



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

ALOKASI EKONOMIS UNTUK SISTEM PENYIMPAN ENERGI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN DISTRIBUSI TENAGA ANGIN

Vicky Pria Permata
NRP 07111440000117

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ALOKASI EKONOMIS UNTUK SISTEM PENYIMPAN
ENERGI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN DISTRIBUSI
TENAGA ANGIN**

Vicky Pria Permata
NRP 0711144000117

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

ECONOMIC ALLOCATION FOR ENERGY STORAGE SYSTEM CONSIDERING WIND POWER DISTRIBUTION

Vicky Pria Permata
NRP 07111440000117

Supervisors
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“ALOKASI EKONOMIS UNTUK SISTEM PENYIMPAN ENERGI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN DISTRIBUSI TENAGA ANGIN”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018

Vicky Pria Permata
0711144000117

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ALOKASI EKONOMIS UNTUK SISTEM
PENYIMPAN ENERGI DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN DISTRIBUSI TENAGA
ANGIN**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001

Vita Lystianingrum, B. P., ST., M.Sc., Ph.D
NIP. 198208292006042001



Halaman ini sengaja dikosongkan

ALOKASI EKONOMIS UNTUK SISTEM PENYIMPAN ENERGI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN DISTRIBUSI TENAGA ANGIN

Nama mahasiswa : Vicky Pria Permata

Dosen Pembimbing I : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

Dosen Pembimbing II : Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc., Ph.D

Abstrak:

Sistem penyimpanan energi telah banyak digunakan, seiring meningkatnya penggunaan pembangkit listrik energi terbarukan. Salah satu kelebihan dari sistem penyimpanan energi adalah dapat meminimalkan biaya operasi sistem dan memperbaiki profil tegangan. Namun, pemasangan penyimpanan energi dengan lokasi dan ukuran yang kurang sesuai akan menyebabkan biaya operasi sistem yang kurang optimal dan mengancam stabilitas tegangan, khususnya pada sistem yang memiliki pembangkit listrik tenaga angin. Karena sifat angin yang tidak pasti, sehingga menyebabkan daya yang disalurkan pembangkit listrik tenaga angin ke sistem berubah-ubah. Algoritma *Hybrid Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (HMOPSO) digunakan untuk mencari lokasi dan ukuran penyimpanan energi yang optimal dalam pertimbangan ketidak-pastian distribusi tenaga angin. Algoritma HMOPSO mengkombinasikan algoritma *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) dengan teknik aliran daya Newton-Raphson dan *five-point estimation method* (5PEM). Metode 5PEM digunakan untuk mendiskritisasi distribusi tenaga angin. Selanjutnya, dilakukan analisis probabilitas biaya. Sistem IEEE 30-bus digunakan untuk melakukan beberapa studi kasus. Hasil simulasi dari setiap studi kasus menunjukkan perlunya alokasi sistem penyimpanan energi secara optimal dan memperlihatkan keefektifan metode yang dilakukan.

Kata kunci: analisis probabilitas biaya, *five-point estimation method*, *multi-objective particle swarm optimization*, sistem penyimpanan energi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

ECONOMIC ALLOCATION FOR ENERGY STORAGE SYSTEM CONSIDERING WIND POWER DISTRIBUTION

Student Name : Vicky Pria Permata
Supervisor I : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Supervisor II : Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc., Ph.D

Abstract:

The energy storage system has been widely used, along with the increasing use of renewable energy. One of the advantages of energy storage systems is that it can minimize system operating costs and improve voltage profiles. However, the installation of energy storage with less suitable locations and sizes will result in non-optimal operating costs and threatening voltage stability, especially on systems with wind power. Due to the uncertain of the wind speed, it causes the power that the wind power generated into the system changes. Hybrid Multi-Objective Particle Swarm Optimization (HMOPSO) algorithm is used to find the optimal energy storage location and size in consideration of wind power uncertainty. The HMOPSO algorithm combines the Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm with a power flow Newton-Raphson technique and five-point estimation method (5PEM). The 5PEM method is used to discretizing wind power distribution. Furthermore, a cost probability analysis is performed. The IEEE 30-bus system is used to conduct some case studies. The simulation results from each case study clearly demonstrate the need for optimal allocation of energy storage systems, and the effectiveness of the proposed method.

Key Word: *cost probability analysis, five-point estimation method, multi-objective particle swarm optimization, energy storage system.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**ALOKASI EKONOMIS UNTUK SISTEM PENYIMPAN ENERGI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN DISTRIBUSI TENAGA ANGIN**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Bapak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Rony dan Ibu Vita selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Vestiana Rosita, Fericko Satya Wicaksana dan teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN.....	i
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 ALOKASI EKONOMIS SISTEM PENYIMPAN ENERGI DENGAN MEMPERHATIKAN DISTRIBUSI TENAGA ANGIN	5
2.1 Alokasi Ekonomis Untuk Sistem Penyimpan Energi dengan Memperhatikan Distribusi Tenaga Angin	5
2.2 Sistem Tenaga Listrik	6
2.3 Sistem Pembangkitan	7
2.4 Sistem Penyimpan Energi	8
2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Angin	8
2.6 Diskritisasi Distribusi Tenaga Angin	9
2.6.1 Distribusi Tenaga Angin	10
2.6.2 Distribusi Weibull	10
2.6.3 5PEM	10
2.7 Particle Swarm Optimization (PSO)	12
2.8 Studi Aliran Daya.....	13

2.8.1 Analisis Aliran Daya.....	13
2.8.2 Sistem per-unit (pu)	15
2.8.3 Persamaan Aliran daya	16
2.8.4 Aliran Daya dan Rugi-rugi Daya pada saluran	17
2.8.5 Aliran Daya menggunakan metode Newton Raphson	17
2.9 Deviasi Tegangan	20
BAB 3 PENERAPAN HMOPSO UNTUK ALOKASI EKONOMIS	
SISTEM PENYIMPAN ENERGI DENGAN	
MEMPERTIMBANGKAN DISTRIBUSI TENAGA ANGIN	23
3.1 HMOPSO.....	23
3.1.1 MOPSO	24
3.1.2 Pemodelan HMOPSO dalam Alokasi Ekonomis Sistem	
Penyimpan Energi.....	25
3.2 Penentuan Fungsi Objektif.....	27
3.2.1 Fungsi Biaya Operasi Sistem	27
3.2.2 Fungsi Deviasi Tegangan.....	28
3.3 Penentuan Batasan (<i>Constraints</i>).....	28
3.3.1 <i>Equality Constraints</i>	28
3.3.2 <i>Inequality Constraints</i>	28
3.4 Metode Fuzzy Linear	29
3.5 Data Masukan	30
3.5.1 Data Sistem Kelistrikan	30
3.5.2 Data Distribusi Angin	34
3.5.3 Data Koefisien Biaya Operasi Pembangkit Listrik	
Tenaga Angin dan Sistem Penyimpan Energi	35
3.6 <i>Software</i> yang Digunakan.....	35
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Hasil HMOPSO	37
4.2 Studi Kasus	38

4.2.1 Studi Kasus 1.....	38
4.2.2 Studi Kasus 2.....	40
4.2.3 Studi Kasus 3.....	41
4.3 Perbandingan Hasil	44
BAB 5 KESIMPULAN.....	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN.....	49
BIODATA PENULIS	55

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem tenaga listrik secara umum.....	7
Gambar 2.2 Tipikal bus sistem tenaga listrik [14].....	16
Gambar 2.3 Permodelan saluran transmisi untuk perhitungan aliran daya dan rugi daya [14]	17
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> metode HMOPSO	23
Gambar 3.2 <i>Modified</i> IEEE 30-bus system	33
Gambar 3.3 Fungsi Kepadatan Probabilitas dari Data Kecepatan Angin di Kota Madison [5].....	34
Gambar 4.1 Hasil Alokasi Sistem Penyimpan Energi dengan metode HMOPSO.....	37
Gambar 4.2 Perbandingan biaya operasi sistem dari ketiga studi kasus.....	44
Gambar 4.3 Perbandingan deviasi tegangan dari ketiga studi kasus.....	44

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Table 3.1 Data beban sistem IEEE 30- <i>bus</i>	30
Table 3.2 Data saluran sistem IEEE 30- <i>bus</i>	31
Table 3.3 Data generator sistem IEEE 30- <i>bus</i>	33
Table 3.4 Data Distribusi Angin Kota Madison	34
Table 3.5 Parameter Distribusi Angin Kota Madison	34
Table 3.6 5 Poin Diskrit Distribusi Tenaga Angin Kota Madison.....	35
Tabel 4.1 Hasil Alokasi Sistem Penyimpan Energi dengan HMOPSO	37
Table 4.2 Profil tegangan studi kasus 1.....	38
Table 4.3 Profil tegangan studi kasus 2.....	40
Table 4.4 Profil tegangan studi kasus 3.....	42

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan permintaan energi listrik secara global sedang terjadi. Namun terdapat permasalahan volatilitas harga, keterbatasan persediaan dan masalah lingkungan dari bahan bakar fosil. Permasalahan tersebut menyebabkan pembangkit listrik tenaga angin mulai marak digunakan sebagai sumber energi alternatif di banyak bagian dunia [1]. Berdasarkan laporan dari *American Wind Energy Association* (AWEA), Amerika Serikat telah memasang pembangkit listrik tenaga angin sebesar 40 GW pada tahun 2010 [2].

Pembangkit listrik tenaga angin memiliki banyak manfaat dalam keterjaminan energi dibanding pembangkit listrik tenaga diesel atau batubara. Namun, terdapat tantangan dalam pemanfaatannya, yaitu permasalahan kestabilan sistem yang disebabkan oleh sifat ketidakpastian angin. Ketidakpastian ini adalah kecepatan dan arah angin yang terjadi banyak perubahan pada siang dan malam hari, kecepatan dan arah angin ini mengikuti fungsi probabilistik [3]. Profil angin berubah setiap waktu, sehingga daya yang disalurkan ke *grid* berbeda setiap waktu.

Integrasi sistem penyimpanan energi pada *grid* merupakan salah satu solusi terbaik untuk menjamin stabilitas dan kualitas daya suatu sistem tenaga. Penentuan lokasi dan ukuran yang optimal dari penyimpanan energi pada sistem tenaga dapat memperoleh beberapa manfaat yang signifikan, yaitu meningkatkan keandalan dan kualitas daya, mengurangi biaya operasi sistem tenaga dan mengendalikan biaya ketidak-seimbangan energi yang mahal, meminimalkan rugi daya dan memperbaiki profil tegangan, melayani permintaan pada beban puncak dan memperbaiki faktor daya [4]. Namun, lokasi dan ukuran penyimpanan energi yang kurang sesuai akan menyebabkan biaya operasi sistem yang kurang optimal dan mengancam stabilitas tegangan, khususnya pada penggunaan energi terbarukan [5].

Alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi adalah suatu metode untuk mencari lokasi dan ukuran penyimpanan energi yang optimal agar dapat meminimalkan biaya operasi sistem dan memperbaiki profil tegangan namun dengan tetap memperhatikan batasan teknis yang ada. Dengan meningkatnya penggunaan pembangkit listrik tenaga angin,

maka dalam menentukan lokasi dan ukuran penyimpanan energi harus memperhatikan distribusi tenaga angin.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Lokasi dan ukuran penyimpanan energi yang optimal dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin
2. Pengaruh pemasangan sistem penyimpanan energi dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin pada biaya operasi sistem dan profil tegangan

1.3 Tujuan

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Menentukan lokasi dan ukuran penyimpanan energi yang optimal dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin
2. Mengetahui pengaruh pemasangan sistem penyimpanan energi dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin pada biaya operasi sistem dan profil tegangan

1.4 Batasan Masalah

Untuk memperjelas pembahasan dalam Tugas Akhir ini, maka perlu adanya batasan masalah, yaitu:

1. Metode yang digunakan untuk menentukan lokasi dan ukuran optimal sistem penyimpanan energi adalah algoritma HMOPSO
2. Aspek yang dibahas dalam menentukan lokasi dan ukuran optimal sistem penyimpanan energi adalah dari sisi biaya operasi dan deviasi tegangan sistem
3. Data dan parameter distribusi angin yang digunakan adalah data kecepatan angin di kota Madison, Wisconsin, USA
4. Sistem penyimpanan energi yang digunakan adalah baterai
5. Sistem yang digunakan adalah sistem IEEE 30-bus yang telah dimodifikasi
6. Tipe turbin angin yang digunakan adalah VESTAS V82

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur
Studi literatur dilakukan mengenai sistem penyimpan energi, studi aliran daya, distribusi tenaga angin, 5PEM, MOPSO, analisis probabilitas biaya.
2. Pengambilan data
Data yang diperlukan adalah data distribusi angin, data pembangkit listrik tenaga angin, data biaya operasi generator tenaga angin per jam, data biaya operasi sistem penyimpan energi per jam dan data sistem.
3. Pembuatan M-file
Penerapan alokasi ekonomis sistem penyimpan energi dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin menggunakan HMOPSO pada Matlab.
4. Simulasi dan Analisis Data
Simulasi aliran daya dilakukan pada tiga kasus berbeda. Kasus pertama, simulasi aliran daya pada sistem tanpa sistem penyimpan energi. Kasus kedua, simulasi aliran daya dengan menentukan lokasi dan ukuran penyimpan energi yang optimal dengan mengasumsikan daya keluaran pembangkit listrik tenaga angin bernilai nol menggunakan optimal aliran daya. Kasus ketiga, simulasi aliran daya dengan menentukan lokasi dan ukuran penyimpan energi yang optimal dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin menggunakan HMOPSO. Setelah dilakukan simulasi, data dianalisis mengenai probabilitas biaya operasi dan profil tegangan dari ketiga kasus tersebut.
5. Penyusunan Laporan
Hasil analisis dari simulasi akan diperoleh kesimpulan dan disusun dalam laporan Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.

Bab 2 : ALOKASI EKONOMIS SISTEM PENYIMPAN ENERGI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN DISTRIBUSI TENAGA ANGIN

Bab ini membahas tentang dasar teori yang dipakai dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Dasar teori ini berupa penjelasan tentang alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi, sistem tenaga listrik, sistem pembangkitan, sistem penyimpanan energi, diskritisasi distribusi tenaga angin, studi aliran daya, deviasi tegangan, PSO dan OPF.

Bab 3 : PENERAPAN HMOPSO UNTUK ALOKASI EKONOMIS SISTEM PENYIMPAN ENERGI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN DISTRIBUSI TENAGA ANGIN

Bab ini membahas tentang penerapan metode HMOPSO untuk alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin.

Bab 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil dan analisis simulasi alokasi ekonomis untuk sistem penyimpanan energi dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin.

Bab 5 : KESIMPULAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari permasalahan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat mengetahui cara yang tepat dan efektif untuk menentukan letak dan ukuran sistem penyimpanan energi pada sistem dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin
2. Dapat digunakan sebagai acuan atau referensi bagi orang lain yang hendak mempelajari masalah yang serupa

BAB 2

ALOKASI EKONOMIS SISTEM PENYIMPAN ENERGI DENGAN MEMPERHATIKAN DISTRIBUSI TENAGA ANGIN

2.1 Alokasi Ekonomis Untuk Sistem Penyimpan Energi dengan Memperhatikan Distribusi Tenaga Angin

Alokasi ekonomis bertujuan untuk mencari lokasi dan ukuran penyimpanan energi yang optimal agar dapat meminimalkan biaya operasi sistem dan memperbaiki profil tegangan namun dengan tetap memperhatikan batasan-batasan seperti tegangan bus, daya aktif dan daya reaktif [5]. Pada alokasi sistem penyimpanan energi yang dilakukan pada sistem yang memiliki pembangkit listrik tenaga angin, distribusi tenaga angin harus diperhitungkan. Karena daya keluaran dari pembangkit listrik tenaga angin bergantung pada kecepatan angin. Untuk mempermudah perhitungan distribusi tenaga angin yang bersifat kontinu, dapat digunakan metode 5PEM. Metode 5PEM berfungsi untuk merubah distribusi tenaga angin yang berifat kontinu menjadi 5 poin diskrit distribusi tenaga angin. Sehingga, 5 poin diskrit tersebut dapat digunakan sebagai 5 skenario yang diperhitungkan dalam melakukan alokasi sistem penyimpanan energi. Fungsi objektif dari alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi ini berupa biaya operasi dan deviasi tegangan sistem dengan persamaan sebagai berikut:

$$f_{ob1} = \sum_{k=1}^5 p_k \cdot C_k \quad (2.1)$$

$$f_{ob2} = \sum_{k=1}^5 \sum_{s=1}^h \left(\frac{V_{sk} - V_{sk}^{exp}}{\Delta V_{sk}^{max}} \right)^2 \quad (2.2)$$

Dengan persamaan biaya operasi sistem sebagai berikut:

$$\begin{aligned} C_k &= \sum_{r=1}^m C(P_{Gr}) + C_w + C_s \\ &= \sum_{r=1}^m (a_r + b_r \cdot P_{Gr} + c_r \cdot P_{Gr}^2) + c^{ow} \cdot P_w + c^{os} \cdot P_s \end{aligned} \quad (2.3)$$

- p_k : probabilitas biaya operasi sistem pada skenario ke-k
- C_k : total biaya operasi sistem pada skenario ke-k
- h : total simpul bus

- V_{sk}^{exp} : tegangan yang diinginkan pada skenario ke-k
 ΔV_{sk}^{max} : selisih tegangan maksimum pada skenario ke-k
 m : total generator
 $C(P_{Gr})$: biaya operasi generator ke-r (\$/h)
 C_w : biaya operasi pembangkit tenaga angin (\$/h)
 C_s : biaya operasi sistem penyimpan energi (\$/h)
 a_r, b_r, c_r : koefisien *fuel cost* generator ke-r
 c^{ow} : biaya operasi pembangkit tenaga angin (\$/MWh)
 P_w : daya keluaran pembangkit tenaga angin (MW)
 c^{os} : biaya operasi sistem penyimpan energi (\$/MWh)
 P_s : kapasitas sistem penyimpan energi yang terpasang (MW)

2.2 Sistem Tenaga Listrik

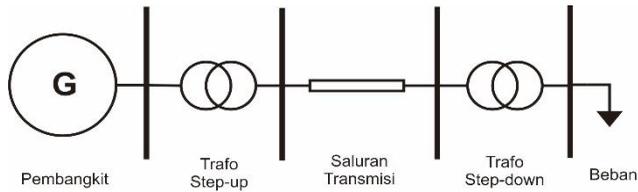
Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung dengan saluran untuk melayani beban. Secara umum sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

- a. Pembangkit
- b. Transmisi
- c. Beban atau konsumen

Sistem tenaga listrik yang memiliki banyak pembangkit biasanya menyalurkan daya ke beban melalui saluran interkoneksi. Tujuan utama dari sistem saluran interkoneksi adalah untuk menjaga kontinuitas dan ketersediaan tenaga listrik terhadap kebutuhan beban yang terus meningkat. Semakin berkembang sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan lemahnya performansi sistem ketika mengalami gangguan. Salah satu efek gangguan adalah osilasi elektromekanik yang jika tidak diredam dengan baik maka sistem akan terganggu dan dapat keluar dari area kestabilannya sehingga mengakibatkan pengaruh yang lebih buruk seperti pemadaman total (*black out*) [6].

Bahan baku energi adalah bagian terbesar dari pembiayaan, selain itu fluktuasi pemakaian listrik selalu terkait dari penggunaan energi listrik oleh beban. Sangat diperlukan cara pengoperasian total pembangkitan yang efisien, karena pembiayaan terbesar ini terletak di pembangkit-pembangkit. Dengan terhubungnya banyak pembangkit kedalam sebuah sistem interkoneksi memberikan kemungkinan pengaturan output setiap

pembangkit dan biaya pembangkitan dapat diatur pada tingkat yang rendah/optimum.



Gambar 2.1 Sistem tenaga listrik secara umum

2.3 Sistem Pembangkitan

Sistem pembangkitan tenaga listrik berfungsi membangkitkan energi listrik melalui berbagai macam pembangkit tenaga listrik. Pada pembangkit tenaga listrik ini sumber-sumber energi alam dirubah oleh penggerak mula menjadi energi mekanis yang berupa kecepatan atau putaran dan selanjutnya energi mekanis dirubah menjadi energi listrik oleh generator. Di dalam sebuah sistem pembangkitan, guna menyediakan total daya yang diperlukan, beberapa generator dioperasikan secara paralel dan terhubung dengan sistem. Generator merupakan salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik. Ada beberapa tipe dari generator namun yang paling sering digunakan dalam sistem tenaga listrik adalah generator 3 fasa atau sering disebut juga dengan *synchronous generator*. Pada *synchronous generator* terdapat 2 medan sinkron yang berputar. Dari kedua medan sinkron tersebut, medan yang pertama dihasilkan oleh putaran rotor dan dieksitasi oleh arus DC. Sementara untuk medan yang kedua dihasilkan oleh arus jangkar tiga fasa pada belitan stator. Untuk menggerakkan generator dibutuhkan *prime mover*. Ada beberapa macam *prime mover* yang digunakan untuk menggerakkan turbin, seperti turbin hidrolik yang digerakan oleh air terjun, turbin uap yang menggunakan sumber energi hasil pembakaran batubara dan lain sebagainya. Selain disalurkan melalui jaringan transmisi, *output* listrik dari sistem pembangkit ini juga digunakan untuk peralatan pusat pembangkit (sistem tenaga bantu) [7].

Fungsi biaya tiap generator bersifat unik, berbeda antara satu dengan yang lainnya. Meskipun terdapat dua buah generator dengan merk dan tipe yang sama, karakter input-output kedua generator itu bisa

berbeda. Fungsi biaya untuk pembangkit termal ditunjukkan pada persamaan (2.4).

$$Cost = a + b(P) + c(P)^2 \quad (2.4)$$

Cost : biaya operasi pembangkit termal
P : daya yang dibangkitkan pembangkit termal
a, b, c : koefisien *fuel cost* pembangkit termal

2.4 Sistem Penyimpan Energi

Sistem penyimpanan energi merupakan tempat penyimpanan energi. Sistem penyimpan energi sering digunakan dalam aplikasi sistem tenaga listrik untuk menyimpan energi cadangan dikarenakan sifat penyimpan energi yang dapat melakukan *charging* dan *discharging*. Sistem penyimpan energi dapat mengatasi permasalahan dari penggunaan pembangkit tenaga angin, yang disebabkan oleh sifat ketidak-pastian angin. Keuntungan dari penggunaan sistem penyimpan energi adalah meningkatkan keandalan dan kualitas daya, mengurangi biaya operasi sistem tenaga dan mengendalikan biaya ketidak-seimbangan energi yang mahal, meminimalkan rugi daya dan memperbaiki profil tegangan, melayani permintaan pada beban puncak dan memperbaiki faktor daya [4]. Namun pemasangan penyimpan energi yang kurang sesuai dalam lokasi dan ukurannya akan menyebabkan biaya operasi sistem yang kurang optimal dan mengancam stabilitas tegangan. Perhitungan biaya operasi sistem penyimpan energi didefinisikan dalam persamaan berikut:

$$Cost = c^{ops} \cdot P_{storage} \quad (2.5)$$

Cost : Biaya operasi sistem penyimpan energi (\$/h)
c^{ops} : koefisien biaya operasi sistem penyimpan energi (\$/MWh)
P_{storage} : Kapasitas sistem penyimpan energi yang terpasang.

