

SIMULASI PEMODELAN SISTEM EKSITASI STATIS PADA GENERATOR SINKRON TERHADAP PERUBAHAN BEBAN

SKRIPSI

untuk memenuhi salah satu persyaratan
mencapai derajat Sarjana S1



Disusun oleh:

Annas Alatas Sukmahadi

14524062

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta**

2018

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

SIMULASI PEMODELAN SISTEM EKSITASI STATIS PADA GENERATOR

SINKRON TERHADAP PERUBAHAN BEBAN

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia

Disusun oleh:

Annas Alatas Sukmahadi
14524062

Yogyakarta, 27 November 2018

Menyetujui,

Pembimbing



Husein Mubarak, S.T., M.Eng.

155241305

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI

SIMULASI PEMODELAN SISTEM EKSITASI STATIS PADA GENERATOR

SINKRON TERHADAP PERUBAHAN BEBAN

Dipersiapkan dan disusun oleh:

Annas Alatas Sukmahadi

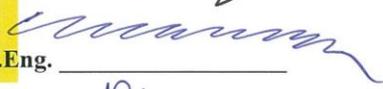
14524062

Telah dipertahankan di depan dewan penguji

Pada tanggal: 27 November 2018

Susunan dewan penguji

Ketua Penguji : Husein Mubarak, S.T., M.Eng. 

Anggota Penguji 1: Wahyudi Budi Pramono, S.T., M.Eng. 

Anggota Penguji 2: Almira Budiyanto, S.Si., M.Eng. 

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana

Tanggal: 27 November 2018

Ketua Program Studi Teknik Elektro




Kusni Aziz Amrullah, S.T., M.Sc., Ph.D.

045240101

PERNYATAAN

PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Skripsi yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal penggunaan informasi dan materi Skripsi terkait paten maka akan diskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut diatas.

Yogyakarta, 27 November 2018



Annas Alatas Sukmahadi

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh.

Alhamdulillahirabbil'alamin puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyusun dan menyelesaikan tugas akhir sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah limpahkan kepada Habibullah dan Nabiullah Muhammad SAW dan kepada keluarganya, sahabatnya, sampai kita semua hingga akhir zaman.

Dengan segenap kerendahan hati, penulis menyadari bahwa segala sesuatu tidak ada yang sempurna melainkan kesempurnaan hanya milik Allah SWT, begitupun dengan tugas akhir ini yang jauh dari kata sempurna dan tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Rasa terimakasih dan penghargaan yang mendalam penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Husein Mubarak, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah bersedia meluangkan waktu dan memberikan arahan serta teori sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir.
2. Bapak Rudi Satriana, selaku Supervisor Pemeliharaan Listrik PT. Indonesia Power UP Saguling yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian.
3. Bapak Wahyudi Budi Pramono, S.T., M.Eng. dan Ibu Almira Budiyanto, S.Si., M.Eng., selaku dosen penguji yang telah menguji dan memberi saran terkait hasil penelitian.
4. Bapak Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku ketua prodi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
5. Seluruh dosen prodi Teknik Elektro yang penuh kesabaran dalam mengajar dan memberikan ilmu selama perkuliahan.
6. Ayahanda (Alm.) dan Ibunda tercinta yang penuh perhatian, kasih sayang, dukungan dan doa sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir.
7. Kakak dan adik-adik tercinta yang penuh kasih sayang, kehangatan dan senantiasa memberikan semangat kepada penulis.
8. Teman seperjuangan prodi Teknik Elektro yang penuh keceriaan, kebersamaan dan memberikan dukungan.
9. Teman sekosan dan setanah air yang penuh kehangatan, kebersamaan, suka dan duka kita lewati bersama.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam tugas akhir ini masih terdapat kekurangan dan kesalahan sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Terakhir penulis memohon maaf atas kekurangan dan kesalahan yang terjadi baik sengaja maupun tidak sengaja. Semoga kita semua senantiasa berada dalam rahmat serta perlindungan Allah SWT. Aamiin ya Rabbal'amin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh.

Yogyakarta, 27 November 2018



Annas Alatas Sukmahadi

ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Daftar singkatan	Keterangan
PLTA	Pembangkit Listrik Tenaga Air
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
DC	<i>Direct Current</i>
A	<i>Ampere</i>
V	<i>Volt</i>
kV	<i>Kilo Volt</i>
MVA	<i>Mega Volt Ampere</i>
MW	<i>Mega Watt</i>
MVAR	<i>Mega Volt Ampere Reactive</i>
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
Hz	<i>Hertz</i>
Pm	<i>Mechanical Power</i>
Vt	<i>Terminal Voltage</i>
Vf	<i>Field Voltage</i>
Ifd	<i>Field Current</i>
m	<i>Measurement</i>

ABSTRAK

Proses perubahan energi mekanis menjadi energi listrik yang dilakukan oleh generator akan berlangsung jika sistem eksitasi ada. Sistem eksitasi merupakan salah satu bagian terpenting dari generator sinkron, dimana sistem ini berfungsi untuk menyediakan daya DC ke kumparan medan generator. Dalam penelitian ini, sistem eksitasi statis yang terdiri dari transformator dan *thyristor* terhubung dalam konfigurasi jembatan telah diimplementasikan dalam mesin sinkron yang beroperasi sebagai generator berkapasitas 206,1 MVA, 16,5 kV dengan menggunakan bantuan perangkat lunak MATLAB *Simulink* R2017b. Dengan menyesuaikan beban yang diberikan pada generator, variasi arus eksitasi dapat mempengaruhi besarnya tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator sehingga dapat menaikkan dan menurunkan tegangan induksi. Dalam kondisi beban penuh yaitu $P = 175 \text{ MW}$, $Q = 100 \text{ MVAR}$, hasil penelitian menunjukkan bahwa ketika simulasi dijalankan pada sudut alfa 0° , diketahui bahwa nilai rata-rata tegangan DC diperoleh sebesar 496,4 V, arus eksitasi sebesar 1057 A dan tegangan keluaran generator telah meningkat melampaui tegangan nominalnya yaitu sebesar 16,72 kV. Dalam hal ini, untuk mempertahankan tegangan terminal maka arus eksitasi harus dikurangi yaitu dengan meningkatkan sudut penembakkan *thyristor* menjadi sudut alfa 45° , sehingga nilai rata-rata tegangan DC dapat berkurang menjadi 479,3 V, begitu juga arus eksitasi menjadi 985,9 A. Tegangan keluaran generator pada sudut alfa 45° diperoleh sesuai dengan nilai nominalnya yaitu 16,5 kV.

Kata kunci: Generator sinkron, sistem eksitasi statis, arus eksitasi, tegangan keluaran.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Studi Literatur	3
2.2 Tinjauan Teori.....	4
2.2.1 Generator Sinkron	4
2.2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron.....	6
2.2.3 Karakteristik Generator Sinkron	6
2.2.4 Daya Tiga Fase.....	7
2.2.5 Dasar Kontrol Tegangan dan Daya Reaktif	7
2.2.6 Sistem Eksitasi	8
2.2.7 Jembatan Penyearah Daya	10
2.2.8 Konsep Dasar <i>Automatic Voltage Regulator (AVR)</i>	10

BAB 3 METODOLOGI.....	12
3.1 Data Penelitian.....	12
3.1.1 Data Teknis Generator Sinkron.....	12
3.1.2 Parameter Model Sistem Eksitasi Statis.....	12
3.2 Alur Penelitian.....	13
3.3 Perancangan Model Simulasi.....	14
3.4 Implementasi Blok Model pada MATLAB <i>Simulink</i> R2017b.....	14
3.4.1 Mesin Sinkron.....	15
3.4.2 <i>Three-Phase Voltage Source</i>	15
3.4.3 <i>Three-Phase Transformer</i>	15
3.4.4 <i>Pulse Generator (Thyristor, 6-Pulse)</i>	15
3.4.5 Jembatan Penyearah Daya.....	16
3.4.6 <i>RLC Parallel Load</i>	16
3.4.7 <i>Powergui</i>	16
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	17
4.1 Deskripsi Model Simulasi.....	17
4.2 Hasil Simulasi.....	18
4.2.1 Hasil Simulasi Pemodelan Sistem Eksitasi Statis.....	18
4.2.2 Hasil Simulasi Pengaruh Perubahan Beban Daya Reaktif (Induktif).....	19
4.2.3 Hasil Simulasi Pengaruh Perubahan Beban Daya Reaktif (Kapasitif).....	21
4.3 Analisis Perhitungan Variasi Arus Eksitasi Terhadap Tegangan Induksi.....	22
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	24
5.1 Kesimpulan.....	24
5.2 Saran.....	24
DAFTAR PUSTAKA.....	25
LAMPIRAN.....	26

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Generator Sinkron Tiga Fase	5
Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron	5
Gambar 2.3 Representasi Segitiga Daya	7
Gambar 2.4 Rangkaian Ekuivalen Sistem Eksitasi	8
Gambar 2.5 Sistem Eksitasi AC	8
Gambar 2.6 Sistem Eksitasi Statis.....	9
Gambar 2.7 <i>Field Flashing</i> pada Generator Sinkron	9
Gambar 2.8 <i>Thyristor Controlled Rectifier</i>	10
Gambar 2.9 Skema <i>Exciter</i> dan AVR	11
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	13
Gambar 3.2 Blok Diagram Penelitian	14
Gambar 4.1 Model Simulasi.....	17
Gambar 4.2 Hasil Keluaran Gelombang Tegangan DC	19
Gambar 4.3 Hubungan Kenaikan Beban Q Induktif Terhadap Arus Eksitasi.....	20
Gambar 4.4 Hubungan Kenaikan Beban Q Kapasitif Terhadap Tegangan Keluaran	21

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Teknis Generator Sinkron.....	12
Tabel 3.2 Parameter Model Sistem Eksitasi Statis.....	12
Tabel 4.1 Nilai Rata-rata Tegangan DC.....	18
Tabel 4.2 Perbandingan Hasil Simulasi Berdasarkan Sudut Alfa.....	19
Tabel 4.3 Hasil Data Pengujian Perubahan Beban Daya Reaktif (Induktif).....	20
Tabel 4.4 Hasil Data Pengujian Perubahan Beban Daya Reaktif (Kapasitif).....	21
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Tegangan Induksi.....	22

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perihal meningkatnya kebutuhan listrik di Indonesia menjadi masalah yang harus segera diatasi. Dalam rangka memenuhi kebutuhan listrik tersebut, maka keandalan suatu sistem operasi pembangkit untuk dapat menghasilkan energi listrik memiliki peranan yang sangat penting. Salah satu komponen yang penting dalam sistem tenaga adalah generator, karena peranannya sebagai sumber utama energi listrik. Daya mekanis dalam generator biasanya berasal dari turbin kemudian diubah menjadi energi listrik. Dalam hal ini, perubahan energi tersebut hanya dimungkinkan jika sistem eksitasi pada generator ada [1].

Berdasarkan cara daya yang digunakan sebagai sumber eksitasi, model sistem eksitasi dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok besar yaitu sistem eksitasi DC, sistem eksitasi AC dan sistem eksitasi statis [2]. Sistem eksitasi merupakan salah satu bagian terpenting dari generator. Sistem eksitasi dimaksudkan untuk menyediakan arus searah ke kumparan medan generator. Selain itu, sistem eksitasi juga bertanggung jawab untuk fungsi kontrol dan proteksi dari sistem tenaga. Sebagai unit kontrol penting generator, sistem eksitasi memiliki dampak langsung pada stabilitas dan keandalan generator.

