

ANALISIS RUGI DAYA PADA PENYULANG DENGAN PEMBANGKIT ENERGI TERBARUKAN AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN Power Losses Analysis on Feeder and Renewable Energy Sources due to Unbalance Load

Sultan, I.M.A. Nrartha, I.M.Ginarsa, A.B. Muljono

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat
Email:sultandarma@yahoo.co.id¹; nrartha@unram.ac.id¹; kadekgin@unram.ac.id¹; agungbm@yahoo.com

ABSTRAK

Penetrasi pembangkit energi terbarukan semakin dalam karena berkurangnya cadangan bahan bakar fosil dan naiknya harga bahan bakar tersebut. Pembangkitan energi terbarukan masuk dalam sistem distribusi tiga fase yang memiliki beban tidak seimbang. Aliran daya tiga fase dengan beban tidak seimbang digunakan untuk menganalisis kehilangan daya pada penyulang dengan pembangkitan energi terbarukan pada sistem. Metode aliran daya tiga fase yang kuat untuk jaringan distribusi adalah metode backward-forward. Hasil penelitian pada penyulang Hilbron dan penyulang Out 3 Gili yang disuplai dari GH Senggigi, PLTS pada tiga gilis, dan PLTM Segara, bahwa ketidakseimbangan beban mengakibatkan kerugian daya meningkat secara eksponensial. Persentase kehilangan daya karena ketidakseimbangan adalah 3,5%, 12,4%, dan 26,7% untuk penyulang Hilbron dengan PLTM Segara dan PLTS Gili Air, penyulang Out 3 Gili dengan PLTS pada tiga gili, dan penyulang Hilbron dengan PLTM Segara.

Kata Kunci—beban tidak seimbang, Backward-forward, Penyulang, pembangkit energi terbarukan.

ABSTRACT

Penetration of renewable energy generation is getting deeper due to reduced fossil fuel reserves and rising prices. Renewable energy generation enter in a three-phase distribution system which have unbalanced load. Three-phase power flow with unbalanced loads is used to analyze power loss in feeders with renewables generation in the system. A robust three phase power flow method for distribution networks is a backward-forward method. The results of the study on Hilbron feeders and Out 3 Gili feeders supplied from GH Senggigi, PLTS on three gilis, and Segara PLTM, that the load imbalance resulted in a power losses increase exponentially. The power loss percentage due to imbalance is 3.5%, 12.4%, and 26.7% for Hilbron feeders with Segara PLTM and Gili Air PLTS, Out 3 Gili feeders with PLTS on three gilis, and Hilbron feeders with Segara PLTM, respectively.

Keywords: Unbalance load, Backward-forward, Feeder, Renewable Energy Sources.

PENDAHULUAN

Potensi energi baru dan terbarukan sangat besar dan dapat dimanfaatkan untuk sumber energi pembangkit alternatif dengan kapasitas kecil sampai besar. Sumber energi alternatif seperti energi angin, energi pasang surut air laut, dan energi potensial air terjun yang letaknya tersebar. Pembangkit listrik energi terbarukan masuk ke saluran distribusi tiga fase bersama-sama dengan suplai daya dari sistem untuk melayani beban. Berbeda

dengan saluran transmisi, saluran distribusi primer digunakan untuk melayani beban yang tidak seimbang antar fasenya sehingga sistem distribusi adalah sistem tiga fase tidak seimbang.

Identifikasi profil tegangan sistem dan rugi daya dari sistem ketenagalistrikan dapat ditinjau dari hasil studi aliran daya. Studi aliran daya bertujuan untuk merepresentasikan sistem tenaga listrik yang ada kedalam pemodelan sistem sehingga diperoleh informasi: sudut fase dan magnitude tegangan

setiap bus, aliran daya aktif dan reaktif, dan rugi daya pada sistem [9]. Perhitungan ketidakseimbangan operasi pada sistem tenaga listrik memerlukan algoritma aliran beban tiga fasa.[12] mengembangkan metoda fast decoupled untuk sistem distribusi radial beban tidak seimbang untuk menggambarkan kondisi aliran daya setiap fasa secara riil. Metoda dengan didasari kompensasi dikembangkan pada sistem tiga fase tak seimbang oleh [2] untuk sistem sistribusi tiga fase radial dengan melibatkan pembangkit tersebar.Metoda yang diusulkan [2] dikenal juga dengan metoda backward-forward. Metoda ini sangat kokoh untuk sistem distribusi radial dan banyak digunakan sebagai pembanding pada penelitian berikutnya [1], [13], [14] dan [15] Metoda cepat dan kokoh untuk aliran daya sistem distribusi dengan melibatkan pembangkit tersebar [10] untuk sistem distribusi seimbang dengan persamaan aliran daya dalam bentuk decopel PQ pada koordinat polar, modifikasi algoritma Newton-Raphson aliran daya tiga fase untuk analisis sistem distribusi tidak seimbang dengan pembangkit tersebar [4]. Model pembangkit tersebar dengan sumber energi terbarukan diusulkan oleh [5] dengan model bus untuk pembangkit energi terbarukan adalah model PQ dan model PV. Model sel surya pada pembangkit listrik energi terbarukan diusulkan untuk analisis aliran daya tiga fase [11]. Kenaikan rugi daya akibat ketidakseimbangan beban sudah pernah diteliti oleh [6], penelitian menghasilkan kenaikan rugi daya akibat adanya arus yang mengalir di netral trafo pada sistem distribusi.Penelitian ini tidak melibatkan pembangkit energi terbarukan pada sistem distribusi.

