

**PENERAPAN *PARALLEL RESONANCE FAULT CURRENT LIMITER*
UNTUK MENINGKATKAN STABILITAS TRANSIEN PADA TURBIN
ANGIN BERBASIS *DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR***

(Skripsi)

Oleh

RULI AMAR MA'RUF

2115031084



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

ABSTRAK

PENERAPAN *PARALLEL RESONANCE FAULT CURRENT LIMITER* UNTUK MENINGKATKAN STABILITAS TRANSIEN PADA TURBIN ANGIN BERBASIS *DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR*

Oleh:

Ruli Amar Ma'ruf

Peningkatan integrasi energi terbarukan, khususnya dari turbin angin berbasis *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG), menimbulkan tantangan baru terhadap stabilitas transien sistem tenaga listrik. Salah satu metode mitigasi yang menjanjikan adalah penggunaan *Parallel Resonance Fault Current Limiter* (PRFCL) untuk membatasi arus gangguan dan meredam osilasi sistem saat terjadi gangguan besar. Penelitian ini melakukan simulasi pada sistem IEEE 9 Bus menggunakan MATLAB/Simulink dengan skenario gangguan tiga fasa ke tanah di Bus 5, 6, dan 8. Parameter yang dianalisis meliputi deviasi tegangan, fluktuasi daya aktif, kecepatan rotor, dan frekuensi sistem. Hasil menunjukkan bahwa penerapan PRFCL secara signifikan mengurangi deviasi parameter transien, mempercepat pemulihan frekuensi, serta meredam osilasi sudut rotor. Efektivitas tertinggi tercapai saat PRFCL dipasang dekat dengan titik gangguan. Dengan demikian, PRFCL meningkatkan kemampuan *Fault Ride-Through* (FRT) sistem DFIG serta mendukung keandalan sistem tenaga listrik dengan penetrasi energi angin tinggi.

Kata kunci: PRFCL, DFIG, Stabilitas Transien, Gangguan Tiga Fasa ke Tanah, MATLAB/Simulink, *Fault Ride-Through* (FRT).

ABSTRAC

IMPLEMENTATION OF PARALLEL RESONANCE FAULT CURRENT LIMITER TO ENHANCE TRANSIENT STABILITY ON WIND TURBINES BASED ON DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR

By:

Ruli Amar Ma'ruf

The increasing integration of renewable energy, especially wind power using Doubly Fed Induction Generators (DFIG), presents challenges to power system transient stability. One promising solution is the application of a Parallel Resonance Fault Current Limiter (PRFCL) to limit fault currents and suppress system oscillations during severe disturbances. This study models the IEEE 9 Bus system in MATLAB/Simulink, simulating three-phase-to-ground faults at Buses 5, 6, and 8. The analysis focuses on voltage deviation, active power fluctuation, rotor speed, and frequency recovery. Simulation results demonstrate that PRFCL significantly improves transient performance by reducing parameter deviations, accelerating frequency restoration, and damping rotor angle oscillations. The highest effectiveness is achieved when PRFCL is installed near the fault location. Therefore, PRFCL enhances the Fault Ride-Through (FRT) capability of DFIG-based systems and supports the reliability of power systems with high wind energy penetration.

Keywords: PRFCL, DFIG, Transient Stability, Three-Phase to Ground Fault, MATLAB/Simulink, Fault Ride-Through (FRT).

**PENERAPAN *PARALLEL RESONANCE FAULT CURRENT LIMITER*
UNTUK MENINGKATKAN STABILITAS TRANSIEN PADA TURBIN
ANGIN BERBASIS *DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR***

Oleh

RULI AMAR MA'RUF

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

Judul Skripsi

: **PENERAPAN *PARALLEL RESONANCE FAULT CURRENT LIMITER* UNTUK MENINGKATKAN STABILITAS TRANSIEN PADA TURBIN ANGIN BERBASIS *DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR***

Nama Mahasiswa

: **RULI AMAR MA'RUF**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2115031084**

Jurusan

: **Teknik Elektro**

Fakultas

: **Teknik**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng
NIP. 19880624 201903 1 015



Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., I.P.M.
NIP. 19710813 199903 1 003

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 19710314 199903 2 001

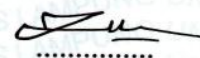


Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 19731104 200003 1 001

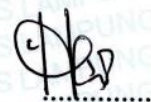
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng**

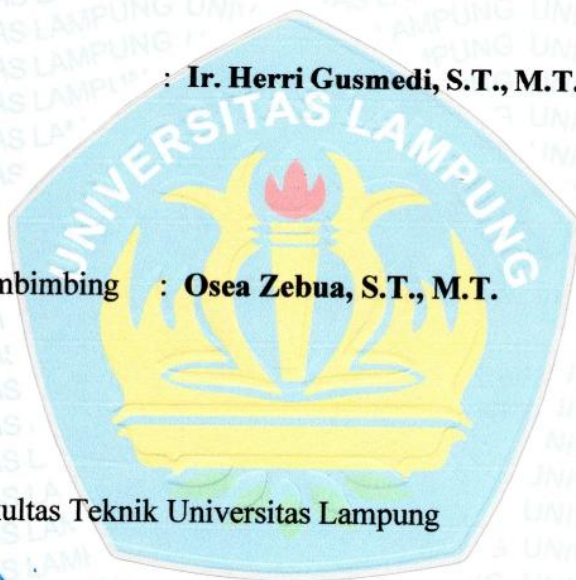


Sekretaris : **Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., I.P.M**



Penguji

Bukan Pembimbing : **Osea Zebua, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **02 Juni 2025**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku

Bandar Lampung, 02 Juni 2025



Ruli Amar Ma'ruf
NPM 211503184

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bukit Kemuning pada tanggal 24 Maret 2003, sebagai anak ke-3 dari 3 bersaudara, dari pasangan Bapak Endri Irawan dan Ibu Yakemi.

Riwayat Pendidikan penulis dimulai dari TK Muslimin Bukit Kemuning pada Tahun 2008 hingga 2009. SDN 1 Bukit Kemuning pada tahun 2009 hingga 2015. SMPN 1 Bukit Kemuning pada tahun 2015 hingga 2018. Kemudian SMAN 1 Bukit Kemuning pada 2018 hingga 2021.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung pada tahun 2021 melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik dari tahun 2023 dan berkesempatan menjadi asisten Praktikum Dasar Tenaga Listrik, Mesin – Mesin Listrik dan Elektronika Daya pada Tahun 2024. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) sebagai anggota Departemen Pengembangan Ketechnikan pada tahun 2022 dan anggota Departemen Komunikasi dan Informasi pada tahun 2023. Penulis melaksanakan kerja praktik di UIP3BS UPT Tanjung Karang Bandar Lampung yang tergabung dalam divisi Perencanaan dan Evaluasi serta Konstruksi dan Penyaluran dan melanjutkan membuat laporan yang berjudul “ANALISIS PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI PADA PEMUTUS TENAGA (PMT) 20 KV PENYULANG JAIPONG GARDU INDUK SRIBAWONO” tahun 2024.

**“Saya Persembahkan dan Saya dedikasikan
Skripsi ini untuk Kedua Orang Tua saya,
Ayahanda Endri Irawan dan Ibunda Yakemi
yang memberikan semua hal terbaik demi
anaknya untuk mencapai kesuksesan”**

Serta

Keluarga Besar, Dosen, Teman dan Almamater

MOTTO

“Jangan terlalu keras memikirkan sesuatu yang di luar kendalimu, sebab urusan hamba sudah diatur indah dengan Takdir Allah. Sabar dan Syukur adalah cara terbaik menjalani hidup, karena soal masa depan itu urusan Allah”

(Ivantara Suranto)

“Bermain, Tertawa, dan Tumbuh”

(Ruli Amar Ma'ruf)

“Beranilah untuk memulai sesuatu, karena kita tidak akan pernah tahu diri kita bila tidak pernah mencoba”

(Saogie)

SANWACANA

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Penerapan *Parallel Resonance Fault Current Limiter* Untuk Meningkatkan Stabilitas Transien Pada Turbin Angin Berbasis *Doubly Fed Induction Generator*” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rezeki serta kesehatan sehingga mampu terlaksanainya penelitian ini hingga menyelesaikan Skripsi.
2. Keluarga penulis, Bapak, Mamak, Abang Fadhli, Mbak Salma, Serta keluarga besar Almunir dan Kasimah yang tercinta yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis selama menempuh pendidikan.
3. Kepada Om Siswanto dan Tante Djatu yang telah memberikan fasilitas tempat tinggal dan memberikan dukungan kepada penulis selama menempuh pendidikan.
4. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A. IPM., ASEAN.Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
6. Ibu Herlinawati, S.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
7. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
8. Bapak Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, nasihat, dan pandangan hidup kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah.

9. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, nasehat, dan pandangan hidup kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah.
10. Osea Zebua, S.T., M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, masukan, saran, serta motivasi kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah.
11. Ibu Dr. Sri Purwiyanti, S.T., M.T., Ph.D, selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus kepada penulis selama perkuliahan.
12. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
13. Staf administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
14. Teruntuk Piz Roni, Jefri Prayoga, Rijal Mahmud Wahyudi, dan Arya Nugraha, sahabat penulis yang selalu menemani, memberi motivasi dan semangat yang luar biasa selama perkuliahan hingga sampai saat ini. Terima kasih sudah menjadi sahabat dan teman yang sangat baik bahkan seperti saudara. Terima kasih karena tidak pernah meninggalkan penulis sendirian, selalu menjadi garda terdepan saat penulis membutuhkan bantuan serta selalu mendengarkan keluh kesah penulis selama berada di perantauan ini.
15. Teruntuk Noven, Afdhal, dan Rika terima kasih atas bantuan, dukungan, motivasi selama menjadi rekan skripsi selama di dunia perkuliahan.
16. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Jefri, Benyamin, Daniel, Dona, Ananda, Siti, Luki, Alex, Marhadi, Bimo, Deni, Dina, Alfiza, dan lain – lain. Serta Adik – Adik asisten Lab KEE 2022, Septa, Awan, Aditio, Fina, Muti, Emil, Bani, Novian, Ayu, Humam, Krisna, dan Jopen. Terima kasih atas ilmu, bantuan, dan kerjasamanya selama penulis menjadi asisten laboratorium.
17. Rekan – Rekan Konsentrasi Teknik Tenaga Listrik, Unedo, Serly, Eikel, Imam, Irfan, dan lain – lain yang telah menjadi rekan skripsi selama perkuliahan.

18. Teruntuk seseorang yang memiliki NPM 2101051019 terima kasih telah menjadi bagian dalam proses penyusunan skripsi. Terima kasih atas segala dukungan, motivasi, semangat, dan telah menjadi tempat keluh kesah, serta rasa yang tidak bisa diungkapkan.
19. Teruntuk Andre, Bilal, Firna, Salwa, dan Asma terima kasih atas bantuan, dukungan serta motivasi selama menjadi teman sekolah sampai saat ini.
20. Teruntuk Riki, Iqbal, Shallu, Dina, Vivi, dan Deana, terima kasih atas telah menjadi teman – teman KKN di Desa Beringan jaya.
21. Segenap Keluarga Besar Angkatan EXCALTO 2021, dan teman – teman yang telah menjadi keluarga bagi penulis.
22. Rekan – rekan HIMATRO UNILA serta kakak – kakak dan adik – adik tingkat di Jurusan Teknik Elektro.
23. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
24. Terakhir, Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada sosok yang selama ini diam – diam berjuang tanpa henti, seorang laki – laki sederhana dengan impian yang tinggi, namun seringkali sulit ditebak isi pikiran dan hati. Terima kasih kepada penulis skripsi ini yaitu diriku sendiri, Ruli Amar Ma'ruf. Anak bungsu yang sedang melangkah menuju usia 23 tahun yang dikenal keras kepala namun terkadang sifat anak kecil pada umumnya. Terima kasih telah turut hadir di dunia ini, telah bertahan sejauh ini, dan terus berjalan melewati segala tantangan semesta hadirkan. Terima kasih telah tetap berani menjadi dirimu sendiri. Aku bangga atas setiap langkah kecil yang kau ambil, atas semua pencapaian yang mungkin tak selalu dirayakan orang lain. Walau terkadang harapanmu tidak sesuai dengan apa yang semesta berikan, tetaplah belajar menerima dan mensyukuri apapun yang kamu dapatkan. Jangan pernah lelah untuk tetap berusaha, berbahagialah dimanapun kamu berada. Rayakan apapun dalam dirimu dan jadikan dirimu bersinar dimanapun tempatmu bertumpu. Aku berdoa, semoga langkah kaki kecilmu selalu diperkuat, dikelilingi oleh orang – orang yang hebat, serta mimpimu satu persatu akan terjawab.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis menerima kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, Juni 2025

Ruli Amar Ma'ruf

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK	ii
ABSTRAC.....	iv
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.1.1 <i>Application of Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Generation</i>	5
2.1.2 <i>Analysis of Using a Hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) to Limit Short-Circuit Fault Currents in a 20 kV Power Distribution System at Sengkaling Substation</i>	6
2.1.3 <i>Transient Stability Analysis of Islanding Operation in Power System with Hybrid Distributed Generation</i>	6
2.2 Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).....	8
2.3.1 Jenis – Jenis PLTB.....	10
2.4 Mesin Induksi	11

2.5 <i>Doubly Fed Induction Generator</i> (DFIG)	13
2.6 Pemodelan <i>Doubly Fed Induction Generator</i> (DFIG).....	17
2.7 Konverter AC/DC/AC	22
2.8 Kestabilan Sistem Tenaga.....	23
2.8.1 Kestabilan Tegangan.....	24
2.8.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	25
2.8.3 Tegangan Jatuh	26
2.8.4 Standar <i>Undervoltage</i>	26
2.8.5 Kestabilan Transien	26
2.9 Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik	27
2.9.1 Gangguan Hubung Singkat.....	28
2.9.2 Gangguan Beban Lebih (<i>Over Load</i>).....	29
2.10 Perhitungan Arus Hubung Singkat	29
2.11 <i>Fault Current Limiter</i>	32
2.11.1 <i>Parallel Resonance Fault Current Limiter</i>	32
2.11.2 Kontrol <i>Parallel Resonance Fault Current Limiter</i>	36
2.11.3 Desain <i>Parallel Resonance Fault Current Limiter</i>	37
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	6
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	6
3.2 Alat dan Bahan	6
3.3 Prosedur Penelitian	41
3.4 Diagram Alir Penelitian	43
3.5 Simulasi dan Pemodelan.....	44
3.6 Metode Perhitungan Indeks Stabilitas Transien	48
3.6.1 <i>Voltage Index</i> (VLT).....	48
3.6.2 <i>Power Index</i> (POW).....	48
3.6.3 <i>Speed Index</i> (SPD)	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	50
4.1 Pemodelan Simulasi Sistem Tenaga Listrik	50
4.2 Kapasitas Generator 1	51
4.3 Kapasitas Generator 2	51
4.4 Kapasitas Generator 3	52
4.5 Kapasitas Trafo	53
4.6 Kapasitas <i>Doubly Fed Induction Generator</i>	53

4.7 Skenario Simulasi Stabilitas Transien	54
4.8 Penentuan Parameter <i>Parallel Resonance Fault Current Limiter</i>	55
4.9. Penentuan Jenis Gangguan Sistem	58
4.10 Simulasi Stabilitas Transien DFIG	59
4.10.1 <i>IEEE 9 Bus System</i> yang terintegrasi DFIG Dalam Kondisi Normal	59
4.10.2 IEEE 9 bus System yang terintegrasi DFIG dengan Gangguan Bus 5	60
4.10.3 IEEE 9 bus System yang terintegrasi DFIG dengan Gangguan Bus 6	67
4.10.4 IEEE 9 bus System yang terintegrasi DFIG dengan Gangguan Bus 8	74
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	82
5.1 Kesimpulan	82
5.2 Saran	83
DAFTAR PUSTAKA	74