Dalam penelitian ini akan dibahas tentang sistem eksitasi statis yang akan diimplementasikan dalam generator sinkron. Sistem eksitasi statis dirancang untuk memenuhi semua mode operasi generator berkapasitas besar [3]. Salah satu pembangkit listrik di Indonesia yang menerapkan sistem eksitasi statis adalah PLTA Saguling, Jawa Barat. PLTA ini menghasilkan daya sebesar 700,72 MW yang terdiri dari empat unit generator, dimana masing-masing generator mempunyai keluaran daya sebesar 175,18 MW. Dengan diperolehnya keluaran daya yang cukup besar, maka perubahan beban yang terjadi pada pembangkit listrik dapat menyebabkan fluktuasi tegangan keluaran generator, dimana hal ini akan berdampak pada ketidakstabilan sistem secara keseluruhan. Faktor yang mempengaruhi dalam proses pembangkitan energi listrik oleh generator dikarenakan adanya perubahan kebutuhan daya reaktif pada sisi beban, dimana kenaikan daya reaktif ini dapat menyebabkan penurunan besarnya tegangan terminal. Dalam rangka menciptakan kestabilan tegangan yang dihasilkan oleh generator, maka dalam penelitian ini sistem eksitasi statis pada generator sinkron dimodelkan dan disimulasikan dengan menggunakan MATLAB *Simulink* R2017b yang nantinya dapat diketahui besarnya arus eksitasi dan tegangan keluaran generator yang dipengaruhi oleh perubahan beban.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana simulasi pemodelan sistem eksitasi statis pada generator sinkron dan menjaga tegangan keluaran generator supaya tetap stabil terhadap perubahan beban dengan menggunakan MATLAB *Simulink* R2017b?
2. Bagaimana pengaruh perubahan beban daya reaktif terhadap arus eksitasi dan tegangan keluaran generator dengan menggunakan MATLAB *Simulink* R2017b?
3. Bagaimana variasi besarnya arus eksitasi terhadap tegangan induksi generator?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang membatasi lingkup penelitian ini adalah:

1. Dalam pemodelan sistem eksitasi statis yang diterapkan hanya untuk menentukan nilai rata-rata tegangan DC yang akan menjadi suplai eksitasi ke kumparan medan pada generator sinkron.
2. Simulasi perubahan beban yang diberikan pada generator sinkron hanya mengubah data beban daya reaktif.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengimplementasikan sistem eksitasi statis pada generator sinkron dan menjaga tegangan keluaran generator tetap stabil serta mengetahui pengaruh perubahan beban daya reaktif terhadap arus eksitasi dan tegangan keluaran generator dengan menggunakan MATLAB *Simulink* R2017b.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya arus eksitasi dan tegangan keluaran generator terhadap perubahan beban daya reaktif dalam rangka menciptakan kestabilan tegangan yang dihasilkan oleh generator.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Tinjauan pustaka ini berisi penelitian ilmiah yang diperoleh dari beberapa jurnal sebagai ulasan dan pertimbangan mengenai sistem eksitasi dari generator sinkron. Berbagai metode telah dilakukan dengan studi perbandingan mengenai pengaruh arus eksitasi dan salah satu diantaranya mensimulasikan sistem eksitasi AC dengan menggunakan penyearah masukan untuk kumparan medan pada generator.

Imron Ridzki [4] dengan penelitiannya berdasarkan data operasi harian yang telah diperoleh di lapangan yaitu mengenai pengaruh perubahan arus eksitasi terhadap daya reaktif generator. Hasil penelitian diperoleh bahwa daya reaktif yang disuplai oleh generator ke sistem daya dikontrol oleh arus medan generator, nilai eksitasi awal diperoleh berkisar $\pm 3,27\%$ dan nilai fluktuasi tegangan diperoleh berkisar $\pm 0,66\%$ dari nilai nominal tegangannya. Hasil dari nilai tersebut menyimpulkan bahwa tegangan yang dihasilkan cenderung konstan, hal ini dikarenakan untuk menjaga sinkronisasi dengan sistem.

Basofi, Ir. Syamsul Amien [5] melakukan analisis pengaruh arus eksitasi terhadap perubahan faktor daya pada operasi paralel dari generator sinkron. Komponen utama yang digunakan terdiri dari generator sinkron tiga fase dan motor DC sebagai penggerak utama serta sumber daya DC. Hasil penelitian menjelaskan bahwa dengan mengatur arus eksitasi pada operasi paralel dari generator sinkron maka akan mengatur daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator sehingga perubahan faktor daya pada masing-masing generator dapat ditentukan. Percobaan pada generator pertama yaitu dengan menggunakan beban resistif-induktif, ketika arus eksitasi dikurangi maka diperoleh daya reaktif sebesar $-0,002$ kVAR dengan faktor daya $0,098$ *leading*, sedangkan pada generator kedua ketika arus eksitasi diperbesar, daya reaktif diperoleh sebesar $0,173$ kVAR dengan faktor daya $0,64$ *lagging*.

Armansyah, Sudaryanto [6] yaitu tentang pengaruh penguatan medan terhadap tegangan terminal generator sinkron tiga fase 600 kVA, 400 V. Pengujian dilakukan untuk menganalisis hubungan arus eksitasi terhadap keluaran generator dengan cara mengatur arus eksitasi. Pada saat arus eksitasi dinaikkan sebesar 5% , tegangan yang dibangkitkan diperoleh sebesar $291,73$ V dan pada saat arus eksitasi dinaikkan 10% , tegangan yang dibangkitkan diperoleh sebesar $305,62$ V kemudian pada saat arus eksitasi dinaikkan 15% , tegangan yang dibangkitkan diperoleh sebesar

319,51 V. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin besar perubahan arus eksitasi (I_{fd}) maka semakin besar juga tegangan yang dibangkitkan generator (E_a).

Gerha Terimananda [7] melakukan perbandingan terhadap pengaturan arus eksitasi sesuai dengan sudut penyalaaan *thyristor* untuk mengatur tegangan keluaran generator. Penelitian ini dimodelkan dan disimulasikan dengan menggunakan MATLAB *Simulink* yang terdiri dari rangkaian sistem eksitasi UBP Kamojang. Pengujian sistem eksitasi generator dijalankan pada kondisi beban penuh ($P = 55 \text{ MW}$, $Q = 41,25 \text{ MVAR}$). Hasil penelitian berdasarkan hasil perhitungan diperoleh sudut penyalaaan *thyristor* bekerja pada batas maksimal $\alpha = 120,96^\circ$ dan batas minimal $\alpha = 116,57^\circ$. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh sudut penyalaaan *thyristor* bekerja pada batas maksimal $\alpha = 127,15^\circ$ dan batas minimal $\alpha = 100,71^\circ$. Dalam hal ini bahwa sudut penyalaaan *thyristor* berbanding terbalik dengan tegangan keluaran generator, dimana semakin besar nilai sudut penyalaaan *thyristor* pada rangkaian semi konverter akan menghasilkan tegangan eksitasi pada *exciter* dan tegangan keluaran generator mengecil.

2.2 Tinjauan Teori

2.2.1 Generator Sinkron

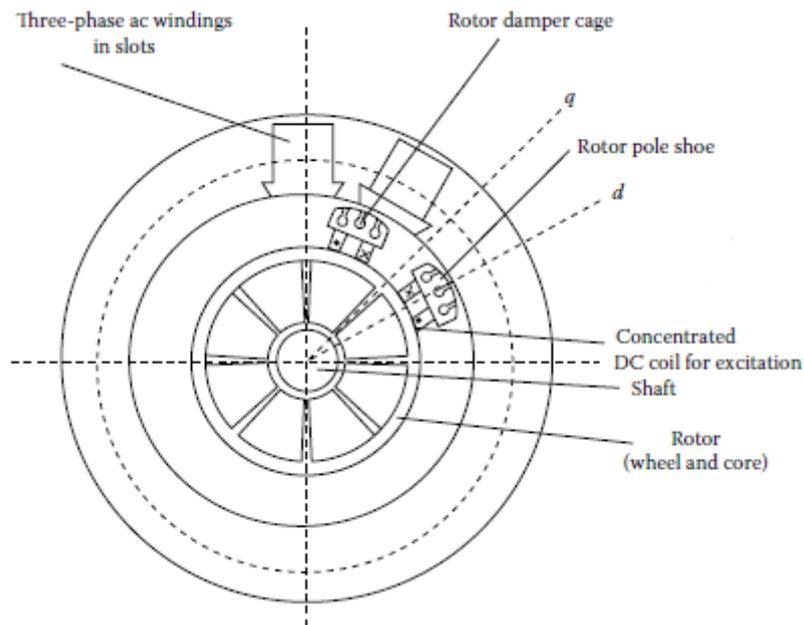
Generator merupakan sumber utama energi listrik dalam sistem tenaga, sehingga kinerja dari generator mempengaruhi operasi jaringan listrik [8]. Generator adalah mesin listrik berputar yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik berdasarkan induksi magnet. Unsur utama untuk membangkitkan listrik secara induksi adalah:

1. Medan magnet
2. Penghantar (kumparan)
3. Kecepatan relatif

Generator sinkron (juga disebut dengan alternator) terdiri dari dua bagian utama yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian dari generator sinkron yang diam, yang mana stator ini merupakan tempat dibangkitkannya tegangan induksi. Sedangkan rotor adalah bagian dari generator sinkron yang berputar secara mekanis yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet dan menginduksi tegangan disekitar kumparan stator.

Dalam pemodelan mesin sinkron, medan magnet diciptakan oleh arus eksitasi karena melalui gulungan eksitasi. Oleh karena itu dapat dianggap sebagai masukan ke dalam mesin. Masukan lainnya adalah daya mekanis yang disediakan oleh turbin [9].

Gambar 2.1 menunjukkan skema dari generator sinkron tiga fase yang mempunyai tiga kumparan dan memiliki rangkaian magnetis stator yang terbuat dari laminasi yang dilengkapi dengan slot-slot dan rotor [10].



Gambar 2.1 Skema Generator Sinkron Tiga Fase [10]

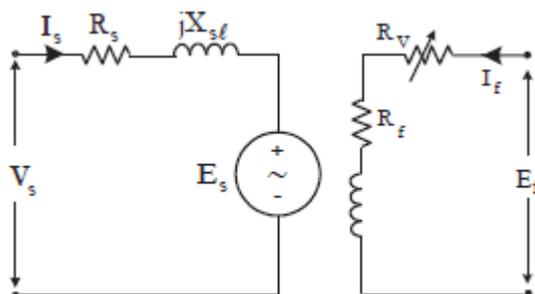
Istilah sinkron pada generator sinkron mengacu pada frekuensi listrik mesin yang serentak atau sinkron dengan laju putaran mekanis porosnya. Kecepatan putaran rotor memiliki hubungan dengan frekuensi listrik dan jumlah kutub yang dinyatakan dengan persamaan:

$$n = \frac{120 f}{P} \quad (2.1)$$

Dimana:

- n = Kecepatan putar rotor (rpm)
- f = Frekuensi (Hz)
- P = Jumlah kutub

Rangkaian ekuivalen per fase dari generator sinkron ditunjukkan pada Gambar 2.2 yang menjelaskan fluks magnetis yang terjadi di kumparan medan.



Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron [11]

2.2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Generator sinkron tiga fase mempunyai kumparan jangkar yang terletak pada stator dan kumparan medan terletak pada rotor. Ketika kumparan medan pada rotor dialiri arus searah (DC) maka akan menimbulkan medan magnet. Penggerak utama yang terhubung dengan rotor akan beroperasi dan memutar rotor. Perputaran rotor akan menghasilkan medan putar yang diinduksikan pada kumparan jangkar, sehingga menghasilkan fluks magnet yang memotong kumparan jangkar pada stator dan menimbulkan gaya gerak listrik bolak-balik tiga fase, dimana gaya gerak listrik tersebut akan dialirkan melalui terminal menuju beban listrik.

2.2.3 Karakteristik Generator Sinkron

Dalam karakteristik generator sinkron berbeban terdapat arus yang mengalir pada kumparan jangkar, sehingga arus jangkar yang dihasilkan akan membentuk fluks jangkar. Terbentuknya fluks jangkar dapat mempengaruhi fluks arus medan yang menyebabkan besarnya tegangan terminal berubah-ubah. Terjadinya proses tersebut dikenal sebagai reaksi jangkar yang bersifat reaktif, dimana reaksi jangkar ini akan menimbulkan reaktansi bocor jangkar (X_L) dan reaktansi magnet (X_m) yang dinyatakan sebagai reaktansi sinkron (X_s).

Tegangan keluaran generator sinkron adalah selisih antara tegangan induksi dengan total rugi-rugi tegangan akibat reaksi jangkar ($jX_L I_a$), rugi tegangan akibat induktansi diri ($jX_a I_a$) dan penurunan tegangan akibat resistansi lilitan stator ($R_a I_a$). Tegangan keluaran generator sinkron dinyatakan dengan persamaan:

$$V_{out} = E_a - jX_s I_a - R_a I_a \quad (2.2)$$

Dimana:

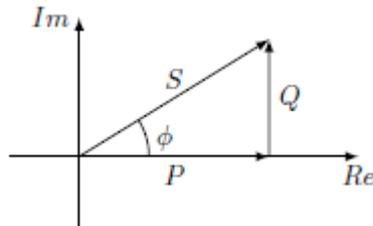
- V_{out} = Tegangan keluaran generator (V)
- E_a = Tegangan induksi pada kumparan jangkar (V)
- X_s = Reaktansi sinkron (Ω)
- I_a = Arus jangkar (A)
- R_a = Resistansi jangkar (Ω)

Resistansi jangkar (R_a) yang dialiri arus jangkar (I_a) akan menyebabkan jatuh tegangan. Namun pada praktiknya, jatuh tegangan ini diabaikan karena nilainya sangat kecil. Dari pernyataan tersebut diperoleh bahwa untuk menentukan tegangan induksi dinyatakan dengan persamaan:

$$E_a = V_{out} + jX_s I_a \quad (2.3)$$

2.2.4 Daya Tiga Fase

Konsumsi total daya terdiri dari daya aktif dan reaktif. Dalam beban tiga fase seimbang, daya total tiga fase sama dengan tiga kali daya satu fase. Bentuk hubungan antara daya yang telah disebutkan dapat dinyatakan dengan merepresentasikan daya-daya tersebut sebagai vektor yang disebut dengan representasi segitiga daya.



Gambar 2.3 Representasi Segitiga Daya [12]

Gambar 2.3 menunjukkan representasi segitiga daya dimana S adalah daya semu yang disediakan oleh sumber daya yang dinyatakan dalam satuan VA. P adalah daya aktif yang setara dengan energi yang dapat dimanfaatkan beban yang dinyatakan dalam satuan Watt. Q adalah daya reaktif yang timbul karena reaktansi beban atau saluran pada batas VA tertentu yang dapat menyebabkan pergeseran faktor daya, dinyatakan dalam satuan VAR.

2.2.5 Dasar Kontrol Tegangan dan Daya Reaktif

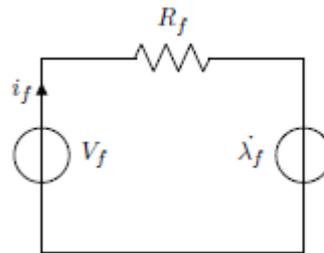
Secara dinamis mempertahankan tegangan konstan dalam sistem daya adalah persyaratan mendasar dalam kualitas daya. Beban pasif (resistif-induktif, resistif-kapasitif) dan beban aktif membutuhkan daya aktif dan daya reaktif dalam sistem tenaga listrik.

Daya reaktif merupakan daya penyeimbang untuk mempertahankan batas-batas nilai tegangan keluaran pada generator. Pada waktu peralihan saat terjadinya perubahan beban, daya reaktif pada generator sinkron sangat diperlukan untuk menstabilkan tegangan agar tegangan tersebut mampu mendorong arus ke beban.

Kontrol tegangan erat kaitannya dengan keseimbangan daya reaktif dalam sistem daya, dikarenakan ketergantungan beban daya reaktif pada tegangan sangat penting. Daya reaktif dapat dihasilkan atau diserap oleh kontrol tegangan eksitasi dari generator sinkron dengan menggunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR).

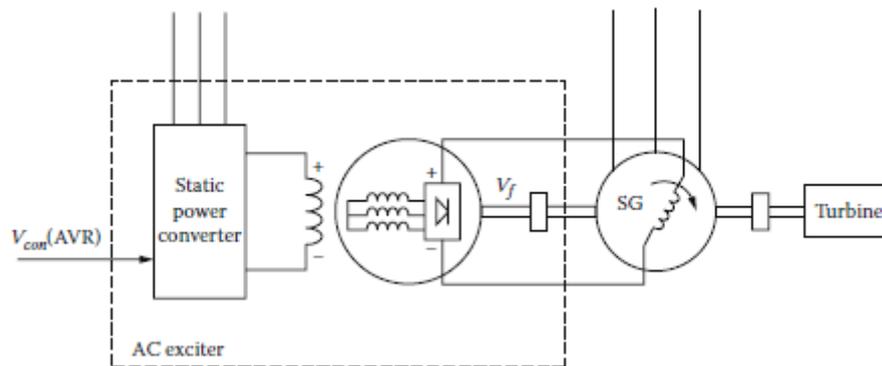
2.2.6 Sistem Eksitasi

Bagian penting dari generator sinkron adalah sistem eksitasi. Fungsi dasar dari sistem eksitasi yaitu menyediakan sumber DC ke kumparan medan generator sinkron. Gambar 2.4 menjelaskan rangkaian ekivalen dari sistem eksitasi, dimana tegangan eksitasi (V_f) sebagai *input* ke dalam sebuah rangkaian. Kumparan medan memiliki resistansi medan (R_f) yang menghasilkan hubungan fluks dengan stator (λ_f).



Gambar 2.4 Rangkaian Ekivalen Sistem Eksitasi [9]

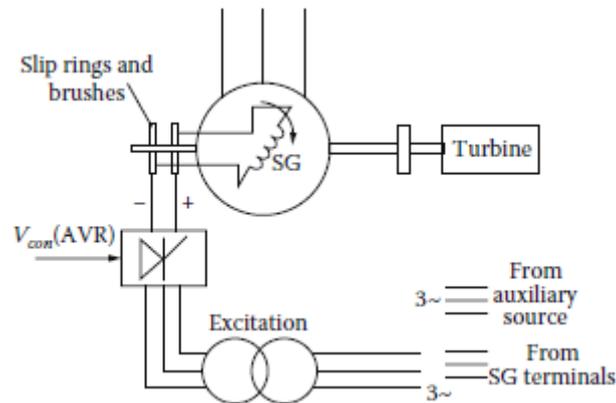
Sistem eksitasi pada generator sinkron dapat diklasifikasikan dalam dua kategori yaitu sistem eksitasi AC dan statis. Sistem eksitasi AC menggunakan mesin AC untuk eksitasi generator. *Exciter* biasanya ditempatkan pada poros yang sama dengan turbin. *Output* AC dari *exciter* diperbaiki oleh penyearah terkontrol atau tidak terkontrol untuk menyediakan DC ke kumparan medan generator.



Gambar 2.5 Sistem Eksitasi AC [10]

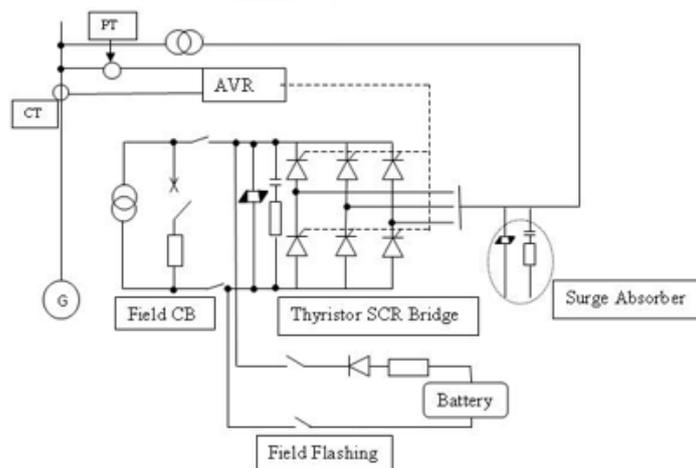
Sistem penyearah yang digunakan pada sistem eksitasi AC kemungkinan dapat bersifat stasioner dan berputar. Saat ini, sistem penyearah stasioner dan berputar banyak digunakan dalam sistem eksitasi AC. Dalam penyearah stasioner, *output* DC diumpankan ke kumparan medan melalui *slip ring*. Sedangkan dalam penyearah berputar, pasokan DC secara langsung diumpankan ke kumparan medan sehingga tidak memerlukan *slip ring* dan *brush*. Sistem seperti ini dikenal sebagai *brushless excitation system* [11].

Gambar 2.6 menunjukkan skema dari sistem eksitasi statis, sesuai dengan namanya bahwa semua komponen didalamnya bersifat statis atau stasioner. Sistem ini terdiri dari jembatan penyearah *thyristor* dan transformator yang dirancang untuk memenuhi semua mode operasi generator berkapasitas besar. Daya DC untuk elektromagnet berasal dari keluaran generator utama itu sendiri atau sumber tambahan melalui transformator [13]. Jembatan penyearah *thyristor* menjadi bagian vital dalam sistem ini karena berfungsi untuk menyearahkan AC ke DC yang akan diumpungkan ke kumparan medan generator melalui *slip ring*.



Gambar 2.6 Sistem Eksitasi Statis [10]

Selama pada proses *start up*, ketika tidak ada keluaran dari generator atau dengan kata lain karena generator tidak dapat menghasilkan tegangan tanpa tegangan eksitasi, maka generator harus memiliki sumber daya tambahan untuk menyediakan arus eksitasi yaitu berupa bank baterai besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, dimana proses ini dikenal sebagai *field flashing*.