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit listrik tenaga angin berfungsi membangkitkan energi listrik dari energi kinetik angin. Angin dengan kecepatan tertentu berhembus ke arah pisau (*blade*) turbin angin. Angin tersebut memiliki energi kinetik yang dapat memutar turbin angin dengan kecepatan tertentu. Turbin angin yang berputar terhubung ke poros rotor dari

generator. Generator mengubah energi mekanik putaran tersebut menjadi energi listrik. Tenaga listrik yang dihasilkan disalurkan ke trafo step-up dan disalurkan ke beban melalui transmisi. Daya mekanik yang dapat diperoleh dari energi angin adalah:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta_T \quad (2.6)$$

P_a : Daya mekanik pembangkit listrik tenaga angin (Watt)

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

A : luas area angin (m^2)

v : kecepatan angin

Dari persamaan 2.6 dapat dilihat bahwa daya mekanik berbanding lurus dengan kecepatan angin, sehingga data tentang kecepatan angin sangat penting. Daya yang dibangkitkan pembangkit listrik tenaga angin bergantung pada kecepatan angin.

Angin tidak pernah konstan di setiap tempat dan di setiap saat. Angin sangat dipengaruhi oleh: iklim, kontur muka bumi, ketinggian lokasi. Oleh karena itu kecepatan rata-rata angin harus diambil dalam rentang waktu yang lama, idealnya selama 10 tahun atau bahkan lebih [8].

2.6 Diskritisasi Distribusi Tenaga Angin

Diskritisasi distribusi tenaga angin bertujuan untuk mendiskritisasi distribusi tenaga angin yang bersifat kontinu. Berbeda dengan analisis alokasi konvensional yang dilakukan pada beban besar tanpa pembangkit listrik tenaga angin, pada penelitian [9] bertujuan untuk menentukan alokasi optimal sistem penyimpanan energi dengan memperhatikan distribusi tenaga angin. Penelitian tersebut menggunakan metode *five-point estimation method* (SPEM). Hasil diskritisasi distribusi tenaga angin

menggunakan metode SPEM adalah 5 poin diskrit distribusi tenaga angin beserta probabilitas dari masing masing poin.

2.6.1 Distribusi Tenaga Angin

Dari penelitian sebelumnya [3] telah dijelaskan bahwa, dengan menggunakan *power curve* dari turbin angin, distribusi tenaga angin dapat diubah menjadi persamaan linier seperti berikut:

$$P_w = \begin{cases} 0, & \text{if } V \leq V_{ci} \text{ or } V > V_{co} \\ \alpha + \beta V, & \text{if } V_{ci} \leq V \leq V_{no} \\ Z, & \text{if } V_{no} \leq V \leq V_{co} \end{cases} \quad (2.7)$$

P_w : daya yang disalurkan

V : kecepatan angin

Z : daya maksimum dari turbin angin

α & β : koefisien linier

V_{ci} : *cut-in* kecepatan angin

V_{co} : *cut-out* kecepatan angin

V_{no} : kecepatan angin normal

2.6.2 Distribusi Weibull

Menurut penelitian sebelumnya distribusi Weibull merupakan metode yang memiliki fleksibilitas yang bagus dan akurat untuk memberikan deskripsi probabilitik kecepatan angin [3], sehingga distribusi Weibull telah banyak digunakan untuk menyajikan distribusi probabilitas kecepatan angin, yang didefinisikan sebagai berikut:

$$f(x | \lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda} \right)^k} \quad (2.8)$$

k : parameter bentuk

x : parameter skala

2.6.3 SPEM

Tujuan utama diskritisasi ini adalah mendiskritisasi distribusi tenaga angin yang bersifat kontinyu menjadi lima poin diskrit distribusi tenaga angin, dengan probabilitas pada masing-masing poin. Untuk langkah awal, probabilitas skenario ketika daya yang dihasilkan turbin

angin bernilai nol dan ketika daya yang dihasilkan turbin angin sebesar *rating*, dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$P_1 = \text{prob}(P_W = 0) = \text{prob}(V \leq V_{ci}) + \text{prob}(V > V_{co}) \quad (2.9)$$

$$P_5 = \text{prob}(P_W = Z) = \text{prob}(V_{no} \leq V \leq V_{co}) \quad (2.10)$$

Probabilitas dari skenario pertama tersebut dapat diperoleh dengan mencari luas *area* diantara nilai 0 dan kecepatan *cut-in* angin serta diantara nilai kecepatan *cut-out* angin dan kecepatan normal angin dari grafik fungsi distribusi Weibull distribusi tenaga angin. Sedangkan probabilitas dari skenario kelima tersebut diperoleh dengan mencari luas *area* diantara kecepatan normal angin dan kecepatan *cut-out* angin dari grafik fungsi distribusi Weibull distribusi tenaga angin.

Kemudian untuk kecepatan angin sebesar $V_{ci} \leq V \leq V_{no}$, fungsi kepadatan probabilitasnya dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$f_{P_W}(y | \lambda, k) = \frac{\frac{1}{\beta} f\left(\frac{y-\alpha}{\beta} | \lambda, k\right)}{1 - P_1 - P_5} \quad (2.11)$$

diketahui bahwa,

$$\int_0^Z f_{P_W}(y | \lambda, k) dy = 1 \quad (2.12)$$

$$\mu_{P_W} = \int_0^Z y f_{P_W}(y | \lambda, k) dy \quad (2.13)$$

$$\sigma_{P_W}^2 = \int_0^Z (y - \mu_{P_W})^2 f_{P_W}(y | \lambda, k) dy \quad (2.14)$$

$$\lambda_j = \int_0^Z \left(\frac{y - \mu_{P_W}}{\sigma_{P_W}}\right)^j f_{P_W}(y | \lambda, k) dy \quad (2.15)$$

- μ_Y : rata-rata dari P_W ;
- σ_Y : standar deviasi dari P_W ;
- λ_j : momen sentral ke j dari P_W .

Dengan mengasumsikan $d=(y-\mu_Y/\sigma_Y)$. Dimana d merupakan nilai standar dari P_W . Persamaan momen yang diketahui adalah

$$\sum_{i=2}^4 p_i d_i = \lambda_j \quad (2.16)$$

dimana, p_i merupakan probabilitas yang sesuai dengan d_i . Dengan menyelesaikan persamaan (2.16), maka didapatkan:

$$\begin{cases} d_2 = \frac{\lambda_3}{2} - \sqrt{\lambda_4 - \frac{3\lambda_3^2}{4}} \\ d_3 = 0 \\ d_4 = \frac{\lambda_3}{2} + \sqrt{\lambda_4 - \frac{3\lambda_3^2}{4}} \end{cases} \quad (2.17)$$

Dengan menentukan nilai d_2 , d_3 dan d_4 maka nilai dari p_2 , p_3 dan p_4 dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$\begin{cases} p_2 = \frac{-1}{d_2(d_4 - d_2)} \\ p_3 = \frac{1 - p_2 - p_4}{1} \\ p_4 = \frac{1}{d_4(d_4 - d_2)} \end{cases} \quad (2.18)$$

Dengan menentukan nilai p_2 , p_3 dan p_4 , maka diperoleh probabilitas beserta besar daya yang dihasilkan turbin angin pada tiga poin diskrit distribusi tenaga angin lainnya:

$$\begin{cases} P_{W2} = \mu_{P_W} + \sigma_{P_W} \mu_{P_W} d_2 \quad \text{dan} \quad P_2 = p_2(1 - P_1 - P_5) \\ P_{W3} = \mu_{P_W} \quad \text{dan} \quad P_3 = p_3(1 - P_1 - P_5) \\ P_{W4} = \mu_{P_W} + \sigma_{P_W} \mu_{P_W} d_4 \quad \text{dan} \quad P_4 = p_4(1 - P_1 - P_5) \end{cases} \quad (2.19)$$

2.7 Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah teknik optimasi heuristik yang telah dikembangkan oleh Kennedy dan Eberhart [10]. Algoritma PSO meniru perilaku sosial sekawanan burung atau ikan. Perilaku sosial terdiri dari tindakan individu dan pengaruh dari individu-individu lain dalam suatu kelompok. Kata partikel menunjukkan, misalnya, seekor burung dalam kawanan burung. Setiap individu atau partikel berperilaku dengan cara menggunakan kecerdasannya (*intelligence*) sendiri dan juga dipengaruhi perilaku kelompok kolektifnya. Dengan demikian, jika satu partikel atau seekor burung

menemukan jalan yang pendek atau tepat menuju ke sumber makanan, sisa kelompok yang lain juga akan dapat segera mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka berjauhan di kelompok tersebut.

Pada algoritma PSO ini, pencarian solusi dilakukan oleh suatu populasi yang terdiri dari beberapa partikel. Populasi dibangkitkan secara *random* dengan batasan nilai terkecil dan terbesar. Setiap partikel merepresentasikan posisi atau solusi dari permasalahan yang dihadapi. Setiap partikel yang memiliki kecepatan acak melakukan pencarian solusi yang optimal dengan melintasi ruang pencarian (*search space*). Hal ini dilakukan dengan cara setiap partikel melakukan penyesuaian terhadap posisi terbaik dari partikel tersebut (*local best*) dan penyesuaian terhadap posisi partikel terbaik dari seluruh kawanan (*global best*) selama melintasi ruang pencarian. Jadi, penyebaran pengalaman atau informasi terjadi di dalam partikel itu sendiri dan antara suatu partikel dengan partikel terbaik dari seluruh kawanan selama proses pencarian solusi. Setelah itu, dilakukan proses pencarian untuk mencari posisi terbaik setiap partikel dalam sejumlah iterasi tertentu sampai didapatkan posisi yang relatif *steady* atau mencapai batas iterasi yang telah ditetapkan. Pada setiap iterasi, setiap solusi yang direpresentasikan oleh posisi partikel, dievaluasi performansinya dengan cara memasukkan solusi tersebut kedalam *fitness function*.

2.8 Studi Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan dasar dari pengoperasian sistem tenaga listrik, dalam sistem tenaga listrik. Pada studi aliran daya, sangat penting untuk dilakukan perhitungan untuk memperoleh tegangan dan arus pada setiap bagian yang berbeda-beda pada suatu sistem tenaga listrik [11]. Studi aliran daya dilakukan bertujuan untuk mendesain komponen sistem tenaga listrik yang berbeda-beda serta berguna agar sistem tenaga listrik dapat bertahan mengalami fluktuasi beban selama operasi *steady state* [12].

2.8.1 Analisis Aliran Daya

Pada sistem tenaga listrik terdapat 4 besaran yang berhubungan dengan setiap bus pada sistem yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), sudut fasa (δ) dan *magnitude* tegangan $|V|$. Pada aliran daya terdapat dua besaran yang harus diperhitungkan menggunakan persamaan aliran daya

dan dua lainnya telah ditentukan. Selain untuk menentukan 4 besaran tersebut pada kenyataannya dalam melakukan analisis aliran daya bertujuan untuk mengidentifikasi tiga tipe bus pada jaringan. Besaran yang akan ditentukan dipilih berdasarkan tiga tipe bus pada sistem tenaga listrik, yang pertama adalah *slack/swing bus* atau *reference bus* adalah bus yang terdapat generator yang daya keluarannya mengikuti besar beban. *Reference bus* memiliki *magnitude* tegangan $|V|$ dan sudut fasa (δ) yang telah ditentukan. Sedangkan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) berubah-ubah sesuai dengan yang dibutuhkan oleh sistem. Yang kedua adalah *voltage-controlled buses* atau bus generator adalah bus yang terdapat generator dengan daya aktif yang sudah ditentukan. Bus generator memiliki besaran daya aktif (P) dan *magnitude* tegangan $|V|$ yang telah ditentukan. Sedangkan daya reaktif (Q) dan sudut fasa (δ) merupakan variabel yang akan dicari. Yang ketiga adalah *load bus*. Pada setiap bus yang hanya terdapat beban dan tidak memiliki generator, dapat disebut *load bus*. Daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari beban telah diketahui, sehingga besaran yang perlu diperhitungkan selanjutnya adalah besaran sudut fasa (δ) dan *magnitude* tegangan ($|V|$).

