

**TESIS****DESAIN SISTEM KONTROL UNTUK MENINGKATKAN  
KAPASITAS *LOW VOLTAGE RIDE THROUGH* (LVRT) PADA  
TURBIN ANGIN MENGGUNAKAN STATCOM BERBASIS  
KENDALI SISTEM *LINEAR QUADRATIC REGULATOR* (LQR)**

*Design of Control System to Enhance Low Voltage Ride Through (LVRT)  
Capability in Wind Turbines Using STATCOM Based on Linear Quadratic  
Regulator (LQR) Control*

**Nurul Chairunnisa Noor**

**D032191003**



**PROGRAM STUDI MAGISTER**

**TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2023**

**PENGAJUAN TESIS**

**DESAIN SISTEM KONTROL UNTUK MENINGKATKAN KAPASITAS  
LOW VOLTAGE RIDE THROUGH (LVRT) PADA TURBIN ANGIN  
MENGUNAKAN STATCOM BERBASIS KENDALI SISTEM LINEAR  
QUADRATIC REGULATOR (LQR)**

**TESIS**

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Master

Program Studi Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

**Nurul Chairunnisa Noor**

**D032191003**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2023**

**TESIS****DESAIN SISTEM KONTROL UNTUK  
MENINGKATKAN KAPASITAS LOW VOLTAGE  
RIDE THROUGH (LVRT) PADA TURBIN ANGIN  
MENGUNAKAN STATCOM BERBASIS KENDALI  
SISTEM LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)****NURUL CHAIRUNNISA NOOR  
D032 191 003**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin  
pada tanggal 31 Juli 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan



Pembimbing Utama



**Dr. Indar Chaerah Gunadin, ST., MT**  
NIP. 19750404 200012 1 001

Pembimbing Pendamping



**Prof. Dr. Ir. H. Ansar Suyuti, M.T**  
NIP. 19770322 200501 1 001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



**Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM**  
NIP. 19730926 2000 121 002

Ketua Program Studi  
S2 Teknik Elektro



**Dr. Eng. Ir. Wardi, S.T., M.Eng**  
NIP. 19720828 199903 1 003

**PERNYATAAN KEASLIAN  
TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Nurul Chairunnisa Noor

Nomor mahasiswa : D032191003

Program studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis yang berjudul “*Desain Sistem Kontrol Untuk Meningkatkan Kapasitas Low Voltage Ride Through (LVRT) Pada Turbin Angin Menggunakan STATCOM Berbasis Kendali Sistem Linear Quadratic Regulator (LQR)*” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T, M.T. dan Prof.Dr.Ir. Ansar Suyuti, M.T.) karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah dicantumkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar pustaka tesis ini. Sebagian dari tesis ini telah diterbitkan oleh Prosiding (the 3rd *International Conference on Applied Electromagnetic Technology (AEMT) 2022*, halaman 51–55, paper ID: 3811 ) sebagai artikel dengan judul “*Control System Design to Increase Low Voltage Ride Through (LVRT) Capacity in Wind Turbine Using STATCOM Base on Control Linear Quadratic Regulator (LQR)*”

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin

Gowa 31 juli 2023

Yang menyatakan

A 10,000 Indonesian postage stamp (METERAN TEMPEL) with a signature over it. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the number 10000. The signature is in black ink and appears to be 'Nurul Chairunnisa Noor'.

Nurul Chairunnisa Noor

## PRAKATA

Puji syukur yang sedalam–dalamnya penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan limpahan rahmat–Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tesis dengan judul “Desain Sistem Kontrol Untuk Meningkatkan Kapasitas *Low Voltage Ride Through* (LVRT) Pada Turbin Angin Menggunakan STATCOM berbasis Kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR)” Tak lupa pula shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menyinari dunia ini dengan keindahan ilmu dan akhlak yang diajarkan kepada seluruh umatnya.

Tujuan tesis ini disusun untuk memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) pada Program Pascasarjana Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin. Tentunya penyelesaian tesis ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan dari semua pihak. Untuk itu, dengan penuh kerendahan hati penulis menyampaikan terima kasih setulus–tulusnya dan setinggi–tingginya kepada :

1. Rektor universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister serta para dosen dan rekan–rekan dalam tim penelitian.
2. Bapak Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T, M.T. selaku Pembimbing Utama dan Prof.Dr.Ir. Ansar Suyuti, M.T. selaku Pembimbing Pendamping yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan arahan, memberikan kritik dan saran kepada penulis dalam penyelesaian tesis ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, MT ,Bapak Dr. Ikhlas Kitta, ST. MT dan Dr. Yusran, ST.MT selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan arahan dan menguji tesis ini.
4. Dengan tulus hati, saya ingin mengungkapkan rasa terima kasih dan penghormatan yang mendalam kepada orang tua tercinta atas doa, pengorbanan, dan motivasi yang mereka berikan selama saya menjalani pendidikan. Saya juga ingin memberikan penghargaan yang besar kepada saudara–saudara serta keluarga besar saya atas motivasi dan dukungan tak

terhingga yang mereka berikan. Segala keberhasilan dan hal-hal positif yang akan saya raih di masa depan adalah berkat kalian dan untuk kalian.

5. Kepada ponakan tercinta Salwa Najiya Noor dan Rayanza malik ahmad sebagai ponakan online Terima kasih atas keceriaan, kehangatan, dan kebahagiaan yang telah kalian berikan pada penulis.
6. Para teman-teman seperjuangan Pasca Teknik Elektro Unhas Angkatan 2019, khususnya untuk Defi, Mia, Azizah, Ayu dan Aulia yang sudah memotivasi dan berjuang bersama penulis untuk menyelesaikan tesis ini.
7. Dan pada pihak PT. PLN UP2B Sistem Sulselrabar yang telah memberikan wadah kepada penulis untuk mengambil data analisis tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu saran beserta kritikan yang membangun sangat diharapkan. Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Gowa, 31 juli 2023

Nurul Chairunnisa Noor

## ABSTRAK

**NURUL CHAIRUNNISA NOOR.** Desain Sistem Kontrol Untuk Meningkatkan Kapasitas *Low Voltage Ride Through* (LVRT) Pada Turbin Angin Menggunakan STATCOM Berbasis Kendali Sistem *Linear Quadratic Regulator* (LQR). (Dibimbing oleh **Indar Chaerah Gunadin** dan **Ansar Suyuti** )

Energi angin selama beberapa tahun belakangan ini telah mendapatkan banyak perhatian karena dapat digunakan sebagai energi alternatif dalam semua bidang. munculnya masalah kestabilan pada sistem pembangkit yaitu terputusnya secara signifikan beban pada pembangkit secara bersamaan ketika meningkat atau menurunnya produksi energi angin secara tiba-tiba menyebabkan gangguan dalam sistem. Kestabilan sistem merupakan masalah yang perlu mendapat perhatian lebih dalam mendesain sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Selama sistem beroperasi secara normal, komponen sistem energi listrik memastikan keseimbangan antara kebutuhan daya reaktif dan aktif. Perubahan yang cepat dapat menghilangkan keseimbangan dan mencegah sistem tenaga kembali ke titik keseimbangan normalnya. Kajian ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas *Low Voltage Ride Through* (LVRT) dimana pembangkit harus dengan cepat terhubung kembali ke jaringan saat gangguan terjadi maka *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) digunakan sebagai pengatur tegangan. Dalam penelitian ini rancangan kendali optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) mengontrol STATCOM dengan menghasilkan daya reaktif dan menginjeksikannya pada sistem ketika terjadi gangguan sesuai dengan kebutuhan sistem. Sistem yang akan diteliti adalah sistem interkoneksi Sulselrabar tepatnya di PLTB Sidrap. Software yang digunakan untuk simulasi instalasi STATCOM adalah SIMULINK MATLAB 2020a. simulasi dilakukan dengan memantau situasi dalam sistem pada saat normal lalu ketika terjadinya gangguan pada sistem dan keadaan setelah dimasukkan STATCOM dalam sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada sistem Sulselrabar tepatnya pada PLTB Sidrap menunjukkan nilai settling time pada saat keadaan normal sebelum ditambakkannya STATCOM didalam sistem adalah 2 menit dan setelah ditambakkannya STATCOM pada sistem pembangkit nilai settling time-nya semakin cepat menjadi 3 detik. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penggunaan STATCOM sistem dapat meningkatkan kemampuan LVRT dalam meningkatkan kecepatan respons turbin untuk mencapai stabilitas secara lebih cepat dibandingkan sebelum menggunakan STATCOM.

Kata kunci : Low Voltage Ride Through (LVRT) ,Linear Quadratic Regulator (LQR), Static Synchronous Compensator (STATCOM) , SIMULINK MATLAB 2020a.

## ABSTRACT

**NURUL CHAIRUNNISA NOOR.** Control sistem Design To Increase Low Voltage Ride Through (LVRT) Capacity in Wind Turbine Using STATCOM Base on Control Linear Quadratic Regulator (LQR). (Guided by **Indar Chaerah Gunadin** and **Ansar Suyuti**)

Wind energy in recent years has received a lot of attention because it can be used as an alternative energy in all fields. the emergence of stability problems in the generating system, namely the significant disconnection of the load on the generator simultaneously when an increase or decrease in wind energy production suddenly causes a disturbance in the system. System stability is a problem that needs more attention in designing a wind power system. As long as the system operates normally, the electrical energy system components ensure a balance between reactive and active power supply requirements. Rapid changes can throw off balance and prevent the power system from returning to its normal equilibrium point. This study aims to increase the Low Voltage Ride Through (LVRT) capacity where the generator must quickly reconnect to the network when a disturbance occurs, so the Static Synchronous Compensator (STATCOM) is used as a voltage regulator. In this study the optimal control design of the Linear Quadratic Regulator (LQR) controls STATCOM by generating reactive power and injecting it into the system when a disturbance occurs according to system requirements. The system to be studied is the Sulsehrabar interconnection system, to be precise at the Sidrap. The software used for the STATCOM installation simulation is SIMULINK MATLAB 2020a. The simulation is carried out by monitoring the situation in the system at normal times and then when there is a disturbance in the system and the state after entering STATCOM in the system. The simulation results show that in the South Celebes system, precisely at the Sidrap PLTB, the settling time value during normal conditions before adding STATCOM in the system is 2 minutes and after adding STATCOM to the generating system, the settling time value is getting faster to 3 seconds. This shows that by using STATCOM the system can improve LVRT's ability to increase turbine response speed to achieve stability more quickly than before using STATCOM.

Key word : Low Voltage Ride Through (LVRT) ,Linear Quadratic Regulator (LQR), Static Synchronous Compensator (STATCOM) , SIMULINK MATLAB 2020a.



## DAFTAR ISI

PRAKATA .....	3
ABSTRAK .....	4
ABSTRACT .....	5
BAB I PENDAHULUAN .....	11
1.1 Latar belakang .....	11
1.2 Rumusan masalah .....	13
1.3 Tujuan penelitian .....	14
1.4 Manfaat penelitian .....	14
1.5 Batasan masalah .....	14
1.6 Sistematika penulisan .....	15
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	16
2.1 Landasan teori .....	16
2.2 Sistem pembangkit listrik .....	18
2.3 Turbin angin .....	23
2.4 STATCOM .....	25
2.5 <i>Low voltage ride through</i> .....	27
2.6 <i>Linear quadratic regulator</i> .....	28
2.7 Sistem transmisi dan distribusi .....	32
2.8 Sistem <i>direct quadrature</i> (dq–DQ) .....	36
2.9 State of the art .....	38
2.10 Kerangka pikir .....	43
BAB 3 METODE PENELITIAN .....	45
3.1 Waktu dan tempat penelitian .....	45
3.2 Teknik pengumpulan data .....	45
3.3 Perancangan penelitian .....	45
3.4 Teknik analisis sistem .....	46
3.5 <i>Flow chart</i> sistem .....	59
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....	62
4.1 Sistem interkoneksi .....	62

4.2 Saluran transmisi .....	63
4.3 Tahapan simulasi .....	63
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	69
5.1 KESIMPULAN .....	69
5.2 SARAN .....	69
DAFTAR PUSTAKA .....	70
LAMPIRAN .....	72

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga kerja .....	18
Gambar 2. Pembangkit listrik tenaga angin .....	19
Gambar 3. Turbin angin .....	23
Gambar 4. STATCOM .....	26
Gambar 5. Blok diagram LQR sederhana .....	31
Gambar 6. Rangkaian ekivalen sederhana .....	33
Gambar 7. Rangkaian $\mu$ nominal (saluran menengah) .....	34
Gambar 8. Rangkaian T nominal (saluran menengah) .....	34
Gambar 9. Ekivalen (saluran panjang) .....	35
Gambar 10. Rangkaian transien ekivalen generator .....	47
Gambar 11. Blok diagram representasi generator model <i>two-axis</i> .....	49
Gambar 12. Blok diagram representasi persamaan .....	50
Gambar 13. Blok diagram lengkap generator model <i>two-axis</i> .....	51
Gambar 14. Blok diagram eksitasi .....	52
Gambar 15. Model generator .....	53
Gambar 16. Sistem kontrol optimal .....	54
Gambar 17. Contoh jaringan sistem tenaga listrik sebelum direduksi .....	56
Gambar 18. Contoh jaringan sistem tenaga listrik setelah direduksi .....	56
Gambar 19. Block diagram <i>feedback</i> sistem .....	60
Gambar 20. Diagram sistem kendali LQR .....	64
Gambar 21. Blok diagram sistem .....	65
Gambar 22. Hasil simulasi sistem LQR .....	64
Gambar 22. Hasil simulasi sistem PID .....	68

