

Perencanaan Operasi Mikrogrid Dengan Baterai Mempertimbangkan Ketahanan Sistem

Jason Kumala Soendojo, Rony Seto Wibowo, Ni Ketut Aryani

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi
Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: jason.17071@mhs.its.ac.id

Abstrak— Majunya perkembangan jaman diiringi juga oleh perkembangan teknologi yang menyebabkan kebutuhan akan kelistrikan juga meningkat dibanding tahun-tahun sebelumnya. Tentunya tingkat dari efisiensi dan kehandalan dari sistem kelistrikan menjadi suatu perhatian yang lebih dikarenakan listrik menjadi salah satu kebutuhan primer di saat ini sehingga ketersediaan akan listrik menjadi sesuatu yang sangat krusial. Namun tidak dapat dihindarkan bahwa terkadang adanya hal eksternal yang tidak terduga menyebabkan timbulnya permasalahan sistem yang berakibat dari pemutusan saluran dari sistem. Hal ini tentunya sangat berbahaya terhadap kelangsungan dari operasi sistem serta suplai daya listrik yang ideal yaitu sistem yang efisien dan handal. Mekanisme penyimpanan energi diharapkan dapat menyerap daya yang berlebih akibat pemutusan saluran, agar saluran lain tidak mengalami kelebihan daya dan dapat melakukan pelepasan energi dalam waktu tertentu secara terjadwal sehingga dapat mendukung keberlangsungan sistem. Dengan adanya sistem mikrogrid yang tersambung dengan sistem, maka perlu dilakukan optimasi untuk melihat kestabilan sistem dan pemenuhan daya. Dalam tugas akhir ini, diusulkan perencanaan operasi mikrogrid dengan baterai mempertimbangkan ketahanan sistem sehingga perlu dilakukan kalkulasi aliran daya optimal(SCOPF) yang mempertimbangkan *Line Outage Distribution Factor* (LODF) serta adanya interupsi baterai(BESS) sebagai mekanisme penyerapan dan pelepasan energi akibat dari pemutusan saluran yang akan diselesaikan menggunakan *Quadratic Programming* pada program MATLAB

Kata Kunci— Mikrogrid, SCOPF, LODF, BESS, *Quadratic Programming*.

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan waktu dan teknologi, tingkat kebutuhan listrik sebagai kebutuhan setiap harinya juga akan meningkat, maka penyedia listrik dalam hal ini adalah Perusahaan Listrik Negara(PLN) harus mampu memproduksi dan menyalurkan listrik tersebut menuju konsumen yang membutuhkan. Selain itu perkembangan populasi manusia yang memiliki kebutuhan atau pekerjaan yang berbeda setiap waktunya juga menyebabkan fluktuasi dari kebutuhan listrik akan semakin tidak pasti[1]. Diharapkan hal ini juga berjalan searah dengan tingkat efisiensi dan kehandalan sistem yang semakin besar dan semakin maju namun, karena kebutuhan sistem selalu terjadi fluktuasi maka muncul perbedaan antara daya yang disuplai dan yang dibutuhkan sehingga dalam waktu tertentu

pembangkit menyuplai daya yang berlebih saat beban belum mencapai puncaknya ataupun suplai daya yang diproduksi kurang mencukupi saat pemenuhan beban puncak yang menyebabkan pelepasan beban atau pemadaman listrik[2]. Ada beberapa alternatif yang digunakan untuk mengurangi permasalahan sebelumnya, seperti penggunaan *distributed generation* yang terdiri dari pembangkit berbasis energi baru dan terbarukan berupa mikrogrid maupun menggunakan teknologi penyimpan energi seperti baterai tetapi hal ini tidak dapat menjamin akan kestabilan sistem akibat dari fluktuasi listrik tersebut[3].

