

PERANCANGAN INTERKONEKSI SISTEM PT. PLN (PERSERO) WILAYAH MALINAU DAN SEBUKU

Patria Julianto¹, Stefanli Daniel Mukin², Sabaruddin³

^{1,2,3}*Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia*

¹patricia@borneo.ac.id

²stefanlidaniel4@gmail.com

³sabaruddin091299@gmail.com

Abstract—To improve the quality and reliability of electricity supply in North Kalimantan, PT PLN (Persero) plans to interconnect isolated power systems into an integrated network. This study investigates the interconnection of the Malinau and Sebuku systems through a 20 kV distribution network. System modelling and power flow analysis were carried out using ETAP PowerStation with the Newton–Raphson method based on existing system data from both areas. The proposed interconnection consists of an 86.6 km overhead line from the Malinau PLTU bus to the Tujung bus using a 240 mm² AAAC conductor. The analysis was conducted under two operating scenarios, namely when both generating systems were in service and when the Sebuku generating system was out of service. Simulation results show that when both systems are in operation, the active and reactive power losses are 2,361 kW and 7,802 kVAr, respectively, with the lowest voltage of 18.961 kV. When the Sebuku generating system is out of service, a 1,200 kVAr capacitor bank is required at the end of the Sebuku feeder, while the active and reactive power losses increase to 2,991 kW and 9,719 kVAr, respectively, with the lowest voltage of 18.933 kV. These results indicate that the proposed interconnection is technically feasible for supporting electricity service improvement in the study area.

Keywords—Interconnection, Power Flow, ETAP PowerStation, Distribution Network, Newton–Raphson.

Intisari—Untuk meningkatkan kualitas dan keandalan penyediaan tenaga listrik di Kalimantan Utara, PT PLN (Persero) merencanakan interkoneksi sistem-sistem tenaga listrik yang masih terisolasi. Penelitian ini membahas interkoneksi sistem Malinau dan Sebuku melalui jaringan distribusi 20 kV. Pemodelan sistem dan analisis aliran daya dilakukan menggunakan ETAP PowerStation dengan metode Newton–Raphson berdasarkan data existing dari kedua wilayah. Rancangan interkoneksi yang diusulkan berupa saluran udara sepanjang 86,6 km dari bus PLTU Malinau ke bus Tujung menggunakan konduktor AAAC 240 mm². Analisis dilakukan pada dua skenario operasi, yaitu saat kedua sistem pembangkit beroperasi dan saat pembangkit Sebuku tidak beroperasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi kedua sistem beroperasi, rugi-rugi daya aktif dan reaktif masing-masing sebesar 2.361 kW dan 7.802 kVAr, dengan tegangan terendah sebesar 18,961 kV. Pada kondisi pembangkit Sebuku tidak beroperasi, diperlukan kapasitor bank sebesar 1.200 kVAr pada ujung penyulang Sebuku, sedangkan rugi-rugi daya aktif dan reaktif meningkat menjadi 2.991 kW dan 9.719 kVAr, dengan tegangan terendah sebesar 18,933 kV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rancangan interkoneksi yang diusulkan layak secara teknis untuk mendukung peningkatan pelayanan tenaga listrik di wilayah studi.

Kata Kunci—Interkoneksi, Aliran Daya, ETAP PowerStation, Jaringan Distribusi, Newton–Raphson.

I. PENDAHULUAN

Sistem interkoneksi merupakan sistem tenaga listrik yang menghubungkan beberapa pembangkit, baik pembangkit konvensional maupun pembangkit energi terbarukan, dengan pusat-pusat beban atau konsumen melalui jaringan transmisi maupun distribusi [1]. Melalui sistem yang saling terhubung, penyaluran tenaga listrik dapat dilakukan dengan lebih andal, stabil, dan fleksibel, karena suplai daya tidak hanya bergantung pada satu sumber pembangkitan atau satu wilayah operasi saja [2]. Selain itu, interkoneksi juga memungkinkan terjadinya saling bantu pasokan antarwilayah, sehingga kemampuan sistem dalam melayani kebutuhan beban dapat meningkat [3].

Di wilayah Pulau Kalimantan, khususnya Provinsi Kalimantan Utara, sebagian besar sistem tenaga listrik masih beroperasi secara terpisah (isolated) berdasarkan wilayah atau pusat beban masing-masing. Kondisi ini umumnya dipengaruhi oleh jarak antardaerah yang relatif jauh, kebutuhan beban yang belum terlalu besar pada setiap wilayah, serta keterbatasan infrastruktur jaringan yang tersedia. Akibatnya, masing-masing sistem harus mengandalkan pembangkit lokal dalam memenuhi kebutuhan dayanya. Pada kondisi tertentu, sistem isolated memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas operasi, keandalan pasokan, serta kemampuan menghadapi pertumbuhan beban yang terus meningkat [5].