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Kondisi angin.....	22
Tabel 2. Kecepatan angin.....	23
Tabel 3. <i>State of the art</i> .....	24
Tabel 4. Data pembangkitan sistem Sulselrabar.....	65
Tabel 5. Data penomoran dan jenis bus Sulselrabar.....	68
Tabel 6. Momen inersia.....	69
Tabel 7. Parameter mesin pembangkit.....	69
Tabel 8. Saluran transmisi Sulselrabar .....	70
Tabel 9. Data beban trafo .....	70

## DAFTAR GRAFIK

Grafik 1. Hasil simulasi LQR.....	60
Grafik 2. Hasil simulasi PID.....	60
Grafik 3. Tegangan pada keadaan normal.....	70
Grafik 4. Sistem pada saat terjadinya gangguan.....	70
Grafik 5. Sistem pada saat masuknya STATCOM.....	70
Grafik 6. Keadaan saat gangguan terlepas.....	71
Grafik 7. Keadaan tanpa STATCOM.....	72
Grafik 8. Ukuran STATCOM dinaikkan .....	73

## BAB 1

### Pendahuluan

#### 1.1 Latar belakang

Energi angin selama beberapa tahun belakangan ini telah mendapatkan banyak perhatian karena dapat digunakan sebagai energi alternatif dalam semua bidang. Dalam sistem pembangkit listrik tenaga bayu, energi angin merupakan sesuatu yang sangat penting dalam proses pembangkitan. Dimana Angin merupakan udara yang bergerak disebabkan oleh adanya perbedaan tekanan udara, Udara akan mengalir dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah. Daerah yang memiliki angin bertekanan tinggi biasanya berada di sekitar pusat tekanan tinggi atau wilayah yang dikenal sebagai *Anticyclones*. *Anticyclones* biasanya terbentuk di wilayah-wilayah yang kering atau di belahan bumi yang sedang musim panas. Angin bertekanan tinggi dapat menjadi sumber energi angin yang baik karena angin pada daerah tersebut akan mengalir menuju daerah bertekanan rendah dengan kecepatan yang lebih tinggi, dapat dimanfaatkan untuk memutar kincir angin lalu menghasilkan listrik. Dengan potensi energi angin ini pembangunan pembangkit listrik tenaga bayu di daerah yang mempunyai potensi besar dapat membantu dalam peningkatan kuantitas energi di Indonesia, dimana kecepatan angin di daerah tersebut memadai untuk dibangunnya pembangkit listrik tenaga angin (Molinas, 2018).

Disinilah munculnya masalah kestabilan pada sistem pembangkit yaitu terputusnya secara signifikan beban pada pembangkit secara bersamaan ketika meningkat atau menurunnya produksi energi angin secara tiba-tiba menyebabkan gangguan dalam sistem. Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan masalah yang sangat penting dalam perkembangan kehidupan manusia karena telah melibatkan teknologi yang berperan dalam kelangsungan kehidupan sehari-hari masyarakat. Dimana listrik merupakan komponen utama dalam menyokong teknologi modern dan menjaga kestabilan sistem merupakan salah satu tujuan dalam penelitian ini. Kestabilan daya atau stabilitas suatu sistem tenaga listrik merupakan

kemampuan dari sistem itu untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan. Sebaliknya ketidakstabilan suatu sistem itu adalah kehilangan kendali sinkron dari sistem itu sendiri. Jadi masalah stabilitas terkait dengan mesin sinkron setelah gangguan terjadi. Pada dasarnya kestabilan sistem tenaga listrik terbagi dalam kestabilan *steady state* dan kestabilan transient. Masalah kestabilan berhubungan dengan gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba seperti gangguan hubung singkat, pemutus saluran, pemindahan atau pemutusan beban. Masalah kestabilan sistem yang sering terjadi adalah masalah beban berlebih dan berkurangnya pasokan daya reaktif. Ketika gangguan terjadi kemampuan turbin angin dalam bertahan ketika gangguan kestabilan terjadi biasa kita sebut *low voltage ride-through* (LVRT).

Untuk mengatasi kekhawatiran terhadap kestabilan tersebut, sistem LVRT telah dirancang dengan menggunakan kode jaringan yang ditentukan oleh operator jaringan untuk menjaga stabilitas sistem, sehingga mengurangi risiko penurunan tegangan[Ezzat , 2013]. Kode jaringan awalnya diciptakan mengingat generator sinkron yang umumnya digunakan pada pembangkit listrik konvensional, Sedangkan pembangkit listrik tenaga angin mempunyai karakteristik yang berbeda dengan tenaga listrik konvensional. Karena jumlah daya reaktif yang diusulkan tergantung pada persentase penurunan tegangan jaringan, karena selama penurunan terjadi arus pengenal sistem dan daya diberikan pada jaringan selama munculnya penurunan (Calle,2015). Meninjau penelitian sebelumnya beberapa metode telah dikembangkan untuk menangani masalah *low voltage ride-through* (LVRT) seperti yang dilakukan oleh (Zhao,2017) dengan Negative-Sequence Droop Kontrol, lalu (Zhang : 2012) dengan metode PID, (Habibi,2018) dengan metode fuzzy PI, serta (Kalbat,2013) dengan metode *linear quadratic gaussian* (LQG) dari melihat hasil penelitian yang telah ada dapat dikatakan bahwa *Linear quadratic regulator* adalah sistem yang lebih baik dalam mengontrol sistem agar dapat mengatasi *low voltage ride through* (LVRT).

Keadaan sistem yang memungkinkan mesin sinkron pada sistem untuk merespon gangguan dan kembali pada keadaan normal setelah terjadi gangguan adalah tujuan utama dalam penelitian ini. Dalam hal ini faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan yaitu ketidakmampuan sistem untuk memenuhi permintaan daya reaktif pada kondisi ketika sistem terbebani terlalu berat yaitu ketika sistem tenaga tidak mampu dalam mentransfer daya reaktif melalui saluran transmisi sehingga rugi-rugi daya semakin banyak. Pengaplikasian peralatan FACTs banyak menjadi pertimbangan utama dalam mengatasi hal ini. STATCOM sebagai salah satu alat FACTs dilengkapi dengan sistem kontrol daya aktif dan reaktif untuk mengatur output generator induksi telah dipilih sebagai alat untuk mengatur daya reaktif.

Apabila tegangan STATCOM bernilai lebih rendah maka STATCOM akan menyerap daya reaktif pada sistem, apabila bernilai lebih tinggi dari sistem maka akan menghasilkan daya reaktif ke sistem (Wen,2016). Desain sistem kontrol ini akan dibuat dalam software MATLAB menggunakan sistem *linear quadratic regulator* (LQR), ini adalah sebuah metode kontrol yang menggunakan prinsip kontrol optimal untuk menghasilkan sinyal kendali yang optimal dan dapat menghasilkan kinerja yang baik pada sistem dinamis. Implementasi LQR dilakukan dalam bentuk ruang dan waktu (*state space*), yaitu sebuah metode matematika yang digunakan untuk merepresentasikan sistem dinamis dalam bentuk matriks, sehingga memudahkan dalam mendesain sistem kontrol yang optimal untuk turbin pembangkit tenaga angin. Dengan menggunakan teknik kendali modern seperti LQR, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja turbin pembangkit tenaga angin serta menghasilkan energi listrik yang lebih stabil dan terkendali.



## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang perumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem kontrol pada PLTB agar dapat bertahan saat LVRT sedang aktif?
2. Bagaimana membuat sistem kontrol pada PLTB lalu menambahkan STATCOM untuk meningkatkan kestabilan saat LVRT terjadi?
3. Bagaimana pengaruh simulasi sebelum dan setelah ditambahkan STATCOM saat adanya gangguan pada sistem?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Merancang sistem kontrol pada turbin angin yang telah terinterkoneksi PLTB dengan metode LQR.
2. Membuat analisis unjuk kerja dari kendali LQR dan PID pada STATCOM dalam meningkatkan kinerja dari turbin angin pada saat terjadi LVRT.
3. Evaluasi peningkatan kestabilan transient pada LVRT sebelum dan sesudah penambahan STATCOM.

## 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Sistem kelistrikan yang dianalisis adalah sistem transmisi kelistrikan Sulselrabar tepatnya pada pembangkit listrik tenaga bayu Sidrap.
2. Hanya melakukan analisis untuk memperbaiki kestabilan tegangan dan meningkatkan kecepatan untuk mendapatkan kestabilan LVRT pada Turbin angin.
3. Penempatan Static Synchronous Compensator (STATCOM) pada simulasi dibatasi dengan jumlah 1 unit pada lokasi yang telah ditentukan.
4. Simulasi hanya menggunakan software MATLAB

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Diharapkan dari penelitian ini yaitu :

1. Bagi masyarakat, diharapkan agar jatuhnya tegangan tidak sering terjadi diakibatkan oleh sistem LVRT turbin angin yang tidak stabil.
2. Bagi peneliti, dapat menjadi rujukan pembelajaran pada aplikasi MATLAB dan sistem kontrol LQR.
3. Bagi institusi pendidikan Magister jurusan Teknik Elektro departemen energi, dapat digunakan sebagai referensi ilmiah dalam penelitian untuk pengembangan sistem kontrol pembangkit tenaga listrik angin.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kestabilan sistem tenaga listrik

Sistem tenaga listrik umumnya terdiri dari beberapa pembangkit yang terhubung dalam jaringan transmisi secara interkoneksi yang biasa disebut pula sebagai sistem multi dimensi. Tujuan dalam sistem interkoneksi adalah untuk menjamin kontinuitas dalam pasokan daya listrik ke beban. Mempertahankan kestabilan dalam sistem turbin ketika gangguan terjadi adalah salah satu tujuan utama dalam mengamankan sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik yang beroperasi dalam keadaan stabil memiliki keseimbangan dalam daya input mekanis (*prime mover*). Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung dengan saluran untuk melayani beban. Maka dari itu tujuan utama dari sistem saluran transmisi adalah menjaga kontinuitas dan ketersediaan tenaga listrik terhadap kebutuhan yang meningkat. Semakin berkembangnya sistem tenaga listrik maka mengakibatkan melemahnya performansi sistem ketika terjadi gangguan.

Kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan sebuah sistem tenaga listrik dalam mempertahankan kondisi normal dan mampu kembali ke kondisi normal setelah terjadi gangguan. Respon sistem tenaga listrik terhadap gangguan dapat mempengaruhi kondisi peralatan. Sebagai contoh, sebuah gangguan pada elemen yang kritis dapat menyebabkan variasi pada aliran daya. Tegangan bus jaringan, dan kecepatan rotor mesin. Variasi tegangan akan mengaktifkan *exciter* pada generator, variasi beban akan mengaktifkan governor untuk menyesuaikan kecepatan generator, serta variasi tegangan dan frekuensi akan mempengaruhi beban sistem menjadi bervariasi bergantung pada karakteristik masing-masing. Analisis kestabilan secara umum dapat digolongkan menjadi 3 antara lain sebagai berikut :

### **2.1.1 Kestabilan keadaan tetap (*steady state stability*)**

Kestabilan keadaan tetap adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil bersifat gradual yang terajadi di sekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap. Kestabilan ini tergantung pada karakteristik komponen yang terdapat pada sitem tenaga listrik yaitu pembangkit , beban, jaringan transmisi dan kontrol sistem itu sendiri. Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan.

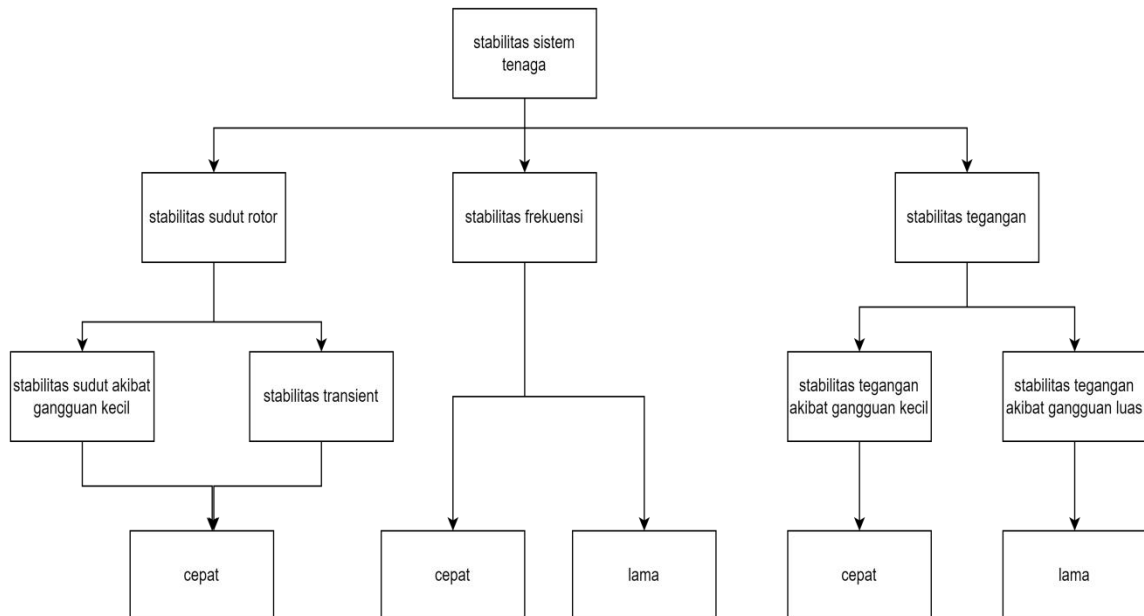
### **2.1.2 Kestabilan dinamis (*dynamic stability*)**

Kestabilan dinamis adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah timbul gangguan yang relatif kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama. Analisis kestabilan dinamis lebih kompleks karena juga memasukkan komponen kontrol otomatis dalam perhitungan.

