

# Analisis Aliran Daya dan Kualitas Daya *Voltage Uprating* 70 kV ke 150 kV Menggunakan *Performance Index*

Muhammad Marozi Effendi<sup>\*a)</sup>, Budi Eko Prasetyo<sup>a)</sup>, Muhammad Fahmi Hakim<sup>a)</sup>

(Artikel diterima: Mei 2021, direvisi: Juni 2021)

**Abstrak** Kebutuhan energi listrik semakin meningkat seiring dengan perkembangan beban. Adanya perkembangan beban menyebabkan arus pada saluran transmisi semakin besar sehingga profil tegangan menurun dan losses semakin besar khususnya pada saluran transmisi 70 kV. Sehingga diperlukan cara untuk menanggulangi masalah tersebut yaitu dengan mempertinggi level tegangan atau *voltage uprating* dari 70 kV menjadi 150 kV. Penelitian ini dilakukan pada sistem 67 bus di regional Jawa Timur subsistem Paiton-Grati. Terdapat 20 saluran transmisi 70 kV yang akan di-uprating ke 150 kV. Pemodelan sistem dan simulasi aliran daya saat kondisi sebelum (*Initial Condition*) dan sesudah uprating (*Uprating Condition*) menggunakan software ETAP. Selanjutnya menganalisis aliran daya dan kualitas daya berdasarkan profil tegangan dan losses saluran transmisi dari masing-masing kondisi. Serta menggunakan *performance index* untuk membandingkan performa dari *Initial* dan *Uprating Condition* dimana terdiri dari *Voltage Performance Index (PIV)* dan *Active Power Performance Index (PIMW)*. Rata-rata fluktuasi tegangan saat *Initial Condition* adalah sebesar -3.17%, dimana terjadi kenaikan profil tegangan saat *Uprating Condition* menjadi sebesar -2.24% dengan selisih sebesar 0.93%. Losses saluran transmisi saat *Initial Condition* sebesar 4.253%, dimana terjadi penurunan losses saat *Uprating Condition* menjadi sebesar 3.917%. Sehingga selisih losses saluran transmisi antara *Initial* dan *Uprating Condition* sebesar 0.336%. *Performance Index* saat *Initial Condition* sebesar 0.18535 sedangkan saat *Uprating Condition* sebesar 0.15658, sehingga *Uprating Condition* memiliki performa yang lebih baik.

**Kata-kata kunci** : *Voltage Uprating*, Aliran Daya, Kualitas Daya, Profil Tegangan, Losses, *Performance Index*

## 1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik semakin meningkat seiring dengan perkembangan beban di sektor industri, bisnis, rumah tangga, maupun publik. Beban puncak sistem tenaga listrik di provinsi Jawa Timur tahun 2018 sebesar 5756 MW yang tercapai pada bulan November tahun 2018 [1]. Adanya perkembangan beban menyebabkan arus pada saluran transmisi semakin besar. Hal tersebut salah satunya menyebabkan profil tegangan menurun pada bus dan losses pada penghantar semakin besar khususnya pada saluran transmisi 70 kV. Upaya yang dilakukan untuk menanggulangnya adalah dengan mempertinggi *level* tegangan sistem atau istilahnya adalah *voltage uprating* dari 70 kV menjadi 150 kV

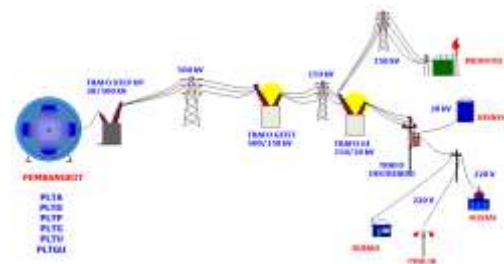
Dari permasalahan paparan di atas, maka penulis akan membahas analisis aliran daya berdasarkan profil tegangan dan losses saluran transmisi saat kondisi sebelum dan sesudah *uprating* dari 70 kV menjadi 150 kV. Serta menggunakan *performance index* untuk membandingkan performa dari kondisi sebelum dan sesudah *uprating* dimana terdiri dari *Voltage Performance Index (PIV)* dan *Active Power Performance Index (PI<sub>MW</sub>)*.

