

LAPORAN HASIL PENELITIAN



**ANALISA PENGARUH PEMBANGKIT TENAGA ANGIN
SKALA BESAR TERHADAP STABILITAS TEGANGAN
STATIK DAN DINAMIK SISTEM TENAGA LISTRIK**

Oleh :

Awan Uji Krismanto, ST., MT., Ph.D (NIP. 198003012005011002)

Dr. F. Yudi Limraptono, ST., MT (NIP. 1039500274)

PENGESAHAN PROGRAM PASCASARJANA ITN MALANG	
CALL. No. 621-3 KRI 2019	No. REG. : 051/KD/2022 TANGGAL : 9-2-2022 JUMLAH ; 1 MASYARAKAT : 1

LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

2019



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

PERPUSTAKAAN PUSAT

Jln. Bendungan Sigura-gura No.2 Malang 65145

Telp. (0341) 551431 Pes. 163-146-147 Fax. (0341) 553015 Website : library.itn.ac.id/lib

TANDA TERIMA

Telah terima Karya Tulis Dosen yang berupa (Laporan penelitian, Diktat, Pengabdian masyarakat) sebanyak:.....Eksemplar dancopy file, atas:

Nama : Awan Uji Krimanto, ST, MT, PhD
 NIP : 196003011995011002
 Fakultas / Jurusan : Teknologi Industri / T. Elektro
 Judul/ Jml artikel : Analisa Pengaruh Sengkangit Tenaga Angin Skala Besar Terhadap Stabilitas Tegangan Statik dan Dynamic Papan Tenaga Listrik

PERPUSTAKAAN ISNTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG	
CALL No <u>621.3</u> <u>1021</u> <u>a</u> <u>2019</u>	No. Reg : <u>051/KD/2022</u>
	Taggal : <u>4-2-2022</u>
	Jumlah : <u>1</u>
	Copies : <u>1</u>

Catatan: Diisi oleh petugas

Malang, 4-2-2022
Mengetahui
Ka. Perpustakaan

Yang Menyerahkan

Penerima

Awan Uji Krimanto

Rumuk Juli



[Signature]

HALAMAN PENGESAHAN
LAPORAN AKHIR PENELITIAN HIBAH INTERNAL

Judul : Analisa Pengaruh Pembangkit Tenaga Angin Skala Besar terhadap Stabilitas Tegangan Statik dan Dinamik Sistem Tenaga Listrik

Peneliti/Pelaksana

Nama Lengkap & Gelar : Awan Uji Krismanto, ST, MT, Ph.D
NIDN / NIP : 0001038001 / P. 198003012005011002
Fakultas / Program Studi : Fakultas Teknologi Industri / Teknik Elektro S-1
Alamat Surel (E-mail) : awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id
No. HP : 081217200708
Jabatan Fungsional : Lektor

Anggota (1)

Nama Lengkap & Gelar : Dr. F Yudi Limpraptono, ST. MT.
NIDN / NIP : 0703056802 / P. 1039500274
Fakultas / Program Studi : Fakultas Teknologi Industri / Teknik Elektro S-1
Institusi Mitra (jika ada) :
Nama Institusi Mitra :
Alamat Institusi Mitra :
Penanggung Jawab :
Tahun Pelaksanaan : 2019
Biaya Keseluruhan : Rp. 10.000.000,00



Mengetahui,
Ketua LPPM ITN Malang

(Dr. Ir. F. Yudi Limpraptono, MT)
NIP. Y. 1030100350

Malang, 17 Desember 2019
Ketua,

(Awan Uji Krismanto, ST, MT, Ph.D)
NIP. P. 198003012005011002

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	1
HALAMAN PENGESAHAN	2
DAFTAR ISI	3
RINGKASAN	4
BAB 1 Pendahuluan	5
1.1 Latar Belakang.....	5
1.2 Tujuan Penelitian	6
1.3 Target dan Luaran	7
BAB 2 Tinjauan Pustaka	8
2.1 Stabilitas Tegangan Statik dan Dinamik.....	8
2.2 Pengaruh EBT terhadap Stabilitas Tegangan statik dan dinamik	9
2.3 Peningkatan Stabilitas Tenggangan pada Sistem Tenaga Elektrik.....	10
BAB 3 Metodologi Penelitian	12
BAB 4 Anggaran Biaya dan Jadwal Kegiatan	14
4.1 Anggaran Biaya	14
4.2 Jadwal Kegiatan	14
DAFTAR PUSTAKA	15
LAMPIRAN-LAMPIRAN	17

RINGKASAN

Semakin meningkatnya penggunaan energi angin sebagai salah satu pembangkit berbasis energi baru terbarukan (EBT) selain memberikan banyak keuntungan tetapi juga secara signifikan mengubah karakteristik kendali dan operasi sistem tenaga elektrik. Kondisi kecepatan angin yang senantiasa berfluktuatif serta penggunaan teknologi baru pada pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang berbeda dengan pembangkit listrik konvensional menimbulkan permasalahan baru khususnya berkaitan dengan kestabilan sistem tenaga listrik. Salah satu hal yang menjadi perhatian utama untuk menjaga stabilitas sistem tenaga listrik adalah mempertahankan kestabilan profil tegangan baik pada kondisi transient maupun pada kondisi steady state. Dengan mulai beroperasinya PLTB Sidrap dengan kapasitas 75 MW di Sulawesi serta mulai dibangunnya PLTB skala besar di berbagai daerah di Indonesia, diperlukan penelitian untuk menginvestigasi pengaruh PLTB pada stabilitas sistem tenaga listrik khususnya yang berkaitan dengan stabilitas tegangan. Penelitian ini menginvestigasi pengaruh pemasangan PLTB skala besar terhadap kondisi stabilitas tegangan statis dan dinamik sistem tenaga listrik. Pada penelitian ini, dilakukan juga analisa pemasangan peralatan kompensator seperti *FACTS devices* untuk memperbaiki dan meningkatkan perilaku dinamik dan kestabilan sistem tenaga dengan penetrasi pembangkit berbasis energi baru-terbarukan (EBT).

Kata kunci: PLTB, kestabilan tegangan statik dan dinamik, FACTS devices

BAB 1

Pendahuluan

1.1 Latar belakang

Semakin meningkatnya penggunaan energi angin sebagai salah satu pembangkit berbasis energi baru terbarukan (EBT) secara signifikan mengubah perilaku dan stabilitas dinamik sistem tenaga listrik [1]. Penetrasi pembangkit listrik energi bayu (PLTB) dalam skala besar akan mempengaruhi arah aliran daya dan distribusi pembangkitan. Terlebih, kondisi kecepatan angin yang senantiasa berfluktuatif serta karakteristik pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang berbeda dengan pembangkit listrik konvensional dalam hal teknologi penggerak dan peralatan konversi energi yang digunakan, dapat menimbulkan permasalahan kestabilan pada sistem tenaga listrik apabila tidak dikendalikan dengan baik [2]-[3].

Kondisi kestabilan sistem meliputi kestabilan transient, tegangan dan *small-signal* menjadi perhatian utama dalam mengintegrasikan PLTB skala besar ke dalam sistem sistem tenaga listrik. Salah satu aspek kestabilan yang harus diperhatikan dalam mengoperasikan sistem tenaga listrik dengan porsi penetrasi PLTB yang besar adalah menjaga stabilitas sistem tenaga listrik adalah mempertahankan kestabilan profil tegangan baik pada kondisi transient maupun pada kondisi steady state [4]. Pada umumnya, PLTB di daerah pesisir atau lepas pantai sehingga membutuhkan saluran transmisi yang panjang untuk menghubungkan pembangkit tersebut dengan pusat beban. Sistem transmisi panjang meningkatkan resiko terjadinya ketidakstabilan sistem terutama pada kondisi grid yang lemah seperti ketika sistem dioperasikan pada kondisi pembebanan tinggi. Integrasi PLTB juga meningkatkan resiko ketidakstabilan tegangan yang disebabkan oleh adanya interaksi antara kontrol sistem dari PLTB dan kontrol sistem pada pembangkit konvensional [5]-[6]. Permasalahan lain terkait dengan stabilitas sistem tenaga listrik dengan PLTB skala besar adalah menurunnya kemampuan untuk mempertahankan kestabilan ketika terjadi gangguan atau perubahan titik operasi [7]. Untuk menjamin kontinuitas pelayanan dan ketersediaan energi listrik serta menjaga kestabilan sistem, diperlukan studi dan analisis yang menyeluruh terkait dengan kestabilan tegangan sistem tenaga listrik dengan penetrasi PLTB yang besar. Analisis

yang diperlukan terkait dengan profil tegangan pada kondisi *steady-state* dan tanggapan dinamik tegangan ketika terjadi gangguan dan perubahan titik keseimbangan operasi (*equilibrium point*).

Peralatan kompensasi daya reaktif memiliki peran yang sangat penting untuk meningkatkan performa dinamik dari sistem tenaga listrik dengan penetrasi PLTB skala besar. Melalui instalasi peralatan kompensasi tersebut, daya reaktif pada sistem dapat diatur untuk menjaga kestabilan tegangan sistem [8]. Selain itu, peralatan kompensasi juga dapat meningkatkan sistem untuk tetap dapat beroperasi secara normal ketika sistem mengalami penurunan tegangan (*Low Voltage Ride Through*). Kemampuan LVRT dapat dilakukan dengan mengedalikan aliran daya reaktif pada sistem ketika terjadi gangguan seperti hubung singkat dan penambahan beban-beban besar. Di lain pihak, pemasangan alat kompensator juga menimbulkan resiko terjadinya interaksi atau resonansi dengan sistem kontrol PLTB. Terjadinya interaksi dapat mengakibatkan penurunan performa dinamik dan bahkan menimbulkan ketidakstabilan apabila tidak dicegah.

Dengan mulai beroperasinya PLTB Sidrap dengan kapasitas 75 MW di Sulawesi serta mulai dibangunnya PLTB skala besar di berbagai daerah di Indonesia, diperlukan penelitian untuk menginvestigasi pengaruh PLTB pada stabilitas sistem tenaga listrik. Penelitian ini menginvestigasi pengaruh pemasangan PLTB skala besar terhadap kondisi stabilitas tegangan statis dan dinamik sistem tenaga listrik. Pada penelitian ini, dilakukan juga analisa pemasangan peralatan kompensator seperti *FACTS devices* untuk memperbaiki dan meningkatkan perilaku dinamik dan kestabilan sistem tenaga dengan penetrasi pembangkit berbasis energi baru-terbarukan (EBT).

