

ANALISIS PENGARUH KONDISI *INFEED CURRENT* TERHADAP PEMBACAAN IMPEDANSI GANGGUAN OLEH *DISTANCE RELAY* PADA SALURAN TRANSMISI

Dhiny Aminarti¹, Sutisna², Asep Andang³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Siliwangi

Email: 217002003@student.unsil.ac.id¹, sutisna@unsil.ac.id², andhangs@unsil.ac.id

Corresponding Author : Dhiny Aminarti

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Siliwangi

Email: 217002003@student.unsil.ac.id

Abstrak – Fenomena *infeed current* pada saluran transmisi 150 kV GI Sunyaragi–Mandirancan–Arjawinangun telah mempengaruhi akurasi pengukuran impedansi oleh rele jarak secara signifikan. Ketidaktepatan tersebut mengakibatkan kesalahan estimasi titik gangguan yang memicu kegagalan operasi, baik berupa jangkauan kurang maupun jangkauan berlebih pada sistem proteksi. Metode yang diterapkan adalah perhitungan nilai faktor *infeed* (k) sebagai faktor koreksi kesalahan pembacaan oleh rele jarak pada simulasi gangguan hubung singkat di berbagai konfigurasi jaringan (kondisi *infeed current*). Hasil analisis menunjukkan bahwa Fenomena *underreach* (jangkauan jauh) terjadi saat ada pembangkit di GI depan dengan kenaikan impedansi sebesar 65,89% dari kondisi stabil (tanpa *infeed*) dengan impedansi 1,29 Ω menjadi 2,14 Ω . Kemudian terjadi juga pada perubahan saluran ganda ke tunggal naik 43,41% menjadi 1,85 Ω dari 1,29 Ω , serta pada saat ada perubahan saluran ganda ke ganda naik sebesar 30,23% menjadi 1,68 Ω . Sedangkan, fenomena *overreach* terjadi pada perubahan saluran tunggal ke ganda yang mengalami penurunan impedansi sebesar 6,20% dari 1,29 Ω menjadi 1,21 Ω . Selain itu, keberadaan pembangkit listrik di gardu induk depan memicu fenomena jangkauan kurang yang paling signifikan dengan kenaikan 151,93% dari impedansi sebenarnya pada kondisi stabil 1,29 Ω menjadi 3,25 Ω , terutama pada gangguan satu fasa ke tanah yang mengalami lonjakan impedansi akibat kontribusi arus urutan nol dari trafo. Dari penelitian ini terbukti bahwa nilai faktor *infeed* (k) mampu mengoreksi kesalahan pembacaan impedansi oleh rele jarak karena faktor *infeed current* dengan mengalikan nilai faktor *infeed* (k) ke impedansi *setting* zona proteksinya.

Kata-kata Kunci: *Infeed Current, Rele Jarak, Impedansi Gangguan, Nilai Faktor Infeed (k)*

Abstract – The *infeed current* phenomenon on the 150 kV Sunyaragi–Mandirancan–Arjawinangun transmission line has significantly affected the accuracy of impedance measurement by distance relays. Such inaccuracy results in fault location estimation errors that trigger operational failures, in the form of either *underreach* or *overreach* in the protection system. The applied method includes short circuit fault simulations on various network configurations (*infeed current* conditions) as well as the calculation of the *infeed* factor (k) value as a correction factor for reading errors by the distance relay. The analysis results show that the *underreach* phenomenon occurs when there is a generator at the remote substation with an impedance increase of 65.89% from the stable condition (without *infeed*) with an impedance of 1.29 Ω becoming 2.14 Ω . Then it also occurs during a change from double to single line rising by 43.41% to 1.85 Ω from 1.29 Ω , as well as during a change from double to double line rising by 30.23% to 1.68 Ω . Meanwhile, the *overreach* phenomenon occurs during a change from single to double line which experiences an impedance decrease of 6.20% from 1.29 Ω to 1.21 Ω . In addition, the presence of a power plant at the remote substation triggers the most significant *underreach* phenomenon with an increase of 151.93% from the actual impedance in the stable condition of 1.29 Ω to 3.25 Ω , especially in single phase to ground faults which experience an impedance surge due to zero sequence current contribution from transformer. From this research, it is proven that the *infeed* factor (k) value is capable of correcting impedance reading errors by the distance relay due to the *infeed* current factor by multiplying the *infeed* factor (k) value to its protection zone setting impedance.