## 2. Tinjauan Pustaka

### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen, antara lain unit pembangkitan, saluran transmisi, gardu induk dan jaringan distribusi yang berhubungan sedemikian rupa dan bekerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Secara garis besar skema sistem tenaga listrik dapat digambarkan dengan

skema sebagai berikut [2].



Gambar 2-1 Skema Sistem Tenaga Listrik

### 2.2 Saluran Transmisi

Saluran transmisi dibagi menjadi tiga kategori berdasarkan panjangnya yang terdiri dari saluran transmisi pendek (*short line*), menengah (*medium line*), panjang (*long line*). Terdapat rangkaian ekuivalen pada masing-masing kategori saluran transmisi tersebut [3].

### 2.3 Aliran Daya

Metode Newton-Rhapson merupakan salah satu metode penyelesaian aliran daya dimana memiliki kecepatan konvergen kuadratik, oleh karena itu metode Newton-Rhapson merupakan metode matematis yang lebih unggul dibandingkan dengan metode lainnya. Untuk sistem tenaga listrik yang besar, metode Newton-Rhapson sangat efisien dan praktis dalam menyelesaikan analisis aliran daya. Jumlah iterasi yang diperlukan untuk memperoleh penyelesaian tidak bergantung pada ukuran sistem [4]. Tujuan analisis aliran daya digunakan untuk menentukan tegangan, arus, daya aktif, dan daya reaktif di berbagai macam titik/bus pada jaringan listrik dalam kondisi operasi normal.

\* Korespondensi: [marozi.effendi98@gmail.com](mailto:marozi.effendi98@gmail.com)

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Polinema.  
Jalan Soekarno-Hatta No. 9 Malang 65141

## 2.4 Kualitas Daya

### 2.4.1 Profil Tegangan

Berdasarkan *International Electrical Commission (IEC)* mengenai "*IEC Standart Voltages*" dimana untuk sistem dengan tegangan nominal diatas 35 kV dan tidak sampai dengan 230 kV ( $35 \text{ kV} \leq V_{nom} < 230 \text{ kV}$ ) memiliki standar tegangan sebesar  $\pm 5\%$  [5]. Sedangkan Permen ESDM nomor 03 tahun 2007 menyatakan bahwa fluktuasi tegangan sistem untuk 70 kV dan 150 kV harus dipertahankan nilainya +5% dan -10% dari tegangan nominal sistem tersebut [6]. Besarnya fluktuasi tegangan dinyatakan dalam prosen untuk mengacu pada standar batasan tegangan adalah sebagai berikut.

$$\%Fluktuasi = \frac{V - V_{nom}}{V_{nom}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Keterangan:

V = tegangan kerja pada bus

$V_{nom}$  = tegangan nominal pada bus

### 2.4.2 Losses Saluran Transmisi

Standar *losses* untuk saluran transmisi berdasarkan *IEC* mengenai "*Efficient Electrical Energy Transmission and Distribution*" harus dijaga sebesar 2.5% [7]. Besarnya *losses* untuk saluran transmisi dalam prosen setelah dibandingkan dengan daya kirim ( $P_{ij}$ ) adalah sebagai berikut.

$$\%Losses = \frac{P_{Lij}}{P_{ij}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Dimana:

$P_{Lij}$  = losses saluran transmisi antara bus i dan j

$P_{ij}$  = daya kirim antara bus i dan j

## 2.5 Performance Index

*Performance Index (PI)* merupakan sebuah indeks yang digunakan untuk mengukur deviasi dari sebuah variabel sistem tenaga listrik seperti tegangan bus, aliran daya dari nilai rating yang terukur. Terdapat 2 jenis *Performance Index*, yaitu *Voltage Performance Index (PI<sub>V</sub>)* dan *Active Power Performance Index (PI<sub>MW</sub>)* [8].