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini dapat diformulasikan sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penetrasi PLTB skala besar pada kestabilan tegangan statis sistem tenaga listrik.
2. Menganalisis pengaruh penetrasi PLTB skala besar pada kestabilan tegangan dinamik sistem tenaga listrik.
3. Meningkatkan kondisi kestabilan tegangan static dan dinamik pada sistem tenaga listrik dengan integrasi PLTB dengan pemasangan peralatan FACTS.

4. Menganalisis pengaruh pemasangan peralatan kompensator terhadap kemampuan LVRT dari sistem.

1.3 Target dan Luaran

Target dan luaran penelitian ini dapat dituliskan sebagai berikut:

1. Analisa komprehensif terhadap stabilitas sistem tenaga listrik ketika dioperasikan bersama dengan PLTB.
2. Implementasi metode baru untuk meningkatkan performa dinamik dan batas kestabilan dari sistem tenaga listrik ketika dioperasikan bersama dengan PLTB.
3. Implementasi metode baru untuk meningkatkan LVRT dari sistem tenaga listrik.
4. Publikasi pada jurnal internasional.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Stabilitas Tegangan statik dan dinamik

Operasi sistem tenaga elektrik secara terus-menerus dihadapkan pada kondisi yang tidak pasti (*uncertain*) seperti perubahan profil beban, gangguan hubung singkat dan perubahan penjadwalan pembangkit. Kestabilan tegangan pada sistem tenaga listrik terkait dengan kemampuan untuk mempertahankan tegangan pada batas-batas yang diijinkan setelah sistem mengalami gangguan atau perubahan kondisi operasi [9]. Kondisi beban yang bervariasi pada operasi sistem tenaga listrik mempengaruhi pembangkitan daya aktif dan reaktif dari generator. Terlebih, variasi beban yang diikuti dengan perubahan daya yang dibangkitkan dapat mengganggu kondisi keseimbangan (*equilibrium operating point*) antara daya pembangkitan dan permintaan beban. Ketidakseimbangan antara pembangkitan dan permintaan daya reaktif mengakibatkan terjadinya fluktuasi tegangan pada bus-bus kristis. Apabila fluktuasi tegangan tersebut tidak segera diatasi, akan dapat menimbulkan ketidakstabilan operasi sistem tenaga elektrik. Kestabilan tegangan dapat diklasifikasikan menjadi kestabilan tegangan statik dan dinamik. Kestabilan statik terkait dengan profil tegangan pada sistem tenaga elektrik pada kondisi steady-state sedangkan kestabilan dinamik terkait dengan tanggapan dinamik dan variasi tegangan setelah sistem mengalami gangguan atau perubahan titik operasi [10].

Penurunan tegangan yang drastic (*voltage collapse*) dapat dipandang sebagai permasalahan statis yang berkaitan dengan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan kebutuhan daya reaktif [11]. Jika kompensasi daya reaktif yang tersedia tidak mencukupi, ketidakstabilan tegangan dapat terjadi. Karena permasalahan ketidakstabilan tegangan dapat dipandang sebagai suatu fenomena yang statis, hal tersebut dapat dianalisa dengan metode *offline* pada saat perencanaan atau pengembangan jaringan. Stabilitas tegangan statis termasuk analisis penentuan batas kemampuan sistem untuk menanggung kenaikan beban tanpa menyebabkan terjadinya *voltage collapse* pada waktu sebelum dan setelah terjadinya gangguan.

Penentuan batas atau margin kestabilan tegangan statik dan identifikasi bus-bus lemah dapat dilakukan dengan memonitor kurva P-V, kurva Q-V dan studi *bifurcation* pada bus-bus kritis untuk menentukan batas-batas kestabilan sistem. Kurva P-V merepresentasikan variasi tegangan sebagai fungsi daya aktif. Batas/ margin kestabilan tegangan dapat ditentukan dengan menentukan titik dimana tegangan mengalami penurunan secara drastis (*voltage collapse*). Sedangkan kondisi stabilitas tegangan di sekitar titik kritis atau titik *bifurcation equilibrium* dapat dianalisa dengan menggunakan *bifurcation theory*. Kondisi tegangan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan daya reaktif pada sistem. Untuk mengevaluasi stabilitas tegangan, daya aktif dapat dipertahankan konstan pada setiap titik operasi dan kestabilan tegangan dapat dimonitor dengan menganalisis hubungan antara tegangan dan kenaikan daya reaktif melalui kurva Q-V.

Perilaku dinamik dan variasi tegangan selama peralihan dari satu titik operasi ke titik operasi yang lain tidak dapat diamati dengan memakai metode-metode yang digunakan untuk menganalisa stabilitas tegangan statik. Tujuan dilakukan analisa kondisi dinamik adalah untuk menentukan setting parameter pada sistem kendali dan waktu kritis yang diperlukan sistem kontrol untuk mengembalikan tegangan ke kondisi normal [12]. Untuk menganalisa permasalahan stabilitas tegangan dinamik, sistem tenaga elektrik beserta komponen-komponen yang ada dimodelkan ke dalam satu set persamaan *differensial non-linear*. *Time domain simulation* merupakan metode yang umum digunakan untuk menganalisa tanggapan tegangan dinamik dan mekanisme terjadinya instability tegangan pada sistem setelah mengalami gangguan seperti hubung singkat, pemutusan saluran (*line outage*) dan lepasnya generator dari sistem.

2.2 Pengaruh EBT terhadap Stabilitas Tegangan statik dan dinamik

Permasalahan kestabilan tegangan menjadi hal yang perlu mendapatkan perhatian dengan meningkatnya penetrasi pembangkit berbasis EBT termasuk PLTB. Kondisi kecepatan angin yang tidak dapat diprediksi dan bergantung pada kondisi cuaca berpotensi menimbulkan fluktuasi tegangan yang dapat mengakibatkan terjadinya kondisi sistem yang tidak stabil. Implementasi peralatan elektronika daya pada PLTB juga mengakibatkan munculnya distorsi harmonisa tegangan dan arus yang turut mempengaruhi kondisi kestabilan tegangan.

Pengaruh PLTB pada kestabilan sistem tenaga elektrik bergantung pada lokasi PLTB pada jaringan sistem tenaga elektrik. Integrasi PLTB dapat mempengaruhi dan mengubah arah aliran daya yang mengakibatkan penambahan atau penurunan rugi-rugi pada saluran transmisi. Perubahan arah aliran daya juga mempengaruhi kemampuan transfer energi (*energy transfer capability*) saluran transmisi yang pada akhirnya akan mempengaruhi kemampuan pembebanan (*loadability*) sistem. Dengan kata lain, integrasi PLTB dapat menurunkan kondisi stabilitas tegangan statis terutama pada sistem tenaga listrik dengan kondisi beban yang tinggi (*weak power system*) [13].

Pada sistem tenaga listrik dengan penetrasi PLTB yang tinggi mempengaruhi kemampuan sistem untuk mempertahankan kondisi stabil pada saat menghadapi gangguan. Integrasi PLTB secara signifikan menurunkan kemampuan untuk mempertahankan level tegangan pada kondisi gangguan (*low voltage ride through capability*) sehingga memicu terjadinya pemutusan aliran daya dan *voltage collapse* [14]-[15]. Terlebih, implementasi generator induksi dan peralatan elektronika daya pada PLTB berpotensi memperburuk tanggapan dinamik tegangan sehingga memicu kondisi osilasi yang berkepanjangan yang pada akhirnya berpotensi menimbulkan kondisi ketidakstabilan [8].

2.3 Peningkatan Stabilitas Tegangan pada Sistem Tenaga Elektrik

Integrasi PLTB skala besar mempengaruhi aliran daya pada sistem tenaga elektrik yang berpotensi memperburuk kondisi stabilitas tegangan statik dan dinamik. Regulasi daya reaktif diperlukan untuk meningkatkan stabilitas tegangan sistem. Untuk memfasilitasi regulasi daya reaktif diperlukan peralatan-peralatan kompensator. SVC banyak diimplementasikan untuk meningkatkan *loadability* dan tanggapan dinamik tegangan terutama pada *weak power grid* dengan saluran transmisi panjang dan kondisi pembebanan yang tinggi. Pemasangan SVC secara signifikan meredam kondisi osilasi dan dapat mempertahankan level tegangan pada kondisi normal ketika sistem dihadapkan pada gangguan [2].

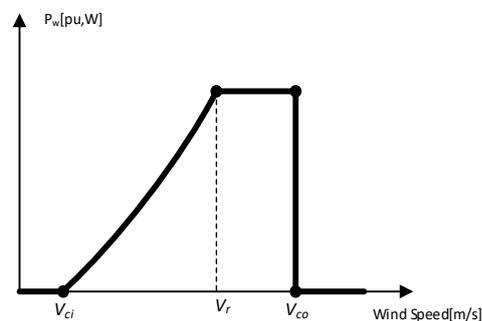
Penggunaan SVC untuk memperbaiki stabilitas tegangan pada sistem tenaga elektrik memiliki beberapa kekurangan seperti respon SVC yang lambat sehingga tidak dapat memberikan kompensasi yang akurat pada kondisi operasi yang berfluktuatif.

Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan implementasi peralatan FACTS seperti SSSC dan STATCOM. Implementasi peralatan FACTS memberikan perbaikan yang lebih signifikan terhadap kemampuan pembebanan dan kondisi stabilitas tegangan statis. Terlebih, sistem kontrol yang pada peralatan FACTS memberikan tanggapan yang lebih cepat dan akurat untuk memitigasi permasalahan tanggapan dinamik tegangan. Di lain pihak, pemasangan beberapa peralatan FACTS berpotensi menimbulkan permasalahan kestabilan baru seperti fenomena resonansi dan interaksi apabila sistem kontrol peralatan tersebut tidak terkoordinasi dengan baik [16]. Untuk menjamin dan meningkatkan kondisi ketabilan sistem dengan penetrasi PLTB yang tinggi diperlukan pemasangan peralatan kompensator yang terkoordinasi dengan baik.

