SKRIPSI

PENEMPATAN DAN UKURAN *BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM* (BESS) PADA SISTEM SULBAGSEL

Disusun dan diajukan oleh :

SEPTIAN PRAMUDITA
D041 191 017

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024

Optimized using
trial version
www.balesio.com

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PENEMPATAN DAN UKURAN *BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM* (BESS) PADA SISTEM SULBAGSEL

Disusun dan diajukan oleh

Septian Pramudita

D041191017

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 1 Desember 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,	Pembimbing Pendamping,
Dr. Ir. Zaenab Muslimin, M.T.	Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T.,IPM
NIP 196602011992022002	NIP 197311181998032001

Ketua Program Studi,

Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. IPM
NIP 19691026 199412 2 001

Optimized using
trial version
www.balesio.com

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :
Nama : Septian Pramudita
NIM : D041191017
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

PENEMPATAN DAN UKURAN *BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM* (BESS) PADA SISTEM SULBAGSEL

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 13 Maret 2024

Yang Menyatakan

Septian Pramudita

Optimized using
trial version
www.balesio.com

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah SWT, penulis panjatkan puji dan syukur atas segala rahmat dan hidayah yang telah dilimpahkan kepada penulis sehingga dengan izin-Nya, skripsi ini dapat dikerjakan hingga selesai. Sholawat beserta salam penulis curahkan kepada kekasih Allah SWT, yaitu Nabi Muhammad SAW yang telah menggulung tikar kejahilian dan membentang tikar peradaban kepada umat manusia. Berkat perjuangan beliau, penulis bisa mendapatkan banyak ilmu hingga di titik ini.

Penyelesaian skripsi ini merupakan upaya penulis dalam memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini berjudul **"Penempatan dan Ukuran Battery Energy Storage System (BESS) Pada Sistem Sulbagsel"**. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini mengalami berbagai hambatan. Namun, berkat kegigihan, usaha, dan doa, penulisan skripsi ini akhirnya dapat terselesaikan. Penyusunan skripsi ini juga tidak terlepas dari bantuan, doa, dorongan, semangat serta bimbingan dari berbagai pihak. Tanpa menghilangkan rasa hormat, kami ucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini, antara lain:

1. Ibu Andi Hufraniah, Ayah Thamar selaku kedua orang tua sekaligus pintu surga dan sebagai contoh bagi penulis yang tak henti-hentinya mendoakan dan memberikan dukungan baik moral maupun materil kepada penulis hingga tahap penyelesaian skripsi ini. Juga adik-adik penulis Diaz Aditya Pramudita, Ratri Kusuma Wardani, Neisya Almaghfira di Parepare yang selalu mendoakan, mendukung dan memberikan semangat kepada penulis baik dalam keadaan senang ataupun susah
2. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

u Dr. Ir. Hj. Zaenab Muslimin, MT. selaku dosen pembimbing I dan apak Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, ST., MT., IPM. selaku dosen mbimbing II, terima kasih telah meluangkan waktu dan memberikan mbingan, gagasan serta ide-ide dalam penyelesaian skripsi ini.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

4. Bapak Ir. Tajuddin Waris, MT. dan Ibu Dr. Fitriyanti Mayasari, ST., MT. selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan masukan serta kritik dan saran guna penyempurnaan tugas akhir ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro atas segala ilmu, bantuan dan kemudahan yang diberikan selama penulis menempuh proses perkuliahan.
6. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Sulawesi dan PT. PLN (Persero) Unit Pelayanan Penganturan Beban Makassar serta Unit Layanan PLTA Bakaru yang telah membantu dalam memperoleh data-data yang diperlukan dan memberikan masukan mengenai penelitian yang dilakukan.
7. Mama Andi Nahrawarsih, Bapak Suharyono yang penulis anggap sebagai orangtua kandung yang tak henti-hentinya mendoakan dan memberikan dukungan baik moral maupun materil kepada penulis hingga tahap penyelesaian skripsi ini.
8. Kepada Om Rudi dan P ija yang penulis anggap sebagai rumah dan pengganti orangtua selama proses perkuliahan.
9. Kepada Pak Pinanggih yang telah membantu memberikan gagasan dan pengetahuan, menjadi teman diskusi, dan memberikan saran dan masukan kepada penulis.
10. Mas Mahardika, Mba Yelly, Sukmayati dan Pak Keno yang telah menuangkan ilmu dan gagasan bagi penulis selama pembuatan tugas akhir ini.
11. Teman-teman seperjuangan Wartuts yang penulis anggap sebagai saudara. terima kasih atas kebersamaan, kerjasama, saran dan dukungan yang diberikan.
12. Rekan Komunitas Pelajar Muslim yang senantiasa memberikan dukungan moril dan senantiasa mengingatkan penulis untuk selalu taat beribadah.
13. Kepada rekan-rekan TR19GER yang sejak pertama kali menginjakkan kaki di Universitas Hasanuddin hingga saat ini berjuang bersama penulis untuk menuntut ilmu di kampus merah tercinta.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

14. Rekan-rekan pengurus BPH MADZ FT-UH yang telah memberi pembelajaran moral dan aqidah selama periode kepengurusan.
15. Kepada Ocang, Sony, Bogel, Palli, Aca, Ocil, Fatur, Palli, Raste, Adeq, Bull, serta semua rekan rumson dan rumcil yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.
16. Kawan KKNT PS BACUKIKI yang telah memberikan kesan dan menjadi bagian dari perjalanan hidup bagi penulis.
17. Kepada Alonica, terima kasih telah jadi bagian dari perjalanan dan proses pendewasaan, terima kasih telah meluangkan waktu dan tenaga untuk penulis sebagai tempat bercerita, dimanapun kamu berada semoga kebahagiaan senantiasa menghampirimu.
18. Kepada diri saya sendiri. Septian Pramudita. Terima kasih sudah bertahan sejauh ini. Terima kasih tetap memilih berusaha dan merayakan dirimu sendiri sampai di titik ini, walau sering kali merasa putus asa atas apa yang diusahakan dan belum berhasil, namun terima kasih tetap menjadi manusia yang selalu mau berusaha dan tidak lelah mencoba. Terima kasih karena memutuskan tidak meyerah sesulit apapun proses penyusunan skripi ini dan telah menyelesaikannya sebaik dan semaksimal mungkin. ini merupakan pencapaian yang patut dirayakan untuk diri sendiri. Berbahagialah selalu dimanapun berada. Septian. Apapun kurang dan lebihmu mari merayakannya sendiri.
19. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat dalam skripsi ini, oleh karena itu saran dan kritik dari semua pihak diharapkan untuk kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat diterima sebagai sumbangan pikiran penulis yang mendatangkan manfaat baik bagi penulis maupun pembacanya.

Makassar, 29 Februari 2024

Septian Pramudita

Optimized using
trial version
www.balesio.com

ABSTRAK

SEPTIAN PRAMUDITA. *Penempatan dan Ukuran Battery Energy Storage System (BESS) Pada Sistem Sulbagsel* (dibimbing oleh Zaenab Muslimin dan Indar Chaerah Gunadin)

Regulasi frekuensi dan pengelolaan kerugian daya aktif merupakan aspek penting dalam pengoperasian sistem tenaga listrik. *Battery Energy Storage Systems* (BESS) telah muncul sebagai solusi inovatif untuk meningkatkan kinerja jaringan listrik dengan mengatasi fluktuasi frekuensi dan mengurangi kerugian daya. Penelitian ini menunjukkan peran BESS dalam mengoptimalkan regulasi frekuensi dan mengelola rugi daya aktif pada sistem tenaga listrik. Analisis kinerja dilakukan dengan mempertimbangkan integrasi BESS dalam beberapa skenario. Hasilnya menunjukkan bahwa penerapan BESS dengan kapasitas sebesar 8,437 MW dengan melakukan simulasi *steady state simetris* pada software DigSILENT PowerFactory untuk menguji fungsi BESS sebagai regulasi frekuensi dan meminimalisir rugi daya aktif pada sistem Sulbagsel. Hasilnya BESS dapat mengurangi atau menambah frekuensi sistem Sulbagsel baik dalam kondisi *over frequency* maupun *under frequency* , BESS dapat menurunkan frekuensi rata-rata sebesar 0,02 Hz dan meminimalkan kerugian daya sebesar 1,09 MW saat BESS dalam kondisi *discharge* sedangkan saat BESS dalam kondisi *charge* rugi-rugi daya bertambah menjadi 1,22 MW saat BESS terpasang pada Bus Tonasa. Studi ini memberikan wawasan penting bagi pengembangan regulasi frekuensi berbasis BESS untuk mencapai sistem stabil.

Kata kunci : Battery Energy Storage System, regulasi frekuensi, dan rugi daya aktif

Optimized using
trial version
www.balesio.com

ABSTRACT

SEPTIAN PRAMUDITA. Battery Energy Storage System (BESS) on Sulbagsel System (dibimbing oleh Zaenab Muslimin dan Indar Chaerah Gunadin)

Frequency regulation and management of active power losses are important aspects of power system operation. Battery Energy Storage Systems (BESS) has emerged as an innovative solution to improve power grid performance by addressing frequency fluctuations and reducing power losses. This research demonstrates the role of BESS in optimizing frequency regulation and managing active power losses on power systems. Performance analysis is carried out considering BESS integration in several scenarios. The results showed that the application of BESS with a capacity of 8.437 MW by performing a symmetrical steady state simulation on the DigSILENT PowerFactory software to test the BESS function as frequency regulation and minimize active power losses on the Sulbagsel system. The result of this BESS can decrease or increase the frequencies of Sulbagesel systems both under and over freqüence conditions, BESS could lower the average Frequency by 0,02 Hz and minimise the power loss of 1,09 MW when BESS is in discharge conditions, while when Bess is in charge conditions the power loss increased to 1,22 MW when the Bess was installed on the Tonasa Bus. This study provides important insights into the development of BESS-based frequency regulation to stable systems.