### 2.5.1 Voltage Performance Index (PI<sub>V</sub>)

*Voltage Performance Index (PI<sub>V</sub>)* digunakan untuk mengidentifikasi seberapa bahayanya pelepasan saluran transmisi sehingga stabilitas tegangan dapat tetap dipertahankan. Indeks ini juga dapat membantu dalam menentukan batas tegangan lebih pada bus. Berikut adalah persamaan dari *Voltage Performance Index (PI<sub>V</sub>)*.

$$PI_V = \sum_{i=1}^n \left( \frac{W}{2z} \right) \left\{ \frac{(|V_i| - |V_i^{SP}|)}{\Delta V_i^{lim}} \right\}^{2z} \quad (2.3)$$

Keterangan:

$PI_V$  = Voltage Performance Index

$V_i$  = tegangan pada bus i

$V_i^{SP}$  = tegangan bus spesifik pada bus i

$\Delta V_i^{lim}$  = batas deviasi tegangan yang dapat kita ukur dengan mengambil nilai rata-rata tegangan minimum dan maksimum yang diizinkan di bus i

W = koefisien weighting (=1)

z = eksponen fungsi penalti (=1)

n = jumlah bus

### 2.6 Active Power Performance Index (PI<sub>MW</sub>)

*Active Power Performance Index (PI<sub>MW</sub>)* digunakan untuk mengidentifikasi aliran daya lebih pada saluran transmisi. Indeks ini juga akan membantu dalam menentukan batas overload. Berikut adalah persamaan dari *Active Power Performance Index (PI<sub>MW</sub>)*.

$$PI_{MW} = \sum_{i=1}^{N_L} \left( \frac{W}{2z} \right) \left( \frac{P_i}{P_i^{max}} \right)^{2z} \quad (2.4)$$

Keterangan:

$PI_{MW}$  = Active Power Performance Index

$P_i$  = aliran daya aktif (MW) pada line i

$P_i^{max}$  = kapasitas aliran daya maksimum pada line i

W = koefisien weighting (=1)

Z = eksponen fungsi penalti (=1)

$N_L$  = jumlah saluran transmisi

Persamaan  $PI_{max}$ :

$$P_i^{max} = \frac{V_i \cdot V_j}{X} \quad (2.5)$$

Keterangan:

$V_i$  = tegangan pada bus i

$V_j$  = tegangan pada bus j

X = reaktansi dari transmisi antara bus i dan bus j

Sehingga nilai *Performance Index (PI)* adalah sebagai berikut.

$$PI = PI_V + PI_{MW} \quad (2.6)$$

Keterangan:

PI = Performance Index

$PI_V$  = Voltage Performance Index

$PI_{MW}$  = Active Power Performance Index

## 3. Metodologi

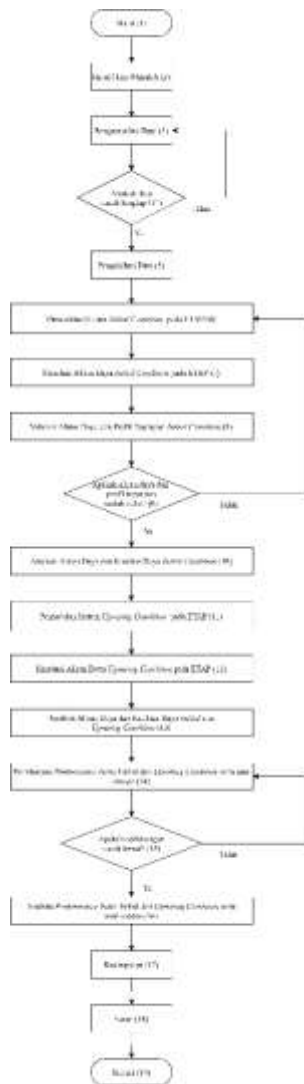
### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Tempat penelitian berada di PT. PLN (PERSERO) Unit Pelayanan Pengatur Beban Jawa Timur (UP2B JATIM). Waktu penelitian ini berlangsung pada bulan November 2019 sampai Juni 2020.