Penelitian ini untuk menganalisis rugi daya pada penyulang dengan pembangkit energi terbarukan akibat beban tidak seimbang. Pembangkit energi terbarukan yang diteliti adalah pembangkit energi terbarukan jenis Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro dan Pembangkit listrik Tenaga Surya yang berada pada penyulang Hilbon dan penyulang Out 3 Gili pada GH Senggigi, sisten distribusi 20 kV, sistem kelistrikan Lombok. Metoda aliran daya untuk analisis sistem tiga fase digunakan metoda backward/forward untuk sistem radial [7]. Untuk memperoleh pembahasan yang lebih terarah, pada paper akan dibagi dalam beberapa bahasan yaitu : pada bagian II membahas Model Sistem yang meliputi model distribusi dan model pembangkit energi

terbarukan, bagian III membahas Metoda Backward-forward untuk analisis aliran daya tiga fase, bagian IV adalah Hasil dan Pembahasan dan bagian ke V adalah kesimpulan.

MODEL SISTEM

Sistem distribusi digambarkan oleh saluran distribusi, kapasitor shunt, unit-unit pembangkit, beban-beban dan transformator distribusi.Masing-masing elemen dari sistem distribusi dapat dimodelkan untuk studi aliran daya.

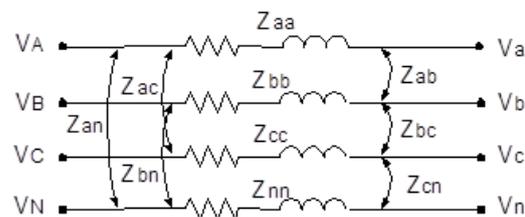
A. Saluran Distribusi

Gambar 1 diperlihatkan sebuah saluran tiga fasa sebagai penghubung antara bus i dan j, dimana parameter-parameter dari saluran tersebut dapat dihitung menjadi suatu matriks berukuran 4 x 4 yang terdiri dari impedansi sendiri dan bersama, seperti pada per. 1.

$$[Z_{abcn}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Untuk sistem distribusi dengan pentanahan yang baik, maka nilai V_N dan V_n pada Gambar1 dapat diasumsikan bernilai nol sehingga dengan reduksi Kron Pers. 1 menjadi Pers. 2.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa-n} & Z_{ab-n} & Z_{ac-n} \\ Z_{ba-n} & Z_{bb-n} & Z_{bc-n} \\ Z_{ca-n} & Z_{cb-n} & Z_{cc-n} \end{bmatrix} \quad (2)$$



Gambar 1. Saluran tiga fasa empat kawat

Hubungan antara tegangan bus dengan arus cabang dari saluran pada Gambar 1., dapat dinyatakan pada Pers. 3.

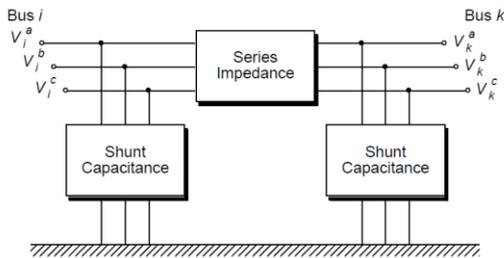
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa-n} & Z_{ab-n} & Z_{ac-n} \\ Z_{ba-n} & Z_{bb-n} & Z_{bc-n} \\ Z_{ca-n} & Z_{cb-n} & Z_{cc-n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{Aa} \\ I_{Bb} \\ I_{Cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Impedansi seri dari saluran ke I

digambarkan oleh matrik 3 x 3 pada Pers. 4.

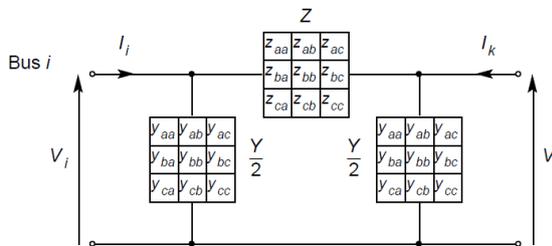
$$Z_l = \begin{bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ab,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ac,l} & Z_{bc,l} & Z_{cc,l} \end{bmatrix}$$

Model saluran pada jaringan distribusi dapat direpresentasikan sebagai rangkaian nominal phi, seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Model saluran tiga fase nominal phi

Jaringan distribusi tersebut mempunyai impedansi seri dan admitansi shunt yang terbagi merata di kedua ujung rangkaian dari bus i ke bus k. Nilai impedansi dan admitansi tiga fase yang setiap elemen tersusun dalam dimensi matrik 3 x 3 seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Parameter saluran tiga fase nominal phi

B. Beban

Beban - beban dimodelkan sebagai kombinasi dari daya konstan, arus konstan atau impedansi konstan. Hubungan tiga fase beban bisa hubung bintang (Y) atau delta (Δ). Beban L_i terhubung pada bus i , V_i tegangan tiga fase pada bus i , I_{L_i} arus beban tiga fase.