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
Gambar 2.2 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.....	8
Gambar 2.3 Skema VSWT dipasang DFIG, SCIG, dan PMSG	11
Gambar 2.4 kurva karakteristik torsi mesin induksi	13
Gambar 2.5 Turbin angin berbasis DFIG	14
Gambar 2.6 Skematik dan aliran daya pada DFIG	15
Gambar 2.7 Rangkaian Ekivalen DFIG dalam sumbu-d	17
Gambar 2.8 Rangkaian Ekivalen DFIG dalam sumbu-q	18
Gambar 2.9 Konverter daya jenis <i>back to back converter</i>	22
Gambar 2.10 Arah aliran arus ketika terjadi gangguan Hubung Singkat	29
Gambar 2.11 Topologi Rangkaian <i>Parallel Resonance Fault Current Limiter</i> ...	33
Gambar 2.12 Rangkaian kontrol dari PRFCL	36
Gambar 2.13 arus gangguan i_L (t)	37
Gambar 2.14 Rangkaian Resonansi PRFCL	37
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	43
Gambar 3.2 Modelling Simulink Sistem IEEE 9 bus terintegrasi turbin angin berbasis DFIG.....	44
Gambar 3.3 Modelling Simulink Sistem IEEE 9 bus terintegrasi turbin angin berbasis DFIG dengan PRFCL dan Gangguan 3LG Bus 5	45
Gambar 3.4 Modelling Simulink Sistem IEEE 9 bus terintegrasi turbin angin berbasis DFIG dengan PRFCL dan Gangguan 3LG Bus 6	46
Gambar 3.5 Modelling Simulink Sistem IEEE 9 bus terintegrasi turbin angin berbasis DFIG dengan PRFCL dan Gangguan 3LG Bus 8	47
Gambar 4.1 Perbandingan variasi nilai L & C pada PRFCL terhadap Tegangan Bus 4 dengan gangguan 3LG pada Bus 5.....	56
Gambar 4.2 Perbandingan variasi nilai L & C pada PRFCL terhadap Frekuensi Generator dengan gangguan 3LG pada Bus 5	56
Gambar 4.3 Perbandingan nilai arus Bus 4 dengan variasi gangguan pada Bus 5	58
Gambar 4.4 Tegangan Bus 4 saat terjadi gangguan 3L-G pada bus 5	61

Gambar 4.5 Daya Aktif DFIG saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 5	62
Gambar 4.6 Kecepatan DFIG saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 5	63
Gambar 4.7 Tegangan <i>DC link</i> DFIG saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 5 ...	64
Gambar 4.8 Respons <i>Load Angle</i> Generator saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 5	65
Gambar 4.9 Respons Frekuensi Generator saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 5	66
Gambar 4.10 Tegangan Bus 4 saat terjadi gangguan 3L-G pada bus 6	68
Gambar 4.11 Daya Aktif DFIG saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 6	69
Gambar 4.12 Kecepatan DFIG saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 6	70
Gambar 4.13 Tegangan <i>DC link</i> DFIG saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 6..	70
Gambar 4.14 Respons <i>Load Angle</i> Generator saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 6	72
Gambar 4.15 Respons Frekuensi Generator saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 6	74
Gambar 4.16 Tegangan Bus 4 saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 8	75
Gambar 4.17 Daya Aktif DFIG saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 8	76
Gambar 4.18 Kecepatan DFIG saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 8	77
Gambar 4.19 Tegangan <i>DC link</i> DFIG saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 8..	77
Gambar 4.20 Respons <i>Load Angle</i> Generator saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 8	79
Gambar 4.21 Respons Frekuensi Generator saat terjadi gangguan 3L-G pada Bus 8	81

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Keterangan Parameter Generator Induksi Pada DFIG.....	21
Tabel 2.2 Keterangan Parameter Rangkaian <i>Parallel-Resonance-Type Fault Current Limiter</i>	39
Tabel 3.1 Waktu Penelitian.....	40
Tabel 4.1 Data Generator Pada Sistem Tenaga Listrik 9 Bus IEEE.....	50
Tabel 4.2 Data Saluran Transmisi Pada Sistem Tenaga Listrik 9 Bus IEEE.....	51
Tabel 4.3 Data Generator 1	51
Tabel 4.4 Data Generator 2	52
Tabel 4.5 Data Generator 3	52
Tabel 4.6 Kapasitas Trafo	53
Tabel 4.7 Spesifikasi Turbin (1 Turbin Angin)	53
Tabel 4.8 Spesifikasi Generator (1 Turbin Angin)	53
Tabel 4.9 Spesifikasi Konverter (1 Turbin Angin)	54
Tabel 4.10 Parameter Kontrol (1 Turbin Angin)	54
Tabel 4.12 Skenario Stabilitas Transien	55
Tabel 4.11 Data Parameter <i>Parallel Resonance Fault Current Limiter</i>	57
Tabel 4.13 Indeks Parameter Sistem Ketika Tidak Terjadi Gangguan (Normal). 60	60
Tabel 4.14 Indeks Parameter Saat Terjadi Gangguan 3L-G pada Bus 5	60
Tabel 4.15 Persentase Perubahan Indeks Parameter Saat Terjadi Gangguan 3L-G pada Bus 5 dengan Saat Kondisi Normal	60
Tabel 4.16 Nilai Indeks Parameter dalam Kondisi Gangguan 3L-G pada Bus 6 . 67	67
Tabel 4.17 Persentase Perubahan Indeks Parameter Saat Terjadi Gangguan 3L-G pada Bus 6 dengan Saat Kondisi Normal	68
Tabel 4.18 Nilai Indeks Parameter dalam Kondisi Gangguan 3L-G pada Bus 8 . 74	74
Tabel 4.19 Persentase Perubahan Indeks Parameter Saat Terjadi Gangguan 3L-G pada Bus 8 dengan Saat Kondisi Normal	74

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi terbarukan khususnya energi angin, telah muncul sebagai solusi utama untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit 23% dan 31% pada tahun 2050. Sementara hingga tahun 2020 PLTB baru terpasang sekitar 135 MW. Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan turbin angin semakin meluas, seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya keberlanjutan dan perubahan iklim[1]. Salah satu teknologi yang paling banyak digunakan dalam pembangkitan energi angin adalah *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG). DFIG memiliki keunggulan dalam efisiensi operasional dan fleksibilitasnya dalam menghadapi variasi kecepatan angin, serta kemampuan untuk mengontrol daya aktif dan daya reaktif yang dihasilkan oleh turbin angin[2].

Namun, integrasi turbin angin berbasis DFIG ke dalam sistem tenaga listrik menghadirkan tantangan teknis yang signifikan, terutama dalam menjaga stabilitas transien. Stabilitas transien mengacu pada kemampuan sistem untuk tetap berada dalam kondisi operasional yang stabil setelah mengalami gangguan besar seperti hubung singkat atau perubahan beban mendadak. Pada turbin angin berbasis DFIG, gangguan jaringan dapat menyebabkan osilasi torsi yang besar, fluktuasi tegangan, dan arus gangguan yang berlebihan. Hal ini tidak hanya berdampak pada turbin angin itu sendiri, tetapi juga dapat mengganggu kestabilan sistem tenaga secara keseluruhan, berpotensi menyebabkan *voltage collapse* atau bahkan *blackout*[3].

Dalam menghadapi tantangan ini, penerapan teknologi mitigasi seperti *Fault Current Limiter* (FCL) menjadi sangat penting. FCL adalah perangkat yang dirancang untuk mengatasi arus gangguan selama gangguan jaringan, sehingga melindungi peralatan dan menjaga kestabilan sistem. Di antara berbagai jenis FCL, *Parallel Resonance Fault Current Limiter* (PRFCL) menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan kestabilan transien pada sistem tenaga yang mengintegrasikan turbin angin berbasis DFIG. PRFCL bekerja dengan menggabungkan rangkaian LC paralel, yang secara efektif mengurangi osilasi arus dan torsi selama gangguan, sekaligus mempertahankan tegangan pada titik sambung bersama (*Point of Common Coupling*, PCC)[4].

Keunggulan utama PRFCL dibandingkan FCL konvensional adalah struktur yang lebih sederhana, biaya implementasi yang lebih rendah, dan kemampuan untuk menstabilkan tegangan dan arus selama seluruh periode gangguan. Dengan mengurangi isolasi torsi yang signifikan pada turbin angin berbasis DFIG, PRFCL dapat membantu menjaga kestabilan operasional sistem tenaga secara keseluruhan, meningkatkan kemampuan *Fault Ride Through* (FRT) turbin angin, serta mendukung integrasi energi terbarukan dalam skala yang lebih luas.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pemanfaatan PRFCL dalam meningkatkan kestabilan transien pada turbin angin berbasis DFIG. Dengan menggunakan simulasi berbasis perangkat lunak seperti MATLAB/SIMULINK, penelitian ini akan mengevaluasi kinerja PRFCL dalam mengurangi dampak negatif gangguan jaringan, termasuk fluktuasi tegangan, osilasi torsi, dan arus hubung singkat. Penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan solusi teknis yang inovatif untuk tantangan dalam integrasi turbin angin, tetapi juga mendukung pengembangan sistem tenaga listrik yang lebih andal, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perancangan dan menentukan parameter *Parallel Resonance Fault Current Limiter* ?
2. Apa pengaruh penggunaan *Parallel Resonance Fault Current Limiter* terhadap kemampuan *Fault Ride Through* pada turbin angin berbasis *Doubly Fed Induction Generator* selama gangguan jaringan?
3. Bagaimana prinsip kerja *Parallel Resonance Fault Current Limiter* dalam membatasi arus hubung singkat dan meningkatkan stabilitas transien pada sistem DFIG?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan stabilitas transien ketika terjadi gangguan hubung singkat dengan menerapkan *Parallel Resonance Fault Current Limiter* pada sistem turbin angin berbasis *Doubly Fed Induction Generator*, dengan melakukan simulasi pada MATLAB R2021a untuk pemodelan dan perhitungan matematis pada sistem.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya membahas pengaruh *Parallel Resonance Fault Current Limiter* terhadap stabilitas transien dan kemampuan *Fault Ride Through* (FRT) pada sistem turbin angin berbasis *Doubly Fed Induction Generator*.
2. Gangguan yang dianalisis dalam penelitian ini terbatas pada gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.
3. Kecepatan angin pada penelitian ini menggunakan kecepatan angin rata-rata di Indonesia.

1.5 Manfaat Penelitian

Mengetahui peran *Parallel Resonance Fault Current Limiter* yang dapat meningkatkan stabilitas transien dan keandalan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin berbasis *Doubly Fed Induction Generator* serta memberikan rekomendasi praktis bagi industri energi mengenai penerapan *Parallel Resonance Fault Current Limiter* dalam pengoperasian sistem turbin angin.

1.6 Hipotesis

Penggunaan *Parallel Resonance Fault Current Limiter* dapat meningkatkan stabilitas transien dan kemampuan *Fault Ride Through* (FRT) pada sistem turbin angin berbasis *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) selama terjadi gangguan jaringan tenaga listrik

1.7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, manfaat, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang landasan teori dari penelitian ini didapat dari sumber buku, jurnal, serta penelitian terdahulu.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan waktu dan tempat, alat dan bahan, metode penelitian dan pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan data komputasi dan pembahasan dari penelitian tugas akhir ini.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dibahas dalam penelitian tugas akhir ini dan berisi saran penulis untuk meningkatkan wawasan bagi pembaca.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

2.1.1 *Application of Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Generation*

Penelitian ini ditulis oleh Raditya Arindya, membahas penerapan *Doubly-Fed Induction Generator* (DFIG) dalam pembangkit listrik tenaga angin. Dalam beberapa tahun terakhir, energi angin telah menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang penting dan menjanjikan. Penelitian ini menyoroti keuntungan dari turbin angin dengan kecepatan variabel dibandingkan dengan turbin dengan kecepatan tetap, terutama dalam hal efisiensi konversi energi angin. DFIG menggunakan pengoperasian turbin angin pada kecepatan yang bervariasi, yang terhubung ke jaringan melalui *Voltage Source Converters* (VSC). Stator generator terhubung langsung ke jaringan, sedangkan rotor terhubung melalui konverter *back-to-back* yang dirancang untuk menangani sebagian kecil dari daya generator. Penelitian ini juga menjelaskan karakteristik *output* turbin, respon terhadap perubahan kecepatan angin, serta pentingnya kontrol daya aktif dan daya reaktif untuk menjaga stabilitas sistem. Melalui simulasi SIMULINK/MATLAB dan analisis, penelitian ini menunjukkan bahwa DFIG dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga angin, serta memberikan kontribusi positif terhadap pengelolaan daya dalam jaringan listrik. Penelitian ini menjadi referensi penting untuk dalam pengembangan teknologi energi terbarukan, khususnya dalam konteks pembangkit listrik tenaga angin[5].

2.1.2 Analysis of Using a Hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) to Limit Short-Circuit Fault Currents in a 20 kV Power Distribution System at Sengkaling Substation

Penelitian ini dilakukan oleh Eko Nurcahyo dan rekan – rekannya dari Institute Technology National Malang, membahas penggunaan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) untuk mengatasi masalah arus hubung singkat yang sering terjadi di *Sengkaling Substation*, yang merupakan bagian dari sistem distribusi listrik di Malang, Indonesia. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh meningkatnya permintaan energi listrik dan frekuensi kejadian hubung singkat yang tinggi, yang mencapai ± 18 kali dalam tahun 2016. Kejadian ini sebagian besar disebabkan oleh kondisi cuaca ekstrem yang memicu trip relay pada feeder yang disuplai oleh transformator. Penulis mengusulkan penerapan SFCL untuk membatasi arus hubung singkat dengan cepat dalam waktu setengah siklus, sehingga dapat melindungi peralatan dan meningkatkan kinerja sistem distribusi listrik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan pemasangan *hybrid* SFCL, mampu mengurangi arus gangguan hubung singkat dalam $\frac{1}{2}$ siklus awal, di mana gangguan L-G dari 16,77 kA turun menjadi 5,9 kA, gangguan L-L-G dari 35,38 kA turun menjadi 9,15 kA, Gangguan L-L-L-G dari 38,36 kA turun menjadi 9,8 kA, dan gangguan L-L dari 28,89 kA turun menjadi 4,35 kA. Rata – rata persentase pengurangan arus gangguan hubung singkat oleh *hybrid* SFCL adalah 74,12%[6].

2.1.3 Transient Stability Analysis of Islanding Operation in Power System with Hybrid Distributed Generation

Penelitian ini dilakukan oleh Adam Farrel Alldila Mambu dari Universitas Lampung, yang membahas tentang analisa stabilitas pada sistem tenaga yaitu stabilitas transien yang terjadi akibat gangguan hubung singkat 3 fasa dengan pembangkit terbarukan yaitu *wind turbine* dan tenaga air menggunakan kriteria sama luas dan *power flow tracking*. Studi kasus yang digunakan pada penelitian ini yaitu sistem standar IEEE 13-bus. Dari hasil penelitian ini menunjukan dengan adanya gangguan hubung singkat pada sistem mengakibatkan *islanding operation*, dengan *single-machine* sudut pemutusan kritis rotor generator 1 lebih rendah dibandingkan sudut pemutusan kritis rotor generator 2 yaitu sebesar 94.576° dan

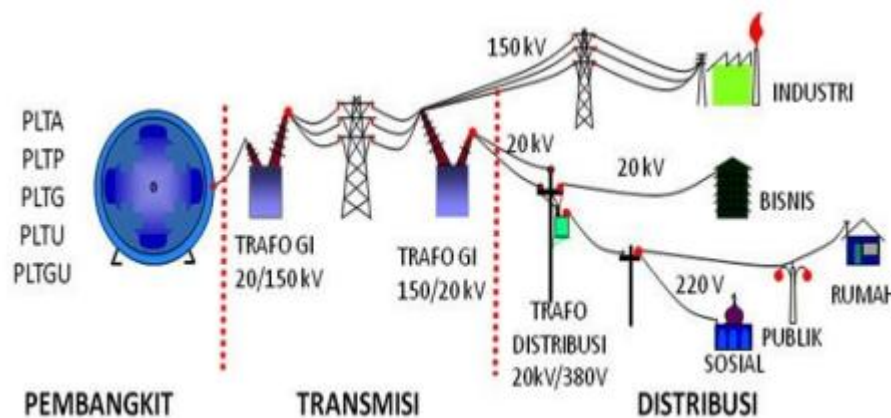
112.320°, dan dengan adanya *wind turbine* saat beroperasi *multi-machine* menunjukkan sudut ayunan rotor generator lebih rendah meskipun tidak signifikan, namun dengan *wind turbine*, *losses* yang dihasilkan lebih besar dan lebih rentang terhadap gangguan karena terbatasnya daya reaktif dan kurangnya efisiensi daya yang dihasilkan.