Salah satu metode yang digunakan untuk memenuhi tujuan tersebut adalah analisa aliran daya optimal yang memenuhi batasan keamanan tertentu(SCOPF) dimana beberapa aspek seperti nilai tegangan sistem, aliran daya aktif maupun reaktif. Selain itu SCOPF digunakan untuk meminimalkan biaya pembangkitan serta menyeimbangkan aliran daya dalam waktu yang sama[4]. Batasan-batasan keamanan yang dipertimbangkan yaitu pertahanan sistem apabila terjadinya gangguan sistem seperti pemutusan saluran besar yang menyebabkan operasi dari sistem cadangan tidak dapat bekerja dengan baik. Pemutusan saluran ini menyebabkan saluran lainnya mengalami kelebihan daya atau *overloading* yang pada umumnya melebihi kapasitas dari kemampuan peralatan penyaluran listrik sehingga terjadi pemadaman listrik. Adapun penempatan *Distributed Generation* (DG) dalam hal ini sebagai sistem penyimpanan dan pelepasan energi seperti baterai yang diletakkan pada sistem juga dapat mempengaruhi dalam proses aliran daya sistem tersebut dengan harapan baterai akan dapat menyimpan kelebihan daya akibat dari pemutusan saluran agar saluran lain yang sedang beroperasi tidak mengalami kelebihan daya(*Overload*) yang menyebabkan sistem menjadi tidak stabil

Maka dari itu, pada tugas akhir ini akan diusulkan Perencanaan Operasi Mikrogrid dengan Baterai Mempertimbangkan Ketahanan(*Resilience*) Sistem dengan *Line Outage Distribution Factor*(LODF) dan Intervensi dari baterai sebagai batasan keamanan pada perhitungan aliran daya optimal ini dimana LODF merupakan kondisi yang muncul akibat terjadinya pelepasan saluran.pada sistem sehingga timbul karakteristik pada saluran sistem. Pada tugas akhir ini diusulkan untuk analisa sistem pada IEEE 30 bus dengan mempertimbangkan LODF yang akan dikombinasikan dengan sistem mikrogrid dan penyimpanan berupa baterai. Diharapkan penempatan baterai pada sistem ini dapat memberikan fungsi sebagai media untuk penyimpanan energi listrik yang berlebih pada sistem

sehingga dapat digunakan untuk cadangan dari keseluruhan sistem.

II. OPTIMAL POWER FLOW

A. Line Outage Distribution Factor

Saat terjadi pemutusan saluran, akan terjadi perubahan terhadap keseimbangan daya (*power balance*) dimana daya yang berlebih akan mengalir menuju saluran lain yang masih beroperasi. Setiap jumlah aliran daya setiap saluran akan berbeda membentuk karakteristik tertentu. Hal ini yang disebut dengan *Line Outage Distribution Factor* (LODF) yang umumnya digunakan untuk memperkirakan pergerakan aliran daya pada saluran yang nantinya akan diamati saat ada saluran yang terputus. LODF memiliki persamaan matematis umum sebagai berikut:

$$LODF_{i,k} = \frac{\Delta P_i^k}{P_k^0} \quad (2.1)$$

$$P_i^k = P_i^0 + LODF_{i,k} * P_k^0 \quad (2.2)$$

Dengan,

ΔP_i^k = Perubahan aliran daya pada saluran i akibat putusnya k

P_k^0 = Aliran daya mula mula pada saluran k

P_i^k = Aliran daya pada saluran i saat terjadi kontingensi di saluran k

P_i^0 = Aliran daya mula mula pada saluran i

k = Indeks saluran yang lepas

i = Indeks saluran yang di monitor

Pertimbangan LODF ini tentunya akan mempengaruhi jalannya aliran daya pada sistem karena setiap kali adanya pemutusan saluran, keseimbangan sistem akan berubah yang menyebabkan sistem menjadi tidak stabil. Respon sistem berkaitan terhadap karakteristik dari gangguan ini perlu dianalisa sehingga pada kalkulasi mengenai ketahanan sistem akan memiliki hasil yang lebih baik dan memungkinkan untuk mencegah ataupun mengurangi gangguan keamanan yang berkelanjutan pada sistem tersebut.

B. DC Power Flow

Selain *AC Power Flow*, ada metode kalkulasi aliran daya lain, yaitu metode aliran daya arus searah. Dikarenakan hanya arus searah, maka perubahan tegangan dan daya reaktif (*Q-V*) dapat diabaikan dan $|E_1| = 1.00$ p.u. maka akan menghasilkan persamaan yang lebih sederhana dari persamaan *AC Power Flow Fast Decoupled* dan berbentuk linier dan *noninteractive*. Persamaan umum *DC Power Flow* adalah sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Perhitungan aliran daya DC hanya menghitung daya MW yang melalui saluran dari sistem tanpa adanya asumsi perubahan dari besar tegangan, MVAR, dan MVA. DC Power Flow sendiri sangat umum digunakan apabila dibandingkan

dengan AC Power Flow, karena hasil akhir dari perhitungan AC Power Flow rawan tidak konvergen yang menyebabkan kalkulasi akan bermasalah atau *error*.

