

Studi Optimalisasi Kinerja PLTB Melalui Pemilihan *Type* Generator Terhadap Stabilitas Sistem Tenaga Listrik (Stabilitas Frekuensi dan Tegangan) Sulbagsel

Muammar Fadli Nur
Departemen Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
4fadly4@gmail.com

Indar Chaerah Gunadin
Departemen Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
indarcg@unhas.ac.id

Zaenab Muslimin
Departemen Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
zaenabandy@gmail.com

Abstract-- Kementerian ESDM menargetkan porsi energi baru dan terbarukan (EBT) pada tahun 2025 mencapai 23% dari pembangkitan. Salah satu program mencapai target tersebut adalah melalui pembangunan dan pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) yang kini sudah ada di beberapa tempat di Indonesia. Pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) dengan sifatnya yang *intermittent* menimbulkan banyak tantangan dalam pengoperasiannya. Salah satu hal yang diperhatikan dalam pengoperasiannya adalah kestabilan sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis berbagai jenis generator yang dapat digunakan pada PLTB dengan melihat kondisi frekuensi dan tegangan sistem dari penggunaan jenis generator dan juga mensimulasikan pengaruh ketika adanya PLTB Tersebar masuk ke sistem. Dari simulasi dan analisa yang telah dilakukan dengan menggunakan software DigSILENT PowerFactory 15.1.7 didapatkan hasil bahwa untuk simulasi tipe generator PLTB tipe *permanent magnet synchronous generator* merupakan tipe yang terbaik diantara generator yang disimulasikan. Sedangkan simulasi dengan masuknya PLTB Tersebar, maka PLTB akan saling mengkompensasi kehilangan daya akibat kecepatan angin yang berbeda.

Keywords—23% EBT 2023, PLTB, Stabilitas, Frekuensi, Tegangan, Generator, PLTB Tersebar, DigSILENT PowerFactory 15.1.7

I. PENDAHULUAN

Pengoperasian suatu sistem tenaga listrik yang berperan penting dalam menyediakan dan menyalurkan energi listrik yang stabil secara terus-menerus dalam memenuhi kebutuhan dari konsumen. Kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem untuk menjaga kondisi operasi yang seimbang dan kemampuan sistem tersebut untuk kembali ke kondisi operasi normal ketika terjadi gangguan. Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik yang stabil, maka listrik yang disalurkan dapat memenuhi seluruh kebutuhan beban. Kementerian ESDM mencatat sejak 2018, pembangkit energi baru terbarukan (EBT) dengan sifat *intermittent* atau tidak stabil mulai dikembangkan secara pesat. Hal ini dikarenakan pemerintah mengejar sasaran bauran

energi khususnya energi baru terbarukan (EBT) paling sedikit 23% pada tahun 2025. Khusus untuk daerah Sulawesi Selatan yang kini memiliki pembangkit *renewable energy* (RE) baru yaitu pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang berlokasi di dua Kabupaten berbeda yakni Kabupaten Sidrap & Kabupaten Jeneponto. Dua pembangkit tersebut dengan rincian PLTB Sidrap berkapasitas 60 Mw serta PLTB Tolo Jeneponto berkapasitas 70 Mw. Dengan adanya pembangkit listrik tenaga bayu tersebut yang kini sudah beroperasi dan telah masuk ke sistem kelistrikan PLN Sulselbar, tentunya mempunyai dampak yang besar terhadap sistem tenaga listrik. Mengingat bahwa jenis pembangkit ini sifatnya *intermittent* (tidak stabil).

Potensi energi angin di Indonesia telah teridentifikasi di beberapa lokasi terutama di wilayah Sumatera, Jawa, Sulawesi Selatan, Nusa Tenggara dan Maluku. Berdasarkan RUPTL PLN 2019-2028 roadmap pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT) akan dibangun lagi pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) dari 2021-2028 berkapasitas 855 Mw. Berdasarkan Peta Sistem Tenaga Listrik di Provinsi Sulawesi Selatan terdapat rencana pengembangan PLTB Sulbagsel (Kuota) berkapasitas 60 Mw pada tahun 2023. Salah satu hal yang perlu dicermati dalam masuknya PLTB ke sistem adalah stabilitas sistem menerima masuknya unit PLTB. Dalam pengoperasiannya, dibutuhkan pembangkit cadangan sebagai pembangkit pendukung untuk mengantisipasi ketika terjadi penurunan kecepatan angin dibawah batasan desain turbin sehingga, untuk setiap daerah dengan karakter sistem berbeda, dibutuhkan kajian yang berbeda juga untuk menilai kelayakan proyek PLTB, terutama skala besar. Mengingat bahwa potensi energi angin yang ada di Sulawesi Selatan untuk dibangun lagi sistem pembangkitan yang baru.