Dua wilayah operasi PT PLN (Persero) di Provinsi Kalimantan Utara yang masih beroperasi secara terpisah adalah sistem Malinau dan sistem Sebuku. Kedua sistem tersebut saat ini melayani beban pada wilayah masing-masing dengan pembangkitan lokal dan jaringan distribusi 20 kV yang berdiri sendiri. Namun demikian, seiring dengan pertumbuhan kebutuhan energi listrik, peningkatan aktivitas masyarakat, dan perkembangan wilayah, diperlukan upaya perencanaan sistem yang dapat meningkatkan keandalan dan kualitas pelayanan tenaga listrik. Mengingat jarak antara kedua sistem relatif masih memungkinkan untuk dihubungkan, interkoneksi Malinau–Sebuku menjadi salah satu alternatif teknis yang layak untuk dikaji lebih lanjut. Gagasan ini juga selaras dengan tujuan penelitian yaitu melakukan pemodelan dan simulasi aliran daya masing-masing sistem, menentukan spesifikasi jaringan penghubung, serta memperoleh parameter operasi sistem interkoneksi melalui ETAP.

Dalam perencanaan interkoneksi, studi aliran daya memiliki peran yang sangat penting karena dapat digunakan untuk mengetahui kondisi operasi sistem, seperti profil tegangan, aliran daya aktif dan reaktif, rugi-rugi daya, serta kemampuan sistem dalam melayani beban setelah kedua jaringan dihubungkan [6-9]. Analisis ini diperlukan untuk memastikan bahwa sistem interkoneksi yang dirancang tetap memenuhi batas operasi yang diizinkan, khususnya terhadap jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi 20 kV [10]. Dengan demikian, hasil studi aliran daya dapat dijadikan dasar dalam menentukan kelayakan teknis interkoneksi, termasuk kebutuhan penambahan peralatan pendukung seperti kapasitor bank apabila diperlukan [6,10].

II. LANDASAN TEORI

A. Sistem Interkoneksi

Sistem interkoneksi adalah sistem tenaga listrik yang menghubungkan dua atau lebih sistem pembangkitan, transmisi, atau distribusi sehingga dapat beroperasi secara terpadu dalam melayani beban. Dengan adanya interkoneksi, pasokan daya antarwilayah dapat saling mendukung, sehingga keandalan dan kontinuitas pelayanan listrik dapat ditingkatkan. Pada sistem yang masih bersifat terisolasi (isolated), setiap wilayah bergantung pada pembangkit lokal, sehingga fleksibilitas operasi relatif terbatas. Oleh karena itu, interkoneksi menjadi salah satu alternatif strategis untuk meningkatkan kualitas pelayanan, efisiensi operasi, dan kemampuan sistem dalam memenuhi pertumbuhan beban [11].

B. Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan analisis dasar dalam sistem tenaga listrik yang digunakan untuk mengetahui kondisi operasi jaringan pada keadaan tunak [12]. Melalui studi ini dapat diperoleh besaran-besaran penting, seperti tegangan pada setiap bus, sudut fasa tegangan, aliran daya aktif dan reaktif, serta rugi-rugi daya pada saluran. Informasi tersebut sangat diperlukan untuk mengevaluasi apakah sistem masih beroperasi dalam batas teknis yang diizinkan, sekaligus menjadi dasar dalam perencanaan dan pengembangan jaringan tenaga listrik [13]. Pada penelitian ini, studi aliran daya digunakan untuk mengevaluasi kondisi sistem distribusi 20 kV Malinau dan Sebuku sebelum dan sesudah interkoneksi. Persamaan dasar aliran daya untuk setiap bus dinyatakan sebagai:

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \quad (1)$$

Keterangan

P_i, Q_i = daya aktif dan reaktif pada bus i ;
 V_i, V_k = tegangan bus i dan bus k ;
 G_{ik}, B_{ik} = elemen matriks admitansi;
 δ_{ik} = sudut fasa.