### 3.2 Objek Penelitian

Objek penelitian ini dilakukan pada sistem 67 bus di regional Jawa Timur subsistem Paiton-Grati. Terdapat 20 saluran transmisi 70 kV yang akan di-upgrading ke 150 kV. Pemodelan sistem dan simulasi aliran daya saat kondisi sebelum (*Initial Condition*) dan sesudah (*Upgrading Condition*) upgrading dari 70 kV menjadi 150 kV menggunakan bantuan *software ETAP*. Data yang digunakan untuk simulasi adalah berdasarkan data dari PT. PLN (Persero) saat beban puncak yaitu pada tanggal 26 April 2019 jam 19:00.

### 3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3-1 Diagram Alir Penelitian

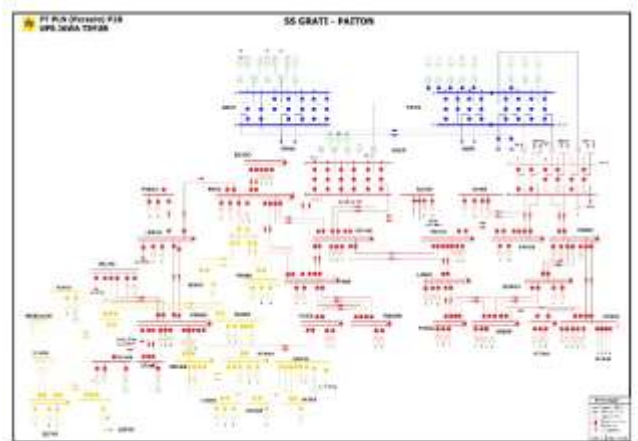
Gambar 3-1 menunjukkan diagram alir penelitian, adapun langkah alirnya adalah sebagai berikut.

1. Mulai.
2. Mengidentifikasi Masalah.
3. Pengumpulan data.
4. Apakah data sudah lengkap? Jika ya lanjut ke langkah 5, sedangkan jika tidak kembali ke langkah 3.
5. Pemodelan sistem saat *Initial Condition* pada software ETAP.
6. Simulasi aliran daya saat *Initial Condition* pada software ETAP.
7. Validasi aliran daya dan profil tegangan saat *Initial Condition* dengan batas  $\pm 5\%$ .
8. Apakah aliran daya dan profil tegangan saat *Initial Condition* sudah valid? Jika ya lanjut ke langkah 9, sedangkan jika tidak kembali ke langkah 6.
9. Menganalisis aliran daya dan kualitas daya saat *Initial Condition*.
10. Pemodelan sistem saat *Upgrading Condition* pada software ETAP.

11. Simulasi aliran daya saat *Upgrading Condition* pada software ETAP.
12. Menganalisis aliran daya dan kualitas daya saat *Upgrading Condition*.
13. Melakukan perhitungan *Performance Index* yang terdiri dari *Voltage Performance Index* dan *Active Performance Index* saat *Initial* dan *Upgrading Condition*.
14. Apakah perhitungan *Performance Index* sudah benar? Jika ya lanjut ke langkah 15, sedangkan jika tidak kembali ke langkah 13.
15. Menganalisis hasil *Performance Index* saat *Initial* dan *Upgrading Condition*.
16. Kesimpulan.
17. Saran.
18. Selesai.

## 4. Pembahasan

### 4.1 Overview Subsistem Paiton-Grati

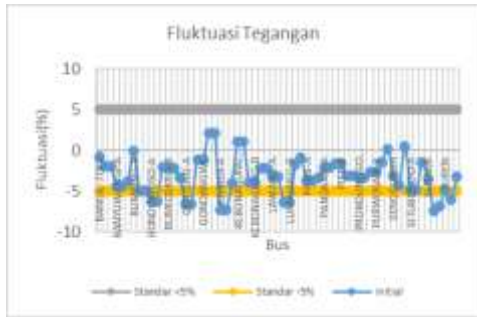


Gambar 4-1 *Single Line Diagram* Subsistem Paiton-Grati

Gambar 4-1 menunjukkan *single line diagram* dari subsistem Paiton-Grati, yang terdapat 3 level tegangan yaitu 500 kV (biru), 150 kV (merah), dan 70 kV (kuning). Sistem *uprating* saluran transmisi dari 70 kV menjadi 150 kV dilakukan berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2019 -2028 yaitu tentang pengembangan transmisi. Terdapat 55 saluran transmisi 150kV dan 20 saluran transmisi 70 kV dimana saat *Upgrading Condition*, saluran transmisi 70 kV tersebut akan di-*uprating* ke 150 kV secara keseluruhan.

