

**KENDALI STABILITAS FREKUENSI PADA SISTEM TENAGA
BERINERSIA RENDAH MENGGUNAKAN *VIRTUAL SYNCHRONOUS*
*GENERATOR***

(Tesis)

Oleh

**NOVIA UTAMI PUTRI
NPM 1725031016**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

**KENDALI STABILITAS FREKUENSI PADA SISTEM TENAGA
BERINERSIA RENDAH MENGGUNAKAN *VIRTUAL SYNCHRONOUS*
*GENERATOR***

Oleh

NOVIA UTAMI PUTRI

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK ELEKTRO**

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

ABSTRACT

FREQUENCY STABILITY CONTROL IN LOW - INERTIA POWER SYSTEM USING VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR

By

NOVIA UTAMI PUTRI

Renewable Energy Sources (RES) especially Solar Power Plants and Wind Power Plants are alternative energy sources in the electric power system. The weakness of the RES which does not have inertia causes the total inertia performance of the main generator to decrease when the RES is connected to the system so that the frequency of the system becomes unstable/frequency oscillation. In this design, the design of adding a Virtual Synchronous Generator (VSG) to the system is carried out with the aim of stabilizing the frequency. The method used is a simulation using MATLAB/Simulink software with parameter values obtained from the IEEE 9 Bus which has a frequency of 60 Hz. In this study, the IEEE 9 Bus integrated RES power system will be compared with the IEEE 9 Bus integrated RES system with the addition of VSG. The result shows the frequency response on the IEEE 9 Bus integrated RES, the lowest frequency oscillation is 59.75 Hz at -0.08 second and the highest is 60.14 Hz at -0.08 second. At 0.3 seconds the frequency value returns to the 60 Hz position, but the frequency oscillation remains continuous. This is because the total inertia condition decreases by 20% to 40% which makes the system unable to meet the load requirements so that the load release occurs on the system. The addition of VSG when integrated with RES on the IEEE 9 Bus system does not have a significant difference between the two, but VSG is able to respond to frequencies faster and stable than without VSG.

Keywords: Renewable Energy Sources, Virtual Synchronous Generator, Frequency Stability, Inertia, IEEE 9 Bus

ABSTRAK

KENDALI STABILITAS FREKUENSI PADA SISTEM TENAGA BERINERSIA RENDAH MENGGUNAKAN *VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR*

Oleh

NOVIA UTAMI PUTRI

Renewable Energy Sources (RES) khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan energi alternatif sebagai pasokan daya tambahan yang dapat membantu pembangkit utama pada sistem tenaga listrik. Kelemahan dari RES yang tidak memiliki inersia menyebabkan total kinerja inersia dari pembangkit utama menjadi menurun ketika RES dihubungkan pada sistem sehingga frekuensi pada sistem menjadi tidak stabil/osilasi frekuensi. Pada perancangan ini dilakukan desain penambahan *Virtual Synchronous Generator* (VSG) pada sistem dengan tujuan menstabilkan frekuensi. Metode yang digunakan adalah simulasi menggunakan software MATLAB/Simulink dengan nilai parameter didapatkan dari IEEE 9 Bus yang memiliki frekuensi 60 Hz. Pada penelitian ini sistem tenaga IEEE 9 Bus terintegrasi RES akan dibandingkan dengan sistem IEEE 9 Bus terintegrasi RES dengan penambahan VSG. Hasilnya menunjukkan tanggapan frekuensi pada IEEE 9 Bus terintegrasi RES terjadi osilasi frekuensi terendah sebesar 59.75 Hz pada detik ke-0.08 dan tertinggi sebesar 60.14 Hz pada detik ke-0.08. Pada detik ke-0.3 nilai frekuensi kembali pada posisi 60 Hz, namun osilasi frekuensi tetap kontinyu. Hal ini dikarenakan kondisi total inersia semakin menurun 20% hingga 40% yang membuat sistem tidak mampu memenuhi kebutuhan beban sehingga terjadinya pelepasan beban pada sistem. Penambahan VSG ketika diintegrasikan dengan RES pada sistem IEEE 9 Bus tidak memiliki perbedaan signifikan di antara keduanya, namun VSG mampu menanggapi frekuensi lebih cepat stabil dibandingkan tanpa VSG.

Kata kunci: *Renewable Energy Sources, Virtual Synchronous Generator, Kestabilan Frekuensi, Inersia, IEEE 9 Bus*

Judul Tesis : **KENDALI STABILITAS FREKUENSI
PADA SISTEM TENAGA BERINERSIA
RENDAH MENGGUNAKAN *VIRTUAL
SYNCHRONOUS GENERATOR***

Nama Mahasiswa : **Novia Utami Putri**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1725031016

Program Studi : Magister Teknik Elektro

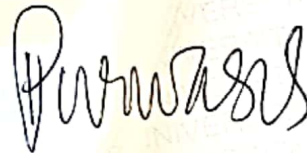
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II



Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D.Eng.
NIP 19700719 200012 1 001

Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.
NIP 19740422 200012 2 001

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro



Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP 19710525 199903 1 001

MENGESAHKAN

1. Komisi Penguji

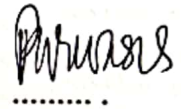
**Ketua Komisi Penguji
(Pembimbing I)**

: Khairudin, S.T., M.Sc., Ph. D. Eng.



**Sekretaris Komisi Penguji
(Pembimbing II)**

: Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.



**Anggota Komisi Penguji
(Penguji I)**

: Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc



**Anggota Komisi Penguji
(Penuji II)**

: Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T., M.T.





Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN.Eng.
NIP 19620717 198703 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T.
NIP 19710415 199803 1 005

4. Tanggal Lulus Ujian: 12 Agustus 2021

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Novia Utami Putri
NPM : 1725031016

Dengan ini menyatakan bahwa dalam tesis ini dibuat oleh saya sendiri.

Adapun karya orang lain yang terdapat dalam tesis saya ini telah dicantumkan sumbernya pada daftar pustaka.

Apabila saya tidak benar, maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, Agustus 2021



Novia Utami Putri

NPM: 1725031016

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, pada tanggal 14 November 1990, sebagai anak pertama dari tiga bersaudara, dari bapak Drs. Fajar Rasyid dan ibu Deswita, S.Pd.

Pendidikan Sekolah Dasar Al-Azhar 2 Way Halim, Bandar Lampung selesai pada tahun 2002, Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 3 Bandar Lampung selesai pada tahun 2005, Sekolah Menengah Kejuruan di SMA Negeri 3 Bandar Lampung selesai pada tahun 2008, Strata 1 di Universitas Lampung Bandar Lampung selesai pada tahun 2013 dan Strata 2 di Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai, Bandar Lampung.

Tahun 2017, penulis terdaftar sebagai mahasiswa program studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Pengalaman pekerjaan penulis. tahun 2013 menjadi staff *Quality Control* di PT. Hanjung Indonesia selama 2 tahun sekaligus menjadi dosen di Universitas Teknokrat Indonesia hingga saat ini. Penulis pernah menjadi dosen di Sekolah Tinggi Teknologi Nusantara dan Satu Maret Institute. Penulis juga dipercaya sebagai Wakil Ketua Departemen Pendidikan di Asosiasi Himpunan Ahli Teknik Seluruh Indonesia (HATSINDO) Provinsi Lampung periode 2020-2025.

PERSEMBAHAN

Karya sederhana ini dengan kerendahan hati aku persembahkan untuk:

- ~ Allah SWT tuhan semesta alam, pelindung segala umat, pemberi petunjuk dalam segala kesusahan.*
- ~ Dua orang terhebat yang Allah berikan dalam hidupku. Bapakku Drs. Fajar Rasyid dan Ibuku Deswita, S.Pd. yang selalu mendoakanku dan memotivasi setiap langkahku. Aku menyayangi kalian.*
- ~ Satu orang terhebat yang Allah berikan juga kepadaku untuk pendamping hidup selamanya suami tercinta Doni Septian, S.Kom, MM. yang selalu mendoakanku dan memotivasi setiap langkahku. Aku menyayangi kamu*
- ~ Adik-adikku yang kusayangi Dwifa Resti Agustin, S.E. Amelia Tri Amanda dan seluruh sanak keluarga yang yang aku sayangi.*
- ~ Teman-teman seperjuangan Magister Teknik Elektro angkatan 2017*
- ~ Teman-temanku yang tidak dapat disebutkan satu persatu terimakasih.*
- ~ Almamaterku Tercinta*

SANWACANA

Bismillahirrohmanirrohiim.

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT atas karunia rahmat dan hidayah-Nya yang begitu besar sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini yang berjudul **“Kendali Stabilitas Frekuensi Pada Sistem Tenaga Berinersia Rendah Menggunakan Virtual Synchronous Generator”** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik (S2) pada Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Dalam penulisan Tesis ini penulis menyadari masih banyak kekurangan, namun itu semua tidak menjadi suatu kendala bagi penulis untuk dapat terus mencoba, karena dengan mencoba maka penulis dapat mengetahui kekurangan dan kelebihan yang ada pada diri penulis. Untuk itu penulis sangat berterima kasih apabila ada saran dan kritik yang bersifat membangun agar dapat lebih baik untuk kedepannya.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu, baik dari segi moril dan pengalaman-pengalaman serta mengarahkan penulis dalam penyusunan tesis ini. Ucapan terima kasih pula penulis sampaikan kepada:

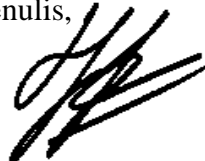
1. Bapak Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D sebagai Ketua Program Studi Teknik Magister Elektro Universitas Lampung.
2. Bapak Khairudin, S.T.,M.Sc., Ph. D. Eng. sebagai Dosen pembimbing utama.
3. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T, sebagai Dosen pembimbing pendamping.
4. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. sebagai Dosen Penguji I.
5. Ibu Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T., M.T, IPM ASEAN. Eng. sebagai Dosen Penguji II.

6. Bapak dan Ibu Dosen Magister Teknik Elektro yang telah membekali penulis dengan ilmu dan pengetahuan serta pengalaman, dan juga staf karyawan di lingkungan Fakultas Teknik UNILA.
7. Kedua orang tua, suami dan saudara/i ku yang telah memberikan dukunganselama penulis kuliah dan menyelesaikan tesis ini.
8. Rekan mahasiswa/i Magister Teknik Elektro Angkatan 2017, terima kasih atas bantuan dan kebersamaan selama ini.
9. Teman-teman dan semua pihak yang telah banyak membantu dalam penelitian ini.
10. Kepada pihak-pihak lain yang tidak mungkin disebutkan satu persatu yang telah memberikan dorongan baik secara langsung maupun tidak langsung atas kelancaran penyusunan tesis ini.

Akhir kata semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan bisa memberikan nilai tambah bagi Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung.

Bandar Lampung, Agustus 2021

Penulis,



Novia Utami Putri

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN	vi
MOTTO	vii
PERSEMBAHAN	vii
SANWACANA	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Hipotesis Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian Terdahulu.....	5
2.2. Sistem Tenaga Listrik	8
2.3. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	10
2.4. Virtual Synchronous Generator	13
2.5. Inersia	19
2.6. Inverter.....	26
2.7. Buck-Boost Converter	26
2.8. Thyristor	27
2.9. Pulse Width Modulation	28
III. METODE PENELITIAN	29
3.1. Waktu Dan Tempat Penelitian.....	29
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	29
3.3. Prosedur Penelitian	29
3.4. Rancangan Model Sistem	30

3.5.	Diagram Alir Penelitian.....	32
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1.	Hasil Penelitian.....	34
4.2.	Pemodelan Sistem Standard IEEE 9 Bus	35
4.3.	Pemodelan Sistem Standard IEEE 9 Bus Terintegrasi Renewable Energy Sources (RES)	36
4.4.	Pemodelan Sistem Standard IEEE 9 Bus Terintegrasi Renewable Energy Sources (RES) dengan Virtual Synchronous Generator (VSG).....	37
4.5.	Parameter Sistem	39
4.6.	Tanggapan Frekuensi Pada Pemodelan Sistem Standar IEEE 9 Bus	40
4.6.1	Tanggapan Frekuensi Bus 1	40
4.6.2	Tanggapan Frekuensi Bus 2	41
4.6.3	Tanggapan Frekuensi Bus 3	42
4.6.4	Tanggapan Frekuensi Bus 4	43
4.6.5	Tanggapan Frekuensi Bus 5	44
4.6.6	Tanggapan Frekuensi Bus 6	45
4.6.7	Tanggapan Frekuensi Bus 7	46
4.6.8	Tanggapan Frekuensi Bus 8	47
4.6.9	Tanggapan Frekuensi Bus 9	48
4.7.	Tanggapan Frekuensi IEEE 9 Bus dengan RES tanpa VSG dalam Kondisi 20% dari Sistem	49
4.7.1	Tanggapan Frekuensi Bus 1	49
4.7.2	Tanggapan Frekuensi Bus 2	50
4.7.3	Tanggapan Frekuensi Bus 3	51
4.7.4	Tanggapan Frekuensi Bus 4	52
4.7.5	Tanggapan Frekuensi Bus 5	53
4.7.6	Tanggapan Frekuensi Bus 6	54
4.7.7	Tanggapan Frekuensi Bus 7	55
4.7.8	Tanggapan Frekuensi Bus 8	56
4.7.9	Tanggapan Frekuensi Bus 9	57
4.8.	Tanggapan Frekuensi IEEE 9 Bus dengan RES tanpa VSG dalam Kondisi 30% dari Sistem	59
4.8.1	Tanggapan Frekuensi Bus 1	59
4.8.2	Tanggapan Frekuensi Bus 2	59
4.8.3	Tanggapan Frekuensi Bus 3	60
4.8.4	Tanggapan Frekuensi Bus 4	61
4.8.5	Tanggapan Frekuensi Bus 5	62
4.8.6	Tanggapan Frekuensi Bus 6	63
4.8.7	Tanggapan Frekuensi Bus 7	64
4.8.8	Tanggapan Frekuensi Bus 8	65
4.8.9	Tanggapan Frekuensi Bus 9	66
4.9.	Tanggapan Frekuensi IEEE 9 Bus dengan RES tanpa VSG dalam Kondisi 40% dari Sistem	67
4.9.1	Tanggapan Frekuensi Bus 1	67
4.9.2	Tanggapan Frekuensi Bus 2	68