### **2.1.3 Kestabilan transien (*transient stability*)**

Kestabilan transient adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan kestabilan karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem.

Untuk menjaga kestabilan sebuah sistem maka perlu diupayakan mesin-mesin sinkron berada pada kondisi sinkronnya. Sistem tenaga listrik eksitasi harus mendukung peningkatan pengendalian tegangan yang efektif bagi kestabilan sistem. Sistem harus mampu merespon dengan cepat terhadap suatu gangguan tingkat kestabilan sementara. Ketidakstabilan terjadi ketika gangguan menyebabkan ketidakseimbangan terus menerus antara gaya berlawanan tersebut. Kestabilan sistem tenaga dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis seperti pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Klasifikasi kestabilan sistem tenaga  
(Ghafouri ,2017 )

Kestabilan sistem tenaga merupakan hal yang sangat penting dalam menjaga operasi sistem kelistrikan yang aman dan efisien. Hal ini disebabkan karena pada kondisi keadaan mantap (*steady-state*), kecepatan rata-rata dari semua generator dalam sistem kelistrikan harus sama. Kondisi ini disebut juga sebagai operasi sinkron, dimana semua generator berinteraksi secara harmonis untuk menghasilkan energi listrik yang dibutuhkan. Oleh karena itu, menjaga kestabilan sistem tenaga menjadi salah satu perhatian utama dalam pengoperasian sistem kelistrikan agar dapat menghasilkan energi listrik yang aman, andal, dan efisien. Sistem tenaga listrik yang kompleks dapat mengalami gangguan, yang dapat menyebabkan perbedaan arus dan tegangan pada setiap bus, serta perbedaan sudut rotor pada generator yang ada. Pada kondisi normal, sistem tenaga listrik bekerja dengan seimbang antara daya input mekanis dari *prime mover* dengan daya output listrik generator pada sistem. Namun, ketika terjadi gangguan, terdapat perbedaan antara daya output listrik dan daya input mekanis. Jika daya output listrik melebihi daya input mekanis generator, maka akan terjadi perlambatan kecepatan putaran rotor atau sebaliknya, yang dapat mempengaruhi kerja dari governor.

Perbedaan tegangan pada pembangkit dan saluran dalam jaringan sistem juga dapat mempengaruhi regulator tegangan, sementara perubahan frekuensi pada sistem dapat mempengaruhi beban sesuai dengan karakteristik beban tersebut. Oleh karena itu, pengendalian yang tepat dan efektif dalam menjaga stabilitas sistem tenaga listrik sangat penting untuk meminimalkan risiko gangguan dan menjaga kinerja sistem dalam kondisi optimal.

Saat ini, masalah yang sedang dihadapi adalah LVRT, yaitu penurunan tegangan pada sistem tenaga listrik akibat dari gangguan atau kegagalan sistem. Gangguan kecil atau besar pada sistem tenaga listrik dapat mempengaruhi operasi sinkron dan mengakibatkan perbedaan arus, tegangan, dan sudut rotor pada generator. Beban tiba-tiba yang meningkat atau menurun, atau rugi pembangkitan menjadi beberapa jenis gangguan yang berpengaruh signifikan terhadap sistem. Terdapat pula gangguan lain seperti jaring transmisi yang terputus, beban lebih, atau hubung singkat. Oleh karena itu, kestabilan sistem menuju ke keadaan mantap dalam waktu singkat setelah gangguan menghilang sangat penting dalam menjaga kondisi operasi yang seimbang. Solusi yang tepat harus ditemukan untuk mengatasi masalah LVRT agar sistem tenaga listrik dapat kembali ke kondisi operasi normal ketika terjadi gangguan.

Analisis kestabilan transien sangat penting dalam mengevaluasi perilaku sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan seperti perubahan beban mendadak atau gangguan pada jaringan transmisi seperti hubung singkat atau pemutusan saklar. Dalam analisis ini, dilakukan penelitian terhadap perubahan sudut rotor pada generator dan perbedaan antara daya output listrik dengan daya input mekanis dari *prime mover* pada sistem. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem dapat kembali ke keadaan stabil setelah terjadi gangguan dan mencegah terjadinya kerusakan pada peralatan listrik atau bahkan kegagalan sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, analisis kestabilan transien merupakan bagian penting dalam menjaga keandalan dan keberlangsungan sistem tenaga listrik.

Situasi yang lebih buruk dapat terjadi ketika pembangkitan atau beban yang besar tiba-tiba hilang dari sistem atau ketika terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kondisi seperti itu, stabilitas transien harus cukup kuat untuk mengatasi kejutan atau perubahan beban yang relatif besar. Stabilitas transien merujuk pada kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron setelah terjadinya gangguan pada sistem, sebelum tindakan dari kontrol governor dilakukan. Setelah hilangnya pembangkitan atau beban secara tiba-tiba, keseimbangan antara energi *input* dan *output* listrik pada sistem akan terganggu. Jika energi input tidak lagi cukup, inersia rotor mesin yang masih berfungsi akan melambat dalam periode yang singkat. Apabila beban hilang, maka energi input pada sistem akan melebihi beban listrik, dan mesin akan bergerak semakin cepat. Oleh karena itu, analisis kestabilan transien sangat penting untuk mengevaluasi perilaku sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan seperti perubahan beban mendadak atau gangguan pada jaringan transmisi seperti hubung singkat atau pemutusan saklar.

Kondisi di mana sistem secara transien stabil namun secara dinamik tidak stabil dapat terjadi pada sistem tenaga listrik. Setelah terjadinya gangguan, rotor pada mesin akan melalui ayunan pertama sebelum pengaruh dari kontrol governor. Setelah kontrol mulai berfungsi, osilasi pada sistem dapat meningkat hingga mesin tidak lagi dalam kondisi sinkron. Hal ini terjadi ketika aksi dari kontrol governor tertunda sehingga menghasilkan ayunan berikutnya yang lebih besar daripada yang diharapkan. Oleh karena itu, penanganan gangguan harus dilakukan dengan tepat waktu dan memperhatikan penundaan waktu dalam aksi kontrol governor untuk mencegah terjadinya osilasi yang berbahaya pada sistem tenaga listrik. Persamaan yang menyatakan gerakan rotor pada mesin sinkron merupakan perkalian dari momen inersia rotor dikalikan dengan kecepatan sudut, dan dituliskan sebagai berikut:

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (1)$$

Karena kecepatan rotor relatif terhadap kecepatan sinkron, maka akan lebih mudah untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu referensi yang berputar pada kecepatan sinkron, oleh sebab itu maka persamaan yang digunakan antara lain :

$$\theta_m = \omega_m t + \delta_m \quad (2)$$

Persamaan fundamental yang mempengaruhi dinamika putaran mesin sinkron pada masalah kestabilan disebut juga persamaan ayunan mesin dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \text{ per unit} \quad (3)$$

## 2.2 Sistem pembangkit listrik

Sistem pembangkit listrik adalah sebuah rangkaian komponen dan peralatan yang bekerja bersama untuk menghasilkan energi listrik. Sistem tenaga listrik dibangkitkan oleh pusat-pusat pembangkit seperti Pembangkit tenaga uap (PLTU), tenaga air (PLTA), tenaga gas (PLTG), tenaga nuklir (PLTN) dan lainnya. Sistem pembangkit berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik dengan cara mengkonversi energi primer seperti energi mekanik, termal, atau kimia, menjadi energi listrik yang dapat digunakan. Dalam penelitian ini sistem pembangkitan kapasitas yang besar didapatkan dari pembangkit yang menggunakan generator sinkron. Generator sinkron biasa dipakai dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) adalah generator yang menghasilkan frekuensi konstan meskipun beban berubah-ubah, hal ini dikarenakan generator sinkron dilengkapi dengan governor. Generator merupakan bagian terpenting dari proses pembangkitan yang ditunjang dengan beberapa komponen lainnya untuk meningkatkan kehandalan dalam kerjanya. Dalam prosesnya generator sinkron membuat kumparan medan mendapat *supply* dari sumber dc yang akan menghasilkan medan magnet bila bergerak relatif terhadap kumparan jangkar akan menginduksikan tegangan pada kumparan jangkar.



Dalam penelitian pada pembangkit listrik tenaga bayu tenaga pembangkit yang dapat mengubah rotasi dari pisau turbin menjadi arus listrik dengan menggunakan generator adalah angin. Angin merupakan udara yang bergerak disebabkan oleh adanya perbedaan tekanan udara, Udara akan mengalir dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah. Pembangkit listrik angin sangat ramah terhadap lingkungan dan menghasilkan energi listrik yang sangat berlimpah. Saat ini di provinsi Sulawesi selatan terdapat pembangkit listrik tenaga angin di daerah Sidrap. Pembangunan pembangkit listrik tenaga angin dalam sistem tenaga listrik Sulselrabar diharapkan mampu menopang kebutuhan energi listrik yang dibutuhkan sistem yang telah terinterkoneksi pada sistem kelistrikan provinsi Sulawesi selatan, tenggara dan barat.



Gambar 2.2 Pembangkit listrik tenaga angin  
(Eksplorasi , 2017)

Adapun faktor terjadinya angin seperti yang disebutkan di bawah ini

### **2.2.1 Gradien Barometris**

Bilangan yang menunjukkan perbedaan tekanan udara dari dua isobar yang jaraknya 111 km. Makin besar gradien barometrisnya, makin cepat tiupan anginnya.

### **2.2.2 Letak Tempat**

Kecepatan angin di dekat khatulistiwa lebih cepat dari yang jauh dari garis khatulistiwa.

### 2.2.3 Tinggi Tempat

Semakin tinggi tempat semakin kencang pula angin yang bertiup. Hal tersebut disebabkan oleh pengaruh gaya gesekan yang menghambat laju udara. Di permukaan bumi, gunung, pohon, dan topografi yang tidak rata memberikan gaya gesekan yang besar. Semakin tinggi tempat maka gaya gesekan semakin kecil.

### 2.2.4 Waktu

Waktu yang telah diamati yaitu pada siang hari angin bergerak lebih cepat daripada di malam hari.

Oleh karena itu untuk menghasilkan suatu energi perlu diketahui klasifikasi dan kondisi angin yang dapat menggerakkan turbin sehingga menghasilkan energi listrik dapat kita lihat pada tabel berikut.

Tabel 1. Kondisi angin

Kelas angin	Kecepatan angin m/s	Kecepatan angin km/h	Kecepatan angin Knot/h
1	0,3–1,5	1–5,4	0,58–2,92
2	1,6–3,3	5,5–11,9	3,11–6,42
3	3,4–5,4	12,0–19,5	6,61–10,5
4	5,5–7,9	19,6–28,5	10,7–15,4
5	8,0–10,7	28,6–38,5	15,5–20,8
6	10,8–13,8	38,6–49,7	21–26,8
7	13,9–17,1	49,8–61,5	2,7–33,3
8	17,2–20,7	61,6–74,5	33,5–40,3
9	20,8–24,4	74,6–87,9	40,5–47,5
10	24,5–28,4	88–102,3	47,7–55,3
11	28,5–32,6	102,4–117	55,4–63,4
12	>32,6	>118	63,4

Dibawah ini merupakan tabel yang dapat menunjukkan tingkat kecepatan angin yang memiliki kelas yang berbeda – beda dengan tingkat kecepatan angin adalah 10 meter diatas permukaan tanah seperti dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Tingkat Kecepatan angin

Kelas angin	Kecepatan angin (m/s)	Kondisi alam di daratan
1	0,00 – 0,02	_____
2	0,3 – 0,5	Angin tenang, asap lurus ke atas
3	1,6 – 3,3	Asap bergerak mengikkuti arah angin
4	3,4 – 5,4	Wajah terasa ada angin, daun–daun bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak.
5	5,5 – 7,9	Debu jalan, kertas bertebaran, ranting pohon bergoyang
6	8,0 – 10,7	Debu jalan, kertas bertebaran, ranting pohon bergoyang
7	10,8 – 13,8	Ranting pohon besar bergoyang
8	13,9 – 17,1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa ditelinga.
9	17,2 – 20,7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan menghadap kearah angin terasa berat.
10	20,8 – 24,4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh.
11	24,5 – 29,4	Dapat merubuhkan pohon dan menimbulkan kerusakan.
12	29,5 – 32,6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32,7 – 26,9	Tornado

Energi angin yang dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik yang dihasilkan PLTB berada pada kelas 3 untuk batas minimum dan kelas 6 untuk batas maksimum. Untuk Pembangunan pembangkit listrik tenaga angin diperkirakan telah meningkat 20–30% setiap tahunnya. Teknologi PLTB saat ini dapat mengubah energi gerak angin menjadi energi listrik dengan efisiensi rata-rata 30–40%, karena selalu ada energi kinetik yang tersisa di angin, karena kecepatan angin turbin tidak boleh nol. Berdasarkan data WWEA (*World Wind Energy Association*), diperkirakan sebelum tahun 2007 energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin adalah 93,85 gigawatt, yang menghasilkan lebih dari 1% dari seluruh listrik di dunia. Amerika, Spanyol dan Cina adalah negara–negara terkemuka dalam penggunaan energi angin. Pada tahun 2010, total kapasitas tenaga angin global diperkirakan mencapai 170 GW.