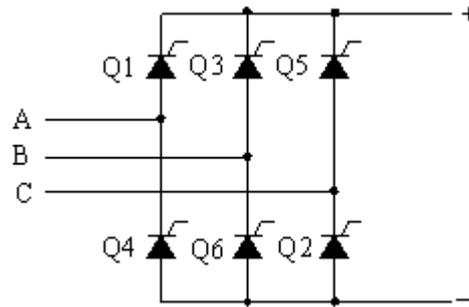


Gambar 2.7 *Field Flashing* pada Generator Sinkron [10]

Sistem pengoperasian unit eksitasi generator berfungsi untuk menjaga agar tegangan tetap konstan atau dengan kata lain generator akan menghasilkan tegangan yang selalu stabil meskipun dipengaruhi oleh perubahan beban.

2.2.7 Jembatan Penyearah Daya

Sistem penyearah dalam sistem eksitasi merupakan komponen yang sangat penting karena peranannya mencatu daya DC ke kumparan medan. Dalam sistem tiga fase yang terhubung ke jembatan enam pulsa, *thyristor* akan menyala dengan selang waktu $\frac{\pi}{3}$. Jenis pengaturan tersebut dikenal dengan rangkaian jembatan gelombang penuh [12].



Gambar 2.8 *Thyristor Controlled Rectifier* [12]

Keluaran rata-rata tegangan DC (V_{dc}) dari sistem penyearah yang dijelaskan dapat diintegrasikan pada setiap interval $\frac{\pi}{3}$, termasuk sudut pemicu (α), persamaan integralnya adalah:

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha + \frac{\pi}{3}} V_{LL} d\omega t \quad (2.4)$$

Substitusi tegangan AC *line-to-line* (V_{LL}) dengan nilai tegangan rms (V_{rms}) dihitung dalam persamaan:

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha + \frac{\pi}{3}} \sqrt{3} V_{peak} \cos(\omega t - 30) d\omega t \quad (2.5)$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{peak} \cos \alpha \quad (2.6)$$

Dengan diberikannya syarat nilai tegangan *line-to-line* ($V_{LL} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_{peak}$), hasil keluaran rata-rata tegangan DC (V_{dc}) dihitung dalam persamaan:

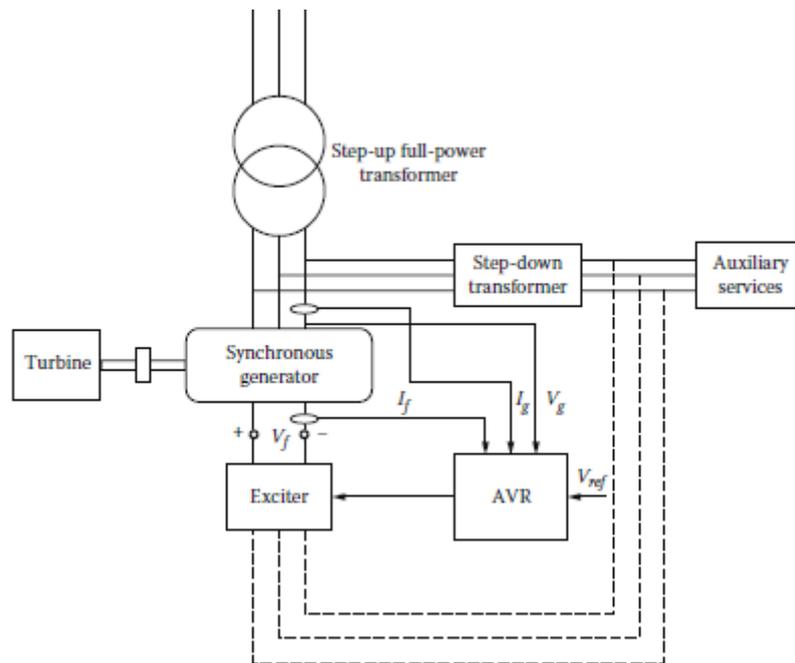
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha \quad (2.7)$$

2.2.8 Konsep Dasar *Automatic Voltage Regulator* (AVR)

Generator sinkron selalu dilengkapi dengan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) yang bekerja pada tegangan DC (V_f) yang mensuplai eksitasi ke kumparan medan pada generator [14]. Eksitasi DC dan AC mengandung generator listrik yang ditempatkan pada poros utama (turbin-

generator) dan memiliki kontrol elektronika daya rendah dari arus eksitasi. Variasi arus eksitasi pada generator dapat menaikkan atau menurunkan tegangan induksi. Dengan menyesuaikan beban yang diberikan pada generator, maka tegangan generator dikontrol sesuai kebutuhan.

AVR mengumpulkan informasi tentang arus dan tegangan generator serta pada arus medan berdasarkan kesalahan kontrol tegangan medan (V_f) melalui tegangan kontrol yang bertindak pada variabel yang dikontrol dalam *exciter*. Gambar 2.9 merupakan sistem eksitasi dari suatu generator sinkron dengan *exciter* dan AVR.



Gambar 2.9 Skema *Exciter* dan AVR [10]

Selain itu AVR mempunyai fungsi kontrol dan proteksi yang penting untuk kinerja sistem daya yang baik dengan mengontrol dan menjaga tegangan pada nilai normal sesuai dengan penyesuaian eksitasi.

BAB 3

METODOLOGI

3.1 Data Penelitian

3.1.1 Data Teknis Generator Sinkron

Generator sinkron yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini adalah generator sinkron PLTA Saguling, Jawa Barat. Berikut merupakan data teknis generator sinkron seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Teknis Generator Sinkron

Deskripsi	Parameter	Nilai
Daya nominal	P_n	206,1 MVA
Tegangan nominal	V_n	16,5 kV
Frekuensi	f	50 Hz
Jumlah kutub	P	18
<i>Rated current</i>	I_a	7212 A
<i>Maximum field voltage</i>	V_f	500 V
<i>Nominal field current</i>	I_{fn}	645 A
<i>Field current at full load</i>	I_{fload}	1180 A
<i>Synchoronous reactance</i>	X_s	1,32 Ω

3.1.2 Parameter Model Sistem Eksitasi Statis

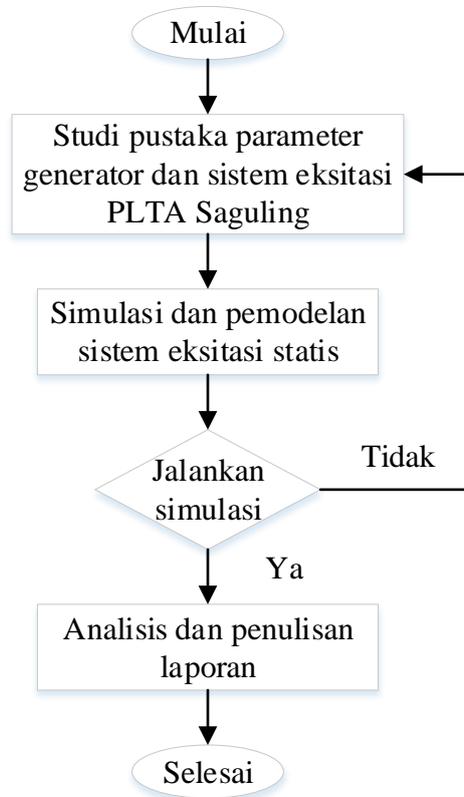
Representasi parameter model selanjutnya adalah karakteristik sistem eksitasi. Berikut merupakan parameter model sistem eksitasi statis yang diperoleh dari PLTA Saguling seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter Model Sistem Eksitasi Statis

Parameter	Nilai
<i>Input source</i>	16,5 kV, 3 <i>phase</i>
Daya nominal transformator	850 kVA
Transformator primer	16,5 kV
Transformator sekunder	420 V
Jembatan penyearah daya	3 <i>arms</i>
<i>Field resistance</i>	1 Ω
<i>Field inductance</i>	4,20 mH

3.2 Alur Penelitian

Secara garis besar alur penelitian ini akan menggambarkan bagaimana penelitian dilakukan. Berikut merupakan diagram alir penelitian seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Beberapa tahapan penelitian yang dilakukan berdasarkan Gambar 3.1 adalah:

1. Mengumpulkan parameter generator sinkron dan karakteristik sistem eksitasi yang diperoleh dari PLTA Saguling. Hal ini dimaksudkan untuk memasukkan nilai parameter pada saat proses pemodelan sistem eksitasi statis pada generator sinkron.
2. Memodelkan dan mensimulasikan sistem eksitasi statis dengan menggunakan MATLAB *Simulink* R2017b yang terdiri dari *input source*, transformator dan *thyristor* dalam konfigurasi jembatan sebagai *convert AC to DC*, kemudian hasil keluaran tegangan DC (V_{dc}) akan diumpankan ke generator sinkron.
3. Menjalankan simulasi hingga memperoleh tegangan keluaran generator yang tidak melebihi batas nilai nominalnya terhadap perubahan beban daya reaktif dengan berdasarkan penyesuaian eksitasi.

4. Melakukan analisis dan pembahasan berdasarkan hasil simulasi berupa pengaturan sudut penembakkan *thyristor* (sudut alfa) yang tepat untuk memperoleh tegangan yang sesuai dengan nilai nominalnya dan pengaruh perubahan beban daya reaktif terhadap arus eksitasi dan tegangan keluaran generator. Berdasarkan analisis tersebut kemudian hasilnya disajikan dalam bentuk laporan.

3.3 Perancangan Model Simulasi

Seluruh sistem akan dimodelkan dan disimulasikan dengan menggunakan *software* MATLAB *Simulink* R2017b. Secara garis besar, sistem dapat dijelaskan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Blok Diagram Penelitian

Penjelasan blok diagram penelitian berdasarkan Gambar 3.2 adalah:

1. *Input source* sebagai sumber eksitasi yang merupakan sumber tegangan tiga fase (16,5 kV, 50 Hz).
2. Transformator digunakan untuk menyesuaikan tegangan *output* 16,5 kV dari *input source* ke jembatan penyearah daya.
3. Jembatan penyearah daya adalah konverter penuh dan enam pulsa generator (*thyristor*) tersinkronisasi. Jembatan penyearah yang diterapkan berfungsi untuk menyearahkan tegangan AC dari keluaran transformator menjadi tegangan DC yang kemudian akan diumpankan ke kumparan medan generator sebagai catu daya sistem eksitasi.
4. Generator sinkron merupakan mesin listrik berputar yang menghasilkan tegangan bolak-balik terhadap sistem.

3.4 Implementasi Blok Model pada MATLAB *Simulink* R2017b

Berikut akan dijelaskan beberapa model blok utama yang akan diimplementasikan dalam proses simulasi pemodelan sistem eksitasi statis pada generator sinkron dengan menggunakan MATLAB *Simulink* R2017b.

3.4.1 Mesin Sinkron

Blok mesin sinkron dapat beroperasi dalam mode generator atau motor. Mode pengoperasian ditentukan oleh tanda daya mekanis (positif untuk mode generator, negatif untuk mode motor). Dalam penelitian ini, blok mesin sinkron beroperasi dalam mode generator.

Penjelasan *input* dan *output* dari blok mesin sinkron adalah:

1. *Input simulink* pertama dari blok adalah daya mekanis pada poros mesin (P_m).
2. *Input simulink* kedua adalah tegangan medan (V_f). Tegangan ini berupa tegangan DC (V_{dc}) yang dihasilkan dari keluaran jembatan penyearah daya.
3. *Output simulink* dari blok adalah vektor yang berisi sinyal keluaran (m) yaitu arus eksitasi (I_{fd}).