Dalam melakukan analisis aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik diperlukan data bus dan data saluran transmisi. Data-data yang di butuhkan pada suatu bus yaitu:

1. *Magnitude* tegangan $|V|$ dalam satuan per unit (p.u.).
2. Sudut fasa (δ)
3. Daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada besar pembebanan.
4. Daya aktif (P), daya reaktif (Q), Q_{min} dan Q_{max} pada besar pembangkitan.

Data-data yang di butuhkan pada saluran transmisi yaitu:

1. Resistansi saluran transmisi dalam satuan p.u.
2. Reaktansi saluran transmisi dalam satuan p.u.
3. Tap transformator.
4. *Rating* tegangan dalam satuan kV.

2.8.2 Sistem per-unit (pu)

Dalam melakukan perhitungan analisis sistem tenaga listrik untuk mendapatkan nilai impedansi, arus, tegangan dan daya yang dalam satuan per-unit bukan dalam satuan sebenarnya seperti ohm, ampere, kilovolt dan megavolt-ampere (atau megavar atau megawatt). Hal tersebut dilakukan karena berbagai macam keuntungan dalam penggunaan satuan per-unit. Sistem pu adalah sarana untuk mempresentasikan agar mudah dalam membandingkannya. Nilai pu tersebut didefinisikan sebagai rasio kuantitas terhadap basis yang ditentukan pada nilai yang memiliki dimensi yang sama. Oleh karena itu nilai pu pada semua kuantitas bisa di definisikan sebagai kuantitas sebenarnya [13].

$$\text{nilai pu} = \frac{\text{nilai sebenarnya}}{\text{nilai dasar}} \quad (2.20)$$

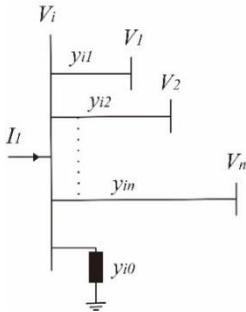
Nilai impedansi dasar (Z_{base}) dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$Z_{base} = \frac{[KV_{base(L-N)}]^2}{MVA_{base(1\phi)}} \quad (2.21)$$

Nilai arus dasar (I_{base}) dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$I_{base} = \frac{KVA_{base(1\phi)}}{KV_{base(L-N)}} \quad (2.22)$$

2.8.3 Persamaan Aliran daya



Gambar 2.2 Tipikal bus sistem tenaga listrik [14]

Aplikasi hukum kirchoff pada bus seperti gambar 2.2 dapat didefinisikan pada persamaan berikut:

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (2.23)$$

$$I_i = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \quad (2.24)$$

$$I_i = V_i + \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} - V_j \quad j \neq i \quad (2.25)$$

- V_i : Tegangan pada bus i
- I_i : Arus yang mengalir pada bus i
- y_{in} : Admintasi diantara bus i dan bus n
- y_{i0} : Admintasi diantara bus i ke tanah
- V_j : Tegangan pada bus j
- y_{ij} : Admintasi diantara bus i dan bus j

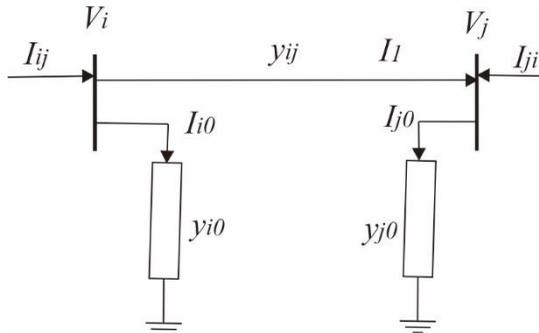
Persamaan daya aktif dan daya reaktif pada bus i yaitu:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.26)$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.27)$$

- V_i : Tegangan pada bus i
- I_i : Arus yang mengalir pada bus i
- P_i : Daya aktif pada bus i
- Q_i : Daya reaktif pada bus i

2.8.4 Aliran Daya dan Rugi-rugi Daya pada saluran



Gambar 2.3 Permodelan saluran transmisi untuk perhitungan aliran daya dan rugi daya [14]

Pada sub bab ini akan dijelaskan tentang perhitungan aliran daya dan rugi-rugi daya pada saluran. Pada gambar 2.3 saluran dihubungkan dari bus i ke bus j . Arus I_{ij} dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$I_{ij} = I_1 + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (2.28)$$

$$I_{ji} = -I_1 + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (2.29)$$

Daya kompleks S_{ij} dan S_{ji} dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.30)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.31)$$

Sehingga untuk menentukan rugi-rugi total saluran i - j (S_{Lij}) adalah penjumlahan antara persamaan:

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.32)$$

2.8.5 Aliran Daya menggunakan metode Newton Raphson

Persamaan aliran daya dapat diselesaikan menggunakan metode Newton-Raphson [14]. Deret Taylor merupakan dasar dari metode Newton Raphson dalam penyelesaian aliran daya. Arus yang memasuki

bus i dari gambar 2.3 memiliki persamaan dan dapat ditulis ulang menjadi:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.33)$$

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.34)$$

Daya kompleks pada bus i adalah:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.35)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.34 ke dalam persamaan 2.35:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.36)$$

Untuk mendapatkan daya aktif dan daya reaktif pada bus i maka di pisahkan antara komponen riil dan imajineranya, yaitu:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| |V_i| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.37)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| |V_i| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.38)$$

Dari persamaan diatas yaitu persamaan 2.37 dan 2.38 merupakan persamaan non linier dengan besaran tegangan dalam satuan per unit, sudut dalam radian dan terdiri dari variable bebas. Kemudian kedua persamaan diatas di kembangkan menjadi deret Taylor sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \dots \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \dots \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \dots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Hubungan yang linier antara sedikit perubahan dalam sudut tegangan $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta |V_i^{(k)}|$ serta sedikit perubahan pada daya aktif $\Delta P_i^{(k)}$ dan daya reaktif $\Delta Q_i^{(k)}$ hubungan linier tersebut diberikan oleh Matriks Jacobian. Matrik Jacobian memiliki elemen-elemen yang merupakan turunan parsial atau merupakan sebagian dari persamaan 2.37 dan 2.38 yang merupakan turunan terhadap $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan $\Delta |V_i^{(k)}|$. Dapat juga dituliskan dalam pemodelan pendek sebagai:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ - \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ - & - \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ - \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Pada *voltage-controlled bus*, telah diketahui nilai tegangan. Maka dari itu, apabila di dalam suatu system yang terdiri dari n bus, m generator, maka akan dihilangkan m persamaan untuk ΔV dan ΔQ pada suatu kolom matriks Jacobian. Dan juga terdapat konstrain yang berkaitan dengan daya aktif adalah n-1 dan konstrain daya reaktif adalah n-1-m. Sedangkan matriks Jacobian memiliki ukuran matriks (2n-2-m) x (2n-2-m). Elemen J1 memiliki ukuran matriks (n-1) x (n-1). Elemen J2 memiliki ukuran matriks (n-1) x (n-1-m). Elemen J3 memiliki ukuran matriks (n-1-m) x (n-1) dan Elemen J4 memiliki ukuran matriks (n-1-m) x (n-1-m).

Untuk elemen J1 memiliki persamaan diagonal dan off-diagonal sebagai:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.41)$$

Berikut adalah persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J2:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ii}|\cos \theta_{ii} + \sum_{j=1}^n |V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = 2|V_i||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.43)$$

Berikut adalah persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J3:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.45)$$

Berikut adalah persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J4:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}|\cos \theta_{ii} + \sum_{j=1}^n |V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.47)$$

2.9 Deviasi Tegangan

Salah satu jenis gangguan kualitas daya berupa selisih nilai atau *magnitude* tegangan yang dihasilkan dari bus sumber dengan bus pada saluran merupakan deviasi tegangan [5]. Suatu sistem dikatakan memiliki kualitas baik jika deviasi tegangan memiliki nilai mendekati 0 (nol). Deviasi tegangan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta V = \left(\frac{V_i - V^{exp}}{V_i^{max} - V_i^{min}} \right)^2 \quad (2.48)$$

ΔV : deviasi tegangan

V_i : tegangan bus ke- i

V^{spek} : tegangan yang diinginkan

V_i^{max} : batas atas dari tegangan pada bus i

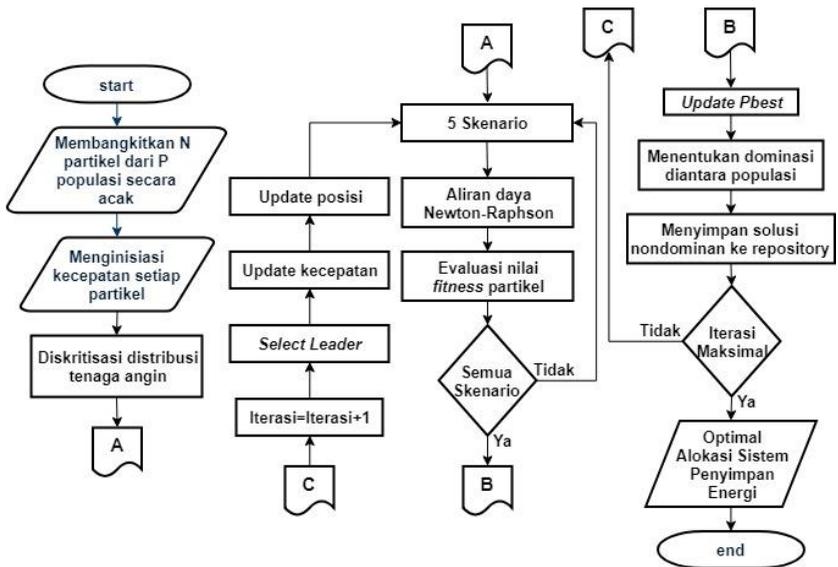
V_i^{min} : batas bawah dari tegangan pada bus i

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PENERAPAN HMOPSO UNTUK ALOKASI EKONOMIS SISTEM PENYIMPAN ENERGI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN DISTRIBUSI TENAGA ANGIN

3.1 HMOPSO



Gambar 3.1 Flowchart metode HMOPSO

Pada tugas akhir ini metode HMOPSO digunakan untuk menentukan lokasi dan ukuran yang optimal dari sistem penyimpanan energi dengan tujuan meminimalkan biaya operasi sistem dan deviasi tegangan sistem. Metode HMOPSO mempertimbangkan ketidak-pastian tenaga angin dalam menentukan lokasi dan ukuran optimal sistem penyimpanan energi. Flowchart dari metode HMOPSO ini dapat dilihat pada gambar 3.1. HMOPSO mengintegrasikan beberapa metode, antara lain: 1) MOPSO, yang mencari posisi dan kecepatan setiap partikel untuk

menentukan lokasi dan ukuran terbaik dari sistem penyimpan energi dan daya yang dibangkitkan oleh generator; 2) SPEM, yang mendiskritisasi distribusi tenaga angin menjadi 5 skenario untuk dilakukan studi kasus; 3) aliran daya Newton-Raphson, yang menyelesaikan persamaan-persamaan aliran daya dengan memperhitungkan 5 poin diskrit distribusi tenaga angin.