C. Security Constrained Optimal Power Flow

Aliran daya optimal memiliki beberapa fungsi, mulai dari kalkulasi penjadwalan pembangkit (*Economic Dispatch*) yang digabungkan dengan aliran daya yang beroperasi pada suatu sistem. Parameter utama yang dipertimbangkan saat melakukan kalkulasi adalah ukuran atau kapasitas dari pembangkit serta kebutuhan beban pada waktu tertentu. Seiring dengan berjalannya proses kalkulasi, OPF akan melakukan penyederhanaan atau meminimalkan fungsi biaya yang menjadi salah satu fungsi tujuan dari perhitungan aliran daya optimal. Keuntungan dari penggunaan aliran daya optimal yaitu dapat diberikannya fungsi pembatas atau batasan keamanan yang menandai keadaan aktual yang akan dipertimbangkan sehingga muncul pemodelan matematis baru untuk menggambarkan sistem tersebut. Maka dari itu, fungsi aliran daya optimal ini disebut *Security Constrained Optimal Power Flow* (SCOPF) [4].

Fungsi objektif yang digunakan pada Optimal Power Flow menggunakan penyederhanaan atau meminimalkan biaya dari operasi maupun pembangkitan dengan rumus umum sebagai berikut,

$$\min \sum(f(p)) = \sum_{i=1}^{gen} a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_{Gi} \quad (2.4)$$

dengan batasan – batasan sebagai berikut,

1) Batasan Persamaan / *Equality Constraint*

Pada perhitungan *DC Power Flow*, batasan yang digunakan adalah,

Active Power Balance:

$$P_{Gi} - P_{load-i} - P_{sal-i} = 0 \quad (2.5)$$

$$P_{sal-i} = \sum_{x_{ij}} \frac{1}{x_{ij}} (\theta_i - \theta_j) \quad (2.6)$$

2) Batasan Pertidaksamaan / *Inequality Constraint*

Selain batasan persamaan, adapun batasan pertidaksamaan yang mendukung perhitungan OPF ini. Secara umum batasan pertidaksamaan disesuaikan dengan kebutuhan batasan yang diperlukan sehingga syarat yang diperlukan akan berbeda pada setiap permasalahan. Namun, ada batasan umum yang sering digunakan yaitu,

- Kapasitas Saluran

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij-max} \quad (2.7)$$

$$P_{ij}^t \leq P_{ij-max} \quad (2.8)$$

$$-P_{ij}^t \leq P_{ij-max} \quad (2.9)$$

- Daya Pembangkitan

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (2.10)$$

- *Ramp Rate* Pembangkit

$$|P_{Gi}^t - P_{Gi}^{t-1}| \leq Ramp\ Rate_{max} \quad (2.11)$$

D. Battery Energy Storage System

BESS atau *Battery Energy Storage System* merupakan salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan kehandalan pada sistem. Penggunaan BESS ini sebagai mekanisme penyimpanan daya yang berlebih dari sistem agar dapat dipakai apabila timbul masalah pada sistem sebagai cadangan agar dapat menyuplai daya menuju sistem apabila dibutuhkan. Merujuk pada [6] terlihat bahwa kecepatan akan respons *Charging* dan *Discharging* BESS sangat menguntungkan dibandingkan pembangkit biasa yang umumnya dibatasi kemampuannya akibat dari *ramping rate* atau inersia yang besar saat operasinya[6]. Dalam penggunaan BESS tentunya perlu ada penjadwalan yang sesuai terhadap kebutuhan *Charging* dan *Discharging* sistem ini sehingga perlu dioptimasi yang umumnya menggunakan perhitungan aliran daya optimal dan *economic dispatch* agar semuanya sesuai dengan batas keamanan yang dibutuhkan. Selain itu sistem penyimpanan energi ini tentunya memiliki batas kapasitas yang diijinkan untuk menyimpan daya tersebut. Adapun pemodelan sistem BESS sebagai berikut[3]:

$$-P_{ES,ch,max} \leq P_{ES}^t \leq P_{ES,ds,max} \quad (2.12)$$

$$SOC_{min} \leq SOC^t \leq SOC_{max} \quad (2.13)$$

$$SOC^t = E_0 + \sum_{t=0}^T (P_{ES}^t * h) \quad (2.14)$$

$$t = 1, 2, \dots, T \quad (2.15)$$

Dengan,

h = periode waktu

SOC^t = State of Charge dari Baterai

P_{ES}^t = Daya Charge/Discharge Baterai

E. Turbin Angin

Pembangkit Listrik berjenis ini sangat bergantung pada kecepatan angin, kemudian energi mekanik yang dihasilkan akan dikonversikan menjadi energi listrik. Frekuensi pada turbin angin cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan frekuensi operasi sehingga perlu digunakan konverter untuk mengubah frekuensi dari turbin angin menjadi frekuensi operasi yaitu 50/60 Hz. Biaya Operasi dari turbin angin dapat dimodelkan sebagai berikut[3]:

$$CF_{PMT} = a + bPMT + cPMT^2$$

Dengan,

CF = Biaya Operasi (\$/h)

a, b, c = Koefisien dari Turbin Angin

PMT = Daya luaran dari Turbin Angin

F. Panel Surya

Secara umum, mekanisme dari sistem ini yaitu mengubah sinar atau cahaya matahari yang memiliki energi panas menuju energi listrik. Panel surya dibuat dalam bentuk suatu modul yang terdiri dari beberapa sel surya berbahan silikon dan dibantu oleh inverter untuk mengubah tegangan DC yang dihasilkan sel surya menjadi tegangan AC agar dapat digunakan pada komponen beban. Setiap panel surya memiliki karakteristik yang berbeda sesuai dengan daerah, bahan, dan variabel lain yang mempengaruhi lingkungan tempat berdirinya panel tersebut. Adapun kondisi standar yang sering digunakan

yaitu radiasi 1000 W/m^2 dan suhu 25°C . Dalam kondisi standar ini, fungsi biaya dari panel dapat dimodelkan menjadi[3]:

$$P_{PV} = M(P_{stc} G_{ING} G_{STC} + 1 + kT_c - T_r)$$

dengan,

P_{PV} = Daya Luaran dari Panel Surya

P_{STC} = Daya maksimum saat kondisi standar(STC) (W)

G_{ING} = Radiasi sesungguhnya (W/m^2)

G_{STC} = Radiasi standar(STC) (1000 W/m^2)

M = Jumlah modul

k = Koefisien Suhu ($\%/^\circ\text{C}$)

T_c = Temperatur lingkungan ($^\circ\text{C}$)

T_r = Temperatur standar (25°C)

Fungsi Biaya Panel Surya :

$$CF(P_{PV}) = bP_{PV}$$

dengan,

CF = Biaya Operasi dari sistem Panel Surya (\$/h)

b = Koefisien dari Panel Surya

P_{PV} = Daya dari PV (kW)

III. PERENCANAAN OPERASI

A. Quadratic Programming

Pada aplikasi Matlab terdapat *toolbox* yang dapat digunakan sebagai optimasi yaitu *Quadratic Programming*. *Quadratic Programming* digunakan untuk mencari solusi dari permasalahan dengan bentuk fungsi kuadrat yang teradang dikombinasikan dengan *toolbox* lain yaitu *matpower* yang umumnya sudah memiliki sebuah set data dan program kalkulasi yang mendukung. *Quadratic Programming* sendiri memiliki batasan – batasan yang digunakan untuk melakukan proses optimasi dari sistem.

Objective Function

Untuk menyelesaikan perhitungan optimasi, *Quadratic Programming* menggunakan fungsi objektif dalam permasalahan $F(X)$ dengan bentuk persamaan kuadrat yang dapat dituliskan dalam formula sebagai berikut,

$$F(X) = \frac{1}{2} X^T H X + f^T X \quad (3.1)$$

Dengan argumen masukan sebagai berikut,

- H : matriks $n \times n$ yang berisi koefisien kuadrat dari permasalahan fungsi objektif.
- f : matriks vektor berbentuk linier dari permasalahan fungsi objektif
- X : berfungsi sebagai variabel yang akan dikontrol atau dicari dalam proses optimasi sistem.