C. Model-model generator pembangkit tersebar

Tergantung pada jenis sumber energi dan konverter daya yang digunakan pada sisi pembangkit, pembangkit tersebar dapat dimodelkan:

1. Model faktor daya konstan (PQ bus): Output P daya aktif dan faktor daya pf ditetapkan dan daya reaktif Q ditentukan oleh dua variabel ini.

2. Model daya reaktif variabel (PQ bus) : Output P daya aktif ditentukan dan daya reaktif Q ditentukan dengan menerapkan fungsi polinomial yang telah ditentukan.
3. Model tegangan konstan (PV bus) : Daya keluaran P aktif dan besarnya tegangan $|V|$ ditentukan.

Pembangkit energi terbarukan dimodelkan sebagai bus PQ dapat diperlakukan sebagai beban PQ negatif dalam analisis aliran daya (EPRI, 2000).

METODA BACKWARD-FORWARD

Prosedur aliran daya metoda backward-forward sebagai berikut:

1. Baca data jaringan bentuk indek jaringan,
2. Bentuk matrik impedansi Z_B dan matrik sensitif Z_V bus PV, Sistem mesh yang jarang diubah ke jaringan radial dengan memutus semua loop. Pada Z_B , elemen diagonal adalah jumlah dari impedansi saluran yang terbentuk dari hubungan loop dua bus dan elemen off diagonal adalah jumlah dari impedansi saluran dua loop. Z_V dapat dibentuk dari bus PV pada bus feeder dengan cara yang sama seperti Z_B .
3. Lakukan iterasi tegangan *forward* dan arus *backward*. Jika kesalahan daya maksimum pada masing-masing bus untuk semua fase lebih kecil dari kriteria konvergensi ϵ_p , lakukan langkah berikutnya.
4. Hitung kesalahan tegangan ΔV_B . Untuk j yang dipisahkan dalam dua bus terakhir, j_1 dan j_2 , didapatkan:

$$\Delta V_{B,j} = V_{j1} - V_{j2} \tag{5}$$

5. Jika kesalahan tegangan maksimum lebih besar dari kriteria tegangan, ϵ_b , perbaharui injeksi arus J menggunakan pers.6 dan 7, lanjutkan ke langkah 3, atau ke langkah berikutnya.

$$Z_B \Delta J = \Delta V_B \tag{6}$$

$$J = J + \Delta J \tag{7}$$

Untuk j , kompensasi arus J_j adalah injeksi pada bus akhir j_1 dan kompensasi arus J_j diinjeksikan pada bus akhir j_2 .

6. Hitung penyimpangan tegangan bus PV (ΔV_V). Untuk bus PV ke i ,

$$\Delta V_{V,i} = V_{set,i} - V_{1,i} \tag{8}$$

dengan $V_{1,i}$ adalah magnitude tegangan urutan positif pada bus i , dan $V_{set,i}$ adalah nilai setting tegangan pada bus PV ke i .

7. Jika penyimpangan tegangan PV maksimum lebih besar dari pada kriteria konvergensi tegangan bus PV, ε_v , perbaharui injeksi arus I_q bus PV menggunakan pers. (9) dan (12), kembali ke langkah 3 atau aliran daya selesai.

$$Z_V \Delta I_q = \Delta V_V$$

$$\begin{cases} \Delta i_{qa,i} = |\Delta i_{q,i}| e^{j(90^\circ + \delta_{va,i})} \\ \Delta i_{qb,i} = |\Delta i_{q,i}| e^{j(90^\circ + \delta_{ba,i})} \\ \Delta i_{qc,i} = |\Delta i_{q,i}| e^{j(90^\circ + \delta_{vc,i})} \end{cases}$$

arus mendahului sebesar 90° , yang akan mengurangi pembangkitan daya reaktif. Jika $\Delta V_{V,i} < 0$ ($V_{1,i}$ lebih besar dari $V_{set,i}$),

$$I_{q,i} = I_{q,i} + \Delta I_{q,i}$$

sehingga pembangkitan daya reaktif akan berkurang diinjeksikan pada bus PV ke i . Jika $\Delta V_{V,i} > 0$ ($V_{1,i}$ lebih kecil dari $V_{set,i}$),

$$I_{q,i} = I_{q,i} - \Delta I_{q,i}$$

sehingga kelebihan pembangkitan daya reaktif akan diinjeksikan pada bus PV ke i .