4.9.3	Tanggapan Frekuensi Bus 3	69
4.9.4	Tanggapan Frekuensi Bus 4	70
4.9.5	Tanggapan Frekuensi Bus 5	71
4.9.6	Tanggapan Frekuensi Bus 6	72
4.9.7	Tanggapan Frekuensi Bus 7	73
4.9.8	Tanggapan Frekuensi Bus 8	74
4.9.9	Tanggapan Frekuensi Bus 9	75
4.10.	Tanggapan Frekuensi IEEE 9 Bus dengan RES dan VSG dalam Kondisi 20% dari Sistem	76
4.10.1	Tanggapan Frekuensi Bus 1	76
4.10.2	Tanggapan Frekuensi Bus 2	77
4.10.3	Tanggapan Frekuensi Bus 3	78
4.10.4	Tanggapan Frekuensi Bus 4	79
4.10.5	Tanggapan Frekuensi Bus 5	80
4.10.6	Tanggapan Frekuensi Bus 6	81
4.10.7	Tanggapan Frekuensi Bus 7	81
4.10.8	Tanggapan Frekuensi Bus 8	83
4.10.9	Tanggapan Frekuensi Bus 9	84
4.11.	Tanggapan Frekuensi IEEE 9 Bus dengan RES dan VSG dalam Kondisi 30% dari Sistem	85
4.11.1	Tanggapan Frekuensi Bus 1	85
4.11.2	Tanggapan Frekuensi Bus 2	86
4.11.3	Tanggapan Frekuensi Bus 3	87
4.11.4	Tanggapan Frekuensi Bus 4	88
4.11.5	Tanggapan Frekuensi Bus 5	89
4.11.6	Tanggapan Frekuensi Bus 6	90
4.11.7	Tanggapan Frekuensi Bus 7	91
4.11.8	Tanggapan Frekuensi Bus 8	92
4.11.9	Tanggapan Frekuensi Bus 9	93
4.12.	Tanggapan Frekuensi IEEE 9 Bus dengan RES dan VSG dalam Kondisi 40% dari Sistem	94
4.12.1	Tanggapan Frekuensi Bus 1	94
4.12.2	Tanggapan Frekuensi Bus 2	95
4.12.3	Tanggapan Frekuensi Bus 3	96
4.12.4	Tanggapan Frekuensi Bus 4	97
4.12.5	Tanggapan Frekuensi Bus 5	98
4.12.6	Tanggapan Frekuensi Bus 6	99
4.12.7	Tanggapan Frekuensi Bus 7	100
4.12.8	Tanggapan Frekuensi Bus 8	101
4.12.9	Tanggapan Frekuensi Bus 9	102
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	104
5.1.	Kesimpulan	104
5.2.	Saran	104
	DAFTAR PUSTAKA	105

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Sistem Tenaga Listrik.....	8
Gambar 2.2. Pembagian Level Tegangan Listrik.....	9
Gambar 2.3. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	13
Gambar 2.4.a. Konsep VSG	14
Gambar 2.4.b. Inverter tiga Fasa dengan VSG Control	15
Gambar 2.5 Peta Pole-Zero (a) dan Tanggapan Frekuensi (b).....	20
Gambar 2.6. Rocof (a), Frekuensi Puncak Nadir (b), Overshoot (c) dan Waktu Penyelesaian (d).....	25
Gambar 2.7. Inverter	26
Gambar 2.8. Buck-Boost Converter	27
Gambar 2.9. Thyristor	28
Gambar 2.10 Pulse Width Modulation.....	28
Gambar 3.1. Rancangan Model Sistem Pembangkit Konvensional.....	30
Gambar 3.2. Rancangan Model Sistem Generator Pembangkit dengan menambahkan RES	31
Gambar 3.3 Rancangan Model Sistem Pembangkit Konvensional dengan menambahkan RES dan VSG	31
Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 4.1 Pemodelan Virtual Synchronous Generator (VSG) Pada Renewable Energy Source	35
Gambar 4.2 Pemodelan Standard IEEE 9 BUS	36
Gambar 4.3 Pemodelan Standar IEEE 9 Bus Terintegrasi Renewable Energy Source.....	37
Gambar 4.4 Pemodelan Standar IEEE 9 Bus Terintegrasi Renewable Energy Source dengan Virtual Synchronous Generator (VSG)	38
Gambar 4.5 Virtual Synchronous Generator (VSG) yang dihubungkan ke Inverter pada Renewable Energy Source (RES)	38
Gambar 4.6 Tanggapan Frekuensi Bus 1	41
Gambar 4.7 Tanggapan Frekuensi Bus 2	42
Gambar 4.8 Tanggapan Frekuensi Bus 3	43
Gambar 4.9 Tanggapan Frekuensi Bus 4	44
Gambar 4.10 Tanggapan Frekuensi Bus 5	45
Gambar 4.11 Tanggapan Frekuensi Bus 6	46
Gambar 4.12 Tanggapan Frekuensi Bus 7	47
Gambar 4.13 Tanggapan Frekuensi Bus 8	48
Gambar 4.14 Tanggapan Frekuensi Bus 9	49

Gambar 4.15 Tanggapan Frekuensi Bus 1	50
Gambar 4.16 Tanggapan Frekuensi Bus 2	51
Gambar 4.17 Tanggapan Frekuensi Bus 3	52
Gambar 4.18 Tanggapan Frekuensi Bus 4	53
Gambar 4.19 Tanggapan Frekuensi Bus 5	54
Gambar 4.20 Tanggapan Frekuensi Bus 6	55
Gambar 4.21 Tanggapan Frekuensi Bus 7	56
Gambar 4.22 Tanggapan Frekuensi Bus 8	57
Gambar 4.23 Tanggapan Frekuensi Bus 9	58
Gambar 4.24 Tanggapan Frekuensi Bus 1	59
Gambar 4.25 Tanggapan Frekuensi Bus 2	60
Gambar 4.26 Tanggapan Frekuensi Bus 3	61
Gambar 4.27 Tanggapan Frekuensi Bus 4	62
Gambar 4.28 Tanggapan Frekuensi Bus 5	63
Gambar 4.29 Tanggapan Frekuensi Bus 6	64
Gambar 4.30 Tanggapan Frekuensi Bus 7	65
Gambar 4.31 Tanggapan Frekuensi Bus 8	66
Gambar 4.32 Tanggapan Frekuensi Bus 9	67
Gambar 4.33 Tanggapan Frekuensi Bus 1	68
Gambar 4.34 Tanggapan Frekuensi Bus 2	69
Gambar 4.35 Tanggapan Frekuensi Bus 3	70
Gambar 4.36 Tanggapan Frekuensi Bus 4	71
Gambar 4.37 Tanggapan Frekuensi Bus 5	72
Gambar 4.38 Tanggapan Frekuensi Bus 6	73
Gambar 4.39 Tanggapan Frekuensi Bus 7	74
Gambar 4.40 Tanggapan Frekuensi Bus 8	75
Gambar 4.41 Tanggapan Frekuensi Bus 9	76
Gambar 4.42 Tanggapan Frekuensi Bus 1	77
Gambar 4.43 Tanggapan Frekuensi Bus 2	78
Gambar 4.44 Tanggapan Frekuensi Bus 3	79
Gambar 4.45 Tanggapan Frekuensi Bus 4	80
Gambar 4.46 Tanggapan Frekuensi Bus 5	81
Gambar 4.47 Tanggapan Frekuensi Bus 6	82
Gambar 4.48 Tanggapan Frekuensi Bus 7	83
Gambar 4.49 Tanggapan Frekuensi Bus 8	84
Gambar 4.50 Tanggapan Frekuensi Bus 9	85
Gambar 4.51 Tanggapan Frekuensi Bus 1	86
Gambar 4.52 Tanggapan Frekuensi Bus 2	87
Gambar 4.53 Tanggapan Frekuensi Bus 3	88
Gambar 4.54 Tanggapan Frekuensi Bus 4	89
Gambar 4.55 Tanggapan Frekuensi Bus 5	90
Gambar 4.56 Tanggapan Frekuensi Bus 6	91
Gambar 4.57 Tanggapan Frekuensi Bus 7	92
Gambar 4.58 Tanggapan Frekuensi Bus 8	93
Gambar 4.59 Tanggapan Frekuensi Bus 9	94
Gambar 4.60 Tanggapan Frekuensi Bus 1	95
Gambar 4.61 Tanggapan Frekuensi Bus 2	96
Gambar 4.62 Tanggapan Frekuensi Bus 3	97

Gambar 4.63 Tanggapan Frekuensi Bus 4	98
Gambar 4.64 Tanggapan Frekuensi Bus 5	99
Gambar 4.65 Tanggapan Frekuensi Bus 6	100
Gambar 4.66 Tanggapan Frekuensi Bus 7	101
Gambar 4.67 Tanggapan Frekuensi Bus 8	102
Gambar 4.68 Tanggapan Frekuensi Bus 9	103

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Nilai Parameter Pembangkit kondisi awal	39
Tabel 4.2 Nilai Parameter Pembangkit kondisi 20% dari Sistem	39
Tabel 4.3 Nilai Parameter Pembangkit kondisi 30% dari Sistem	39
Tabel 4.4 Nilai Parameter Pembangkit kondisi 40% dari Sistem	40
Tabel 4.5 Nilai Parameter Beban dari Sistem	40

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berjalannya waktu, kebutuhan energi semakin tinggi, hal ini mempengaruhi kinerja pembangkit untuk bekerja lebih agar daya yang dibutuhkan terpenuhi. Hal yang mempengaruhi kinerja pembangkit di antaranya adanya penambahan pembangkit, perubahan beban yang bervariasi dan gangguan pada sistem yang berdampak pada kestabilan sistem. Oleh karena itu perubahan beban harus diikuti dengan perubahan penggerak generator, tujuannya agar frekuensi dan tegangan sistem dapat tetap terjaga pada posisi normal, namun semakin besar kinerja pembangkit mengurangi konstanta inersia. Mengurangi inersia dapat memperbesar deviasi frekuensi jaringan listrik secara signifikan. Deviasi secara permanen dapat mengakibatkan kegagalan operasi sistem tenaga, keamanan, keandalan dan efisiensi dengan merusak peralatan, menurunkan kinerja beban, membebani saluran transmisi dan memicu perangkat proteksi.

Pada pembangkit konvensional tentunya memiliki inersia yang baik karena mengandalkan turbin dan generator. Di antara turbin dan generator terdapat komponen berbentuk cincin yang disebut inersia sehingga jika terjadi gangguan tidak serta merta berhenti putarannya sedangkan pada pembangkit energi terbarukan hanya mengandalkan komponen elektronika seperti inverter yang hanya mengeluarkan daya aktif (P) saja dan tidak mengeluarkan daya reaktifnya (Q) sehingga tidak memiliki inersia (kelembaban) sedangkan frekuensi diatur oleh PWM (*pulse width modulation*). Pembangkit energi terbarukan (*Renewable Energy Resources*) dapat membantu menyeimbangkan kebutuhan konsumen listrik, namun kendala jaringan yang dihubungkan antara generator dengan jaringan energi terbarukan seperti PLTS dan PLTB menghasilkan total sistem tenaga berinersia rendah sehingga jika terjadi gangguan maka mengakibatkan osilasi pada frekuensi dalam waktu tertentu yang dapat merusak sistem tenaga.

Beberapa kasus pembangkit tidak semua memiliki inersia sistem tenaga contohnya PLTS dan PLTB. Kelemahan dari beberapa pembangkit tersebut berbeda-beda, PLTS tanpa mempertimbangkan inersia ketika konverter daya merespon cepat tanpa inersia akan berdampak pada perubahan frekuensi, frekuensi mudah melampaui kisaran normal dan mengakibatkan pelepasan beban yang tidak diinginkan, kegagalan sistem berjenjang, dan bahkan pemadaman listrik sekala besar, sedangkan PLTB memiliki kelemahan dikarenakan keadaan angin yang berubah-ubah sehingga efisiensi untuk suplai daya kurang, perubahan inersia akan menyebabkan stabilitas frekuensi dan tegangan pada sistem tenaga listrik menjadi tidak normal.