C. Metode Newton-Raphson

Metode Newton-Raphson merupakan salah satu metode numerik yang umum digunakan dalam penyelesaian persoalan aliran daya karena memiliki tingkat konvergensi yang cepat dan akurat [14]. Metode ini bekerja secara iteratif untuk menyelesaikan persamaan nonlinier

pada sistem tenaga listrik dengan memperbarui nilai tegangan dan sudut fasa pada setiap iterasi hingga mencapai toleransi kesalahan yang ditentukan. Dalam analisis sistem distribusi maupun transmisi, metode ini banyak digunakan karena mampu memberikan hasil yang baik untuk jaringan dengan jumlah bus yang cukup besar [15]. Pada penelitian ini, metode Newton-Raphson diterapkan melalui perangkat lunak ETAP PowerStation untuk menghitung parameter operasi sistem interkoneksi.

D. Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan adalah selisih antara tegangan pada sisi pengirim dan tegangan pada sisi penerima yang terjadi akibat adanya impedansi saluran. Besarnya jatuh tegangan dipengaruhi oleh panjang penghantar, besar arus yang mengalir, tahanan, reaktansi, serta faktor daya beban. Dalam sistem distribusi, jatuh tegangan harus dijaga agar tetap berada dalam batas standar pelayanan yang diizinkan, karena penurunan tegangan yang berlebihan dapat menurunkan kualitas suplai listrik di sisi konsumen [12,16]. Oleh sebab itu, analisis jatuh tegangan menjadi salah satu indikator penting dalam menilai kelayakan teknis suatu rancangan interkoneksi.

Pada perhitungan teknis, jatuh tegangan (ΔV) pada saluran distribusi dinyatakan dengan:

$$\Delta V = I \times (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (2)$$

Keterangan:

I = Arus saluran (A);
 R = Resistansi saluran (Ω);
 X = Reaktansi saluran (Ω);
 φ = sudut beban ($^\circ$).

E. Rugi-rugi Daya

Rugi-rugi daya adalah daya yang hilang selama proses penyaluran energi listrik dari sumber ke beban. Kehilangan ini terutama disebabkan oleh tahanan penghantar dan arus yang mengalir pada jaringan, serta dipengaruhi pula oleh karakteristik impedansi saluran [17]. Dalam sistem distribusi, rugi-rugi daya aktif maupun reaktif perlu dianalisis karena berhubungan langsung dengan efisiensi penyaluran tenaga listrik. Nilai rugi daya yang terlalu besar menunjukkan bahwa sistem bekerja kurang efisien dan dapat menimbulkan kerugian operasional. Oleh karena itu, perencanaan interkoneksi harus mempertimbangkan agar rugi-rugi daya tetap berada pada batas yang dapat diterima.

Rugi-rugi daya aktif dan reaktif dihitung dengan persamaan:

$$P_{loss} = I^2 R \quad (3)$$

$$Q_{loss} = I^2 X \quad (4)$$

F. Kemampuan Hantar Arus Penghantar

Kemampuan hantar arus (KHA) adalah arus maksimum yang dapat dialirkan secara terus-menerus oleh suatu penghantar tanpa menimbulkan kenaikan temperatur yang melebihi batas yang diizinkan [11]. Nilai KHA dipengaruhi oleh jenis konduktor, luas penampang, temperatur lingkungan, serta kondisi pemasangan penghantar. Dalam perencanaan interkoneksi, pemilihan ukuran penghantar harus disesuaikan dengan arus beban yang akan dilayani agar sistem dapat beroperasi secara

aman dan andal. Pada penelitian ini, penghantar yang digunakan untuk saluran interkoneksi adalah AAAC karena sesuai untuk jaringan distribusi tegangan menengah dan memiliki karakteristik mekanik serta elektrik yang memadai.

Arus nominal dapat dihitung menggunakan Persamaan (5) sebagai berikut:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \cos \varphi} \quad (5)$$

Keterangan:

P = daya (Watt);

V = tegangan saluran (Volt);

$\cos \varphi$ = faktor daya;

Selanjutnya, untuk menentukan KHA kabel digunakan Persamaan (6) sebagai berikut:

$$KHA = 125 \% \times I \quad (6)$$

G. Kapasitor Bank

Kapasitor bank merupakan peralatan kompensasi daya reaktif yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya, mengurangi rugi-rugi daya, dan membantu menjaga profil tegangan pada sistem tenaga listrik. Pemasangan kapasitor bank pada jaringan distribusi umumnya dilakukan ketika terjadi penurunan tegangan yang cukup signifikan atau saat kebutuhan daya reaktif sistem meningkat [6, 18-21]. Dalam penelitian ini, kapasitor bank digunakan sebagai alternatif solusi pada skenario ketika pembangkit Sebuku tidak beroperasi, sehingga tegangan pada ujung sistem tetap berada dalam batas standar yang ditetapkan.