### 4.2 Analisis Aliran Daya dan Kualitas Daya *Initial Condition*

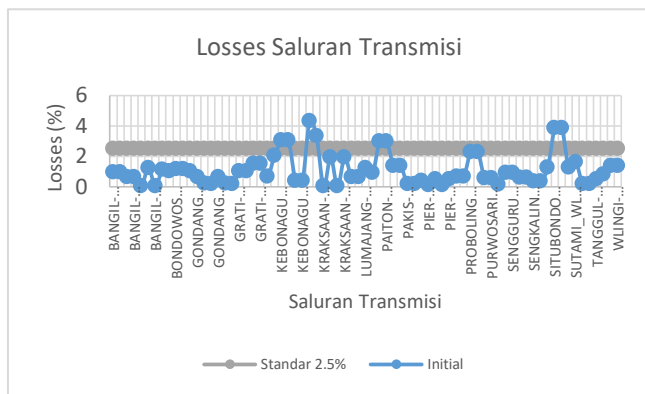
#### 4.2.1 Analisis Profil Tegangan *Initial Condition*



Gambar 4-2 Grafik Fluktuasi Tegangan *Initial Condition*

Gambar 4-2 menunjukkan bahwa terdapat profil tegangan bus yang tidak memenuhi standar tegangan IEC yaitu sebesar  $\pm 5\%$  saat *Initial Condition*. Rata-rata %Fluktuasi tegangan *Initial Condition* adalah sebesar -3.17%.

#### 4.2.2 Analisis Losses Saluran Transmisi *Initial Condition*



Gambar 4-3 Grafik Losses Saluran Transmisi *Initial Condition*

Gambar 4-3 menunjukkan bahwa terdapat losses saluran transmisi yang tidak memenuhi standar dari IEC yaitu sebesar 2.5% saat *Initial Condition*. Berikut adalah hasil aliran daya saat *Initial Condition*.

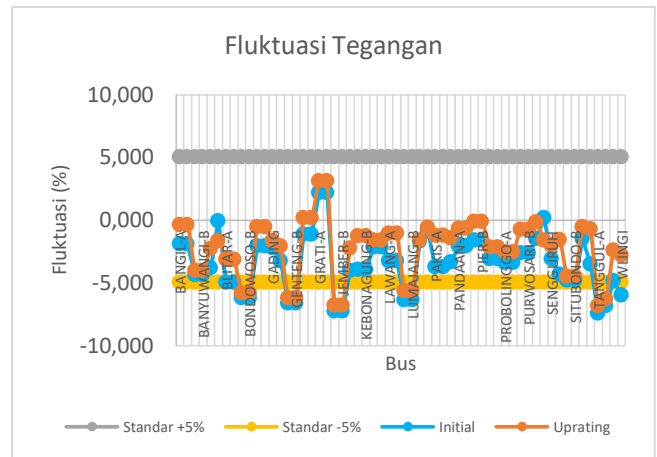
Tabel 4-1 Aliran Daya *Initial Condition*

No	Aliran Daya	MW	MVAR
1	Daya Kirim Total	1858.181 1	550.52 2
2	Losses Transmisi Total	79.032	298.76 7
<b>Losses (%)</b>		<b>4.253</b>	

Tabel 4-1 menunjukkan bahwa daya kirim total sebesar 1858.181 MW + j550.522 MVAR saat *Initial Condition*. Losses total untuk saluran transmisi sebesar 79.032 MW + j298.767 MVAR, sehingga %Losses saat *Initial Condition* sebesar 4.253%.