Keywords: Battery Energy Storage System, frequency regulation, and active power losses

Optimized using
trial version
www.balesio.com

DAFTAR ISI

SKRIPSI ii
ABSTRAK iv
DAFTAR ISI 1
DAFTAR GAMBAR i
DAFTAR TABEL 3
BAB I 1
PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Manfaat Penelitian 3
1.5 Batasan Masalah 4
1.6 Sistematika Penulisan 4
BAB II 5
TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Sistem Tenaga Listrik 5
2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik 6
2.2.1 Stabilitas tegangan 9
2.2.2 Stabilitas transien 10
2.2.3 Stabilitas frekuensi 10
2.3 Hubungan Antara Frekuensi dan Daya Aktif 14
2.4 Dampak Pembangkit Intermiten Terhadap Frekuensi Sistem 15
2.5 Regulasi Frekuensi 16
2.6 Analisis Aliran Daya 18
2.7 Battery Energy Storage System (BESS) 20
2.8 Sistem Kontrol *Battery Energy Storage System* (BESS) 22
2.8.1 Sistem Kontrol Frekuensi 22
2.8.2 Sistem Kontrol Pengisian dan Pengosongan BESS 23
2.8.3 Pemodelan Sistem Kontrol *Battery Energy Storage System* (BESS) 24
2.9 Kapasitas dan Lokasi Penempatan Optimal *Battery Energy Storage System* (BESS) 25
2.10 Indeks Kekuatan Sistem (IKS) Sulbagsel 27
2.11 Penggunaan Software DigSilent 27
BAB III 29
METODOLOGI PENELITIAN 29
elitian 29
n Lokasi Penelitian 29
Bahan Penelitian 29

Optimized using
trial version
www.balesio.com

3.4 Teknik Pengumpulan Data 29
3.5 Teknik Pengolahan Data 29
3.6 Teknik Analisa Data 30
3.7 Diagram Alir 31
BAB IV 33
HASIL DAN PEMBAHASAN 33
4.1 Single Line Diagram Sistem Sulbagsel 33
4.2 Perhitungan Kapasitas *Battery Energi Storage System* (BESS) 34
4.2.1 Indeks Kekuatan Sistem (IKS) 34
4.2.2 Penentuan Kapasitas BESS 35
4.3 Lokasi Penempatan *Battery Energy Storage System* (BESS) 37
4.3.1 Lokasi Penempatan *Battery Energy Storage System* (BESS) Sebagai Regulasi Frekuensi 37
4.3.2 Lokasi Penempatan BESS Untuk Mengurangi Rugi Daya Aktif 38
4.4 Hasil Simulasi 38
4.4.1 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario PelepasanBeban Tonasa 39
4.4.2 Simulasi Kualitas Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Pelepasan Pembangkit Tolo 45
4.4.3 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario OutputPLTB Sidrap 100%, 75%, 50%, 25% 52
4.4.4 Simulasi Rugi Daya Aktif Sistem Kelistrikan Sulbagsel 63
4.5 Validasi Simulasi Aliran Daya (*Load Flow*) Sistem Sulbagsel 71
4.5.1 Data Daya bangkitan dan Data Pembebanan Daya Aktif Pada Sistem Sulbagsel 71
4.5.2 Hasil Simulasi Aliran Daya pada *Software Digsilent* 71
4.6 Validasi Simulasi Frekuensi 72
4.6.1 Perhitungan Perubahan Frekuensi Sistem Sulbagsel setelahPenambahan Beban 50 MW Secara Teori 73
4.6.2 Hasil Simulasi Perubahan Frekuensi Sistem Sulbagsel setelahPenambahan Beban 50 MW pada *Digsilent Powerfactory 15.1* 76
BAB V 77
KESIMPULAN DAN SARAN 77
5.1 Kesimpulan 77
5.2 Saran 78
DAFTAR PUSTAKA 79

Optimized using
trial version
www.balesio.com

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem Tenaga Listrik.....5
Gambar 2 Ilustrasi Kestabilan Frekuensi 13
Gambar 3 *Model of the frequency controller* 23
Gambar 4 *Model of the charge controller*.....24
Gambar 5 Diagram Alir Penelitian.....31
Gambar 6 Diagram Alir Penelitian Pembuatan Single Line Diagram 32
Gambar 7 Single Line Diagram Sistem Sulbagsel 33
Gambar 8 Grafik Regresi IKS Sulbagsel 35
Gambar 9 Grafik Frekuensi Rata-rata Saat Gangguan Under Frequency 36
Gambar 10 Grafik Frekuensi Rata-rata Saat Gangguan Over Frequency 36
Gambar 11 Lokasi Penempatan BESS Sebagai Regulasi Frekuensi.....37
Gambar 12 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Pelepasan Beban Tonasa Sebelum Pemasangan BESS 39
Gambar 13 Simulasi frekuensi sistem sulbagsel skenario pelepasan beban Tonasa setelah pemasangan BESS dengan pemodelan sistem kontrol 1.....40
Gambar 14 Simulasi frekuensi sistem sulbagsel skenario pelepasan beban Tonasa setelah pemasangan BESS dengan pemodelan sistem kontrol 2.....41
Gambar 15 Kondisi daya BESS saat *charge* dengan pemodelan sistem kontrol 1 42
Gambar 16 Kondisi daya BESS saat *charge* dengan pemodelan sistem kontrol 2 43
Gambar 17 Perubahan Daya Bangkit Pembangkit 44
Gambar 18 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Pelepasan PLTB Tolo Sebelum Pemasangan BESS 46
Gambar 19 Simulasi frekuensi sistem sulbagsel skenario pelepasan PLTB Tolo setelah pemasangan BESS dengan pemodelan sistem kontrol 1 47
Gambar 20 Simulasi frekuensi sistem sulbagsel skenario pelepasan PLTB Tolo setelah pemasangan BESS dengan pemodelan sistem kontrol 2 48
Gambar 21 Kondisi daya BESS saat dis*charge* dengan pemodelan sistem kontrol 1 49
Gambar 22 Kondisi daya BESS saat dis*charge* dengan pemodelan sistem kontrol 2 50
Gambar 23 Simulasi Perubahan Daya Bangkitan Pembangkit 51
Gambar 24 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Output PLTB Sidrap 100% Sebelum Pemasangan BESS 52
Gambar 25 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Output PLTB Sidrap 100% Sebelum Pemasangan BESS 53
Gambar 26 Kondisi Daya BESS Saat *Charge*.....54
Gambar 27 Daya Bangkitan PLTB Sidrap 100% Setelah Pemasangan BESS 54
Gambar 28 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Output PLTB Sidrap 75% Sebelum Pemasangan BESS 55
Gambar 29 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Output PLTB Sidrap 75% Setelah Pemasangan BESS 56

Optimized using
trial version
www.balesio.com

Gambar 30 Kondisi Daya BESS Saat *Charge*.....56
Gambar 31 Daya Bangkitan PLTB Sidrap 75% Setelah Pemasangan BESS 57
Gambar 32 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Output PLTB Sidrap 50% Sebelum Pemasangan BESS 58
Gambar 33 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Output PLTB Sidrap 50% Setelah Pemasangan BESS 58
Gambar 34 Daya Bangkitan PLTB Sidrap 50% Setelah Pemasangan BESS. 59
Gambar 35 Kondisi Daya BESS Saat *Charge*.....60
Gambar 36 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Output PLTB Sidrap 25% Sebelum Pemasangan BESS 61
Gambar 37 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Output PLTB Sidrap 25% Setelah Pemasangan BESS 61
Gambar 38 Kondisi Daya BESS Saat Discharge 62
Gambar 39 Daya Bangkitan PLTB Sidrap 25% Setelah Pemasangan BESS 63
Gambar 40 Lokasi Pemasangan BESS Pada Bus Tonasa 63
Gambar 41 Hasil Analisa Aliran Daya Sistem Sulbagsel Sebelum Pemasngan BESS.....64
Gambar 42 Hasil Analisa Aliran Daya Sistem Sulbagsel Setelah Pemasangan BESS Pada Bus Tonasa saat Kondisi *Charge* 65
Gambar 43 Hasil Analisa Aliran Daya Sistem Sulbagsel Setelah Pemasangan BESS Pada Bus Tonasa saat Kondisi *Discharge*.....66
Gambar 44 Hasil Analisa Aliran Daya Sistem Sulbagel 72

Optimized using
trial version
www.balesio.com

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Rentang Frekuensi Sistem Tenaga Listrik.....17
Tabel 2 Pemodelan Sistem Kontrol BESS 25
Tabel 3 Simulasi Frekuensi Skenario Pelepasan Pembangkit.....34
Tabel 4 Simulasi Hasil Frekuensi Skenario Pelepasan Beban Tonasa.....44
Tabel 5 Simulasi Hasil Frekuensi Skenario Pelepasan PLTB Tolo 51
Tabel 6 Simulasi Hasil Frekuensi Sebelum dan Sesudah Pemasangan BESS Pada Bus Tonasa 66
Tabel 7 Simulasi Rugi Daya Aktif Sebelum dan Sesudah Pemasangan BESS Pada Bus Tonasa saat Kondisi *Charge* dan *Discharge* 67
Tabel 8 Data Nilai Partisipasi Faktor tiap Governor Pembangkit.....74

Optimized using
trial version
www.balesio.com

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Masa sekarang ini tidak dapat dipungkiri bahwa penggunaan energi listrik semakin meningkat setiap tahunnya, karena banyaknya permintaan energi listrik yang semakin meningkat tersebut tentunya harus disesuaikan dengan kualitas daya dan jumlah pembangkit agar dapat melayani beban listrik dengan handal. Dengan adanya ketidakseimbangan beban dan pembangkit maka akan mengakibatkan ketidakstabilan tegangan serta berdampak pada frekuensi sistem khususnya pada sistem Sulbagsel. Hal ini dapat menyebabkan kualitas daya listrik menurun bahkandapat mengakibatkan kegagalan ataupun kesalahan operasi pada peralatan-peralatan yang terjadi pada konsumen energi listrik.