Dalam pembangkit listrik, terdapat beberapa rumus dasar yang penting dalam analisis dan perhitungan data. Berikut ini adalah beberapa rumus dasar yang umum digunakan:

a. Rumus Daya Aktif (P):

$$P = V \cdot I \cos \theta \quad (4)$$

Di mana P adalah daya aktif, V adalah tegangan, I adalah arus, dan  $\theta$  adalah sudut fase antara tegangan dan arus.

b. Rumus Daya Reaktif (Q):

$$Q = V \cdot I \sin \theta \quad (5)$$

Di mana Q adalah daya reaktif, V adalah tegangan, I adalah arus, dan  $\theta$  adalah sudut fase antara tegangan dan arus.

c. Rumus Daya Semu (S):

$$S = V \cdot I \quad (6)$$

Di mana S adalah daya semu, V adalah tegangan, dan  $I^*$  adalah konjugat kompleks dari arus.

d. Rumus Faktor Daya (*Power Factor*):

$$PF = \cos(\theta) \quad (7)$$

Di mana PF adalah faktor daya dan  $\theta$  adalah sudut fase antara tegangan dan arus.

e. Rumus Efisiensi (*Efficiency*):

$$\text{Efisiensi} = (\text{Daya keluaran}/\text{Daya masukan})100\% \quad (8)$$

Di mana Daya Keluaran adalah daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit, dan Daya Masukan adalah daya bahan bakar atau daya mekanik yang dikeluarkan untuk menghasilkan daya listrik.

f. Rumus Energi (*Energy*):

$$\text{Energi} = \text{Daya} \times \text{Waktu} \quad (8)$$

Di mana Energi adalah jumlah energi yang dikonsumsi atau dihasilkan oleh pembangkit dalam periode waktu tertentu, Daya adalah daya listrik yang dihasilkan atau dikonsumsi, dan Waktu adalah periode waktu yang dianalisis.

g. Rumus Hukum Ohm:

$$V = IR \quad (9)$$

Di mana V adalah tegangan, I adalah arus, dan R adalah resistansi dalam sirkuit.

h. Rumus Hukum Kirchhoff:

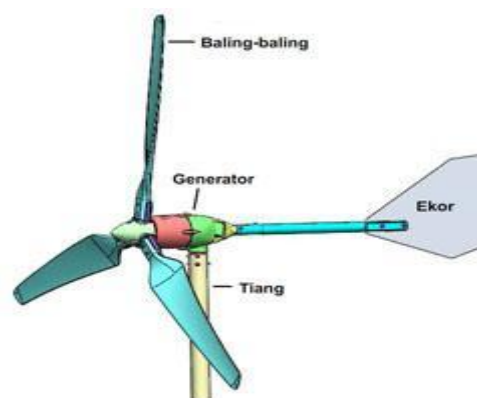
$$\sum I = 0 \quad (10)$$

Di mana  $\sum I$  adalah jumlah aliran arus yang masuk dan keluar dari simpul dalam rangkaian.

Rumus-rumus ini hanya beberapa contoh rumus dasar yang sering digunakan dalam pembangkit listrik. Terdapat juga rumus-rumus lain yang spesifik tergantung pada jenis pembangkit dan analisis yang dilakukan.

### 2.3 Turbin Angin

Turbin angin adalah alat untuk mengubah energi kecepatan angin menjadi energi mekanik yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Sistem produksi energi angin ini dirancang untuk mengubah energi angin menjadi tenaga listrik, yang kemudian digunakan untuk mengisi baterai. Inverter DC-AC digunakan untuk mengubah energi listrik DC dari baterai menjadi energi listrik AC, siap digunakan untuk penerangan rumah. Spesifikasi daya keluaran yang dihasilkan oleh sistem pembangkit listrik ini ditujukan untuk penggunaan sederhana di rumah.



Gambar 2.3 Turbin angin

(Greeners , 2017)

Di dalam turbin angin salah satu komponen utama adalah rotor. Rotor ini berfungsi mengkonversi gerakan linier angin menjadi gerakan berputar pada sudut turbin. Rotor dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsi gaya aerodinamis dan berdasarkan bentuk atau konstruksi rancangan rotor. Merujuk pada gaya utama yang menyebabkan rotor berputar berdasarkan fungsi gaya aerodinamis rotor terbagi menjadi dua yaitu :

### 2.3.1 Rotor tipe *drag*

Tipe *drag* pada rotor adalah gaya aerodinamika yang berlawanan arah dengan gerakan rotor. *Drag* terjadi karena ada gesekan antara udara dan permukaan rotor yang menghasilkan resistensi terhadap gerakan rotor. Gaya *drag* berusaha untuk menghambat gerakan rotor. Hambatan ini tergantung pada sudut serang (*angle of attack*) rotor, kecepatan putar rotor, serta profil dan geometri rotor itu sendiri. Dengan kata lain Memanfaatkan efek gaya hambat atau *drag* sebagai gaya penggerak rotor.

### 2.3.2 Rotor tipe *lift*

Tipe *lift* pada rotor adalah gaya aerodinamika yang berlawanan dengan gravitasi dan berperan dalam menghasilkan gaya angkat yang dibutuhkan untuk mengangkat pesawat atau helikopter. *Lift* dihasilkan oleh perbedaan tekanan antara atas dan bawah permukaan rotor. Hal ini terjadi karena rotor berputar dan menciptakan aliran udara yang cepat di atas permukaan atas rotor dan aliran udara yang lambat di bawah permukaan rotor. Perbedaan tekanan ini menciptakan gaya angkat yang memungkinkan rotor untuk menghasilkan daya angkat. Memanfaatkan efek gaya angkat sebagai gaya penggerak rotor, gaya ini terjadi akibat tegangan yang melewati profil rotor.

Berdasarkan bentuk rotor turbin angin dibagi menjadi dua yaitu turbin angin sumbu mendatar (*horizontal axis wind turbine*) dan turbin angin vertikal (*vertical axis wind turbine*). turbin angin dengan poros vertikal dapat mengantisipasi kelemahan dari angin sebagai sumber energi yaitu arah dan kecepatannya yang berubah-ubah, Turbin angin ini akan memberikan tenaga listrik yang tidak terlalu besar, namun karena kesederhanaannya akan membuatnya cocok sekali untuk digunakan sebagai pemenuhan kebutuhan rumah tangga, terutama di daerah-daerah yang terpencil, dimana listrik belum menjangkau secara maksimal. Sedangkan Turbin angin sumbu horizontal memiliki beberapa komponen utama yang dapat dilihat secara fisik seperti : Generator, menara, baling-baling/sayap, buritan dan kap mesin. Umumnya kincir angin sumbu horizontal dengan generator AC 3 fasa yang

dikembangkan di Indonesia memiliki batas kecepatan angin minimum dan maksimum untuk mengoperasikannya.

Hal ini karena desain awal sistem konversi energi angin tipe kincir angin harus didasarkan pada data potensi kecepatan angin yang tersedia di suatu daerah. Dalam keadaan dimana potensi kecepatan angin di setiap daerah berbeda dengan daerah lainnya, maka kincir angin ini tidak dapat ditempatkan pada daerah yang tidak sesuai dengan desain kincir angin tersebut. Energi angin memutar dua atau tiga bilah dalam turbin angin tepatnya disekitar rotor. Rotor terhubung ke poros generator, baik melalui kotak *gear* atau langsung. Setelah itu poros pada generator listrik akan berputar dan saat itulah generator menghasilkan energi listrik. Tenaga listrik yang dihasilkan melalui sistem konversi daya kemudian ke jaringan. Peningkatan daya reaktif yang diserap oleh generator akan menyebabkan kurangnya pemulihan tegangan, setelah penurunan tegangan terjadi. Kurangnya pemulihan profil tegangan yang cepat juga juga dapat menyebabkan ketidakstabilan kecepatan rotor. Jika terjadi gangguan atau penurunan tegangan pada terminal stator generator turbin angin, maka torsi listrik akan berkurang sedangkan torsi mekanik masih ada karena angin terus bertiup.

Kondisi ini akan menyebabkan kecepatan rotor meningkat. Jika penurunan tegangan ini berlanjut, maka dapat menyebabkan kecepatan rotor meningkat. Jika penurunan tegangan ini berlanjut, maka dapat menyebabkan kecepatan rotor turbin berakselerasi dan kecepatan rotor tidak stabil. Dalam penelitian ini sistem pada LVRT turbin angin akan ditingkatkan dengan alat FACTs yaitu STATCOM.

## **2.4 Generator**

Dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), generator adalah perangkat yang mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi listrik. Generator dalam PLTB biasanya berupa generator sinkron, yang terdiri dari rotor dan stator. Rotor dihubungkan ke baling-baling turbin angin,

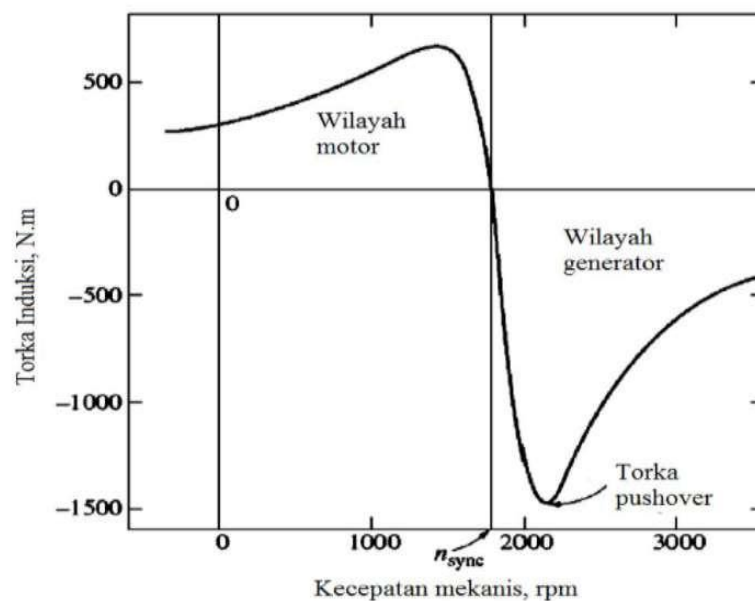


yang berputar karena angin, sedangkan stator terletak di sekitar rotor dan terhubung ke jaringan listrik. Ketika rotor berputar, medan magnet yang dihasilkan di dalamnya memotong gulungan kawat di stator, menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian diatur dan diubah tegangan dan frekuensinya agar sesuai dengan kebutuhan jaringan listrik. Generator dalam PLTB memiliki peran penting dalam menghasilkan energi bersih dan berkelanjutan dari sumber daya alam yang terbarukan, yaitu angin. Sedangkan generator dalam pembangkit berada pada keadaan *lagging* dimana fasa antara tegangan dan arus menjadi tertinggal. Arus mengalami tertinggal karena beban menghasilkan fluks magnetik yang tertinggal di belakang tegangan saat melewati kumparan induktif. Hal ini menyebabkan sudut fasa antara tegangan dan arus menjadi positif atau lebih besar dari nol. Ketika generator menghadapi kondisi *lagging*, daya reaktif yang dihasilkan oleh generator cenderung lebih besar dari daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban. Oleh karena itu, generator dalam keadaan *lagging* harus menghasilkan daya reaktif tambahan untuk mengimbangi kelebihan daya reaktif tersebut. Untuk mengatasi kondisi *lagging*, generator dapat dikompensasi dengan menggunakan perangkat seperti kapasitor atau STATCOM (*Static Synchronous Compensator*). Kapasitor digunakan untuk menyediakan daya reaktif kapasitif yang dapat mengimbangi daya reaktif induktif beban. Jenis generator pada pembangkit antara lain :

#### **2.4.1 Generator asinkron**

Generator asinkron atau disebut juga generator induksi, adalah generator listrik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Generator asinkron terdiri dari dua bagian utama, yaitu rotor dan stator. Rotor terdiri dari sejumlah lilitan kawat yang dipasang di sekitar inti besi, sedangkan stator terdiri dari lilitan kawat yang dipasang di sekitar inti besi yang berbeda. Prinsip kerja generator asinkron adalah ketika rotor diputar oleh suatu sumber daya listrik, maka medan magnet yang dihasilkan oleh rotor akan menginduksi medan listrik pada stator. Medan listrik tersebut akan mendorong arus listrik pada stator, sehingga menghasilkan daya listrik pada

beban yang terhubung ke generator. Dari kurva karakteristik antara kecepatan dan kopel motor induksi dapat dilihat, jika sebuah motor induksi dikendalikan agar kecepatannya lebih besar daripada kecepatan sinkron oleh penggerak mula, maka arah kopel yang terinduksi akan terbalik dan akan beroperasi sebagai generator. Semakin besar kopel pada penggerak mula, maka akan membesar pula daya listrik yang dihasilkan.