III. METODE PENELITIAN

A. Data Sistem dan Pemodelan

Penelitian ini menggunakan data sistem tenaga listrik PT PLN (Persero) wilayah Malinau dan Sebuku yang meliputi data pembangkit, data saluran distribusi, data beban, serta diagram segaris jaringan 20 kV. Data tersebut digunakan sebagai dasar untuk membangun model sistem eksisting pada perangkat lunak ETAP PowerStation [22]. Pemodelan [23-24] dilakukan untuk merepresentasikan kondisi aktual masing-masing sistem sebelum dilakukan interkoneksi. Sistem Malinau dan Sebuku mula-mula dimodelkan secara terpisah, kemudian dihubungkan melalui saluran distribusi 20 kV yang direncanakan sebagai jalur interkoneksi. Berdasarkan hasil perancangan, saluran penghubung antara kedua sistem berupa saluran udara dari Bus PLTU Malinau ke Bus Tujung pada sistem Sebuku dengan menggunakan penghantar AAAC berpenampang 240 mm² dan panjang 86,6 km.

B. Skenario Simulasi

Untuk mengevaluasi performa sistem interkoneksi, penelitian ini dilakukan pada dua skenario simulasi. Skenario pertama adalah kondisi ketika sistem pembangkit Malinau dan Sebuku beroperasi secara bersamaan. Skenario ini digunakan untuk melihat karakteristik aliran daya pada saat kedua sistem sama-sama menyuplai beban. Skenario kedua adalah kondisi ketika pembangkit Sebuku tidak beroperasi, sehingga pasokan daya ke sistem Sebuku sepenuhnya disuplai dari sistem Malinau melalui saluran

interkoneksi. Pada skenario kedua ini juga dilakukan evaluasi kebutuhan kompensasi daya reaktif, dan hasil simulasi menunjukkan bahwa diperlukan penambahan kapasitor bank sebesar 1.200 kVAr pada ujung sistem Sebuku untuk menjaga tegangan tetap berada dalam batas yang diizinkan. Kedua skenario tersebut dianalisis untuk membandingkan profil tegangan, aliran daya, dan rugi-rugi daya pada sistem interkoneksi yang dirancang.

C. Kriteria Evaluasi

Kelayakan teknis interkoneksi dievaluasi berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu profil tegangan pada setiap bus, besarnya jatuh tegangan, serta rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada saluran. Nilai tegangan hasil simulasi dibandingkan dengan batas toleransi tegangan pelayanan yang berlaku pada sistem distribusi PLN, sedangkan rugi-rugi daya dievaluasi untuk memastikan sistem masih beroperasi secara efisien. Selain itu, pemilihan penghantar interkoneksi juga mempertimbangkan kemampuan hantar arus agar saluran yang direncanakan mampu menyalurkan daya secara aman. Apabila hasil simulasi menunjukkan kondisi operasi yang belum memenuhi kriteria teknis, maka dilakukan penyesuaian desain, termasuk penambahan kapasitor bank, hingga diperoleh konfigurasi sistem yang memenuhi persyaratan operasi. Dengan demikian, evaluasi dilakukan tidak hanya untuk menilai kelayakan interkoneksi, tetapi juga untuk menentukan kebutuhan teknis pendukung agar sistem dapat beroperasi secara andal dan stabil.