Dalam operasionalnya, sistem tenaga listrik sering mengalami gangguan hubung singkat, baik yang bersifat permanen maupun sementara. tersebut dapat menyebabkan simpangan pada variabel-variabel sistem tenaga listrik, salah satunya adalah frekuensi. Frekuensi ini dapat mempengaruhi stabilitas sistem tenaga listrik antara kebutuhan beban listrik dan daya yang disuplai oleh generator. Jenis masalah pada dinamika sistem tenaga listrik mencakup tinggi/rendahnya osilasi frekuensi, besar/kecilnya gangguan dan besar/kecilnya sistem. Sistem tenaga listrik harus memiliki kualitas yang baik, diantaranya frekuensi sistem harus diperhatikan dalam batas toleransi $\pm 1\%$. Nilai frekuensi yang berada dalam batas kesetabilan, maka kualitas suplai daya yang dalam sistem tenaga listrik akan lebih optimal [1].

Pada dasarnya, stabilitas sistem tenaga listrik terbagi dalam stabilitas transien, stabilitas *steady state* dan stabilitas dinamis. Stabilitas transien berhubungan dengan kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan/sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan kestabilan karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem, sedangkan stabilitas *steady state* berhubungan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil yang bersifat gradual, yang terjadi disekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap. Stabilitas dinamis berhubungan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah timbul gangguan yang relatif kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama. Perubahan kecil pada beban akan mengakibatkan perubahan frekuensi dan kecepatan sudut akan berayun di sekitar kecepatan sinkron dan tegangan terminal generator konvergen di sekitar tegangan nominalnya [2].

Untuk menangani simpangan variabel-variabel sistem tenaga listrik khususnya frekuensi saat sistem tenaga berinersia rendah yaitu dengan menambahkan kelembaban secara virtual, yang dibuat untuk RES (*Renewable Energy Sources*) yang terhubung dengan generator. Konsep *Virtual Synchronous Generator* (VSG) yang beroperasi seperti generator sinkron yang dapat membantu dengan menunjukkan jumlah inersia dan sifat redaman generator sinkron konvensional, konsep virtual inersia ini mempertahankan sebagian besar RES pada sistem tenaga listrik masa depan tanpa mengorbankan stabilitas sistem tenaga listrik. VSG dapat beroperasi secara paralel dengan beberapa VSG lainnya yang diharapkan dapat mempertahankan kestabilan frekuensi pada sistem tenaga berinersia rendah.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana memodelkan *Virtual Synchronous Generator* (VSG) ke dalam MATLAB Simulink untuk keperluan analisa sistem tenaga?
2. Bagaimana menganalisis tanggapan frekuensi pada sistem tenaga berinersia rendah pada saat terjadi perubahan kondisi sistem?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis tanggapan frekuensi pada sistem tenaga berinersia rendah pada saat terjadi perubahan kondisi sistem baik dilengkapi dengan *Virtual Synchronous Generator* (VSG) maupun tanpa *Virtual Synchronous Generator* (VSG)
2. Menganalisis konfigurasi jaringan agar sistem dapat mempertahankan kestabilan setelah terjadi gangguan

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu menjadi bahan pertimbangan bagi operator sistem tenaga listrik ketika mengimplementasikan *Virtual Synchronous Generator* (VSG) ke dalam sistem

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Analisis kestabilan frekuensi dengan sistem berinersia rendah dalam kondisi kestabilan *steady state*
2. PLTB yang digunakan adalah jenis PLTB konvensional
3. Simulasi dilakukan dengan memilih bus yang akan diberi gangguan.

1.6 Hipotesis Penelitian

Ketidakstabilan frekuensi pada sistem tenaga berninersia rendah dapat terjadi saat kebutuhan beban meningkat. Satu upaya yang dilakukan untuk mengatasi ketidakstabilan frekuensi sistem tenaga berinersia rendah adalah *Virtual Synchronous Generator* (VSG) dengan mengatur *switching* di inverter PLTS dan PLTB sehingga tidak terjadi osilasi frekuensi ketika beban terlepas dari sistem.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Peneliti Terdahulu

Setelah peneliti berhasil melakukan penelitian, dari hasil penelitian ada beberapa yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang peneliti lakukan.

Penelitian yang dilakukan oleh Hassan Bevrani dan Jorg Raisch [1] berjudul “*On Virtual Inertia Application in Power Grid Frequency Control*”. Tujuan dari penelitian tersebut adalah menguji efisiensi *Virtual Synchronous Generator* (VSG) dalam meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik dengan menjaga konstanta inersia agar tetap dikeadanaan yang diizinkan, dan adakah pengaruh dari penggunaan VSG di sistem tenaga listrik. Pengambilan data dilakukan dengan menguji beberapa VSG dan Inverter, uji coba dilakukan menggunakan simulasi *software*. Hasil penelitian menunjukkan ketidakseimbangan terhadap stabilitas sistem tenaga, deviasi frekuensi yang disebabkan oleh inverter dan inersia dapat stabil dengan penambahan VSG dengan konstanta inersia yang sudah diperbarui, ini dibuktikan dari analisis teoritis kemudian hasil simulasi yang menunjukkan tingkat kesetabilan sebelum dan sesudah penggunaan VSG.

Penelitian yang dilakukan oleh Nor Shahida, Norzanah Rosmin, Nor Julia Mohd Nordin, Aede Hatib Mustaamal, Siti Maherah Husin, Aripriharta dan Ira Devi Sara [3] berjudul “*Virtual inertia support wind turbine system*”. Tujuan dari penelitian ini untuk membuktikan peran superkapasitor dan *buck boost converter* dalam mengurangi frekuensi nadir dan *rate of change of frequency* (ROCOF) dari

sistem frekuensi ketika terjadi peningkatan beban secara tiba-tiba pada sistem *wind energy conversion system* (WECS) , superkapasitor digunakan sebagai penyimpanan agar *virtual inertia support* (VIS) yang dihasilkan tak terbatas selama perubahan frekuensi, lebih tepatnya superkapasitor bertindak sebagai VIS sistem turbin angin. VIS yang sederhana namun cepat dapat disupply ketika fluktuasi kecepatan angin, saat terjadi fluktuasi kecepatan angin akan memengaruhi daya yang dihasilkan, oleh karena itu penggunaan *buck boost converter* untuk memecahkan masalah penurunan frekuensi pada WECS sangat lah tepat. Hasil penelitian menggunakan simulasi *software* MATLAB *Simulink*, derivasi superkapasitor dan *buck boost converter* bertindak sebagai penyeimbang daya antara tenaga angin (P_{WT}), daya generator sinkron (P_{SG}), dan daya beban berdasarkan perubahan frekuensi, implementasi pengisian maupun pemakaian superkapasitor dikendalikan selama perubahan frekuensi, ini membuktikan ketika perubahan beban mendadak selama 50 detik , superkapasitor tidak hanya mereduksi frekuensi nadir tapi juga ROCOF dari frekuensi sistem sedangkan kebutuhan daya dikendalikan oleh *buck boost converter*.

Penelitian yang dilakukan oleh Jingyang Fang, Hongchang Li, Yi Tang dan Frede Blaabjerg [4] ”*Distributed Power System Virtual Inertia Implemented by Grid-Connected Power Converters*”. Penelitian diitujukan ke *Renewable Energy Sources* (RES) yang terhubung ke jaringan konverter untuk menghasilkan *virtual inertia*, dikarenakan RES tidak memiliki inersia maka ditambahkan *power converter* sehingga secara efektif dapat meningkatkan inersia dan mengurangi deviasi frekuensi serta menstabilkan laju perubahan frekuensi di bawah gangguan besar. Untuk membuktikan pengaruh dari *power converter* dalam peningkatan inersia maka dilakukan simulasi *software* MATLAB *Simulink*. Hasil penelitian menunjukan konsep *virtual inertia* terdistribusi berhasil melalui simulasi MATLAB *Simulink*. Koefisien *virtual inersia* yang dihasilkan sama dengan koefisien inersia generator sinkron. Oleh karena itu, mengganti generator sinkron dengan potovoltaik berbasis inverter tidak akan mengurangi daya sistem inersia saat melakukan dua simulasi yaitu model sistem tanpa *virtual inertia* dan dengan *virtual inertia* diberikan ketika beban *step-up* 3%. Penyimpangan frekuensi maksimal terjadi ketika metode sistem tanpa

virtual inertia sedangkan dengan metode *virtual inertia* pengontrolan frekuensi dan deviasi frekuensi dapat dicapai serta ROCOF dapat berkurang.

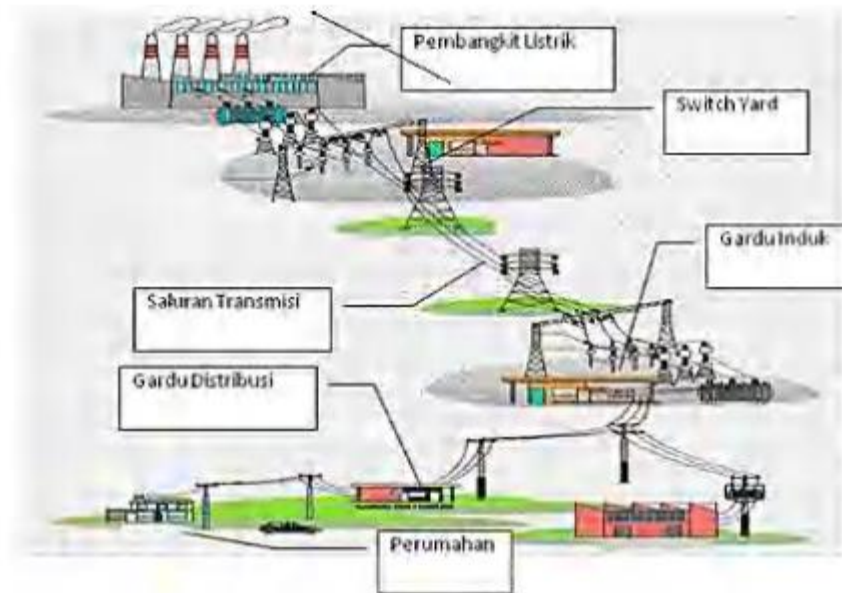
Penelitian yang dilakukan oleh Nanjun Lu, Jingyang Fang, Ti Yang, dan Branislav. Hredzak [5] berjudul “*Frequency Deadband-Based Virtual Inertia Control for Grid-Connected Power Converters*”. Tujuan dari penelitian ini untuk meningkatkan stabilitas inersia dan frekuensi ke kondisi seharusnya untuk pembangkit terbarukan khususnya daya RES. Metode yang digunakan berbasis *deadband-based* merupakan analisis teoritis penggunaan daya RES pada konverter tidak menghasilkan putaran inersia, sebaliknya menyebabkan penyimpangan frekuensi yang sangat besar akibat pelepasan beban dan berdampak ke semua sistem tenaga listrik termasuk peralatan proteksi. Penggunaan metode *deadband-base* mengatasi masalah inersia dan frekuensi melalui kontrol *power converter*. Hasil penelitian menunjukkan fungsi *deadband* terlihat ketika frekuensi melebihi frekuensi *preset deadband* yaitu DC-link kapasitor berkontribusi di *power converter* sehingga tidak mempengaruhi kinerja dari *power converter*. Hasil penelitian diperkuat dengan simulasi MATLAB Simulink, dari simulasi menghasilkan ketika terjadi fluktuasi frekuensi, virtual regulasi frekuensi dapat meningkatkan *virtual inertia* berkelanjutan dan mengarah ke peningkatan frekuensi nadir akibat dari kontrol *deadband*

Penelitian yang dilakukan oleh Jia Liu, Yusi Miura, Hassan Bevrani dan Toshifumi Ise [6] berjudul “*Enhanced Virtual Synchronous Generator Control for parallel Inverters in Microgrids*”. Penelitian ini mengajukan sebuah metode kontrol virtual generator sinkron menggunakan *communication-less* di *microgrid* untuk stabilitas inersia dan stabilitas kinerja sistem. Kontrol VSG yang mana osilasi *damping* dan pertukaran daya aktif dapat dicapai dengan menyesuaikan reaktansi stator, memanfaatkan inverter untuk membantu meningkatkan rasio redaman. Hasil penelitian menggunakan simulasi MATLAB simulink menunjukkan kondisi stabil terhadap deviasi tegangan *Distribute Generator (DG)* dan tegangan bus menjadi kecil ketika kontrol VSG ditingkatkan, penurunan tegangan induktansi stator virtual pada inverter menghasilkan output tegangan yang stabil. Hal ini menunjukkan penurunan

tegangan pada induktansi virtual dikontrol dengan baik, hasil percobaan keefektifan kontrol VSG dapat mencapai kinerja transien dengan menjaga stabilitas inersia maka peningkatan kontrol VSG pilihan yang tepat untuk sistem kendali dalam *microgrid*.