HASIL DAN PEMBAHASAN

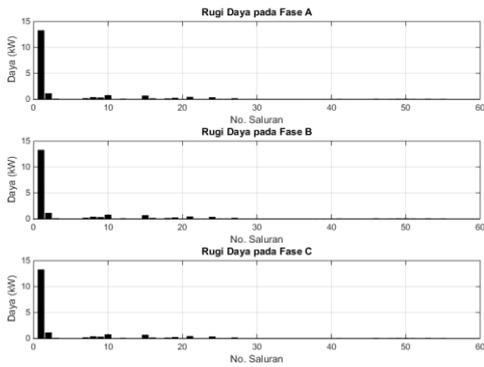
Penyulang yang digunakan sebagai objek penelitian ini adalah penyulang Hilbron dan penyulang Out 3 Gili [8]. Kedua penyulang tersebut terhubung pada GH Senggigi pada sistem kelistrikan Lombok. Pada operasi siang hari, penyulang Hilbron disuplai dari GH Senggigi dan pembangkit energi terbarukan yaitu PLTS Gili Air dan PLTMH Segara (diagram segaris penyulang Gambar 15), sedangkan pada malam hari, disuplai dari GH Senggigi dan PLTM Segara (diagram segaris penyulang Gambar 16). Operasi penyulang Out 3 Gili pada siang hari disuplai dari GH senggigi, PLTS Gili Air, Gili Meno dan Gili Trawangan (diagram segaris penyulang Gambar 17). Operasi PLTS Gili Air dapat masuk ke penyulang Hilbron pada kondisi LBS Sire *Normally Close* (NC) atau penyulang Out 3 Gili pada kondisi LBS Sire *Normally Open* (NO). PLTS Gili Air, Gili Meno dan Gili Trawangan masuk sistem hanya pada siang hari karena PLTS tidak dilengkapi baterai.

Analisis rugi daya pada penyulang dengan pembangkit energi terbarukan dilakukan dengan beberapa skenario untuk penyulang

dengan jenis pembangkit energi terbarukan yang berbeda-beda. Skenario-skenario tersebut adalah pertama, penyulang dengan pembangkit terbarukan jenis PLTS (pembangkit yang hanya dapat membangkitkan daya aktif, EPRI, 2000). Skenario kedua adalah penyulang dengan pembangkit terbarukan jenis PLTMH. PLTMH menggunakan generator untuk konversi energi listrik sehingga bus PLTMH sebagai bus kontrol tegangan. Apabila rentang pembangkitan daya reaktif generator tidak terpenuhi, bus pembangkit tersebut bukan lagi sebagai bus kontrol tegangan tetapi sebagai bus dengan daya aktif dan reaktif konstan. Skenario ketiga adalah penyulang dengan pembangkit terbarukan jenis PLTMH dan PLTS. Simulasi pembebanan setiap skenario dengan pembebanan seimbang dan tidak seimbang. Pembebanan ini dinyatakan dengan faktor ketidakseimbangan beban dari satu sampai tiga. Faktor Ketidakseimbangan Beban (FKB) satu yang berarti beban antar fase (fase A, B, C) adalah sama, FKB dinaikkan bertahap sampai tiga (FKB = 3 berarti semua beban pada bus terkonsentrasi di fase A).

Skenario pertama untuk penyulang dengan PLTS. Penyulang dengan PLTS adalah penyulang Out 3 Gili yang mempunyai 56 bus dan 55 saluran. PLTS terletak pada bus-bus, 13, 23, dan 34 berturut-turut adalah PLTS Gili Air, Gili Meno, dan Gili Trawangan. Hasil rugi daya untuk beban seimbang pada masing-masing fase (fase A, B, dan C) atau FKB = 1, ditampilkan pada Gambar 4. Gambar 4. menunjukkan rugi daya untuk setiap saluran adalah sama. Rugi daya pada saluran yang keluar dari PLTS yaitu saluran 13, 23, dan 35, adalah 0, 0, dan 0.002 kW untuk PLTS Gili Air, Gili Meno, dan Gili Trawangan. Ini menunjukkan daya yang dibangkitkan PLTS Gili Air dan Gili Meno untuk suplai beban sendiri, sehingga tidak ada daya yang dikirim ke penyulang, sedangkan PLTS Gili Trawangan ikut memberikan daya ke penyulang

Simulasi berikutnya, beban dinaikkan secara bertahap dengan kenaikan FKB sebesar 0.2 sampai dengan FKB=3. Hasil rugi daya sistem akibat kenaikan FKB ini ditabelkan pada Tabel 1.

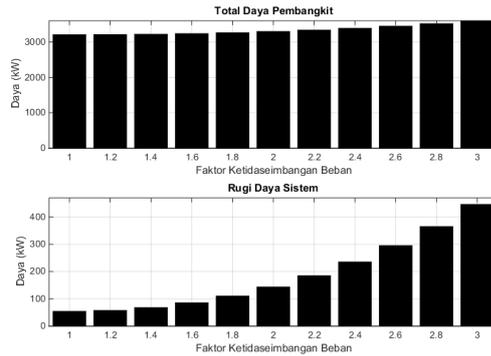


Gambar 4. Rugi daya saluran pada penyulang OUT 3 Gili pada FKB=1

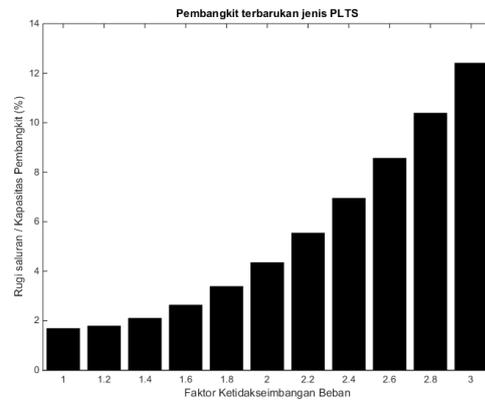
Tabel 1. Rugi daya dengan PLTS 3 Gili untuk kenaikan FKB

