi.org/10.31961/intekna.v19i2.864>
- Teknik, K., & Listrik, E. (2020). *STUDI PERBANDINGAN BEBAN LINEAR DAN NONLINEAR TERHADAP KINERJA GENERATOR SINKRON TIGA PHASA Diky Ikhsan Nasution (1) , Syamsul Amien (2). 1, 45–48.*
- Zulhakim, A., Handayani, Y. S., & Priyadi, I. (2023). Pengaruh Sistem Eksitasi Terhadap Generator Sinkron Tiga Fasa Di Unit 1 PT. PLN Indonesia Power ULPL TA Musi. *Teknosia, 17(1)*, 1–12. <https://doi.org/10.33369/teknosia.v17i1.28708>