2.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan dan berkerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Secara garis besar sistem tenaga listrik dapat digambarkan dengan skema seperti pada Gambar 2.1 berikut Listrik [7]:



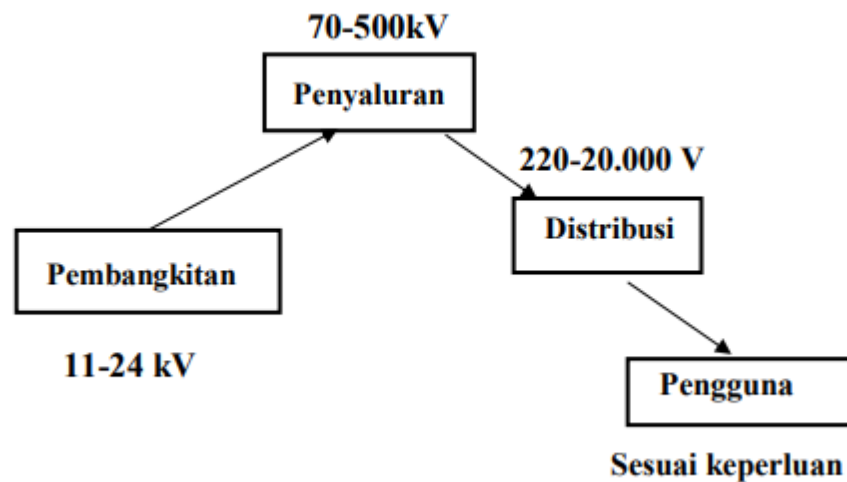
Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik [7]

Fungsi masing-masing komponen secara garis besar adalah sebagai berikut :

1. Pembangkitan merupakan komponen yang berfungsi membangkitkan tenaga listrik, yaitu mengubah energi yang berasal dari sumber energi lain misalnya: air, batu bara, panas bumi, minyak bumi dan lain-lain menjadi energi listrik.
2. Transmisi merupakan komponen yang berfungsi menyalurkan daya atau energi dari pusat pembangkitan ke pusat beban.

3. Distribusi merupakan komponen yang berfungsi mendistribusikan energi listrik ke lokasi konsumen energi listrik.
4. Beban adalah peralatan listrik di lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tersebut.

Pada suatu sistem tenaga listrik, tegangan yang digunakan pada masing-masing komponen dapat berbeda beda sesuai dengan kepentingannya. Dengan kata lain, setiap komponen pada sistem tenaga listrik mempunyai level tegangan yang berbeda-beda. Pembagian level tegangan dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Pembagian Level Tegangan Listrik [7]

Pada sistem pembangkitan, level tegangan disesuaikan dengan spesifikasi generator pembangkit yang digunakan, untuk pembangkit yang berkapasitas lebih besar biasanya menggunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini dilakukan agar arus yang mengalir tidak terlalu besar karena untuk kapasitas daya tertentu, besar arus yang mengalir berbanding terbalik dengan tegangannya. Level tegangan pada pembangkit biasanya tidak tinggi, karena semakin tinggi level tegangan generator, jumlah lilitan generator harus lebih banyak lagi. Lilitan yang lebih banyak mengakibatkan generator menjadi lebih besar dan lebih berat sehingga dinilai tidak efisien. Pada sistem saluran transmisi biasanya digunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini karena fungsi pokok saluran transmisi adalah menyalurkan daya,

sehingga yang dipentingkan adalah sistem mampu menyalurkan daya dengan efisiensi yang tinggi atau rugi-rugi daya dan turun tegangannya kecil. Upaya yang dilakukan adalah mempertinggi level tegangan agar arus yang mengalir pada jaringan transmisi 70kV-500kV. Penyaluran Distribusi Pengguna Pembangkitan lebih kecil. Level tegangan saluran transmisi lebih tinggi dari tegangan yang dihasilkan generator pembangkit. Tegangan saluran transmisi umumnya berkisar antara 70 kV/d 500 kV, untuk menaikkan tegangan dari level pembangkit ke level tegangan saluran transmisi diperlukan transformator penaik tegangan. Pada jaringan distribusi biasanya menggunakan tegangan yang lebih rendah dari tegangan saluran transmisi. Hal ini karena daya yang didistribusikan oleh masingmasing jaringan distribusi biasanya relatif kecil dibanding dengan daya yang disalurkan saluran transmisi, dan juga menyesuaikan dengan tegangan pelanggan atau pengguna energi listrik. Level tegangan jaringan distribusi yang sering digunakan ada dua macam, yaitu 20 kV untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan 380V untuk jaringan tegangan rendah (JTR).

Dengan demikian diperlukan gardu induk yang berisi trafo penurun tegangan untuk menurunkan tegangan dari saluran transmisi ke tegangan distribusi 20 kV. Diperlukan juga trafo distribusi untuk menurunkan tegangan dari 20 kV ke 380 V sesuai tegangan pelanggan. Level tegangan beban pelanggan menyesuaikan dengan jenis bebannya, misalnya beban industri yang biasanya memerlukan daya yang relatif besar biasanya menggunakan tegangan menengah 20 kV, sedang beban rumah tangga dengan daya yang relatif kecil, biasanya menggunakan tegangan rendah 380 V [8].

2.3 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem

✓ *Reliability* adalah "kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus".

✓ *Quality* adalah "kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi".

✓ *Stability* adalah "kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan".

Dalam sistem

berlaku dan harus segera kembali normal bila sistem terkena gangguan. Untuk jaringan yang sangat kompleks dimana beberapa pembangkit saling terkoneksi satu sama lain maka keluaran daya listrik berupa besaran seperti tegangan dan frekuensi haruslah diperhatikan agar tidak ada pembangkit yang kelebihan beban dan pembangkit yang lain bebannya kecil. Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik tetap dan harus dipasok dengan besaran daya yang sesuai, bila pada saat tertentu terjadi lonjakan atau penurunan beban yang tidak terduga maka perubahan ini sudah dapat dikategorikan ke dalam gangguan pada sistem tenaga listrik yakni kondisi tidak seimbang antara pasokan listrik dan permintaan energi listrik akibat adanya gangguan baik pada pembangkit ataupun pada sistem transmisi sehingga mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi lebih berat. Untuk itu diperlukan satu penelaahan kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak terlepas dari sistem. Analisis kestabilan biasanya digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yaitu [2]:

1. Kestabilan Keadaan Tetap (Steady State Stability) Kestabilan keadaan tetap adalah: "Kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil yang bersifat gradual, yang terjadi disekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap". Kestabilan ini tergantung pada karakteristik komponen yang terdapat pada sistem tenaga listrik antara lain: pembangkit, beban, jaringan transmisi, dan kontrol sistem itu sendiri. Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan.

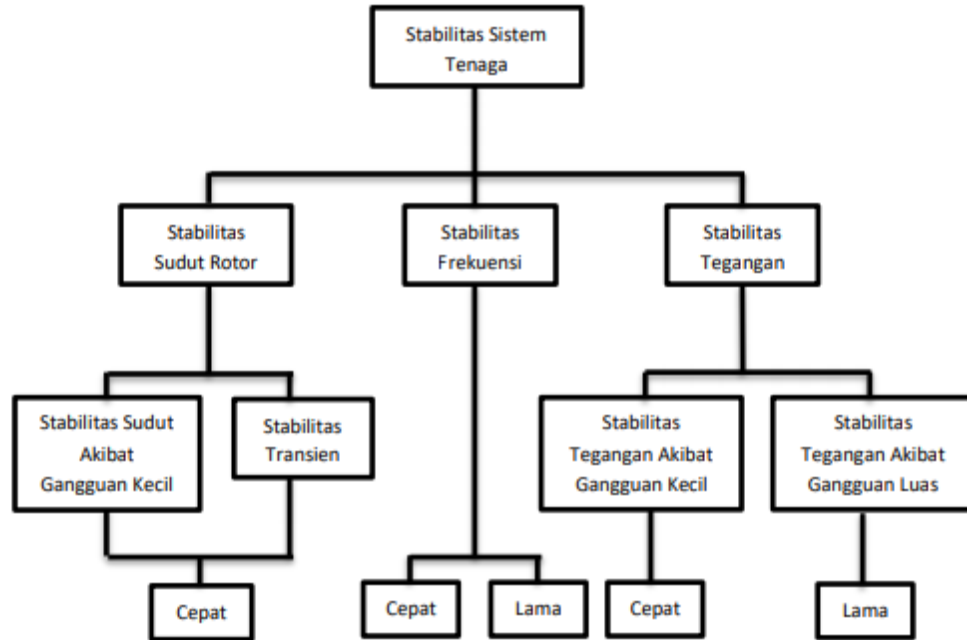
2. Kestabilan Dinamis (Dynamic Stability) Kestabilan dinamis adalah: "Kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah timbul gangguan yang relatif kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama". Analisa kekestabilan dinamis lebih kompleks karena juga memasukkan komponen kontrol otomatis dalam perhitungannya.

3. Kestabilan Peralihan (*Transient Stability*) Kekestabilan peralihan adalah: "Kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan/sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan kestabilan karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem".

Analisis kestabilan peralihan merupakan analisis yang utama untuk menelaah perilaku sistem daya misalnya gangguan yang berupa:

- a. Perubahan beban yang mendadak karena terputusnya unit pembangkit.
- b. Perubahan pada jaringan transmisi misalnya gangguan hubung singkat atau pemutusan saklar (*switching*).

Sistem daya listrik masa kini jauh lebih luas, ditambah interkoneksi antar sistem yang rumit dan melibatkan beratus-ratus mesin yang secara dinamis saling mempengaruhi melalui perantara jala-jala tegangan ekstra tinggi, mesin-mesin ini mempunyai sistem penguatan yang berhubungan. Kisaran masalah yang dianalisis banyak menyangkut gangguan yang besar dan tidak lagi memungkinkan menggunakan proses kelinearan. Masalah kestabilan peralihan dapat lebih lanjut dibagi ke dalam "Kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multi swing*). Kestabilan ayunan pertama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana tanpa memasukkan sistem pengaturannya, biasanya periode waktu yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem. Sesebuah kemungkinan klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik ke dalam tiga bagian, yaitu kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan yang dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik [7]

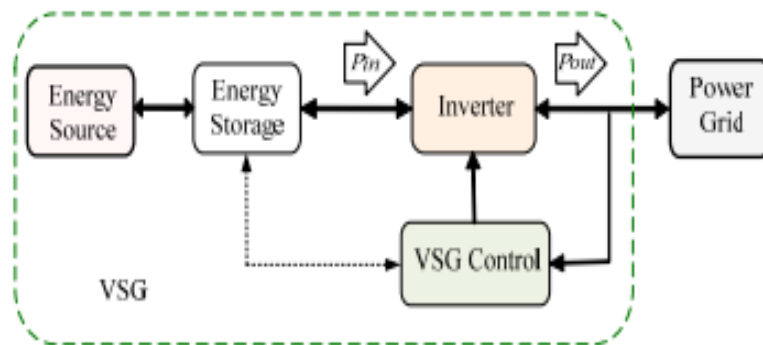
Bila pada sistem, mesin dijumpai tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhirnya detik pertama, ini dikategorikan sistem masih stabil. Kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal di bawah ini (Saadat, 1999):

- a. Sifat alami dari ketidakstabilan yang dihasilkan terkait dengan parameter sistem utama dimana ketidakstabilan bisa diamati.
- b. Ukuran gangguan dianggap menunjukkan metode perhitungan dan prediksi ketidakstabilan yang paling sesuai.
- c. Divais, proses, dan rentang waktu yang harus diambil untuk menjadi pertimbangan dalam menentukan kestabilan.