2.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang meliputi beberapa bagian yang saling terhubung atau saling interkoneksi untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. Secara umum, sistem ini mencakup proses pembangkitan energi listrik, penyaluran melalui jaringan transmisi, gardu induk, hingga pendistribusian ke konsumen melalui jaringan distribusi listrik. Energi listrik dihasilkan oleh berbagai jenis pembangkit seperti Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga *Gheothermal* (PLTG)[7].

Secara struktural, sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu:

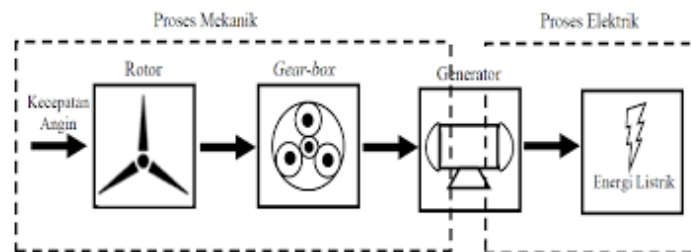
- Pembangkit tenaga listrik
- Penyaluran transmisi tenaga listrik
- Distribusi tenaga listrik



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik (*catatanwsn.wordpress.com*)

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber penghasil energi listrik. Energi angin dan energi terbarukan lainnya diperkirakan akan menjadi sumber energi yang cepat pertumbuhannya. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan salah satu pembangkit energi terbarukan yang ramah lingkungan dan memiliki efisiensi kerja yang baik jika dibandingkan dengan pembangkit listrik terbarukan lainnya. Pada gambar 2.2 PLTB memiliki prinsip kerja dengan mengubah energi kinetik angin yang bergerak melalui area turbin menjadi energi mekanik. Energi ini memutar baling – baling atau kincir turbin, yang kemudian diteruskan ke generator untuk menghasilkan listrik. Untuk mencapai daya yang optimal, beberapa faktor penting perlu diperhatikan, salah satunya adalah kecepatan angin, yang idealnya berada dalam rentang 2 sampai 17 m/s dengan aliran yang stabil. Apabila angin terlalu lemah, akan memungkinkan turbin tidak berputar atau menghasilkan daya yang sangat rendah. Sebaliknya, apabila angin terlalu kuat dapat menimbulkan risiko kerusakan pada turbin[8].



Gambar 2.2 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

(dspace.uui.ac.id)

Pembangkit listrik tenaga angin, atau yang diberi nama *Wind Power System* memanfaatkan angin melalui kincir, untuk menghasilkan energi listrik. Alat ini sangat cocok sekali untuk digunakan oleh masyarakat yang tinggal di pulau – pulau kecil.[9]

Besar kecilnya nilai daya yang dihasilkan oleh turbin angin sangat bergantung pada energi kinetik yang diperoleh. Energi kinetik ini, yang menjadi komponen utama dalam proses konversi energi angin menjadi energi listrik, dijelaskan melalui persamaan berikut:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Keterangan:

E_k = Energi kinetik (Joule);

m = massa benda (kg);

v = kecepatan (m/s).

Dari persamaan (2.1) dapat diketahui bahwa energi kinetik yang dihasilkan, bergantung pada massa udara yang bergerak dan kecepatan angin yang diukur dalam meter per detik. Karena massa udara tidak secara langsung, maka dari itu untuk menentukan nilai massa dapat dijelaskan pada persamaan berikut.

$$m = \rho Av \quad (2.2)$$

Keterangan:

m = massa (kg);

ρ = kerapatan udara (kg/m^3);

A = luas area penangkapan angin (m^2);

v = kecepatan angin (m/s).

Daya angin total yang melewati turbin adalah:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad A = \pi r^2 \quad (2.3)$$

Keterangan:

P = daya angin (watt);

ρ = kerapatan udara (kg/m^3);

A = luas area penangkapan angin (m^2);

v = kecepatan angin (m/s);

r = jari – jari bilah (m).

Dari persamaan (2.3) dapat diketahui bahwa daya yang dihasilkan oleh angin dipengaruhi kecepatan dan area penangkapan angin. Namun daya tersebut tidak dapat diserap secara penuh oleh turbin angin. Pembangkitan daya oleh turbin angin tergantung pada faktor koefisien turbin yang dipengaruhi oleh desain turbin.

Sehingga daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin mengikuti persamaan berikut:

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v^3 \quad (2.4)$$

Keterangan:

- P_m = keluaran daya mekanik turbin angin (watt);
- C_p = koefisien performansi turbin angin/ koefisien bilah rotor;
- λ = tip speed ratio;
- β = sudut angguk blade/bilah rotor;
- ρ = kerapatan udara (kg/m^3);
- A = daerah sapuan turbin (m^2);
- v = kecepatan angin (m/s).

Menurut Betz, nilai teoritis maksimum C_p adalah $16/27$ atau 0.593 . Untuk generasi baru turbin angin daya tinggi, nilai C_p berkisar antara 0.32 dan 0.52 .

Tip speed ratio pada turbin angin ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{\Omega_r r_r}{v} \quad (2.5)$$

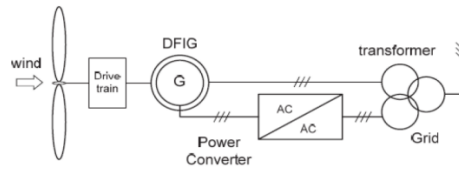
Keterangan :

- λ = *tip speed ratio* turbin angin;
- Ω_r = kecepatan rotor;
- r_r = jari – jari *rotor plane*;
- v = kecepatan angin.

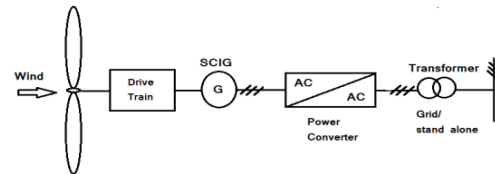
2.3.1 Jenis – Jenis PLTB

Berdasarkan kecepatan rotasinya, PLTB dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu kecepatan tetap (*fixed speed*) dan kecepatan variabel (*variabel speed*). Pada sistem dengan kecepatan tetap, kecepatan sudut rotor generator disesuaikan secara konstan dengan frekuensi sistem kelistrikan. Sementara itu, pada sistem kecepatan variabel, kecepatan sudut rotor generator berubah – ubah. Karena kecepatan rotor tidak selalu sesuai dengan frekuensi jaringan, maka PLTB dengan kecepatan variabel dihubungkan ke jaringan melalui perangkat elektronika daya.

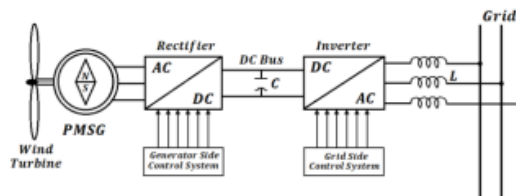
Adapun jenis – jenis *variable speed wind turbine* (VSWT) dengan pemasangan generator yang tipenya berbeda. VSWT terbagi menjadi tiga tipe antara lain : VSWT-*Doubly Fed Induction Generator*, VSWT- *Permanent Magnet Synchronous Generator*, dan VSWT- *Squirell Cage Induction Generator*.



(a) VSWT-DFIG



(b) VSWT-SCIG



(c) VSWT- PMSG

Gambar 2.3 Skema VSWT dipasang DFIG, SCIG, dan PMSG

(Radhey Shyam 2017, Alper Ulutas 2019)

Keuntungan dari pembangkit dengan kecepatan variabel adalah kemampuannya untuk mengoptimalkan daya maksimum pada berbagai tingkat kecepatan angin, sehingga daya yang dihasilkan menjadi lebih efisien. Namun, kelemahan dari PLTB jenis ini adalah adanya biaya tambahan akibat pemasangan konverter serta peningkatan kompleksitas pada sistem daya (*power control*), torsi (*torque control*), kecepatan (*speed control*), dan pengaturan sudut baling – baling (*pitch control*).

2.4 Mesin Induksi

Mesin induksi bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik dan umumnya terdiri dari dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Rotor adalah bagian yang dapat berputar, sementara stator adalah bagian yang diam, tempat daya listrik bekerja. Sedangkan daya mekanik bekerja pada bagian rotor. Pada mesin induksi dengan rotor belit, rotor dapat dihubungkan dengan komponen tambahan atau penguat arus

dari luar. Sedangkan, mesin dengan rotor sangkar menggunakan batang – batang konduktor yang terhubung singkat di kedua ujungnya[10].

Prinsip kerja mesin induksi ini menggunakan prinsip elektromagnetik, dimana kumparan stator diberi tegangan bolak balik maka kumparan stator akan mengalir arus listrik. Arus listrik tersebut menimbulkan medan magnet seolah – olah berputar. Besarnya kecepatan medan putar (kecepatan sinkron) sebesar:

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.6)$$

Keterangan :

n_s = kecepatan putar stator / kecepatan sinkron (rpm);

F = frekuensi sumber (Hz);

P = jumlah pole / kutub.

Medan magnet yang berputar ini kemudian akan menimbulkan fluks pada bidang rotor yang besarnya berubah – ubah setiap waktunya ($d\phi/dt$) akibat dari perubahan besarnya medan magnet dari kumparan stator. Dengan adanya perubahan fluks pada kumparan rotor setiap waktunya, maka akan menimbulkan GGL induksi pada rangkaian rotor. Karena rangkaian rotor merupakan rangkaian tertutup, maka akan timbul arus listrik bolak – balik (AC) pada kumparan rotor. Arus listrik hasil induksi tegangan pada kumparan rotor ini menyebabkan timbulnya gaya Lorentz pada rotor akibat interaksi arus pada kumparan rotor dengan medan magnet putar dari kumparan stator. Dengan adanya gaya Lorentz membuat mesin ini mampu menghasilkan torsi yang berfungsi untuk memutar rotor pada kecepatan tertentu (n_r). pada kondisi ini, akan terjadi selisih antara kecepatan medan putar stator (n_s) dan kecepatan putar rotor (n_r). jika kecepatan putar rotor pada mesin induksi lebih tinggi dibandingkan kecepatan medan putar stator, slip akan bernilai negatif, dan mesin induksi tersebut berfungsi sebagai generator induksi. Generator induksi mampu menghasilkan tegangan meskipun kecepatan putarnya berubah – ubah. Selisih antara kecepatan medan putar dan kecepatan rotor inilah yang disebut slip. Pada kurva karakteristik motor induksi, mesin akan berperan sebagai motor ketika slip positif, dan berperan sebagai generator ketika slip negatif[11].

$$s = \frac{(n_s - n_r)}{n_r} \quad (2.7)$$

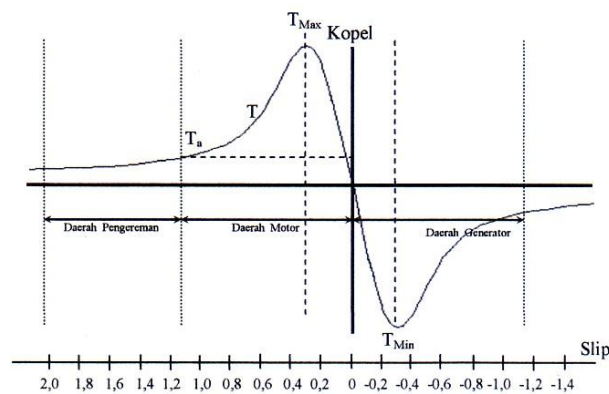
Keterangan :

s = slip;

n_r = kecepatan putar rotor (rpm);

n_s = kecepatan putar stator (rpm).

Persamaan (2.7) menunjukkan hubungan antara n_r dan n_s . Ketika kecepatan rotor lebih besar dari kecepatan stator maka slip akan bernilai negatif. Gambar dibawah ini menunjukkan kurva karakteristik torsi mesin induksi.

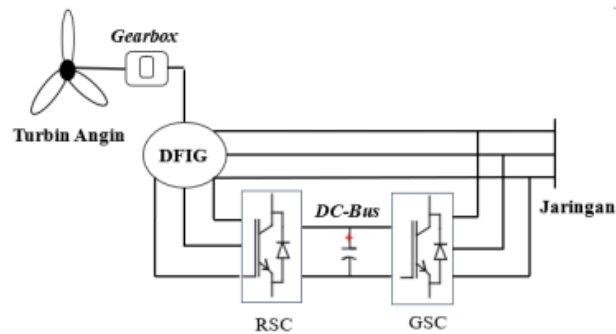


Gambar 2.4 kurva karakteristik torsi mesin induksi

(Blogger.com)

2.5 Doubly Fed Induction Generator (DFIG)

Doubly Fed Induction Generator (DFIG) adalah salah satu jenis generator yang digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Generator ini memiliki rotor yang dihubungkan ke jaringan melalui konverter AC/DC/AC *back-to-back*, sedangkan statornya terhubung langsung ke jaringan. DFIG menawarkan beberapa keunggulan, termasuk peningkatan kualitas daya, kontrol atas daya aktif dan reaktif, efisiensi tinggi menghasilkan energi, serta peningkatan performa dinamis pada PLTB[12].



Gambar 2.5 Turbin angin berbasis DFIG

(Doane Putri Mustika, 2022)

Berbeda dari generator induksi konvensional seperti *Single Fed Induction Generator*, DFIG merupakan generator kecepatan variabel yang membuat output daya listriknya tidak bergantung pada kecepatan rotasi. Hal ini dapat memungkinkan generator untuk mengikuti kecepatan angin yang bervariasi, sehingga operasi turbin angin dapat dioptimalkan secara aerodinamik pada rentang kecepatan tertentu.

DFIG banyak diterapkan pada sistem pembangkitan dengan turbin angin berkecepatan variabel. Hal ini penting karena kecepatan putaran turbin angin tidak dapat dikendalikan secara langsung, yang berisiko menyebabkan kehilangan daya dan menurunkan efisiensi pembangkitan. Dengan DFIG proses pembangkitan pada turbin angin menjadi lebih efisien, terutama dibandingkan dengan turbin berkecepatan tetap. Setiap desain generator bertujuan menghasilkan *output* yang sesuai dengan perencanaan. Namun, seperti dalam semua proses mekanis dan listrik, efisiensi generator juga dipengaruhi oleh kerugian tertentu. Efisiensi generator dihitung sebagai rasio antara daya yang dihasilkan (daya keluaran) dengan daya masukan yang diperoleh dari turbin angin. Daya keluaran generator ini dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P_{out} = V \times I \quad (2.8)$$

Keterangan :

p_{out} = daya keluaran generator (watt);

V = tegangan (volt);

I = arus (ampere).

Semakin tinggi nilai efisiensi generator maka generator tersebut semakin mendekati nilai keluaran yang direncanakan. Perhitungan efisiensi generator dapat ditulis persamaan berikut.

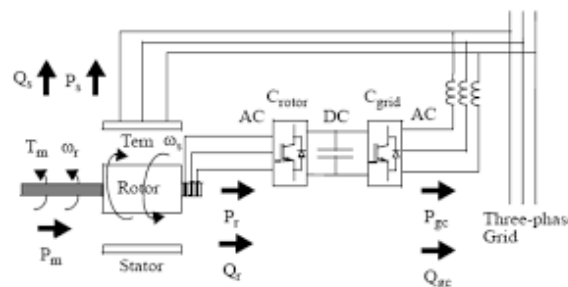
$$\text{Efisiensi generator } (\eta_G) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad (2.9)$$

Keterangan :

P_{out} = daya keluaran generator (watt);

P_{in} = daya keluaran generator (watt).

Pada konsep DFIG, generator induksi dihubungkan dengan jala – jala terminal stator, sedangkan rotor generator dihubungkan pada konverter AC/DC/AC. Skematik dan aliran daya pada DFIG ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.6 Skematik dan aliran daya pada DFIG

(Abdul Natsir, 2016)

Keterangan:

P_m = daya mekanik yang ditangkap oleh *wind turbine* yang kemudian disalurkan menuju rotor;

P_s = output daya listrik stator;

P_r = output daya listrik rotor;

P_{gc} = output daya listrik Cgrid;

Q_s = output daya reaktif stator;

Q_r = output daya reaktif rotor;

Q_{qc} = output daya reaktif Cgrid;

T_m = torsi mekanik yang disalurkan ke rotor;

T_{em} = torsi elektromekanik yang disalurkan pada rotor oleh generator;

ω_s = kecepatan sinkron, atau kecepatan putaran fluks magnetik pada sela udara generator. Kecepatan ini sebanding dengan frekuensi tegangan jala jala dan jumlah kutub generator;

J = kombinasi koefisien inersia rotor dan *wind turbine*.