2.4 Model Dinamik

2.4.1 Model PLTB berbasis *Fully Rated Converter (FRC)*

Daya yang dibangkitkan oleh PLTB dipengaruhi oleh karakteristik mekanik dari turbin angin, kurva daya keluaran dan kecepatan angin. Kurva karakteristik turbine angin ditunjukkan pada gambar 1. Turbin angin beroperasi diantara kecepatan *cut-in* (V_{ci}) dan kecepatan *cut-off* (V_{co}). Diantara kecepatan tersebut, daya yang dibangkitkan akan meningkat secara proporsional sesuai dengan peningkatan kecepatan angin sampai pada kecepatan nominal (V_r). Di luar batas kecepatan tersebut, turbin angin tidak dapat dioperasikan karena alasan efisiensi dan keamanan [17].



Gambar 1. Kurva Karakteristik Turbine Angin.

Dengan menggunakan kurva daya dari suatu turbi angin, daya yang dibangkitkan oleh sebuah PLTB dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini [18], [19].

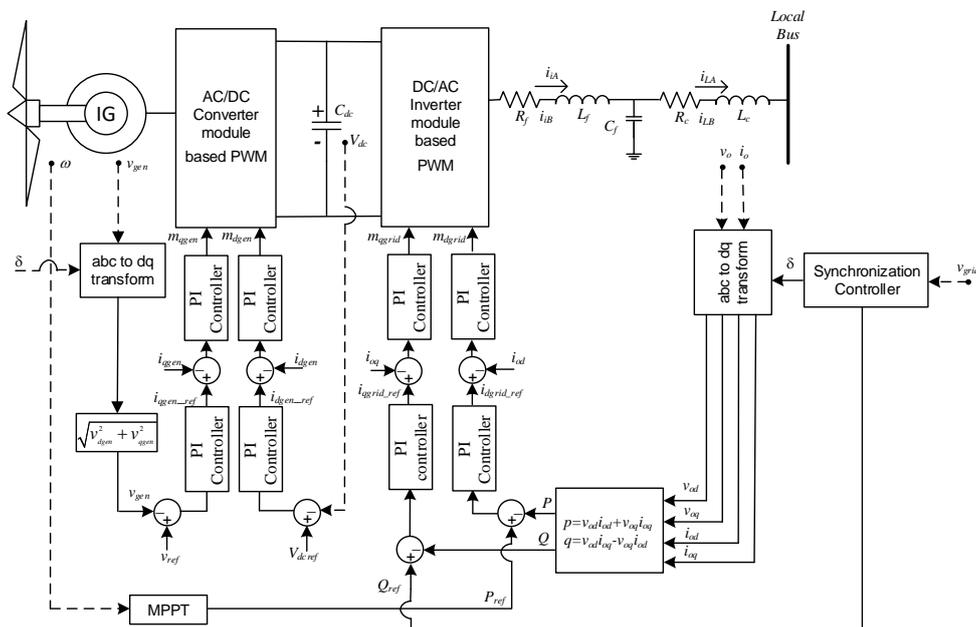
$$P_w(v_w) = \begin{cases} 0 & \text{for } v < v_{ci} \text{ or } v > v_{co} \\ \frac{v_w - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} P_{wr} & \text{for } v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{wr} & \text{for } v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

P_w and P_{wr} masing-masing merepresentasikan daya yang dibangkitkan pada kondisi kecepatan angin tertentu dan daya nominal pada PLTB. Pada penelitian ini, injeksi daya dari PLTB dinaikkan secara bertahap untuk menyelidiki pengaruh peningkatan penetrasi PLTB terhadap kestabilan tegangan sistem tenaga listrik.

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, kondisi kecepatan angin yang berfluktuasi akan menyebabkan injeksi daya PLTB yang berfluktuasi. Hal ini menuntut adanya kemampuan PLTB untuk dapat beroperasi pada kecepatan angin yang berfluktuatif untuk menjamin kestabilan operasi dan tegangan pada sistem tenaga listrik. Untuk menyelidiki pengaruh peningkatan penetrasi dan injeksi daya dari PLTB, pada penelitian ini, teknologi *Fully Rated Converter System* (FRC) pada PLTB akan dimodelkan dan disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak DigSILENT Power Factory. Penggunaan teknologi FRC pada PLTB meningkatkan kemampuan PLTB dalam mengoptimalkan pembangkitan daya dari dan menjaga kestabilan sistem ketika terjadi perubahan kecepatan angin secara tiba-tiba. Model dinamik FRC yang disimulasikan terdiri atas model arus dari generator induksi dan model detail dari AC/DC/AC inverter system sebagaimana disajikan dalam [20], [21]. Untuk menyederhanakan analisa, pada penelitian ini, diasumsikan bahwa *pitch angle* dari turbin angin adalah konstan. Blok diagram pemodelan FRC pada PLTB ditunjukkan pada gambar 2.

Sistem kendali pada PLTB berbasis FRC terdiri atas dua bagian utama yaitu kendali pada sisi generator dan sisi grid. Kendali pada sisi generator sangat penting untuk mendukung operasi PLTB pada kondisi angin yang bervariasi. Sinyal kendali pada sisi generator didapatkan dengan membandingkan nilai referensi tegangan dari generator dan DC-link untuk menjaga operasi stabil dari PLTB. Kendali pada sisi grid sangat dibutuhkan untuk mengatur aliran daya dan menjaga kestabilan daya keluaran PLTB.

Untuk menjamin kestabilan operasi PLTB, sinkronisasi antar pembangkit konvensional dan PLTB harus dapat dipertahankan pada segala kondisi kecepatan angin. Operasi sinkron PLTB dapat dipertahankan dengan menggunakan kendali *Phase Lock Loop* (PLL). Proses sinkronisasi pada PLTB dengan menggunakan PLL dimulai dengan menentukan nilai referensi untuk sudut daya, frekuensi dan tegangan. Nilai-nilai tersebut kemudian digunakan sebagai input kendali PI untuk menentukan sinyal referensi bagi inverter pada sisi grid.

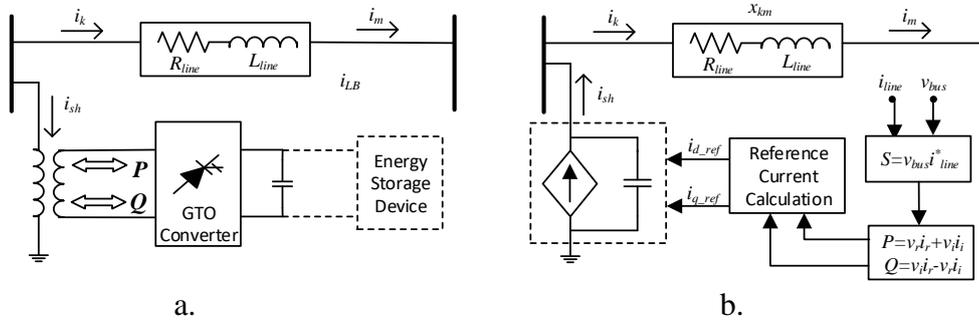


Gambar 2. Model Dinamik dari PLTB berbasis FRC.

2.4.2 Model STATCOM

Kestabilan tegangan pada sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi dapat ditingkatkan dengan memasang peralatan kompensasi seperti kapasitor bank dan peralatan FACTS. Dibandingkan dengan kapasitor, peralatan FACTS menyediakan fleksibilitas yang tinggi dalam meregulasi dan mengatur aliran daya. Pada penelitian ini, STATCOM sebagai salah satu dari peralatan FACTS akan digunakan untuk memperbaiki dan meningkatkan profil tegangan pada sistem tenaga listrik yang dioperasikan dengan penetrasi daya yang bervariasi dari PLTB. STATCOM berperan sebagai peralatan kendali daya reaktif yang dapat menyerap dan menginjeksikan daya reaktif ke system untuk mempertahankan level tegangan pada batas-batas yang diijinkan [22].

Pemodelan STATCOM pada DigSILENT ditunjukkan pada gambar 3 [22]. STATCOM dapat dimodelkan sebagai sumber arus terkontrol yang dapat menyerap atau menginjeksikan daya reaktif. Sebagai sumber arus, STATCOM mampu menginjeksikan arus dengan sudut fasa yang mendahului sejauh 90° terhadap tegangan. Ketika tegangan pada bus lebih rendah dari nilai referensi, STATCOM akan menginjeksikan daya reaktif pada jaringan untuk meningkatkan nilai tegangan pada bus tersebut. Pada kondisi ini, STATCOM berlaku seperti kapasitor. Demikian juga ketika tegangan pada bus melebihi nilai referensi, STATCOM akan berlaku seperti inductor yang menyerap daya reaktif untuk menurunkan nilai tegangan bus.



Gambar 3. Model STATCOM

Dari arus kompleks yang terukur ($i_{line} = i_r + j i_i$) dan tegangan ($v_{bus} = v_r + j v_i$) pada bus, daya total pada STATCOM yang terhubung dengan bus tersebut dapat dihitung sebagai hasil dari perkalian tegangan arus sesuai dengan persamaan berikut ini

$$S = v i^* = (v_r + j v_i)(i_r - j i_i) \quad (1)$$

Sehingga daya aktif dan reaktif pada STATCOM dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut ini

$$\begin{aligned} P &= v_r i_r + v_i i_i \\ Q &= v_i i_r - v_r i_i \end{aligned} \quad (2)$$

Pada penelitian ini diasumsikan bahwa STATCOM hanya menyerap dan menginjeksikan daya reaktif dan tidak ada pertukaran/ aliran daya aktif dari dan menuju STATCOM ($P = 0$). Dari asumsi ini, dan dengan menyelesaikan persamaan (2), bagian imajiner dari arus dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$i_i = -\frac{v_r}{v_i} i_r \quad (3)$$

Magnitudo arus dari STATCOM ditentukan sebagai berikut

$$|i_{sh}| = \sqrt{i_r^2 + i_i^2} = \sqrt{i_r^2 + \left(-\frac{v_r}{v_i} i_r\right)^2} \quad (4)$$

$$|i_{sh}| = \frac{i_r v_{bus}}{v_i}$$

Dengan demikian, bisa diperoleh hubungan antara i_r dan i_i sebagai fungsi dari i_{sh} dengan menggunakan persamaan berikut ini

$$i_r = |i_{sh}| \frac{v_i}{v_{bus}} \quad (5)$$

$$i_i = -|i_{sh}| \frac{v_r}{v_{bus}}$$

Injeksi arus dari STATCOM dapat ditentukan sebagai fungsi dari bagian nyata dan imajiner pada arus kompleks yang ditunjukkan pada (4). Arus dari STATCOM juga dapat dihitung dari arus referensi dengan menggunakan persamaan berikut ini

$$i_{sh} = (i_{dref} \cos(\theta) - i_{qref} \sin(\theta)) + j(i_{dref} \sin(\theta) + i_{qref} \cos(\theta)) \quad (6)$$

dengan $\cos(\theta) = \frac{v_r}{v}$ dan $\sin(\theta) = \frac{v_i}{v}$.