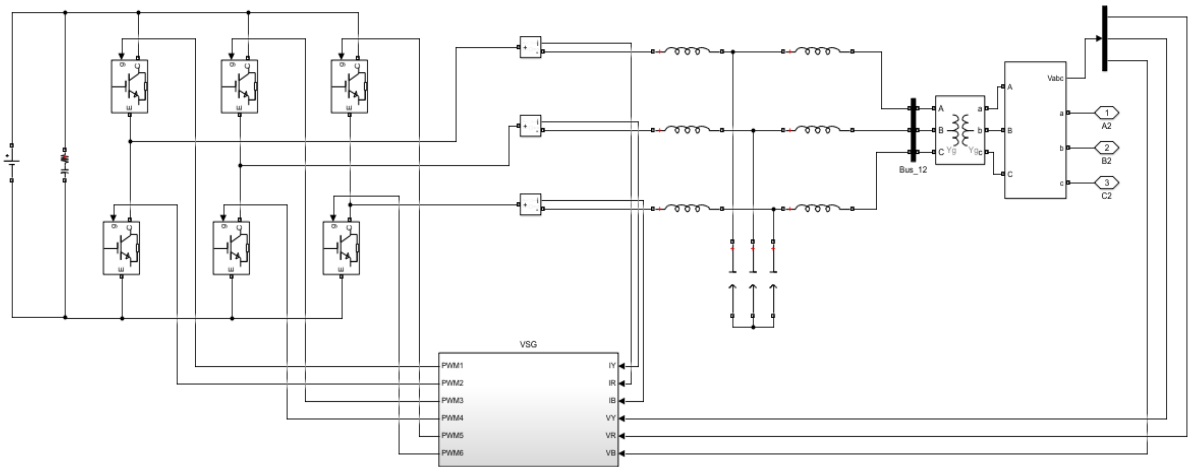
2.4 Virtual Synchronous Generator

Prinsip dari *Virtual Synchronous Generator* (VSG) didasarkan pada pengintegrasian dari teknologi konverter dinamis dari operasi statis dan dinamis pada karakteristik elektromekanis. Hal ini dapat direpresentasikan konsep VSG seperti

yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Tiga komponen VSG yang berbeda adalah PEC (yang terdiri dari dua tahap konversi daya, yaitu tingkat DC ke DC dan tingkat DC ke AC), sebuah perangkat penyimpanan energi (baterai, superkapasitor, flywheel, dll.) dan skema kontrol yang mengontrol pertukaran daya antara penyimpanan energi dan sistem tenaga. Pertukaran daya ini mendukung daya sistem dengan mencegah fluktuasi frekuensi serupa ke SG inersia rotasi [9]. VSG biasanya ditempatkan di antara *Distributed Generator* (atau sumber DC) dan grid. Sumber DC yang menuju ke algoritma VSG menampilkan fungsi *Synchronous Generator* (SG) dengan menyediakan inersia dan *damping* yang mendukung sistem grid dengan melihat konsep VSG dan penerapannya pada inverter tiga fasa dihubungkan pengendaliannya dapat dilihat pada Gambar 2. 4 (a) dan (b) sebagai berikut:



Gambar 2.4 (a) Konsep VSG [1]



Gambar 2.4 (b) Inverter Tiga Fasa dengan VSG Control [1]

Pada Gambar 2.4 (a) dan (b) menjelaskan tentang konsep VSG yaitu kombinasi antara kontrol algoritma komponen elektronika daya yang berfungsi untuk menirukan respon daya inersia pada *Renewable Energy Source (RES)* dan meningkatkan stabilitas frekuensi sistem. Konsep dasar dari VSG adalah melakukan perubahan sifat pembangkit terbarukan yang berbasis elektronika daya menjadi mirip seperti generator sinkron pada jaringan. Pembangkit terbarukan beroperasi dengan kondisi dan output yang berbeda-beda sehingga membutuhkan sebuah *converter* yang berakibat pada pengurangan inersia pada sistem. penggunaan VSG menggunakan umpan balik dari voltase dan arus untuk memanipulasi sifat pembangkit terbarukan yang berbasis *intermittent*. Pada penelitian ini digunakan VSG untuk mengembalikan nilai frekuensi nominal. VSG dapat membantu sistem dengan menunjukkan jumlah inersia dan sifat redaman generator sinkron konvensional. Konsep VSG dapat mempertahankan sebagian besar RES pada sistem tenaga listrik masa depan tanpa mengorbankan stabilitas sistem tenaga listrik dengan menambahkan *inverter*, *buck boost converter* dan *thyristor (power electronic)* pada VSG yang dibuat secara paralel

Pada sistem tenaga listrik, frekuensi merupakan indikator dari keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan total beban sistem. Frekuensi sistem akan

turun bila terjadi kekurangan pembangkitan atau kelebihan beban. Penurunan frekuensi yang besar dapat mengakibatkan kegagalan-kegagalan unit-unit pembangkitan secara beruntun yang menyebabkan kegagalan sistem secara total. Pelepasan sebagian beban secara otomatis dengan menggunakan rele frekuensi (*under frequency relay*) dapat mencegah penurunan frekuensi dan mengembalikannya ke kondisi frekuensi yang normal, dengan semakin berkembangnya sistem tenaga listrik dan dengan adanya pembangkit-pembangkit baru yang masuk dalam sistem interkoneksi, maka penyetelan rele frekuensi sudah perlu ditinjau kembali. Salah satu karakteristik pada sistem tenaga listrik yang sangat penting untuk dijaga kestabilannya adalah frekuensi. Pentingnya menjaga frekuensi berkaitan erat dengan upaya untuk menyediakan sumber energi yang berkualitas bagi konsumen. Pasokan energi dengan frekuensi yang berkualitas baik akan menghindarkan peralatan konsumen dari kerusakan (umumnya alat hanya dirancang untuk dapat bekerja secara optimal pada batasan frekuensi tertentu saja 50 s.d 60 Hz). Pengendalian frekuensi tidak semata untuk memuaskan pelanggan semata, tindakan ini juga bertujuan untuk menjaga kestabilan sistem.

Menurut [10] daya yang dibangkitkan selalu sama dengan daya yang dibutuhkan konsumen (beban). Ketika daya yang dibutuhkan konsumen lebih besar dari daya yang dibangkitkan generator maka frekuensi akan turun dan bila daya yang dihasilkan generator lebih besar dari daya yang dibutuhkan konsumen maka frekuensi akan bertambah besar. Pada sebuah generator, beban pada dasarnya merupakan beban listrik. Apabila beban tersebut diterjemahkan sebagai torsi, maka torsi tersebut dapat diterjemahkan sebagai torsi elektrik sedangkan daya yang keluar atau terbangkit dari generator dapat diterjemahkan sebagai torsi mekanik. Pada pengoperasian generator dalam kondisi tetap, nilai torsi mekanik akan sama dengan nilai torsi elektrik. Prinsip dasar persamaan putaran rotor mesin sinkron adalah momen percepatan putar (*accelerating torque*) merupakan perkalian dari momen kelembaman J (*moment of inertia*) rotor dengan percepatan sudut yang dimiliki $\frac{d^2\theta_m}{dt^2}$, persamaan differensial dinamis rotor [10]:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e$$

Keterangan :

J = Momen kelembaman total masa motor (kg.m²).

θ_m = Pergeseran sudut rotor (angular displacement) terhadap sumbu yang diam (rad).

T_a = Momen putar percepatan bersih (Nm).

T_m = Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran (Nm).

T_e = Momen putar listrik/elektromagnetis (Nm).

Putaran generator sinkron dapat membangkitkan torsi medan elektromagnetik pada saat berputar kecepatan sinkron atau ω_m maka $T_m = T_e$. Percepatan percepatan (*accelerating*) $T_m > T_e$ atau perlambatan (*decelerating*) $T_m < T_e$ akan terjadi akibat gangguan. Berdasarkan pada persamaan 2.1 perubahan posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron dapat dituliskan dengan persamaan berikut [1].

$$\theta_m = \omega_{sm} + \delta_m$$

Pergeseran daya sudut rotor atau δ_m merupakan pergeseran angular rotor yang terjadi saat sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron dalam radian.

Sedangkan persamaan kecepatan putaran rotor ω_m maka persamaan 2.2 dapat diturunkan terhadap waktu menjadi

$$\omega_m = \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt^2} \quad (2.3)$$

persamaan percepatan rotornya maka persamaan 2.3 dapat diturunkan kembali terhadap waktu menjadi

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \quad (2.4)$$

substitusi persamaan 2.4 ke dalam persamaan 2.1 akan didapatkan

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e$$

Selanjutnya dengan mengalikan persamaan 2.5 dengan ω_m akan menghasilkan

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e$$

P_m adalah daya mekanik dari masukan sedangkan P_e daya elektrik keluaran maka persamaan daya dapat ditulis kembali

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \text{ (MW)}$$

Jika $J\omega_m$ merupakan momen sudut rotor maka dapat dinyatakan M atau konstanta inersia. Masa putar memiliki hubungan dengan energi kinetik yang dituliskan pada persamaan berikut.

$$W_k = \frac{1}{2} \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m^2 \text{ atau } M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}^2}$$

Hubungan persamaan ayunan dengan momen sudut adalah

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \text{ (MW)}$$

Apabila p adalah jumlah kutub dari generator sinkron, maka sudut daya listrik δ dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik δ_m adalah sebagai berikut.

$$\delta = p \delta_m \text{ dan } \omega = p \omega_m$$

Persamaan ayunan dalam hubungan dengan sudut daya elektrik adalah

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e$$

Jika nilai M pada persamaan 2.8 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.11 akan diperoleh

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_k}{\omega_{sm}^2} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

Selanjutnya membagi persamaan 2.12 dengan S_{base} (SB) maka akan menghasilkan

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B}$$

Akan diperoleh persamaan 2.14 ketika mensubstitusikan $H = W_k / S_B$ ke dalam persamaan 2.13.

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \text{ (pu)}$$

Kecepatan putar elektrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik adalah

$$\omega_{sm} = \frac{P}{2} \omega_s \text{ sehingga persamaan 2.14 menjadi}$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \text{ (pu)}$$

Dengan mensubstitusikan $\omega = 2\pi f$ ke dalam persamaan 2.15 akan diperoleh

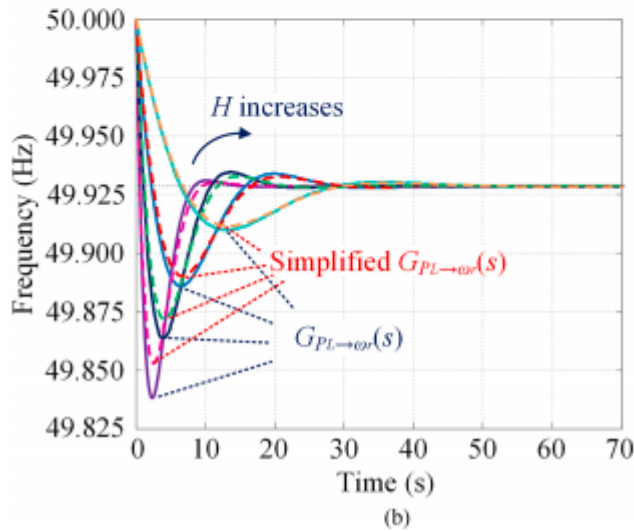
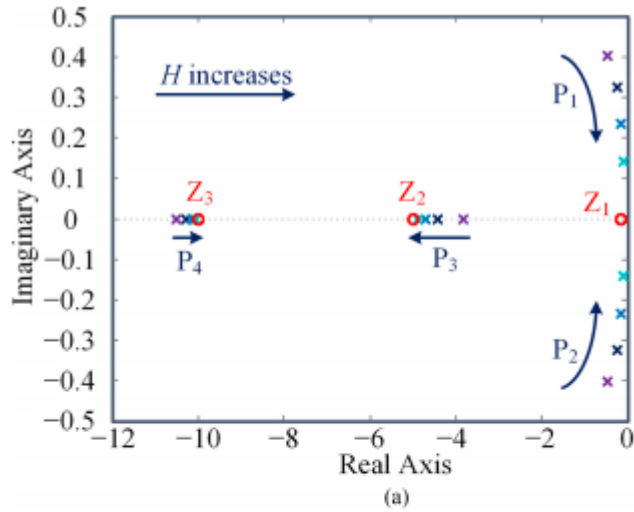
$$\frac{H}{\pi f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \text{ (pu)}$$

Persamaan 2.15 atau 2.16 dinamakan dengan persamaan ayunan (*swing equation*) yang merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) perputaran mesin sinkron dalam studi kestabilan [2,11].

2.5. Inersia

Inersia atau kelembaman adalah kecenderungan semua benda fisik untuk menolak perubahan terhadap keadaan geraknya. Secara numerik, ini diwakili oleh massa benda tersebut. Pada pembangkit konvensional, inersia berada di antara turbin dan generator yang terdapat cincin dengan tujuan mengendalikan frekuensi pada turbin. Adapun tujuan dari analisa inersia adalah untuk mengetahui pengaruh inersia sistem tenaga pada regulasi frekuensi [5]. Untuk mencapai tujuan ini, fungsi transfer dari gangguan beban dapat dilihat pada persamaan (2.17) dan untuk melihat pengaruh inersia terhadap frekuensi dapat dilihat pada Gambar 2.5(a) dan (b).

$$\Delta P_{m,pu} - \Delta P_{l,pu} = 2H \frac{d\Delta\omega_{r,pu}}{dt} + D\Delta\omega_{r,pu} \quad (2.17)$$



Gambar 2.5 Peta Pole-Zero Dan Tanggapan Frekuensi GP L \rightarrow Ω R (S) Di Bawah 3% Perubahan Beban (H = 5, 10, 20, Dan 50). (A) Peta Pole-Zero. (B) Tanggapan Frekuensi

Persamaan beban dan daya memiliki variasi yang berbeda, direpresentasikan menjadi persamaan berikut (2.18).

$$\Delta P_{in,g} - \Delta P_{out,g} = M_g (d\Delta\omega_g/dt)$$

Diasumsikan $H_{gov,g}(s)$ merupakan representasi fungsi governor, kemudian persamaan (2.18) setelah dilaplace menjadi,

$$-H_{gov,g}(s)\Delta\omega_g - \Delta P_g = M_g s \Delta\omega_g$$

dan

$$G_{P\omega,g}(s) = \frac{\Delta\omega_g}{\Delta P_g} = - \frac{1}{M_g s + H_{gov,g}(s)}$$