Sistem tenaga listrik yang handal adalah sistem tenaga yang dapat melayani beban secara berkelanjutan, serta memiliki tegangan, dan frekuensi yang konstan. Sasaran utama dari pengelolaan sistem tenaga listrik adalah untuk menyediakan energi kepada konsumen secara kontinyu dengan keandalan pelayanan yang baik. Untuk memenuhi hal tersebut, sistem tenaga harus dirancang dan dioperasikan pada kondisi keseimbangan antara pembangkit dan beban. Kondisi sistem yang benar-benar stabil sebenarnya tidak pernah ada. Perubahan beban selalu terjadi dalam sistem.

Kualitas daya listrik adalah masalah daya listrik yang berbentuk penyimpangan tegangan, arus atau frekuensi yang mengakibatkan kegagalan ataupun kesalahan operasi pada peralatan-peralatan yang terjadi pada konsumen energi listrik (Roger C. Dugan, 2004). Daya adalah suatu nilai dari energi listrik yang dikirimkan dan didistribusikan, di mana besarnya daya listrik tersebut sebanding dengan perkalian besarnya tegangan dan arus listrik. Sistem suplai daya listrik dapat dikendalikan oleh kualitas dari tegangan, dan tidak dapat [illegible]kan oleh arus listrik karena arus listrik berada pada sisi beban yang [illegible]ndividual, sehingga pada dasarnya kualitas daya adalah kualitas dari [illegible] itu sendiri (Roger C. Dugan, 2004).

Optimized using
trial version
www.balesio.com

Salah satu penyebab penurunan kualitas daya listrik adalah karena terjadinya ketidakstabilan frekuensi pada sistem tenaga listrik. Penurunan dan kenaikan frekuensi disebabkan karena perubahan beban yang menyebabkan sistem beroperasi pada ketidakstabilan. Menurut data PT. PLN PERSERO bahwa dalam upaya memitigasi potensi ketidakseimbangan frekuensi sistem akibat permintaan beban yang semakin meningkat dan juga yang menjadi tantangan pada kualitas daya adalah masuknya pembangkit *intermitten* dimana daya yang dihasilkan tidak konstan yang akan memengaruhi kestabilan frekuensi khususnya pada sistem Sulbagsel. Terlebih lagi saat ini pemasangan *Battery Energy Storage System* (BESS) untuk sistem tenaga listrik sudah banyak dikembangkan dan juga beberapa perusahaan sudah menyewakan BESS untuk sistem tenaga listrik, hal tersebut mengakibatkan biaya operasional untuk pemasangan BESS berkurang. Oleh karena itu dibutuhkan suatu solusi mengenai keandalan daya khususnya daya aktif pada sistem tenaga listrik agar frekuensi sistem tetap dalam keadaan stabil sehingga energi listrik yang terpakai bersifat efisien, bermutu, dan dapat diandalkan.Salah satu cara yang dapat digunakan adalah penggunaan BESS pada sistem tenaga listrik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas daya listrik khususnya pada gangguan frekuensi, dimana gangguan frekuensi adalah suatu kondisi dimana frekuensi sistem tidak dalam rentang frekuensi nominal yaitu 50 Hz selain itu dengan memperhatikan lokasi pemasangan serta kapasitas optimal dari BESS itu sendiri kita dapat memaksimalkan fungsi dari BESS yang terpasang. Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode aliran daya *newton rhapson* untuk menentukan bus yang memiliki *losses* terbesar sedangkan untuk frekuensi sendiri menggunakan parameter IKS (Indeks Kekuatan Sistem). Indeks Kekuatan Sistem (IKS) merupakan aspek penilaian sebuah sistem interkoneksi agar dapat mengetahui batasan nilai kekuatan sistem ketika mengalami gangguan. Berdasarkan hal tersebut maka, kami melakukan penelitian dengan judul "**Penempatan dan Ukuran *Battery Energy Storage System* (BESS) tem Sulbagsel**". Pada penelitian ini, penempatan dan ukuran BESS pada ulbagsel akan disimulasikan menggunakan software Digsilent Power 5.1.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka dapat dirumusakan permasalahan pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Bagaimana menentukan besar kapasitas *Battery Energy Storage System* (BESS) di sistem kelistrikan Sulbagsel?
2. Bagaimana menentukan lokasi untuk penempatan *Battery Energy Storage System* (BESS) sebagai regulasi frekuensi dan perbaikan rugi daya aktif?
3. Bagaimana frekuensi sistem Sulbagsel sebelum dan sesudah pemasangan *Battery Energy Storage System* (BESS)?
4. Bagaimana rugi daya aktif sistem Sulbagsel sebelum dan sesudah pemasangan *Battery Energy Storage System* (BESS)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang disebutkan diatas, maka tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut ;

1. Menentukan ukuran *Battery Energy Storage System* (BESS) pada sistem Sulbagsel sebagai regulasi frekuensi dan perbaikan rugi daya aktif.
2. Menentukan lokasi *Battery Energy Storage System* (BESS) pada sistem Sulbagsel sebagai regulasi frekuensi dan perbaikan rugi daya aktif.
3. Menentukan frekuensi sistem Sulbagsel sebelum dan sesudah pemasangan *Battery Energy Storage System* (BESS).
4. Menentukan rugi daya aktif sistem Sulbagsel sebelum dan sesudah pemasangan *Battery Energy Storage System* (BESS).

1.4 Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi tambahan referensi bagi peneliti dalam mengembangkan penggunaan BESS pada sistem tenaga listrik.
2. Diharapkan penelitian ini dapat dijadikan bahan masukan bagi pihak PT. .N dalam pengembangan sistem tenaga listrik khususnya Penggunaan ESS Pada Sistem Sulbagsel.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

1.5 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah dalam penelitian ini, antara lain :

1. Perangkat lunak yang digunakan adalah Digsilent 15.1.
2. Sistem kelistrikan yang dianalisis adalah sistem Sulbagsel.
3. Kualitas daya yang dimaksud adalah frekuensi dan rugi daya aktif.
4. Data yang digunakan berdasarkan data historis sistem kelistrikan sulbagsel tahun 2022.
5. Rumus dan perhitungann serta simulasi yang dilakukan berdasarkan dari literature yang dijabarkan pada tinjauan pustaka.
6. Penelitian ini tidak memperhatikan analisis ekonomi.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pemahaman terhadap penelitian ini, maka diuraikan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini membahas mengenai teori-teori relevan untuk mendukung penelitian yang diperoleh dari sumber ilmiah.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi diagram alir penelitian, rancangan sistem, waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta teknik pengumpulan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas mengenai hasil penelitian yang diperoleh serta pembahasan terkait penelitian yang dilakukan.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

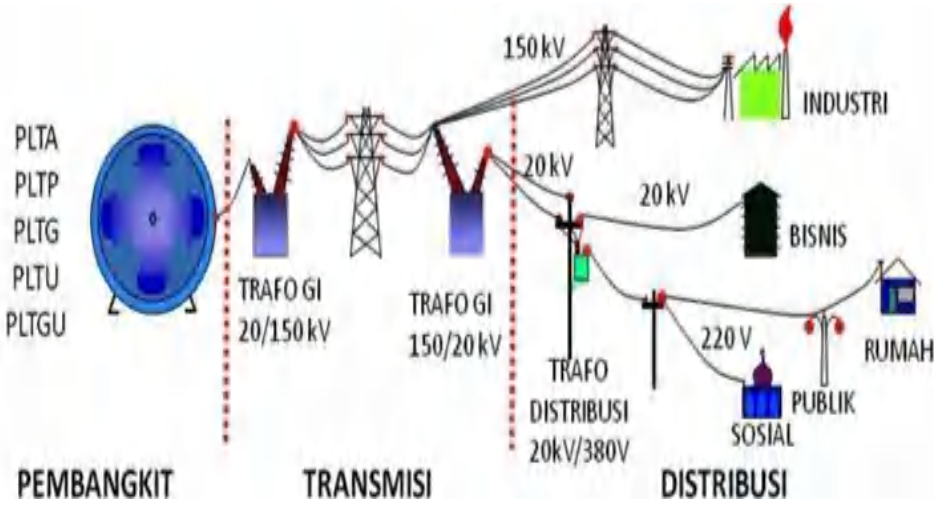
berisi simpulan dari hasil penelitian yang dilakukan beserta saran – saran ıelitian selanjutnya.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan dan berkerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Secara garis besar sistem tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 1 (Suripto, 2018).



Gambar 1 Sistem tenaga listrik
(Sumber :Suripto, 2018)

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

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

·an adalah peralatan listrik di lokasi konsumen yang memanfaatkan energi ·ik dari sistem tersebut.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

Pada sistem saluran transmisi biasanya digunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini karena fungsi utama dari saluran transmisi adalah menyalurkan daya, sehingga yang diperhatikan terlebih dahulu adalah sistem harus mampu menyalurkan daya dengan efisiensi ~~yang tinggi~~ atau rugi-rugi daya dan drop tegangannya kecil. Upaya yang dilakukan adalah mempertinggi level tegangan agar arus yang mengalir pada jaringan transmisi lebih kecil. Level tegangan saluran transmisi lebih tinggi dari tegangan yang dihasilkan oleh generator pembangkit. Tegangan saluran transmisi umumnya berkisar antara 70 s/d 500 kV. Untuk menaikkan tegangan dari level pembangkit ke level tegangan saluran transmisi diperlukan transformator penaik tegangan.