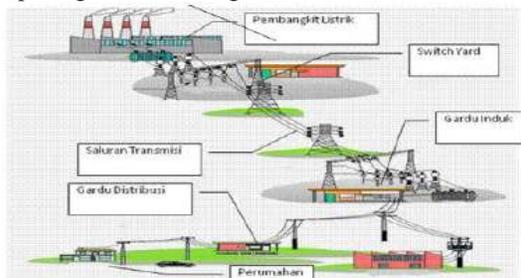
penelitian ini mempunyai tujuan antara lain studi mengoptimalkan suatu perencanaan sistem pembangkit listrik tenaga bayu dengan pertimbangan stabilitas sistem tenaga listrik melalui optimalisasi tipe generator yang digunakan dengan melihat parameter kestabilan tegangan dan frekuensi untuk perencanaan sistem pembangkitan listrik tenaga bayu yang baru. Perkembangan generator yang dapat dipakai pada sistem pembangkit listrik tenaga bayu kini sudah banyak pilihan mulai dari *Squirrel Cage Induction Generator*, *Wound Rotor Induction Generator*, dan

Permanent Magnet Synchronous Generator. Karakteristik dan teknologi yang juga berbeda mempengaruhi suatu sistem kelistrikan, terutama stabilitas sistem.

II. STUDI LITERATUR

A. Sistem Tenaga Listrik

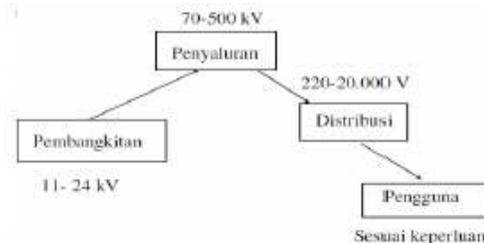
Sistem Tenaga Listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan dan bekerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Secara garis besar Sistem Tenaga Listrik dapat digambarkan dengan skema. Gambar 1.



Gambar 1. Skema Sistem Tenaga Listrik [1]

B. Level Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik

Pada suatu sistem tenaga listrik, tegangan yang digunakan pada masing-masing komponen dapat berbeda-beda sesuai dengan kepentingannya. Dengan kata lain, setiap komponen pada sistem tenaga listrik mempunyai level tegangan yang berbeda-beda, terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Level Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik.

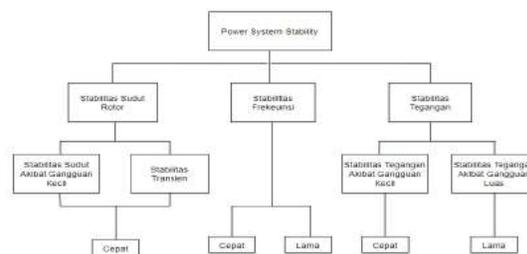
Pada sistem pembangkitan, level tegangan disesuaikan dengan spesifikasi generator pembangkit yang digunakan, biasanya berkisar antara 11 s/d 24 kV. Untuk pembangkit yang berkapasitas lebih besar biasanya menggunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini dilakukan agar arus yang mengalir tidak terlalu besar. [2]

C. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik dikatakan baik jika memenuhi beberapa syarat sebagai berikut:

1. Keandalan (*Reliability*) yaitu kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus-menerus.
2. Kualitas (*Quality*) yaitu kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang diterapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. Kestabilan (*Stability*) yaitu kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