Agar mendapatkan hasil pemuaian $H_{gov,g}(s)$ disederhanakan menjadi $H_{gov,g}(s) = K_g/(1 + sT_g)$, maka didapatkan,

$$G_{P\omega,g}(s) = - \frac{T_g s + 1}{M_g T_g s^2 + M_g s + K_g}$$

Dari persamaan (2.21) dapat dijelaskan bahwa resonansi terjadi jika daya beban berfluktuasi pada frekuensi jika frekuensi melewati batas toleransi, maka dibutuhkan VSG untuk mengatasi resonansi yang terjadi, persamaan VSG dapat diperoleh dengan menetapkan $T_{vsg} = 0$ maka persamaan menjadi [12],

$$G_{P\omega,g}(s) = - \frac{1}{M_{vsg} s + K_{vsg}}$$

Dikarenakan $G_{P\omega,g}(s)$ tidak memiliki resonansi frekuensi, karena hal tersebut *Virtual Synchronous Generator (VSG)* dapat menghindari interferensi, oleh karena itu hubungan dari persamaan $\Delta P_{vsg} + \Delta P_g = \Delta P_L$ diperoleh ΔP_{vsg} dan ΔP_g sebagai berikut,

$$\begin{cases} \Delta P_{vsg} = \frac{P'_{vsg} P'_g}{P'_{vsg} + P'_g} \frac{\omega_0 (\Delta\omega_{vsg} - \Delta\omega_g)}{s} + \frac{P'_{vsg}}{P'_{vsg} + P'_g} \Delta P_L \\ \Delta P_g = \frac{P'_{vsg} P'_g}{P'_{vsg} + P'_g} \frac{\omega_0 (\Delta\omega_g - \Delta\omega_{vsg})}{s} + \frac{P'_g}{P'_{vsg} + P'_g} \Delta P_L \end{cases}$$

ΔP_L pu ke deviasi frekuensi $\Delta\omega_r$ pu diturunkan dari Gambar 2 dan dinyatakan sebagai (2) yang ditampilkan di bagian bawah halaman ini [12]

$$G_{PL \rightarrow \omega_r}(s) = \frac{\Delta\omega_r \text{ pu}}{\Delta P_L \text{ pu}} = \frac{-R(1+sT_G) + (1+sT_{RH})(1+sT_{RH})}{(2H_S + D)(1+sT_G)(1+sT_{RH}) R + sF_{HP} T_{RH} + 1} \quad (2.24)$$

Peta *pole-zero* dan tanggapan frekuensi (2.24) di bawah a Perubahan beban step-up 3% digambar pada Gambar 2.5, di mana nol dilambangkan sebagai lingkaran dan tiang yang direpresentasikan sebagai salib. Hal tersebut perlu dicatat bahwa tidak seperti sistem elektronik daya di mana 100% beban perubahan langkah dapat terjadi, perubahan langkah dalam sistem tenaga terutama disebabkan oleh hilangnya generator atau pelepasan muatan, dan perubahan beban 3–5% dianggap sebagai gangguan besar ke sistem tenaga [13]. Hal ini dapat diamati dari Gambar 2.5 (a) kutub P_3 dan P_4 secara bertahap mendekati dan cenderung meniadakan keluar nol Z_2 dan Z_3 ,

masing-masing, sebagai koefisien inersia H meningkat. Akibatnya, tanggapan frekuensi menjadi yang utama ditentukan oleh nol mendominasi Z_1 serta konjugasi kutub P_1 dan P_2 .

Mencirikan sistem dengan Z_1 , P_1 , dan P_2 , (2) dapat disederhanakan ke dalam

$$\begin{aligned} G_{PL \rightarrow \omega r}(s) &= \frac{-R(1+sT_{RH})}{(2H_s+D)(1+sT_{RH})R+sF_{HP}T_{RH}+1} \\ &= G_0 \frac{s+Z_1}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Dimana

$$\begin{aligned} G_0 &= \frac{-1}{2H}, Z_1 = \frac{1}{T_{RH}}, \omega_n = \sqrt{\frac{DR+1}{2HRT_{RH}}} \\ \zeta &= \frac{2HR+DRT_{RH}+F_{HP}T_{RH}}{4HRT_{RH}} \cdot \sqrt{\frac{2HRT_{RH}}{DR+1}} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Dimana ω_n dan ζ , masing-masing, merupakan frekuensi yang tidak teredam secara alami dan rasio redaman. Perbandingan antara tanggapan langkah $GP L \rightarrow \omega r(s)$ yang ditunjukkan pada Gambar. 2.5 (b) menjelaskan bahwa perbedaan maksimum antara kedua kasus ini selalu kurang dari 10% dari penyimpangan frekuensi, oleh karena itu dengan mempertimbangkan beban berubah-ubah maka frekuensi dapat dinyatakan dalam domain s yang dapat dilihat pada persamaan 2.27 sebagai berikut [14]:

$$\begin{aligned} f_{r_pu}(s) &= f_{ref_pu}(s) + \frac{G_{PL \rightarrow \omega r}(s)}{s} \\ &= \frac{1}{s} + G_0 \left\{ \frac{1}{\omega_d} \cdot \frac{\omega_d}{(s+\zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} + \frac{Z_1}{\omega_n^2} \cdot \left[\frac{1}{s} - \frac{s+\zeta\omega_n}{(s+\zeta\omega_n)^2 + \omega_n^2} - \frac{\zeta\omega_n}{\omega_d} \cdot \frac{\omega_d}{(s+\zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Dimana $f_{ref_pu}(s) = 1/s$ dan $GP L \rightarrow \omega r(s) / s$ diperkenalkan oleh referensi frekuensi per unit dan deviasi frekuensi, masing-masing, dan ω_d adalah merupakan frekuensi teredam, yang dapat direpresentasikan pada persamaan 2.28 [14].

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

(2.28)

Dengan mengambil transformasi Laplace terbalik dari persamaan (2.27), ekspresi frekuensi dalam domain waktu dapat diturunkan pada persamaan 2.29 sebagai berikut:

$$f_{r_pu}(t) = 1 + G_0 \left[\frac{z_1}{\omega_n^2} - e^{-\zeta \omega_n t} A \sin(\omega_d t + \beta) \right]$$

(2.29)

Dimana

$$A = \sqrt{\left(\frac{z_1}{\omega_n^2} \right)^2 + \left(\frac{-z_1 \zeta + \omega_n}{\omega_n \omega_d} \right)^2},$$

$$\beta = \arctan \left[\frac{\omega_d z_1}{(z_1 \zeta - \omega_n) \omega_n} \right]$$

(2.30)

Berdasarkan persamaan 2.28, beberapa indeks kinerja penting untuk mengevaluasi regulasi frekuensi dapat dengan mudah diturunkan. Sebagai contoh, laju perubahan frekuensi (RoCoF) dapat diperoleh dengan persamaan diferensial dari persamaan 2.28 sehingga menjadi persamaan 2.31 dalam satuan waktu sebagai berikut [15]:

$$\frac{d}{dt} f_{r_pu}(t) = G_0 \left[\zeta \omega_n e^{-\zeta \omega_n t} A \sin(\omega_d t + \beta) - e^{-\zeta \omega_n t} A \omega_d \cos(\omega_d t + \beta) \right]$$

(2.31)

Selanjutnya, waktu puncak t_{peak} dapat diturunkan dari persamaan 2.30 menjadi nol yang dapat dilihat pada persamaan 2.32.

$$t_{peak} = \frac{1}{\omega_d} \cdot \left[\arctan \left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right) - \beta + \pi \right]$$

(2.32)

Persamaan 2.31 disubstitusikan ke persamaan 2.28 maka frekuensi puncak nadir, yaitu, dapat dilihat pada persamaan 2.33.

$$f_{r_peak_pu} = 1 + \frac{G_0 z_1}{\omega_{n^2}} + G_0 e^{-\zeta \omega_n t_{peak}} A \sqrt{1 - \zeta^2}$$

(2.33)

Persamaan (2.32) secara kolektif mewakili frekuensi *steady-state* $f_{r \infty pu}$, yang dapat direpresentasikan pada persamaan 2.34.

$$f_{r \infty pu} = 1 + \frac{G_0 z_1}{\omega_{n^2}} = 1 - \frac{R}{DR + 1}$$

(2.34)

Diketahui dari persamaan 2.27 bahwa koefisien inersia H tidak memiliki pengaruh pada deviasi frekuensi kondisi *steady-state*. Namun, Seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.26, persamaan 2.32, dan persamaan 2.33, H pasti akan mempengaruhi RoCoF dan frekuensi nadir. Penyimpangan frekuensi mungkin juga dievaluasi oleh frekuensi overshoot σ , yang dapat diturunkan dari persamaan 2.33 sehingga dapat dilihat pada persamaan 2.34 [16].

$$\begin{aligned} \sigma &= \left| \frac{f_{r \infty pu} - f_{r_peak_pu}}{f_{r \infty pu}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{e^{-\zeta \omega_n t_{peak}} A \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_{n^2}}{2H \omega_{n^2} - z_1} \right| \times 100\% \end{aligned}$$

(2.34)

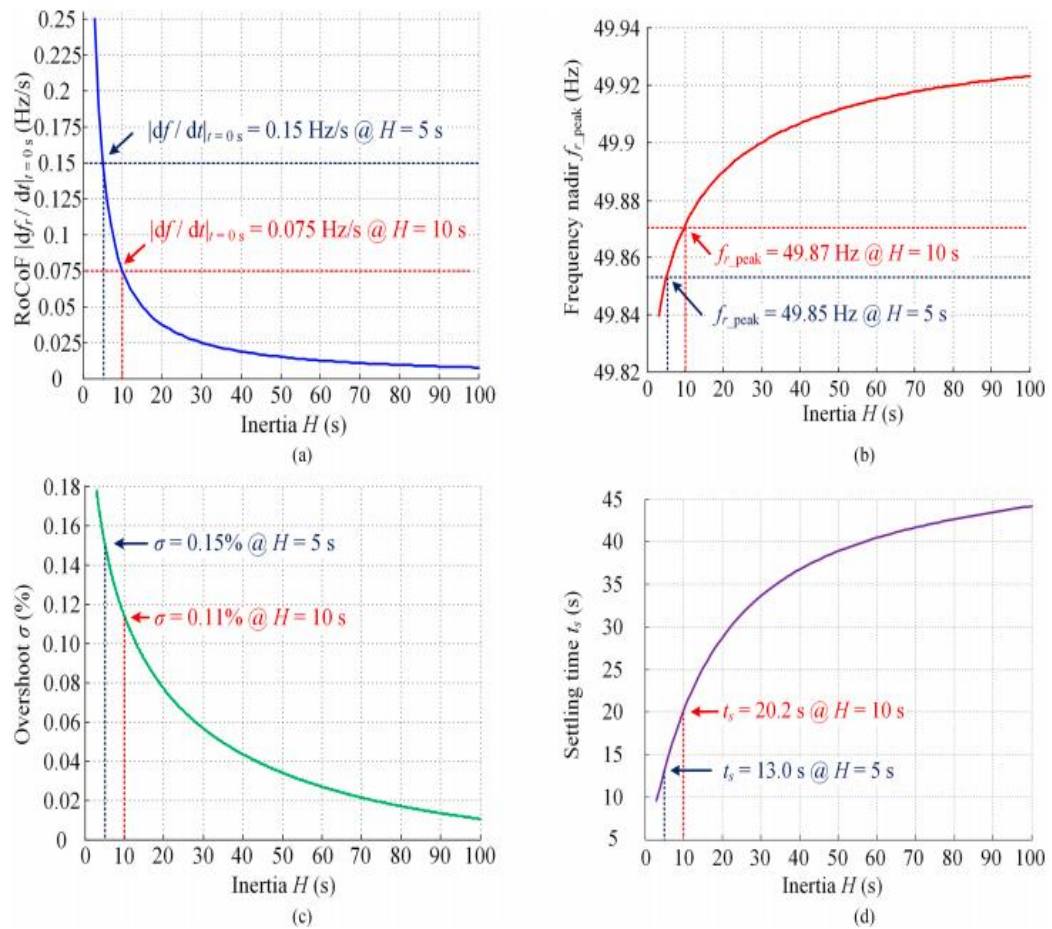
Selain itu, waktu penyelesaian biasanya digunakan untuk mengevaluasi dinamika regulasi frekuensi, yang dapat dilihat pada persamaan 2.35[16].

$$\begin{aligned} \left| \frac{f_{rpu}(t_s) - f_{r \infty pu}}{1 - f_{r \infty pu}} \right| = 2\% &\Rightarrow \frac{\omega_{n^2} e^{-\zeta \omega_n t_s} A}{z_1} = 2\% \\ \Rightarrow t_s &= - \frac{1}{\zeta \omega_n} \cdot \ln \left(\frac{0.02 z_1}{A \omega_{n^2}} \right) \end{aligned}$$

(2.35)

Berdasarkan persamaan 2.30 hingga persamaan 2.35, hubungan antara indeks kinerja dan koefisien inersia H ditunjukkan pada Gambar 2.6. Pada Gambar 2.6 (a) dan (b), terjadinya peningkatan inersia yang menyebabkan penurunan RoCoF $|dfr / dt|_{t=0}$ s dan meningkat frekuensi puncak nadir. Hal ini membuktikan bahwa keefektifan inersia sistem tenaga dalam menekan deviasi frekuensi dalam satuan waktu sehingga perubahan beban yang lebih besar akan menimbulkan kasus RoCoF

yang lebih serius dan frekuensi nadir yang seharusnya dapat diselesaikan dengan benar untuk mencegah pelepasan beban yang tidak menguntungkan.