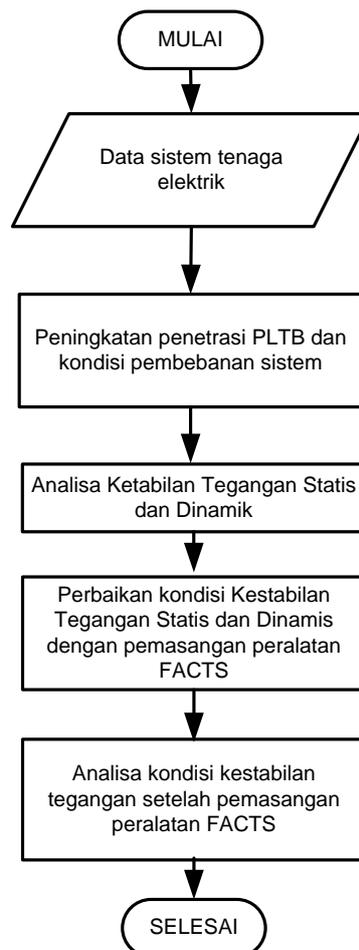
Menggunakan kesetaraan pada (5) dengan bagian nyata dan imajiner pada (6), arus referensi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut ini

$$\begin{aligned} i_{dref} &= 0 \\ i_{qref} &= -i_{sh} \end{aligned} \quad (7)$$

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pengaruh penetrasi PLTB pada kestabilan statik dan dinamik sistem tenaga elektrik harus dianalisa secara komprehensif untuk menjamin kestabilan operasi sistem tenaga elektrik. Secara garis besar, kerangka kerja penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada gambar 4, prosedur penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Persiapan penelitian

Pada tahap ini, dilakukan kajian pustaka dan pengumpulan data sistem kelistrikan yang menjadi kajian. Sebagai studi kasus, dalam penelitian ini digunakan sistem kelistrikan Sulawesi Selatan Tenggara Barat (Sulselbar).

2. Peningkatan penetrasi PLTB dan kondisi pembebanan

Untuk menyelidiki kondisi kestabilan tegangan dari sistem dengan adanya penetrasi PLTB, level injeksi daya dari PLTB dinaikkan secara bertahap. Stabilitas tegangan statik diinvestigasi dengan menaikkan kondisi pembebanan sedangkan stabilitas tegangan dinamik diselidiki dengan mengaplikasikan skenario perubahan pembebanan dan terjadinya gangguan pada salah satu bus.

3. Analisa kestabilan tegangan statik dan dinamik

Kondisi kestabilan tegangan statik diinvestigasi dengan menggunakan P-V, Q-V dan metode *Bifurcation*. Sedangkan, kondisi kestabilan tegangan dinamik diinvestigasi dengan menggunakan *metode time domain simulation*.

4. Perbaikan kondisi kestabilan tegangan

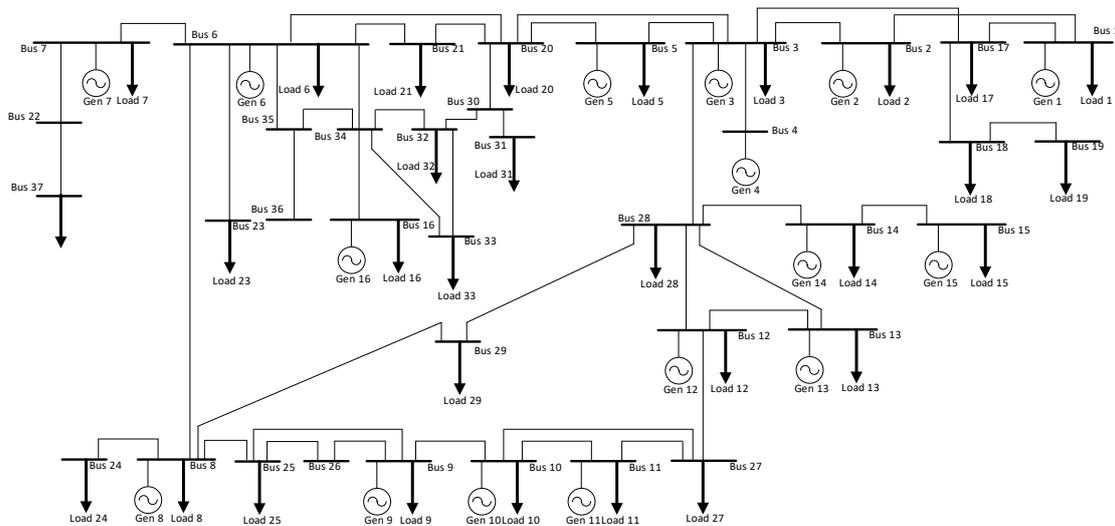
Kondisi kestabilan tegangan ditingkatkan dengan mengimplementasikan peralatan kompensator pada sistem kelistrikan. Untuk menginvestigasi pengaruh berbagai peralatan kompensator, SVC dan peralatan FACTS akan diintegrasikan ke sistem.

5. Analisa kestabilan tegangan statik dan dinamik setelah peralatan kompensator ditambahkan

Analisa dilakukan kembali untuk membandingkan kondisi stabilitas tegangan sebelum dan sesudah pemasangan peralatan kompensator pada berbagai tingkat penetrasi PLTB.

BAB 4 HASIL DAB ANALISA

Sistem kelistrikan yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem kelistrikan Sulawesi Selatan–Barat (Sulselbar) yang terdiri dari 16 unit pembangkit, yang beroperasi pada tegangan 150 kV, serta terdiri dari 37 Bus dan 48 saluran yang terhubung dengan pusat beban. Diagram sistem kelistrikan Sulselbar 150 kV ditunjukkan pada gambar 4.1



Gambar.4.1 Gambar One-Line Diagram Sistem Sulselbar 150 kV.

Data yang diinputkan ke dalam software DigSILENT Power Factory berupa data penyulang yang terdiri atas data beban, data saluran dan data pembangkit. Data parameter dinamik generator untuk setiap pembangkit ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan 4.2, yang meliputi data dinamik generator, data eksitasi. Data dinamik ini akan digunakan untuk mensimulasikan tanggapan dinamik dari masing-masing generator ketika terjadi perubahan titik operasi dan gangguan pada sistem Sulselbar. Tanggapan dinamik generator dan tegangan pada setiap bus merupakan indikasi penting untuk menilai kestabilan tegangan dinamik pada suatu sistem tenaga listrik. Hal ini terutama untuk mengetahui apakah sistem masih dapat mempertahankan level tegangan pada kondisi normal ketika sistem menghadapi gangguan dan mendapatkan injeksi daya yang bervariasi dari pembangkit berbasis energi baru terbarukan seperti PLTB.

Tabel 4.1 DataDinamik Generator

No	Pembangkit	$X_d(\text{pu})$	$X_d'(\text{pu})$	$X_d''(\text{pu})$	$X_q(\text{pu})$	$X_q'(\text{pu})$	$X_q''(\text{pu})$
1	PLTA Bakaru	0,924	0,28	0,27	0,553	0	0,27
2	PLTA Teppo	0,523	0,385	0,261	0,423	0	0,261
3	PLTD Pare-Pare	0,924	0,28	0,27	0,553	0	0,27
4	PLTD Suppa	0,5	0,385	0,261	0,41	0	0,261
5	PLTU Barru	0,451	0,324	0,204	0,524	0,395	0,204
6	PLTU Tello	0,221	0,1995	0,102	0,211	0,1975	0,102
7	PLTD Agrekko	0,351	0,299	0,204	0,436	0,395	0,204
8	PLTD Sgmnsa	0,468	0,385	0,261	0,375	0	0,261
9	PLTD Arena	0,468	0,385	0,261	0,375	0	0,261
10	PLTD Matekko	0,436	0,385	0,261	0,385	0	0,261
11	PLTA Tmatipi	0,521	0,385	0,27	0,321	0	0,27
12	PLTD Pajelasang	0,425	0,385	0,261	0,385	0	0,261
13	PLTGU Sengkang	0,375	0,2	0,12	0,752	0,6	0,12
14	PLTD Malea	0,42	0,385	0,261	0,435	0	0,261
15	PLTD Palopo	0,523	0,385	0,261	0,271	0	0,261
16	PLTA Bili-Bili	0,435	0,385	0,261	0,375	0	0,261

Tabel 4.2 Data Parameter Eksitasi Generator

No	Nama Pembangkit	$K_A(\text{pu})$	TA	$V_{A_{\max}}$	$V_{A_{\min}}$
1	PLTA Bakaru	1	0,02	1	-1
2	PLTA Teppo	200	0,05	5	-5
3	PLTD Pare-Pare	1	0,02	1	-1
4	PLTD Suppa	1	0,02	1	-1
5	PLTU Barru	1	0,02	1	-1
6	PLTU Tello	50	0,04	1	-1
7	PLTD Agrekko	100	0,04	1	-1
8	PLTD Sgmna	10	0,02	18,3	-18,3
9	PLTD Arena	10	0,02	18,3	-18,3
10	PLTD Matekko	10	0,02	18,3	-18,3
11	PLTA Tmatipi	4	0,02	5,99	-5,99
12	PLTD Pajelasang	10	0,02	18,3	-18,3
13	PLTGY Sengkang	300	0,04	1	-1
14	PLTD Malea	10	0,02	18,3	-18,3
15	PLTD Palopo	4	0,02	5,99	-5,99
16	PLTA Bili-Bili	4	0,02	5,99	-5,99

Untuk dapat mensimulasikan kondisi sistem seperti yang terjadi di lapangan, diperlukan juga data pembangkitan, data pembebanan dan saluran transmisi yang menghubungkan terminal generator, pusat-pusat beban dan pembangkit lain. Data beban dan pembangkitan yang digunakan adalah data operasi harian sistem Sulselrabar, di mana

yang dipakai adalah data beban puncak yang di tunjukan pada Table 4.3, yang meliputi daya aktif dan reaktif pada beban dan pembangkit.