### 4.3 Analisis Aliran Daya dan Kualitas Daya *Initial* dan *Upgrading Condition*

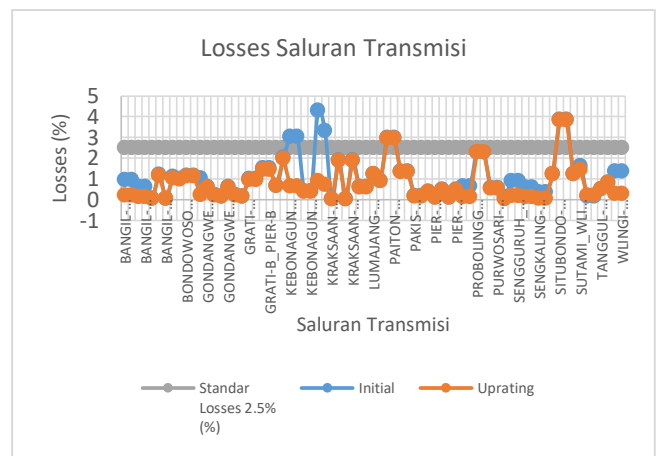
#### 4.3.1 Analisis Profil Tegangan *Initial* dan *Upgrading Condition*



Gambar 4-4 Grafik Fluktuasi Tegangan Antara *Initial* dan *Upgrading Condition*

Gambar 4-4 menunjukkan bahwa terjadi kenaikan fluktuasi tegangan antara *Initial* dan *Upgrading Condition*. Rata-rata %Fluktuasi tegangan *Upgrading Condition* adalah sebesar -2.24%. Sehingga selisih rata-rata %Fluktuasi tegangan antara *Initial* dan *Upgrading Condition* adalah sebesar 0.93%. Maka, dapat disimpulkan bahwa *uprating* dari 70 kV menjadi 150 kV dapat memperbaiki profil tegangan.

#### 4.3.2 Analisis Losses Saluran Transmisi *Initial* dan *Upgrading Condition*



Gambar 4-5 Losses Saluran Transmisi Antara *Initial* dan *Upgrading Condition*

Gambar 4-5 menunjukkan bahwa terjadi penurunan losses saluran transmisi antara *Initial* dan *Upgrading Condition*. Berikut adalah hasil aliran daya antara *Initial* dan *Upgrading Condition*.

Tabel 4-2 Aliran Daya Antara *Initial* dan *Upgrading Condition*

No	Aliran Daya	Initial		Upgrading	
		MW	MVAR	MW	M
1	Daya Kirim Total	1858.1811	550.522	185 1.0711	48 4.547
2	Losses Transmisi Total	79.032	298.767	72.5 14	26 6.983
<b>Losses (%)</b>		<b>4.253</b>		<b>3.917</b>	

Tabel 4-2 menunjukkan bahwa daya kirim total sebesar 1851.071 MW + j550.522 MVAR saat *Upgrading Condition*. *Losses* total untuk saluran transmisi sebesar 72.514 MW + j266.983 MVAR, sehingga %*Losses* saat *Upgrading Condition* sebesar 3.917%. *Losses* saluran transmisi saat *Upgrading Condition* lebih kecil dibandingkan saat *Initial Condition* dengan selisih sebesar 6.518 MW + j31.784 MVAR.

#### 4.4 Analisis Performance Index

*Performance Index* yang akan dibandingkan adalah pada *Initial* dan *Upgrading Condition* serta apabila terjadi satu saluran transmisi mengalami *outages* pada masing-masing kondisi. Saluran transmisi yang mengalami *outages* (F1) adalah salah satu dari saluran BANGIL\_SUKOREJO.