Pada jaringan distribusi biasanya digunakan tegangan yang lebih rendah dari tegangan saluran transmisi. Hal ini karena daya yang didistribusikan oleh masing-masing jaringan distribusi biasanya relatif kecil dibanding dengan daya yang disalurkan saluran transmisi, dan juga menyesuaikan dengan tegangan pelanggan atau konsumen energi listrik. Level tegangan jaringan distribusi yang sering digunakan ada dua macam, yaitu 20 kV untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan 220 V untuk jaringan tegangan rendah (JTR). Dengan demikian diperlukan gardu induk yang berisi trafo penurun tegangan untuk menurunkan tegangan dari saluran transmisi ke tegangan distribusi 20 kV. Diperlukan (pula) trafo distribusi untuk menurunkan tegangan dari 20 kV ke 220 V sesuai tegangan pelanggan. Level tegangan beban pelanggan menyesuaikan dengan jenis bebannya, misalnya beban industri yang biasanya memerlukan daya yang relatif besar biasanya menggunakan tegangan menengah 20 kV, sedang beban rumah tangga dengan daya yang relatif kecil, biasanya menggunakan tegangan rendah 220 V (Suripto, 2016).

2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan tegangan berkaitan dengan kemampuan sebuah sistem tenaga
lam mempertahankan tegangan pada setiap bus pada kondisi normal
rjadinya gangguan (P. Kundur, 1994). Sistem tenaga listrik mempunyai
ban yang berubah-ubah di setiap waktu.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat, seperti *reliability, quality dan stability*.

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

Dalam sistem tenaga listrik yang baik maka ketiga syarat tersebut harus dipenuhi yaitu sistem harus mampu memberi pasokan listrik secara terus menerus dengan standar besaran ~~untuk~~ tegangan dan frekuensi sesuai dengan aturan yang berlaku dan harus segera kembali normal bila sistem mengalami gangguan. Untuk jaringan yang sangat kompleks dimana beberapa pembangkit saling terkoneksi satu sama lain maka keluaran daya elektrik berupa besaran tegangan dan frekuensi haruslah diperhatikan agar tidak ada pembangkit yang kelebihan beban dan pembangkit yang lain bebannya kecil. Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik tetap dan harus dipasok dengan besaran daya yang sesuai, bila pada saat tertentu terjadi lonjakan atau penurunan beban yang tidak terduga maka perubahan ini sudah dapat dikategorikan ke dalam gangguan pada sistem tenaga listrik yakni kondisi tidak seimbang antara pasokan listrik dan permintaan energi listrik akibat adanya gangguan baik pada pembangkit ataupun pada sistem transmisi sehingga mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi lebih berat. Untuk itu diperlukan satu penelaahan kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak terlepas dari sistem.

Analisis kestabilan biasanya digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yaitu (Saadat, 1999):

1. stabilan Keadaan Tetap (*Steady State Stability*)

   stabilan keadaan tetap adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk nerima gangguan kecil yang bersifat gradual, yang terjadi disekitar titik

Optimized using
trial version
www.balesio.com

keseimbangan pada kondisi tetap. Kestabilan ini tergantung pada karakteristik komponen yang terdapat pada sistem tenaga listrik antara lain: pembangkit, beban, jaringan transmisi, dan kontrol sistem itu sendiri. Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan.

2. Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)

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

3. Kestabilan Peralihan (*Transient Stability*)

   Kekestabilan peralihan adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan/ sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan kestabilan karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem. Analisis kestabilan peralihan merupakan analisis yang utama untuk menelaah perilaku sistem daya misalnya gangguan yang berupa:

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

Sistem daya listrik masa kini jauh lebih luas, ditambah interkoneksi antar sistem yang rumit dan melibatkan beratus-ratus mesin yang secara dinamis saling mempengaruhi melalui perantara jala-jala tegangan ekstra tinggi, mesin-mesin ini mempunyai sistem penguatan yang berhubungan. Kisaran masalah yang dianalisis banyak menyangkut gangguan yang besar dan tidak lagi memungkinkan menggunakan proses kelinearan. Masalah kestabilan peralihan dapat lebih lanjut ·dalam. Kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk ·ing). Kestabilan ayunan pertama didasarkan pada model generator yang ·derhana tanpa memasukkan sistem pengaturannya, biasanya periode ng diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada

Optimized using
trial version
www.balesio.com

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

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

2.2.1 Stabilitas tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan level tegangan pada batas yang diizinkan di semua bus apabila terjadi gangguan. Sebuah sistem dapat dikatakan stabil apabila mampu menjaga naik turun level tegangan pada batas yang sesuai standar dalam jangka waktu yang diizinkan saat terjadi keadaan tidak seimbang. Sebaliknya sistem tidak stabil apabila tidak dapat mengembalikan keadaan semula apabila terjadi gangguan. Salah satu penyebab ketidakstabilan adalah ketidaksinkronan antara kebutuhan beban dan pembangkitan. Biasanya gangguan yang terjadi adalah lepasnya beban yang signifikan atau lepasnya generator sehingga tegangan menjadi berosilasi tidak stabil (M. Faisol, 2012)

Kestabilan berdasarkan gangguan yang terjadi dapat dikategorikan menjadi dua yaitu kestabilan tegangan akibat gangguan besar dan kestabilan tegangan akibat gangguan kecil. Gangguan besar yang terjadi adalah hilangnya supply dari generator (generator outage), perubahan beban yang besar dan short circuit. Sedangkan gangguan kecil yaitu perubahan beban dengan kapasitas yang kecil.

Kestabilan berdasarkan lama gangguan dapat dibedakan menjadi gangguan jangka pendek dan jangka panjang. Gangguan kestabilan jangka pendek ›atkan *voltage dip* dan *voltage swell*. Sedangkan gangguan kestabilan anjang dapat mengakibatkan *under voltage* dan *over voltage* (IEEE,

Optimized using
trial version
www.balesio.com

Stabilitas tegangan pada kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan-tegangan yang stabil pada semua bus dalam sistem setelah mengalami untuk gangguan dari kondisi operasi yang diberikan awal. Stabilitas tegangan juga dibagi dalam dua subkategori, yaitu:

1. Stabilitas tegangan gangguan besar, stabilitas ini mengacu pada kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan agar tetap stabil ketika ada gangguan yang besar seperti kesalahan sistem, kehilangan pembangkit, atau segala kemungkinan darurat yang terjadi pada saluran.
2. Stabilitas tegangan gangguan kecil, stabilitas ini mengacu pada kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan stabil ketika mengalami gangguan kecil seperti perubahan penambahan dalam beban sistem (Kundur, 1994).

2.2.2 Stabilitas transien

Stabilitas transien adalah keadaan sistem dalam mempertahankan sinkornisasi setalah terjadinya gangguan besar yang sifatnya secara tiba-tiba selama sekitar satu ayunan dengan mengasumsikan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dan governor belum bekerja. Pendekatan non-linier digunakan dalam menganalisis stabilitas transien. Masalah kestabilan dengan gangguan besar tidak lagi dapat dikerjakan dengan proses linear, sehingga dengan menggunakan persamaan tidak linear.

2.2.3 Stabilitas frekuensi

Stabilitas frekuensi mengacu pada kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi stabil ketika sistem terjadi ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkit dan beban. Stabilitas frekuensi dapat bersifat jangka pendek dan jangka panjang. Untuk jangka pendek dapat berupa pembentukan dari sebuah sistem wilayah dengan kondisi undergenerasi yang mempunyai pemutusan beban atau *load shedding* yang kurang sehingga mengakibatkan frekuensi menurun dengan cepat dan terjadi blackout pada wilayah tersebut dalam beberapa [illegible] untuk jangka panjang merupakan situasi yang lebih kompleks dimana [illegible]abilan dapat disebabkan oleh kontrol-kontrol *overspeed* turbin uap atau

Optimized using
trial version
www.balesio.com

perlindungan dan kontrol-kontrol reaktor dengan jangka waktu dari puluhan detik hingga beberapa menit (Kundur, 1994)

Pada sistem tenaga listrik, frekuensi merupakan indikator dari keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan total beban sistem. Frekuensi sistem akan turun bila terjadi kekurangan pembangkitan atau kelebihan beban. Penurunan frekuensi yang besar dapat mengakibatkan kegagalan-kegagalan unit-unit pembangkitan secara beruntun yang menyebabkan kegagalan sistem secara total. Pelepasan sebagian beban secara otomatis dengan menggunakan rele frekuensi (*under frequency relay*) dapat mencegah penurunan frekuensi dan mengembalikannya ke kondisi frekuensi yang normal. Dengan semakin berkembangnya sistem tenaga listrik dan dengan adanya pembangkit-pembangkit baru yang masuk dalam sistem interkoneksi, maka penyetelan rele frekuensi sudah perlu ditinjau kembali. Kestabilan frekuensi adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan frekuensi saat terjadi gangguan misalnya pelepasan beban secara tiba-tiba, lepasnya generator dan short circuit. Sistem dikatakan stabil frekuensinya apabila mampu kembali ke keadaan normal setelah terjadi gangguan dengan fluktuasi level frekuensi yang masih diizinkan dan selang waktu yang diizinkan. Faktor yang mempengaruhi kestabilan frekuensi adalah tidak sinkronnya jumlah pembangkitan dengan jumlah beban serta fungsi governor yang tidak bekerja

Pada sistem tenaga listrik, frekuensi merupakan indikator dari keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan total beban sistem. Frekuensi sistem akan turun bila terjadi kekurangan pembangkitan atau kelebihan beban. Penurunan frekuensi yang besar dapat mengakibatkan kegagalan-kegagalan unit-unit pembangkitan secara beruntun yang menyebabkan kegagalan sistem secara total. Pelepasan sebagian beban secara otomatis dengan menggunakan rele frekuensi (*under frequency relay*) dapat mencegah penurunan frekuensi dan mengembalikannya ke kondisi frekuensi yang normal. Dengan semakin berkembangnya sistem tenaga listrik dan dengan adanya pembangkit-pembangkit

ɜ masuk dalam sistem interkoneksi, maka penyetelan rele frekuensi sudah
njau kembali.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

Salah satu karakteristik pada sistem tenaga listrik yang sangat penting untuk dijaga kestabilannya adalah frekuensi. Pentingnya menjaga frekuensi berkaitan erat dengan upaya untuk menyediakan sumber energi yang berkualitas bagi konsumen. Pasokan energi dengan frekuensi yang berkualitas baik akan menghindarkan peralatan konsumen dari kerusakan. Pengendalian frekuensi tidak semata untuk memuaskan pelanggan semata, tindakan ini juga bertujuan untuk menjaga kestabilan sistem.