Output daya mekanik dan daya listrik stator dapat diperoleh dengan persamaan berikut :

$$P_m = T_m \omega_r \quad (2.10)$$

$$P_s = T_{em} \omega_s \quad (2.11)$$

Persamaan mekanik pada generator tanpa rugi – rugi :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_{em} - T_m \quad (2.12)$$

Pada saat *steady state*, kecepatan rotor adalah tetap.

$$T_m = T_{em} \quad (2.13)$$

$$P_m = P_s + P_r \quad (2.14)$$

$$P_r = P_m - P_s \quad (2.15)$$

Dengan memasukkan persamaan (2.10) dan (2.11) pada persamaan (2.15) maka akan diperoleh :

$$P_r = T_m \omega_r - T_{em} \omega_s \quad (2.16)$$

$$P_r = -T_m (\omega_s - \omega_r) \quad (2.17)$$

$$P_r = -T_m \left(\frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \right) \omega_s \quad (2.18)$$

$$P_r = -s T_m \omega_s \quad (2.19)$$

$$P_r = -sP_s \quad (2.20)$$

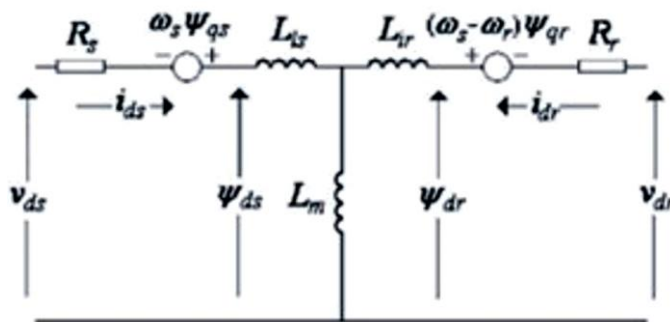
Dengan persamaan slip generator sebagai berikut:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.21)$$

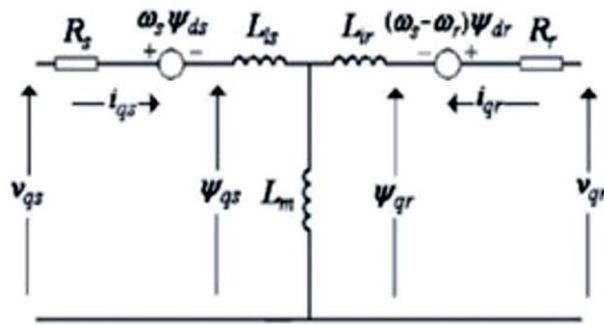
Secara umum, slip pada generator berkisar antara 0 sampai 1. Oleh karena itu, nilai P_r merupakan bagian dari P_s . Ketika T_m bernilai positif saat proses pembangkitan daya dan ω_s memiliki nilai positif serta tetap pada frekuensi konstan, P_r akan bergantung pada slip. Nilai P_r menjadi positif ketika kecepatan putaran rotor lebih tinggi dari kecepatan sinkron (slip negatif), sementara P_r akan bernilai negatif apabila kecepatan putaran rotor lebih rendah dari kecepatan sinkron (slip positif).

2.6 Pemodelan *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG)

Pemodelan generator induksi dibagi menjadi dua bagian yaitu pemodelan elektrik dan pemodelan mekanik. Dalam pemodelan elektrik pada DFIG terbagi menjadi dua bagian yaitu model kerangka acuan dq dan model kerangka acuan $\alpha\beta$ (xy). Dimana d merupakan *orthogonal direct* dan q merupakan komponen *quadrature*. Pada sistem koordinat d-q hubungan rotor, arus magnetisasi hanya berada pada sumbu-d dan tegangan stator berada pada sumbu-q[13].



Gambar 2.7 Rangkaian Ekuivalen DFIG dalam sumbu-d (Farez M'zoughi, 2017)



Gambar 2.8 Rangkaian Ekvivalen DFIG dalam sumbu-q (*Farez M'zoughi, 2017*)

Persamaan matematik model elektrik DFIG berdasarkan kerangka acuan sumbu d dan q dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

Persamaan tegangan stator untuk masing – masing komponen d dan q yaitu:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e \Psi_{qs} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} \quad (2.22)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_e \Psi_{ds} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} \quad (2.23)$$

Persamaan tegangan rotor untuk masing – masing komponen d dan q yaitu:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \Psi_{qr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} \quad (2.24)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \Psi_{dr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} \quad (2.25)$$

Persamaan fluks *Doubly Fed Induction Generator* dalam sumbu dq yaitu:

$$\Psi_{s,dq} = L_s i_{s,dq} + L_m i_{r,dq} \quad (2.26)$$

$$L_s = L_m + L_{is} \quad (2.27)$$

$$\Psi_{r,dq} = L_r i_{r,dq} + L_m i_{s,dq} \quad (2.28)$$

$$L_r = L_m + L_{ir} \quad (2.29)$$

Persamaan fluks stator dan rotor diatas dapat dinyatakan dalam komponen d dan q yaitu:

$$\Psi_{ds} = L_{is} i_{ds} + L_m i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.30)$$

$$\Psi_{qs} = L_{is} i_{qs} + L_m i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.31)$$

$$\Psi_{dr} = L_{ir}i_{dr} + L_m i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.32)$$

$$\Psi_{qs} = L_{ir}i_{qr} + L_m i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.30)$$

Daya yang dihasilkan oleh *Doubly Fed Induction Generator* meliputi daya aktif dan daya reaktif, yang dihasilkan pada bagian stator maupun rotor. Jika rugi – rugi daya akibat resistansi dan induktansi stator diabaikan, maka persamaan daya aktif dan daya reaktif yang dihasilkan oleh kutub stator dalam sumbu dq dapat ditentukan sebagai berikut:

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{ds}i_{ds} + V_{qs}i_{qs}) \quad (2.31)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs}i_{ds} + V_{ds}i_{qs}) \quad (2.32)$$

Sehingga, daya aktif dan reaktif yang dibangkitkan dalam sumbu dq yaitu:

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{dr}i_{dr} + V_{qr}i_{qr}) \quad (2.33)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{qr}i_{dr} + V_{dr}i_{qr}) \quad (2.34)$$

Persamaan daya total yang dibangkitkan *Doubly Fed Induction Generator* yaitu:

$$P_{dfig} = P_s + P_r \quad (2.35)$$

$$Q = Q_s + Q_r \quad (2.36)$$

Torsi elektromagnetis pada DFIG dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$T_e = \frac{3}{2} p L_m (i_{qs}i_{ds} - i_{qs}i_{qr}) \quad (2.37)$$

Model per unit DFIG dalam kerangka $\alpha\beta$ (xy), terkoneksi dengan *grid* (jala-jala), dijelaskan dalam persamaan diferensial variabel *state*-nya (komponen fluks stator dan arus rotor mengacu pada sisi rotor) yaitu[14]

$$\frac{d\phi_{sx}}{dt} = a_{11}\phi_{sx} + a_{12}u_{sx}i_{rx} \quad (2.38)$$

$$\frac{d\phi_{sy}}{dt} = a_{11}\phi_{sy} + a_{12}u_{sy}i_{ry} \quad (2.39)$$

$$\frac{di_{rxR}}{dt} = a_{21}i_{rxR} + a_{22}\phi_{sxR} - a_{23}\omega_r\phi_{syR} + b_{21}u_{rx} - b_{22}u_{sxR} \quad (2.40)$$

$$\frac{di_{ryR}}{dt} = a_{21}i_{ryR} + a_{22}\phi_{syR} - a_{23}\omega_r\phi_{sxR} + b_{21}u_{ry} - b_{22}u_{syR} \quad (2.41)$$

$$\frac{d\gamma_{fir}}{dt} = \omega_r \quad (2.42)$$

$$\frac{d\gamma_{ksi}}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (2.43)$$

Dimana konstanta a dan b didefinisikan sebagai berikut

$$a_{11} = -\frac{R_s}{L_s}, \quad a_{12} = \frac{R_s L_m}{L_s} \quad (2.44)$$

$$a_{21} = -\frac{(L_s^2 R_s + L_m^2 R_s)}{L_s(L_s L_r - L_m^2)}, \quad a_{22} = -\frac{L_m R_s}{L_s(L_s L_r - L_m^2)}, \quad a_{23} = -\frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \quad (2.45)$$

$$b_{21} = -\frac{L_s}{L_s L_r - L_m^2}, \quad b_{22} = -\frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \quad (2.46)$$

Tabel 2.1 menunjukkan keterangan parameter generator induksi pada DFIG

Tabel 2.1 keterangan parameter generator induksi pada DFIG

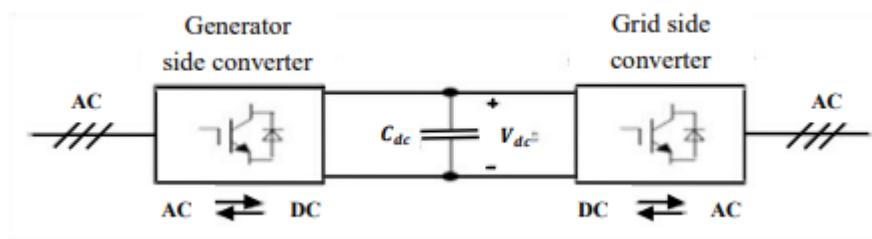
Parameter	Keterangan	Parameter	Keterangan
V_{ds}	Tegangan stator sumbu d	i_{ds}	Arus stator sumbu d
V_{dr}	Tegangan rotor sumbu d	i_{dr}	Arus rotor sumbu d
V_{qs}	Tegangan stator sumbu q	i_{qs}	Arus stator sumbu q
V_{qr}	Tegangan rotor sumbu q	i_{qr}	Arus stator sumbu q
R_s	Resistansi stator	R_r	Resistansi rotor
L_s	Induktansi stator	L_r	Induktansi rotor
V_s	Tegangan stator	i_s	Arus stator
V_r	Tegangan rotor	i_r	Arus rotor
Ψ_{qs}	Fluksi sumbu q stator	Ψ_{ds}	Fluksi sumbu d stator
Ψ_{qr}	Fluksi sumbu q rotor	Ψ_{dr}	Fluksi sumbu d rotor
L_{is}	Induktansi kebocoran stator	L_{ir}	Induktansi kebocoran rotor
L_m	Induktansi magnetisasi	P	Jumlah kutub
ω_m	Kecepatan putar mesin	ω_r	Kecepatan sudut rotor
θ_m	Posisi sudut rotor	H	Konstanta inersia beban dan rotor
J	Koefisien inersia beban dan rotor	F	Koefisien gesek beban dan rotor
T_e	Torsi elektromagnetik	T_m	Torsi mekanik poros
γ_{fir}	Sudut antara fluksi stator dan kecepatan rotor (dalam Matlab Simulink)	γ_{ksi}	Posisi sudut rotor (dalam Matlab Simulink)
P_s	Daya aktif stator	P_r	Daya aktif rotor
Q_s	Daya reaktif stator	Q_r	Daya reaktif rotor

2.7 Konverter AC/DC/AC

Konverter AC/DC/AC, yang dikenal sebagai *converter back-to-back* dalam sistem DFIG, terdiri dari dua bagian utama yaitu konverter sisi jaringan (*grid-side converter*) dan konverter sisi rotor (*rotor-side converter*). Masing – masing konverter ini adalah konverter tiga fasa yang menggunakan enam saklar semikonduktor berupa MOSFET. Keduanya dipisahkan oleh kapasitor DC yang berfungsi sebagai penyimpan energi sekaligus sumber tegangan[15].

Konverter sisi jaringan terhubung ke jaringan listrik atau *grid* memiliki fungsi utama yaitu menjaga agar tegangan DC tetap stabil serta mendukung suplai daya ke *grid*. Sebaliknya, konverter sisi rotor terhubung ke rotor generator induksi dan berfungsi untuk mengatur putaran rotor agar turbin angin dapat menghasilkan daya secara optimal. Masing – masing konverter ini dilengkapi dengan rangkaian kontrol yang terpisah guna memastikan fungsinya berjalan dengan baik[16].

Rangkaian kontrol pada konverter sisi jaringan bertugas untuk mengatur kinerja konverter agar tegangan pada kapasitor DC tetap terjaga. Sementara itu, rangkaian kontrol konverter sisi rotor bertujuan mengoptimalkan kinerja konverter agar dapat memaksimalkan daya yang dihasilkan.



Gambar 2.9 Konverter daya jenis *back to back converter* (Nurul Arifah, 2021)

Persamaan daya pada kapasitor DC link dapat dinyatakan pada persamaan berikut:

$$\frac{dW_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} C \frac{d}{dt} V_{dc}^2 = P_{gc} - P_{rc} \quad (2.47)$$

Maka tegangan yang dihasilkan pada kapasitor DC *link* dapat dinyatakan pada persamaan:

$$V_{dc} = \frac{1}{2} \int I_{dc} dt \quad (2.48)$$

Keterangan:

C = kapasitas kapasitor

P_{gc} = daya pada konverter jaringan

P_{rc} = daya pada konverter rotor

2.8 Kestabilan Sistem Tenaga

Stabilitas sistem tenaga listrik dapat diartikan sebagai sifat dari sistem tenaga yang memungkinkan sistem tersebut tetap berada dalam kondisi seimbang meskipun dalam keadaan operasi yang tidak normal, serta mampu kembali ke kondisi yang seimbang setelah terjadi gangguan. Sebuah sistem tenaga listrik yang optimal harus memenuhi beberapa kriteria[17], yaitu:

1. *Reability* adalah kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus.
2. *Quality* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran – besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. *Stability* adalah kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

Sistem tenaga listrik dapat mengalami ketidakstabilan tegangan akibat gangguan, peningkatan beban, atau perubahan kondisi sistem yang disebabkan oleh penurunan tegangan. Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan aspek yang sangat krusial dalam memastikan pasokan daya yang andal kepada konsumen. Salah satu masalah kestabilan yang sering terjadi adalah gangguan arus hubung singkat, yang dapat menyebabkan sistem berada pada kondisi *voltage collapse*, yang berpotensi mengarah pada *blackout*. Oleh karena itu, setiap sistem tenaga listrik diharapkan mampu mempertahankan kestabilan tegangan untuk menjaga keberlangsungan pasokan listrik secara terus – menerus dengan kualitas daya yang baik.

Berdasarkan sifat dan besarnya gangguan, analisis kestabilan digolongkan menjadi tiga jenis yaitu, kestabilan keadaan dinamis, kestabilan tetap, kestabilan transien.

1. Kestabilan keadaan dinamis merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil setelah menerima gangguan besar dan waktunya lebih lama. Hal ini mengakibatkan terjadinya perubahan dalam sistem yang lebih kompleks, karena memasukkan komponen kendali otomatis dalam perhitungannya.
2. Kestabilan tetap merupakan kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk tetap menjadi sinkronisasi di antara mesin dalam sistem dan saluran eksternal apabila terjadi perubahan beban baik secara normal ataupun lambat dan mengalami gangguan kecil. *Stabilitas steady state* bergantung kepada komponen transmisi, kapasitas pembangkitan, beban, dan efektivitas perangkat kendali.
3. Kestabilan transien merupakan kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk kembali setelah mengalami gangguan yang besar secara tiba – tiba. Gangguan ini dapat berupa hilangnya beban yang besar secara tiba – tiba. Setelah mengalami gangguan generator akan kembali pada keadaan transien lalu berangsur – angsur pulih ke dalam keadaan serempak dalam kesetimbangan yang baru, apabila sistem menerima gangguan di luar batas kemampuannya akan terjadi kehilangan kestabilannya

2.8.1 Kestabilan Tegangan

Stabilitas tegangan adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada seluruh bus dalam sistem agar tetap berada dalam batas toleransi tegangan, baik pada saat kondisi normal maupun setelah terkena gangguan. Stabilitas tegangan memiliki dua klasifikasi berdasarkan gangguan:

1. Stabilitas tegangan pada gangguan besar adalah kemampuan sistem untuk mengatur tegangan setelah terjadi gangguan besar, seperti kegagalan sistem, hilangnya pembangkitan, atau kegagalan sirkuit. Suatu kondisi dikatakan stabil jika tegangan di setiap *busbar* dapat kembali mencapai nilai *steady state* yang diizinkan setelah gangguan tersebut.