Dalam sistem tenaga listrik yang baik maka ketiga syarat tersebut harus dipenuhi dalam artian sistem tenaga listrik harus memberi pasokan listrik secara terus menerus dengan standar tegangan dan frekuensi sesuai dengan aturan yang berlaku serta harus segera kembali normal bila sistem terkena gangguan. Untuk jaringan yang sangat kompleks dimana beberapa pembangkit saling terhubung satu sama lain, maka tegangan dan frekuensi haruslah diperhatikan agar tidak ada pembangkit yang kelebihan beban sementara pembangkit yang lain bebannya kecil [2]. Masalah pada sistem tenaga listrik yang sering muncul adalah masalah yang berkaitan dengan dinamika dan stabilitas sistem untuk merespon gangguan yang terjadi, karena masalah dinamika dan stabilitas sistem tersebut sangat berkaitan erat dengan unjuk kerja sistem yang mencerminkan kondisi setiap saat, baik kondisi normal maupun kondisi gangguan, serta pemulihannya. Stabilitas sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai suatu keadaan sistem untuk kembali lagi ke keadaan normal atau stabil setelah mengalami gangguan. Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat menimbulkan osilasi tegangan, frekuensi dan daya. Stabilitas sistem tenaga listrik diklasifikasikan atas beberapa seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.

1. Kestabilan Frekuensi

Frekuensi merupakan indikator dari keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan total beban sistem. Frekuensi sistem akan turun bila terjadi kekurangan pembangkitan atau kelebihan beban. Salah satu karakteristik pada sistem tenaga listrik yang sangat penting untuk dijaga kestabilannya adalah frekuensi. Pentingnya menjaga frekuensi berkaitan erat dengan upaya untuk menyediakan sumber energy yang berkaitan

bagi konsumen. Pengendalian frekuensi tidak semata untuk memuaskan pelanggan semata, tindakan ini juga bertujuan untuk menjaga kestabilan sistem. Menurut prinsip dasar dalam dinamika rotor, ada hubungan antara kopel mekanis penggerak generator dengan perputaran generator, dapat dituliskan dalam bentuk persamaan 1:

$$(TG - TB) = H \times \frac{dw}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

TG = torsi atau kopel penggerak generator
 TB = torsi atau kopel beban yang membebani generator

M = momen inersia dari generator beserta mesin penggerak

W = kecepatan sudut perputaran generator. [4]

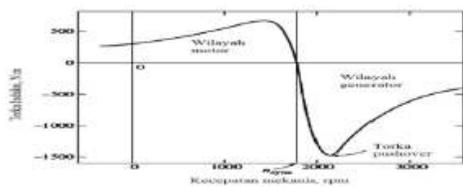
2. Kestabilan Tegangan

Stabilitas tegangan adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan level tegangan dalam batas yang dapat diterima di semua bus, dalam kondisi operasi normal maupun setelah gangguan. Sistem tenaga listrik memasuki kondisi ketidakstabilan tegangan ketika gangguan peningkatan atau perubahan beban dalam topologi sistem menyebabkan penurunan level tegangan yang progresif dan tidak terkendali di sebuah node, di suatu area, atau diseluruh sistem. [6]

D. Generator

1. Generator Asinkron

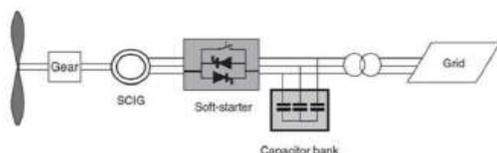
Kurva karakteristik antara kecepatan dan kopel motor induksi dapat dilihat, jika sebuah motor induksi dikendalikan agar kecepatannya lebih besar daripada kecepatan sinkron oleh penggerak mula, maka arah kopel yang terinduksi akan terbalik dan akan beroperasi sebagai generator. Semakin besar kopel pada penggerak mula, maka akan membesar pula daya listrik yang dihasilkan. Gambar 4. Karakteristik kopel kecepatan mesin induksi.



Gambar 4. Karakteristik kopel kecepatan mesin induksi.

1.1 Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)

Squirrel cage induction generator (Generator Induksi Sangkar Tupai) menggunakan konsep kecepatan tetap dalam turbin angin jenis ini. Dalam konfigurasi (Gambar 5) ini motor induksi sangkar tupai terhubung langsung dengan turbin grid. [8]

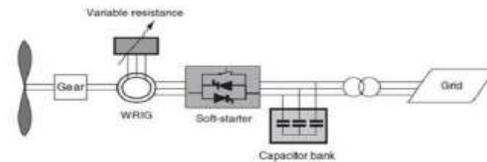


Gambar 5. Turbin angin SCIG

Generator induksi rotor belitan. Konsep variable speed digunakan pada tipe ini. Generator induksi Sebuah kapasitor bank didalamnya untuk kompensasi daya reaktif dan *soft starter* untuk koneksi jaringan yang mulus. Hal ini tidak mendukung pengontrolan kecepatan apapun yang menjadi kelemahan utama.