No	FKB	P_G (kW)	P_D (kW)	Rugi Daya (kW)
1	1	3204.8	3151.1	53.8
2	1.2	3208.2	3151.1	57.1
3	1.4	3218.5	3151.1	67.4
4	1.6	3236.1	3151.1	85.0
5	1.8	3261.2	3151.1	110.1
6	2	3294.2	3151.1	143.1
7	2.2	3335.7	3151.1	184.6
8	2.4	3386.1	3151.1	235.0
9	2.6	3446.0	3151.1	294.9
10	2.8	3516.0	3151.1	365.0
11	3	3597.2	3151.1	446.1

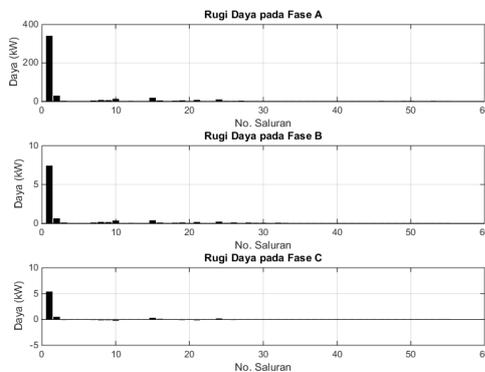
Tabel 1. menunjukkan kenaikan FKB menghasilkan kenaikan rugi daya pada penyulang, walaupun total beban pada penyulang adalah sama. Gambar 5. menunjukkan kenaikan daya dari pembangkit dan kenaikan rugi daya pada penyulang akibat kenaikan FKB. Gambar 5. memberi informasi, dengan kenaikan FKB, daya yang dibangkitkan oleh pembangkit semakin besar. Hal ini untuk menanggulangi kekurangan daya akibat kenaikan rugi-rugi pada saluran. Gambar 6. menunjukkan perbandingan rugi daya terhadap kapasitas daya pembangkit dalam persen akibat kenaikan FKB. Grafik pada Gambar 6. menunjukkan prosentase perbandingan rugi daya terhadap kapasitas daya pembangkit akibat kenaikan FKB. Prosentase meningkat secara eksponensial. Prosentase rugi daya terhadap kapasitas daya pembangkit akibat FKB, naik dari 1.68% pada FKB=1 menjadi 12,4%, pada FKB = 3.



Gambar 5. Daya pembangkit dan rugi daya akibat kenaikan FKB



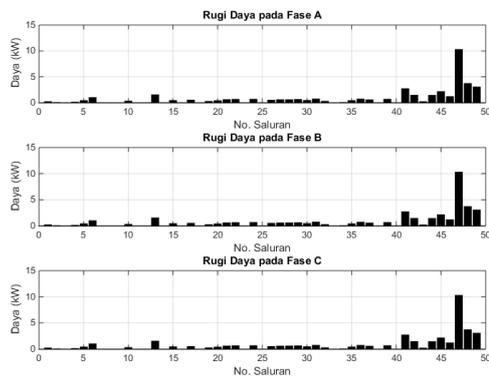
Gambar 6. Prosentase rugi daya dengan PLTS 3 Gili akibat kenaikan FKB



Gambar 7. Rugi Daya pada penyulang OUT 3 Gili, FKB = 3

Rugi-rugi daya pada saluran untuk FKB = 3 ditampilkan pada Gambar 7. Gambar 7. menunjukkan rugi daya setiap fase berbeda-beda. Rugi daya terbesar terdapat pada fase A karena beban terkonsentrasi pada fase A. Rugi daya pada saluran keluar dari PLTS mempunyai rugi daya yang sama seperti kondisi beban seimbang. Ini menunjukkan PLTS mempunyai daya yang hanya dapat memenuhi daya beban sendiri, sehingga tidak ada daya yang dikirim ke penyulang oleh PLTS tiga gili. Rugi daya saluran keluar pada ketiga PLTS untuk kondisi beban tidak seimbang sama dengan beban seimbang.

Skenario kedua adalah penyulang dengan PLTMH. Penyulang dengan PLTMH adalah penyulang Hilbron dengan PLTMH Segara untuk operasi penyulang pada malam hari. Penyulang Hilbron terdiri dari 50 bus dengan 49 saluran. PLTMH Segara terletak pada bus 50 (bus pada ujung penyulang). Simulasi yang sama dilakukan seperti pada skenario pertama. Beban penyulang Hilbron pada fase A dinaikkan dari FKB satu sampai tiga dengan kenaikan 0.2. Gambar 8. menampilkan hasil rugi daya penyulang Hilbron untuk beban seimbang atau FKB = 1.



Gambar 8. Rugi daya saluran penyulang Hilbron untuk beban seimbang

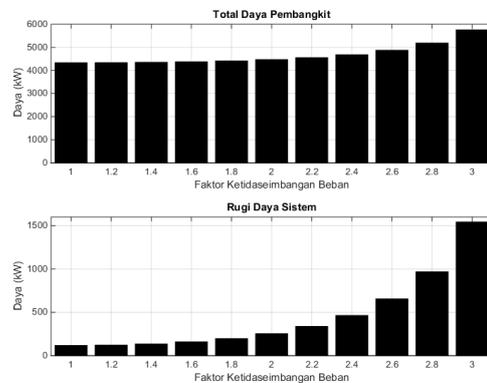
Gambar 8. menunjukkan rugi daya setiap fase adalah sama karena beban seimbang. Rugi daya terbesar terjadi pada saluran 47 sebesar 10.268 kW. Hal ini karena beban terkonsentrasi di bus 44 (Outlet Bayan). PLTMH Segara menyulai daya yang lebih besar dari pada GH Senggigi sehingga saluran menuju ke bus 44 dari PLTMH Segara mempunyai rugi daya yang lebih besar.