Tabel 4.2 Data Pembangkitan dan Pembebanan Sistem Sulselbar

No Bus	Nama Bus	Jenis Bus	Beban		Pembangkitan	
			P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	Bakaru	Slack	4,4	0,2	-	-
2	Pinrang	Generator	15,6	-5,6	0,3	0
3	Pare-Pare	Generator	6	-0,5	20,1	5
4	Suppa	Generator	-	-	62,2	19,7
5	Barru	Generator	6,8	1,7	44,7	0
6	Tello	Generator	39,6	15,3	29,7	18,6
7	Tello Lama	Generator	14	0,4	19,3	0
8	Sgmnsa	Generator	9,4	2,5	12,3	3,8
9	Inpnto	Generator	10,8	3,1	19,6	-0,9
10	Blkmba	Generator	11	1,6	9	2,2
11	Sinjai	Generator	13	4,4	3,5	-0,6
12	Soppeng	Generator	3,4	9,1	15,1	0,9
13	Sengkang	Generator	18,1	7,2	192,9	-3,7
14	Makale	Generator	9,8	1,8	3,5	0
15	Palopo	Generator	29,9	5,9	6,9	1
16	Borongloe	Generator	7,2	0	7,1	0,9
17	Polmas	Beban	10,2	2,9	-	-
18	Majene	Beban	9,4	2,2	-	-
19	Mamuju	Beban	10,6	2	-	-
20	Pangkep	Beban	15	5,8	-	-
21	Bosowa	Beban	20,2	10	-	-
22	Tel. Lama	Beban	-	-	-	-
23	Panakukkang	Beban	56,4	17	-	-
24	Tanjung Bunga	Beban	31,8	11,3	-	-
25	Talasa	Beban	20,2	5,8	-	-
26	TIP	Beban	-	-	-	-
27	Bone	Beban	21,5	6,1	-	-
28	Sidrap	Beban	18,6	7,1	-	-
29	Maros	Beban	8,9	2,2	-	-
30	Pangkep D	Beban	-	-	-	-
31	Tonasa	Beban	37,8	20,8	-	-
32	Mandai	Beban	22,5	2,1	-	-
33	Daya	Beban	20,8	1,6	-	-
34	TelloA	Beban	-	-	-	-
35	TelloB	Beban	-	-	-	-
36	Barawaja	Beban	-	-	-	-
37	Bontoala	Beban	29,4	0	-	-

Saluran transmisi pada sistem Sulselbar terdiri dari 48 saluran transmisi yang menghubungkan pusat-pusat pembangkit dan beban pada sistem kelistrikan Sulselbar. Data Saluran yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Table 4.4. Data saluran tersebut terdiri atas data Impedansi saluran.

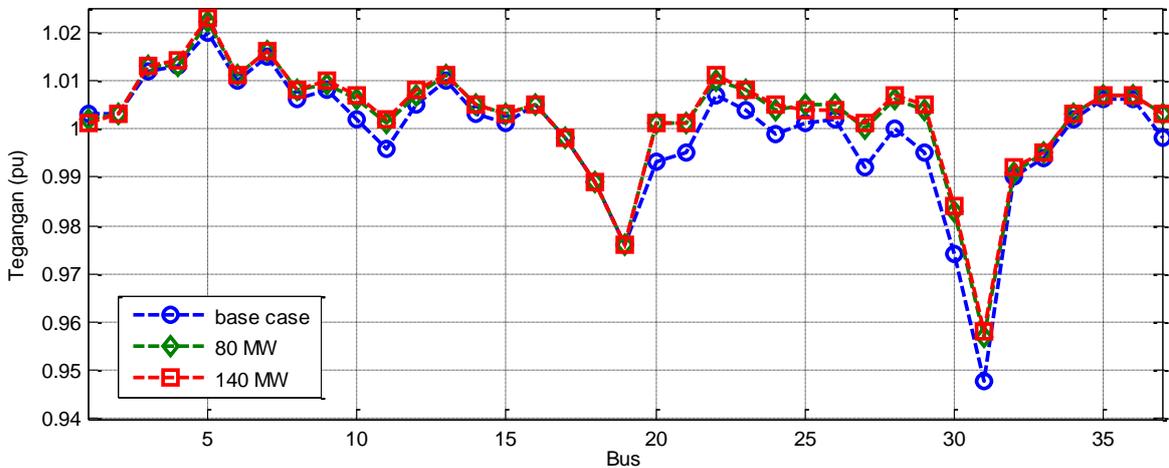
Tabel 4.3 Data Saluran Transmisi pada Sistem Sulselbar

Line	Impedansi Per-Line Pu			Impedansi Per-Line ohm		
	R	Jx	Y/2	R	Jx	Y2
1 ke 17	0,0263	0,0944	0,0074	5,9108	21,2400	3,302,E-05
1 ke 2	0,0308	0,1102	0,0101	6,9210	24,8018	4,497,E-05
10 ke 11	0,0313	0,1125	0,0089	7,0448	25,3103	3,935,E-05
10 ke 27	0,0720	0,2585	0,0203	16,1888	58,1648	9,043,E-05
11 ke 27	0,0406	0,1460	0,0115	9,1440	32,8568	5,108,E-05
12 ke 13	0,0211	0,1267	0,0040	4,7385	28,5075	1,794,E-05
12 ke 27	0,0458	0,1631	0,0040	10,3005	36,6885	1,786,E-05
12 ke 28	0,0564	0,2028	0,0048	12,6968	45,6188	2,142,E-05
14 ke 15	0,0392	0,1408	0,0028	8,8133	31,6710	1,231,E-05
14 ke 28	0,0627	0,3775	0,0120	14,1165	84,9443	5,346,E-05
17 ke 18	0,0526	0,1890	0,0037	11,8373	42,5295	1,653,E-05
18 ke 19	0,0734	0,2638	0,0208	16,5195	59,3528	9,228,E-05
2 ke 3	0,0139	0,0497	0,0067	3,1230	11,1915	2,976,E-05
20 ke 21	0,0109	0,0392	0,0049	2,4525	8,8178	2,192,E-05
25 ke 26	0,0103	0,0703	0,0033	2,3063	15,8108	1,473,E-05
28 ke 29	0,0124	0,0846	0,0040	2,7788	19,0395	1,774,E-05
3 ke 17	0,0366	0,1316	0,0182	8,2418	29,6078	8,085,E-05
3 ke 20	0,0946	0,3392	0,0114	21,2940	76,3110	5,073,E-05
3 ke 28	0,0200	0,0720	0,0014	4,5068	16,1955	6,293,E-06
3 ke 4	0,0079	0,0283	0,0006	1,7708	6,3585	2,471,E-06
3 ke 5	0,0231	0,0629	0,0112	5,2065	14,1525	4,960,E-05
5 ke 20	0,0242	0,0867	0,0117	5,4428	19,5008	5,186,E-05
6 ke 20	0,0476	0,1702	0,0057	10,7190	38,2883	2,553,E-05
6 ke 21	0,0168	0,0605	0,0076	3,7868	13,6103	3,383,E-05
6 ke 23	0,0047	0,0170	0,0003	1,0620	3,8160	1,484,E-06
6 ke 7	0,0073	0,0260	0,0009	1,6335	5,8500	3,889,E-06
6 ke 8	0,0039	0,0264	0,0012	0,8663	5,9288	5,524,E-06
8 ke 24	0,0071	0,0426	0,0014	1,5908	9,5760	6,027,E-06
8 ke 25	0,0097	0,0665	0,0031	2,1825	14,9603	1,394,E-05
8 ke 29	0,0543	0,3723	0,0179	12,2243	83,7765	7,938,E-05
9 ke 10	0,0486	0,1747	0,0034	10,9373	39,2985	1,528,E-05
9 ke 25	0,0667	0,2394	0,0047	14,9963	53,8718	2,094,E-05
9 ke 26	0,0362	0,1300	0,0026	8,1383	29,2410	1,136,E-05

4.1 Kestabilan Tegangan Statik

Kondisi kestabilan tegangan statik pada sistem Sulsebar dapat dilihat dari perbandingan profil tegangan pada setiap bus sebelum dan sesudah PLTB diintegrasikan pada sistem. Perbandingan profil tegangan sistem Sulsebar sebelum dan sesudah adanya integrasi PLTB Sidrap dan Jeneponto ditunjukkan pada gambar 4.2. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa integrasi PLTB pada bus Sidrap dan Jeneponto memberikan dampak positif terhadap kondisi kestabilan tegangan statik sistem.

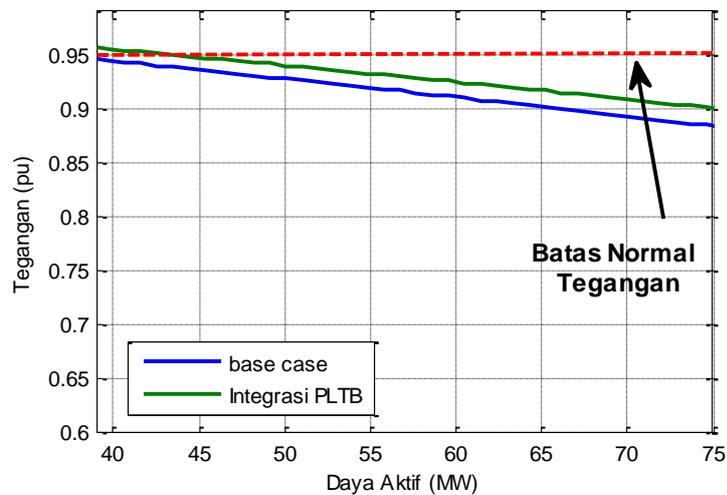
Dari hasil analisa aliran daya terlihat bahwa peningkatan profil tegangan secara signifikan terlihat pada bus 31. Sebelum integrasi PLTB, bus 31 yaitu bus Tonasa mengalami kondisi *under-voltage* dengan tegangan sebesar 0.946 pu. Kondisi *under-voltage* ini sangat berbahaya karena dapat mengakibatkan ketidakstabilan tegangan sistem. Injeksi daya dari PLTB memberikan dampak positif terhadap profil tegangan bus 31. Injeksi daya sebesar 80 MW mengakibatkan peningkatan profil tegangan pada bus 31 menjadi 0.953 pu. Lebih jauh, ketika injeksi daya dari PLTB dinaikkan menjadi 140 MW, profil tegangan pada bus 31 menjadi normal yaitu 0.957 pu.