1.2 Wound Rotor Induction Generator (WRIG)

Generator Induksi Rotor Belitan. Konsep variable speed digunakan pada tipe ini. Pada tipe ini Generator langsung dihubungkan ke grid/jaringan. *Variable rotor resistance* untuk mengendalikan *slip* dan keluaran daya generator. 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 6. Turbin angin WRIG [8]



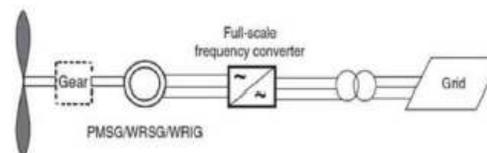
Gambar 6. Turbin angin WRIG

2. Generator Sinkron

Mesin serempak berdasarkan konversi energinya terdiri atas dua jenis; yaitu sebagai generator dan motor. Mesin sinkron ini bekerja dengan kondisi putaran medan kumparan jangkaranya (pada stator) dan putaran kumparan medannya (rotor) adalah sama (sinkron), slipnya = 0%. [7]

2.1 Permanent Magnet Generator (PMSG)

Generator Magnet Permanen. Generator terhubung ke jaringan melalui konverter frekuensi skala penuh seperti pada Gambar 7. Konverter frekuensi membantu untuk mengontrol daya aktif dan reaktif yang disalurkan oleh generator ke jaringan. [8]

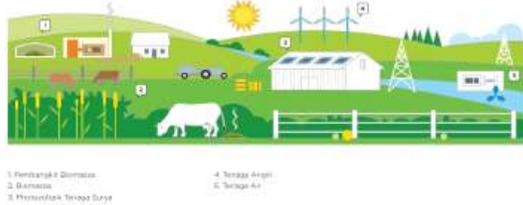


Gambar 7. Turbin angin PMSG

E. Energi Terbarukan

Energi terbarukan adalah energi yang dihasilkan dari sumber alami seperti matahari, angin dan air dan dapat dihasilkan lagi dan lagi. Sumber akan selalu tersedia dan tidak merugikan

lingkungan. Gambar 8 Menunjukkan beberapa contoh sumber energi terbarukan. [9]

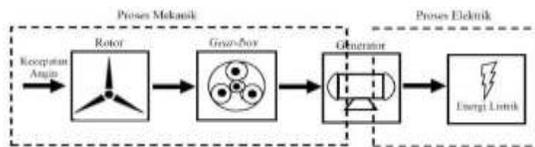


Gambar 8. Contoh Energi Terbarukan

F. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

PLTB yang merupakan pembangkit dengan sumber energi *intermittent*, menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang fluktuatif. Dalam pengoperasiannya, dibutuhkan pembangkit cadangan sebagai pembangkit pendukung untuk mengantisipasi ketika terjadi penurunan kecepatan angin dibawah desain turbin.

Pembangkit Listrik Tenaga Angin merupakan suatu sistem pembangkit listrik yang mengkonversikan suatu energi kinetic dari udara menjadi energi kinetic yang menyebabkan putaran yang terjadi pada generator sehingga menghasilkan arus listrik. Ketika rotor berputar maka secara otomatis generator tersebut akan mengalirkan energi listrik seperti gambar 9 [11].



Gambar 9. Konversi Energi Angin Ke Listrik

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Metode Analisa Data

Analisa data dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode simulasi aliran daya (*Time Domain Simulation*) menggunakan *software* DigSILENT *PowerFactory* 15.1.7 dengan menguji tipe generator angin yang tersedia di *software* dan melihat osilasi frekuensi dan tegangan pada bus yang diamati. Sistem yang digunakan adalah sistem kelistrikan Sulbagsel.