D. Alur Penelitian

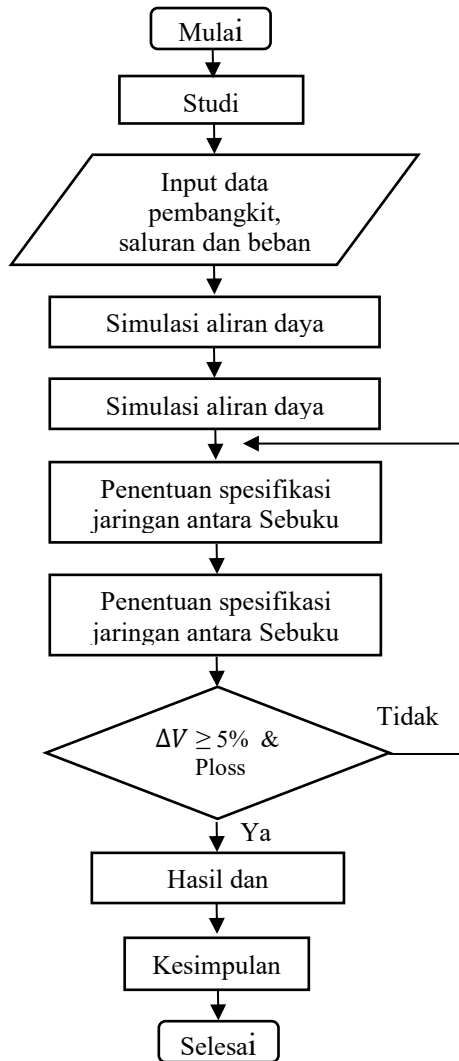
Alur Penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Sedangkan prosedur penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Mengumpulkan dan menginputkan data-data yang akan diperlukan dalam penelitian berupa data single line diagram, data pembangkit, saluran, dan beban PT. PLN (persero) wilayah sebuku dan Malinau.
2. Melakukan simulasi aliran daya PT. PLN (persero) sebuku dan malinau;
3. Melakukan simulasi aliran daya menggunakan Software ETAP pada sistem tenaga listrik PT. PLN (persero) Sebuku dan Malinau untuk mengetahui kondisi sebenarnya saat ini pada masing-masing sistem.
4. Menentukan spesifikasi jaringan atau saluran yang tepat untuk menghubungkan sistem tenaga listrik PT. PLN (persero) Sebuku dan Malinau.
5. Melakukan simulasi aliran daya pada sistem interkoneksi PT. PLN (persero) Sebuku dan Malinau
6. Melakukan simulasi aliran daya pada sistem interkoneksi PT. PLN (persero) Sebuku dan Malinau dan selanjutnya akan dianalisa apakah rugi-rugi daya dan jatuh tegangan sesuai dengan SPLN atau tidak.

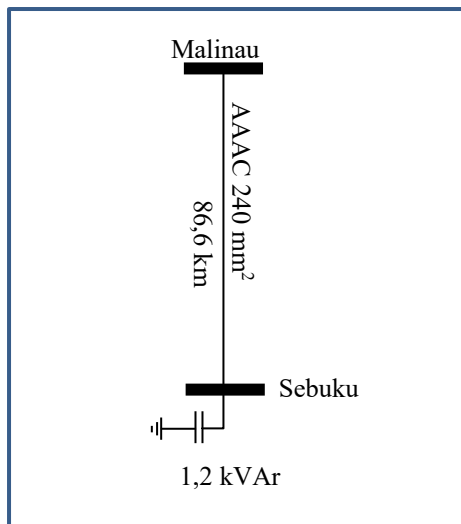
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancangan interkoneksi sistem Malinau–Sebuku melalui jaringan distribusi 20 kV ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan parameter utama rancangan dirangkum pada Tabel I. Untuk mengevaluasi kinerja sistem, simulasi aliran daya dilakukan pada dua skenario operasi, yaitu saat kedua sistem pembangkit beroperasi dan

saat pembangkit Sebuku tidak beroperasi. Ringkasan hasil simulasi untuk kedua skenario tersebut ditunjukkan pada Tabel II.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Skema Rancangan Interkoneksi Sistem Distribusi 20 kV antara Malinau dan Sebuku

Tabel I
Parameter Utama Rancangan Interkoneksi

Parameter	Nilai
Tegangan sistem	20 kV
Titik interkoneksi	Bus PLTU Malinau – Bus Tujung Sebuku
Jenis saluran	Saluran udara
Jenis penghantar	AAAC
Luas penampang penghantar	240 mm ²
Panjang saluran interkoneksi	86,6 km
Metode analisis	Newton–Raphson
Perangkat lunak	ETAP PowerStation
Jumlah skenario simulasi	2
Kapasitor bank tambahan	1.200 kVAr

Tabel II
Ringkasan Hasil Simulasi Aliran Daya

Parameter	Skenario 1: Malinau dan Sebuku beroperasi	Skenario 2: Sebuku tidak beroperasi
Rugi-rugi daya aktif	2.361 kW	2.991 kW
Rugi-rugi daya reaktif	7.802 kVAr	9.719 kVAr
Tegangan minimum	18,961 kV	18,933 kV
Lokasi tegangan minimum	SBWK.115 / SBWK.67 / LSO.66	TNP.34 / NPT.35
Kapasitor bank tambahan	Tidak diperlukan	1.200 kVAr
Status kelayakan tegangan	Memenuhi batas	Memenuhi batas