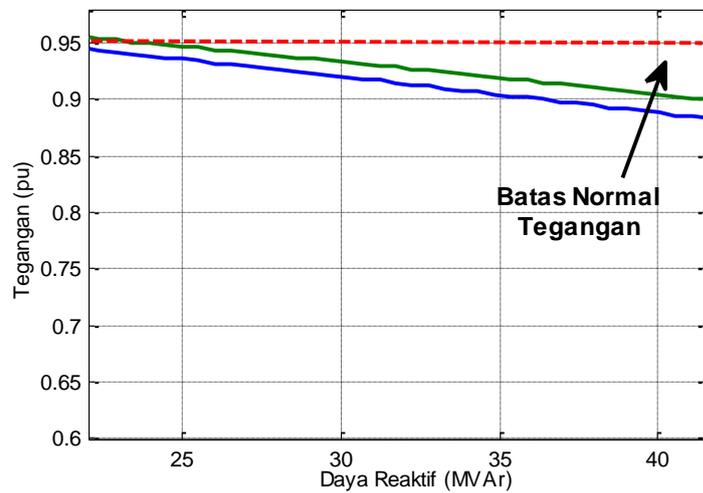
Gambar 4.2. Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Integrasi PLTB

Kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan pada kondisi beban yang bervariasi dapat dianalisis dengan menggunakan kurva PV dan PQ. Kurva tersebut menampilkan kondisi tegangan bus ketika beban yang terhubung dengan bus tersebut dinaikkan secara bertahap. Dengan menggunakan metode kurva PV dan PQ, kemampuan

sistem untuk mensuplai beban (*loadability*) serta batas kritis kestabilan statik tegangan dapat ditentukan. Kurva PV dan PQ pada bus 31 Tonasa pada kondisi peningkatan beban sebesar 5% sampai 100% ditunjukkan pada gambar 4.3. Kurva tersebut menunjukkan perbandingan *loadability* bus 31 Tonasa dalam mempertahankan profil tegangan di atas batas normal pada kondisi beban yang bervariasi sebelum dan sesudah integrasi PLTB pada bus Sidrap dan Jeneponto



(a)



(b)

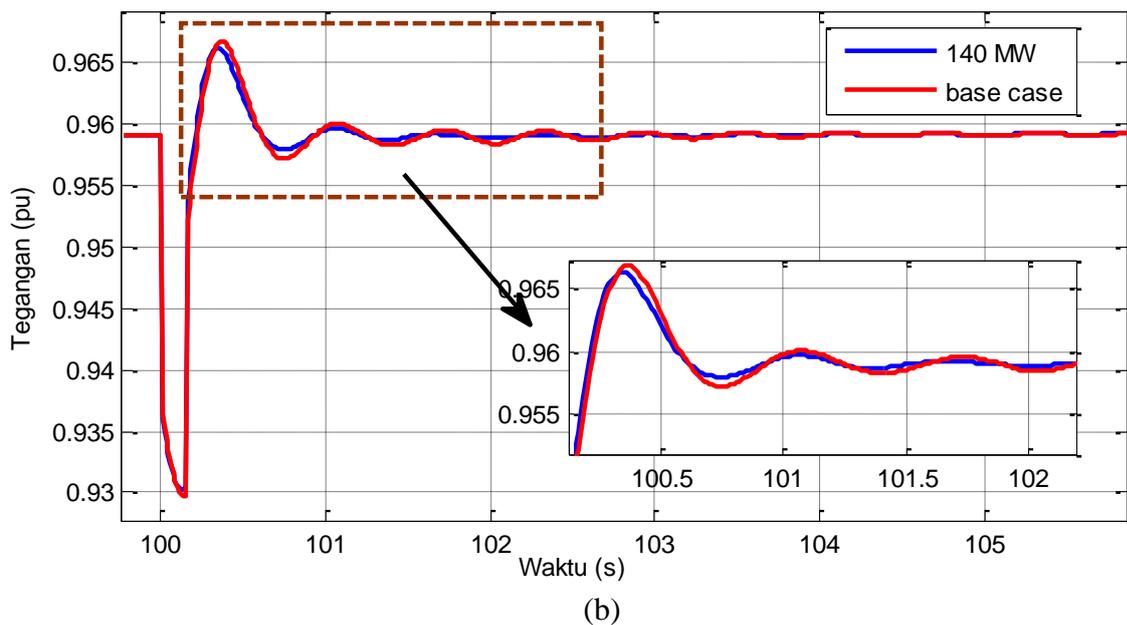
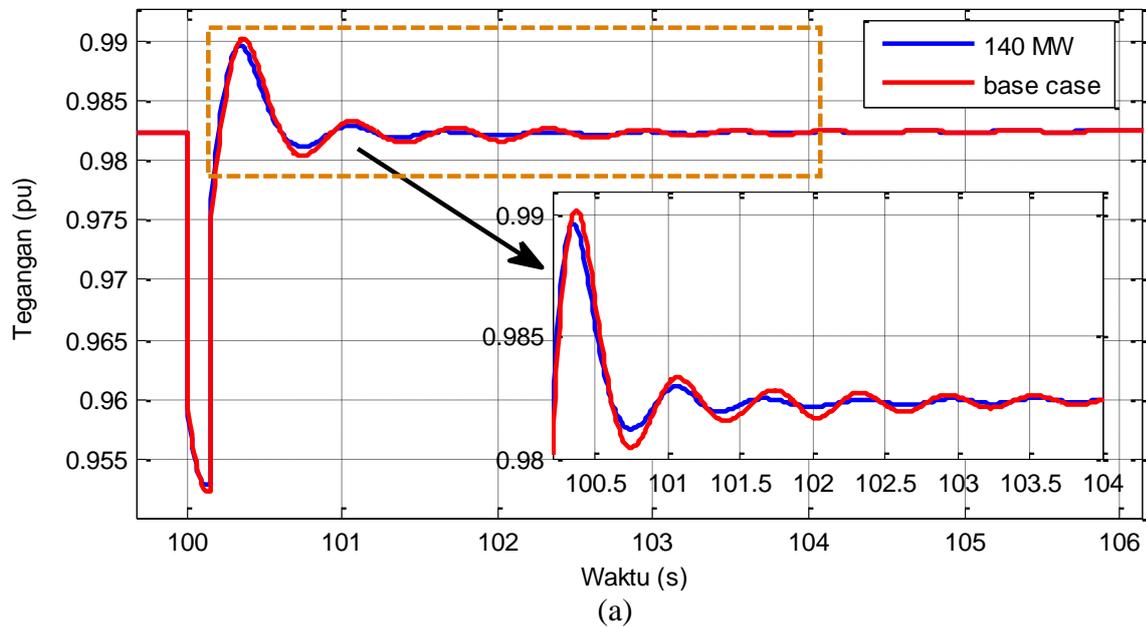
Gambar 4.3. Kurva (a) PV dan (b) PQ pada bus 31 Sebelum dan Sesudah Integrasi PLTB

Pada kondisi Base Case sebelum integrasi PLTB, bus 31 Tonasa sudah mengalami undervoltage. Kondisi tegangan pada bus 31 tersebut semakin menurun ketika ditambahkan beban sampai 100%. Kondisi loadability pada bus 31 mengalami perbaikan pada saat PLTB diintegrasikan pada sistem Sulselbar. Tegangan pada bus 31 Tonasa masih dalam keadaan normal pada kondisi pembebanan normal sampai kenaikan beban sekitar 15%. Setelah kenaikan beban 17,5% sampai 100%, tegangan bus tersebut mengalami penurunan di bawah batas nilai normal yang diijinkan (*undervoltage*). Dengan demikian dapat dilihat dari perbandingan kurva PV dan PQ pada bus 31 bahwa integrasi PLTB pada sistem Sulselbar memberikan dampak positif dalam meningkatkan kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan pada kondisi peningkatan beban.

4.2 Kestabilan Tegangan Dinamik

Untuk menyelidiki tanggapan dinamik sistem, dua scenario gangguan akan diperhitungkan. Gangguan pertama adalah gangguan 3 (tiga) fasa simetris pada bus detik ke-100. Gangguan dikenakan pada bus 31 Tonasa dan bus 19 Mamuju dikarenakan profil tegangan pada Bus 31 mendekati nilai batas kondisi *undervoltage* yakni 0,95 pu. Hal ini mengakibatkan gangguan yang terjadi pada bus ini akan berpotensi menyebabkan kondisi ketidakstabilan pada sistem. Sedangkan pemilihan Bus 19 dikarenakan jarak bus ini yang amat jauh dari letak penempatan PLTB yaitu pada Bus 28 Sidrap dan Bus 9 Janeponto. Hal ini untuk menyelidiki apakah bus kritis tetap sensitif terhadap gangguan yang jauh dari bus tersebut. Gangguan kedua adalah penambahan beban sebesar 20% pada detik ke 200.

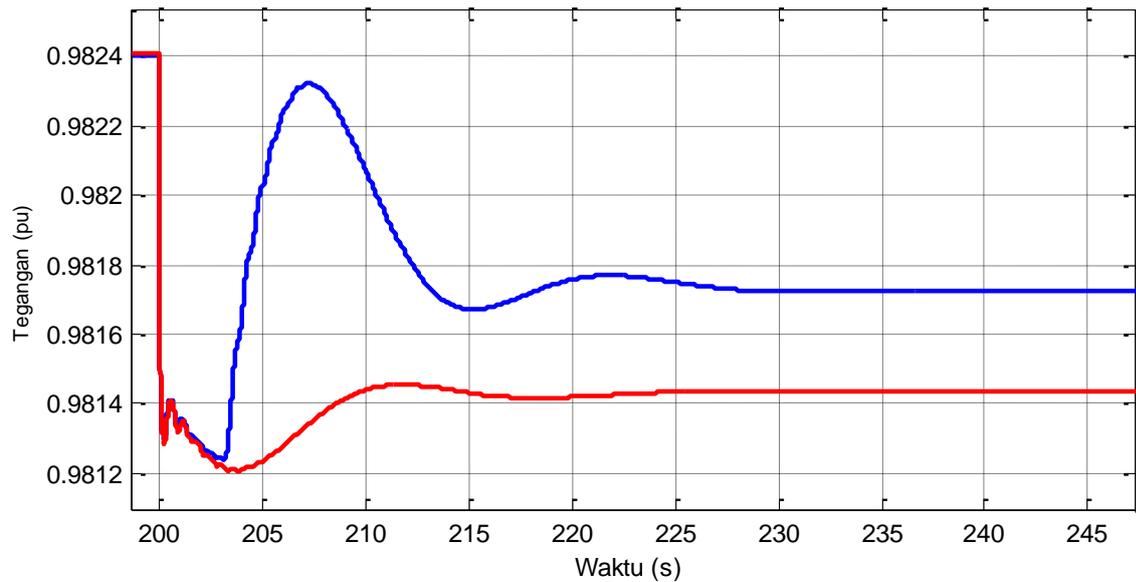
Kestabilan tegangan dinamik sistem ketika menghadapi gangguan 3 (tiga) fasa simetris ditunjukkan pada gambar 4.4. Tanggapan tegangan dinamik pada bus 30 dan bus 31 sebelum dan sesudah integrasi PLTB menunjukkan bahwa integrasi PLTB dapat memperbaiki tanggapan tegangan dinamik. Hal ini terlihat dari penurunan overshoot ketika 140 MW injeksi daya dari PLTB diperhitungkan. Selain itu, dengan integrasi PLTB kondisi osilasi ketika sistem mencoba mempertahankan kestabilan tegangan menjadi lebih cepat. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat mempertahankan level tegangan dan lebih cepat mencapai keadaan stabil.