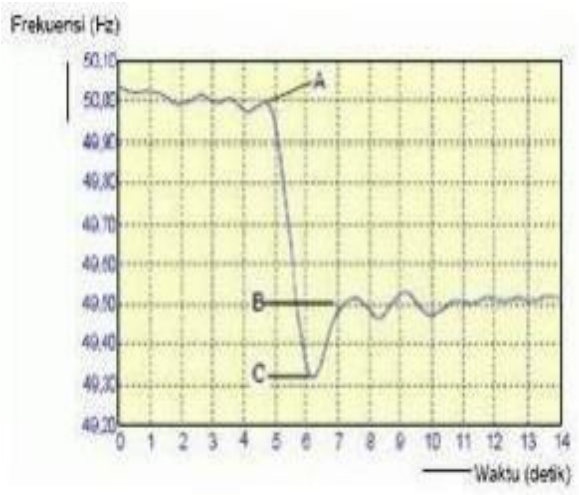
Pertama kita lihat hubungan antara torsi mekanik (Tm), torsi elektrik (Te), jumlah total moment inersia dari rotor (J), dan percepatan angular dari rotor.

$$J\frac{d^2\theta m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \qquad (1)$$

Dari rumus tersebut dapat disimpulkan bahwa ketika :

a. Torsi mekanik = torsi elektrik maka Ta = 0 yang berarti pula tidak ada percepatan yang dialami oleh rotor. Karena tidak ada percepatan, maka rotor berputar pada kecepatan yang tetap sehingga menghasilkan tegangan dengan frekuensi yang konstan. Keadaan ini terjadi ketika tercapai keseimbangan antara jumlah energi yang dibangkitkan dengan energi yang diserap beban.
b. Tm > Te maka tercipta kelebihan torsi sebesar Ta yang menyebabkan timbulnya percepatan rotor sebesar $J\frac{d^2\theta m}{dt^2}$ sehingga frekuensi tegangan yang dibangkitkan naik sampai tercapai nilai tertentu dan tercipta keseimbangan baru.
c. Tm < Te maka tercipta kekurangan torsi sebesar Ta yang menyebabkan timbulnya perlambatan rotor sebesar $J\frac{d^2\theta m}{dt^2}$ sehingga frekuensi tegangan yang dibangkitkan turun sampai tercapai nilai tertentu di titik B dan selanjutnya akan tercipta keseimbangan baru antara Tm dan Te (Marsudi, 2006).

Optimized using
trial version
www.balesio.com



Gambar 2 Ilustrasi Kestabilan Frekuensi
(Sumber : Marsudi, 2006)

Pada gambar 2 menunjukkan bahwa ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban akan menyebabkan frekuensi bergeser dari nilai normalnya. Dalam hal ini ketika pembangkitan > beban maka frekuensi sistem akan > 50 Hz, begitu pula sebaliknya. Oleh karena itu perlu selalu dijaga keadaan yang seimbang antara pembangkitan dan beban agar tercipta frekuensi sistem yang normal 50 Hz.

Penanganan ketika terjadi keadaan dimana frekuensi < 50 Hz dapat dilakukan dengan cara:

a. Menambahkan jumlah total energi yang disuplai ke sistem melalui cara menambah unit pembangkit yang bekerja.
b. Memanfaatkan fasilitas LFC (*Load Frequency Control*)/AGC yang mengendalikan putaran generator sesuai dengan fluktuasi beban. Ketika beban besar maka AGC akan memberikan bahan bakar lebih banyak agar unit pembangkit dapat membangkitkan energi sesuai yang dibutuhkan oleh beban.
c. Apabila unit pembangkit sudah beroperasi maksimal, maka dengan terpaksa harus dilakukan pengurangan beban melalui *manual load shedding* mbuangan beban) ataupun melalui relay UFR yang bekerja ketika kuensi sistem berada di bawah nilai settingnya (Marsudi, 2006)

Optimized using
trial version
www.balesio.com

2.3 Hubungan Antara Frekuensi dan Daya Aktif

Sistem tenaga listrik harus mampu menyediakan tenaga listrik bagi para pelanggan dengan frekuensi yang konstan. Penyimpangan frekuensi dari nilai nominal harus selalu dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nilai frekuensi dalam sistem, sedangkan beban sistem yang berupa daya aktif maupun reaktif selalu berubah sepanjang waktu. Untuk mempertahankan frekuensi dalam batas toleransi yang diperbolehkan, penyediaan atau pembangkitan daya aktif dalam sistem harus disesuaikan dengan kebutuhan pelanggan atas daya aktif, harus selalu disesuaikan dengan beban daya aktif. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur besarnya kopel penggerak generator (Marsudi, 2016).

Menurut Nugraheni (2011) daya dalam gerak lurus dapat didefinisikan sebagai gaya yang dialami suatu benda yang bergerak pada jarak tertentu per satuan waktu. Hal ini juga berlaku bagi daya yang dihasilkan generator. Generator memiliki bagian yang berputar, sehingga tinjauan daya yang dihasilkan generator adalah daya yang dihasilkan oleh suatu benda berputar (rotasi) dan bukan merupakan benda statis. Oleh sebab itu, daya yang dihasilkan generator dapat didefinisikan sebagai momen gaya (torsi) yang dialami generator yang berputar sebesar sudut tertentu per satuan waktu seperti pada persamaan 2.2.

$$P = r\frac{d\theta}{dt} \tag{2}$$

Keterangan :

P = daya yang dibangkitkan generator (Watt)

r = momen gaya/kopel mekanik generator (Nm)

θ = sudut rotasi (rad)

t = waktu (s)

Besarnya perubahan sudut rotasi dari bagian generator yang berputar per satuan waktu merupakan nilai dari kecepatan sudut generator tersebut.

$$P = r\ \omega = r.2\pi f \tag{3}$$

an:

daya yang dibangkitkan generator (Watt)

momen gaya/kopel mekanik generator (Nm)

Optimized using
trial version
www.balesio.com

θ = sudut rotasi (rad)

ω = kecepatan putar sudut generator (rad/s)

f = Frekuensi Generator (Hz)

t = waktu (s)

Dari persamaan 2.3 terlihat bahwa perubahan daya aktif yang dibangkitkan generator akan menyebabkan perubahan pada torsi kerja. Perubahan torsi kerja ini akan mempengaruhi frekuensi sistem. Perubahan daya aktif yang dihasilkan generator terjadi apabila permintaan daya oleh beban berubah. Hal ini tidak boleh dibiarkan terjadi karena generator memiliki rentang frekuensi kerja tertentu. Ketika generator bekerja di luar rentang frekuensi kerja, maka generator tersebut akan cepat mengalami kerusakan. Oleh sebab itu, untuk mempertahankan besarnya frekuensi sistem diperlukan pengaturan pada besarnya kopel mekanis penggerak generator (Nugraheni, 2011).

2.4 Dampak Pembangkit Intermiten Terhadap Frekuensi Sistem

Frekuensi adalah besaran yang dipergunakan untuk menunjukkan kualitas tenaga listrik. Frekuensi dalam pembangkitan tenaga listrik, menunjukkan jumlah putaran elektrik mesin pembangkit. Satu gelombang sinusoidal menunjukkan satu putaran elektrik. Sistem kelistrikan di Indonesia yang di kelola PLN menggunakan frekuensi 50 Hz. Nilai ini setara dengan 50 putaran per detik atau 3.000 putaran per menit. Perbandingan keseimbangan sesaat antara daya yang dipergunakan oleh konsumen (beban) dengan daya yang disuplai oleh pembangkit tenaga listrik juga dapat dilihat dari frekuensinya. Pada saat keduanya seimbang, maka frekuensi adalah 50 Hz. Penyimpangan frekuensi terjadi apabila nilai sesaat antara suplai daya dan beban tidak sama. Apabila frekuensi kurang dari 50 Hz maka hal tersebut menunjukkan suplai daya nyata dari pembangkit kurang dari daya beban. Di sisi lain apabila suplai daya dari pembangkit berlebih, mengakibatkan nilai frekuensi menjadi lebih besar dari 50 Hz. Ini menunjukkan bahwa suplai daya dan

an yang bersifat acak dapat membuat nilai frekuensi sistem kelistrikan
ıbah sehingga hal tersebut menyebabkan hampir tidak ada kemungkinan
daya nyata unit pembangkit dapat terus-menerus tepat sama dengan
tem.