3.4.2 Three-Phase Voltage Source

Blok *three-phase voltage source* merupakan sumber tegangan tiga fase sebagai sumber statis dari sistem eksitasi yang akan diimplementasikan pada generator sinkron.

3.4.3 Three-Phase Transformer

Blok *three-phase transformer* mengimplementasikan transformator tiga fase dengan koneksi gulungan yang dapat dikonfigurasi. Transformator yang diterapkan dalam penelitian adalah transformator *step-down* dengan satu gulungan primer dalam mode bintang (Y) dan satu gulungan sekunder dalam mode delta (Δ) yang berfungsi untuk menyesuaikan tegangan dari *input source* ke jembatan penyearah daya.

3.4.4 Pulse Generator (Thyristor, 6-Pulse)

Blok *pulse generator (thyristor, 6-pulse)* digunakan untuk menembak *thyristor* dan mengontrol konverter *thyristor* dari jembatan penyearah daya.

Penjelasan *input* dan *output* dari blok *pulse generator* adalah:

1. *Input* pertama *alpha_deg* adalah sinyal pengaktifan *alpha* yang dihubungkan ke blok konstan.
2. *Input* selanjutnya yaitu AB, BC, CA merupakan tegangan sinkronisasi fase ke fase (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}).
3. *Input* terakhir yaitu *Block* yang berfungsi untuk memblokir pengoperasian sinyal pulsa (pulsa di non-aktifkan ketika sinyal yang diberikan lebih besar dari nol).

4. *Output* dari blok ini adalah vektor yang berisi enam sinyal pulsa yang terhubung ke *input* gerbang (*g*) pada jembatan penyearah daya.

3.4.5 Jembatan Penyearah Daya

Blok jembatan penyearah daya mengimplementasikan jembatan perangkat elektronika daya yang menerapkan konverter daya tiga fase untuk menyearahkan AC ke DC. Jenis perangkat elektronika daya yang digunakan di jembatan adalah *thyristors*.

Penjelasan *input* dan *output* dari blok jembatan penyearah daya adalah:

1. *Input gate* (*g*) ini menerima sinyal pulsa dari *output* blok *pulse generator* (*thyristor*, 6-*pulse*).
2. *Input* A, B, C terhubung ke *output* transformator.
3. *Output* dari blok ini merupakan nilai rata-rata tegangan DC (V_{dc}) dari keluaran jembatan penyearah daya.

3.4.6 RLC Parallel Load

Blok RLC *parallel load* mengimplementasikan beban seimbang tiga fase. Blok ini terhubung ke generator melalui blok model pengukuran tegangan dan arus generator tiga fase.

3.4.7 Powergui

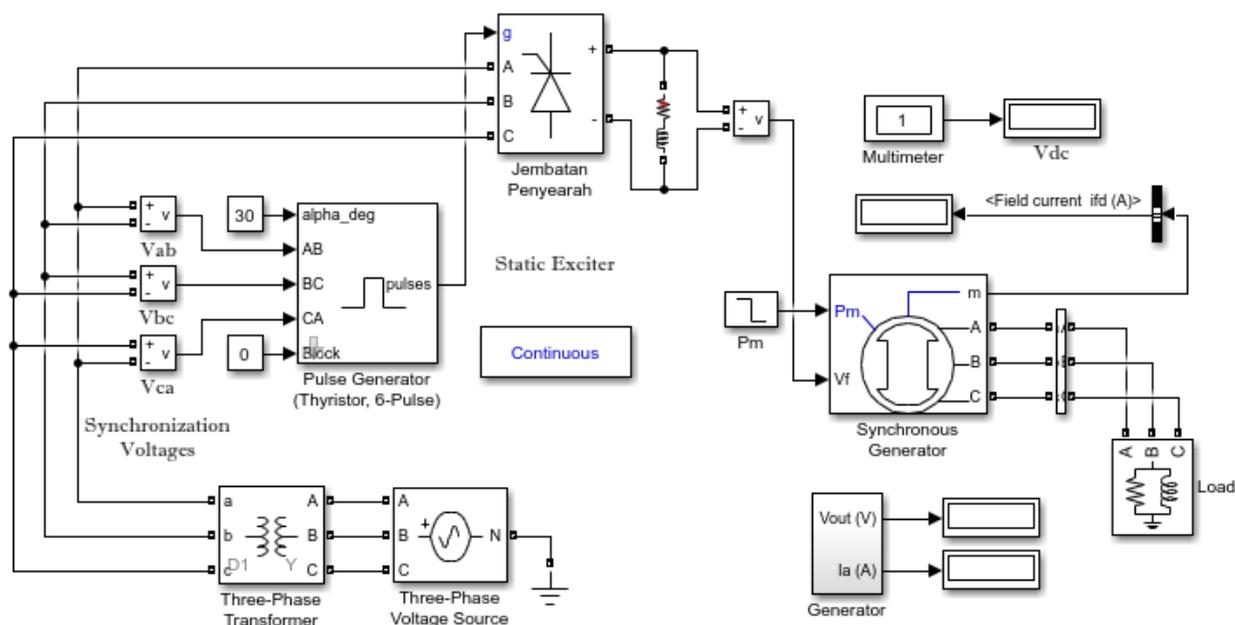
Blok *powergui* merupakan sebuah antarmuka grafis yang berguna untuk menyelesaikan sebuah pemodelan atau rangkaian yang telah dibuat dengan berbagai metode yang telah disediakan. Selain itu blok ini dapat menyetel jenis simulasi, parameter simulasi dan preferensi. Jenis metode yang diterapkan dalam penelitian ini dengan menggunakan metode *continuous* (*default*) yaitu berupa *variable-step solver* otomatis dari *simulink*.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Model Simulasi

Seluruh sistem telah dimodelkan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB *Simulink* R2017b seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1, dimana sistem ini terdiri dari generator sinkron tiga fase dengan nilai nominal 206,1 MVA, 16,5 kV dihubungkan ke beban dengan jenis sistem eksitasi yang diterapkan adalah sistem eksitasi statis.



Gambar 4.1 Model Simulasi

Fungsi dasar dari setiap sistem eksitasi adalah untuk menyediakan sumber DC ke kumparan medan generator sinkron. Sistem eksitasi mengontrol dan melindungi fungsi-fungsi penting dari sistem tenaga untuk operasi dan kinerja yang optimal. Fungsi kontrol termasuk kontrol tegangan generator dan peningkatan stabilitas sistem. Fungsi pelindung memastikan bahwa batas kemampuan mesin sinkron, sistem eksitasi dan peralatan lainnya tidak terlampaui.

Dalam sistem eksitasi yang direalisasikan, sumber daya untuk menyediakan eksitasi berasal dari sumber tegangan tiga fase yang terhubung melalui transformator. Transformator yang dimaksud adalah transformator *step-down* dengan satu gulungan primer dalam mode bintang (Y) dan satu gulungan sekunder dalam mode delta (Δ) yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari 16,5 kV menjadi 420 VAC.

Telah disebutkan bahwa pada dasarnya sistem eksitasi membutuhkan sumber DC maka *output* transformator dihubungkan ke konverter jembatan tiga fase. Konverter ini merupakan penyearah jembatan terkontrol yang dikontrol sepenuhnya dengan menggunakan enam *thyristor*

yang terhubung dalam konfigurasi jembatan. Hasil dari tegangan yang telah disearahkan oleh jembatan penyearah merupakan nilai rata-rata tegangan DC yang mana akan diumpankan dan sebagai *input* dari blok generator sinkron (V_f).

4.2 Hasil Simulasi

4.2.1 Hasil Simulasi Pemodelan Sistem Eksitasi Statis

Perlu diketahui bahwa nilai tegangan nominal generator sinkron dalam penelitian ini adalah 16,5 kV. Untuk menentukan nilai rata-rata tegangan DC dalam pemodelan ini dilakukan oleh blok multimeter dimana blok ini menghitung tegangan yang ditentukan dalam parameter perhitungan dalam model yang telah dibuat.

Dengan menyatakan tidak adanya titik netral pada koneksi transformator dalam mode delta, maka besarnya tegangan saluran dan tegangan fase mempunyai besar *magnitude* yang sama yaitu $V_{LL} = 420$ V. Tabel 4.1 menunjukkan nilai rata-rata tegangan DC (V_{dc}) yang dihasilkan pada keluaran jembatan penyearah pada sudut alfa 30° . Sudut 30° ini merupakan besarnya pergeseran fase pada koneksi transformator dengan keterangan gulungan sekunder dalam mode delta (Δ).

Tabel 4.1 Nilai Rata-rata Tegangan DC

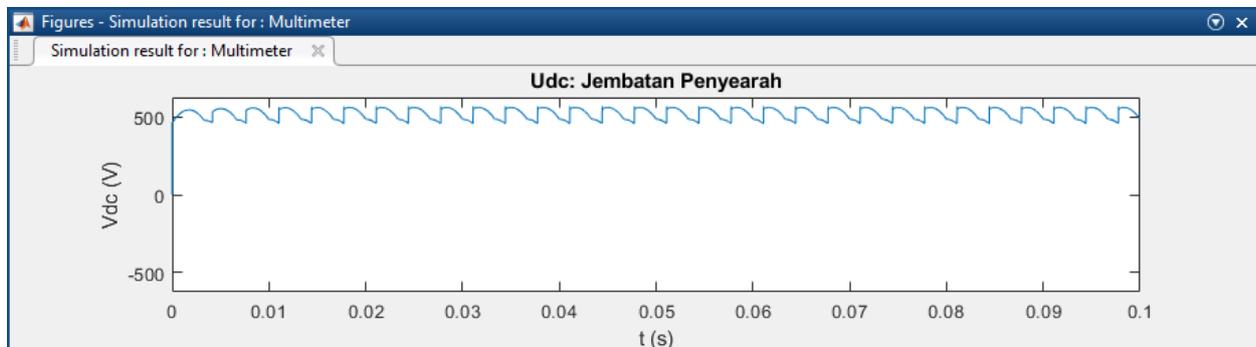
Hasil perhitungan	Hasil simulasi
$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} 420 \cos(30^\circ) = 491,01$ V	$V_{dc} = 483,4$ V

Berdasarkan Tabel 4.1, bahwa hasil perhitungan manual dan hasil simulasi yang dihitung oleh multimeter, nilai rata-rata tegangan DC yang diperoleh menunjukkan hasil yang berbeda tetapi tidak terlalu signifikan. Dimana nilai kesalahan diperoleh sebesar 7,61 dan tingkat kedekatan nilai perhitungan dibandingkan dengan nilai yang diinginkan diperoleh sebesar 98,46 %.

Simulasi pertama dalam pemodelan sistem eksitasi statis dijalankan dengan sudut alfa 0° (blok konstan yang terhubung pada *input* satu dari blok *pulse generator (thyristor, 6-pulse)* diatur nilainya ke 0) dan beban yang diberikan pada generator dalam kondisi beban penuh yaitu sebesar $P = 175$ MW, $Q = 100$ MVAR. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tegangan keluaran generator telah meningkat melampaui tegangan nominalnya yaitu sebesar 16,72 kV, dimana nilai rata-rata tegangan DC yang menjadi *input* tegangan medan (V_f) dari blok generator sinkron diperoleh sebesar 496,4 V dan arus eksitasi diperoleh sebesar 1057 A.