3.1.1 MOPSO

MOPSO adalah pengembangan algoritma PSO untuk menyelesaikan kasus *multi-objective optimization*. MOPSO pertama kali diperkenalkan pada tahun 2004 oleh Carlos A. Coello [15]. *Multi-objective optimization* mengoptimalkan dua atau lebih fungsi tujuan yang saling bertentangan dengan *constraints* yang ada. *Multi-objective optimization* dalam kasus nyata banyak digunakan untuk menangani permasalahan yang harus memenuhi lebih dari satu fungsi tujuan. *Multi-objective optimization* bertujuan untuk menemukan satu set solusi yang tidak saling mendominasi antar fungsi tujuan (*non-dominated front*). MOPSO menggabungkan metode PSO dengan konsep *Pareto Envelope*, *Non dominated Sorting*, *External repository* dan *Mutation Operator*. Pada MOPSO, setelah setiap partikel memperbaharui posisi maka setiap partikel dievaluasi dengan fungsi tujuan. Partikel-partikel tersebut selanjutnya diproses dengan *non-dominated sorting procedure*. Pada prosedur ini partikel diseleksi untuk mencari *non-dominated particle*, yang kemudian dikelompokkan menjadi *elite group*. Setelah *elite group* terbentuk maka dipilihlah kandidat di antara *elite group* yang akan menjadi *leader (guidance)* yang akan membawa kawanan partikel ke area yang masih kosong untuk mendapatkan penyebaran pencarian yang lebih baik.

Dalam memilih *leader* dari *repository front*, pertama member dari *repository front* dibagi ke dalam *grid* lalu memilih lokasi dengan teknik *roulette wheel*, *cell grid* yang kepadatannya rendah lebih besar kemungkinan dipilih. Dan 1 dari member *grid* yang dipilih secara random sebagai *leader*.

Konsep *Non dominated sorting* digunakan untuk menentukan solusi terbaik yang dihasilkan oleh metode MOPSO dengan cara menentukan dominasi antara solusi yang ada. Sebuah solusi a dikatakan dominan terhadap solusi b (dinotasikan $a < b$) jika dan hanya jika kondisi berikut ini terpenuhi [15]: Solusi a tidak lebih baik dari solusi b untuk

semua fungsi objektif, solusi a sedikit lebih baik dari solusi b untuk beberapa fungsi objektif.

Metode MOPSO tidak hanya memiliki satu solusi global optimal akan tetapi banyak solusi yang disebut solusi *pareto front optimal*, karena satu solusi tidak dapat dianggap lebih baik dari pada yang lainnya dengan memandang semua fungsi objektif [16]. Solusi yang digunakan adalah solusi *Non Dominated*, yaitu solusi yang tidak akan didominasi solusi lainnya. Solusi *Non Dominated* ini akan di simpan pada tempat penyimpanan eksternal (*Repository*) setiap proses iterasi. Sehingga nantinya *repository* berisi banyak solusi-solusi optimisasi yang dijadikan kandidat solusi terbaik untuk optimisasi.

Kita ketahui metode PSO memiliki waktu konvergensi yang cepat, akan tetapi hal ini dapat mengganggu optimisasi multi objektif karena algoritma PSO dapat konvergensi dengan menghasilkan Pareto Front yang salah. Dari hal tersebut Metode MOPSO juga mengembangkan metode operasi mutasi. Operasi mutasi digunakan untuk mempengaruhi kemampuan eksplorasi dari setiap partikel pada awal pencarian, lalu pengaruh dari operasi mutasi pada partikel menurun sejalan dengan meningkatnya iterasi [17]. Dengan meningkatnya kemampuan eksplorasi didapatkan setiap variable yang diharapkan.

3.1.2 Pemodelan HMOPSO dalam Alokasi Ekonomis Sistem

Penyimpan Energi

3.1.2.1 Inisialisasi Awal

Dalam memulai HMOPSO kita harus menginisialisasi beberapa parameter, yaitu:

Jumlah Populasi	= 50
Jumlah Variabel	= 29
Jumlah <i>Repository</i>	= 100
Bobot Inersia	= 0.4
Koefisien Kognitif	= 1
Koefisien Sosial	= 1
Koefisien Mutasi	= 0.5
Koefisien Inflasi	= 0.2
Ukuran dimensi grid	= 30
Koefisien <i>Leader Selection</i>	= 2
Koefisien <i>Deletion Selection</i>	= 5

Iterasi Maksimal = 200

Populasi terdiri dari sekumpulan variabel. Variabel adalah parameter yang akan dioptimasi, pada tugas akhir ini variabel yang akan dioptimasi adalah 5 *output* generator dan 24 kapasitas sistem penyimpanan energi pada *load bus*, sehingga total variabel adalah 29 variabel. Variabel tersebut dibatasi oleh batas variabel maksimal serta batas variabel minimal. *Repository* adalah kelompok populasi nondominan yang merupakan kandidat solusi. Bobot inersia digunakan untuk memberikan bobot pada kecepatan dari setiap populasi. Koefisien kognitif adalah konstanta untuk posisi terbaik dari pengalaman setiap populasi. Koefisien sosial adalah konstanta untuk posisi terbaik dari pengalaman seluruh populasi. Koefisien mutasi, koefisien inflasi, koefisien *leader selection*, koefisien *deletion selection* telah dijelaskan pada MOPSO. Iterasi maksimal adalah banyaknya proses pengulangan yang dilakukan dalam optimasi nilai *fitness*.

3.1.2.2 Penerapan HMOPSO Untuk Alokasi Ekonomis Sistem Penyimpanan Energi dengan Mempertimbangkan Distribusi Tenaga Angin

Penerapan HMOPSO untuk alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi dapat dijelaskan lebih detail sebagai berikut [18]:

1. Inisiasi posisi dan kecepatan populasi
2. *Run loadflow* dan evaluasi nilai *fitness* dari posisi populasi
3. *Update personal best* populasi
4. Menentukan dominasi di antara populasi
5. Simpan populasi yang tidak didominasi (*non dominated*) ke dalam repositori (*rep*), solusi baru yang dihasilkan ditambahkan ke repositori dan solusi yang dikuasai dihapus dari repositori
6. Mencari *leader* dari repositori
7. *Update* kecepatan setiap populasi dengan persamaan:
$$\begin{aligned} \text{pop. velocity} &= W \times \text{pop. velocity} \dots & (3.1) \\ &+ C1 \times \text{rand} \times (Pbest - \text{pop}) \dots \\ &+ C2 \times \text{rand} \times (Leader - \text{pop}) \end{aligned}$$
8. *Update* posisi populasi dengan persamaan:

$$pop.posisi = pop.posisi + pop.velocity \quad (3.2)$$

9. Memeriksa posisi populasi yang baru dengan batasan posisi yang telah ditentukan
10. *Run load flow* dan evaluasi nilai *fitness* dari posisi populasi yang baru
11. Melakukan proses mutasi
12. Menentukan dominasi diantara populasi dan *update Pbest*
13. Menambahkan solusi *non-dominated* yang baru dari populasi ke dalam repositori
14. Memeriksa ukuran repositori, jika repositori melebihi batasan maka harus mengeluarkan member *extra*.
15. Jika jumlah iterasi sudah mencapai iterasi maksimum yang ditentukan, maka HMOPSO berhenti
16. Semua member repositori yang tersisa akan diambil untuk menentukan solusi akhir dengan menggunakan metode *fuzzy linear*.

3.2 Penentuan Fungsi Objektif

Pada sub bab ini akan menjelaskan tentang penentuan fungsi multi objektif untuk penerapan MOPSO pada alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi, karena terdapat dua kasus yang hendak diminimalkan maka adapun fungsi yang digunakan adalah sebagai berikut.

3.2.1 Fungsi Biaya Operasi Sistem

Fungsi objektif yang pertama dari alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi ini adalah:

$$f_{ob1} = \sum_{k=1}^5 p_k \cdot C_k \quad (3.3)$$

Dengan persamaan biaya operasi sistem sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Cost_k &= \sum_{r=1}^m C(P_{Gr}) + C_w + C_s \\ &= \sum_{r=1}^m (a_r + b_r \cdot P_{Gr} + c_r \cdot P_{Gr}^2) + c^{ow} \cdot P_w + c^{os} \cdot P_s \end{aligned} \quad (3.4)$$

p_k : probabilitas biaya operasi sistem pada skenario ke-k

C_k : total biaya operasi sistem pada skenario ke-k

m : total generator

- $C(P_{Gr})$: biaya operasi generator ke-r (\$/h)
 C_w : biaya operasi pembangkit tenaga angin (\$/h)
 C_s : biaya operasi sistem penyimpan energi (\$/h)
 a_r, b_r, c_r : koefisien *fuel cost* generator ke-r
 c^{ow} : biaya operasi pembangkit tenaga angin (\$/MWh)
 P_w : daya keluaran pembangkit tenaga angin (MW)
 c^{os} : biaya operasi sistem penyimpan energi (\$/MWh)
 P_s : kapasitas sistem penyimpan energi yang terpasang (MW)

3.2.2 Fungsi Deviasi Tegangan

Fungsi objektif yang kedua dari alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi ini adalah:

$$f_{ob2} = \sum_{k=1}^5 \sum_{s=1}^h \left(\frac{V_{s_k} - V_{s_k}^{exp}}{\Delta V_{s_k}^{max}} \right)^2 \quad (3.5)$$

- V_{s_k} : tegangan bus s pada skenario ke-k
 $V_{s_k}^{exp}$: tegangan yang diinginkan pada skenario ke-k
 $\Delta V_{s_k}^{max}$: selisih tegangan maksimum pada skenario ke-k
 h : total simpul bus

3.3 Penentuan Batasan (*Constraints*)

3.3.1 Equality Constraints

$$P_i - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (3.6)$$

Pada tugas akhir ini, digunakan metode Newton-Raphson pada aliran daya untuk memenuhi *equality constraints*.

3.3.2 Inequality Constraints

Inequality constraints berkaitan dengan tegangan bus, daya aktif dan daya reaktif generator.

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (3.7)$$

$$P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max} \quad (3.8)$$

$$Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \quad (3.9)$$

V_i : tegangan pada bus i

P_{Gi} : daya aktif yang dibangkitkan generator i

Q_{Gi} : daya reaktif yang dibangkitkan generator i

3.4 Metode Fuzzy Linear

Proses selanjutnya adalah penentuan solusi *non dominated* terbaik didalam *repository* dengan menggunakan metode *fuzzy linear*, setelah dilakukan proses pencarian kumpulan solusi menggunakan metode HMOPSO dan didapatkan kumpulan populasi *nondominated* pada *repository*. Metode *fuzzy linear* digunakan untuk menentukan nilai *membership function* dari masing-masing solusi pada masing-masing hasil fungsi objektif. Nilai *membership function* di simbolkan sebagai α_s^r , dengan formulasi dibawah ini [18]:

$$\alpha_s^r = \begin{cases} 1 & f_s \leq f_s^{\min} \\ \frac{f_s^{\max} - f_s^r}{f_s^{\max} - f_s^{\min}} & f_s^{\min} < f_s < f_s^{\max} \\ 0 & f_s \geq f_s^{\max} \end{cases} \quad (3.10)$$

f_s^{\min} dan f_s^{\max} adalah nilai minimum dan maksimum fungsi objektif ke- i yang digunakan. Nilai *membership function* α_s^r untuk ke- s fungsi objektif dan ke- r *repository* memiliki nilai bervariasi antara 0 sampai 1, dimana jika $\alpha_s^r = 0$ maka solusi tidak kompatibel dan jika $\alpha_s^r = 1$ maka solusi kompatibel. Untuk setiap solusi pareto optimal r yang ada di *repository* dilakukan normalisasi nilai *membership function* α^r dengan perhitungan di bawah ini:

$$\alpha^r = \frac{\sum_{s=1}^{Nobj} \alpha_s^r}{\sum_{r=1}^{NRep} \sum_{s=1}^{Nobj} \alpha_s^r} \quad (3.11)$$

Nilai maksimum α^r menunjukkan solusi terbaik dari hasil metode MOPSO.