B. Rancangan Simulasi

Rancangan simulasi pada penelitian ini terdiri dari simulasi kestabilan frekuensi dan tegangan sistem ketika masuknya generator PLTB yang terdiri atas beberapa variasi generator. Adapun variasi skenario yang diterapkan pada penelitian kali ini antara lain:

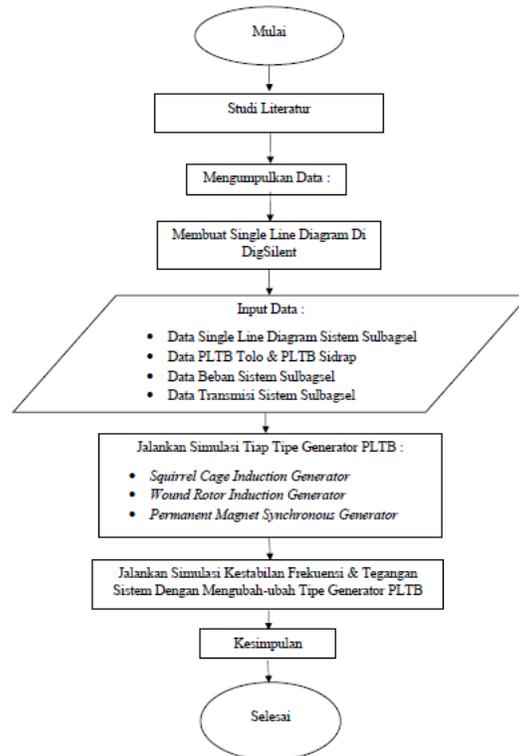
1. Studi kasus I
Simulasi masuknya PLTB tipe generator *squirrel cage induction generator* (SCIG) ke sistem Sulbagsel. Masuk pada detik ke 2.
2. Studi kasus II

Simulasi masuknya PLTB tipe generator *Wound rotor induction generator* (WRIG) ke sistem Sulbagsel. Masuk pada detik ke 2.

3. Studi kasus III
Simulasi masuknya PLTB tipe generator *Permanent magnet synchronous generator* ke sistem Sulbagsel. Masuk pada detik ke 2
4. Studi Kasus IV
Simulasi pelepasan PLTB Tolo dan masuknya PLTB Tersebar yang dipasang di Pinrang, Parepare, Barru, Pangkep dan Bantaeng.

C. Alur Penelitian

Adapun langkah-langkah penelitian ini digambarkan dalam diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 7.

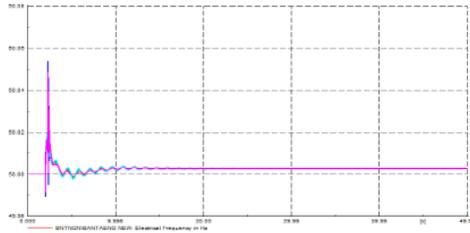


Gambar 10. Alur Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Simulasi kestabilan frekuensi masuknya PLTB Berdasarkan jenis generator

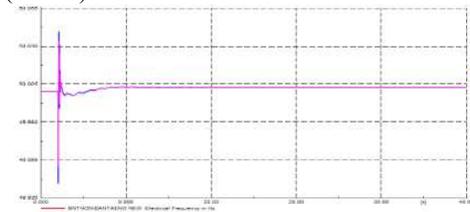
1. PLTB Tipe *Squirrel cage induction generator* (SCIG).



Gambar 11. Kondisi frekuensi pada bus 150 kV masuknya SCIG ke sistem.

PLTB dengan tipe generator *Squirrel cage induction generator* (SCIG) merupakan generator induksi. Dalam pengoperasiannya membutuhkan daya reaktif sebagai sumber magnetisasi generator. Sehingga pada saat awal masuk generator, osilasi frekuensi mengalami guncangan sesaat (magnetisasi generator) seperti terlihat pada Gambar 11. Pada generator ini merupakan sistem kecepatan tetap (*fixed speed* WTG)

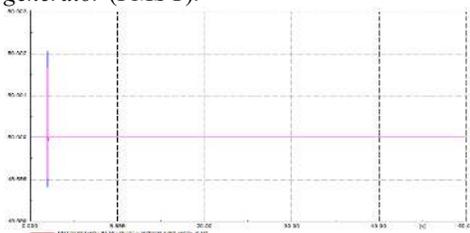
2. PLTB Tipe *Wound rotor induction generator* (WRIG).



Gambar 12. Kondisi frekuensi pada bus 150 kV masuknya WRIG ke sistem.

Generator PLTB tipe *Wound rotor induction generator* (WRIG) merupakan generator induksi yang juga membutuhkan daya reaktif dalam pengoperasiannya seperti terlihat pada Gambar 12. Tambahan resistansi pada tahanan rotor sehingga generator ini dapat diatur kecepatannya (*Variable speed* WTG) akan tetapi kontrol kecepatannya terbatas.

3. PLTB Tipe *Permanent magnet synchronous generator* (PMSG).



Gambar 13. Kondisi frekuensi pada bus 150 kV masuknya PMSG ke sistem.