Pada sistem ini variabel yang dikontrol adalah sudut tegangan dan jumlah daya pembangkitan masing – masing generator, sehingga bentuk dari matriks X akan disesuaikan dengan jumlah bus dan generator ($1, n\text{-bus} + n\text{-gen}$).

$$X = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \\ P_1 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Batasan Persamaan

Batasan persamaan yang digunakan untuk melakukan perhitungan optimasi sebagai berikut,

$$A_{eq}X = B_{eq} \quad (3.3)$$

Dengan keterangan,

A_{eq} = Matriks Persamaan

B_{eq} = Nilai dari Batasan Persamaan

Batasan Pertidaksamaan

Batasan persamaan yang digunakan untuk melakukan perhitungan optimasi sebagai berikut,

$$AX \leq B \quad (3.4)$$

Dengan keterangan,

A = Matriks Pertidaksamaan

B = Nilai dari Batasan Pertidaksamaan

$$lb \leq X \leq ub \quad (3.5)$$

Dengan keterangan,

ub = Batas atas dari variabel kontrol

lb = Batas bawah dari variabel kontrol

Maka dari itu, pembentukan matriks dapat dibentuk sebagai berikut,

H_t							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
H_{t+1}	0	0	0	0	0	0						
	0	0	0	0	0	0						
	0	0	0	0	0	0						
	0	0	0	0	0	0						
	0	0	0	0	0	0						
	0	0	0	0	0	0						

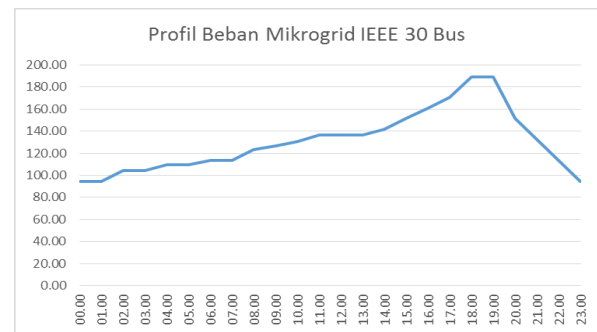
Gambar 1. Matriks H Multilevel Beban

Tabel I. Data Modifikasi Generator IEEE 30 Bus

No	Pembangkit	P Maks (kW)	P Min (kW)	Ramp Rate (kW/jam)
1	PLTD 1	250	30	100
2	PLTD 2	200	20	100
3	PLTMH 1	50	10	30
4	PLTMH 2	55	15	30
5	PLTB	30	0	30
6	PLTS	20	0	20

Tabel II. Spesifikasi Energy Storage pada IEEE 30 Bus

Spek	Jumlah
Bus	4
Kapasitas	30 kWh
SOC Awal (%)	50
SOC Min (%)	20
SOC Maks (%)	100
P Charge Maks (kW)	-6
P Discharge Maks (kW)	6



Gambar 4. Profil Beban Harian

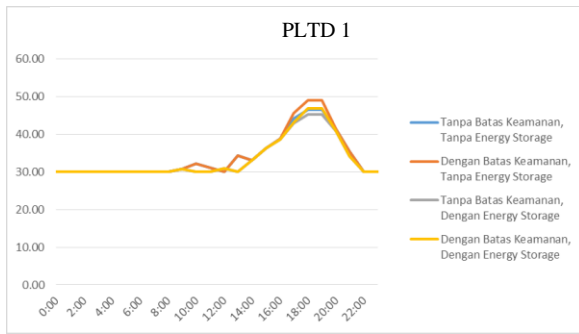
Sistem IEEE 30 Bus dimodifikasi menjadi sistem mikrogrid yang menggunakan kombinasi pembangkit thermal dengan pembangkit energi terbarukan serta *energy storage* dalam operasinya. Digunakan 3 kasus untuk validasi yaitu:

- 1) DCSCOPF tanpa LODF
- 2) DCSCOPF tanpa LODF dengan kontingensi saluran 36
- 3) DCSCOPF dengan LODF tanpa Energy Storage dan kontingensi saluran 36
- 4) DCSCOPF dengan LODF dan Energy Storage dan kontingensi saluran 36