Untuk FKB satu sampai dengan tiga, rugi daya penyulang Hilbron dengan PLTMH Segara ditabelkan pada Tabel 2.

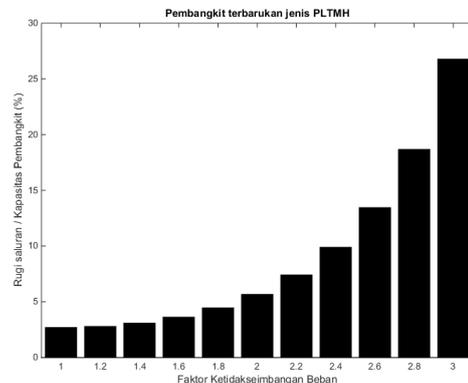
Tabel 2. Rugi daya dengan PLTMH Segara untuk kenaikan FKB

No	FKB	P_e (kW)	P_D (kW)	Rugi Daya (kW)
1	1	4332.5	4216.0	116.5
2	1.2	4336.8	4216.0	120.7
3	1.4	4350.1	4216.0	134.0
4	1.6	4374.2	4216.0	158.2
5	1.8	4412.1	4216.0	196.1
6	2	4469.0	4216.0	253.0
7	2.2	4553.1	4216.0	337.1
8	2.4	4678.6	4216.0	462.6
9	2.6	4871.0	4216.0	655.0
10	2.8	5183.8	4216.0	967.8
11	3	5757.6	4216.0	1541.6

Tabel 2. menunjukkan untuk daya beban total yang sama, kenaikan FKB, rugi daya penyulang naik sehingga daya pembangkit ikut naik untuk menalangi kenaikan rugi daya tersebut. Gambar 9. menunjukkan grafik kenaikan daya pembangkit dan kenaikan rugi daya akibat kenaikan FKB. Gambar 10. menunjukkan prosentase rugi daya terhadap kapasitas pembangkit untuk kenaikan FKB. Seperti pada penyulang Out 3 Gili, kenaikan rugi daya akibat kenaikan FKB pada penyulang Hilbron dengan PLTMH Segara juga meningkat secara eksponensial



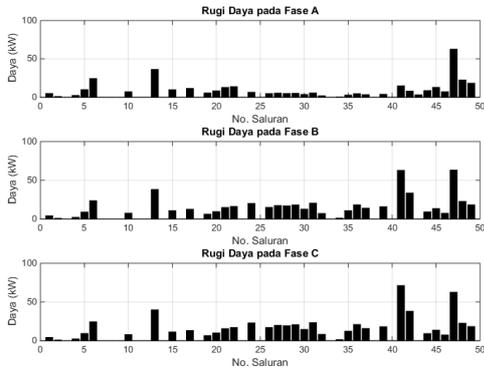
Gambar 9. Rugi daya penyulang dengan PLTM Segara akibat kenaikan FKB



Gambar 10. Rugi daya penyulang dengan PLTM Segara akibat kenaikan FKB

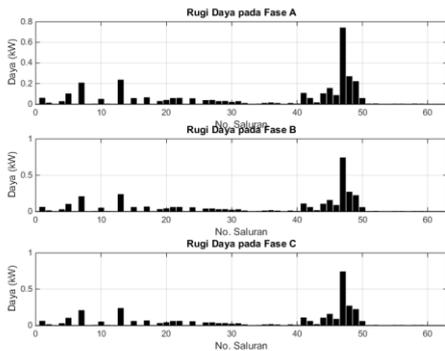
Peningkatan ini dari prosentase pada FKB = 1 adalah 2.69% menjadi 26,7% pada FKB = 3. Perbandingan rugi daya antar fase pada saat FKB = 3 ditampilkan pada Gambar 11. Gambar 11. menunjukkan pada fase A, rugi daya pada bagian tengah dari penyulang lebih kecil dibandingkan dengan fase B dan C. Hal ini karena beban terkonsentrasi pada fase A, dan beban terbesar berada di dekat PLTMH Segara, sehingga daya pada fase A dari PLTMH Segara diserap oleh beban fase A sedangkan fase B dan C, daya dari PLTMH

Segara diteruskan ke GH Senggigi, sehingga rugi daya fase B dan C menjadi lebih besar pada tengah-tengah penyulang.