Generator PLTB tipe *Permanent magnet synchronous generator* merupakan tipe generator sinkron, sumber eksitasi dari

generator ini berasal dari magnet permanen. Perubahan osilasi frekuensi ketika masuk ke sistem terlihat pada Gambar 13. Generator ini merupakan tipe *Variable speed* WTG (dapat beroperasi dalam rentang kecepatan angin yang rendah sekalipun).

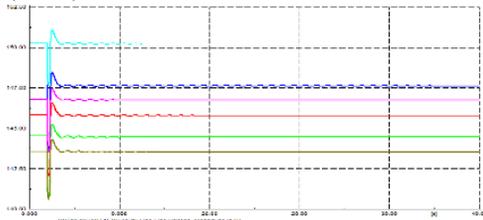
Tabel 1. Perbedaan waktu *steady state* pada tipe generator PLTB yang diuji.

Tipe Generator PLTB	Bus	Waktu Steady State (s)
<i>Squirrel Cage Induction Generator</i>	275 kV	23.5
	150 kV	26.09
	70 kV	25.36
	20 kV	19.79
<i>Wound Rotor Induction Generator</i>	275 kV	24.02
	150 kV	24.66
	70 kV	13.02
	20 kV	25.23
<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>	275 kV	2.15
	150 kV	2.10
	70 kV	2.11
	20 kV	2.13

Tabel 1 merupakan perbandingan antara tipe generator PLTB yang disimulasikan dan waktu steady state. Diperoleh tipe generator *permanent magnet synchronous generator* paling terbaik dengan waktu steady state berkisar 2.10s – 2.15s.

B. Simulasi kestabilan tegangan masuknya PLTB berdasarkan jenis generator.

1. PLTB Tipe *Squirrel cage induction generator* (SCIG).

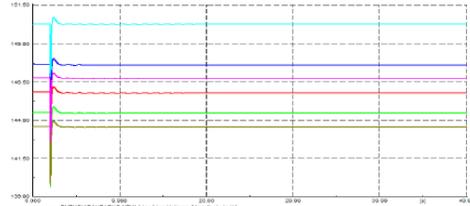


Gambar 14. Kondisi tegangan pada bus 150 kV masuknya SCIG ke sistem.

Generator PLTB tipe *Squirrel cage induction generator* (SCIG) merupakan generator induksi rotor sangkar, pada generator ini kontrol daya aktif dan reaktif yang buruk menjadi kelemahan utama. Gambar 14 merupakan osilasi perubahan nilai tegangan pada bus yang diamati. Tegangan sesaat mengalami penurunan (magnetisasi generator) dan perlahan naik hingga menuju *steady state*. Tabel 2 merupakan perbandingan ketika sebelum dan sesudah interkoneksi PLTB tipe SCIG. Tabel 2. Perubahan tegangan ketika sebelum dan sesudah interkoneksi PLTB tipe SCIG.

Bus	Tegangan Sebelum Interkoneksi (kV)	Drop Tegangan Sesaat Setelah Interkoneksi (kV)	Tegangan steady state Setelah Interkoneksi (kV)	Waktu Steady State (s)
Banteng New	147.330	143.045	147.277	22.95
Bulukumba	145.999	142.235	145.948	28.02
Jenepono	149.159	145.176	149.103	33.58
Maros	146.884	143.383	146.841	11.55
Punagaya	150.443	147.328	150.412	12.20
Sidrap	148.842	145.045	148.791	6.93

2. PLTB Tipe *Wound rotor induction generator* (WRIG).

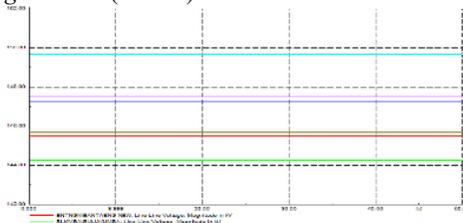


Gambar 15. Kondisi tegangan pada bus 150 kV masuknya WRIG ke sistem.