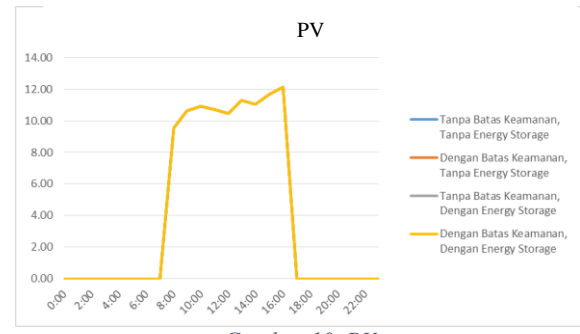
IV. ANALISIS HASIL

1) DCSCOPF tanpa LODF

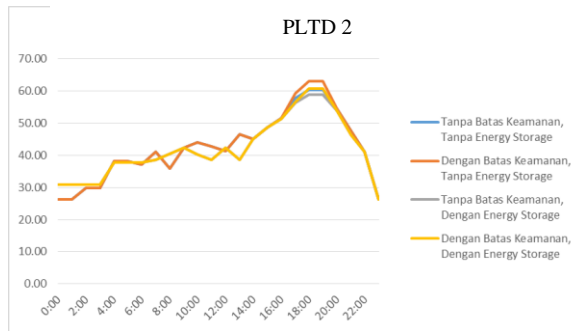
Dari Gambar 4 hingga Gambar 10, diperlihatkan operasi sistem selama 24 jam dengan 4 pembangkit thermal dan 2 pembangkit berbasis energi terbarukan. Terdapat 2 kasus yaitu operasi dengan *energy storage* dan tanpa menggunakan *energy storage*. Jika dilihat berdasarkan gambar maka pembangkit thermal akan berjalan normal namun, terdapat perbedaan ketika menggunakan *energy storage*. Perbedaan tersebut terjadi akibat dari adanya pertimbangan *charging* maupun *discharging* dari *energy storage* saat melakukan operasi pada sistem. Karena penelitian ini tidak mempertimbangkan adanya biaya operasi pada *energy storage* maka dari itu kondisi optimal untuk melakukan *discharge* daya tersimpan yaitu saat beban puncak atau kondisi dimana pembangkit, terutama pembangkit thermal perlu meningkatkan daya yang diproduksi untuk memenuhi beban tersebut tanpa adanya bantuan PV yang tentunya tidak aktif diluar jam 08.00 – 16.00 pada simulasi ini. Akibat dari penggunaan *energy storage*, biaya operasi dari sistem lebih rendah yaitu \$7451 dibanding \$7454