PLTB merupakan pembangkit dengan sumber energi intermiten, yang menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang fluktuatif. Hal tersebut karena Pembangkit Listrik Tenaga Bayu adalah salah satu pembangkit energi terbarukan yang sangat bergantung dengan kondisi angin. Inilah yang menyebabkan daya yang dibangkitkan menjadi tidak stabil dan memberi efek intermittent yang signifikan pada kestabilan sistem. Nilai intermiten pembangkit dalam suatu sistem akan mempengaruhi kestabilan pada sistem tersebut. Dimana semakin besar komposisi intermiten dalam sistem, maka kestabilan sistem akan semakin rentan, karena ramping rate (ukuran seberapa cepat suatu pembangkit dapat mengubah daya selama beroperasi dalam mengejar perubahan daya beban) pembangkit *intermittent* mengganggu kestabilan frekuensi sistem (Riasa, 2019).

2.5 Regulasi Frekuensi

Stabilitas jaringan telah menjadi salah satu aplikasi terbaik dari BESS. Seperti ~~yang~~ diketahui bahwa stabilitas jaringan merupakan hal penting, ini dapat dilihat dari jumlah generator pada jaringan yang terus menerus dinaikkan atau diturunkan berdasarkan permintaan daya untuk beban langsung dan juga termasuk diantaranya beban-beban tak terduga. Banyak hal yang dapat terjadi di sepanjang waktu, namun dengan responsnya yang cepat dalam hitungan milidetik, BESS adalah penyedia *ancillary services* yang sesuai untuk mengatasi ketidakstabilan jaringan. Paling umum, BESS ini membantu menjaga frekuensi jaringan untuk tetap dalam batas yang diizinkan (dikenal sebagai regulasi frekuensi), frekuensi adalah indikator utama dari kekurangan atau kelebihan pasokan daya.

Frekuensi adalah parameter yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik AC. Penyimpangan dari frekuensi nominal mengindikasikan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban. Kelebihan pembangkitan akan menyebabkan peningkatan frekuensi, sementara kelebihan beban akan menyebabkan penurunan frekuensi. Kejadian ketidakseimbangan daya ini secara natural akan ngkan kembali oleh perubahan pada energi kinetik yang tersimpan pada generator sinkron. Respon dari governor ini dapat mengurangi dampak imbangan tetapi tidak memperbaikinya, hal tersebut merupakan peran

Optimized using
trial version
www.balesio.com

dari *Primary Frequency Respons* (FPR) dari sistem tenaga. Jika frekuensi menyimpang terlalu jauh, hingga mencapai batas operasinya, generator akan dipaksa untuk memutuskan daya sehingga mengakibatkan kegagalan yang besar dalam sistem. Batas operasional frekuensi yang diizinkan di sistem tenaga listrik Sulbagsel dapat diilustrasikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Rentang frekuensi sistem tenaga listrik

RENTANG FREKUENSI	RENTANG WAKTU OPERASI
51,50 Hz < f ≤ 52,00 Hz	Beroperasi selama paling singkat 15 menit
51,00 Hz < f ≤ 51,50 Hz	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
49,00 Hz < f ≤ 51,00 Hz	Beroperasi secara terus menerus
47,50 Hz < f ≤ 49,00 Hz	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
47,00 Hz < f ≤ 47,50 Hz	Beroperasi selama paling singkat 6 menit

Sumber: Peraturan Menteri ESDM No.20 (2020)

Tabel 1 menunjukkan peraturan Menteri ESDM No.20 mengenai rentang frekuensi sistem tenaga listrik yang diizinkan pada sistem Sulbagsel, adapun untuk menjaga frekuensi dalam keadaan normal maka diterapkan regulasi frekuensi pada sistem. Regulasi frekuensi adalah alat yang digunakan oleh operator jaringan listrik untuk menjaga frekuensi sistem dari menjadi terlalu tinggi atau terlalu rendah dan membantu mempertahankannya pada frekuensi nominal sistem yaitu 50 Hz, dengan batas operasional normal di ±0,2 Hz. Frekuensi sistem yang melebihi batas yang diizinkan menjadi tanda bahwa terjadinya ketidakseimbangan atau gangguan pada sistem.

Secara umum regulasi frekuensi terdiri dari 3 bagian yaitu primer, sekunder dan tersier. Namun dalam penelitian kali ini akan fokus pada regulasi frekuensi tahap pertama yaitu *Primary Frequency Response* (PFR). PFR adalah respons pertama jika terjadi penyimpangan frekuensi dan bertindak dengan memberikan atau menerima daya untuk menstabilkan frekuensi. Oleh karena itu, pembangkit listrik harus memiliki cadangan energi untuk dapat menggunakan PFR tambahan yang disediakan oleh generator sinkron. Namun demikian PFR memiliki kekurangan sebagai berikut :

Optimized using
trial version
www.balesio.com

1. Persentase daya generator yang tersedia harus dicadangkan, mengurangi energi yang dapat di jual.
2. Kecepatan respons untuk dapat memberikan daya cenderung lambat.
3. Pengaturan frekuensi dilakukan secara tidak langsung melalui sistem pengaturan kecepatan generator dan dapat menyebabkan osilasi frekuensi sistem.

Seperti yang di ketahui pula bahwa sistem tenaga listrik masa mendatang, ketidakteraturan dan tingkat kecuraman kejadian frekuensi diperkirakan akan meningkat karena adanya penetrasi tinggi dari pembangkitan energi terbarukan yang memiliki lebih banyak faktor yang tidak tetap (berubah-ubah), jumlah pembangkitan yang sulit diprediksi, dan pengurangan inersia sistem ketika pembangkit konvensional digantikan oleh teknologi pembangkit energi terbarukan.

Penambahan BESS dan segala keunggulannya mampu merealisasikan kemungkinan untuk memberikan respon frekuensi yang lebih baik secara siginifikan dengan lebih cepat daripada respon primer yang ada. Ini tentu dapat mengurangi masalah peningkatan kontrol frekuensi dan membantu memungkinkan penetrasi energi terbarukan yang lebih tinggi (Steinmoe, 2018).

2.6 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya (*load flow*) digunakan untuk menentukan tegangan, arus, daya aktif atau daya reaktif di berbagai macam titik/bus pada jaringan listrik dalam kondisi operasi normal (Stevenson, 1994). Selain dipergunakan untuk perencanaan pengembangan sistem listrik pada masa mendatang, juga dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi sistem kelistrikan yang sudah ada (*existing*) (Gupta, 1998).

Tujuan studi aliran daya adalah untuk mengetahui besar vektor tegangan pada tiap bus dan besar aliran daya pada tiap cabang suatu jaringan untuk suatu kondisi beban tertentu dalam kondisi normal. Hasil perhitungan dapat digunakan
nelaah berbagai persoalan yang berhubungan dengan jaringan tersebut,
liputi hal-hal yang berhubungan dengan operasi jaringan yaitu:(Saadat,

gaturan tegangan (*voltage regulation*), perbaikan faktor daya (*power*
or) jaringan, kapasitas kawat penghantar, termasuk rugi-rugi daya.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

b. Perluasan atau pengembangan jaringan, yaitu menentukan lokasi yang tepat untuk penambahan bus beban baru dan unit pembangkitan atau gardu induk baru.
c. Perencanaan jaringan, yaitu kondisi jaringan yang diinginkan pada masa mendatang untuk melayani pertumbuhan beban karena kenaikan terhadap kebutuhan tenaga listrik.

Dalam analisis aliran daya terdapat empat buah besaran pada masing-masing bus jaringan yang ditinjau dan memegang peranan yaitu (Saadaat, 1999) :

a. Daya aktif P (*active power*).
b. Daya reaktif Q (*reactive power*).
c. Besar tegangan |V| (*magnitude*).
d. Sudut fase tegangan θ (*angle*).

Dua di antara empat besaran yang terdapat pada tiap bus tersebut sudah diketahui, sedangkan dua besaran lainnya yang akan dihitung melalui proses iterasi. (Kundur, 1993)

Setiap bus, dalam sistem tenaga listrik dikelompokkan menjadi 3 (tiga) tipe bus yaitu:

1. Bus beban: variabel yang diketahui adalah daya aktif , daya reaktif. Kemudian akan dihitung besaran tegangan dan sudut fasa tegangan di setiap bus.
2. Bus pembangkit: variabel yang diketahui adalah daya aktif dan besaran tegangan, sedangkan daya reaktif dan sudut fasa tegangan merupakan hasil perhitungan.
3. Bus penyangga (bus *swing*): Variabel yang diketahui adalah besaran tegangan dan sudut fasa tegangan yang merupakan sudut acuan. Sedangkan daya aktif dan daya reaktif yang harus dikompensasi merupakan hasil perhitungan.

Dalam penyelesaian aliran daya metode umum yang digunakan yaitu metode Gauss-Seidel dan metode Newton-Raphson. Dalam tugas akhir ini menggunakan metode Newton-Raphson karena metode ini lebih cepat nilai konvergen sehingga proses iterasi yang berlangsung lebih sedikit, iap iterasinya memerlukan waktu yang relatif lebih lama (Saadaat,

Optimized using
trial version
www.balesio.com

2.7 Battery Energy Storage System (BESS)

Battery Energy Storage System (BESS) adalah perangkat yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik dan sebaliknya. Tidak semua BESS dibuat sama, dalam pengembangan BESS aspek yang ditinjau adalah kapasitas energi. Seringkali pabrikan akan melakukan klasifikasi terhadap BESS menggunakan aspek kapasitas energi ini. Klasifikasi umum lainnya adalah daya tahan tinggi, artinya bahan kimia tersebut telah dimodifikasi untuk BESS memiliki masa penggunaan yang lebih lama. (Piernas et al, 2018)

BESS merupakan benda dengan suatu sistem yang dapat mengubah suatu energi listrik menjadi energi kimia. Energi kimia ini kemudian disimpan dalam larutan yang terdapat pada BESS untuk jangka waktu yang relatif lama. Suatu saat ketikan dibutuhkan energi tersebut mampu kembali diubah menjadi energi listrik untuk memenuhi kebutuhan listrik peralatan tertentu. Kapasitas BESS bergantung pada banyak sel yang terpasang dan ukurannya, semakin besar ukurannya maka semakin besar kapasitasnya. Jumlah kapasitas energi yang mampu disimpan oleh sebuah BESS diitung dengan satuan Ampere-Jam (Ah). Satuan ini menjelaskan berapa besar arus listrik yang mampu dialirkan oleh BESS selama 1 jam dalam kondisi penuh dan besar jumlah arus yang diperlukan untuk mengisi penuh BESS dari keadaan kosong hingga penuh.