Dalam hal ini, untuk mempertahankan tegangan terminal sesuai dengan nilai nominalnya maka arus eksitasi harus dikurangi yaitu dengan meningkatkan sudut penembakkan *thyristor*

menjadi sudut alfa 45° sehingga nilai rata-rata tegangan DC dapat berkurang menjadi 479,3 V, begitu juga dengan arus eksitasinya menjadi 985,9 A. Tegangan keluaran pada sudut alfa 45° diperoleh sesuai dengan nilai nominalnya yaitu 16,5 kV. Gambar 4.2 menunjukkan hasil keluaran gelombang tegangan DC (V_{dc}) dari blok jembatan penyearah daya.



Gambar 4.2 Hasil Keluaran Gelombang Tegangan DC

Pengaturan tegangan generator dilakukan dengan mengontrol nilai tegangan medan dari keluaran jembatan penyearah. Perbandingan hasil simulasi berdasarkan sudut alfa ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan Hasil Simulasi Berdasarkan Sudut Alfa

Sudut alfa	Tegangan medan (V)	Arus eksitasi (A)	Tegangan keluaran (kV)
0°	496,4	1057	16,72
10°	490,7	1026	16,65
20°	485,1	1013	16,6
30°	483,4	997,4	16,56
40°	480,9	990,2	16,52
45°	479,3	985,9	16,5
50°	477,5	981,3	16,47
60°	474,3	953,6	16,32
70°	462,1	938,2	16,22
80°	460,9	937,6	16,21
90°	440,2	914,4	16

Berdasarkan Tabel 4.2, bahwa dalam kondisi beban $P = 175 \text{ MW}$, $Q = 100 \text{ MVAR}$ pengaturan nilai sudut penembakkan *thyristor* yang tepat untuk memperoleh tegangan generator berada pada nilai nominalnya yaitu pada sudut alfa 45° .

4.2.2 Hasil Simulasi Pengaruh Perubahan Beban Daya Reaktif (Induktif)

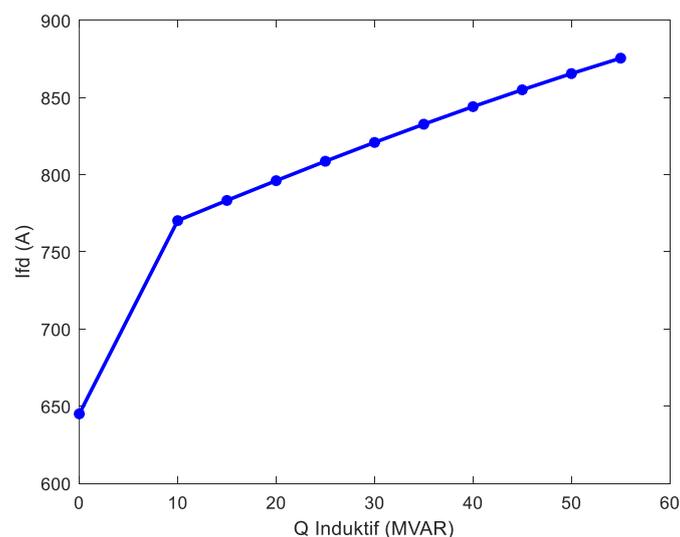
Hasil simulasi pemodelan sistem eksitasi statis pada generator sinkron selanjutnya yaitu dengan menyesuaikan beban yang diberikan pada generator sehingga nantinya dapat diketahui besarnya arus eksitasi (I_{fd}) yang dapat mempengaruhi besarnya tegangan keluaran generator (V_{out}) terhadap perubahan beban.

Simulasi pengaruh perubahan beban pada generator yang dilakukan dalam penelitian ini adalah hanya mengubah nilai beban daya reaktif yang diperoleh dari hasil percobaan dan untuk nilai beban daya aktif ditetapkan sama yaitu sebesar $P = 175$ MW. Sudut penembakkan *thyristor* ditetapkan pada sudut alfa 30° . Hasil data pengujian perubahan beban daya reaktif (induktif) ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Data Pengujian Perubahan Beban Daya Reaktif (Induktif)

Data ke-	Generator			Arus eksitasi A	
	Beban		Arus		Tegangan
	MW	MVAR	A		kV
1.	175	10	6211	16,54	770,2
2.	175	15	6252	16,5	783,3
3.	175	20	6301	16,46	796,1
4.	175	25	6358	16,42	808,7
5.	175	30	6422	16,38	820,9
6.	175	35	6490	16,34	832,7
7.	175	40	6561	16,3	844,1
8.	175	45	6634	16,26	855
9.	175	50	6706	16,21	866,5
10.	175	55	6778	16,17	875,5

Berdasarkan Tabel 4.3, pengujian pertama yang dilakukan dalam simulasi adalah pada saat beban daya reaktif (induktif) $Q = 10$ MVAR, arus eksitasi diperoleh sebesar 770,2 A dan tegangan keluaran generator diperoleh sebesar 16,54 kV. Hubungan kenaikan beban daya reaktif (induktif) terhadap arus eksitasi dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hubungan Kenaikan Beban Q Induktif Terhadap Arus Eksitasi

Kemudian pada saat beban daya reaktif (induktif) dinaikkan menjadi $Q = 55$ MVAR, dapat menyebabkan fluktuasi tegangan dimana tegangan keluaran generator menurun menjadi 16,17 kV sehingga arus eksitasi pada generator semakin besar nilainya menjadi 875,5 A. Hal ini dikarenakan

dengan meningkatnya beban daya reaktif (induktif) maka tegangan keluaran generator menurun, sehingga untuk tetap menjaga kestabilan tegangan yang dihasilkan oleh generator agar tidak melebihi batas toleransi maka arus eksitasi harus diperbesar.

Dalam hasil pengujian, pengaturan sudut alfa 30° hanya dapat memperoleh tegangan sesuai dengan nilai nominal pada beban $P = 175 \text{ MW}$, $Q = 15 \text{ MVAR}$ dengan nilai tegangan keluaran $16,5 \text{ kV}$. Apabila tegangan generator melampaui atau mengalami penurunan, maka dapat diatur dengan menaikkan atau menurunkan nilai sudut alfa sehingga eksitasi dapat disesuaikan.

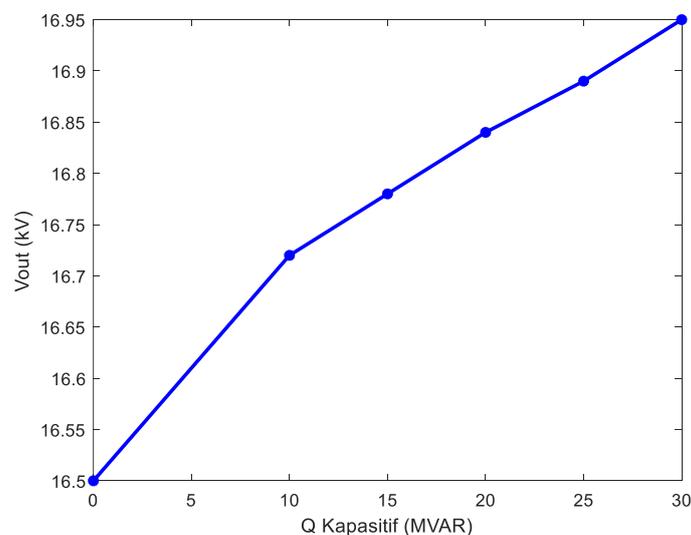
4.2.3 Hasil Simulasi Pengaruh Perubahan Beban Daya Reaktif (Kapasitif)

Berikut merupakan hasil data pengujian perubahan beban daya reaktif (kapasitif) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4, dan untuk pengaturan sudut penembakkan *thyristor* ditetapkan pada sudut alfa 30° .

Tabel 4.4 Hasil Data Pengujian Perubahan Beban Daya Reaktif (Kapasitif)

Data ke-	Generator				Arus eksitasi
	Beban		Arus	Tegangan	
	MW	MVAR	A	kV	A
1.	175	10	6216	16,72	725,8
2.	175	15	6250	16,78	716,9
3.	175	20	6289	16,84	708
4.	175	25	6333	16,89	699
5.	175	30	6383	16,95	690

Berdasarkan Tabel 4.4, kenaikan beban daya reaktif (kapasitif) dapat menyebabkan kenaikan tegangan keluaran generator. Hubungan kenaikan beban daya reaktif (kapasitif) terhadap tegangan keluaran generator dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Hubungan Kenaikan Beban Q Kapasitif Terhadap Tegangan Keluaran

Selain itu, dalam hasil pengujian beban daya reaktif (kapasitif) pada pengaturan sudut alfa 30°, diperoleh bahwa semua nilai tegangan generator telah meningkat melampaui nilai nominalnya, sehingga untuk memperoleh tegangan nominalnya, maka pengaturan sudut penembakkan *thyristor* perlu dinaikkan.

Pada saat nilai sudut alfa dinaikkan dari 30° menjadi 60°, hasil pengujian dalam kondisi beban $P = 175 \text{ MW}$, $Q = 10 \text{ MVAR}$, arus eksitasi (I_{fd}) berkurang menjadi 684,6 A dan nilai tegangan keluaran (V_{out}) diperoleh hampir mendekati nilai tegangan nominalnya yaitu 16,46 kV.

Kenaikan beban daya reaktif berupa induktif ataupun kapasitif, diketahui bahwa nilai arus jangkar (I_a) juga semakin besar. Hal ini dikarenakan dengan bertambahnya beban, maka generator membutuhkan injeksi arus yang lebih besar.