Gambar 11. Rugi daya penyulang dengan PLTM Segara, FKB = 3

Skenario ketiga penyulang dengan pembangkit energi terbarukan jenis PLTS dan PLTMH. Penyulang dengan PLTS dan PLTMH adalah penyulang Hilbron yang beroperasi pada siang harisaat LBS Sire *Normally Close* (NC). Pada operasi ini, penyulang Hilbron terdiri dari 63 bus dan 62 saluran. PLTS Gili Air terletak pada bus 61 dan PLTMH Segara pada bus 50. Saluran keluar untuk PLTS Gili Air adalah saluran 61 dan saluran yang keluar dari PLTMH Segara adalah saluran 49. Hasil rugi daya saluran setiap fase pada penyulang saat beban seimbang atau FKB = 1, ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Rugi daya penyulang Hilbron siang hari beban seimbang

Gambar 12 menunjukkan rugi daya setiap fase sama. Rugi daya terbesar terjadi pada saluran dekat dengan PLTMH Segara ini menunjukkan PLTMH Segara membangkitkan daya yang besar, sehingga menyebabkan rugi daya di saluran dekat PLTMH Segara besar. Rugi daya yang keluar dari PLTS Gili Air sama dengan nol, seperti pada skenario pertama. Hal ini menunjukkan daya dari PLTS Gili Air

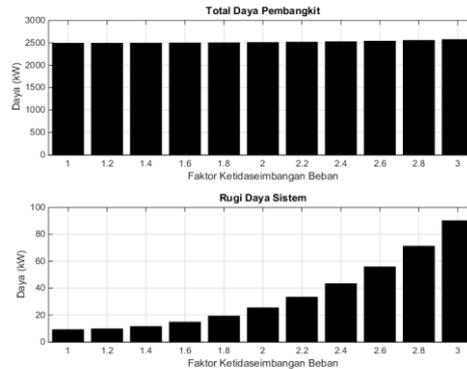
kecil, hanya cukup suplai daya untuk beban sendiri.

Hasil rugi daya akibat kenaikan faktor ketidakseimbangan beban pada penyulang Hilbron dengan PLTS Gili Air dan PLTMH Segara ditabelkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rugi daya penyulang Hilbron siang hari untuk kenaikan FKB

No	FKB	P_e (kW)	P_D (kW)	Rugi Daya (kW)
1	1	2489.5	2480.4	9.1
2	1.2	2490.1	2480.4	9.7
3	1.4	2491.9	2480.4	11.5
4	1.6	2495.1	2480.4	14.7
5	1.8	2499.6	2480.4	19.2
6	2	2505.8	2480.4	25.4
7	2.2	2513.7	2480.4	33.3
8	2.4	2523.7	2480.4	43.3
9	2.6	2536.2	2480.4	55.8
10	2.8	2551.6	2480.4	71.2
11	3	2570.5	2480.4	90.1

Kenaikan FKB menyebabkan kenaikan rugi daya pada penyulang. Gambar 13. menunjukkan rugi daya dan daya pembangkit meningkat untuk kenaikan FKB. Rugi daya meningkat secara eksponensial.

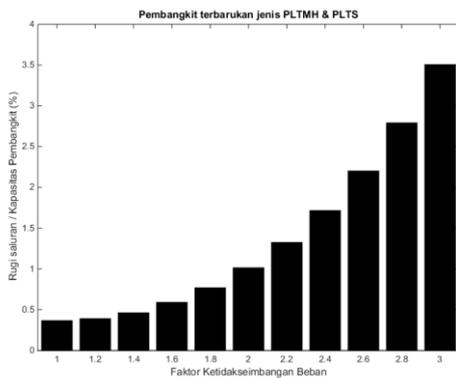


Gambar 13. Rugi daya penyulang Hilbron siang hari untuk kenaikan FKB

Gambar 14. menunjukkan prosentase kenaikan rugi daya terhadap daya pembangkit akibat kenaikan FKB. Prosentase rugi daya terhadap daya pembangkit akibat FKB yang meningkat adalah 0.37% pada FKB = 1 menjadi 3.5% pada FKB = 3. Prosentase kenaikan rugi daya pada skenario ketiga ini jauh lebih kecil dari pada skenario sebelumnya. Hal ini karena posisi pembangkit PLTMH Segara sebagai pembangkit kontrol tegangan berada di tengah pengulang dan mempunyai kapasitas yang besar sehingga dapat memberikan daya dua arah ke hulu dan ke hilir pada penyulang. Daya dua arah ini menyebabkan daya yang dikirim dari sumber, GH Senggigi bisa lebih kecil karena sudah

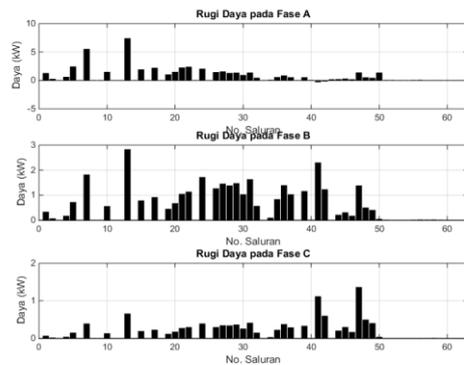
disuplai dari tengah penyulang oleh PLTMH Segara. Selain itu, pada ujung penyulang PLTS Gili Air memberikan daya cukup untuk beban disekitar PLTS sehingga suplai ke ujung saluran tidak diperlukan.