Gambar 2.6. Hubungan Antara Berbagai Indeks Kinerja Dan Koefisien Inersia H Di Bawah Perubahan Beban Step-Up 3%. (a) Rocof $|Df / Dt| T = 0$ S. (b) Frekuensi Puncak Nadir f_r . (c) $Overshoot \Sigma$. (d) Waktu Penyelesaian T_s .

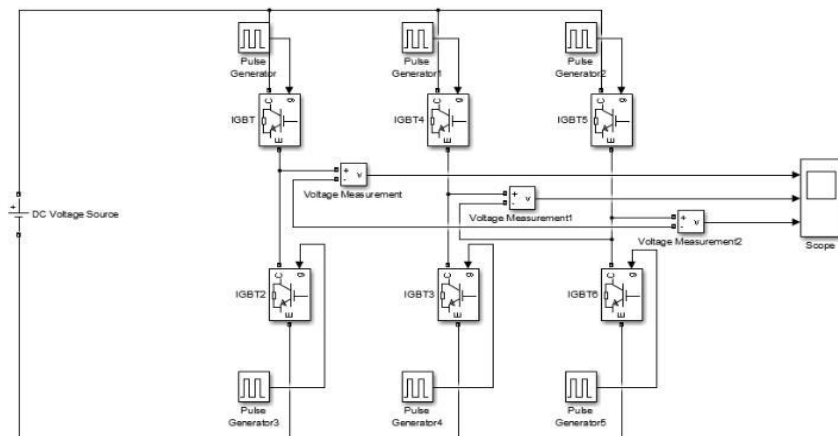
Seperti yang

dinamika regulasi frekuensi dan memperpanjang proses pemulihan frekuensi, sebagaimana dibuktikan oleh Gambar 2.6 (d). Akibatnya, deviasi frekuensi dan waktu penyelesaian diperlukan untuk perancangan koefisien inersia H . Secara teoritis, koefisien inersia harus dirancang sesuai dengan persyaratan indeks kinerja yang dinyatakan dalam persamaan 2.30 hingga persamaan 2.35 dan ditunjukkan pada Gambar. 2.6. Secara umum, jika nilai H lebih besar maka dapat meningkatkan

regulasi frekuensi saat deviasi frekuensi yang lebih kecil dan tingkat RoCoF rendah [16].

2.6 INVERTER

Inverter merupakan komponen elektronika daya dengan mengubah nilai frekuensi dan tegangan, secara sederhana inverter dapat mengubah frekuensi menjadi lebih kecil atau lebih besar dengan cara mengubah tegangan AC menjadi DC kemudian dirubah Kembali menjadi AC, output keluaran dari inverter mengandung harmonic oleh karena itu dapat dipakai pada aplikasi daya rendah dan menengah, namun untuk aplikasi daya tinggi dibutuhkan distrorsi seminimal mungkin sehingga harmonik yang dihasilkan berkurang dan menghasilkan output tegangan sinusoidal yang dapat dilihat pada Gambar 2.7.

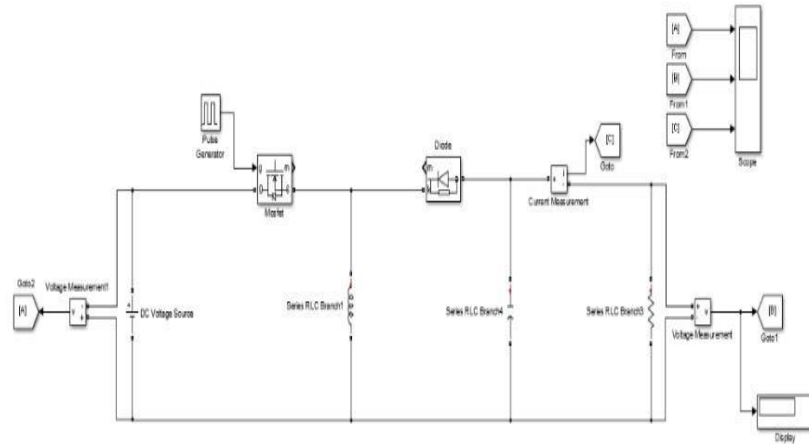


Gambar 2.7 Inverter [5]

2.7 BUCK-BOOST CONVERTER

Buck-Boost Converter merupakan converter DC to DC dimana fungsi dari buck-boost converter sebagai penaik dan penurun tegangan dari generator DC dengan mengubah nilai *duty cycle*, komponen utama *buck-boost converter* adalah sebuah induktor berfungsi sebagai penyimpan energi listrik yang akan disalurkan ke beban bertujuan menstabilkan tegangan keluaran dari generator, terdapat tiga mode dalam

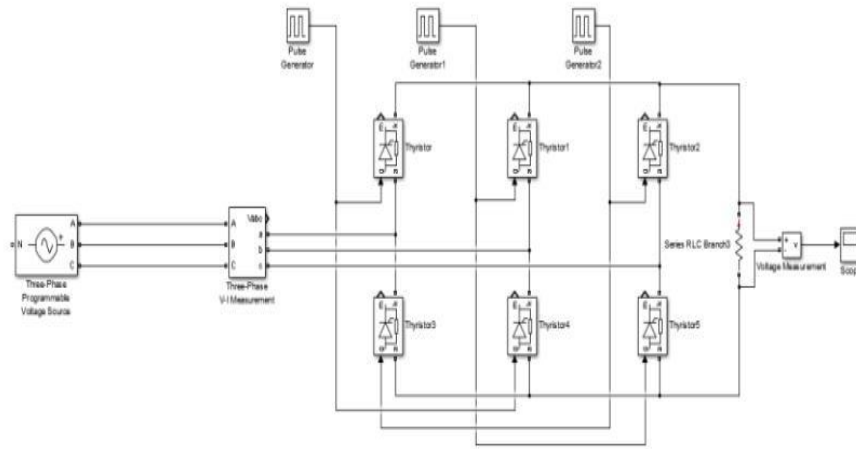
pengoperasian *buck-boost converter* yaitu *mode buck* jika tegangan input diatas tegangan yang diinginkan, *mode boost* jika tegangan input dibawah tegangan yang diinginkan, dan *mode buck-boost* jika tegangan input stabil mendekati tegangan yang diinginkan, dalam pengimplementasian *buck-boost converter* dipilih sebagai penstabil *output* tegangan dari sumber DC atau generator DC yang dapat dilihat pada Gambar 2.8 [17].



Gambar 2.8 Buck-Boost Converter [17]

2.8 THYRISTOR

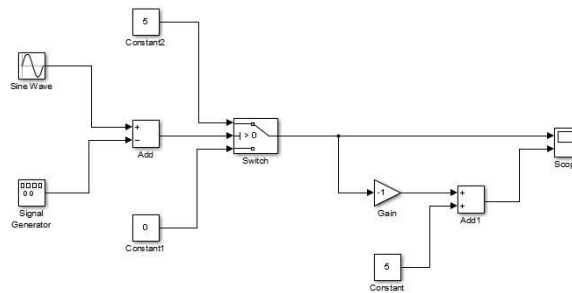
Thyristor memiliki peranan sebagai saklar daya, ketika keadaan batas tegangan tembus V_r atau V_{br} tidak dicapai maka tidak ada arus mengalir, arus tetap juga tidak akan mengalir sampai dicapainya batas tegangan penyalan V_{bo} menjadi kecil, dikatakan sebagai saklar karena arus *forward* dari anoda menuju katoda harus berada diatas parameter *Holding Current* (I_H) maka thyristor ON, thyristor akan kembali OFF jika arus *forward* berada dibawah parameter I_H , nilai I_H ditentukan berdasarkan datasheet, dan oleh sebab itu thyristor dikatakan saklar ideal, selain itu thyristor merupakan salah satu devais semikonduktor daya yang paling penting, beroperasi antara keadaan non konduksi ke konduksi yang dapat dilihat pada Gambar 2.9 [17].



Gambar 2.9 Thyristor [17]

2.9 Pulse Width Modulation

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan komponen penting dalam elektronika daya khususnya pada rangkaian seperti inverter, converter, *Switch mode power supply* (SMPS), dan speed controller. PWM sebagai pengontrol *pulse modulation* dengan memberikan sumber tegangan stabil dan frekuensi kerja yang sama tetapi nilai *duty cycle pulse control* bervariasi, PWM mengatur lebar sisi positif dan negative pulsa kontrol pada frekuensi kerja tetap yang dapat dilihat pada Gambar 2.10 [17].



Gambar 2.10 Pulse Width Modulation [17]

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pengerjaan tugas akhir ini dilakukan di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Waktu penelitian ini dilakukan pada bulan September 2020 sampai dengan bulan Desember 2020.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun peralatan dan bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Satu Unit Laptop dan sistem operasi Windows 10
2. Perangkat lunak MATLAB sebagai alat bantu untuk pemodelan dan simulasi virtual inersia terhadap sistem tenaga berinersia rendah
3. Data-data beban, pembangkit konvensional dan terbarukan bersumber dari IEEE 9 bus

3.3 Prosedur Penelitian

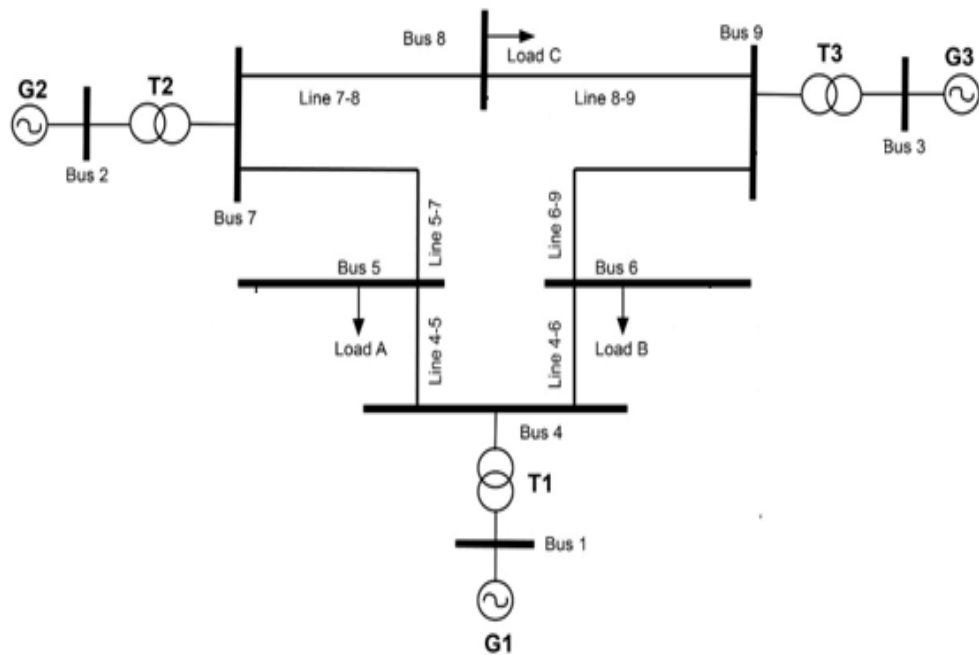
Penelitian ini dilakukan dengan sistem tenaga yang terhubung dengan pembangkit konvensional dengan mempertimbangkan inersia rendah. Pensatabilan frekuensi dilakukan dengan menambahkan VSG di beberapa sistem tenaga berinersia rendah. Terdapat beberapa hal mengenai sistem tenaga berninersia rendah dengan VSG di dalamnya agar dapat beroperasi secara optimal dan frekuensi dapat stabil, di antaranya:

1. Pemodelan sistem

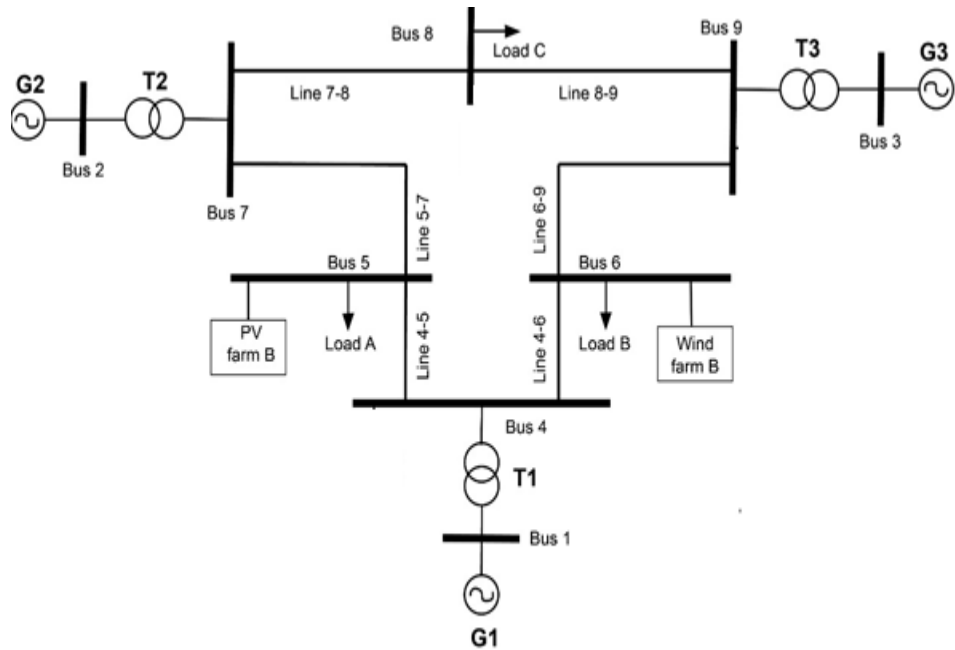
2. Daya keluaran dari pembangkit sel surya dan angin sudah ditentukan
3. Apabila total permintaan beban lebih kecil dari daya keluaran sel surya, angin, maka VSG yang terhubung dengan sistem tenaga akan bekerja sehingga menghasilkan frekuensi yang tinggi.
4. Apabila total permintaan beban lebih besar daripada daya keluaran sel surya dan angin, maka permintaan beban akan disuplai oleh total daya keluaran dari jaringan pembangkit konvensional dan sistem tenaga yang tersimpan dari baterai.