3.5 Data Masukan

3.5.1 Data Sistem Kelistrikan

Pada tugas akhir ini digunakan sistem kelistrikan IEEE 30 bus yang telah dimodifikasi. Sistem ini terdiri dari 5 buah generator dan 24 beban, dimana bus 1 merupakan *slack bus*, bus 5, 8, 11, 13 merupakan *generator bus* dan yang lainnya merupakan *load bus*. Pembangkit tenaga angin ditambahkan pada bus 2 dengan *rating* sebesar 113 MW.

Untuk data beban pada setiap bus dari sistem IEEE 30-bus dapat dilihat pada tabel 3.1.

Table 3.1 Data beban sistem IEEE 30-bus

Bus No.	Load	
	P (MW)	Q (MVar)
1	0	0
2	21.7	12.7
3	2.4	1.2
4	7.6	1.6
5	94.2	19
6	0	0
7	22.8	10.9
8	30	30
9	0	0
10	5.8	2
11	0	0
12	11.2	7.5
13	0	0
14	6.2	1.6
15	8.2	2.5
16	3.5	1.8
17	9	5.8
18	3.2	0.9
19	9.5	3.4
20	2.2	0.7
21	17.5	11.2

Table 3.1 Data beban sistem IEEE 30-bus (Lanjutan)

Bus No.	Load	
	P (MW)	Q (MVar)
22	0	0
23	3.2	1.6
24	8.7	6.7
25	0	0
26	3.5	2.3
27	0	0
28	0	0
29	2.4	0.9
30	10.6	1.9

Sedangkan untuk data saluran dari sistem IEEE 30-bus dapat dilihat pada tabel 3.2.

Table 3.2 Data saluran sistem IEEE 30-bus

Line No.	From	To	Series Impedance (pu)		Half Line Charging (pu)	Tap Setting
			R	X		
1	1	2	0.0384	0.1150	0.0528	1
2	1	3	0.0904	0.3304	0.0408	1
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0184	1
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0042	1
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0209	1
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0187	1
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0045	1
8	5	7	0.0460	0.1160	0.0102	1
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0085	1
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0045	1
11	6	9	0.0000	0.2080	0.0000	0.978
12	6	10	0.0000	0.5560	0.0000	0.969
13	9	11	0.0000	0.2080	0.0000	1
14	9	10	0.0000	0.1100	0.0000	1
15	4	12	0.0000	0.2560	0.0000	0.932

Table 3.2 Data saluran sistem IEEE 30-*bus* (Lanjutan)

Line No.	From	To	Series Impedance (pu)		Half Line Charging (pu)	Tap Setting
			R	X		
16	12	13	0.0000	0.1400	0.0000	1
17	12	14	0.1231	0.2559	0.0000	1
18	12	15	0.0662	0.1304	0.0000	1
19	12	16	0.0945	0.1987	0.0000	1
20	14	15	0.2210	0.1997	0.0000	1
21	16	17	0.0524	0.1923	0.0000	1
22	15	18	0.1073	0.2185	0.0000	1
23	18	19	0.0639	0.1292	0.0000	1
24	19	20	0.0340	0.0680	0.0000	1
25	10	20	0.0936	0.2090	0.0000	1
26	10	17	0.0324	0.0845	0.0000	1
27	10	21	0.0348	0.0749	0.0000	1
28	10	22	0.0727	0.1499	0.0000	1
29	21	22	0.0116	0.0236	0.0000	1
30	15	23	0.1000	0.2020	0.0000	1
31	22	24	0.1150	0.1790	0.0000	1
32	23	24	0.1320	0.2700	0.0000	1
33	24	25	0.1885	0.3292	0.0000	1
34	25	26	0.2544	0.3800	0.0000	1
35	25	27	0.1093	0.2087	0.0000	1
36	27	28	0.0000	0.3960	0.0000	0.968
37	27	29	0.2198	0.4153	0.0000	1
38	27	30	0.3202	0.6027	0.0000	1
39	29	30	0.2399	0.4533	0.0000	1
40	6	28	0.0636	0.2000	0.0214	1
41	8	28	0.0169	0.0599	0.0065	1

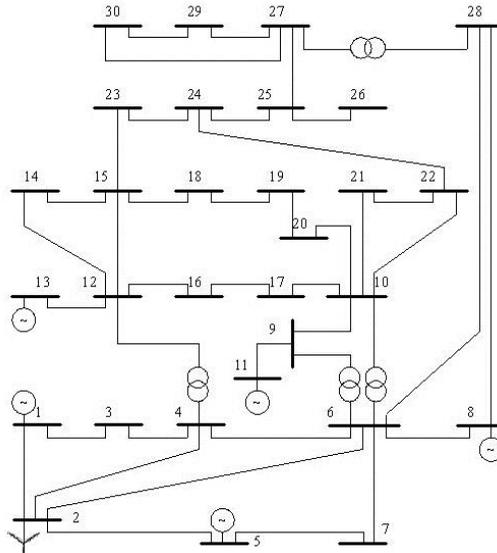
Untuk data generator pada sistem IEEE 30-*bus* dapat dilihat pada tabel 3.3.

Table 3.3 Data generator sistem IEEE 30-bus

Unit	Pmin (MW)	Pmax (MW)	Qmin (MVar)	Qmax (MVar)	a	b	c
1	50	200	-	-	0	20	0.038432
5	15	50	-15	62.5	0	40	0.01
8	10	35	-15	50	0	40	0.01
11	10	30	-10	40	0	40	0.01
13	12	40	-15	45	0	40	0.01

Sistem yang digunakan adalah sistem tiga fasa seimbang, dimana fasa dari R, S dan T mempunyai nilai impedansi dan nilai pembebanan yang sama. Sehingga pada penulisan tugas akhir ini hanya digunakan salah satu fasanya saja. Sistem kelistrikan IEEE 30-bus merupakan *plant* yang akan digunakan sebagai validasi hasil metode MOPSO pada tugas akhir ini.

Sistem IEEE 30-bus yang telah dimodifikasi dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Modified IEEE 30-bus system

3.5.2 Data Distribusi Angin

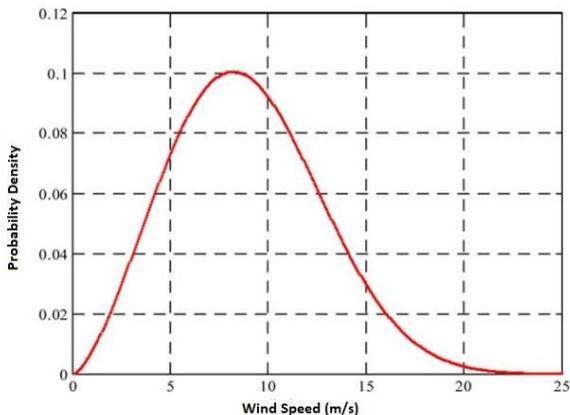
Data dan parameter distribusi angin yang digunakan adalah data kecepatan angin harian di kota Madison, Wisconsin, USA, dalam sepuluh tahun terakhir. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 3.4 dan tabel 3.5. Grafik dari fungsi kepadatan probabilitas dari data kecepatan angin di Kota Madison dapat dilihat pada gambar 3.3.

Table 3.4 Data Distribusi Angin Kota Madison

Vcut-in	Vcut-out	Vrated
3.5	40	13.5

Table 3.5 Parameter Distribusi Angin Kota Madison

k	λ	α	β
2.5034	10.0434	-39.55	11.3



Gambar 3.3 Fungsi Kepadatan Probabilitas dari Data Kecepatan Angin di Kota Madison [5]

Dengan menggunakan parameter distribusi angin pada tabel 3.5, distribusi angin yang kontinu di kota Madison dapat didiskritisasikan menjadi 5 poin diskrit dari distribusi tenaga angin tersebut menggunakan metode 5PEM. 5 poin diskrit tersebut dapat dilihat pada tabel 3.6. 5 poin diskrit tersebut kemudian akan digunakan sebagai 5 skenario pada studi kasus.

Table 3.6 5 Poin Diskrit Distribusi Tenaga Angin Kota Madison

Poin (MW)	0	14.54	55.79	98.12	113
Probabilitas (%)	6.89	20.44	40.48	19.92	12.27

3.5.3 Data Koefisien Biaya Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Angin dan Sistem Penyimpan Energi

Dalam fungsi objektif, perhitungan biaya operasi sistem penyimpanan energi dan pembangkit listrik tenaga angin memerlukan koefisien biaya operasi c^{os} dan c^{ow} . Berdasarkan penelitian yang berjudul “*Energy Policy*” yang diterbitkan oleh *Lawrance Berkeley National Laboratory* [19] dan laporan tahunan dari *US Department of Energy* [20], biaya operasi dan perawatan dari pembangkit tenaga angin disepakati sebesar 30 \$/MWh. Berdasarkan biaya penyimpanan energi dari *Sandia National Laboratory* [21], biaya operasi dan perawatan sistem penyimpanan energi sebesar 40 \$/MWh.

3.6 Software yang Digunakan

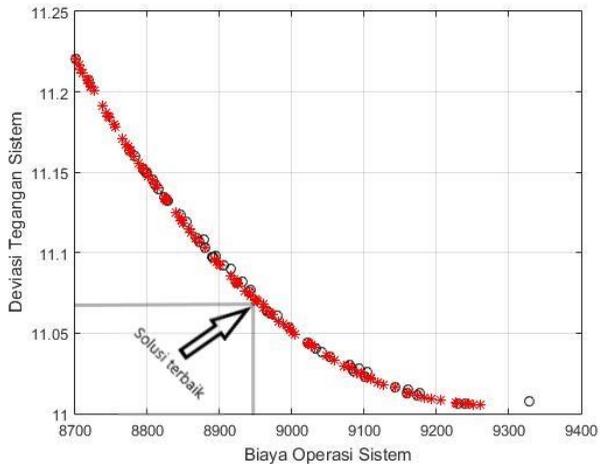
Dalam tugas akhir ini untuk mendapatkan hasil analisa alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi digunakan simulasi menggunakan software Matlab. Software Matlab digunakan untuk mengolah data dan mensimulasikan algoritma HMOPSO untuk menemukan penyelesaian permasalahan alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin pada sistem tenaga listrik. Software Matlab sendiri merupakan suatu program komputer yang bisa membantu memecahkan berbagai masalah matematis yang kerap ditemui dalam bidang teknis. Kita bisa memanfaatkan kemampuan Matlab untuk menemukan solusi dari berbagai masalah numerik secara cepat, mulai dari hal paling dasar hingga yang kompleks, seperti mencari akar-akar polinomial, interpolasi dari sejumlah data, perhitungan dengan matriks, pengolahan data dan metode numerik. Salah satu aspek yang sangat berguna dari Matlab ialah kemampuannya untuk menggambarkan berbagai jenis grafik, sehingga kita bisa memvisualisasikan data dan fungsi yang kompleks.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil HMOPSO

Berikut ini adalah hasil alokasi ekonomis sistem penyimpanan energi dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin menggunakan metode HMOPSO. Diperoleh grafik yang menunjukkan solusi *nondominated* pada gambar 4.1. Setelah diperoleh solusi *nondominated*, maka langkah selanjutnya adalah menggunakan metode *fuzzy linear* untuk mencari nilai maksimal *membership function* untuk menentukan solusi terbaik dari *nondominated* tersebut. Diperoleh alokasi terbaik sistem penyimpan energi pada tabel 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Alokasi Sistem Penyimpan Energi dengan metode HMOPSO

Tabel 4.1 Hasil Alokasi Sistem Penyimpan Energi dengan HMOPSO

Lokasi Sistem Penyimpan Energi (bus)	Ukuran Sistem Penyimpan Energi (MW)	Total Kapasitas Sistem Penyimpan Energi (MW)
26	3.5	11
30	7.5	

4.2 Studi Kasus

Efek atau pengaruh dari integrasi pembangkit tenaga angin dan sistem penyimpanan energi akan dipelajari dan dibandingkan dalam 3 studi kasus yang berbeda, untuk menunjukkan keefektifan metode HMOPSO. Ketiga studi kasus tersebut disimulasikan pada 5 skenario yang telah ditentukan menggunakan 5PEM.