Tabel 4-3 Performance Index (PI) *Initial* dan *Upgrading Condition*

No	Condition	PI <sub>v</sub>	PI <sub>MW</sub>	PI
1	Initial	0.04797	0.13738	0.18535
2	Initial + F1	0.04827	0.13751	0.18578
3	Upgrading	0.02948	0.1271	0.15658
4	Upgrading + F1	0.02966	0.12714	0.15681

Tabel 4-3 menunjukkan besarnya PI saat *Initial* dan *Upgrading Condition* masing-masing sebesar 0.18535 dan 0.15658, dimana mengalami penurunan dengan selisih sebesar 0.02877. Terjadi kenaikan PI saat terjadi *outage* saat *Initial* dan *Upgrading Condition*, dimana kenaikannya masing-masing sebesar 0.00043 dan 0.00023. Sehingga, *Upgrading Condition* memiliki performa yang lebih baik dibandingkan saat *Initial Condition* karena memiliki *Performance Index* (PI) lebih kecil.

#### 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Aliran daya saat kondisi sebelum upgrading dari 70 kV menjadi 150 kV atau saat *Initial Condition* adalah memiliki daya kirim total sebesar 1858.181 MW + j550.522 MVAR dan *losses* saluran transmisi total sebesar 79.032 MW + j298.767 MVAR dengan %*Losses* sebesar 4.253% saat beban puncak. Rata-rata fluktuasi tegangan saat *Initial Condition* adalah sebesar -3.17%. Terdapat profil tegangan pada bus 70 kV dan 150 kV yang tidak memenuhi "IEC Standart Voltages" yaitu ±5%. Terdapat *losses* saluran transmisi 70 kV dan 150 kV yang tidak memenuhi standar IEC *losses* saluran transmisi sebesar 2.5%.
2. Aliran daya saat kondisi sebelum dan sesudah upgrading dari 70 kV menjadi 150 kV atau saat *Initial* dan *Upgrading Condition* adalah terjadi penurunan *losses* saluran transmisi saat *Upgrading Condition* menjadi sebesar 72.514 MW + j266.983 MVAR dengan %*Losses* sebesar 3.917% serta daya kirim total sebesar 1851.071 MW + j484.547 MVAR, lebih kecil dibandingkan saat *Initial Condition* dengan selisih *losses* sebesar 6.518 MW + j31.784 MVAR. Rata-rata fluktuasi tegangan saat *Upgrading Condition* adalah sebesar -2.24%, dimana terjadi kenaikan profil tegangan saat *Upgrading*

*Condition* dibandingkan saat *Initial Condition* dengan selisih sebesar 0.93%. Sehingga *upgrading* dari 70 kV menjadi 150 kV dapat memperbaiki profil tegangan.

3. *Performance Index* saat kondisi sebelum dan sesudah *upgrading* dari 70 kV menjadi 150 kV atau saat *Initial* dan *Upgrading Condition* pada subsistem Paiton-Grati adalah *Performance Index* saat *Initial Condition* sebesar 0.18535 sedangkan saat *Upgrading Condition* sebesar 0.15658. Ketika salah satu saluran transmisi mengalami *outage*, selisih *Performance Index* saat *Upgrading Condition* sebesar 0.00023 lebih kecil dibandingkan saat *Initial Condition* sebesar 0.00043. Sehingga *Upgrading Condition* memiliki performa yang lebih baik.

#### Daftar Pustaka

- [1] Anonim1, Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero) 2019-2028, Jakarta: PT. PLN (Persero), 2019.
- [2] S. Suropto, Sistem Tenaga Listrik, Yogyakarta: LP3M UMY, 2017.
- [3] D. P. Kothari and I. J. Nagrath, Power System Engineering Second Edition, New Delhi: McGraw-Hill, 2008.
- [4] H. Saadat, Power System Analysis, United States: McGraw-Hill, 1999.
- [5] Anonim2, IEC Standart Voltages (IEC 60038), Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2002.
- [6] Anonim3, Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor: 03 Tahun 2007, Jakarta: Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2007.
- [7] Anonim4, Efficient Electrical Energy Transmission and Distribution, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2007.
- [8] S. Burada, D. Joshi and K. D. Mistry, "Contingency Analysis of Power System by Using Voltage and Active Power Performance Index," *International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES-2016)*, pp. 1-5, 2016.