3.4 Rancangan Model Sistem

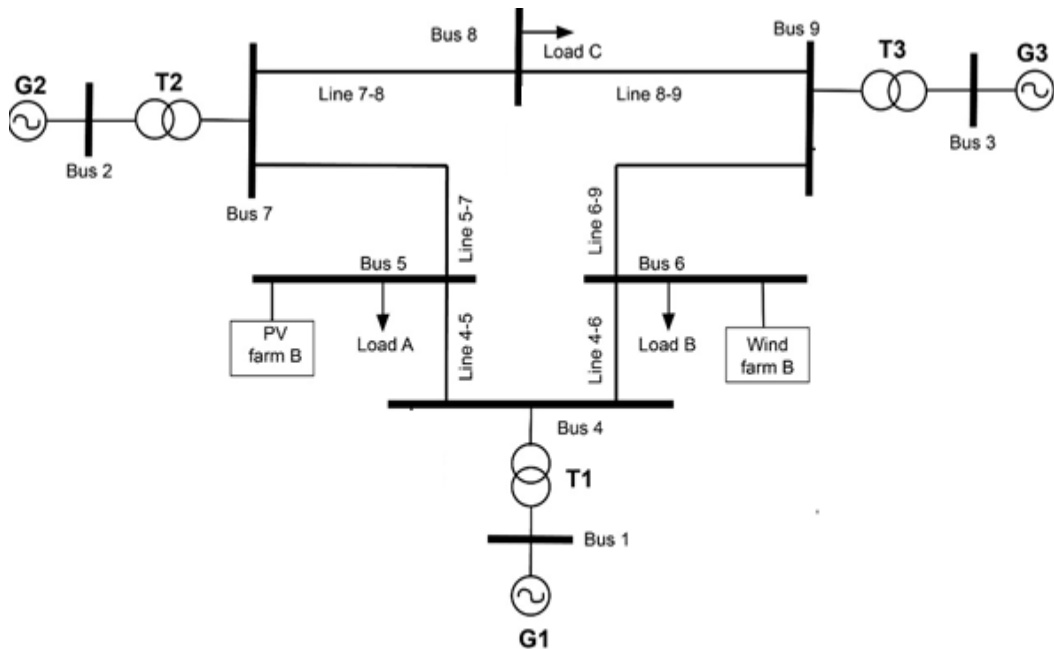
Secara keseluruhan diagram blok model sistem dirancang akan memiliki tiga kondisi yang dapat dilihat pada Gambar 3.1, Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 berikut ini.



Gambar 3.1 Rancangan Model Sistem Pembangkit Konvensional



Gambar 3.2 Rancangan Model Sistem Generator Pembangkit dengan menambahkan RES

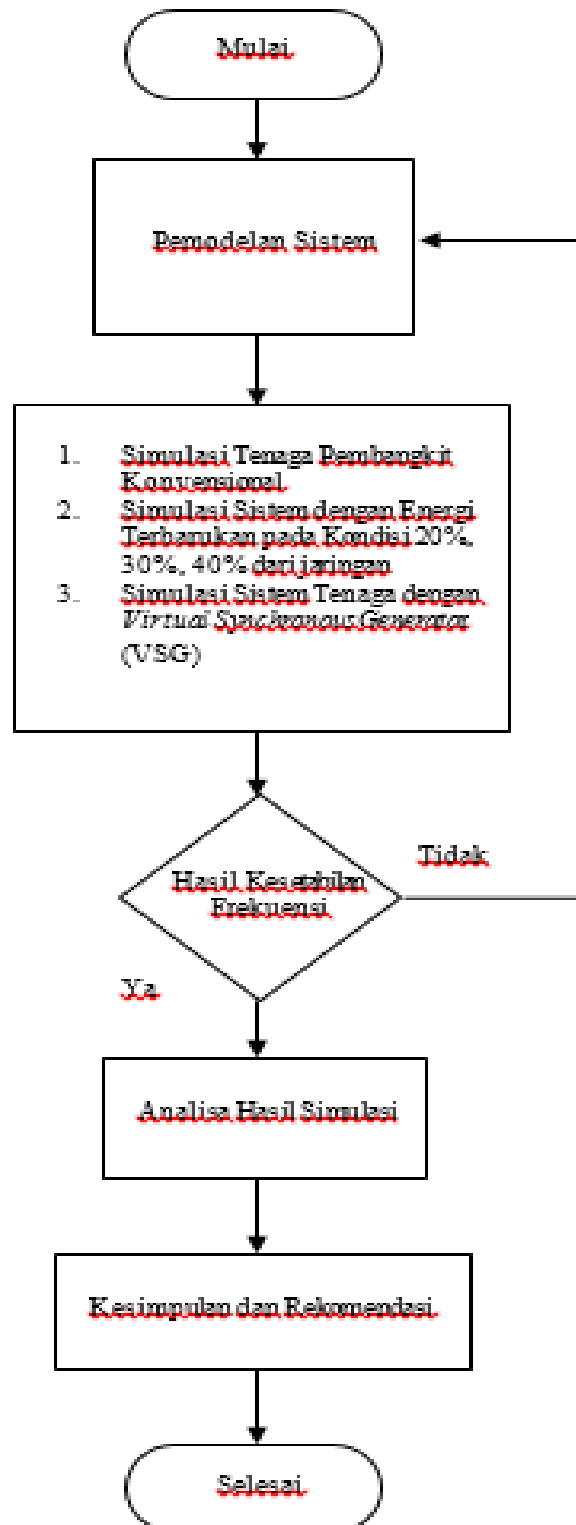


Gambar 3.3 Rancangan Model Sistem Pembangkit Konvensional dengan menambahkan RES dan VSG

Pada pemodelan sistem tenaga berinersia rendah yang digunakan pada penelitian ini adalah *on grid* dengan pembangkit konvensional. Pada rancangan model sistem yang akan dibuat terdiri dari tiga kondisi yaitu kondisi pertama beban terhubung dengan pembangkit konvensional, kondisi kedua yaitu beban terhubung dengan pembangkit konvensional dengan menambahkan RES (*Renewable Energy Sources*) dan kondisi ketiga yaitu beban terhubung dengan pembangkit konvensional dengan menambahkan RES (*Renewable Energy Sources*) dan VSG (*Virtual Synchronous Generator*) ketiga kondisi ini akan dibandingkan untuk menganalisis seberapa besar frekuensi berpengaruh terhadap inersia. Suplai daya pada sistem tenaga terbarukan (RES) yang terhubung ke beban sebesar 20%, 30% dan 40% berasal dari jaringan pembangkit konvensional. Sumber pembangkit yang digunakan dalam sistem tenaga terbarukan ini terdiri dari fotovoltaik dan angin. Sistem pembangkit konvensional pada penelitian adalah sebesar 320,19 MW, dimana terhubung dengan pembangkit fotovoltaik 50 kW, serta angin 100 kW, dengan beban total 315 MW.

3.5 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut:



Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa :

1. Tanggapan frekuensi pada IEEE 9 Bus dengan *Renewable Energy Sources* (RES) terjadi osilasi frekuensi terendah sebesar 59.88 Hz pada detik ke-0.02 dan tertinggi sebesar 60.27 Hz pada detik ke-0.1 dan kembali stabil sebesar 60 Hz pada detik ke-0.3. Hal ini dikarenakan generator sedang menyelaraskan antara kapasitas masing-masing generator yang berbeda-beda untuk mengalirkan energi listrik ke beban agar tercukupi sehingga terjadi adanya perubahan nilai frekuensi namun tidak mempengaruhi sistem secara signifikan begitu juga untuk tiap bus seterusnya.
2. Tanggapan frekuensi pada IEEE 9 Bus dengan RES mengalami penurunan dari total inersia sebesar 20% hingga 40% dari sistem. Hal ini dikarenakan sistem tidak mampu mempertahankan kestabilan frekuensi. akibat beban berlebih sehingga terjadi pelepasan beban pada sistem dan osilasi frekuensi tetap kontinyu hingga detik ke-1.
3. Penambahan VSG ketika dintegrasikan dengan RES pada sistem IEEE 9 Bus tidak memiliki perbedaan signifikan di antara keduanya, namun VSG mampu menanggapi frekuensi lebih cepat stabil dibandingkan tanpa VSG.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk melengkapi atau menyempurnakan penelitian yang akan datang dengan menggunakan *supercapacitive energy* pada *Renewable Energy Sources* agar mendapatkan hasil yang optimal dan lebih bervariasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bevrani, Hassan dan, Jorg Raisch. 2017. “*On Virtual inertia Application in Power Grid Frequency Control*”. *Control*. International Conference on Power and Energy Systems Engineering
- [2] Saadat, Hadi. 1999. “*Power System Analysis*.” New York: McGraw-Hill.
- [3] Nor Shahida Hasan, Norzanah Rosmin, Nor Julia Mohd Nordin, Aede Hatibc Mustamal, Siti Maherah Husin, Apripriharta, Ira Devi Sara. 2020. “*Virtual Inertia Support For Wind Turbine System*”. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. pp. 629-636
- [4] Jingyang, Hongchang Li, Yi Tang, Frede Blaabreg. 2018. “*Distributed Power System Virtual Inertia Implemented by Grid-Connected Power Converters*”. IEEE Transaction On Power Electronic, Vol. 33, No. 10.
- [5] Lu, Nanjun, Jingyang Fang, Yi Tang dan Branislav. Hredzak. 2017. “*A Frequency Deadband-Based Virtual Inertia Control for Grid-Connected Power Converters*”. IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- [6] Liu J, Yushi Miura, Hassan Bevrani dan Toshifumi Ise. 2016. “*Enhanced Virtual Synchronous Generator Control For Parallel Inverters In Microgrid*”. IEEE Trans Smart Grid.
- [7] Humamuddin, Rayhan, Dudi Darmawan dan Reza Fauzi Iskandar. 2018. “Kontrol Frekuensi Menggunakan Metode Kontrol Beban Elektronik dengan Sistem Kontrol *Fuzzy – Pi* pada Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro”. E-Proceeding of Engineering : Vol.5.
- [8] Kundur, Prabha. 1993. “*Power System Stability and Control*”. New York: McGraw-Hill Book.
- [9] Liu J, Yushi Miura dan Toshifumi Ise. 2015. “*Comparison of Dynamic Characteristics between Virtual Synchronous Generator and Droop Control in Inverter-Based Distributed Generators*”. IEEE Transactions on Power Electronics.
- [10] Rahman, Rifai Hasan. 2008. “Analisis Pengaruh Pemasangan Kompensator Seri Terhadap Stabilitas Sistem SMIB dan Sistem IEEE 14 Bus”. Universitas Diponegoro.

- [11] Grainger, Jhon J & Stevenson, William. 1994. "*Power System Analysis*". Singapore. Mc-Graw Hill Inc.
- [12] Ahammad, Fakir Uddin Ali dan Mandal Sharmistha. 2016." *Robust Load Frequency Control in Multi Area Power System*". An LMI Approach. IEEE First International Conference On Control Measurement and Instrumentation (CMI).
- [13] D' Arco, Salvatore dan Jon Are Suul. 2014. " *Equivalence of Virtual Synchronous Machine and Frequency-Droops for Converter-Based Microgrids*". IEEE Trans. Smart Grid Vol. 5 No.1.pp.394-395.
- [14] Kakimoto, Naoto, Satoshi Takayama, , Hiroyuki Satoh dan Kouichi Nakamura. 2009. "Power Modulation Of Photovoltaic Generator For Frequency Control System Modulation". IEEE Trans. Energy Conv, Vol.4,No. 4. Pp.200-217.
- [15] Kamdar, Renuka dkk. 2014. *Transient Stability Analysis and Enhancement of IEEE-9 Bus System*". Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ). Vol. 3,No.2, India.
- [16] Mohammed,O.O, A. O. Otuoze , S. Salisu , O. Ibrahim dan N. A. Rufa'I. 2019. "Virtual Synchronous Generator: An Overview". Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH) Vol. 38, No. 1, pp. 153 – 164.
- [17] Padiyar, K.R. 2008. "*Power System Dynamic Second Edition*". Indian Institute of Science, Bangalore.