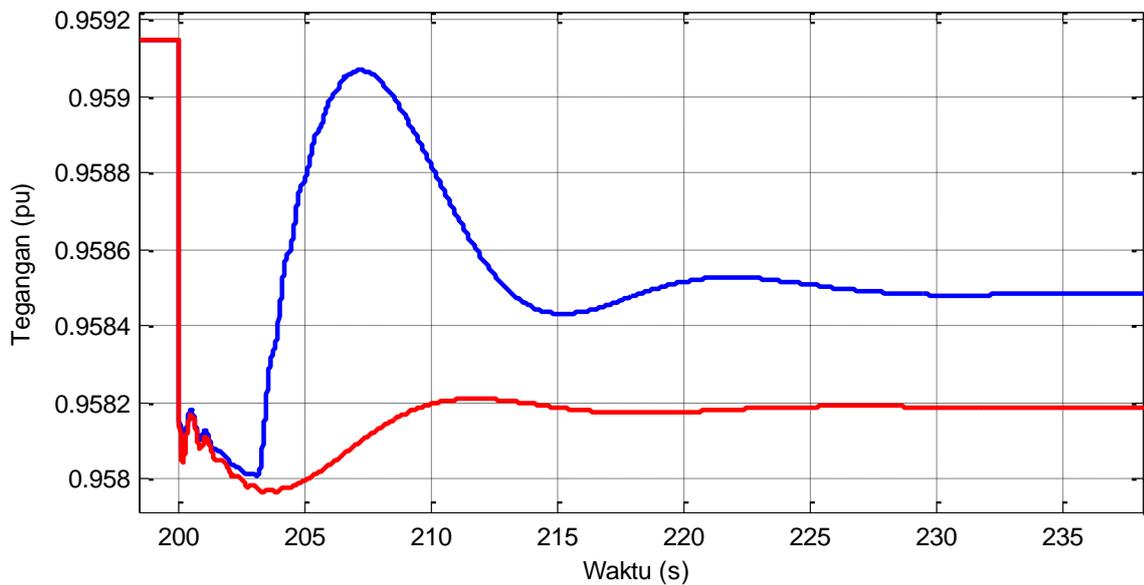
Gambar 4.4. Grafik Respon Tegangan Dinamik pada Bus (a) 30 dan (b) 31 ketika terjadi gangguan hubung singkat

Kestabilan tegangan dinamik sistem ketika menghadapi gangguan penambahan beban ditunjukkan pada gambar 4.5. Ketika beban yang terhubung ke sistem meningkat, tegangan akan mengalami penurunan karena adanya waktu yang diperlukan oleh generator untuk memenuhi kebutuhan daya aktif dan melakukan regulasi daya reaktif untuk mempertahankan level tegangan. Tanggapan tegangan dinamik pada bus 30 dan bus

31 sebelum dan sesudah integrasi PLTB menunjukkan bahwa integrasi PLTB dapat memperbaiki tanggapan tegangan dinamik. Hal ini terlihat dari kenaikan profil tegangan setelah sistem mengalami kenaikan pembebanan ketika 140 MW injeksi daya dari PLTB diperhitungkan.

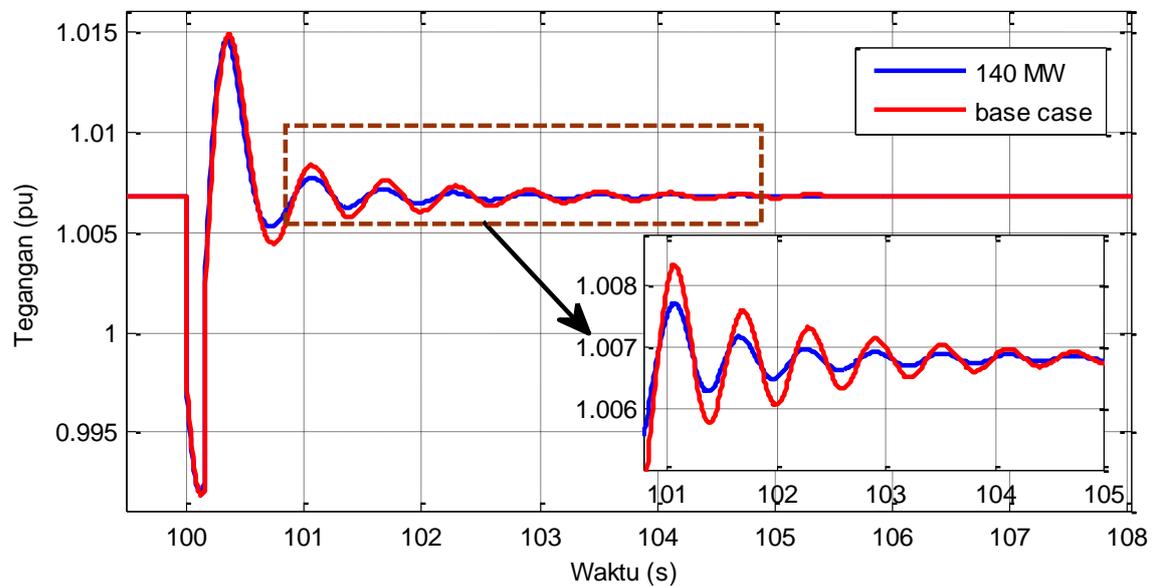


(a)

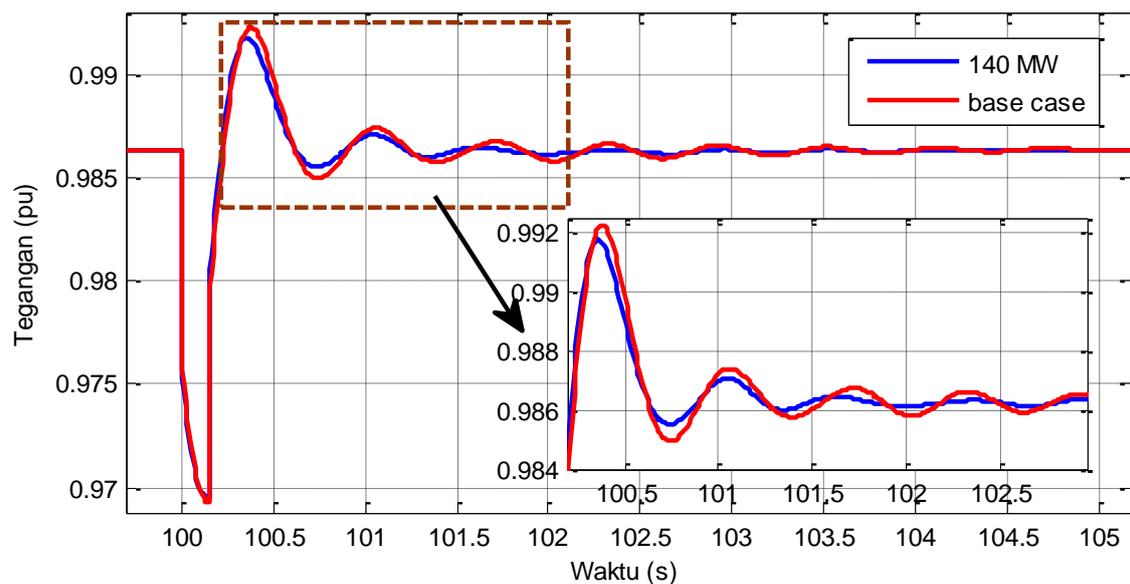


(b)

Gambar 4.5. Grafik Respon Tegangan Dinamik pada Bus (a) 30 dan (b) 31 terjadi kenaikan beban.



(a)

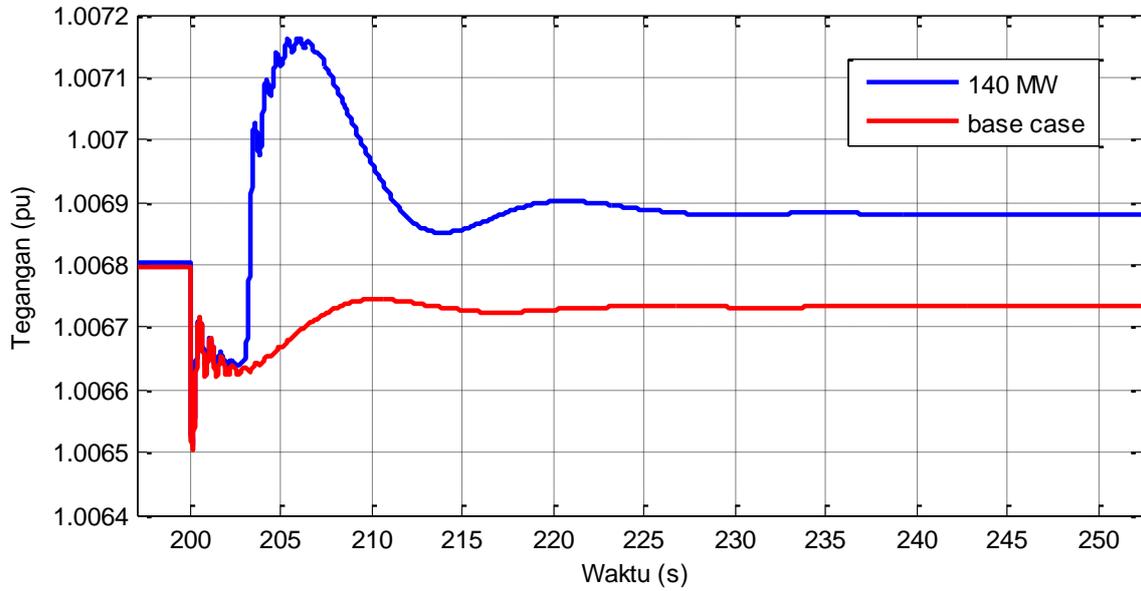


(b)