Generator PLTB tipe *Wound rotor induction generator* (WRIG) merupakan generator induksi rotor belitan, pada generator ini kontrol daya aktif dan reaktif yang buruk menjadi kelemahan utama. Gambar 15 merupakan osilasi perubahan nilai tegangan pada bus yang diamati. Pengaturan resistansi rotor dapat memperbesar rugi rugi daya pada generator. Tegangan sesaat mengalami penurunan (magnetisasi generator) dan perlahan naik hingga menuju *steady state*. Tabel 3 merupakan perbandingan ketika sebelum dan sesudah interkoneksi PLTB tipe WRIG. Tabel 3. Perubahan tegangan ketika sebelum dan sesudah interkoneksi PLTB tipe WRIG.

Bus	Tegangan Sebelum Interkoneksi (kV)	Drop Tegangan Sesaat Setelah Interkoneksi (kV)	Tegangan steady state Setelah Interkoneksi (kV)	Waktu Steady State (s)
Banteng New	147.330	143.484	147.277	15.64
Bulukumba	145.999	142.257	145.949	35.2
Jenepono	149.159	145.200	149.103	21.74
Maros	146.884	143.404	146.841	6.75
Punagaya	150.443	147.346	150.412	6.27
Sidrap	148.842	145.068	148.792	5.58

3. PLTB Tipe *Permanent magnet synchronous generator* (PMSG).



Gambar 16. Kondisi tegangan pada bus 150 kV masuknya PMSG ke sistem.

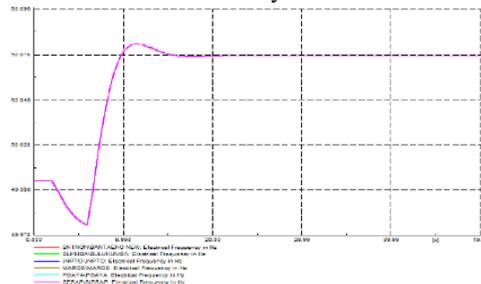
Generator PLTB tipe *Permanent magnet synchronous generator* (PMSG) merupakan generator sinkron magnet permanen, pada generator ini kontrol daya aktif dan reaktif yang baik, akan tetapi harga yang relatif lebih mahal dibandingkan generator SCIG dan WRIG karena menggunakan magnet permanen dan *power converter* sebelum terhubung ke grid. Gambar 16 merupakan osilasi perubahan nilai tegangan pada bus yang diamati. Pengaturan resistansi rotor dapat memperbesar rugi rugi daya pada generator. Tegangan sesaat mengalami penurunan (magnetisasi generator) dan perlahan naik hingga menuju *steady state*. Tabel 4 merupakan perbandingan ketika sebelum dan sesudah interkoneksi PLTB tipe PMSG.

Tabel 4. Perubahan tegangan sebelum dan sesudah interkoneksi PLTB Tipe PMSG.

Bus	Tegangan Sebelum Interkoneksi (kV)	Tegangan Setelah Interkoneksi (kV)	Perubahan Tegangan (kV)	Waktu Steady State (s)
Banteng New	147.330	147.330	-	-
Bulukumba	145.999	145.999	-	-
Jenepono	149.159	149.159	-	-
Maros	146.884	146.884	-	-
Punagaya	150.443	150.443	-	-
Sidrap	148.842	148.842	-	-

C. Simulasi masuknya PLTB Tersebar pada sistem Subagsel

1. Simulasi kestabilan frekuensi dengan lepasnya PLTB Tolo dan masuknya PLTB Tersebar.



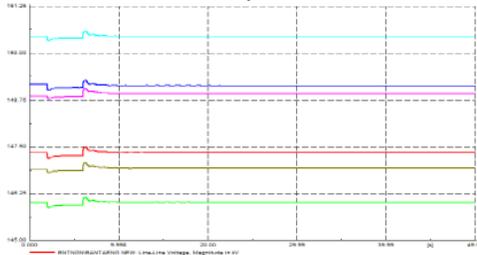
Gambar 17. Kondisi frekuensi pada bus 150 kV ketika PLTB Tolo lepas dan PLTB Tersebar masuk ke sistem.

Pada simulasi ini diterapkan PLTB Tolo dilepas pada detik ke 2 dan PLTB Tersebar masuk pada detik ke 6. Dengan adanya PLTB tersebar dapat saling mengkompensasi kehilangan atau penurunan daya PLTB disuatu tempat sehingga frekuensi sistem dapat lebih terjaga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17 dan perubahan nilai frekuensi pada Tabel 5.

Tabel 5. Perubahan frekuensi ketika PLTB Tolo lepas dan PLTB Tersebar masuk ke sistem.