A. Desain Sistem Interkoneksi Malinau–Sebuku

Hasil penelitian menunjukkan bahwa interkoneksi antara sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) wilayah Malinau dan Sebuku dapat dirancang melalui saluran udara yang menghubungkan Bus PLTU Malinau dengan Bus Tujung pada sistem Sebuku. Saluran interkoneksi yang diusulkan menggunakan penghantar AAAC berpenampang 240 mm² dengan panjang total 86,6 km. Pemilihan penghantar tersebut didasarkan pada kebutuhan penyaluran daya, kemampuan hantar arus penghantar, serta pertimbangan teknis terhadap panjang jalur interkoneksi yang direncanakan. Pada kondisi tertentu, khususnya ketika pembangkit Sebuku tidak beroperasi, diperlukan penambahan kapasitor bank sebesar 1.200 kVAr pada ujung sistem Sebuku untuk menjaga profil tegangan agar tetap berada dalam batas standar pelayanan.

B. Hasil Simulasi pada Kondisi Kedua Sistem Beroperasi

Pada skenario pertama, yaitu saat sistem pembangkit Malinau dan Sebuku beroperasi secara bersamaan, hasil simulasi aliran daya menunjukkan bahwa sistem interkoneksi mampu beroperasi dengan kondisi yang

masih memenuhi batas teknis. Total daya beban sistem tercatat sebesar 10,058 kW dan 7,283 kVAr, dengan rugi-rugi daya total sebesar 0,236 MW dan 0,780 MVAR. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem masih dapat menyalurkan daya dengan rugi-rugi yang relatif dapat diterima untuk jaringan distribusi yang dirancang. Tegangan terendah pada skenario ini terjadi pada Bus SBWK.115, Bus SBWK.67, dan Bus LSO.66 dengan nilai sekitar 18,961 kV hingga 18,962 kV. Nilai tegangan tersebut masih berada dalam batas toleransi tegangan pelayanan jaringan distribusi 20 kV, sehingga secara umum interkoneksi dinilai layak dioperasikan pada kondisi kedua sistem pembangkit aktif.

Dari hasil simulasi juga terlihat bahwa penurunan tegangan terbesar terjadi pada beberapa saluran yang relatif panjang dan memiliki beban cukup besar. Hal ini menunjukkan bahwa panjang penghantar dan distribusi beban sangat berpengaruh terhadap profil tegangan pada sistem interkoneksi. Namun demikian, karena kedua sistem sama-sama menopang beban, aliran daya masih terdistribusi dengan cukup baik sehingga tidak terjadi penurunan tegangan yang melampaui batas yang diizinkan. Dengan kata lain operasi paralel antara sistem Malinau dan Sebuku memberikan dukungan yang lebih baik terhadap kestabilan tegangan dan aliran daya antarsistem.

C. Hasil Simulasi pada Kondisi Pembangkit Sebuku Tidak Beroperasi

Pada skenario kedua, yaitu ketika pembangkit Sebuku tidak beroperasi, seluruh kebutuhan daya pada sistem Sebuku disuplai dari sistem Malinau melalui saluran interkoneksi. Kondisi ini menyebabkan aliran daya pada jalur interkoneksi meningkat, yang berdampak pada kenaikan rugi-rugi daya dan penurunan tegangan pada beberapa bus di ujung sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rugi-rugi daya aktif meningkat menjadi 2,991 kW dan rugi-rugi daya reaktif menjadi 9,719 kVAr. Tegangan terendah pada skenario ini terjadi pada Bus TNP.34 dan Bus NPT.35 dengan nilai masing-masing sebesar 18,933 kV dan 18,935 kV. Nilai ini lebih rendah dibandingkan dengan skenario pertama, namun masih berada dalam rentang batas tegangan yang diizinkan oleh standar pelayanan PLN.

Peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan tegangan pada skenario ini merupakan konsekuensi logis dari bertambahnya aliran daya yang harus ditransmisikan dari Malinau menuju Sebuku. Semakin besar daya yang disalurkan melalui penghantar dengan panjang yang cukup besar, maka semakin besar pula rugi-rugi daya dan jatuh tegangan yang terjadi. Oleh karena itu, pada kondisi ini diperlukan penambahan kapasitor bank sebesar 1.200 kVAr di ujung sistem Sebuku. Penambahan kapasitor bank berfungsi untuk menyediakan kompensasi daya reaktif secara lokal sehingga tegangan pada sisi beban dapat dipertahankan tetap stabil. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun interkoneksi tetap layak secara teknis pada kondisi pembangkit Sebuku tidak beroperasi, sistem memerlukan dukungan kompensasi reaktif agar kualitas tegangan tetap terjaga.