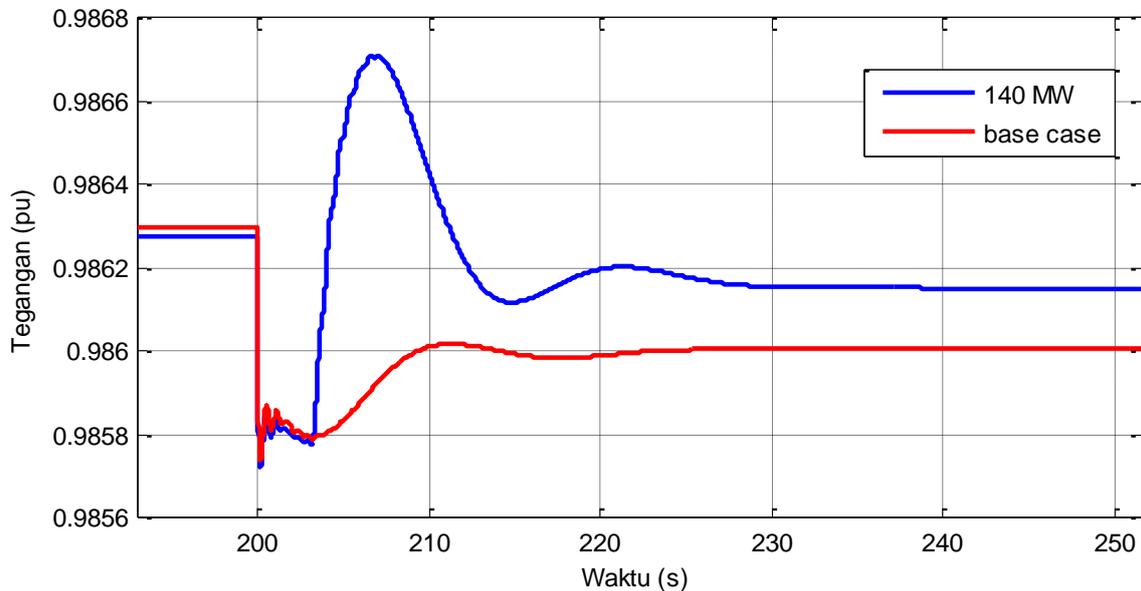
Gambar 4.6. Grafik Respon Tegangan Dinamik pada Generator (a) 10 dan (b) 16 ketika terjadi gangguan hubung singkat

Respon tegangan pada terminal generator 10 dan 16 ketika terjadi gangguan hubung singkat pada bus 31 dan 19 ditunjukkan pada gambar 4.6. Tanggapan tegangan dinamik pada terminal generator 10 dan bus 16 sebelum dan sesudah integrasi PLTB menunjukkan bahwa integrasi PLTB dapat memperbaiki tanggapan tegangan dinamik. Hal ini terlihat dari penurunan overshoot ketika 140 MW injeksi daya dari PLTB diperhitungkan. Selain

itu, dengan integrasi PLTB kondisi osilasi ketika sistem mencoba mempertahankan kestabilan tegangan menjadi lebih cepat. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat memertahankan level tegangan dan lebih cepat mencapai keadaan stabil.



(a)



(b)

Gambar 4.7. Grafik Respon Tegangan Dinamik pada Generator (a) 10 dan (b) 16 ketika terjadi gangguan hubung singkat

Kestabilan tegangan dinamik pada terminal generator ketika menghadapi gangguan penambahan beban ditunjukkan pada gambar 4.7. Ketika beban yang terhubung ke sistem

meningkat, tegangan akan mengalami penurunan karena adanya waktu yang diperlukan oleh generator untuk memenuhi kebutuhan daya aktif dan melakukan regulasi daya reaktif untuk mempertahankan level tegangan. Tanggapan tegangan dinamik pada bus 30 dan bus 31 sebelum dan sesudah integrasi PLTB menunjukkan bahwa integrasi PLTB dapat memperbaiki tanggapan tegangan dinamik. Hal ini terlihat dari kenaikan profil tegangan setelah sistem mengalami kenaikan pembebanan ketika 140 MW injeksi daya dari PLTB diperhitungkan.

BAB 5

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini pengaruh integrasi PLTB terhadap kestabilan tegangan statik dan dinamik sistem interkoneksi tenaga listrik dianalisa secara detail. Dari hasil analisa dapat disusun kesimpulan sebagai berikut:

1. Injeksi daya aktif dari PLTB dapat memperbaiki kondisi kestabilan tegangan statik pada sistem tenaga listrik. Hal ini terlihat dari meningkatnya profil tegangan pada bus bus kritis secara proporsional seiring dengan meningkatnya injeksi daya dari PLTB. Selain itu, integrasi PLTB juga meningkatkan kemampuan beban dalam menanggung pembebanan (*loadability*). Hal ini terlihat dari perbaikan kurva PV dan PQ dari bus bus kritis.
2. Integrasi PLTB pada sistem tenaga listrik juga memperbaiki tanggapan dinamik dari sistem terutama tanggapan yang berkaitan dengan kestabilan tegangan dinamik. Hal ini terlihat dari penurunan magnitudo ayunan (*overshoot*) dan pengurangan periode osilasi dari sistem ketika menghadapi gangguan baik gangguan besar seperti hubung singkat maupun gangguan kecil seperti variasi beban.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Ghaljehei, A. Ahmadian, M. A. Golkar, T. Amraee, and A. Elkamel, "Stochastic SCUC considering compressed air energy storage and wind power generation: A techno-economic approach with static voltage stability analysis," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 100, pp. 489–507, 2018.
- [2] Z. Mi, H. Tian, Y. Yu, X. Su, X. Fan, and J. Feng, "Study on voltage stability of power grid with large scale wind farm interconnected," in *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009, pp. 1–6.
- [3] A. Kanchanaharuthai, V. Chankong, and K. A. Loparo, "Transient Stability and Voltage Regulation in Multimachine Power Systems Vis-à-Vis STATCOM and Battery Energy Storage," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2404–2416, 2015.
- [4] M. EL-Shimy, M. A. L. Badr, and O. M. Rassem, *Impact of large scale wind power on power system stability*. 2008.
- [5] Y. Qian, X. Yuan, and M. Zhao, "Analysis of voltage control interactions and dynamic voltage stability in multiple wind farms," in *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016, pp. 1–5.
- [6] L.-J. Cai, I. Erlich, and J. Fortmann, "Dynamic Voltage Stability Analysis for Power Systems with Wind Power Plants using Relative Gain Array (RGA)," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 45, no. 21, pp. 331–336, 2012.
- [7] Z. Bi and C. Gao, "Power System Dynamic Voltage Stability Analysis Considering Wind Power," in *2014 IEEE 12th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing*, 2014, pp. 129–132.
- [8] T. Huang, J. Ma, and W. Wang, "Study on transient voltage stability of wind farm incorporated system with reactive power compensation device," in *2014 International Conference on Power System Technology*, 2014, pp. 2642–2646.
- [9] K. Schaab, J. Hahn, M. Wolkov, and O. Stursberg, "Robust control for voltage and transient stability of power grids relying on wind power," *Control Eng. Pract.*, vol. 60, pp. 7–17, 2017.
- [10] E. A. Feilat, S. Azzam, and A. Al-Salaymeh, "Impact of large PV and wind power plants on voltage and frequency stability of Jordan's national grid," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 36, pp. 257–271, 2018.
- [11] S. H. E. Abdel Aleem and A. F. Zobaa, "Voltage stability analysis of grid-connected wind farms with FACTS: Static and dynamic analysis AU - Heetun, Kevin Zibran," *Energy Policy Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2016.
- [12] M. J. Hossain, H. R. Pota, and V. Ugrinovskii, "Short and Long-Term Dynamic Voltage Instability," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 41, no. 2, pp. 9392–9397, 2008.
- [13] P. N. Boonchiam, A. Sode-Yome, N. Mithulananthan, and K. Aodsup, "Voltage stability in power network when connected wind farm generators," in *2009*

- International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2009, pp. 655–660.
- [14] M. Ma, Y. H. Liu, and D. M. Zhao, “Research on the impact of large-scale integrated wind farms on the security and stability of regional power system,” in *2010 International Conference on Power System Technology*, 2010, pp. 1–6.
 - [15] R. M. M. Pereira, C. M. M. Ferreira, and F. P. M. Barbosa, “Influence of a wind farm in the dynamic voltage stability of a power network,” in *2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2009, pp. 1–5.
 - [16] M. J. Hossain, H. R. Pota, M. A. Mahmud, and R. A. Ramos, “Investigation of the Impacts of Large-Scale Wind Power Penetration on the Angle and Voltage Stability of Power Systems,” *IEEE Syst. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 76–84, 2012.
 - [17] W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, and H. Yang, “Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems,” *Appl. Energy*, vol. 87, pp. 380–389, 2010.
 - [18] J. Hetzer, D. C. Yu, and K. Bhattarai, “An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 603–611, 2008.
 - [19] G. L. a, H. Yuea, M. Zhoua, and J. Weib, “Probabilistic assessment of oscillatory stability margin of power systems incorporating wind farms,” *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 58, pp. 47–56, 2014.
 - [20] A. U. Krismanto and M. Nadarajah, “Identification of Modal Interaction and Small Signal Stability in Autonomous Microgrid Operation,” *IET Gen. Transm. Distrib.*, 2017.
 - [21] A. U. Krismanto, N. Mithulananthan, and O. Krause, “Stability of Renewable Energy based Microgrid in Autonomous Operation,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 13, pp. 134–147, 2018.
 - [22] F. M. Gonzalez-Longatt and J. L. R. (eds.), *Power Factory Applications for Power System Analysis*. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.