Gambar 2.4 Karakteristik kopel–kecepatan mesin induksi  
(Fadli ,2021)

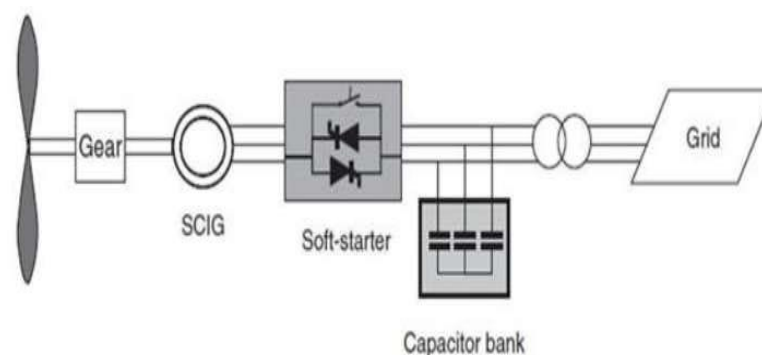
Dalam hal penggunaannya, generator induksi banyak memiliki Batasan yang membuatnya memiliki kelemahan–kelemahan, seperti :

- Tidak dapat menghasilkan daya reaktif, bahkan sebaliknya, generator induksi mengkonsumsi daya reaktif, sehingga diperlukan sumber daya reaktif eksternal untuk menjaga keberadaan medan magnet stator.
- Pengontrolan tegangan harus juga dilakukan oleh sumber daya reaktif tersebut, dikarenakan tidak ada arus medan, sehingga generator induksi tidak dapat mengontrol tegangan keluarannya sendiri.
- Perubahan akibat tegangan dan frekuensi generator induksi sangat besar/bervariasi akibat adanya perubahan beban.

Hal-hal di atas yang menyebabkan generator induksi jarang digunakan kecuali untuk sumber daya alternatif, misalnya dengan penggerak kincir angin. Namun walaupun demikian, generator tersebut memiliki beberapa keuntungan dari kesederhanaannya, tidak memerlukan rangkain medan yang harus terus menerus diputar pada kecepatan tetap, serta sangat sedikit sekali perawatannya.

#### 2.4.2 Generator *squirrel cage inductor*

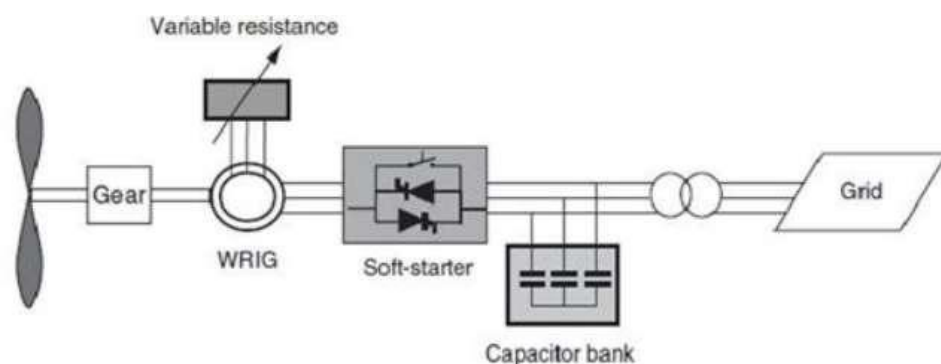
*Squirrel-cage inductor* generator adalah varian dari *squirrel-cage* generator yang memiliki tambahan induktor pada rangkaian rotor-nya. Rotor generator ini terdiri dari sebuah inti besi yang dilengkapi dengan kumparan sangkar tupai, seperti pada *squirrel-cage* generator biasa, tetapi juga memiliki tambahan induktor kawat yang terletak pada poros rotor. Induktor pada *squirrel-cage inductor* generator berfungsi untuk menghasilkan medan magnetik sendiri pada rotor, yang pada akhirnya dapat meningkatkan arus rotor dan menghasilkan daya listrik yang lebih besar pada stator. Induktor tersebut terhubung dengan ring penghubung pada ujung-ujung kumparan sangkar tupai rotor. Dalam konfigurasi ini motor induksi sangkar tupai (*Squirrel cage induction motor*) terhubung langsung dengan angin melalui trafo. Sebuah kapasitor bank didalamnya untuk kompensasi daya reaktif dan *soft starter* (starting lembut) digunakan untuk koneksi jaringan yang mulus. Hal ini tidak mendukung pengontrolan kecepatan apapun yang menjadi kelemahan utama.



Gambar 2.5 Turbin angin SCIG  
(Fadli , 2021)

### 2.4.3 Wound Rotor Induction Generator (WRIG)

*Wound Rotor Induction Generator* (WRIG) adalah jenis generator listrik asinkron yang memiliki rotor berlilitan kawat yang dapat disambungkan ke sumber listrik eksternal. Pada WRIG, rotor berbentuk silinder yang terdiri dari inti besi dan lilitan kawat yang dihubungkan ke slip ring (ring penghubung) pada ujung-ujungnya. Sama seperti pada motor induksi, stator pada WRIG menghasilkan medan magnetik yang berputar. Ketika rotor berputar di dalam medan magnetik ini, rotor akan menghasilkan tegangan yang terinduksi pada lilitannya dan menghasilkan arus listrik. Arus listrik pada lilitan rotor dapat disambungkan ke slip ring dan kemudian dialirkan ke sumber listrik eksternal seperti baterai atau sistem grid. Generator Induksi Rotor Belitan. Konsep *variable speed* digunakan pada tipe ini. Pada tipe jenis turbin ini Generator induksi Rotor Luka (*Wound Rotor Induction Generator*) langsung dihubungkan ke grid/jaringan. Variable rotor resistance untuk mengendalikan slip dan keluaran daya generator. Starting lembut (*soft starter*) digunakan untuk mereduksi arus masuk (*inrush current*) dan kompensator daya reaktif digunakan untuk menghilangkan permintaan daya reaktif. Rentang kecepatan terbatas, kontrol daya aktif dan reaktif yang buruk, daya slip hilang pada tahanan geser (*variable resistance*) karena rugi adalah kerugian konfigurasi ini.

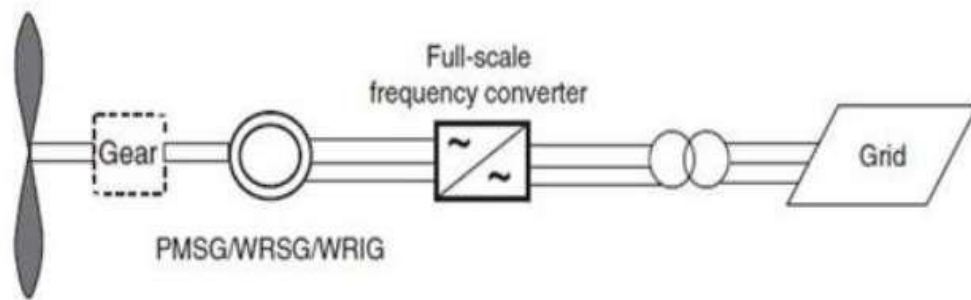


Gambar 2.6 Turbin angin WRIG  
(Fadli , 2021)

#### 2.4.4 Generator sinkron

Generator sinkron (*synchronous generator*) adalah suatu jenis generator listrik yang menghasilkan energi listrik dengan memanfaatkan prinsip elektromagnetik. Generator sinkron bekerja dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan medan magnet yang berputar di dalam kumparan penghasil listrik. Prinsip kerja generator sinkron didasarkan pada hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik, di mana ketika suatu kumparan ditempatkan di dalam medan magnet yang berubah-ubah, maka akan terjadi arus listrik yang mengalir melalui kumparan tersebut. Dalam generator sinkron, medan magnet dihasilkan oleh rotor yang berputar di dalam stator yang tidak bergerak. Ketika rotor diputar, medan magnet yang dihasilkan akan mengalir melalui kumparan stator dan menghasilkan arus listrik. Mesin serempak disebut juga sebagai mesin sinkron, yang berdasarkan konversinya terdiri atas dua jenis; yaitu sebagai generator dan motor. Mesin sinkron ini bekerja dengan kondisi putaran medan kumparan jangkarnya (pada stator) dan putaran kumparan medannya (rotor) adalah sama (sinkron), slipnya = 0%. Generator sinkron disebut juga sebagai alternator, dan umumnya merupakan mesin listrik 3 fasa.

Generator sinkron yang biasa dipakai pada pembangkit listrik tenaga angin adalah *Permanent Magnet synchronous Generator* (PMSG) karena efisiensinya yang tinggi dan keandalannya yang baik. Dalam PMSG, medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen pada rotor mengalir melalui kumparan di stator untuk menghasilkan arus listrik. Prinsip kerja ini sama dengan generator sinkron konvensional, hanya perbedaannya terletak pada penggunaan magnet permanen sebagai sumber medan magnet, bukan sumber medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir melalui koil medan seperti pada generator sinkron konvensional. Generator terhubung ke jaringan melalui konverter frekuensi skala penuh seperti pada Gambar 2.7 Konverter frekuensi membantu untuk mengontrol daya aktif dan reaktif yang disalurkan oleh generator ke jaringan.



Gambar 2.7 Turbin angin PMSG

(Fadli , 2021)

## 2.5 STATCOM

Unsur–unsur inti dari Sistem Tenaga AC mencakup generator, transmisi (termasuk subtransmisi), jaringan distribusi, serta beban beserta peralatan pendukung dan proteksinya. Generator merujuk pada mesin sinkron yang berputar, sedangkan transmisi, subtransmisi, dan jaringan distribusi pada dasarnya merupakan komponen–komponen yang terhubung dan dirancang untuk mendistribusikan tenaga listrik. Komponen ini, terutama dalam transmisi, memiliki karakteristik yang dominan dalam hal rangkaian reaktif dan dioperasikan pada tegangan bolak–balik (*alternating voltage*) tinggi, menengah, dan rendah. Sementara itu, beban dalam sistem ini dapat berupa beban sinkron, non–sinkron, atau pasif, dengan kecenderungan untuk mengonsumsi daya aktif (nyata) dan daya reaktif sesuai kebutuhan sistem. Dalam sistem kelistrikan, daya aktif dan daya reaktif dikendalikan oleh tegangan atau perbedaan sudut fasa antara sisi pengirim dan sisi penerima. Impedansi saluran transmisi juga dapat digunakan untuk mengatur daya aktif dan daya reaktif.

Secara umum, STATCOM dapat memperbaiki faktor daya dan kestabilan sistem tenaga listrik. STATCOM dapat memberikan lebih banyak daya reaktif kapasitif daripada kompensator variabel statis tipikal selama kesalahan atau ketika tegangan sistem turun secara tidak normal. STATCOM biasanya dipasang untuk mendukung jaringan listrik dengan faktor daya tinggi dan pengaturan voltase yang sering buruk. STATCOM adalah perangkat berbasis konverter sumber tegangan (VSC) dengan sumber

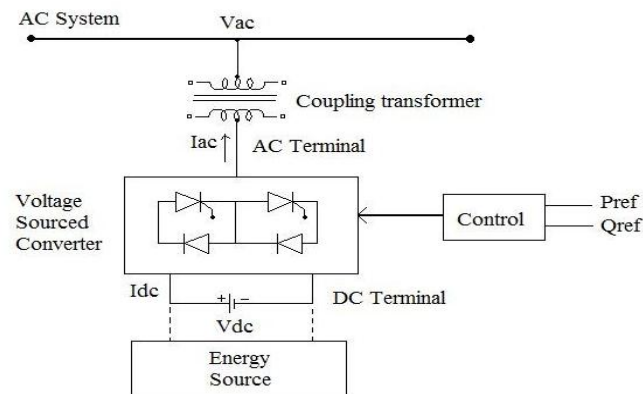
tegangan di belakang koil. Sumber tegangan terdiri dari kapasitor DC dan oleh karena itu STATCOM memiliki daya nyata yang sangat kecil. Namun, daya aktif dapat ditingkatkan jika perangkat penyimpanan energi yang sesuai dihubungkan ke kapasitor DC. Daya reaktif terminal STATCOM bergantung pada amplitudo pada sumber tegangan listrik. STATCOM dilengkapi dengan sistem daya aktif dan reaktif untuk mengatur output generator induksi. Ketika sistem tegangan naik, STATCOM menyerap daya reaktif. STATCOM juga berfungsi sebagai penyedia *Volt Amp Reactive* (VAR) untuk menjaga kestabilan tegangan pada jaringan transmisi yang berukuran panjang dan berbeban tinggi (*heavily loaded*). Prinsip operasional STATCOM digambarkan dalam persamaan berikut :

$$P = \frac{v_s v_c \sin \delta}{X_L} \quad (11)$$

$$Q = \frac{v_s (v_s - v_c) \sin \delta}{X_L} \quad (12)$$

$$S = 3 \frac{v_s v_c}{X_L} \sin \delta - j3 \left( \frac{v_s v_c}{X_L} \cos \delta - \frac{v_s^2}{X_L} \right) = P - jQ \quad (13)$$

STATCOM terdiri dari beberapa bagian yaitu *Voltage source converter* (VSC), kapasitor DC dan sistem kontrol. VSC ialah peralatan elektronika daya yang berguna untuk mengkonversi tegangan masukan DC menjadi tegangan keluaran AC. Kapasitor DC berguna sebagai sumber tegangan untuk sistem kontrol STATCOM dan sebagai penyimpanan energi (pada saat menyerap daya reaktif) dan sumber daya (pada saat menyuplai daya reaktif). Sistem yang berguna untuk mendeteksi arus dan tegangan pada sistem dan akan mengirimkan sinyal kepada VSC untuk menyuplai atau menyerap daya reaktif apabila terjadi perubahan tegangan. Selain itu, STATCOM memungkinkan koreksi faktor daya, pengendalian daya reaktif, redaman ayunan daya frekuensi rendah dengan modulasi daya reaktif, penyingkapan harmonik, mitigasi kedipan, dan peningkatan kualitas daya.