Bus (kV)	Frekuensi sebelum gangguan (Hz)	Frekuensi Ketika PLTB Tolo Lepas (Hz)	Frekuensi Ketika PLTB Tersebar Masuk (Hz)
275	50	49.976	50.069
150	50	49.976	50.069
70	50	49.976	50.069
20	50	49.976	50.069

2. Simulasi kestabilan tegangan dengan lepasnya PLTB Tolo dan masuknya PLTB Tersebar.



Gambar 18. Kondisi tegangan pada bus 150 kV ketika PLTB Tolo lepas dan PLTB Tersebar masuk ke sistem.

Pada simulasi ini diterapkan PLTB Tolo dilepas pada detik ke 2 dan PLTB Tersebar masuk pada detik ke 6. Kehilangan atau penurunan daya yang dihasilkan pada suatu tempat PLTB dan ditempat lain PLTB Tersebar mengalami kenaikan daya keluaran generator sehingga dapat mengkompensasi kehilangan daya tersebut. Tegangan sistem lebih terjaga dengan asumsi kecepatan angin di PLTB Tolo berkurang dan kecepatan angin di PLTB Tersebar meningkat. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 18 dan perubahan tegangan pada bus yang diamati Tabel 6.

Tabel 6. Perubahan tegangan ketika PLTB Tolo lepas dan PLTB Tersebar masuk ke sistem.

Bus	Tegangan Sebelum Gangguan (kV)	Tegangan Ketika PLTB Tolo Lepas (kV)	Tegangan Ketika PLTB Tersebar Masuk (kV)
Bantaeng New	147.330	147.253	147.347
Bulukumba	145.999	145.930	146.008
Jenepono	149.159	149.073	149.129
Maros	146.884	146.857	146.923
Punagaya	150.443	150.406	150.447
Sidrap	148.842	148.828	148.908

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan pada *Software DigSILENT PowerFactory 15.1.7* maka dapat disimpulkan:

1. Simulasi kestabilan frekuensi dan tegangan sistem setelah masuknya PLTB baru (berdasarkan tipe generator), diperoleh tipe *permanent magnet synchronous generator* merupakan generator yang terbaik

diantara jenis generator yang diuji pada simulasi yang dilakukan. Osilasi frekuensi yang terjadi ketika PLTB masuk ke sistem didapatkan osilasi frekuensi menuju *steady state* paling singkat berkisar 2.10 s hingga 2.15 s. Tegangan sebelum dan sesudah interkoneksi generator menunjukkan tidak ada perubahan tegangan, hal ini disebabkan karena generator menggunakan *permanent magnet synchronous generator* (PMSG) dan menggunakan *power converter* untuk mengontrol keluaran generator sebelum

2. Untuk simulasi kestabilan frekuensi dan tegangan sistem ketika masuknya PLTB Tersebar, frekuensi dan tegangan sistem bisa lebih terjaga karena PLTB akan saling mengkompensasi akibat adanya kecepatan angin yang berbeda.

Referensi

1. Suropto, S. Sistem Tenaga Listrik. Yogyakarta, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2016.
2. Kundur, P. *Power System Stability and Control*. USA: McGraw-Hill, 1994.
3. Afandi, A.N. SISTEM TENAGA LISTRIK OPERASI SISTEM & PENGENDALIAN. Malang, Universitas Negeri Malang, 2005.
4. Marsudi, D. Operasi Sistem Tenaga Listrik, Yogyakarta, Graha Ilmu, 2006.
5. Saadat, H. *Power System Analysis*, Singapore, McGraw-Hill, 1999.
6. Shahidehpour, M. and Mircea, E. *Handbook Of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control*. Wiley-IEEE Press, 2013.
7. Wijaya, M. Dasar-dasar Mesin Listrik, Jakarta, Djambatan, 2001.
8. Babu, B, & Divya, S, "Comparative study of different types of generators used in wind turbine and reactive power compensation," IOSR J. Electr. Electron. Engineering (IOSR-JEEE) hal. 95-99
9. PNNP-MP, Buku Energi Terbarukan, Indonesia, Contained Energy Indonesia, 2011.
10. PT. PLN (Persero), Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN (Persero) 2019-2028. Jakarta, PT. PLN, 2020.
11. M. H. Basri, dan Djaman. "Rancang Bangun Dan Desain Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Model Savonius," J. SIMETRIK, Vol.9, no.2, hal. 208-214, 2019.