Renewable energy terus meningkat penggunaannya sehingga penggunaan *Battery Energy Storage System* (BESS*)* juga terus meningkat. BESS memiliki peran penting dalam sistem tenaga listrik karena dapat mengatasi masalah ketidakpastian pada sumber *renewable energy* sehingga dapat menigkatkan keandalan sistem (Chen et al, 2018).

Battery Energy Storage System (BESS) adalah elektrokimia perangkat (menggunakan teknologi BESS) yang mengisi daya (atau mengumpulkan energi) dari jaringan atau pembangkit listrik dan kemudian melepaskannya energi di kemudian hari untuk menyediakan listrik atau layanan jaringan lainnya Saat
an. BESS memiliki karakteristik yang membuatnya ideal untuk
n sebagai pengatur energi dalam sistem jaringan listrik. Diantaranya :

Optimized using
trial version
www.balesio.com

1. *Fast Acting* : BESS dapat mengalirkan daya dengan cepat sesuai permintaan.
2. *Bi-directional Energy Flow*: dimana BESS dapat mengirimkan energy yang tersimpan lalu menyerap kehilangan energi dengan cepat energi dan menyerap kelebihan energi dengan cepat.
3. *Scalable* : pemakaian BESS dapat dioptimalkan untuk pengiriman daya dan kapasitas penyimpanan dari BESS dapat ditingkatkan dari skala kecil menjadi skala besar.
4. *Low stand-by cost*.

BESS terdiri dari satu atau lebih sel elektrokimia dengan eksternal koneksi yang disediakan untuk menyediakan daya ke perangkat listrik. Ketika BESS memasok daya listrik, terminal positif adalah katoda, negatif terminal adalah anoda. Terminal bertanda negatif adalah sumber elektron yang akan mengalir melalui sirkuit listrik eksternal ke terminal positif. Ketika BESS terhubung ke beban listrik eksternal, reaksi redoks mengubah reaktan berenergi tinggi ke produk berenergi lebih rendah dan selisih energi bebasnya adalah ditransfer ke sirkuit eksternal sebagai energi listrik.

Berdasarkan jenisnya, BESS dibedakan menjadi dua. Utama (sekali pakai) BESS digunakan sekali kemudian dibuang, bahan elektroda tidak dapat diubah lagi berubah selama pelepasan. Sedangkan BESS sekunder (dapat diisi ulang) dapat habis dan diisi ulang beberapa kali, komposisi asli elektroda dapat dipulihkan dengan arus balik. Sistem penyimpanan BESS memiliki ciri utama yaitu sebagai berikut:

1. *Rated power capacity* : adalah tingkat energi pelepasan maksimum yang dapat dilakukan atau dilepaskan oleh BESS mulai dari kondisi penuh.
2. *Energy capacity* : jumlah maksimum energi yang tersimpan (dalam kilowatt-jam [kWh] atau megawatt-jam [MWh].
3. *Storage duration* : jumlah waktu BESS dapat dikosongkan (*discharge*) kapasitas dayanya sebelum menghabiskan kapasitas energinya.
4. *cle life/lifetime*: jumlah waktu atau siklus BESS sistem penyimpanan at menyediakan pengisian dan pemakaian regular sebelum terjadi agalan atau degradasi yang signifikan. Nilai ini dipengaruhi oleh *Depth Discharge* (DOD) dan temperatur. DOD adalah jumlah kapasitas energi.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

BESS yang digunakan, biasanya dinyatakan sebagai persentase. Semakin dalam kemampuan BESS untuk melepaskan, semakin pendek umur BESS. Misalnya, jika BESS memiliki nilai DOD 90%, artinya kapasitas energi yang dapat digunakan BESS hanya 90% dari jumlah total energi dalam BESS. Sedangkan 10% energi dari BESS tidak bisa digunakan. Temperatur juga dapat mempengaruhi masa pakai BESS, karena pada umumnya BESS adalah reaksi kimia. Jika suhu BESS terlalu tinggi, dapat menguras kapasitas BESS lebih cepat.

5. Pelepasan sendiri persentase muatan yang hilang selama periode tertentu, mengurangi jumlah energi yang tersedia untuk pelepasan.
6. *State of Charge* (SOC): status muatan dinyatakan sebagai persentase. SOC menunjukkan tingkat pengisian daya BESS, dari kosong hingga terisi penuh. SOC mempengaruhi kemampuan BESS untuk memberikan energi tambahan atau energi layanan ke jaringan di waktu tertentu.
7. *Round-trip efficiency* : rasio energi yang dibebankan ke BESS terhadap energy dilepas dari BESS.

2.8 Sistem Kontrol *Battery Energy Storage System* (BESS)

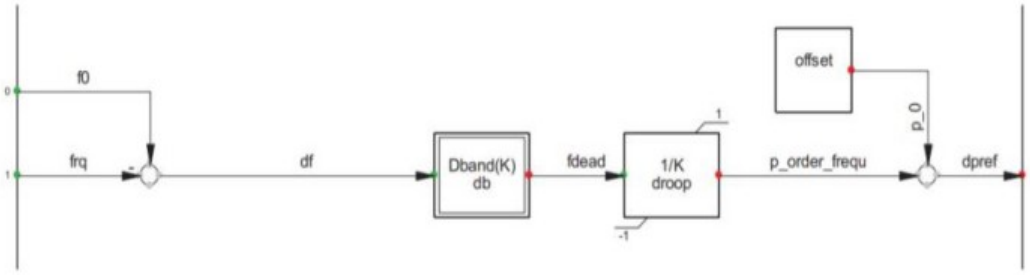
Sistem kontrol *Battery Energy Storage System* (BESS) adalah suatu sistem yang dirancang untuk mengelola dan mengontrol operasi dari suatu penyimpanan energi berbasis baterai. Tujuan utama dari sistem kontrol Bess adalah untuk mengoptimalkan penggunaan energi, meningkatkan efisiensi sistem, dan menyediakan berbagai layanan yang dapat membantu dalam menjaga keseimbangan dan keandalan jaringan listrik. Pada penelitian ini setifaknya terdapat parameter sistem kontrol frekuensi dan juga sistem kontrol pengisian dan pengosongan BESS.

2.8.1 Sistem Kontrol Frekuensi

em kontrol frekuensi pada *Battery Energy Storage System* (BESS) ; untuk memberikan layanan regulasi frekuensi dalam jaringan listrik.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

Regulasi frekuensi adalah kemampuan untuk menjaga frekuensi daya listrik dalam batas yang diinginkan. BESS dengan sistem kontrol frekuensi dapat memberikan kontribusi positif terhadap keseimbangan dan stabilitas jaringan listrik.



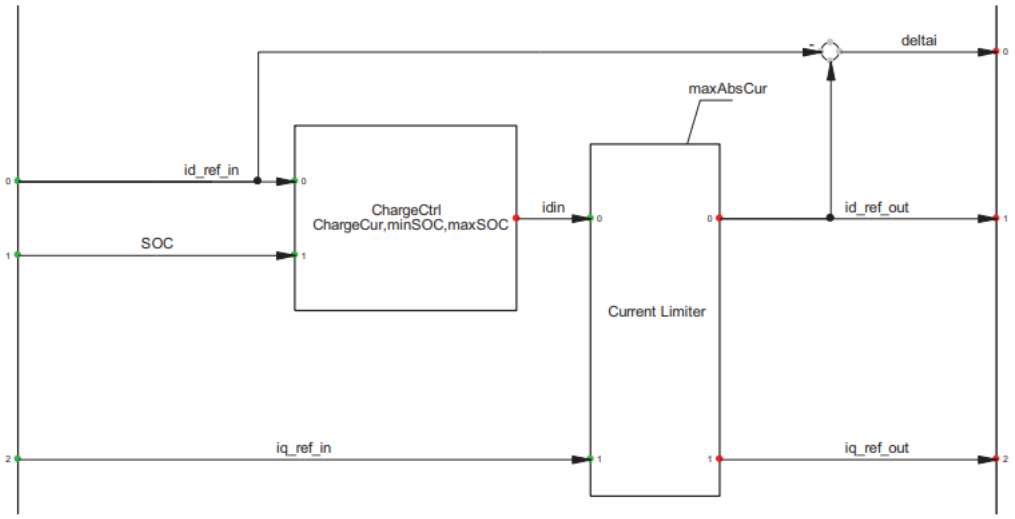
Gambar 3 *Model of the frequency controller*

Gambar 3 menampilkan model kontrol frekuensi BESS, terdapat dua parameter yang diatur pada kontrol frekuensi pada BESS yaitu deadband dan juga nilai droop. Deadband adalah nilai perubahan frekuensi dimana BESS mulai merespon untuk merubah (menambah atau mengurangi) keluaran BESS, adapun droop adalah rasio perubahan frekuensi terhadap perubahan daya aktif dari BESS, sistem kontrol tersebut mempengaruhi seensitifitas kerja dari BESS yang disesuaikan dengan kondisi sistem tenaga listrik yang ada dalam hal ini sistem tenaga listrik Sulbagsel.