Gambar 2.8 Blok diagram *Static Synchronous Compensator* (STATCOM)

(D.K Sharma , 2011)

Pada gambar 2.8 diketahui bahwa Sistem pengukuran STATCOM terdiri dari pengukuran tegangan AC, pengukuran tegangan DC, dan pengukuran arus. Sistem pengukuran ini memiliki fungsi penting dalam mengukur komponen d (sumbu langsung) dan komponen q (sumbu kuadratur) dari arus dan tegangan urutan positif untuk keperluan pengendalian, termasuk pengendalian tegangan DC. Dalam sistem pengukuran, tegangan AC dan arus diukur untuk mendapatkan nilai amplitudo dan fasa dari komponen d dan q. Pengukuran tegangan DC penting untuk memantau dan mengendalikan tegangan pada level yang diinginkan. Dengan mengukur dan menganalisis komponen d dan q dari arus dan tegangan, sistem pengukuran memungkinkan pengendalian yang efektif terhadap tegangan DC dan parameter penting lainnya dalam sistem. Hal ini memungkinkan pengendali untuk memantau dan mempertahankan kinerja yang stabil dan sesuai dengan kebutuhan sistem.

Dalam blok diagram STATCOM Regulator tegangan AC menghasilkan keluaran berupa nilai referensi arus reaktif yang dihasilkan melalui perhitungan perbedaan antara tegangan terukur dan tegangan referensi. Nilai tegangan referensi ini kemudian akan digunakan oleh regulator arus untuk mengendalikan aliran daya reaktif dengan menggunakan arus dalam tegangan n. Prosesnya dimulai dengan regulator tegangan AC membandingkan tegangan terukur dengan nilai referensi tegangan yang



diinginkan. Perbedaan antara kedua tegangan ini dihitung dan dijadikan sebagai basis untuk menghasilkan nilai referensi arus reaktif. Selanjutnya, regulator arus menggunakan nilai referensi  $i_{qref}$  yang diberikan oleh regulator tegangan AC untuk mengendalikan aliran daya reaktif. Dengan menggunakan arus dalam tegangan  $n$  sebagai dasar kontrol, regulator arus dapat mengatur besarnya aliran daya reaktif dalam sistem. Dengan adanya keterkaitan antara regulator tegangan AC dan regulator arus, sistem mampu mengontrol dan menjaga aliran daya reaktif yang diinginkan dalam jaringan kelistrikan. Hal ini penting untuk menjaga kualitas dan stabilitas sistem tenaga listrik serta memastikan bahwa daya reaktif yang dihasilkan sesuai dengan kebutuhan sistem.

Sedangkan penggunaan Regulator tegangan DC menghasilkan keluaran berupa nilai referensi arus tegangan sefasa yang diperoleh melalui perhitungan perbedaan antara tegangan terukur dan tegangan referensi. Nilai tegangan referensi ini selanjutnya akan digunakan oleh regulator arus untuk mengatur aliran daya aktif dengan menggunakan arus sefasa. Prosesnya dimulai dengan regulator tegangan DC membandingkan tegangan terukur dengan nilai referensi tegangan yang diinginkan. Perbedaan antara kedua tegangan tersebut dihitung dan dijadikan dasar untuk menghasilkan nilai referensi arus tegangan sefasa. Selanjutnya, regulator arus menggunakan nilai arus referensi yang diberikan oleh regulator tegangan DC untuk mengendalikan magnitude dan fase dari tegangan yang akan dihasilkan oleh modulasi lebar pulsa (PWM) dari arus referensi. Regulator arus dinilai oleh regulator tipe feed forward yang memprediksi tegangan keluaran dari pengukuran tegangan sefasa. Dengan adanya keterkaitan antara regulator tegangan DC dan regulator arus, sistem dapat mengatur aliran daya aktif dengan tepat, baik dalam hal magnitude maupun fase tegangan yang dihasilkan. Hal ini penting untuk menjaga kualitas dan stabilitas sistem tenaga listrik serta memastikan bahwa aliran daya aktif sesuai dengan kebutuhan sistem.

Operasi STATCOM mirip dengan kompensator sinkron. Apakah tegangan yang dihasilkan Konverter kurang dari tegangan sistem transmisi, itu bertindak sebagai beban induktif, menyerap daya reaktif dari jaringan. Sebaliknya, ketika tegangan keluaran Konverter lebih tinggi dari tegangan jaringan, STATCOM bertindak sebagai kapasitor, memberikan daya reaktif ke sistem. Perangkat ini beroperasi secara efektif ketika beban non-linear dan/atau tidak seimbang dihubungkan. Saat ini, perangkat ini telah berhasil digunakan di gardu induk jaringan listrik, karena memiliki waktu respons yang lebih cepat, struktur yang ringkas, rentang kompensasi yang lebih luas, dan tidak memerlukan permukaan yang luas untuk ditempatkan. Daya reaktif pada STATCOM dapat dilihat antara lain :

1. Meningkatkan faktor daya: Dengan mengimbangi kelebihan atau kekurangan daya reaktif dalam sistem, STATCOM membantu meningkatkan faktor daya yang merupakan rasio antara daya aktif dan daya semu dalam sistem.
2. Stabilisasi tegangan: STATCOM dapat membantu dalam menjaga tegangan sistem yang stabil dengan mengendalikan aliran daya reaktif dan mengimbangi perubahan tegangan yang disebabkan oleh fluktuasi beban.
3. Mengurangi kerugian daya: Dengan mempertahankan faktor daya yang baik, STATCOM membantu mengurangi kerugian daya yang terjadi dalam sistem tenaga listrik.
4. Penyediaan daya reaktif instan: STATCOM mampu menyediakan atau menyerap daya reaktif dalam waktu yang sangat cepat, sehingga dapat merespons perubahan beban dengan cepat.

Adapun bagaimana Daya reaktif dapat membantu mengatasi gangguan dalam sistem kelistrikan dengan beberapa cara sebagai berikut:

1. Dengan mengimbangi ketidakseimbangan daya reaktif yang terjadi akibat gangguan dapat menjaga tegangan tetap stabil, sistem kelistrikan dapat berfungsi dengan baik dan mencegah kerusakan pada peralatan yang terhubung.

2. Dengan menyediakan daya reaktif yang tepat melalui komponen seperti *capacitor banks* atau *Static VAR Compensators (SVC)*, gangguan tersebut dapat dikompensasi dan tegangan dapat dipertahankan dalam rentang yang diinginkan.
3. Daya reaktif yang tepat dapat membantu dalam menjaga stabilitas frekuensi sistem dengan menyeimbangkan daya aktif dan reaktif. Dengan mempertahankan frekuensi dalam rentang yang diinginkan, sistem kelistrikan dapat beroperasi secara efisien dan andal.
4. Daya reaktif yang dikompensasi dengan tepat dapat membantu mengurangi beban jaringan dan menjaga kualitas daya yang baik. Dengan mengurangi beban jaringan, gangguan dapat dikendalikan dan risiko pemadaman dapat diminimalkan.

#### **2.6 Low Voltage Ride Through (LVRT)**

LVRT adalah kemampuan turbin untuk tetap terhubung ke jaringan selama adanya kondisi gangguan. Dengan meningkatnya produksi tenaga maka persentase terputusnya secara signifikan pada kapasitas pembangkit secara bersamaan dapat berdampak besar pada stabilitas jaringan. Pembangkit diharuskan untuk tetap beroperasi dan tidak terputus dari jaringan. LVRT yang diperlukan telah ditentukan dalam kode jaringan yang dikeluarkan oleh operator jaringan untuk menjaga stabilitas sistem, sehingga mengurangi risiko jatuhnya tegangan. Kode jaringan awalnya dikembangkan mengingat generator sinkron yang umumnya digunakan pada pembangkit listrik konvensional, sedangkan pembangkit listrik tenaga angin memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional. Jumlah daya reaktif yang akan dimasukkan tergantung pada persentase penurunan tegangan jaringan selama penurunan, arus pada sistem, dan daya reaktif yang diberikan ke jaringan selama kemunculan penurunan.

Persyaratan LVRT telah digunakan pada pembangkitan turbin uap dan gas melalui penggunaan bus listrik vital yang ditenagai oleh sumber daya DC dan dengan bus tambahan yang terhubung ke generator. Jenis pembangkit ini umumnya lebih tahan terhadap fluktuasi tegangan daripada generator turbin

angin. generator turbin angin biasanya dibiarkan beroperasi secara *offline* selama peristiwa tegangan rendah. Sebagai contoh, konsep keselamatan yang paling umum dari generator turbin angin adalah sistem baterai. Dengan jenis sistem ini dimungkinkan untuk memutar bilah turbin angin dari posisi operasi ke posisi parkir saat daya generator tidak tersedia.

Selama listrik mati, penggerak pitch dialihkan dari penggerak generator bertenaga ke penggerak bertenaga baterai hingga bilah mencapai posisi berhenti atau parkir. Posisi parkir biasanya ditentukan oleh batas akhir yang memutus motor dari baterai. Pergerakan sudu ke posisi parkir terjadi secara otomatis sebagai akibat dari gangguan tegangan atau frekuensi. Namun, hal ini tidak memenuhi persyaratan LVRT karena pembangkit angin dibiarkan beroperasi secara *offline*. Saat ini, spesifikasi generator turbin angin memerlukan koneksi dan sinkronisasi dengan jaringan listrik hingga level 70% dari tegangan pengenal. Persyaratan ini dapat diakomodasi melalui, misalnya, peningkatan kapasitas di berbagai komponen (motor, generator, konverter, dll.) dan dengan menggunakan catu daya tak terputus (UPS) untuk rangkaian kontrol sensitif. Namun, fluktuasi tegangan yang lebih parah, misalnya tegangan pada 15% tegangan pengenal tidak dapat diakomodasi dengan menggunakan teknik ini. Maka dari itu Persyaratan untuk *low voltage ride through* (LVRT) yaitu pembangkit dan turbin angin harus selalu terhubung pada jaringan sistem diatas *solid line*. Peningkatan daya aktif paling tajam ditemukan di Inggris Raya, metode *grid* yang dilakukan adalah daya aktif harus dinaikkan ke nilai pra-default dengan laju sama dengan 1 p.u. per detik.