4.3 Analisis Perhitungan Variasi Arus Eksitasi Terhadap Tegangan Induksi

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa dengan menyesuaikan beban yang diberikan pada generator, maka variasi arus eksitasi dapat meningkatkan dan menurunkan tegangan induksi (E_a). Berdasarkan data standar generator sinkron yang ditunjukkan pada Tabel 3.1, diketahui bahwa reaktansi sinkron $X_s = 1,32 \Omega$. Dari hasil data pengujian perubahan beban daya reaktif (induktif) dari simulasi pemodelan sistem eksitasi statis, tegangan yang dibangkitkan generator dapat dihitung sebagai berikut:

$$E_a = 16420 + (j1,32 \times 6358)$$

$$E_a = 18440,48 \angle 27,07^\circ$$

$$E_a = 18,440 \text{ kV}$$

Sesuai perhitungan berdasarkan Persamaan (2.3), maka hasil perhitungan tegangan induksi yang diperoleh dari hasil simulasi pengaruh perubahan beban daya reaktif (induktif) ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Tegangan Induksi

Data ke-	Beban		I_a (A)	V_{out} (kV)	I_{fd} (A)	E_a (kV)
	MW	MVAR				
1.	175	10	6211	16,54	770,2	18,431
2.	175	15	6252	16,5	783,3	18,433
3.	175	20	6301	16,46	796,1	18,437
4.	175	25	6358	16,42	808,7	18,440
5.	175	30	6422	16,38	820,9	18,443
6.	175	35	6490	16,34	832,7	18,449
7.	175	40	6561	16,3	844,1	18,457
8.	175	45	6634	16,26	855	18,468
9.	175	50	6706	16,21	866,5	18,469
10.	175	55	6778	16,17	875,5	18,480

Dalam perhitungan tegangan yang dibangkitkan generator sesuai dengan Tabel 4.5, dapat diperoleh bahwa semakin besar arus eksitasi (I_{fd}) maka tegangan induksi (E_a) semakin besar. Kenaikan arus eksitasi ini memiliki peranan yang penting untuk menyesuaikan dan mempertahankan tegangan keluaran generator yang nilainya berubah-ubah. Tegangan keluaran generator yang awalnya sesuai dengan nilai nominalnya pada beban $P = 175 \text{ MW}$, $Q = 15 \text{ MVAR}$, kemudian dikarenakan perubahan beban daya reaktif berupa induktif terus meningkat maka tegangan terminal mengalami penurunan, sehingga nilai arus eksitasi semakin besar, begitu juga dengan sebaliknya. Penjelasan tersebut dapat membuktikan bahwa arus eksitasi berguna untuk menjaga kestabilan tegangan terminal generator agar tetap pada batas toleransi dan cenderung konstan meskipun dalam kondisi beban yang sifatnya berubah-ubah.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah diperoleh maka kesimpulan dari penelitian simulasi pemodelan sistem eksitasi statis pada generator sinkron terhadap perubahan beban adalah:

1. Apabila tegangan keluaran generator telah meningkat melampaui tegangan nominalnya, maka arus eksitasi harus dikurangi dengan cara meningkatkan sudut penembakkan *thyristor*, begitu juga dengan sebaliknya.
2. Kenaikan beban daya reaktif (induktif) dapat menyebabkan tegangan keluaran generator mengalami penurunan sehingga arus eksitasi harus diperbesar. Sedangkan kenaikan beban daya reaktif (kapasitif) dapat menyebabkan tegangan keluaran generator meningkat sehingga arus eksitasi perlu dikurangi.
3. Arus eksitasi berbanding lurus dengan tegangan yang dibangkitkan generator, dimana semakin besar arus eksitasi maka semakin besar juga tegangan yang dibangkitkan generator.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan, saran dalam pengembangan penelitian selanjutnya adalah:

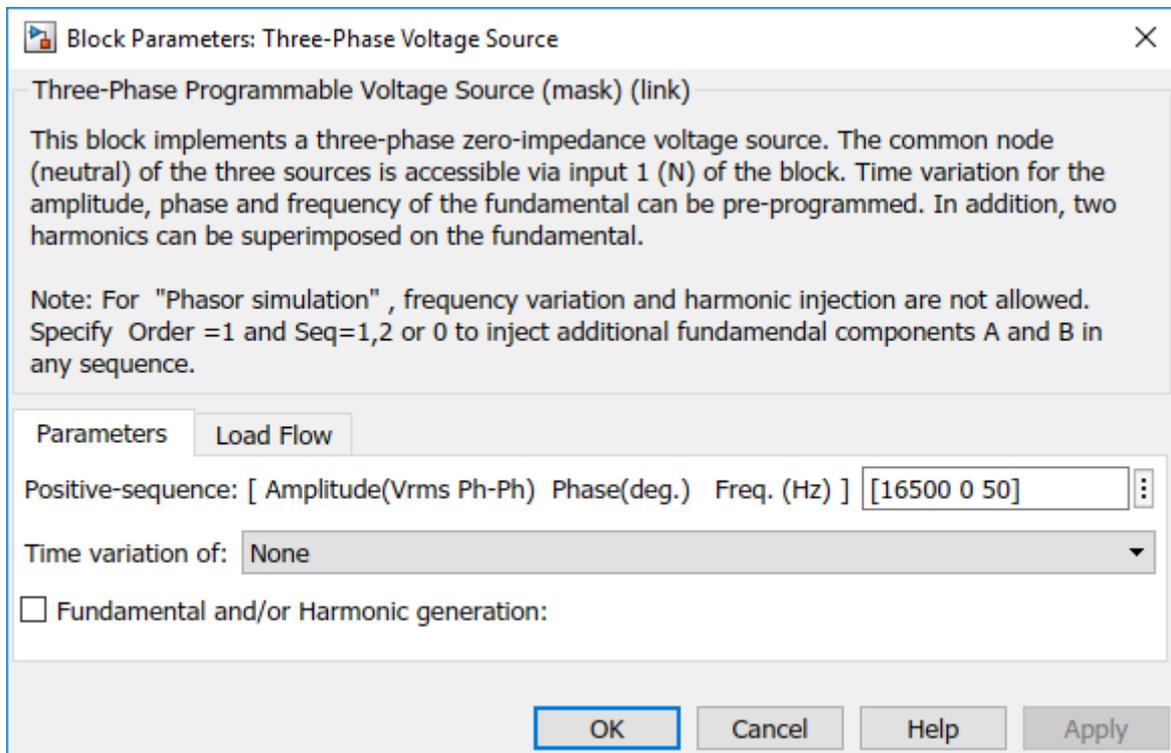
1. Dalam hal pengoperasian generator perlu diperhatikan kelayakan dari sistem kontrol generator guna memperoleh pengaturan yang tepat bagi generator sehingga kestabilan generator tetap terjaga.
2. Untuk lebih menjelaskan kontrol tingkat eksitasi, maka perlu memiliki pemahaman tentang karakteristik sistem eksitasi dan kemampuan untuk mengontrol arus eksitasi pada generator.

DAFTAR PUSTAKA

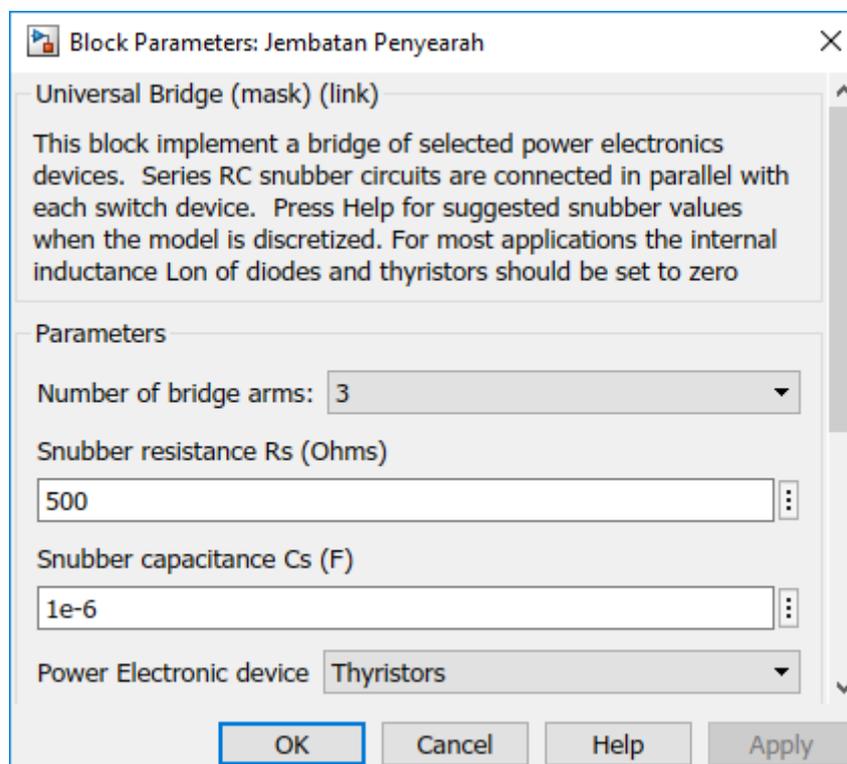
- [1] K. S. Z. Jerkovic, Vedrana; Miklosevic, "Excitation System Models of Synchronous Generator," *28th Int. Conf. Sci. Pract.*, 2010.
- [2] S. Tsegaye and K. A. Fante, "Analysis of Synchronous Machine Excitation Systems : Comparative Study," *Int. J. Energy Power Eng.*, vol. 10, no. 12, pp. 1492–1496, 2016.
- [3] J. K. Noland and U. Lundin, "Step Time Response Evaluation of Different Synchronous Generator Excitation Systems," *IEEE Int. Energy Conf.*, pp. 1–7, 2016.
- [4] I. Ridzki, "Analisis Pengaruh Perubahan Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator," *J. ELTEK*, vol. 11, no. 2, pp. 31–41, 2013.
- [5] I. S. Amien, "Studi Pengaruh Arus Eksitasi Pada Generator Sinkron Yang Bekerja Paralel Terhadap Perubahan Faktor Daya," *SINGUDA ENSIKOM*, vol. 7, no. 1, pp. 8–15, 2014.
- [6] S. Armansyah, "Pengaruh Penguatan Medan Generator Sinkron Terhadap Tegangan Terminal," *J. Tek. Elektro UISU*, vol. 1, no. 3, pp. 48–55, 2016.
- [7] R. G. Terimananda, N. Hariyanto, and Syahrial, "Studi Pengaturan Arus Eksitasi untuk Mengatur Tegangan Keluaran Generator di PT Indonesia Power UBP Kamojang Unit 2," *Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 2016.
- [8] Y. I. Al Mashhadany, F. Amir, and N. Anwer, "Modeling, Simulation and Analysis of Excitation System for Synchronous Generator," *Asian J. Eng. Technol.*, vol. 02, no. 05, pp. 430–437, 2014.
- [9] S. Hobi, "Simulation of a Synchronous Machine Model," *Power Syst. Lab.*, 2018.
- [10] I. Boldea, *The Electric Generators Handbook, Synchronous Generators, Second Edition (CRC Press)*. Taylor & Francis Group, LLC, 2016.
- [11] M. Irmak, E. Guler, N. Ersan, "PI Controlled Solar Energy Supported Static Excitation System Design and Simulation for Synchronous Generators," *ICRERA*, vol. 5, 2016.
- [12] P. Butros, "Simulations of Rotating Brushless AC Excitation System with Controlled Thyristor Bridge Rectifier for Hydropower Generators," *UPTEC*, pp. 3–38, 2011.
- [13] A. K. Datta, M. Dubey, and S. Jain, "Modelling and Simulation of Static Excitation System in Synchronous Machine Operation," vol. 8, no. 3, pp. 564–569, 2014.
- [14] M. Pamungkas and E. Rijanto, "Modifikasi Topologi Pengendali PID untuk Automatic Voltage Regulator Generator Sinkron," *JNTETI*, vol. 6, no. 3, pp. 380–385, 2017.