2. Stabilitas tegangan pada gangguan kecil adalah kemampuan sistem untuk mengatur tegangan setelah terjadinya gangguan minor, seperti penambahan beban pada sistem. Suatu kondisi dikatakan stabil jika tegangan di setiap *busbar* dalam sistem tetap meningkat seiring dengan bertambahnya daya reaktif yang disuplai selama operasi.

2.8.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga secara luas didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk tetap berada dalam kondisi seimbang dalam operasi normal dan dapat memperoleh kembali kondisi seimbang setelah sistem mengalami gangguan. Berdasarkan *paper* IEEE *definition and classification of power system stability*, kestabilan sistem tenaga dibagi menjadi tiga kategori yaitu [18] :

1. Kestabilan sudut rotor

Kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang saling terkoneksi pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron. Kemampuan sistem untuk menjaga stabilitas bergantung pada kemampuannya mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik dari setiap mesin sinkron dalam jaringan. Jika terjadi ketidakstabilan, sudut rotor pada generator dapat berubah secara bervariasi dibandingkan dengan generator lainnya dan akan menyebabkan ayunan sudut rotor meningkat. Akibatnya, generator bisa kehilangan sinkronisasi dengan generator lain di sistem.

2. Kestabilan frekuensi

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan dari sistem suatu untuk mempertahankan kestabilan frekuensi akibat gangguan pada sistem yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban. Ketidakstabilan yang terjadi berupa perubahan frekuensi yang secara terus – menerus mengakibatkan pembangkit dan atau beban mengalami trip.

3. Kestabilan tegangan

Kestabilan tegangan dapat diartikan sebagai kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan nilai tegangannya di semua bus pada sistem dalam kondisi operasi normal maupun setelah terjadi gangguan.

2.8.3 Tegangan Jatuh

Tegangan jatuh adalah kondisi ketika tegangan listrik di sistem menurun secara terus-menerus karena adanya gangguan, dan jika dibiarkan bisa menyebabkan pemadaman total (*blackout*). Salah satu penyebabnya adalah ketidakseimbangan antara daya pembangkit dan daya yang digunakan, misalnya pembangkit menghasilkan daya lebih besar dari kebutuhan beban, tetapi gangguan membuat sistem tidak mampu mengatur keseimbangan tersebut. Untuk mencegah tegangan jatuh, penting untuk mengetahui karakteristik dan lokasi beban mana yang perlu diputus agar tegangan bisa kembali stabil.

2.8.4 Standar *Undervoltage*

Undervoltage adalah kondisi ketika tegangan listrik turun hingga di bawah 90% dari nilai normalnya dan berlangsung lebih dari satu menit. Kondisi ini biasanya terjadi karena adanya gangguan, beban listrik yang terlalu besar, atau ketika daya yang digunakan oleh beban melebihi daya yang mampu dihasilkan oleh pembangkit, sehingga menyebabkan tegangan turun.

Tegangan sistem harus dipertahankan dengan batasan sebagai berikut:

Tegangan Nominal Kondisi Normal

- a. 500 kV +5%, -5%
- b. 150 kV +5%, -10%
- c. 70 kV +5%, -10%
- d. 20 kV +5%, -10%

2.8.5 Kestabilan Transien

Kestabilan transien adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap sinkron atau bekerja secara selaras setelah mengalami gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba, biasanya dalam satu siklus ayunan pertama rotor. Ketika sistem kehilangan sinkronisasi, artinya terjadi ketidakseimbangan antara daya yang dihasilkan pembangkit dan daya yang dibutuhkan beban. Hal ini membuat rotor pada mesin sinkron mengalami ayunan karena adanya torsi yang menyebabkan rotor bergerak lebih cepat atau lebih lambat[19].

Respons sistem terhadap gangguan ini dipengaruhi oleh hubungan sudut daya yang bersifat tidak linier, terutama pada sudut rotor generator. Stabil atau tidaknya sistem tergantung pada kondisi awal sistem sebelum gangguan dan seberapa besar gangguan yang terjadi. Setelah gangguan, sistem biasanya akan mencapai kondisi stabil baru yang berbeda dari kondisi sebelum gangguan.

2.9 Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan pada sistem tenaga listrik adalah kondisi tidak normal yang menyebabkan terganggunya penyaluran listrik secara terus-menerus. Berdasarkan sumbernya, gangguan dapat dibedakan menjadi tiga jenis[20]:

1. Gangguan berasal dari dalam sistem

Gangguan dari dalam sistem merupakan gangguan yang disebabkan oleh masalah internal dalam sistem tenaga listrik itu sendiri. Beberapa penyebabnya antara lain kerusakan mekanis akibat proses penuaan atau cacat material, seperti kabel putus, isolator pecah, atau *bearing* retak. Selain itu, pemasangan peralatan yang tidak sesuai standar, kondisi tegangan dan arus yang tidak normal, serta beban yang melebihi kapasitas sistem juga termasuk dalam gangguan ini.

2. Gangguan berasal dari luar sistem

Gangguan dari luar sistem berasal dari faktor eksternal yang memengaruhi sistem kelistrikan. Contohnya adalah cuaca ekstrem seperti hujan lebat, angin kencang, atau sambaran petir yang dapat menyebabkan lonjakan tegangan hingga merusak isolasi peralatan. Selain itu, gangguan juga bisa disebabkan oleh lingkungan sekitar seperti pohon tumbang, benda asing yang jatuh ke jaringan listrik, atau aktivitas manusia yang tidak disengaja di dekat instalasi listrik.

3. Faktor Manusia

Faktor manusia menjadi penyebab gangguan ketika terjadi kesalahan atau kelalaian dalam pengoperasian sistem. Hal ini bisa berupa kesalahan saat menyambung rangkaian listrik, kesalahan dalam proses pengaturan atau kalibrasi alat proteksi, serta tindakan ceroboh lainnya yang dapat menurunkan keandalan sistem tenaga listrik.

Berdasarkan sifat gangguan, maka jenis gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi 2 yaitu:

1. Gangguan sementara (*temporary*)

Merupakan gangguan pada sistem tenaga listrik yang sifatnya tidak permanen dan dapat hilang dengan sendirinya. Gangguan ini biasanya terjadi hanya sesaat, dan dapat diatasi dengan pemutus aliran listrik sementara pada bagian yang terkena gangguan, kemudian sistem dapat kembali normal tanpa perlu perbaikan fisik.

2. Gangguan permanen (*stationary*)

Merupakan gangguan yang bersifat menetap dan tidak dapat hilang meskipun pemutus tenaga sudah bekerja memutus aliran listrik. Untuk mengatasi gangguan jenis ini, diperlukan penanganan langsung berupa perbaikan atau penggantian komponen pada titik yang menjadi sumber gangguan agar sistem dapat kembali beroperasi dengan normal.

2.9.1 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat terjadi ketika satu atau lebih konduktor fasa secara tidak sengaja terhubung dengan fasa lainnya atau dengan tanah. Kondisi ini dapat menimbulkan arus yang sangat besar dalam waktu singkat dan berpotensi merusak peralatan listrik yang berada di sekitar titik gangguan. Besar arus yang muncul saat gangguan hubung singkat sangat bergantung pada nilai impedansi dari peralatan – peralatan listrik yang terlibat dalam sistem. Gangguan ini dibagi menjadi dua jenis utama:

- Gangguan hubung singkat simetri

Jenis gangguan ini terjadi secara merata di ketiga fasa, sehingga arus dan tegangan pada masing – masing fasa tetap dalam kondisi seimbang setelah gangguan. Karena sifatnya seimbang, analisis gangguan ini cukup menggunakan komponen urutan positif saja.

- Gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri)

Gangguan ini terjadi secara tidak merata pada sistem, misalnya pada gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, atau antar dua fasa. Arus pada fasa yang terganggu

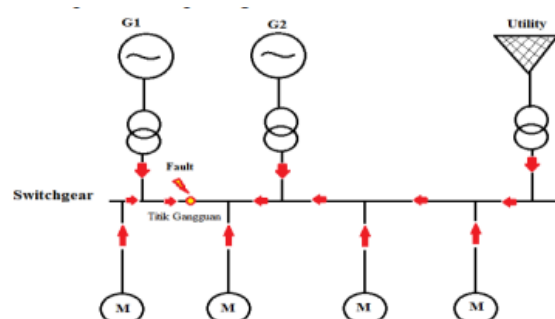
bisa menjadi sangat besar, sementara tegangan pada fasa lain dapat naik secara signifikan. Gangguan jenis ini adalah yang paling sering terjadi dalam sistem tenaga listrik. Untuk menganalisisnya, digunakan metode komponen simetri agar arus dan tegangan diseluruh sistem bisa diketahui secara akurat.

2.9.2 Gangguan Beban Lebih (*Over Load*)

Gangguan beban lebih terjadi ketika jumlah daya listrik yang dibutuhkan oleh beban melebihi kapasitas daya yang disuplai oleh pembangkit. Jika kondisi ini dibiarkan terus – menerus tanpa penanganan, maka arus yang mengalir melebihi batas aman dan dapat merusak peralatan listrik dalam sistem tersebut.

2.10 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Saat terjadi gangguan hubung singkat di suatu titik dalam sistem tenaga, arus yang sangat besar bisa mengalir ke titik tersebut arus ini mengalami tiga tahap kondisi, yaitu; Kondisi Subtransien, terjadi pada setengah siklus pertama setelah gangguan. Pada tahap ini, reaktansi sistem sangat kecil, sehingga arus hubung singkat menjadi sangat besar. Reaktansi pada kondisi ini dilambangkan dengan X''_d ; Kondisi Transien, setelah beberapa siklus, arus mulai menurun ke tingkat yang lebih rendah. Reaktansinya disebut X'_d ; Kondisi *Steady State*, pada kondisi ini arus hubung singkat berada pada tingkat yang stabil dan reaktansinya disebut X_d . Besar kecilnya arus hubung singkat sangat dipengaruhi oleh nilai reaktansi sistem. Selain itu, arus gangguan juga dapat berasal dari beberapa sumber seperti generator, jaringan utilitas, motor sinkron, dan motor induksi.



Gambar 2.10 Arah aliran arus ketika terjadi gangguan Hubung Singkat (Erwin D. Purwandi, ITS, 2017)

Untuk mengantisipasi gangguan hubung singkat diperlukan analisis mendalam agar sistem proteksi yang tepat dapat diterapkan pada sistem tenaga listrik. Analisis hubung singkat ini bertujuan untuk mempelajari semua arus gangguan yang mengalir di setiap bagian sistem kelistrikan, yang dapat berasal dari trafo, pembangkit atau beban motor, ketika terjadi gangguan hubung singkat.

Sistem tenaga listrik memerlukan perangkat pengaman yang mampu mendeteksi dan merespons arus hubung singkat saat terjadi gangguan. Analisis ini penting untuk mengidentifikasi kejadian tak diinginkan yang mungkin muncul dan memastikan pengaman peralatan bekerja secara optimal. Berikut adalah perhitungan untuk menentukan besarnya arus hubung singkat pada sistem:

- Gangguan hubung singkat tiga fasa

Gangguan hubung singkat tiga fasa merupakan jenis gangguan yang menghasilkan arus hubung singkat paling besar (maksimum) dibandingkan dengan jenis gangguan hubung singkat lainnya. Hal ini disebabkan karena ketiga fasa dalam sistem terlibat langsung dalam gangguan tersebut. Adapun rumus atau persamaan untuk menghitung arus hubung singkat pada gangguan tiga fasa disajikan sebagai berikut.

$$I_{hs_{3\phi}} = \frac{V_{LN}}{Z_1} \quad (2.49)$$

Keterangan :

$I_{hs_{3\phi}}$ = Arus hubung singkat tiga fasa (Ampere)

V_{LN} = tegangan *line to netral* (Volt)

Z_1 = impedansi urutan positif (Ohm)

- Gangguan hubung singkat antar fasa

Gangguan hubung singkat antar fasa terjadi ketika dua konduktor fasa saling terhubung secara langsung tanpa melibatkan tanah. Jenis gangguan ini biasanya menghasilkan arus hubung singkat yang lebih kecil dibandingkan dengan jenis gangguan lainnya. Persamaan untuk menghitung arus hubung singkat antar fasa dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Ihs_{2\phi} = \frac{\sqrt{3} \times V_{LN}}{Z_1 + Z_2} \quad (2.50)$$

Keterangan :

$Ihs_{2\phi}$ = Arus hubung singkat antar fasa (Ampere)

V_{LN} = tegangan *line to netral* (Volt)

Z_1 = impedansi urutan positif (Ohm)

Z_2 = impedansi urutan negatif (Ohm)

Dimana masing – masing reaktansi urutan positif dan negatifnya mempunyai nilai yang sama, maka didapatkan:

$$Ihs_{2\phi} = \frac{\sqrt{3} \times V_{LN}}{2Z_1} \approx 0.86 Ihs_{3\phi} \quad (2.51)$$

- Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi ketika salah satu fasa secara tidak sengaja tersambung ke tanah. Pada gangguan ini, impedansi urutan nol (Z_0) berperan penting dalam menentukan besar gangguan. Besarnya arus hubung singkat satu fasa ke tanah ini bisa dikendalikan dengan baik jika sistem pentanahan dirancang dan diterapkan dengan benar. Persamaan untuk menghitung arus hubung singkat satu fasa ke tanah adalah sebagai berikut.

$$Ihs_{1\phi} = \frac{\sqrt{3} \times V_{LN}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.52)$$

Keterangan :

$Ihs_{2\phi}$ = Arus hubung singkat antar fasa (Ampere)

V_{LN} = tegangan *line to netral* (Volt)

X_1 = impedansi urutan positif (Ohm)

X_2 = impedansi urutan negatif (Ohm)

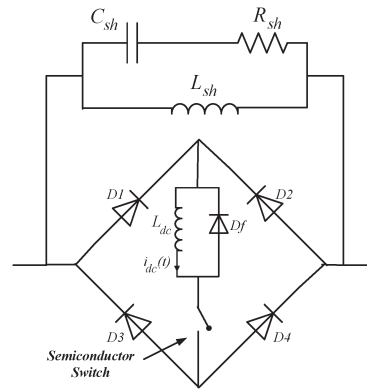
X_0 = impedansi urutan nol (Ohm)

2.11 Fault Current Limiter

Fault Current Limiter merupakan perangkat yang dirancang untuk membatasi arus gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik tanpa harus memutuskan saluran sepenuhnya. FCL memiliki karakteristik yaitu, dalam kondisi normal FCL dirancang untuk memiliki impedansi rendah, sehingga kehilangan daya yang terjadi dapat diabaikan. Selain itu, perangkat ini juga mampu beroperasi sesuai dengan tegangan pada sistem transmisi dan distribusi. Pada saat terjadi gangguan, FCL harus memberikan impedansi tinggi agar arus gangguan dapat dikurangi secara signifikan. Perangkat ini juga memiliki kemampuan menahan kenaikan suhu akibat gangguan serta tetap berfungsi meskipun arus gangguan cukup besar.[21].

2.11.1 Parallel Resonance Fault Current Limiter

Parallel Resonance Fault Current Limiter salah satu tipe FCL yang disusun menggunakan sebuah resistor yang disusun secara seri dengan kapasitor dan disusun secara paralel dengan induktor, sehingga dapat mensimulasikan impedansi beban selama terjadi gangguan. Dengan cara ini, arus gangguan dapat dibatasi hingga mendekati kondisi sebelum gangguan. Dari sudut pandang kualitas daya, dengan menyamakan arus gangguan dan arus saluran sebelum gangguan, tegangan pada *Point of Common Coupling* (PCC) tidak akan mengalami perubahan signifikan selama kondisi gangguan, sehingga kualitas daya akan meningkat. Pada FCL ini tidak menggunakan induktor superkonduktor dalam rangkaian resonansi. Akibatnya, FCL ini lebih sederhana untuk diproduksi dan memiliki biaya yang lebih rendah[4].