### **2.7 Linear quadratic regulator (LQR)**

Sistem kontrol yang optimal membutuhkan adanya kriteria optimasi yang dapat meminimalkan penyimpangan hasil pengukuran perilaku sistem dari perilaku idealnya. LQR merupakan suatu metode untuk kendali optimal pada sistem linear dengan kriteria kuadratik untuk menyelesaikan permasalahan pada regulator. Dalam merancang pengontrol LQR pemilihan matriks pembobot merupakan masalah utama yang secara langsung

mempengaruhi upaya pengendalian. Pada pengujian sistem dengan pengendali LQR diawali dengan menentukan matriks diagonal Q untuk mengatur performance sistem dan matriks diagonal R untuk mengatur input sistem yang nantinya digunakan untuk mendapatkan *gain full state feedback* matriks K. Masalah LQR untuk mengontrol tegangan dalam sistem kontrol aktif disajikan dimana masalah kritisnya adalah memilih matriks bobot yang pada gilirannya menentukan kinerja sistem. Masalah LQR merupakan masalah regulator yang menunjukkan sistem *linier* dengan fungsi biaya kuadratik. Desain sistem sederhana LQR yaitu

Syntax

$$[K,S,e]=lqr(SYS,Q,R,N)$$

$$[K,S,e]=LQR(A,B,Q,R,N)$$

$$[K,S,e]=lqr(SYS,Q,R,N)$$

Merupakan cara untuk menghitung matriks perolehan optimal K. untuk sistem waktu yang berkesinambungan, hukum umpan balik keadaan yaitu

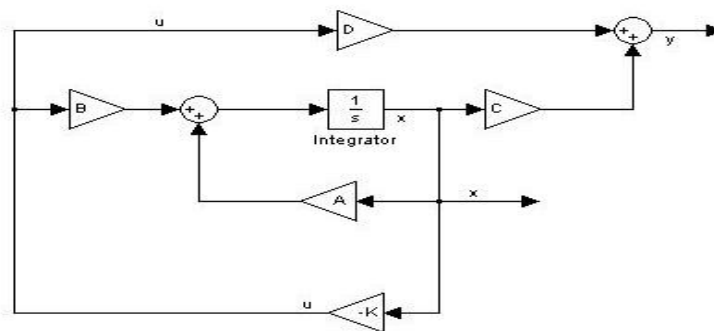
$$u = -Kx \quad (14)$$

Dapat meminimalkan fungsi biaya kuadrat. Pada perancangan pengendalian secara optimal sistem LQR terlebih dahulu menentukan matriks Q dan R yang digunakan untuk menentukan indeks performansi sistem. matriks Q dan R ditentukan sesuai dengan kriteria yang yang diperlukan dengan indeks performansi

$$J(t_0) = \frac{1}{2}x^2S(T)x(\tau) + \frac{1}{2}\int_{t_0}^{\tau} (x^2Q_x + U^2 Ru) \quad (15)$$

Dalam kontrol *loop* tertutup, kinerja sistem dapat ditingkatkan dengan pemilihan matriks dapat membuat umpan balik keadaan (K). Dalam metode penempatan tiang, nilai matriks perolehan umpan balik dapat dihitung berdasarkan lokasi tiang yang diinginkan. Meskipun mudah untuk menemukan matriks K secara matematis dengan metode penempatan tiang,

LQR lebih cocok untuk sistem *multi-input* dan orde tinggi. LQR mendefinisikan lokasi tiang yang optimal berdasarkan fungsi biaya dan memiliki sekumpulan persamaan diferensial yang menggambarkan jalur variabel kontrol yang meminimalkan fungsional biaya. Solusi optimal adalah menemukan input kontrol  $u_c$  untuk meminimalkan fungsi biaya kuadrat.



Gambar 2.9 Blok diagram LQR sederhana

Pengontrol LQR ini dirancang untuk mengontrol kecepatan motor induksi 3 fasa. pada tahap implementasi dengan bantuan simulasi Matlab untuk mendapatkan bahan data rancangan LQR. Nilai determinan yang dapat diperoleh tidak sama dengan nol karena matriks keterkendalian memiliki *full rank* yaitu sebesar 4. Dengan demikian dapat disimpulkan sistem dapat dikendalikan. Adapun untuk matriks bobot adalah matriks Q dan R. Pemilihan matriks Q dan R dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*). Dengan syarat, matriks Q adalah matriks simetris, semidefinit positif dan *real* ( $Q > 0$ ). matriks Q adalah matriks diagonal dengan komponenkomponennya  $q$ , dan bila diadakan pemisahan akan diperoleh matriks identitas yang dikalikan dengan konstanta  $q$ . Penentuan dimensi matriks Q didasarkan pada jumlah state matriks A. matriks R adalah matriks diagonal dengan komponennya yaitu  $r$ , dan bila diadakan pemisahan akan diperoleh matriks identitas yang dikalikan dengan konstanta  $r$ . Sedangkan untuk mendapatkan nilai penguatan gain K, Anda harus terlebih dahulu memilih matriks bobot Q dan R. matriks bobot Q dan R dipilih

berdasarkan nilai residu relatif terkecil. Perhitungan residual relatif dapat dilakukan dengan *trial and error* dengan mengubah nilai matriks Q. Setelah mendapatkan nilai matriks Q dan matriks R maka nilai (*gain*) optimal K dapat diperoleh dengan memasukkan perintah LQR pada program Matlab.

## 2.8 Sistem Transmisi dan Distribusi

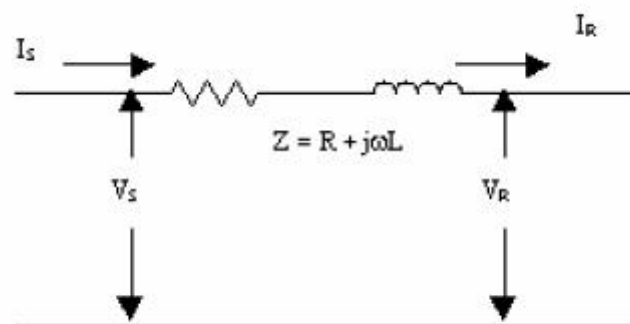
Sistem transmisi dan distribusi berfungsi menyalurkan daya listrik dari sistem pembangkit ke beban dengan melalui kawat penghantar. Karakteristik penyaluran daya (yaitu tegangan, arus dan hilang daya) dalam keadaan normal, lazim diasumsikan saluran transmisi dengan :

1. Rangkaian yang konstantanya didistribusikan
2. Rangkaian yang konstantanya dikonsentrasikan (saluran pendek)

Saluran transmisi dibagi menjadi 3 macam berdasarkan jarak atau panjang salurannya

### 2.8.1 Saluran transmisi jarak pendek

Pengaruh kapasitansi dan konduktansi bocor dapat diabaikan pada saluran pendek yang jaraknya kurang dari 80 km, maka saluran tersebut dapat dianggap sebagai rangkaian impedansi yang terdiri dari tahanan dan induktansi. Untuk memperjelas pemahaman rangkaian impedansi yang terdiri dari tahanan dan induktansi. Untuk memperjelas pemahaman rangkaian pengganti untuk saluran transmisi jarak pendek dapat dilihat pada gambar



Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen saluran pendek

Dengan demikian maka impedansi Z dan admitansi Y dinyatakan oleh :

$$Z = z_l = (r + jx) = R + jX \quad (16)$$

$$Y = y_l = (g + jb) = G + jB \quad (17)$$

Dengan :

$r$  = tahanan kawat (ohm/km)

$x$  = reaktansi kawat =  $2\pi f L$  (ohm/km)

$g$  = konduktifitas kawat (ohm/km)

$b$  = suspetansi kawat =  $2\pi f C$  (ohm/km)

Bila kondisi pada ujung penerimaan diketahui, maka hubungan antara tegangan dan arus dinyatakan oleh

$$E_s = E_r + IR \cos \varphi_r + IX \sin \varphi_r \quad (18)$$

Dengan regulasi tegangan

$$E_s - E_r / E_r = I / E_r (R \cos \varphi_r + X \sin \varphi_r) \quad (19)$$

Dengan :

$E_s$  = tegangan pada rangkaian pengiriman

$E_r$  = tegangan pada ujung penerimaan

$R$  = jumlah tahanan saluran (ohm)

$X$  = jumlah reaktansi saluran (ohm)

$\cos \varphi_r$  = faktor daya pada ujung penerimaan

$\sin \varphi_r$  = faktor daya buta pada ujung penerimaan

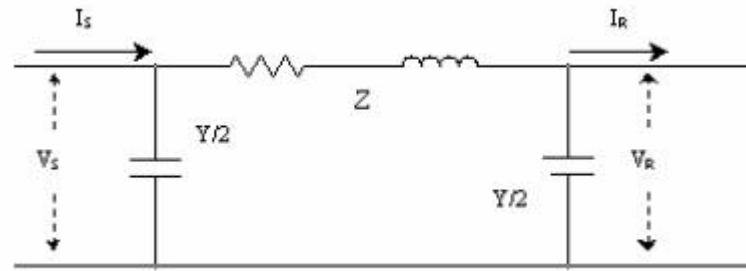
Sebaliknya jika kondisi pada sisi penerimaan diketahui maka :

$$E_r = E_s - (IR \cos \varphi_r + IX \sin \varphi_r) \quad (20)$$

### 2.8.2 Saluran transmisi jarak menengah

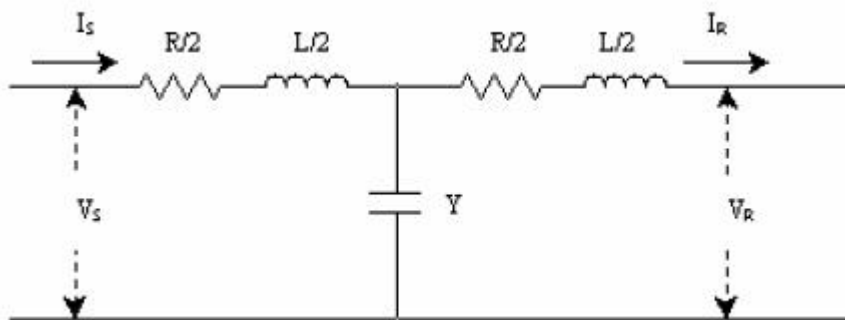
Saluran transmisi jarak menengah merujuk pada jenis saluran transmisi yang digunakan untuk mentransmisikan listrik dalam jarak yang sedang, Panjang saluran transmisi jarak menengah berkisar antara 80 km hingga 240 km. Saluran ini berfungsi untuk menghubungkan pembangkit listrik dengan pusat distribusi atau beban listrik yang lebih jauh. saluran transmisi jarak menengah dapat dilihat pada gambar berikut :





Gambar 2.11 Rangkaian  $\pi$  nominal (saluran menengah)

Saluran transmisi menengah nominal  $\pi$  merupakan saluran transmisi di mana kapasitansi terpusat pada dua titik dan impedansi seri terpusat pada satu titik. Sebagian dari rangkaian  $\pi$  yaitu rangkaian T dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 2.12 Rangkaian T nominal (saluran menengah)

Rangkaian T nominal sering digunakan dalam perencanaan, analisis, dan pemodelan sistem tenaga. Dengan menggunakan rangkaian ini, kita dapat menyederhanakan kompleksitas saluran transmisi jarak menengah dan memahami perilaku sistem dengan lebih baik. Hal ini memungkinkan kita untuk menghitung parameter penting seperti impedansi dan mengestimasi respons saluran terhadap sinyal listrik. Untuk rangkaian T persamaannya antara lain :

$$E_s = E_r(1 + ZY/2) + I_r Z(1 + ZY/4) \quad (21)$$

$$I_s = I_r(1 + ZY/2) + E_r Y \quad (22)$$

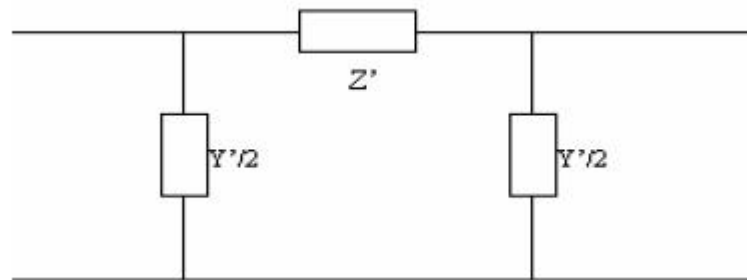
Untuk rangkaian  $\pi$  persamaannya adalah :

$$E_s = E_r(1 + ZY/2) + I_r Z \quad (23)$$

$$I_s = (1 + ZY/2) + E_r Y(1 + ZY/4) \quad (24)$$

### 2.8.3 Saluran transmisi panjang

Rangkaian ekivalen transmisi jarak panjang (lebih dari 240 km) terlihat pada gambar . tetapi untuk membedakan dengan rangkaian  $\pi$  nominal saluran jarak menengah dinamakan cabang seri rangkaian  $\pi$  ekivalen dengan  $Z$  dan cabang shuntnya dengan  $Y/2$  sehingga dengan memasukan nilai  $Z$  dan  $Y/2$  pada persamaan akan menghasilkan tegangan pada ujung pengirim rangkaian ekivalen dengan cabang–cabang seri dan shunt serta tegangan dan arus pada ujung penerimaan sebagai suku–sukunya.



Gambar 2.13 Rangkaian  $\pi$  ekivalen (saluran panjang)

$$E_s = (Z'Y'/2 + 1)E_p + Z'I_r \quad (25)$$

Dengan

$$Z' = Z \sinh \gamma l$$

$$Z' = Z/Y \sinh \gamma l = z_l \sinh \gamma l / y$$

$$Z' = Z \sinh \gamma l / \gamma l$$

Dengan :

$Z = z_l =$  impedansi seri total dari saluran

$Z =$  impedansi seri per satuan panjang penghantar

$Y =$  admitansi paralel per satuan panjang penghantar

$\sinh \gamma l / \gamma l =$  faktor pengali bagi impedansi seri  $\pi$  – nominal untuk mengubahnya menjadi  $\pi$  – ekivalen.