LAMPIRAN

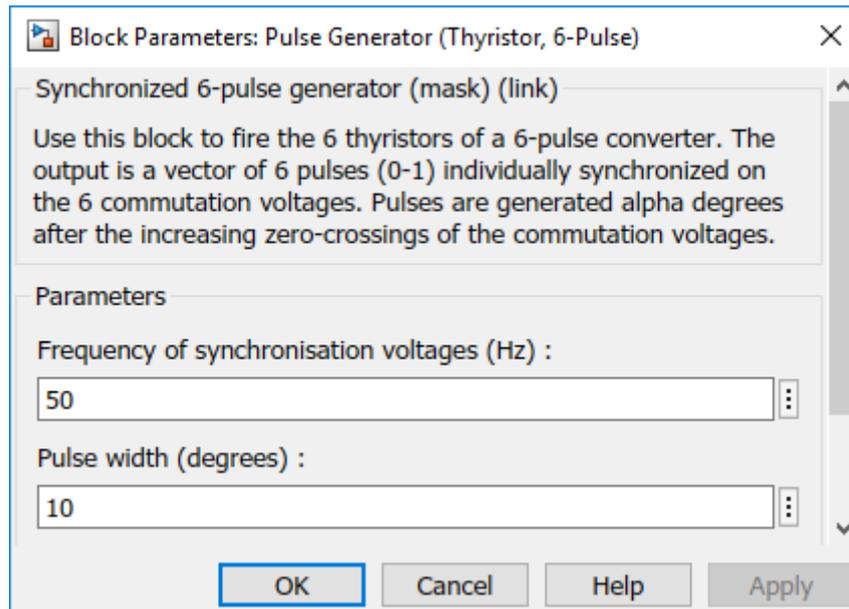
Lampiran 1. Tab Blok Sumber Tegangan



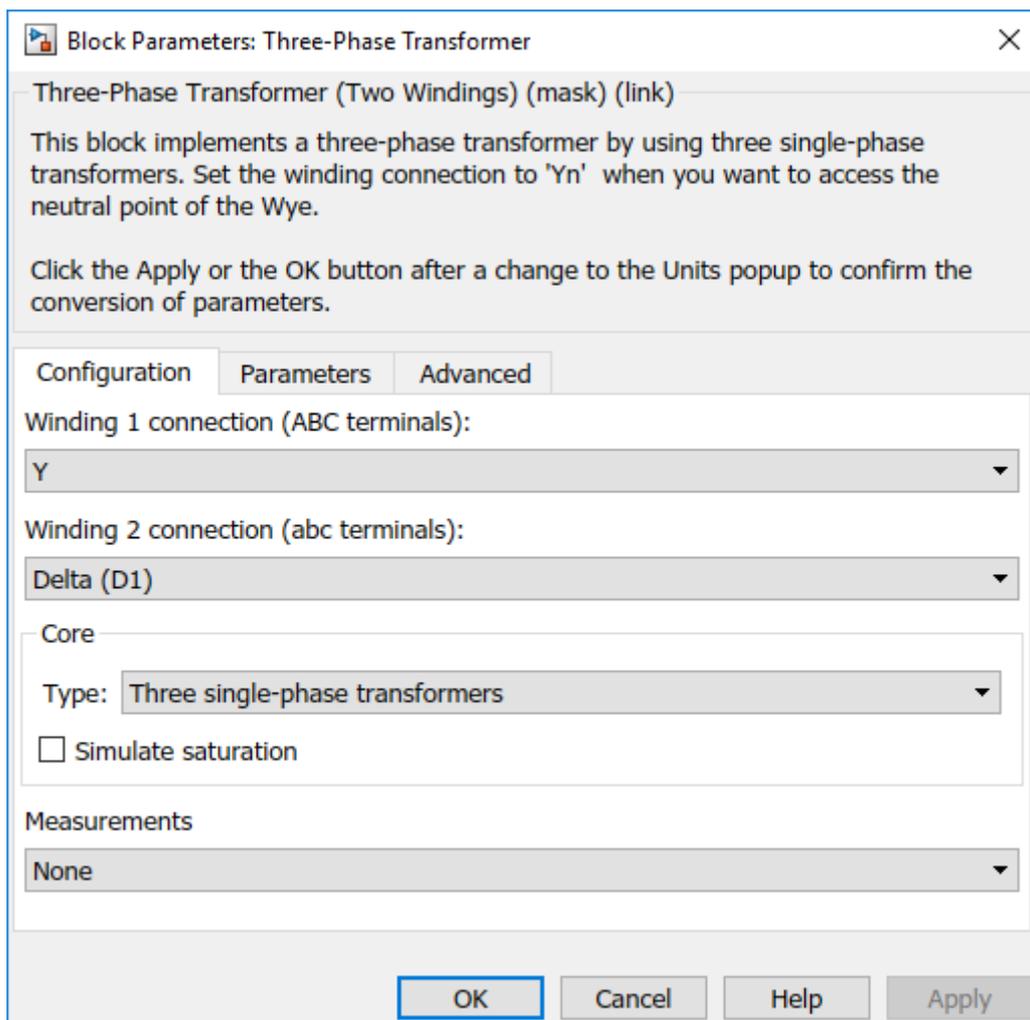
Lampiran 2. Tab Blok Jembatan Penyearah



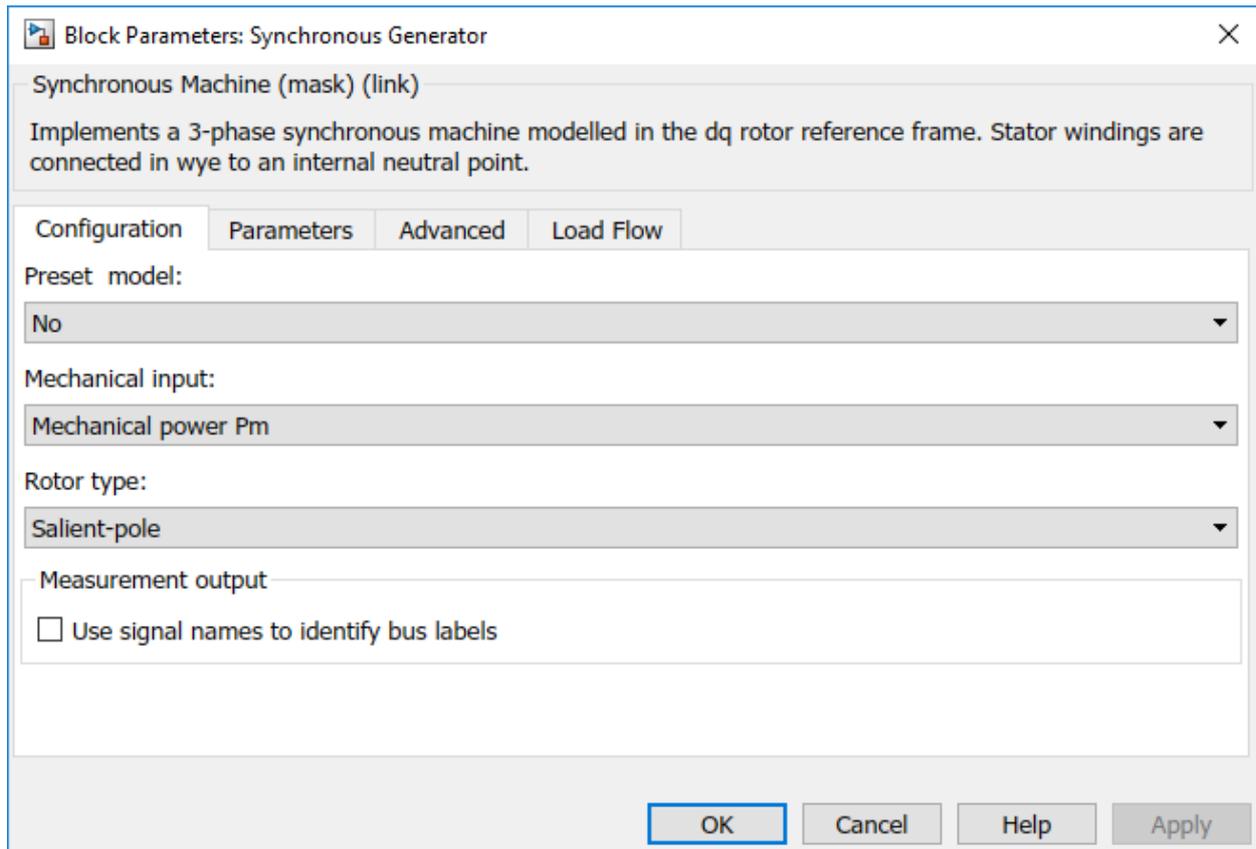
Lampiran 3. Tab Blok Pulsa Generator



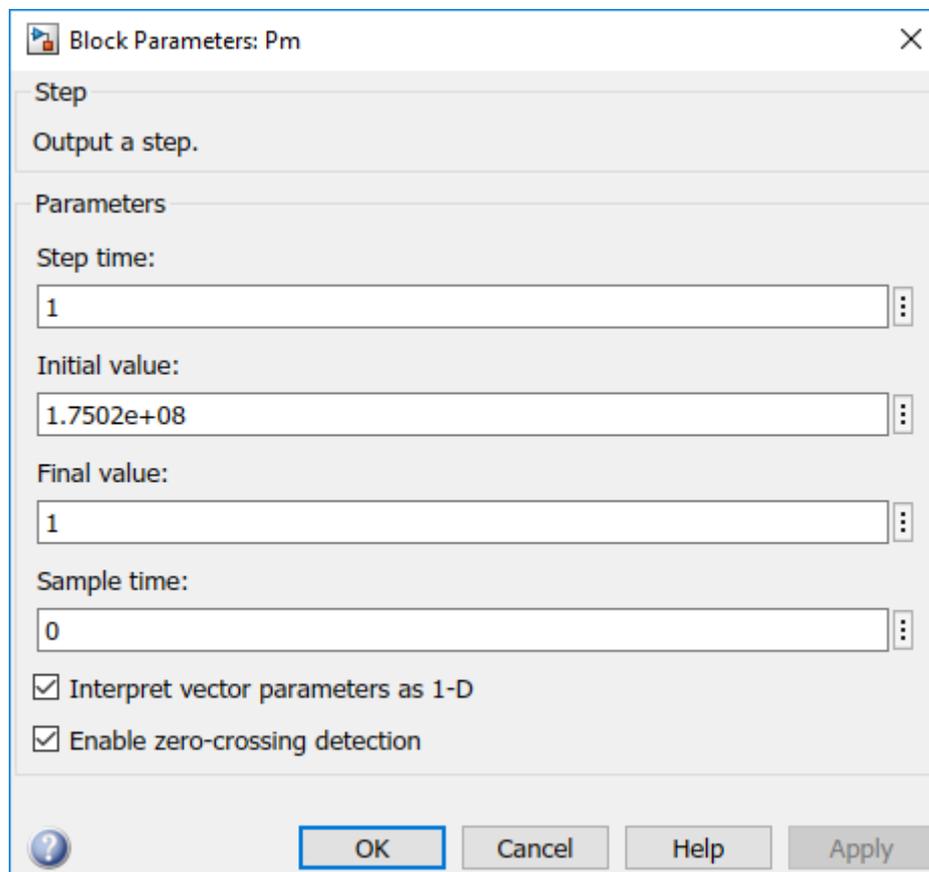
Lampiran 4. Tab Blok Transformator



Lampiran 5. Tab Blok Generator Sinkron



Lampiran 6. Tab Blok Pm



Lampiran 7. Tab Blok Beban

Block Parameters: Load

Three-Phase Parallel RLC Load (mask) (link)
Implements a three-phase parallel RLC load.

Parameters Load Flow

Configuration Y (grounded)

Nominal phase-to-phase voltage V_n (Vrms) 16500

Nominal frequency f_n (Hz): 50

Specify PQ powers for each phase

Active power P (W): 175e6

Inductive reactive Power Q_L (positive var): 100e6

Capacitive reactive power Q_c (negative var): 0

Measurements None

OK Cancel Help Apply