4.2.1 Studi Kasus 1

Pada studi kasus pertama, dilakukan analisis probabilistik pada sistem yang mempertimbangkan distribusi tenaga angin. Namun tidak dilakukan integrasi sistem penyimpanan energi.

Tabel 4.2 Profil tegangan studi kasus 1

Case 1					
Wind Power	0 MW	14.54 MW	55.79 MW	98.12 MW	113 MW
Probability	6.89 %	20.44 %	40.48 %	19.92 %	12.27 %
Bus	Voltage (pu)				
1	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060
2	1.013	1.010	1.010	1.030	1.030
3	1.009	1.004	1.001	1.008	1.008
4	1.003	0.997	0.994	1.001	1.001
5	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010
6	1.004	0.998	0.996	1.000	1.000
7	0.999	0.995	0.994	0.996	0.996
8	1.010	1.000	1.000	1.000	1.000
9	1.036	1.033	1.031	1.034	1.034
10	1.019	1.015	1.013	1.016	1.016
11	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082
12	1.048	1.044	1.044	1.046	1.046
13	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071
14	1.030	1.027	1.026	1.029	1.029
15	1.023	1.020	1.019	1.021	1.021
16	1.028	1.024	1.023	1.025	1.025
17	1.016	1.013	1.011	1.013	1.014
18	1.009	1.006	1.004	1.007	1.007

Tabel 4.2 Profil tegangan studi kasus 1 (Lanjutan)

Case 1					
Wind Power	0 MW	14.54 MW	55.79 MW	98.12 MW	113 MW
Probability	6.89 %	20.44 %	40.48 %	19.92 %	12.27 %
Bus	Voltage (pu)				
19	1.004	1.000	0.999	1.001	1.002
20	1.007	1.003	1.001	1.004	1.004
21	1.006	1.002	1.000	1.003	1.003
22	1.007	1.003	1.000	1.003	1.003
23	1.007	1.003	1.002	1.005	1.005
24	0.994	0.990	0.988	0.992	0.992
25	0.996	0.990	0.990	0.993	0.993
26	0.978	0.972	0.971	0.975	0.975
27	1.006	1.000	0.999	1.003	1.003
28	1.001	0.994	0.992	0.996	0.996
29	0.986	0.979	0.979	0.982	0.983
30	0.974	0.968	0.967	0.971	0.971
Operation cost (\$/h)	9532.5	9386.8	9005.6	8776.9	8750.4
Deviasi tegangan	2.3996	2.3295	2.3109	2.4087	2.4082
Perkiraan biaya operasi	9042.95 \$/h				

Dapat dilihat pada tabel 4.1 bahwa biaya operasi sistem berkurang seiring meningkatnya daya pembangkit tenaga angin. Biaya operasi sistem terus berkurang dari 9532.5 \$/h sampai 8750.4 \$/h seiring dengan meningkatnya daya pembangkit tenaga angin dari 0 sampai 113 MW. Namun deviasi tegangan masih sangat besar. Dapat dilihat ketika daya pembangkit tenaga angin bernilai 55.79, tegangan pada bus 11 dan 13 adalah 1.082 dan 1.071, sedangkan tegangan pada bus 30 sangat rendah, yaitu 0.967.

4.2.2 Studi Kasus 2

Pada studi kasus kedua, diimplementasikan analisis *optimal load flow* untuk menentukan alokasi terbaik sistem penyimpanan energi pada kondisi terburuk, yaitu dengan asumsi daya keluaran pembangkit tenaga angin bernilai nol.

Tabel 4.3 Profil tegangan studi kasus 2

Case 2					
Wind Power	0 MW	14.54 MW	55.79 MW	98.12 MW	113 MW
Probability	6.89 %	20.44 %	40.48 %	19.92 %	12.27 %
Bus	Voltage (pu)				
1	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060
2	1.013	1.010	1.010	1.030	1.030
3	1.010	1.004	1.004	1.011	1.011
4	1.003	0.998	0.997	1.004	1.004
5	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010
6	1.006	0.999	0.998	1.002	1.002
7	1.000	0.995	0.995	0.998	0.998
8	1.010	1.000	1.000	1.000	1.000
9	1.037	1.033	1.033	1.035	1.035
10	1.020	1.015	1.014	1.017	1.017
11	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082
12	1.047	1.045	1.045	1.047	1.047
13	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071
14	1.030	1.027	1.027	1.030	1.030
15	1.024	1.020	1.020	1.023	1.023
16	1.028	1.025	1.024	1.027	1.027
17	1.017	1.013	1.012	1.015	1.015
18	1.010	1.006	1.006	1.008	1.008
19	1.005	1.001	1.000	1.003	1.003
20	1.008	1.003	1.003	1.006	1.006
21	1.007	1.002	1.002	1.005	1.005
22	1.008	1.003	1.002	1.005	1.005
23	1.009	1.005	1.005	1.007	1.007
24	0.998	0.993	0.992	0.995	0.995
25	1.004	0.999	0.999	1.002	1.002

Tabel 4.3 Profil tegangan studi kasus 2 (Lanjutan)

Case 2					
Wind Power	0 MW	14.54 MW	55.79 MW	98.12 MW	113 MW
Probability	6.89 %	20.44 %	40.48 %	19.92 %	12.27 %
Bus	Voltage (pu)	Voltage (pu)	Voltage (pu)	Voltage (pu)	Voltage (pu)
26	0.986	0.981	0.981	0.984	0.984
27	1.017	1.011	1.011	1.014	1.014
28	1.006	0.998	0.998	1.001	1.001
29	1.015	1.009	1.009	1.012	1.013
30	0.996	0.990	0.990	0.993	0.993
Operation cost (\$/h)	9479.1	9315.5	8942.5	8781.0	8774.4
Deviasi tegangan	2.3571	2.1674	2.1588	2.3499	2.3524
Alokasi penyimpanan energi	Bus 4/1.5 MW, Bus 17/1.5, Bus 28/14 MW dan Bus 29/11.5 MW				
Total kapasitas penyimpan energi	28.5 MW				
Perkiraan biaya operasi	9002.92 \$/h				

Telah diperoleh alokasi sistem penyimpan energi terbaik, yaitu *bus* 4, 17, 28 dan 29 dengan kapasitas sistem penyimpan energi pada masing masing *bus* sebesar 1.5, 1.5, 14 dan 11.5 MW. Kemudian sistem dioperasikan pada 5 skenario berbeda. Dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.2. Jika dibandingkan dengan hasil studi kasus 1, biaya operasi sistem berkurang secara signifikan. Deviasi tegangan yang diperoleh juga terlihat lebih baik dibandingkan hasil dari studi kasus 1.

4.2.3 Studi Kasus 3

Pada studi kasus ketiga, dilakukan pendekatan dengan menggunakan metode HMOPSO untuk menentukan alokasi sistem

penyimpan energi pada sistem yang mempertimbangkan distribusi tenaga angin.

Tabel 4.4 Profil tegangan studi kasus 3

Case 3					
Wind Power	0 MW	14.54 MW	55.79 MW	98.12 MW	113 MW
Probability	6.89 %	20.44 %	40.48 %	19.92 %	12.27 %
Bus	Voltage (pu)				
1	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060
2	1.013	1.010	1.010	1.030	1.030
3	1.009	1.004	1.003	1.009	1.009
4	1.003	0.997	0.996	1.003	1.003
5	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010
6	1.005	0.998	0.997	1.001	1.001
7	0.999	0.995	0.994	0.997	0.997
8	1.010	1.000	1.000	1.000	1.000
9	1.037	1.033	1.032	1.035	1.035
10	1.019	1.015	1.013	1.016	1.016
11	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082
12	1.047	1.044	1.044	1.047	1.047
13	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071
14	1.030	1.027	1.026	1.029	1.029
15	1.024	1.020	1.020	1.022	1.022
16	1.028	1.025	1.023	1.026	1.026
17	1.017	1.013	1.011	1.014	1.014
18	1.010	1.006	1.005	1.008	1.008
19	1.005	1.001	0.999	1.002	1.002
20	1.008	1.004	1.002	1.005	1.005
21	1.007	1.003	1.001	1.004	1.004
22	1.008	1.003	1.002	1.005	1.005
23	1.009	1.005	1.004	1.007	1.007
24	0.998	0.993	0.992	0.995	0.995
25	1.005	1.000	0.999	1.003	1.003
26	0.997	0.991	0.991	0.994	0.994
27	1.015	1.009	1.008	1.012	1.012
28	1.004	0.996	0.995	0.998	0.998

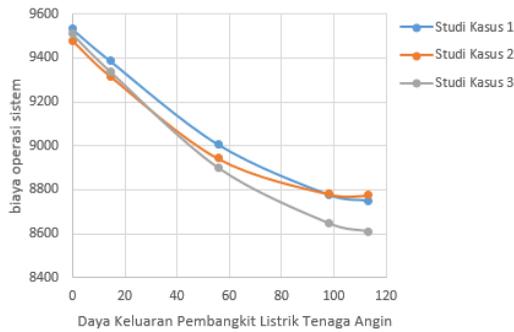
Tabel 4.4 Profil tegangan studi kasus 3 (Lanjutan)

Case 3					
Wind Power	0 MW	14.54 MW	55.79 MW	98.12 MW	113 MW
Probability	6.89 %	20.44 %	40.48 %	19.92 %	12.27 %
Bus	Voltage (pu)	Voltage (pu)	Voltage (pu)	Voltage (pu)	Voltage (pu)
29	1.002	0.996	0.996	0.999	0.999
30	0.998	0.992	0.992	0.995	0.995
Operation cost (\$/h)	9509.3	9338.3	8899.9	8646.5	8609.8
Deviasi tegangan	2.3008	2.1195	2.0856	2.2779	2.2779
Alokasi penyimpan energi	Bus 26/3.5 MW dan Bus 30/7.5 MW				
Total kapasitas penyimpan energi	11 MW				
Perkiraan biaya operasi	8945.42 \$/h				

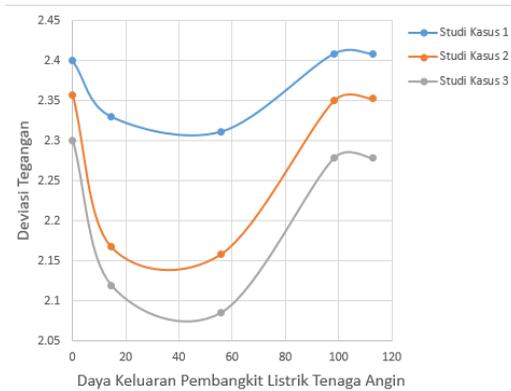
Dapat dilihat dari hasil studi kasus 3 bahwa biaya operasi sistem jauh lebih murah dibandingkan biaya operasi sistem pada studi kasus 2. Deviasi tegangan yang diperoleh juga lebih baik dibandingkan hasil studi kasus 2. Hal ini dikarenakan, pada studi kasus 2 alokasi sistem penyimpan energi dilakukan pada kondisi terburuk, yaitu daya keluaran pembangkit tenaga angin dianggap bernilai nol. Hasil ini menunjukkan bahwa untuk mengalokasikan sistem penyimpan energi distribusi tenaga angin harus dipertimbangkan, sehingga diperlukan metode HMOPSO. Dengan hasil yang diperoleh jika sistem dioperasikan selama satu tahun, maka biaya operasi akan lebih hemat sebesar 496800 \$/tahun. Dengan total kapasitas sistem penyimpan energi yang lebih kecil dari total kapasitas sistem penyimpan energi pada studi kasus 2, dapat disimpulkan juga biaya pemasangan sistem penyimpan energi pada studi kasus 1 lebih murah dibandingkan biaya pemasangan sistem penyimpan energi pada studi kasus 2.