Gambar 2.11 Topologi Rangkaian *Parallel Resonance Fault Current Limiter* (B. Naderi, IEEE, 2014)

Rangkaian di atas memiliki struktur terdiri dari dua bagian utama sebagai berikut:

1. Bagian *Bridge*: bagian ini terdiri dari jembatan penyearah yang berisi dioda – dioda D1-D4, reaktor pembatas arus searah (L_{dc}) yang kecil, saklar semikonduktor *self-turnoff* (seperti *gate turnoff thyristor* atau *insulated-gate bipolar transistor*) dan rangkaian *snubber*-nya, serta dioda *freewheeling* (D_f).
2. Bagian *Resonance*: bagian ini terdiri dari rangkaian resonansi LC paralel (L_{sh} dan C_{sh}) (frekuensi resonansinya sama dengan frekuensi sistem daya) dan sebut resistor yang disusun seri dengan kapasitor.

- Operasi Normal

Pada kondisi normal, saklar semikonduktor pada bagian jembatan ON sehingga arus melewati reaktor DC (L_{dc}) yang memiliki hambatan kecil. Bagian resonansi LC di-*bypass* (diputus) oleh rangkaian jembatan, sehingga tidak ada rugi daya signifikan. Pada kondisi ini arus saluran (i_L) ditentukan oleh impedansi sumber, beban, dan distribusi. Persamaan arus pada kondisi ini adalah:

$$V_s \sin(\omega t) = Ri_L + \omega L \frac{di_L}{d(\omega t)} \quad (2.53)$$

Di mana:

- V_s : Amplitudo tegangan sumber
- ω : Frekuensi sudut ($\omega = 2\pi f$)
- R : Resistansi total ($R = R_s + R_L + R_D$)
- L : Induktansi total ($R = L_s + L_L + L_D$)

Persamaan arus saluran dapat diturunkan menjadi :

$$i_L(\omega t) = \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\sin(\omega t - \phi) + \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} e^{-\frac{R}{\omega L} \omega t} \right] \quad (2.54)$$

Di mana:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (2.55)$$

- Saat Gangguan Terjadi

Ketika terjadi gangguan (*fault*), arus DC meningkat hingga melampaui nilai batas yang telah ditentukan (I_0). Saklar semikonduktor mendeteksi kondisi ini dan segera *OFF*, memutuskan jembatan dari sistem. Setelah jembatan terputus, arus gangguan diarahkan ke bagian resonansi LC paralel. Impedansi besar dari rangkaian LC menghambat kenaikan arus gangguan secara signifikan. Resistor yang disusun seri dengan kapasitor membantu meredam osilasi yang timbul akibat resonansi LC, sehingga mencegah kerusakan atau tekanan pada peralatan sistem tenaga. Oleh karena itu di dapatkan persamaan diferensial arus gangguan yaitu:

$$\begin{aligned} & L_s L_{sh} C_{sh} \left(\frac{d^3 i_L}{dt^3} \right) + \\ & (R_s L_{sh} C_{sh} + L_s R_{sh} C_{sh} + R_{sh} L_{sh} C_{sh}) \left(\frac{d^2 i_L}{dt^2} \right) + (R_{sh} L_{sh} C_{sh}) \left(\frac{di_L}{dt} \right) + R_s i_L = (V_s - \\ & L_{sh} C_{sh} \omega^2) \sin(\omega t) + R_{sh} C_{sh} V_s \omega \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (2.56)$$

Dengan nilai awal yang diberikan pada persamaan dibawah ini, dimana I_0 adalah arus saluran yang telah ditentukan sebelumnya untuk operasi saklar semikonduktor.

$$\begin{aligned} i_L(t = t_{sw}) &= I_0. \\ \left(\frac{di_L}{dt} \right) (t = t_{sw}) &= \frac{V_s \sin(\omega t_{sw}) - I_0(R_s + R_{sh})}{L_s} \\ \left(\frac{d^2 i_L}{dt^2} \right) (t = t_{sw}) &= V_s \omega \cos(\omega t_{sw}) + I_0 \left(\frac{R_{sh}^2}{L_{sh}} - \right. \\ & \left. \frac{1}{C_{sh}} \right) - \left(\frac{V_s \sin(\omega t_{sw}) - I_0(R_s + R_{sh})}{L_s} \right) (R_{sh} + R_s) \end{aligned} \quad (2.57)$$

Persamaan (2.56) diselesaikan menggunakan perangkat lunak MATLAB, setelah redaman transien persamaan arus gangguan dapat dinyatakan sebagai:

$$i_L = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (2.58)$$

Dimana:

$$A = \frac{V_s [R_{sh} C_{sh} \omega (d' - b' \omega^2) - (1 - L_{sh} C_{sh} \omega^2) (c' \omega - a' \omega^3)]}{(c' \omega - a' \omega^3)^2 + (d' - b' \omega^2)^2} \quad (2.59)$$

$$B = \frac{V_s [R_{sh} C_{sh} \omega (a' \omega^3 - b') - (1 - L_{sh} C_{sh} \omega^2) (d' - b' \omega^2)]}{(c' \omega - a' \omega^3)^2 + (d' - b' \omega^2)^2} \quad (2.60)$$

$$a' = L_s L_{sh} C_{sh} \quad (2.61)$$

$$b' = R_s L_{sh} C_{sh} + L_s R_{sh} C_{sh} + R_{sh} L_{sh} C_{sh} \quad (2.62)$$

$$c' = L_s + R_{sh} C_{sh} + L_{sh} \quad (2.63)$$

$$d' = R_s \quad (2.64)$$

- Pemulihan Setelah Gangguan

Ketika gangguan hilang, sementara saklar masih dalam kondisi mati (*OFF*), bagian paralel dari FCL akan terhubung seri dengan impedansi beban. Maka akan mengakibatkan arus saluran menurun secara instan. Untuk mendeteksi penurunan arus saluran ini, i_L dibandingkan dengan I_f , yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$I_f = \frac{|\bar{V}_{PCC}|}{|Z_{eq}|} \quad (2.65)$$

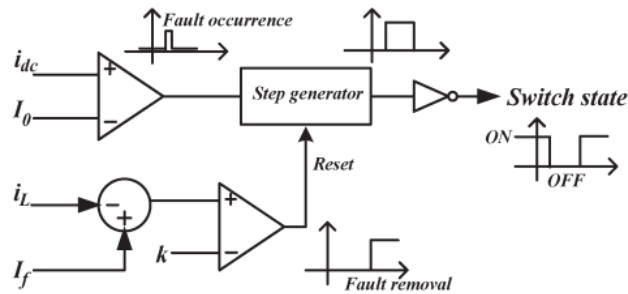
Dimana Z_{eq} adalah impedansi ekivalen dari bagian resonansi. Ketika selisih antara i_L dan I_f menjadi lebih besar dari k sebagai tanda gangguan telah hilang, rangkaian kontrol menghidupkan kembali saklar semikonduktor. Dengan demikian, sistem tenaga kembali ke kondisi normal. Nilai k dapat dihitung dengan:

$$k = \frac{|\bar{V}_{PCC}|}{|\bar{Z}_{eq}|} - \frac{|\bar{V}_{PCC}|}{|\bar{Z}_{eq} + \bar{Z}_{L,min}|} \quad (2.66)$$

Dari sudut pandang rugi daya, pada kondisi normal, PRFCL memiliki rugi daya pada dioda *bridge*, saklar semikonduktor, dan resistansi pada reaktor DC. Setiap dioda *bridge* aktif selama setengah siklus, sedangkan saklar semikonduktor selalu dalam keadaan On. Oleh karena itu, rugi daya PRFCL ini pada operasi normal dapat dihitung sebagai:

$$P_{loss} = P_R + P_D + P_{SW} = R_{dc} I_{dc}^2 + 4V_{DF} I_{ave} + V_{SWF} I_{dc} \quad (2.67)$$

2.11.2 Kontrol *Parallel Resonance Fault Current Limiter*

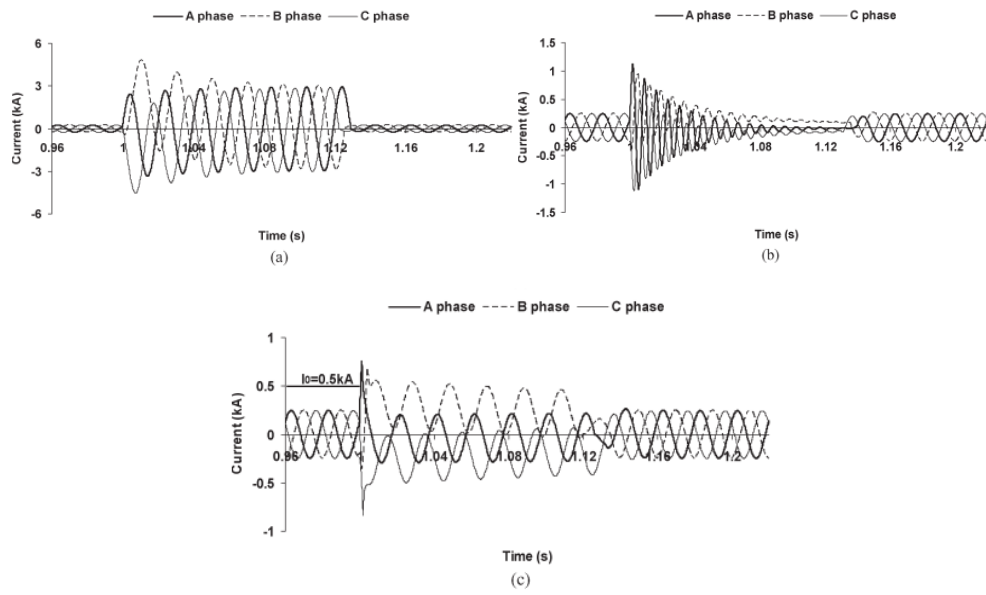


Gambar 2.12 Rangkaian kontrol dari PRFCL (B. Naderi, IEEE, 2014)

Gambar di atas menunjukkan rangkaian kontrol dari PRFCL. Dimana dalam kondisi operasi normal sistem tenaga, saklar semikonduktor dalam keadaan menyala (ON). Oleh karena itu, L_{dc} terisi hingga puncak arus saluran dan berperilaku seperti hubung singkat. Penggunaan perangkat semikonduktor (dioda dan saklar semikonduktor) serta reaktor DC menyebabkan penurunan tegangan pada PRFCL yang dapat diabaikan[22].

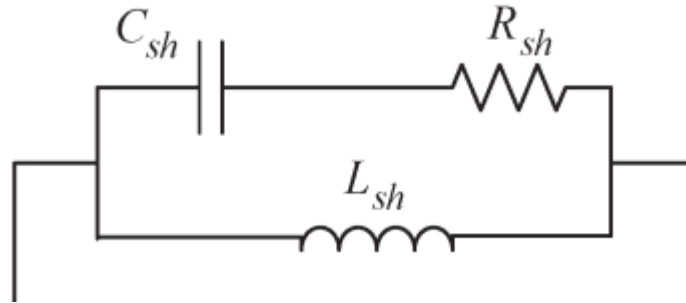
Ketika terjadi gangguan, arus DC menjadi lebih besar dari arus maksimum yang diizinkan (I_0), dan rangkaian kontrol mendeteksinya serta mematikan saklar semikonduktor. Dengan demikian, dioda *bridge* terputus dari jaringan. Pada saat itu, dioda *frewheeling* (D_f) menyala dan menyediakan jalur untuk melepaskan muatan reaktor DC.

Ketika *bridge* terputus, arus gangguan mengalir melalui bagian resonansi paralel dari FCL. Oleh karena itu, impedansi besar masuk ke rangkaian dan mencegah kenaikan arus gangguan. Dalam kondisi gangguan, rangkaian LC paralel mulai beresonansi. Dikarenakan terjadi resonansi, arus saluran mengalami osilasi dengan amplitudo besar. Osilasi ini dapat merusak peralatan sistem. Namun dengan menempatkan resistor (R_{sh}) secara seri dengan kapasitor, transien arus akan teredam dengan cepat, seperti gambar 2.12. Selain itu penggunaan R_{sh} menyebabkan tegangan pada resistor ini menurunkan tegangan pada kapasitor selama gangguan[4].



Gambar 2.13 arus gangguan $i_L(t)$. (a) Tanpa FCL (b) Tanpa R_{sh} di resonance-type FCL (c) Menggunakan PRFCL (*B.Naderi, IEEE, 2014*)

2.11.3 Desain *Parallel Resonance Fault Current Limiter*



Gambar 2.14 Rangkaian Resonansi PRFCL (*B.Naderi, IEEE, 2014*)

Besarnya nilai impedansi pada PRFCL dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$Z_1 = R + X_C \quad (2.68)$$

$$Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.69)$$

$$Z_1 = R - \frac{j}{\omega C} \quad (2.70)$$

$$Z_2 = R + X_L \quad (2.71)$$

$$Z_1 = j\omega L \quad (2.72)$$

Maka Impedansi totalnya:

$$Z_{eq} = Z_1 || Z_2 \quad (2.73)$$

$$Z_{eq} = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.74)$$

$$Z_{eq} = \frac{\left(R - \frac{j}{\omega C}\right)(j\omega L)}{R - \frac{j}{\omega C} + j\omega L} \quad (2.75)$$

$$Z_{eq} = \frac{j\omega LR - \frac{j^2 \omega L}{\omega C}}{R - \frac{j}{\omega C} + j\omega L} \quad (2.76)$$

Karena $j^2 = -1$ maka:

$$Z_{eq} = \frac{j\omega LR + \frac{L}{C}}{R - \frac{j}{\omega C} + j\omega L} \quad (2.77)$$

$$Z_{eq} = \frac{j\omega LR + \frac{L}{C}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (2.78)$$

Kalikan yang atas dan bawah dengan C_{sh} , maka:

$$Z_{eq} = \frac{C\left(j\omega LR + \frac{L}{C}\right)}{CR + j\omega L} \quad (2.79)$$

$$Z_{eq} = \frac{j\omega LCR + L}{CR + j\omega L} \quad (2.80)$$

$$Z_{eq} = \frac{L(1 + jRC)}{CR + j\omega L} \quad (2.81)$$

PRFCL dirancang untuk beresonansi pada frekuensi sistem ($f_r = f_{sistem}$) sehingga didapatkan

$$\omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{L_{sh} C_{sh}}} \quad (2.82)$$

Dari rumus diatas, hubungan antara L_{sh} dan C_{sh} adalah:

$$L_{sh} = \frac{1}{\omega_r^2 C_{sh}} \quad (2.83)$$

Tabel 2.2 menunjukkan keterangan parameter Rangkaian *Parallel-Resonance-Type Fault Current Limiter*

Tabel 2.2 keterangan parameter Rangkaian *Parallel-Resonance-Type Fault Current Limiter*

Parameter	Keterangan	Parameter	Keterangan
L_s	Induktansi sumber tegangan (H)	R_s	Resistansi sumber tegangan (ohm)
L_{sh}	Induktansi PRFCL (H)	R_{sh}	Resistansi PRFCL (ohm)
C_{sh}	Kapasitansi PRFCL (F)	i_L	Arus saluran sistem (A)
V_s	Tegangan sumber (V)	ω	Frekuensi sudut ($\omega = 2\pi f$)
R	Resistansi total (ohm)	L	Induktansi total (H)
R_L	Resistansi <i>Load</i> (ohm)	L_L	Induktansi <i>Load</i> (H)
R_D	Resistansi saluran (ohm)	L_D	Resistansi saluran (ohm)
t	Waktu (second)	ϕ	Sudut fasa
t_{sw}	Waktu saat saklar semikonduktor aktif	I_0	Arus awal pada induktor (A)
V_{PCC}	Tegangan pada Point of Common Coupling (PCC) (V)	Z_{eq}	Total Impedansi (ohm)
k	Tanda gangguan hilang	Z_L	Impedansi saluran
I_f	Arus gangguan (A)	P_{loss}	Rugi-Rugi daya total
P_R	Rugi-rugi pada Reaktor DC	P_D	Rugi-rugi pada dioda
R_{dc}	Resistansi Reaktor DC	V_{DF}	Tegangan pada Dioda <i>Freewheeling</i>
I_{dc}	Arus reaktor DC (A)	I_{ave}	Rata rata arus mengalir pada PRFCL (A)
P_{SW}	Rugi-rugi daya pada saklar semikonduktor	ω_{sh}	Frekuensi sudut pada bagian resonansi
V_{SWF}	Tegangan saklar semikonduktor	f_r	Frekuensi resonansi
ω_r	Frekuensi sudut resonansi		

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan di laboratorium Konversi Energi Elektrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penelitian ini dilakukan dari bulan Oktober 2024 dan direncanakan selesai pada bulan Mei 2025 seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 3.1 Waktu Penelitian

No	Kegiatan	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni
1	Studi Literatur									
2	Seminar Proposal									
3	Pengolahan Data & Simulasi									
4	Analisis									
5	Penulisan Laporan									
6	Seminar Hasil									
7	Komprehensif									

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Satu unit laptop ACER Aspire 3 dengan spesifikasi Intel Celeron Windows 10 *Home* 64-bit untuk melakukan penelitian ini.
2. Perangkat lunak MATLAB R2021a untuk simulasi *Wind Turbine* DFIG, PRFCL, dan matematis pada penelitian ini.