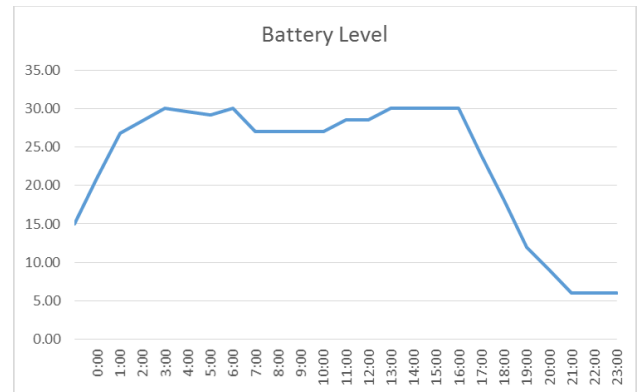
Gambar 5. Pembangkitan PLTD 1



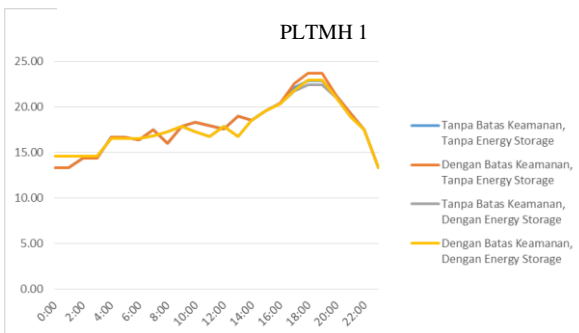
Gambar 10. PV



Gambar 6. Pembangkitan PLTD 2



Gambar 11. Kondisi Energy Storage



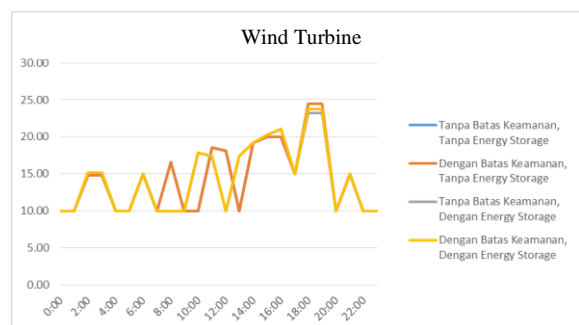
Gambar 7. Pembangkitan PLTMH 1



Gambar 12. Biaya Operasi Setiap Kasus



Gambar 8. Pembangkitan PLTMH 2



Gambar 9. Pembangkitan Wind Turbine

2) DCSCOPF tanpa LODF dengan kontingensi saluran 36

Pada simulasi DCSCOPF tanpa LODF dengan memberlakukan *screening* pada seluruh saluran, saluran 16 dan 34 tidak dapat dilakukan kontingensi karena akan menyebabkan sistem menjadi *islanding* dimana hal itu tidak dapat disimulasikan secara sinkron pada siste Maka dri itu, dipilih kontingensi saluran 36 untuk melihat kondisi ketahanan sistem. Saat melakukan simulasi kontingensi pada saluran 36 tanpa menggunakan *energy storage*, terdapat saluran overload seperti pada tabel III. Saat menggunakan *energy storage* pun terdapat juga overload seperti yang ditampilkan pada tabel IV. Terdapat perbedaan jumlah saluran overload dimana besar aliran overload dan salurannya lebih sedikit saat menggunakan *energy storage*. Hal ini menunjukkan bahwa kelebihan daya dapat dimasukkan menjadi daya untuk mengisi *energy storage* sehingga *energy storage* dapat dijadikan sebagai salah satu alternatif untuk mengurangi saluran yang overload seperti tujuan utama ada penelitian ini.

3) DCSCOPF dengan LODF tanpa Energy Storage dan kontingensi saluran 36

Dirujuk dari Tabel V, Simulasi saluran akan menjadi aman ketika menggunakan batasan keamanan LODF. Ketika melakukan simulasi LODF dijadikan sebagai batasan kapasitas aliran daya sehingga sebelumnya saat simulasi tanppa LODF, beberapa saluran akan mengalami kelebihan aliran daya saat melakukan proses kontingensi pada sistem. Terdapat juga perubahan daya pembangkitan seperti pada Gambar 4 sampai Gambar 7 dimana daya yang disesuaikan akan menjadi meningkat. Selain itu juga terdapat perubahan terkait biaya pembangkitan seperti yang ditampilkan pada Gambar 11.

4) DCSCOPF dengan LODF dan Energy Storage dan kontingensi saluran 36

Saat dilakukan DCSCOPF dengan *energy storage* memiliki hasil yang serupa dengan tidak menggunakan *energy storage* dimana kedua sistem sama sama menjadi aman. Namun terjadi perbedaan ketika kedua simulasi dijalankan. Dilihat dari Tabel IV dan Tabel V, terjadi perubahan karakteristik dari aliran daya pada saluran overload dimana dengan menggunakan dimana dengan menggunakan *energy storage* tetap membuat aliran daya lebih rendah dibandingkan tidak menggunakan. Selain itu, daya pebangkitan juga menurun ketika beban puncak akibat dari *energy storage* yang melakukan *discharging* daya. Hal ini juga membuat perubahan terhadap daya pembangkitan yang disuplai dari pembangkit menuju sistem operasi dengan total biaya \$7453.

Tabel III. Kondisi Saluran Setiap Kasus

Jam	Sal.	Tanpa Batas Keamanan, Tanpa Energy Storage	Tanpa Batas Keamanan, Dengan Energy Storage	Dengan Batas Keamanan, Tanpa Energy Storage	Dengan Batas Keamanan, Dengan Energy Storage
17.00	33	-16.32	-13.36	-12.85	-12.85
17.00	35	-19.47	-16.51	-16.00	-16.00
18.00	30	-16.90	-13.01	-15.15	-14.15
18.00	33	-19.24	-16.99	-12.50	-12.50
18.00	35	-22.74	-20.49	-16.00	-16.00
19.00	30	-16.90	-13.01	-15.15	-14.15
19.00	33	-19.24	-16.99	-12.50	-12.50
19.00	35	-22.74	-20.49	-16.00	-16.00