4.3 Perbandingan Hasil

Perbandingan biaya operasi sistem dari ketiga studi kasus tersebut dapat dilihat pada gambar 4.2. Sedangkan perbandingan deviasi tegangan dari ketiga studi kasus tersebut dapat dilihat pada gambar 4.3. Diantara studi kasus 1, studi kasus 2 dan studi kasus 3, hasil yang diperoleh dari studi kasus 3 adalah yang terbaik. Dengan biaya operasi sistem yang paling murah. Dan deviasi tegangan yang paling rendah. Hal tersebut sesuai dengan dasar teori, yaitu dikarenakan pada studi kasus 3 dilakukan integrasi sistem penyimpanan energi dengan mempertimbangkan seluruh distribusi tenaga angin.



Gambar 4.2 Perbandingan biaya operasi sistem dari ketiga studi kasus



Gambar 4.3 Perbandingan deviasi tegangan dari ketiga studi kasus

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dengan meningkatnya penggunaan pembangkit listrik tenaga angin, maka dalam menentukan lokasi dan ukuran sistem penyimpanan energi sangat penting untuk mempertimbangkan ketidak-pastian tenaga angin. Metode 5PEM digunakan untuk mendiskritisasi distribusi tenaga angin yang kontinyu menjadi 5 poin diskrit distribusi tenaga angin yang kemudian dijadikan 5 skenario untuk diperhitungkan dalam alokasi sistem penyimpanan energi. Dengan mempertimbangkan distribusi tenaga angin, metode HMOPSO dapat menentukan lokasi dan ukuran sistem penyimpanan energi dengan hasil biaya operasi sistem yang lebih murah dan deviasi tegangan sistem yang lebih baik.

5.2 Saran

Berikut saran yang diberikan untuk perbaikan dan pengembangan topik pada tugas akhir ini :

- Menambahkan pertimbangan teknis lain selain tegangan dan biaya operasi sistem dalam menentukan lokasi dan kapasitas sistem penyimpanan energi, seperti hubung singkat, koordinasi proteksi, harmonisa, dan lain-lain.
- Biaya pemasangan penyimpanan energi diperhitungkan dalam alokasi optimal penyimpanan energi.
- Parameter yang digunakan dalam fungsi objektif bisa ditambahkan kerugian daya reaktif.

Halaman ini sengaja dikosongkan

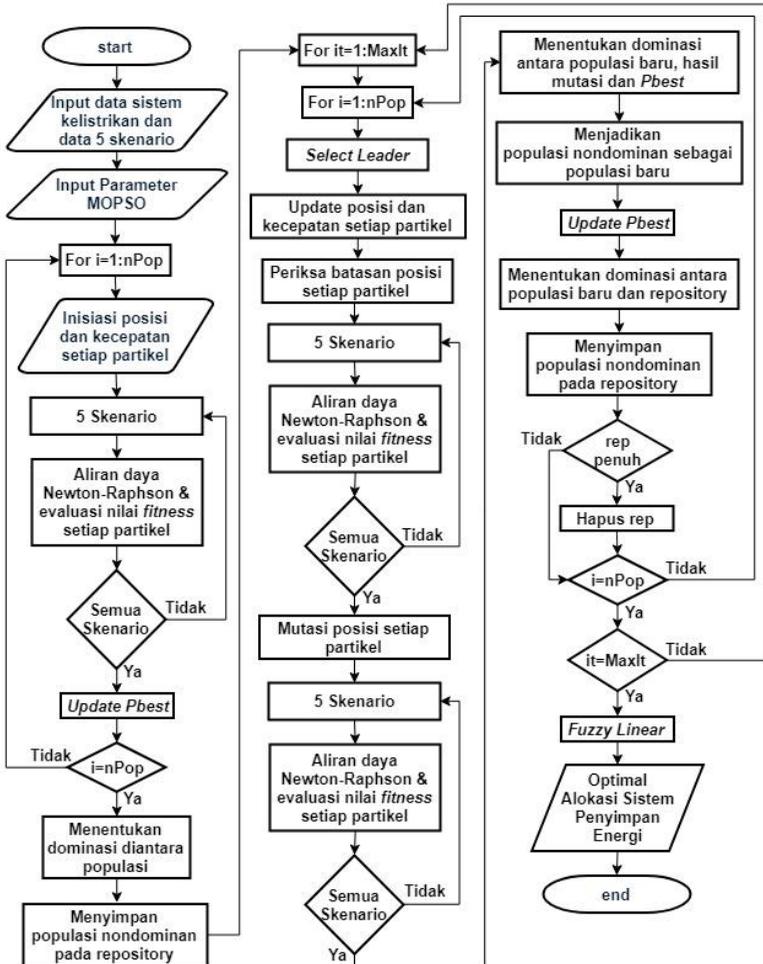
DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, “Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, 2004.
- [2] S. Sims, “AWEA U . S . Wind Industry Annual Market Report Andy Swapp,” 2010.
- [3] T. H. Yeh and L. Wang, “A study on generator capacity for wind turbines under various tower heights and rated wind speeds using Weibull distribution,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 592–602, 2008.
- [4] Q. Fu *et al.*, “Microgrid generation capacity design with renewables and energy storage addressing power quality and surety,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2019–2027, 2012.
- [5] S. Wen, H. Lan, Q. Fu, C. Y. David, and L. Zhang, “Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 644–652, 2015.
- [6] M. Fasich, “Pengaruh Proyek Kelistrikan 10.000 MW pada Biaya Listrik Lokal di Sistem Jawa Bali 500 KV,” vol. 2, no. 1, pp. 7–12, 2013.
- [7] T. Gonen, *Electric Power Transmission System Engineering*. 2011.
- [8] A. F. Nelwan, “Karakteristik Weibull PLTB Miangas,” no. c, pp. 4–7, 2010.
- [9] C. Su, “Probabilistic Load-Flow Computation,” vol. 20, no. 4, pp. 1843–1851, 2005.
- [10] R. Eberhart and J. Kennedy, “A new optimizer using particle swarm theory,” *MHS'95. Proc. Sixth Int. Symp. Micro Mach. Hum. Sci.*, pp. 39–43.
- [11] J. J. Grainger and W. Stevenson, *Power System Analysis*. 1994.
- [12] G. Andersson, “Power System Analysis: Power Flow Analysis, Fault Analysis, Power System Dynamics and Stability,” no. September, p. 185, 2012.
- [13] L. Powell, *Power system load flow analysis*. 2005.

- [14] M. Venkatasubramanian and K. Tomsovic, “Power System Analysis,” *The Electrical Engineering Handbook*. pp. 761–778, 2005.
- [15] C. A. C. Coello, G. T. Pulido, and M. S. Lechuga, “Handling multiple objectives with particle swarm optimization,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 8, no. 3, pp. 256–279, 2004.
- [16] A. Zeinalzadeh, Y. Mohammadi, and M. H. Moradi, “Optimal multi objective placement and sizing of multiple DGs and shunt capacitor banks simultaneously considering load uncertainty via MOPSO approach,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 67, pp. 336–349, 2015.
- [17] C. A. C. Coello, G. T. Pulido, and M. S. Lechuga, “Particle Swarm Optimization,” vol. 8, no. 3, pp. 256–279, 2004.
- [18] K. Mahesh, P. Nallagownden, and I. Elamvazuthi, “Advanced Pareto front non-dominated sorting multi-objective particle swarm optimization for optimal placement and sizing of distributed generation,” *Energies*, vol. 9, no. 12, p. 982, 2016.
- [19] M. B. Å and R. Wiser, “Wind power price trends in the United States : Struggling to remain competitive in the face of strong growth \$,” vol. 37, pp. 1061–1071, 2009.
- [20] R. Wiser and M. Bolinger, “Annual Report on U . S . Wind Power Installation , Cost , and Performance Trends : 2007 Contents.”
- [21] J. Eyer, “Energy Storage for the Electricity Grid : Benefits and Market Potential Assessment Guide A Study for the DOE Energy Storage Systems Program,” no. February, 2010.
- [22] A. D. Rahmatullah, “Pendekatan dengan Cuckoo Optimization Algorithm Untuk Solusi Permasalahan Approaching With The Cuckoo Optimization Algorithm For Solution Economic Emission,” 2017.

LAMPIRAN

1. Flowchart detail metode HMOPSO



2. Datasheet turbin VESTAS V82

Datasheet

Power

Rated power:	1,650.0 kW
Cut-in wind speed:	3.5 m/s
Rated wind speed:	13,5 m/s
Cut-out wind speed:	40 m/s
Survival wind speed:	-
Wind zone (DIBT):	-
Wind class (IEC):	-

Rotor

Diameter:	82.0 m
Swept area:	5,281.0 m ²
Number of blades:	-
Rotor speed, max:	10.8 U/min
Tipspeed:	-
Type:	activstall
Material:	-
Manufacturer:	-
Power density 1:	312.4 W/m ²
Power density 2:	3.2 m ² /kW

Gear box

Type:	planetary/helical
Stages:	3.0
Ratio:	1:70
Manufacturer:	-

Generator

Type:	watercooled
Number:	-
Speed, max:	-
Voltage:	690.0 V
Grid connection:	2 speed
Grid frequency:	-
Hersteller:	-

Tower

Hub height:	59-108 m
Type:	Steel
Shape:	-
Corrosion protection:	-
Manufacturer:	-

Weight

Single blade:	-
Hub:	-
Rotor:	40.0 t
Nacelle:	51.0 t
Tower, max:	322.0 t
Total weight:	-

Miscellaneous

Installation:	-
Offshore:	No
Onshore:	Yes

3. Hasil running program HMOPSO

```
Command Window
Iteration 194: Number of Rep Members = 100
Iteration 195: Number of Rep Members = 100
Iteration 196: Number of Rep Members = 100
Iteration 197: Number of Rep Members = 100
Iteration 198: Number of Rep Members = 100
Iteration 199: Number of Rep Members = 100
Iteration 200: Number of Rep Members = 100

      Biaya      = 8945.191842 $/h
Total Deviasi Tegangan = 11.050867
      Total ESS      = 11.066853
      Kapasitas ESS  = 0.000000
      Kapasitas ESS  = 0.000340
      Kapasitas ESS  = 0.000171
      Kapasitas ESS  = 0.000013
      Kapasitas ESS  = 0.000000
      Kapasitas ESS  = 0.000000
      Kapasitas ESS  = 0.000095
      Kapasitas ESS  = 0.000000
      Kapasitas ESS  = 0.000000
      Kapasitas ESS  = 0.000000
      Kapasitas ESS  = 0.000016
      Kapasitas ESS  = 0.000000
      Kapasitas ESS  = 0.000000
      Kapasitas ESS  = 0.000231
      Kapasitas ESS  = 0.000000
      Kapasitas ESS  = 0.009485
      Kapasitas ESS  = 0.000000
      Kapasitas ESS  = 0.000001
      Kapasitas ESS  = 0.000622
      Kapasitas ESS  = 3.536754
      Kapasitas ESS  = 0.002713
      Kapasitas ESS  = 0.000001
      Kapasitas ESS  = 0.005800
      Kapasitas ESS  = 7.510611
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Vicky Pria Permata lahir di Wamena pada tanggal 11 September 1995. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 1 Mangkujayan Ponorogo pada tahun 2002-2008. Setelah itu melanjutkan ke sekolah menengah pertama di SMPN 1 Ponorogo pada tahun 2008-2011 dan melanjutkan ke jenjang sekolah menengah atas di SMAN 1 Ponorogo pada tahun 2011-2014. Pada tahun 2014, penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Departemen Teknik Elektro. Bidang keahlian yang diambil penulis yaitu teknik sistem tenaga. Penulis dapat dihubungi

melalui email vickypriapermata@gmail.com.