3.3 Prosedur Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini ada beberapa tahap atau prosedur yang akan dilakukan antara lain:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari serta mengkaji literatur yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini, yaitu mengenai penggunaan *Parallel Resonance Fault Current Limiter* dalam menjaga sistem tenaga listrik dan perannya dalam meningkatkan stabilitas transien. Menganalisis prinsip kerja *Doubly Fed Induction Generator* dalam turbin angin dan mengetahui tantangan yang dihadapi dalam menjaga stabilitas sistem. Serta mengetahui cara memodelkan komponen – komponen ke dalam perangkat lunak *power system*. Literatur tersebut diambil dari berbagai sumber, seperti buku, jurnal ilmiah, artikel dan laporan – laporan penelitian terdahulu.

2. Studi Bimbingan

Pada tahap ini penulis melakukan bimbingan dengan dosen pembimbing yang bertujuan sebagai menambah wawasan dan mengetahui mengenai permasalahan – permasalahan apa saja yang dihadapi selama proses pengerjaan pada penelitian ini.

3. Pengumpulan Data dan Pengolahan Data

Pada tahap ini, penulis mengumpulkan data – data yang dibutuhkan penelitian yang akan digunakan untuk menganalisis menggunakan perangkat lunak. Adapun data – data yang dibutuhkan untuk penelitian ini meliputi:

- a. Data parameter turbin angin berbasis DFIG, seperti daya turbin angin, karakteristik rotor dan stator DFIG, kecepatan putar rotor dan kecepatan angin rata – rata, serta koefisien daya dan efisiensi konversi energi.
- b. Spesifikasi dan parameter PRFCL, seperti karakteristik material superkonduktor yang digunakan (jenis material, suhu operasi, dll), parameter listrik FCL (impedansi, daya tahan arus, waktu respons), serta konfigurasi SFCL dalam sistem.

- c. Data jaringan listrik sistem, seperti tegangan operasi sistem, topologi jaringan, lokasi titik pemasangan FCL dalam sistem.
- d. Data gangguan listrik, seperti jenis – jenis gangguan yang akan disimulasikan.

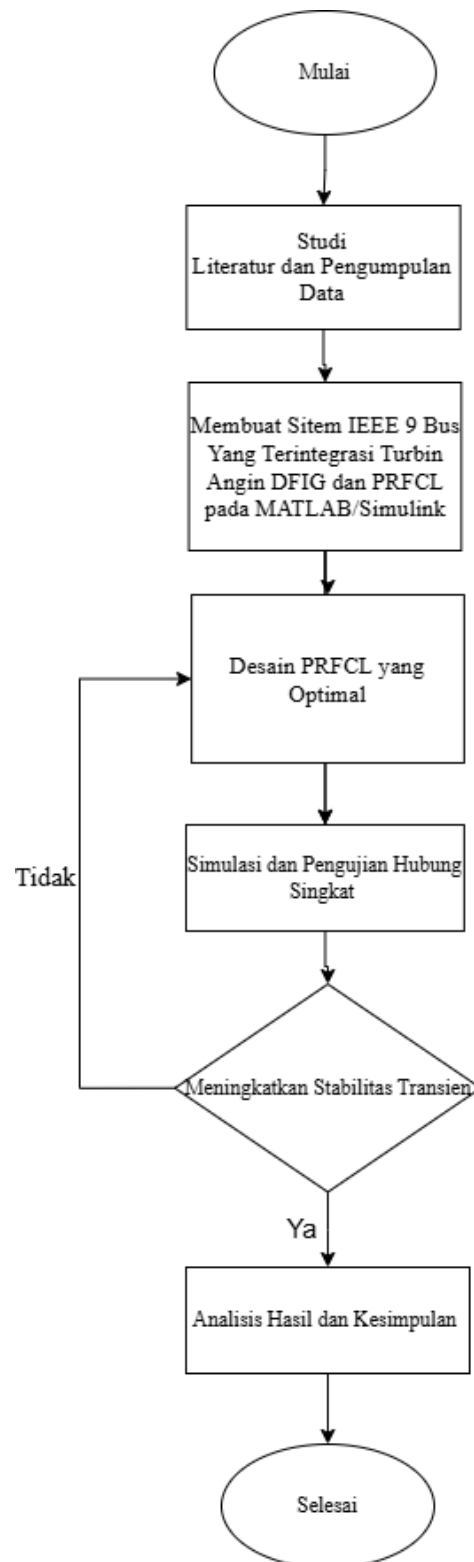
4. Simulasi dan Analisis

Pada tahap ini data – data semuanya dimasukkan dan dimodelkan ke perangkat lunak komputasi *power system* untuk dilakukan simulasi dengan membuat sistem turbin angin berbasis DFIG pada perangkat lunak, kemudian dilakukannya simulasi dengan memberikan gangguan yang dipilih untuk mengamati respons dan keandalan sistem dengan menggunakan PRFCL dan tanpa menggunakan PRFCL, serta menganalisis peningkatan kestabilan transien pada sistem tersebut.

5. Penulisan Laporan

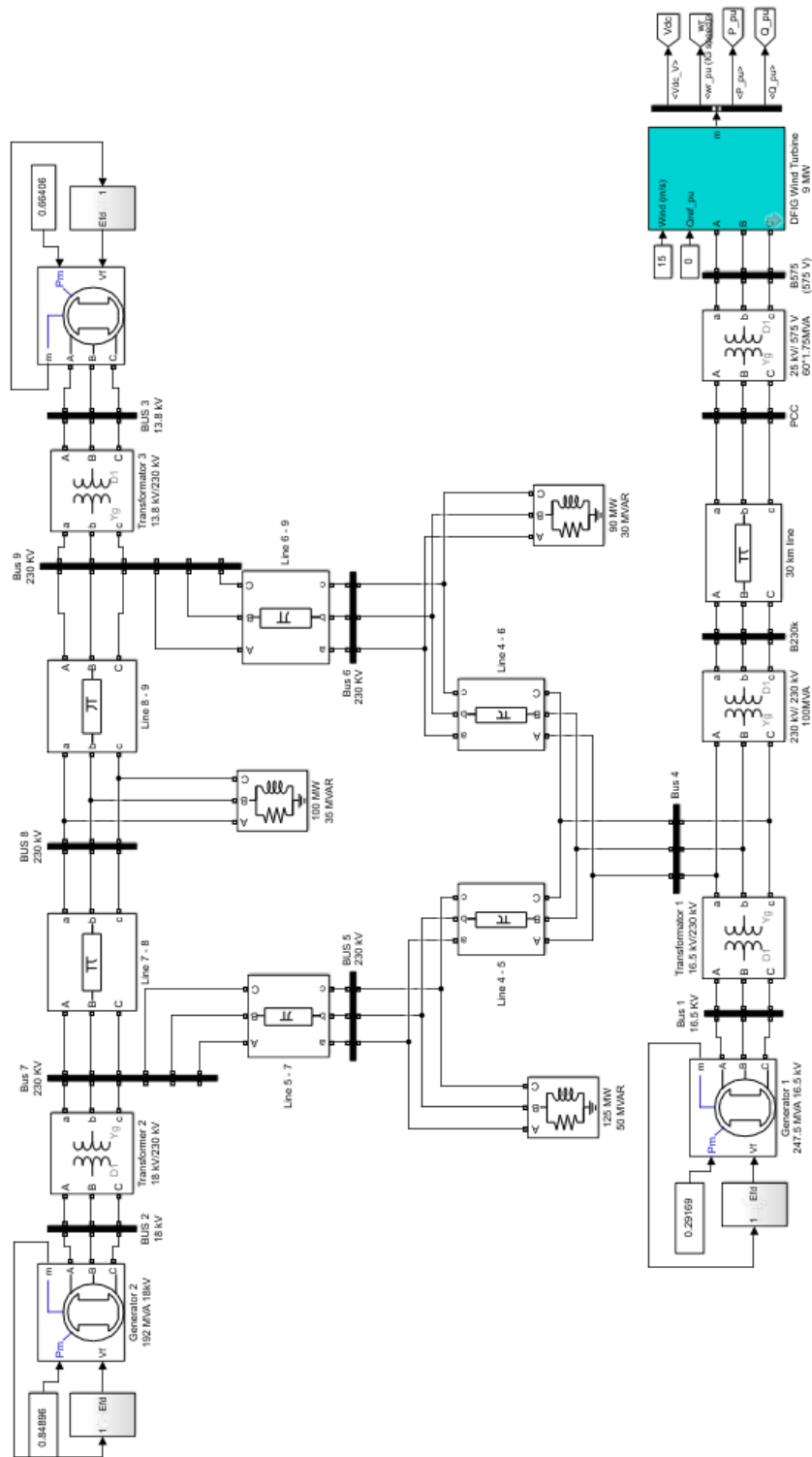
Pada tahap ini menyajikan hasil dan dokumentasi dari sebuah penelitian dalam bentuk laporan. Penelitian ini dimasukkan ke dalam sebuah laporan proposal penelitian yang telah dikerjakan dan selanjutnya hasil penelitian yang dituangkan ke dalam sebuah laporan akhir atau skripsi.