2.8.2 Sistem Kontrol Pengisian dan Pengosongan BESS

BESS (Battery Energy Storage System) memiliki *charge control* yang bertanggung jawab untuk mengatur proses pengisian baterai. Cara kerja *charge control* pada BESS dapat berbeda tergantung pada jenis baterai dan sistem manajemen energi yang digunakan. Secara umum, berikut adalah prinsip dasar cara kerja charge control pada BESS. Charge control melakukan pengukuran pengisian baterai yang disebut *State of Charge* (SOC). SOC kasikan sejauh mana baterai telah diisi. Pada penelitian ini akan ı dua pemodelan sistem kontrol pengisian dan pengosongan BESS.

Optimized using
trial version
www.balesio.com



Gambar 4 Model of the charge controller

Gambar 4 menampilkan model kontrol pengisian BESS, hal yang menjadi parameter penting dalam sistem kontrol pengisian BESS ini adalah State Of Charge (SOC). SOC (State of Charge) pada Battery Energy Storage System (BESS) adalah parameter yang mengukur sejauh mana baterai telah diisi atau dikosongkan relatif terhadap kapasitas totalnya. SOC biasanya diukur dalam persentase, dengan nilai 0% menunjukkan baterai sepenuhnya kosong, dan nilai 100% menunjukkan baterai sepenuhnya terisi. SOC pada BESS memiliki peran penting dalam mengelola dan mengoptimalkan kinerja baterai serta menjaga keandalan operasional sistem.

2.8.3 Pemodelan Sistem Kontrol *Battery Energy Storage System* (BESS)

Pemodelan sistem kontrol BESS dikategorikan menjadi dua sistem kontrol. Sistem kontrol tersebut dibedakan dalam kontrol pengisian dan juga kontrol frekuensi. Pada sistem kontrol pengisian parameter yang diperhatikan yaitu state of charge (SOC), sedangkan kontrol frekuensi memperhatikan nilai droop dan juga deadband dari BESS. Pemodelan dibedakan menjadi dua untuk melihat perubahan keluaran daya BESS terhadap nilai perubahan frekuensi dari naga listrik Sulbagsel dalam keadaan terjadi gangguan *under frequency* gangguan *over frequency*.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

Tabel 2 Pemodelan sistem kontrol BESS

Pemodelan Sistem Kontrol BESS 1			
Sistem Kontrol Pengisian BESS		Sistem Kontrol Frekuensi BESS	
min SOC Discharging will be stopped (pu)	0.2	Droop (pu)	0.002
max SOC Charging will be stopped (pu)	0.8	Deadband (pu)	0.0002
Pemodelan Sistem Kontrol BESS 2			
Sistem Kontrol Pengisian BESS		Sistem Kontrol Frekuensi BESS	
min SOC Discharging will be stopped (pu)	0	Droop (pu)	0.004
max SOC Charging will be stopped (pu)	1	Deadband (pu)	0.0002

Tabel 2 menampilkan pemodelan sistem kontrol BESS yang dibedakan menjadi dua yaitu sistem kontrol pengisian dan sistem kontrol frekuensi. Hal tersebut bertujuan untuk melihat pengaruh perubahan keluaran daya BESS terhadap nilai perubahan frekuensi sistem.

2.9 Kapasitas dan Lokasi Penempatan Optimal *Battery Energy Storage System* (BESS)

Kapasitas sistem penyimpanan BESS perlu ditentukan dengan menggunakan teknik perhitungan dari data histori frekuensi yang telah di analisis secara statistik sedemikian rupa agar dapat berfungsi sebagai regulasi frekuensi dengan optimal. Sebelum menghitung kapasitas *Battery Energy Storrage System* perlu diketahui Indeks Kekuatan Sistem (IKS) atau yang dikenal dengan sebutan *Frequency Gain* atau *Stiffness* dari sistem tenaga listrik Sulbagsel tahun 2022. IKS adalah kemampuan sistem dalam memberikan daya untuk kejadian apabila unit pembangkit besar trip atau kehilangan pasokan daya. Apabila pasokan daya besarnya melebihi IKS maka frekuensi sistem akan turun mencapai <49,0 Hz. Hal ini tentu saja akan mempengaruhi kestabilan sistem sedangkan governor baru akan memberi respon setelah 5 detik.

kapitulasi hasil simulasi dengan skenario melepas beberapa variasi kit yang menyebabkan frekuensi sistem turun menjadi dasar perhitungan

Optimized using
trial version
www.balesio.com

untuk mendapatkan nilai indeks kekuatan sistem dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\beta = \Delta P/\Delta f \quad (4)$$

Dimana :

$\beta = Frequency/Stiftness$

$\Delta P = The\ change\ in\ power$

$\Delta f = The\ change\ of\ frequency$

Kemudian untuk menghitung kapasitas BESS dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$BESS\ Capacity\ [\frac{MW}{Hz}] = \text{FG} * GD\ [\%] * \Delta f\ [Hz] \quad (5)$$

Dimana :

β = *Frequency Gain / Stiffness*

GD = *Governor Droop* (5%, aturan jaringan tahun 2020 (grid code)

$\Delta f = Frekuensi\ nominal - Frekuensi\ sistem$

Sedangkan untuk penempatannya sendiri, Penempatan BESS dapat dilakukan di beberapa lokasi yaitu diletakkan pada gardu jaringan transmisi listrik, diletakkan pada gardu jaringan distribusi dekat pusat beban, atau ditempatkan bersama dengan generator/ *Variable Renewable Energy* (VRE).

Penentuan lokasi BESS memiliki implikasi penting untuk jenis layanan terbaik yang BESS dapat berikandan lokasi yang paling tepat untuk BESS bergantung pada lokasi kasus penggunaan jenis layanan yang diinginkanDalam banyak kasus BESS secara teknis akan mampu menyediakan berbagai jenis layanan di salah satu lokasi BESS yang dihubungkan dengan sistem di gardu transmisi dapat menyediakan berbagai *ancillary services* dan layanan yang terkait dengan masalah di transmisi.

Sistem penyimpanan energi BESS yang ditempatkan di gardu transmisi bisa dimanfaatkan untuk menggantikan atau menunda investasi kapasitas untuk beban puncak mampu menyediakan cadangan operasi untuk menanggapi
n dalam pembangkitan dan permintaan beban atau dapat pula digunakan
nunda terjadinya peningkatan sistem transmisi di wilayah untuk regulasi
, penempatan BESS tidak menjadi masalah karena frekuensi adalah

Optimized using
trial version
www.balesio.com

parameter global yang menunjukkan bahwa penempatannya di mana saja diperbolehkan selama area gardu cukup untuk penempatan BESS (Steinmoe, 2018)

2.10 Indeks Kekuatan Sistem (IKS) Sulbagsel

Untuk menentukan nilai indeks kekuatan sistem Sulbagsel, dilakukan simulasi gangguan pembangkit yang menyebabkan frekuensi sistem turun. Indeks Kekuatan Sistem (IKS) merupakan aspek penilaian sebuah sistem interkoneksi agar dapat mengetahui batasan nilai kekuatan sistem ketika mengalami gangguan. IKS disusun berdasarkan rekapitulasi dari gangguan yang terjadi pada pembangkit pada suatu waktu tertentu yang menyebabkan turunnya frekuensi.

Menurut UPB Sulselrabar, persamaan yang digunakan untuk menentukan Indeks Kekuatan Sistem (IKS) adalah sebagai berikut:

- Persamaan untuk menghitung besar penurunan frekuensi (df), yaitu:

  $df\ (Hz) = fawal\text{-}fakhir$ (6)

- Persamaan untuk menghitung IKS [MW/Hz] = dP/df (7)

  Dimana :

  df = Besar penurunan frekuensi saat terjadi gangguan

  dP = Besar daya yang hilang saat pelepasan pembangkit

Setelah diperoleh data laju penurunan frekuensi akibat hilangnya pasokan daya dari unit pembangkit yang trip, dengan menggunakan grafik regresi Linier maka akan didapatkan Indeks Kekuatan Sistem Sulbagsel.

2.11 Penggunaan Software DigSilent

DigSilent adalah program yang digunakan untuk analisis transmisi, distribusi, dan sistem tenaga listrik industri. DigSilent dirancang untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol agar mencapai tujuan utama dari perencanaan dan optimasi operasi. Digsilent merupakan kependekan dari "*Digital Simulation of Electrical* s". DigSilent versi 7 adalah *software* analisis sistem tenaga pertama ambar single line yang terintegerasi.

Optimized using
trial version
www.balesio.com

DigSilent dirancang dan dikembangkan oleh *engineer* dan *programmer* yang berpengalaman di bidang elektrikal analisis sistem tenaga dan pemrograman. Keakurasian dan keabsahan hasil yang diperoleh dengan DigSilent telah digunakan dalam jumlah besar oleh organisasi meliputi perencanaan dan operasi sistem tenaga di seluruh dunia. Untuk mengatasi persyaratan analisis sistem tenaga, DigSilent dirancang sebagai peralatan engineering untuk menyediakan analisis fungsi sistem tenaga dengan program *single excutable*. Fitur-fitur meliputi:

1. Fungsi inti merupakan definisi, modifikasi, dan kasus-kasus; numerical routine inti dan fungsi dokumentasi.
2. *Single line graphic* interaktif yang terintegerasi.
3. Elemen sistem tenaga dan database kasus.
4. Fungsi kalkulasi yang terintegerasi.
5. Konfigurasi jaring sistem tenaga interaktif dan akses dengan Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA).
6. *Interface* umum untuk komputer berbasis sistem mapping (Samodra, 2018).

Optimized using
trial version
www.balesio.com