D. Hasil Simulasi pada Kondisi Pembangkit Sebuku Tidak Beroperasi

Berdasarkan dua skenario yang dianalisis, dapat dilihat bahwa interkoneksi Malinau–Sebuku memberikan fleksibilitas operasi yang lebih baik dibandingkan kondisi kedua sistem bekerja secara terpisah. Pada saat kedua pembangkit beroperasi, interkoneksi memungkinkan pembagian aliran daya yang lebih merata sehingga tegangan sistem relatif lebih stabil dan rugi-rugi daya lebih rendah. Sementara itu, pada saat pembangkit Sebuku tidak beroperasi, interkoneksi tetap mampu mempertahankan pasokan daya ke sistem Sebuku, walaupun dengan konsekuensi meningkatnya rugi-rugi daya dan turunnya tegangan pada beberapa bus ujung.

Temuan ini memperlihatkan bahwa interkoneksi tidak hanya berfungsi sebagai sarana transfer daya antarwilayah, tetapi juga sebagai solusi untuk meningkatkan kontinuitas pelayanan listrik pada sistem yang sebelumnya terisolasi. Dalam konteks sistem tenaga listrik di Kalimantan Utara yang banyak beroperasi secara isolated, rancangan interkoneksi seperti ini dapat menjadi salah satu pendekatan penting untuk mendukung peningkatan keandalan sistem. Namun demikian, hasil simulasi juga menegaskan bahwa keberhasilan implementasi interkoneksi sangat dipengaruhi oleh pemilihan spesifikasi penghantar, jarak antarsistem, pola pembebanan, serta kebutuhan kompensasi daya reaktif.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa rancangan interkoneksi Malinau–Sebuku melalui jaringan distribusi 20 kV layak secara teknis untuk diterapkan. Nilai tegangan pada kedua skenario masih memenuhi batas toleransi yang diizinkan, sedangkan rugi-rugi daya masih berada pada tingkat yang dapat diterima untuk sistem distribusi. Oleh karena itu, interkoneksi ini berpotensi menjadi alternatif pengembangan sistem tenaga listrik di wilayah Kalimantan Utara, khususnya untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi pelayanan pada sistem yang selama ini masih beroperasi secara terisolasi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan simulasi aliran daya, interkoneksi sistem tenaga listrik PT PLN (Persero) wilayah Malinau dan Sebuku melalui jaringan distribusi 20 kV dinyatakan layak secara teknis untuk diterapkan. Saluran interkoneksi yang diusulkan berupa saluran udara dari Bus PLTU Malinau ke Bus Tujung pada sistem Sebuku dengan menggunakan penghantar AAAC berpenampang 240 mm² dan panjang 86,6 km.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi ketika sistem pembangkit Malinau dan Sebuku beroperasi secara bersamaan, rugi-rugi daya aktif dan reaktif masing-masing sebesar 2,361 kW dan 7,802 kVAr, dengan tegangan terendah sebesar 18,961 kV. Sementara itu, pada kondisi pembangkit Sebuku tidak beroperasi, rugi-rugi daya aktif dan reaktif meningkat menjadi 2,991 kW dan 9,719 kVAr, dengan tegangan terendah sebesar 18,933 kV. Meskipun terjadi peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan tegangan pada skenario kedua, nilai tegangan sistem masih berada dalam batas toleransi standar pelayanan yang diizinkan.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa pada kondisi pembangkit Sebuku tidak beroperasi, diperlukan penambahan kapasitor bank sebesar 1.200 kVAr pada ujung sistem Sebuku untuk membantu menjaga profil tegangan. Dengan demikian, interkoneksi Malinau–

Sebuku tidak hanya memungkinkan penyaluran daya antarwilayah, tetapi juga berpotensi meningkatkan fleksibilitas operasi, kontinuitas pelayanan, dan keandalan sistem tenaga listrik pada wilayah yang sebelumnya masih beroperasi secara terisolasi.