3.4 Diagram Alir Penelitian

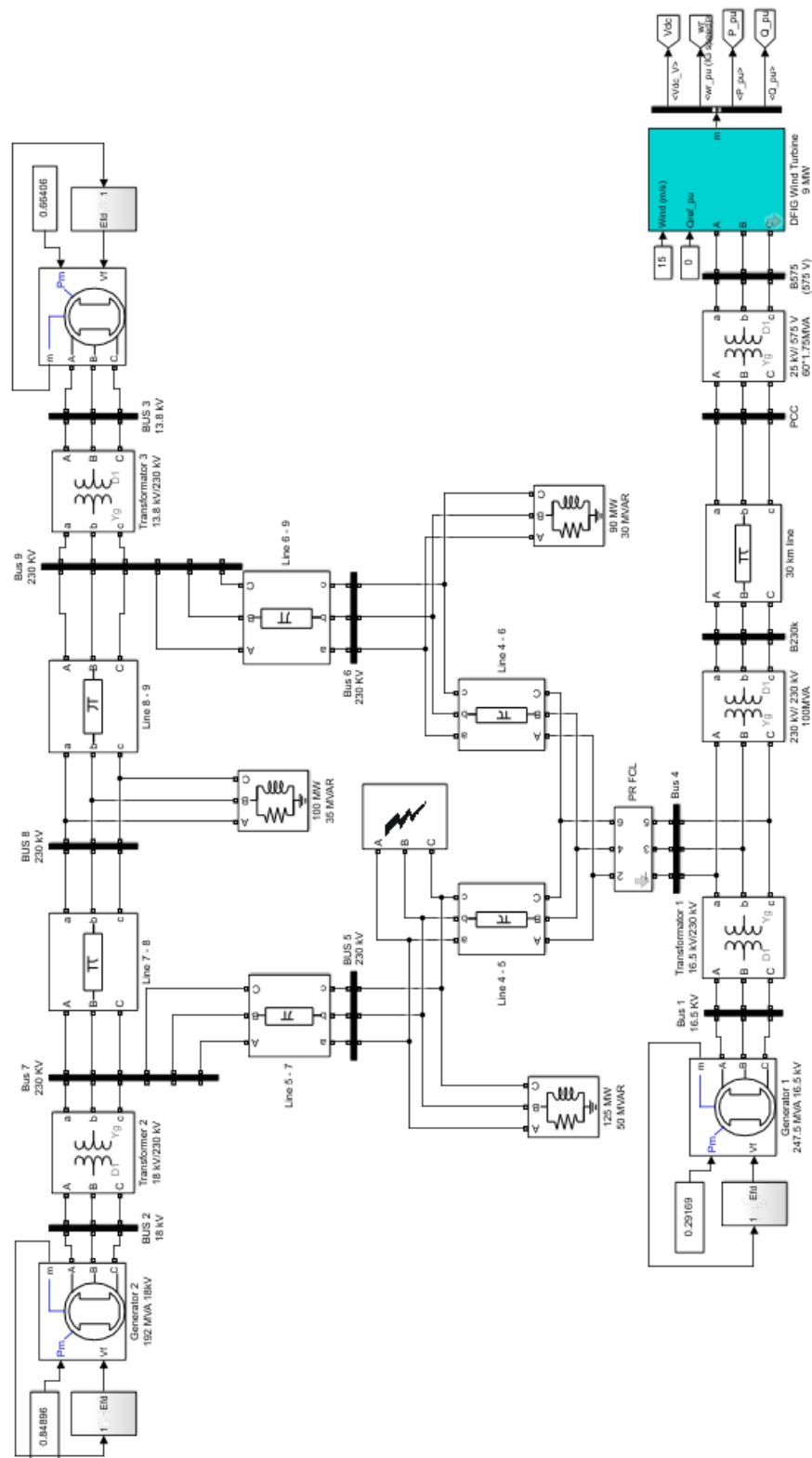


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

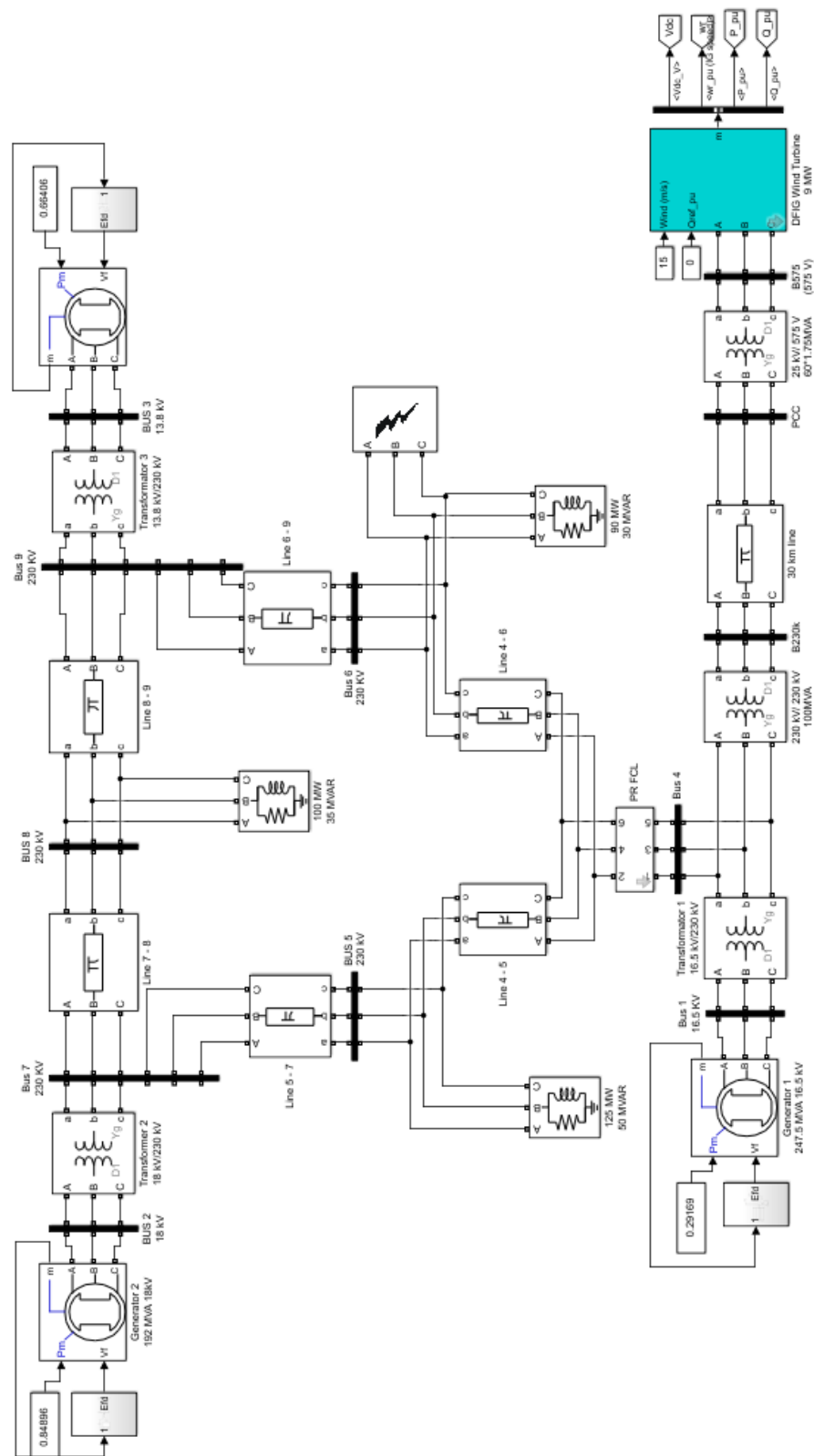
3.5 Simulasi dan Pemodelan



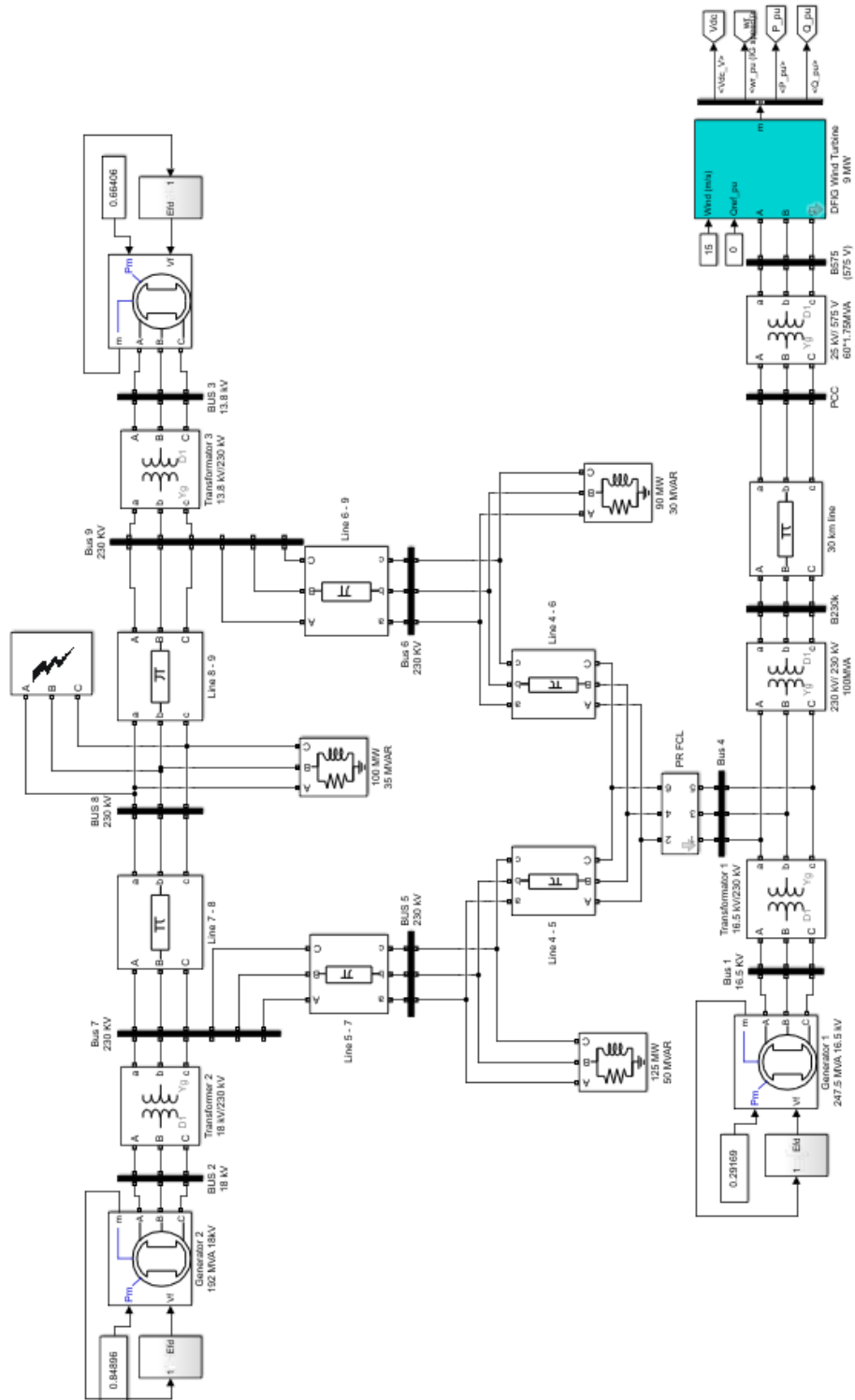
Gambar 3.2 Modelling Simulink Sistem IEEE 9 bus terintegrasi turbin angin berbasis DFIG



Gambar 3.3 Modelling Simulink Sistem IEEE 9 bus terintegrasi turbin angin berbasis DFIG dengan PRFCL dan Gangguan 3LG Bus 5



Gambar 3.4 Modelling Simulink Sistem IEEE 9 bus terintegrasi turbin angin berbasis DFIG dengan PRFCL dan Gangguan 3LG Bus 6



Gambar 3.5 Modelling Simulink Sistem IEEE 9 bus terintegrasi turbin angin berbasis DFIG dengan PRFCL dan Gangguan 3LG Bus 8

3.6 Metode Perhitungan Indeks Stabilitas Transien

Dalam Penelitian ini, analisis stabilitas transien dilakukan menggunakan pendekatan integral luas deviasi terhadap parameter tegangan, daya aktif, dan kecepatan rotor. Metode ini digunakan untuk mengukur seberapa besar penyimpangan sistem dari kondisi *steady state* saat dan setelah terjadi gangguan. Adapun parameter yang dihitung meliputi *Voltage Index* (VLT), *Power Index* (POW), dan *Speed Index* (SPD)[23].

3.6.1 Voltage Index (VLT)

Voltage Index (VLT) digunakan untuk mengukur deviasi tegangan terminal dari nilai acuan tegangan selama kondisi transien. Persamaan perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$VLT = \int_{t_0}^{t_f} |\Delta V(t)| dt \quad (3.1)$$

$$\Delta V(t) = V(t) - V_{ref} \quad (3.2)$$

dengan:

$V(t)$ = Tegangan Aktual Saat dan Sesudah Terjadi Gangguan (p.u)

V_{ref} = Tegangan Acuan (p.u)

t_0 dan t_f = Waktu Observasi Awal dan Akhir (detik)

3.6.2 Power Index (POW)

Power Indeks (POW) digunakan untuk mengevaluasi deviasi daya aktif dari kondisi nominal akibat gangguan. Persamaannya adalah

$$POW = \int_{t_0}^{t_f} |\Delta P(t)| dt \quad (3.3)$$

$$\Delta P(t) = P(t) - P_{ref} \quad (3.4)$$

dengan:

$P(t)$ = Daya Aktif Aktual Saat dan Sesudah Terjadi Gangguan (p.u)

P_{ref} = Daya Aktif Acuan (p.u)

t_0 dan t_f = Waktu Observasi Awal dan Akhir (detik)

3.6.3 *Speed Index (SPD)*

Speed Index (SPD) digunakan untuk mengukur deviasi kecepatan rotor terhadap kecepatan sinkron. Indeks ini dihitung dengan persamaan:

$$SPD = \int_{t_0}^{t_f} |\Delta\omega(t)| dt \quad (3.5)$$

$$\Delta\omega(t) = \omega(t) - \omega_{ref} \quad (3.6)$$

$\omega(t)$ = Daya Aktif Aktual Saat dan Sesudah Terjadi Gangguan (p.u)

ω_{ref} = Daya Aktif Acuan (p.u)

t_0 dan t_f = Waktu Observasi Awal dan Akhir (detik)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan terhadap sistem tenaga IEEE 9 Bus dengan integrasi Doubly Fed Induction Generator (DFIG) serta penerapan Parallel Resonance Fault Current Limiter (PRFCL), maka dapat disimpulkan dalam beberapa poin utama sebagai berikut:

1. Implementasi PRFCL mampu meningkatkan kestabilan transien sistem tenaga. Hal ini ditunjukkan melalui penurunan nilai indeks deviasi seperti *Voltage Index* (VLT), *Power Index* (POW), dan *Speed Index* (SPD) pada kondisi gangguan 3 fasa tanah (3LG) yang diterapkan di Bus 5, Bus 6, dan Bus 8. Nilai indeks tersebut secara konsisten lebih rendah pada kondisi dengan PRFCL dibandingkan tanpa kontrol tambahan, yang menandakan bahwa PRFCL lebih efektif dalam meredam osilasi dan mempercepat pemulihan sistem.
2. Frekuensi generator sinkron lebih cepat stabil dengan adanya PRFCL. Meskipun terjadi fluktuasi sesaat setelah gangguan, sistem dengan PRFCL menunjukkan waktu pemulihan frekuensi yang lebih singkat dan tingkat osilasi yang lebih rendah pada ketika generator sinkron, dibandingkan dengan sistem tanpa PRFCL.
3. Load angle generator menunjukkan karakteristik yang khas saat menggunakan PRFCL. Meskipun terjadi lonjakan awal load angle yang sedikit lebih besar dibandingkan tanpa PRFCL, namun sistem dengan PRFCL mengalami redaman osilasi yang lebih cepat dan kembali ke kondisi steady state dengan lebih stabil. Hal ini menandakan bahwa PRFCL memiliki kemampuan untuk mempercepat penyesuaian sudut rotor terhadap gangguan, meskipun respons awalnya lebih impulsif.

4. Dampak penerapan PRFCL paling signifikan terjadi pada gangguan di lokasi yang lebih dekat dengan DFIG dan PRFCL. Dari ketiga lokasi gangguan pada Bus 5 dan 6 menunjukkan hasil perbaikan parameter stabil yang paling menonjol. Hal ini menegaskan bahwa efektivitas PRFCL dalam meredam gangguan sangat dipengaruhi oleh lokasi pemasangan relatif terhadap titik gangguan.
5. Penerapan PRFCL tidak hanya berdampak lokal pada DFIG, tetapi juga berkontribusi terhadap stabilitas sistem secara menyeluruh. Terbukti dari peningkatan performa sistem pada frekuensi, load angle, dan Indeks stabilitas transien, PRFCL memiliki efek positif dalam mengkoordinasi respons seluruh generator sinkron dalam sistem terintegrasi.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan terhadap sistem tenaga IEEE 9 Bus dengan integrasi Doubly Fed Induction Generator (DFIG) serta penerapan Parallel Resonance Fault Current Limiter (PRFCL), maka penulis memberikan saran untuk penelitian selanjutnya:

1. Untuk implementasi yang lebih luas, perlu dilakukan optimasi terhadap nilai induktansi, kapasitansi, dan resistansi PRFCL sesuai dengan skala sistem dan jenis gangguan yang lebih beragam, termasuk gangguan asimetris.
2. Karena DFIG sangat bergantung pada kecepatan angin, simulasi dalam penelitian ini masih mengasumsikan kecepatan tetap. Saran ke depan adalah mengkaji pengaruh variasi kecepatan angin terhadap kinerja PRFCL dan kestabilan sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Sarante, “Energi Baru dan Terbarukan (EBT) Mendukung Pertahanan Negara Ditekindhan Ditjen Pothan Kemhan,” 2024.
- [2] K. S. Banawair and J. Pasupuleti, “DFIG wind-turbine modeling with reactive power control integrated to large distribution network,” *Conf. Proceeding - 2014 IEEE Int. Conf. Power Energy, PECon 2014*, pp. 298–303, 2014.
- [3] F. Kamal and B. Chowdhury, “Impact of integrating DFIG and direct drive synchronous wind turbine generator on power system stability,” *2017 North Am. Power Symp. NAPS 2017*, 2017.
- [4] S. B. Naderi, M. Jafari, and M. Tarafdar Hagh, “Parallel-resonance-type fault current limiter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 7, pp. 2538–2546, 2013.
- [5] R. Syahputra, “Simulasi DFIG pada PLTA Angin,” *Repository.Umy.Ac.Id*.
- [6] Y. S. W. Utomo, M. Pujiantara, and A. Musthofa, “Analisa Penggunaan Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) Untuk Melindungi Peralatandi PT Pindo Deli,” *J. Tek. Its*, vol. 4, no. 2, pp. 89–95, 2015.
- [7] Wiliam D. Stevenson Jr, “Analisa Sistem Tenaga” Jilid Pertama, Edisi Keempat, Universitas Brawijaya, 129.269, 1998.
- [8] M. Iqbal and R. M. S. Adinandra, “Pembuatan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Berkapasitas 100 Watt,” *Skripsi*, pp. 1–30, 2018.
- [9] A. Bachtiar and W. Hayyatul, “Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras,” *J. Tek. Elektro ITP*, vol. 7, no. 1, pp. 34–45, 2018.
- [10] A. Nurtrimarini Karim, S. M. Said, I. C. Gunadin, and M. B. Darusman, “Impact of Penetration Wind Turbines on Transient Stability in Sulbagsel Electrical Interconnection System,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 979, no. 1, 2018.

- [11] A. Hamzah and D. I. P. A. Dahono, "Analisis Dan Pemodelan Generator Induksi Satu Fasa," pp. 262–264, 2012.
- [12] S. E. E. Profile, "Modelling & Simulation of a Wind Turbine with Doubly-Fed Induction Generator Modelling & Simulation of a Wind Turbine with Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)," no. November, 2020.
- [13] R. Gianto, "Steady-state model of DFIG-based wind power plant for load flow analysis," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 15, no. 8, pp. 1724–1735, 2021.
- [14] A. T. Hussein, B. Manara, and C. De Recherche, "Doubly Fed Induction Generator (DFIG) In Wind Turbine. Modelling and Power Flow Control," pp. 580–584, 2004.
- [15] Asiva Noor Rachmayani, *Power Electronics for Renewable Energy Systems Transportation and Industrial Applications*. 2015.
- [16] E. G. Shehata, "Active and reactive power control of doubly fed induction generators for wind energy generation under unbalanced grid voltage conditions," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 41, no. 6, pp. 619–640, 2013.
- [17] T. R. Y. ATMOJO, "Analisis Kestabilan Tegangan Terhadap Pelepasan Beban Menggunakan Metode Fuzzy Logic Pada Sistem Distribusi 20 Kv," 2023.
- [18] C. Andersson, J. E. Solem, and B. Eliasson, "Classification of power system stability using support vector machines," *2005 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol. 1, no. 2, pp. 650–655, 2005.
- [19] S. Mohandas and A. K. Chandel, "Transient stability enhancement of the power system with wind generation," *Telkomnika*, vol. 9, no. 2, pp. 267–278, 2011.

- [20] Doane Puri Mustika, Sasongko Pramono Hadi, Mokhammad Isnaeni B, Mohd. Brado Frasetyo, and Tumiran, “Peningkatan Stabilitas Transien pada Turbin Angin Berbasis DFIG Menggunakan SFCL tipe Bridge,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 11, no. 4, pp. 297–304, 2022.
- [21] R. Asghar, “Fault Current Limiters Types, Operations and its limitations,” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 1020–1027, 2018.
- [22] “Implementation of Parallel-LC-Resonance Type Fault Current Limiter (FCL) For Multiple Fault Conditions in Electric Power System,” vol. 08, no. 01, pp. 14–20, 2016.
- [23] M. S. Alam, M. A. Y. Abido, A. E. D. Hussein, and I. El-Amin, “Fault ride through capability augmentation of a DFIG-based wind integrated VSC-HVDC system with non-superconducting fault current limiter,” *Sustain.*, vol. 11, no. 5, 2019.