KESIMPULAN



Gambar 14. Prosentase rugi daya penyulang Hilbron siang hari

Hasil rugi daya perfase untuk FKB = 3 pada penyulang Hilbron dengan PLTMH Segara dan PLTS Gili Air ditampilkan pada Gambar 15. Gambar 15. menunjukkan rugi daya terbesar terjadi pada fase A karena beban terkonsentrasi pada fase A. Pada fase A, rugi lebih kecil pada pada saluran yang dekat dengan PLTMH Segara dan PLTS Gili Air. Berbeda dengan fase B dan C, rugi daya pada saluran yang dekat dengan PLTMH Segara hampir sama dengan rugi saluran saluran yang jauh dari PLTMH Segara. Hal ini karena PLTMH Segara memberikan daya secara seimbang pada setiap fasenya, sedangkan beban terkonsentrasi hanya pada fase A saja.



Gambar 15. Rugi daya penyulang Hilbron saat siang hari untuk FKB = 3

I. KESIMPULAN

Rugi daya pada penyulang dengan pembangkit terbarukan jenis PLTS Gili Air, Gili Meno dan Gili Tawangan, PLTMH Segara, atau PLTM Segara dan PLTS Gili Air meningkat untuk menaikkan faktor

ketidakseimbangan beban. Prosentase rugi daya meningkat dari 1.68% pada FKB=1 menjadi 12,4%, pada FKB=3 untuk penyulang Out 3 Gili dengan PLTS Gili Air, Gili Meno dan Gili Trawangan. Prosentase rugi daya meningkat dari 2.69% pada FKB=1 menjadi 26,7% pada FKB=3 untuk penyulang Hibron dengan PLTM Segara. Prosentase rugi daya meningkat dari 0.37% pada FKB = 1 menjadi 3.5% pada FKB=3 untuk penyulang Hibron dengan PLTM Segara dan PLTS Gili Air. Kapasitas PLTMH Segara cukup besar dibandingkan dengan PLTS tiga gili sehingga banyak memberikan kontribusi daya ke penyulang. Kontribusi daya yang besar menyebabkan perubahan rugi daya setiap fase cukup besar akibat kenaikan faktor ketidakseimbangan beban. Sebagai bus kontrol tegangan, bus PLTMH Segara tidak memberikan pengaruh yang besar pada pengurangan rugi daya pada penyulang. Hal ini karena bus kontrol tegangan hanya mengatur daya reaktif untuk menjaga tegangan bus bukan daya aktif. Daya aktif tetap konstan sesuai dengan seting yang diberikan.

Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Mataram atas dukungan pendanaan melalui Skema Penelitian dana PNPB Tahun Anggaran 2018 Universitas Mataram.

Referensi

Garces, Alejandro. (2015). A Linear Three-Phase Load Flow for Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 31. 1-2. 10.1109/TPWRS.2015.2394296.

C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 671-679, May 1995.

Electric Power Research Institute (EPRI). *Engineering Guide for Integration of Distributed Generation and Storage into Power Distribution Systems*; Technical Report; EPRI: Palo Alto, CA, USA, 2000.

Ghasemi, A-R., Ebrahimi, R., Babae, A., Hoseynpoor, M., 2013, A Modified Newton–Raphson Algorithm of Three-Phase Power Flow Analysis in Unsymmetrical Distribution Networks with Distributed Generation, *Journal*

of Basic and Applied Scientific Research,
www.textroad.com.

- Maya K., N., and Jasmin, E., A., 2015, A three phase power flow algorithm for distribution network incorporating the impact of distributed generation model, Elsevier, *Procedia technology* 21, 326-331.
- Mulyadi, A. D., 2011, Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Rugi Daya Saluran Netral Jaringan Distribusi Tegangan Rendah, *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin POLBAN*.
- Nratha, I., M., A., Sultan, Muljono, A., B., 2012," Rancang Bangun Perangkat Lunak Untuk Evaluasi Studi Aliran Daya Tiga Fase Dengan Metoda Kompensasi, Laporan penelitian PNBP, Universitas Mataram.
- Raharjo, S. W. K., 2016, Optimasi Kapasitas Distributed Generation Untuk Berbagai Perubahan Beban Dengan Algoritma Genetika (Studi Kasus Pada Plts 3 Gili Dan Pltm Segara), Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Fak. Teknik, Unram.
- Stevenson, W,D, Jr., Graiger., J., J., 1994, "Power System Analysis", McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- Sun, H., Nikovski, D., Ohno, T., Takano, T., and Kojima, Y., 2011, A Fast and Robust Load Flow Method for Distribution Systems with Distributed Generations, MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES, <http://www.merl.com>.
- Syafii, Nor, K., M., Abdel-Akher, M., 2010, Grid-Connected Photovoltaic Models for Three-Phase Load Flow Analysis, International Conference On Power And Energy, Kuala Lumpur Malaysia.
- Zimmerman R D, 1992, "Network Reconfiguration For Loss Reduction In Three Phase Power Distribution Systems", Thesis to the Faculty of the Graduate School of Cornell University.
- N. Yang, "Three-phase power flow calculations using direct ZBUS method for large-scale unbalanced distribution networks," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 4, pp. 1048-1055, 10 3 2016.
- K. Mahmoud and N. Yorino, "Robust quadratic-based BFS power flow method for multi-phase distribution systems," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 9, pp. 2240-2250, 9 6 2016.
- N. Yang and H. Chen, "Three-phase power-flow solutions using decomposed quasi-Newton method for unbalanced radial distribution networks," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 14, pp. 3594-3600, 28 9 2017.