REFERENSI

- [1] S. Rahmawati, A. Supriyadi, and B. Y. Hadi, "Optimasi jaringan distribusi untuk menjamin stabilitas sistem tenaga listrik," *Jurnal Elektro*, vol. 12, no. 3, pp. 45–52, Mar. 2019.
- [2] D. Santoso, R. Wibowo, and F. N. Prabowo, "Implementasi sistem monitoring cerdas untuk efisiensi sistem distribusi listrik," in *Proc. Int. Conf. Power and Energy*, Bandung, Indonesia, 2020, pp. 112–117.
- [3] Hardyudo *et al.*, "Analisa rugi daya dan jatuh tegangan pada sistem kelistrikan PT Pertamina Ledok untuk meningkatkan keandalan sistem," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 3, 2021.
- [4] Nirwana, Dewi, *et al.*, "Analisis rugi-rugi daya pada jaringan distribusi penyulang Jentak di ULP Jenepono PT PLN (Persero) Sulselrabar," *Jurnal Logika Technology*, 2020.
- [5] R. W. Pratiwi and Haurissa, "Analisa rugi daya berbasis ETAP pada jaringan distribusi 20 kV penyulang Ahuru," *Jurnal Elektronikal dan Komputer*, vol. 4, no. 1, 2020.
- [6] P. Julianto and Fitriani, "Modified genetic algorithm for capacitive compensation in radial distribution systems," in *Proc. 11th Int. Conf. Electr. Eng., Comput. Sci. Informatics (EECSI)*, 2024, pp. 659–665.
- [7] P. Julianto, "Rekonfigurasi jaringan pada sistem distribusi radial untuk mereduksi rugi-rugi daya menggunakan algoritma genetika adaptif," *Jurnal Elekrika Borneo*, vol. 9, no. 1, pp. 15–19, 2023.
- [8] P. Julianto, "Kompensasi kapasitif dengan injeksi daya reaktif untuk mereduksi rugi-rugi daya aktif pada sistem distribusi skala besar," *Jurnal Elekrika Borneo*, vol. 9, no. 2, pp. 36–43, 2023.
- [9] P. Julianto and R. C. J. Manapa, "Rekonfigurasi jaringan untuk mereduksi jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi 20 kV PT PLN Tarakan," *Buletin Profesi Insinyur*, vol. 7, no. 2, pp. 94–100, 2024.
- [10] Pilat *et al.*, "Analisa rugi-rugi daya pada saluran distribusi 20 kV di Kabupaten Kepulauan Sangihe," *Jurnal Teknik Elektro Manado*, 2020.
- [11] S. R. Monantun, *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Paket Keahlian Teknik Ketenagalistrikan*. Jakarta, Indonesia: Kementerian Pendidikan Dasar, Menengah, dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2014.
- [12] S. Bhowmik, S. K. Goswami, and P. K. Bhattacharjee, "A new power distribution system planning through reliability evaluation technique," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 54, no. 3, pp. 169–179, Jun. 2000.
- [13] A. Nizar and B. Suprianto, "Analisis rugi daya menggunakan ETAP pada jaringan distribusi 20 kV penyulang Bagong," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 195–201, 2021.
- [14] V. Janis, M. Tuegeh, F. Lisi, and H. Tumaliang, "Perencanaan sistem distribusi 20 kV Siau tahun 2020," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 2, no. 1, 2013.
- [15] S. K. Khator and L. C. Leung, "Power distribution planning: A review of models and issues," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 1151–1159, Aug. 1997.
- [16] SPLN 72-1987, *Spesifikasi Desain untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR)*. Jakarta, Indonesia: Departemen Pertambangan dan Energi Perusahaan Umum Listrik Negara, 1987.
- [17] D. S. Reddy and C. S. Kumari, "Transient stability analysis of a combined cycle power plant using ETAP software," in *Proc. IEEE 7th Int. Adv. Comput. Conf.*, 2017, pp. 510–515.
- [18] M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 4, no. 1, pp. 725–734, 1989.
- [19] M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 4, no. 1, pp. 735–743, 1989.
- [20] H.-D. Chiang, J.-C. Wang, O. Cockings, and H.-D. Shin, "Optimal capacitor placements in distribution systems. I. A new formulation and the overall problem," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 2, pp. 634–642, 1990.
- [21] M. A. Farrag, A. F. Khalil, and A. Y. Abdelaziz, "Optimal conductor selection and capacitor placement in radial distribution system using nonlinear AC load flow equations and dynamic load model," *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2020.
- [22] L. M. Hysman, T. Hidayat, C. Saleh, I. M. Wartana, and T. Herbasuki, "Pelatihan software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program)," *Industri Inovatif*, vol. 7, no. 1, pp. 7–11, 2017.
- [23] K. Nagaraju, S. Sivanagaraju, T. Ramana, and P. V. Prasad, "A novel load flow method for radial distribution systems for realistic loads," *Electr. Power Compon. Syst.*, vol. 39, no. 1, pp. 128–141, 2011.
- [24] A. Chanhome, Y. Kumsuwan, and A. Sangswang, "A modification of Newton–Raphson power flow for using in LV distribution system," *Energies*, vol. 14, no. 22, Art. no. 7600, 2021.