KESIMPULAN

Penggunaan LODF dan beberapa batasan lainnya mampu memberikan hasil operasi sistem yang aman dari potensi permasalahan saat kontingensi. Selain itu, penambahan *energy storage* dalam sistem dapat mengurangi tingkat overload yang muncul. Hal ini dibuktikan pada tabel III dan tabel IV, dimana saluran 33 pada jam 17.00 dan saluran 30 pada jam 18.00 dan 19.00 yang awalnya overload, beroperasi pada batasan kapasitasnya yaitu pada saluran 33 16.32 kW menjadi 13.36 kW serta saluran 30 menjadi 16.90 kW menjadi 13.01 kW. Tentunya penambahan *energy storage* disini akan meningkatkan biaya secara menyeluruh akibat dari biaya investasi, tetapi penambahan *energy storage* juga dapat mereduksi biaya pembangkitan dari \$7858 menjadi \$7853. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan *energy storage* beserta batasan LODF dapat membuat sistem beroperasi menjadi lebih aman dan dapat meningkatkan ketahanan dari sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Zhongwei, Z. Jin, C. Dong, L. Yuefeng, dan M. Kun, "A Multi-Period Optimal Power Flow Model Including Battery Energy Storage," Power and Energy Society General Meeting (PES) IEEE, pp. 1-5, 2013
- [2] R.S. Wibowo, F.Y. Purnomo, N.K. Aryani, O. Penangsang, "Dynamic Optimal Power Flow Considering Different Charging and Discharging Cost of Energy Storage Using Mixed Integer Quadratic Programming", International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA) IEEE, pp 58-63, 2017
- [3] R. S. Wibowo, K. R. Firmansyah, N. K. Aryani, A. Soeprijanto "Dynamic Economic Dispatch of Hybrid Microgrid with Energy Storage Using Quadratic Programming," IEEE Region 10 Conference pp. 667-670, 2016
- [4] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power, Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons Inc, 2014
- [5] R. S. Wibowo, R. Maulana, A. Taradini, F. A. Pamuji, A. Soeprijanto and O. Penangsang, "Quadratic programming approach for security constrained optimal power flow," 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Chiang Mai, 2015, pp. 200-203, doi: 10.1109/ICITEED.2015.7408941.
- [6] Y. Xu, J. Hu, W. Gu, W. Su and W. Liu, "Real-Time Distributed Control of Battery Energy Storage Systems for Security Constrained DC-OPF," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 3, pp. 1580-1589, May 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2593911.
- [7] R. S. Wibowo, N. L. Nada, S. Anam, A. Soeprijanto, "Dynamic Optimal Power Flow with Geothermal Power Plant under Take or Pay Energy Contract", Proceedings of International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, Surabaya, 2015
- [8] H. Saadat, Power System Analysis, McGraw-Hill, 1999.
- [9] PLN, Standar Perusahaan Listrik Negara, 1995.
- [10] M. Adji, Gambaran Umum Pengelolaan Sistem Jawa Bali, Jakarta: Ekspose Sekuriti Sistem Jawa Bali, 2005.
- [11] Song, C. S., Park, C. H., Yoon, M., & Jang, G. (2011). Implementation of PTDFs and LODFs for power system security. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 1(1), 49-53.
- [12] Teoman G., George G. and Minghai L., "Generalized Line Outage Distribution Factors", *IEEE Trans. Power Systems*, vol.22, no.2, pp.879-881, May. 2007.
- [13] Junhuathon, N., & Marungsri, B. (2018, March). Optimal location and size for the battery energy storage system installation in a microgrid. In *2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automation (ICEEA 2018)* (pp. 86-89). Atlantis Press.
- [14] Robandi, I. (2021). *ARTIFICIAL INTELLIGENCE: Mengupas Rekayasa Kecerdasan Tiruan*. Penerbit Andi.
- [15] Khatami, R., Parvania, M., & Khargonekar, P. P. (2017). Scheduling and pricing of energy generation and storage in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(4), 4308-4322.
- [16] Wang, P., Wang, C., Hu, Y., Varga, L., & Wang, W. (2018). Power generation expansion optimization model considering multi-scenario electricity demand constraints: A case study of Zhejiang province, China. *Energies*, 11(6), 1498.
- [17] Kafazi, I.E., & Bannari, R. (2018). Optimization Strategy Considering Energy Storage Systems to Minimize Energy Production Cost of Power Systems. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8, 2199-2209.
- [18] Borowy, B. S., & Salameh, Z. M. (1996). Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11(2), 367-375. doi:10.1109/60.507648