## 2.9 Sistem *Direct Quadrature* (dq–DQ)

Transformator dq–DQ adalah metode transformasi koordinat yang digunakan dalam analisis sistem tenaga listrik untuk mempermudah perhitungan dan analisis sistem dalam domain dq. Transformasi ini berguna dalam menganalisis sistem dengan sifat–sifat simetri dalam sistem tenaga listrik tiga fasa. Transformasi dq–DQ melibatkan konversi antara koordinat dua fasa (dq) ke koordinat tiga fasa (DQ). Dalam koordinat dq, d (komponen aksial) dan q (komponen kuadratur) mengacu pada sumbu referensi yang diputar sejajar dengan medan magnetik dalam sistem. Sementara itu, dalam koordinat DQ, D (komponen langsung) dan Q (komponen kuadratur) mengacu pada sumbu referensi tetap yang sejajar dengan sumbu fasa sistem tiga fasa. Dengan menggunakan transformasi dq–DQ, sistem tiga fasa dapat dianalisis lebih mudah dan efisien dalam domain dq. Hal ini memungkinkan pemodelan dan analisis yang lebih sederhana dari sistem dengan menggunakan persamaan yang berlaku dalam domain dq, seperti persamaan ruang vektor dan persamaan fluks.

Rangkaian yang berisi transformator pemvariasi waktu tidak dapat dianalisis dengan berbagai teknik analisis rangkaian canggih seperti Transformasi Laplace hingga rangkaian tersebut diubah menjadi rangkaian invarian waktu yang sesuai. Seperti diketahui, sistem variasi waktu sinusoidal dapat diubah menjadi sistem invarian waktu dengan transformasi DQ. Transformasi sirkuit DQ digunakan untuk menganalisis penyearah *pulse width modulation* (PWM) arus terkontrol tiga fasa. Titik operasi DC dan fungsi transfer AC sepenuhnya ditentukan. Sebagian besar fitur konverter ditafsirkan dengan jelas sebagai berikut:

- a. Tegangan keluaran dapat dikontrol dari nol hingga maksimum
- b. Sistem ekuivalen dengan sumber arus ideal dalam keadaan tunak
- c. Sistem dapat digambarkan sebagai rangkaian linier
- d. Faktor daya input dapat dikontrol dalam rentang kendali tertentu

Transformasi *direct quadrature* dapat digunakan pula untuk menyederhanakan analisis rangkaian 3 fasa. Dalam penerapannya sirkuit 3 fasa seimbang dan dapat mengurangi jumlah AC menjadi 2 kuantitas. mulai dengan mencari Persamaan qd untuk jalur RL tiga fasa dengan kembaliannya ke ground. Dalam frame referensi qd yang berputar dengan kecepatan  $\omega$  yang bisa berubah-ubah, sudut  $\theta_q$  ditentukan dengan persamaan :

$$\theta_q(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta_q(0) \text{ rad} \quad (26)$$

Tegangan ujung pengirim dengan mengacu pada ground lokal diberikan oleh persamaan

$$v_{asgs} = i_a r_a + L_{aa} \frac{di_a}{Dt} + L_{ab} \frac{di_b}{Dt} + L_{ac} \frac{di_c}{Dt} + L_{ag} \frac{di_g}{Dt} + v_{argr} + v_{grgs} \quad (27)$$

Dengan menggunakan hubungan  $i_g = -(i_a + i_b + i_c)$ , penurunan tegangan melintasi tiga fasa dari jalur dapat diungkapkan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$[V_S][V_R] = [R][i]\rho[L][i] \quad (28)$$

Dimana :

$$[V_S] = \begin{bmatrix} v_{asgs} \\ v_{bsgs} \\ v_{csgs} \end{bmatrix} \quad [V_R] = \begin{bmatrix} v_{argr} \\ v_{brgr} \\ v_{crgr} \end{bmatrix} \quad [R] = \begin{bmatrix} r_a + r_g & r_g & r_g \\ r_g & r_b + r_g & r_g \\ r_g & r_g & r_b + r_g \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} + L_{gg} - 2L_{ag} & L_{ab} + L_{gg} - L_{bg} - L_{ag} & L_{ac} + L_{gg} - L_{cg} - L_{ag} \\ L_{ab} + L_{gg} - L_{ag} - L_{bg} & L_{bb} + L_{gg} - 2L_{bg} & L_{bc} + L_{gg} - L_{cg} - L_{bg} \\ L_{ac} + L_{gg} - L_{ag} - L_{cg} & L_{bc} + L_{gg} - L_{bg} - L_{cg} & L_{cc} + L_{gg} - 2L_{cg} \end{bmatrix} \quad (29)$$

## 2.10 State Of The Art

Penelitian –penelitian yang telah dilakukan berada pada tabel *state of the art* penelitian menunjukkan bahwa untuk memastikan kestabilan daya tidak diputuskan sambungannya dilapangan maka memberikan atau menarik daya reaktif lalu meningkatkan kestabilan rotor merupakan hal yang perlu dilakukan .

Tabel 3. *State of the art*

No.	Peneliti	Judul	Metode	Hasil
1	Marta Molinas, Jon Are Suul, Tore Undeland  (IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS)	<i>Low Voltage Ride Through of Wind Farms With Cage Generators: STATCOM Versus SVC</i>	Perbandingan kecepatan kritis dari metode kalkulasi dan simulasi Menggunakan sistem pertimbangan pada parameter seperti kecepatan tinggi dan pembersihan default	Pengaruh transien fluks pada kecepatan kritis saat pembersihan sesar berada dalam kisaran 5% untuk berbagai kompensasi reaktif. serta simulasi domain waktu terperinci didapatkan lebih besar; meski masih di bawah 10% –15%.
2	Ezzat, M., Benbouzid, M., Muyeen, S. M., & Harnefors, L.  (IEEE Industrial Electronics Society.)	<i>Low-Voltage Ride-Through Techniques for DFIG-Based Wind Turbines: State-of-the-Art Review and Future Trends</i>	Kontrol sudut pitch blade, yaitu Kontrol jarak hingga mencapai daya pengurangan dengan memutar setiap blade. Lalu umpan maju pada skema kontrol arus transien untuk konverter sisi rotor (RSC) dari DFIG dengan perlindungan crowbar.	mengurangi daya mekanis dan akibatnya membatasi kecepatan rotor dan daya reaktif konsumsi setelah adanya masalah. menghasilkan arus rotor transien minimum dan terjadinya gangguan crowbar minimum.

3	Calle–Prado, A., Alepuz, S., Bordonau, J., Nicolas–Apruzzese, J., Cortes, P., & Rodriguez, J.  (IEEE Transactions On Industry Applications)	<i>Model Predictive Current Kontrol of Grid–Connected Neutral–Point Clamped Converters to Meet Low Voltage Ride–Through Requirements</i>	Model Predictive Kontrol yakni sekumpulan teknik kontrol prediktif berdasarkan model dinamis	Kontrol prediktif yang diusulkan diterapkan pada konverter NPC sisi–grid menyediakan arus grid yang seimbang di bawah penurunan tegangan jaringan, secara bersamaan dengan pengaturan daya aktif dan reaktif yang tepat, memungkinkan untuk sepenuhnya memenuhi persyaratan LVRT.
4	Wen, G., Chen, Y., Zhong, Z., & Kang, Y.  (IEEE Transactions on Industry Applications),	<i>Dynamical Voltage and Current Assignment Strategies of Nine–Switch–Converter–Based DFIG Wind Power sistem for Low Voltage Ride Through (LVRT) under Symmetrical Grid Voltage Dip</i>	Optimasi sistem DFIG berbasis NSC	Dengan DVCA, sistem berbasis NSC dapat sepenuhnya memanfaatkan kapasitas ratingnya. Karena tidak diperlukan crowbar tambahan atau margin kapasitas, penggunaan kapasitasnya selalu lebih tinggi dan total kapasitas VA–nya selalu lebih kecil
5	Yuqing Jin, Daming Wu, Ping Ju, Christian Rehtanz, Feng Wu, Xueping Pan (IEEE)	<i>Modeling of Wind Speeds inside a Wind Farm with Application to Wind Farm Aggregate Modeling Considering LVRT Characteristic</i>	Metode pemodelan agregat Untuk menetapkan model agregat dari pembangkit angin berbasis DFIG	–Lebih meningkatkan akurasi model kombinasi kecepatan angin. –Mengoptimalkan lebih lanjut kendala yang digunakan untuk menentukan kecepatan angin secara acak –Memprediksi secara akurat WTG mana yang akan memasuki mode LVRT sangat penting

				untuk meningkatkan akurasi model agregat
6	Subashini Nallusamy, Dharmalingam Velayutham, Uma Govindarajan  (IET Power electronics)	<i>Design and implementation of a linear quadratic regulator controlled active power conditioner for effective source utilisation and voltage regulation in low-power wind energy conversion systems</i>	–Pengontrol PI digunakan Untuk mendapatkan tegangan keluaran yang diinginkan –Pengontrolan LQR mendefinisikan lokasi kutub yang optimal berdasarkan fungsi biaya	pengontrol yang digunakan membuat bentuk gelombang arus masukan menjadi sinusoidal dan sefasa dengan tegangan fasa yang sesuai. pengontrol tegangan bekerja secara efektif dan membawa tegangan keluaran ke referensi dengan tepat.
7	M. Ghafouri, U. Karaagac, H. Karimi, S. Jensen, J. Mahseredjian, S.O. Faried  (IEEE)	<i>An LQR Controller for Damping of Subsynchronous Interaction in DFIG-Based Wind Farms</i>	Regulator kuadrat linier (LQR) untuk redaman interaksi subsinkron (SSI) di pembangkit listrik tenaga angin berbasis generator induksi (DFIG).	Ketika output pengontrol redaman SSI diblokir selama operasi FRT. kinerjanya berkurang sedikit dibandingkan dengan pendekatan batasan dinamis yang diusulkan. Lalu DFIG memasok arus reaktif yang diinginkan selama gangguan
8	Hamed Habibi, Hamed Rahimi Nohooji, and Ian Howard  (IEEE)	<i>Adaptive PID Kontrol of Wind Turbines for Power Regulation with Unknown Kontrol Direction and Actuator Faults</i>	Metode kontrol PID yang dirancang terdiri dari dua bagian, yaitu bagian yang bervariasi waktu dan bagian konstan	metode yang diusulkan dapat digunakan di turbin angin lepas pantai untuk mengurangi kebutuhan pemeliharaan berulang dan mahal karena kesalahan pitch actuator.

9	Haijun Ren , Bin Hou, Gao Zhou, Li Shen, Chou Wei, Qi Li  (IEEE)	<i>Variable Pitch Active Disturbance Rejection Kontrol of Wind Turbines Based on BP Neural Network PID</i>	Metode pengukuran sudut pitch lalu Dalam loop umpan balik, pengontrol pitch BP–PID dirancang, yang menggunakan sinyal deviasi kecepatan rotor sebagai variabel kontrol	Kontrol PID membentuk hukum kontrol umpan balik kesalahan status nonlinier untuk merealisasikan kompensasi untuk pengontrol pitch BP–PID. Lalu Algoritma kontrol pitch dapat mengurangi amplitudo perubahan sudut pitch dan meningkatkan kecepatan respons.
10	Abdulrahman Kalbat  (IEEE)	<i>Linear Quadratic Gaussian (LQG) Kontrol of Wind Turbines</i>	<i>Linear Quadratic Gaussian (LQG)</i> berakar pada teori kontrol stokastik yang optimal – <i>Linear Quadratic Regulators (LQR)</i> untuk umpan balik keadaan penuh dan Filter Kalman untuk perkiraan keadaan. –Model linier dari <i>controls Advanced Research Turbine (CART)</i>	Pengatur LQG berhasil mengurangi efek dari sistem <i>white gaussian noise w (t)</i> pada sistem loop tertutup. Lalu sistem LQG pada frekuensi tinggi efek pengukuran <i>white gaussian noise v (t)</i> lebih tinggi pada sistem loop tertutup dibandingkan pada sistem loop terbuka
11	Xin Zhao, Josep M. Guerrero, Mehdi Savaghebi , Juan C. Vasquez Xiaohua Wu, Kai Sun	<i>Low–Voltage Ride–Through Operation of Power Converters in Grid–Interactive Microgrids by Using Negative–Sequence</i>	Algoritma kontrol hierarki yang terdiri dari kontrol primer dan sekunder kontroler primer mencakup <i>loop</i> dalam tegangan / arus, <i>loop</i> kontrol <i>droop</i> , dan <i>loop</i> impedansi	Meningkatkan akurasi pembagian daya di antara konverter terdistribusi, dan juga untuk membuat sistem lebih teredam tanpa mengorbankan efisiensi sistem



	(IEEE transactions on Power Electronics)	<i>Droop Kontrol</i>	virtual. Kontroler sekuler digunakan untuk menghitung daya urutan positif / negatif.	
<b>12</b>	Nurul chairunnisa noor, Indar Chaerah Gunadin, Ansar suyuti.	<i>Control sistem Design To Increase Low Voltage Ride Through (LVRT) Capacity in Wind Turbine Using STATCOM Base on Control Linear Quadratic Regulator (LQR)</i>	<i>Linear Quadratic Regulator</i> Simulink–matlab	Meningkatkan kemampuan <i>low voltage ride through</i> (LVRT) dan membuat daya reaktif sampai ke batas <i>predefault</i> yaitu 1 pu.