Keywords: *Infeed Current, Distance Relay, Fault Impedance, Infeed Factor Value (k).*

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung aktivitas masyarakat, industri, hingga layanan publik. Sistem tenaga listrik terutama sistem transmisi menyalurkan daya listrik dari pembangkit energi listrik menuju jaringan distribusi yang nantinya akan diteruskan kepada konsumen [1]. Jaringan transmisi yang ada di Indonesia terdiri dari berbagai tegangan operasi mulai dari 33 kV sampai dengan 500 kV. Dalam operasinya pada tegangan tinggi, transmisi memungkinkan penyaluran daya dalam jumlah besar ke daerah-daerah yang jauh [2]. Keandalan sistem transmisi sangat berpengaruh terhadap keberlangsungan dan kontinuitas penyaluran energi listrik dari pembangkit ke konsumen. Gangguan yang terjadi pada saluran transmisi, seperti hubung singkat dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan bahkan pemadaman luas apabila tidak segera diatasi. Oleh karena itu, diperlukan sistem proteksi secara cepat, selektif, sensitif, dan andal untuk menjaga keandalan sistem tenaga listrik [3].

Salah satu proteksi utama pada jaringan transmisi adalah *distance relay*. *Distance relay* adalah proteksi jaringan transmisi yang melindungi sepanjang saluran transmisi (penghantar) yang menghubungkan satu gardu induk ke gardu induk lainnya. Rele ini akan bekerja berdasarkan prinsip pengukuran impedansi, yaitu dengan membandingkan tegangan dan arus pada saluran untuk menentukan posisi gangguan. *Distance relay* dibagi dalam beberapa zona proteksi utama yang melindungi sekitar 80% panjang saluran, zona 2 sebagai cadangan dekat dengan cakupan sekitar 120%, serta zona 3 sebagai cadangan jauh dengan cakupan hingga 200% [4].

Namun pada keadaan di lapangan, sistem transmisi tenaga listrik saling terkoneksi satu sama lain yang menyebabkan ketika ada gangguan maka arus gangguan mendapatkan suplai dari sisi lain atau disebut kondisi *infeed current*. *Infeed current* terjadi ketika terdapat suplai arus tambahan yang mengalir menuju titik gangguan dari saluran atau sumber lain di jalur yang sedang diamankan. Kondisi ini menyebabkan arus yang masuk ke rele tidak sama dengan arus gangguan sebenarnya. Akibat dari hal tersebut, nilai impedansi yang terbaca oleh rele menjadi tidak tepat dan menimbulkan terjadinya fenomena *overreach* (impedansi terbaca lebih kecil) dan *underreach* (impedansi terbaca lebih besar). Kedua kondisi tersebut dapat menyebabkan keandalan dan selektifitas rele jarak berkurang [5].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut sebuah solusi ditawarkan yakni dengan menghitung nilai faktor *infeed* (k). Faktor ini menggambarkan perbandingan antara arus gangguan total dengan arus yang terbaca oleh rele. Nilai k inilah yang dapat dijadikan dasar untuk melakukan koreksi *setting* rele, sehingga proteksi tetap bekerja andal serta merepresentasikan jarak gangguan yang sebenarnya meskipun terjadi *infeed current*. Selain itu dilakukan pula analisis pengaruh jenis gangguan saat kondisi *infeed current* terhadap pembacaan impedansi gangguan oleh *distance relay*. Penelitian ini dilakukan melalui simulasi menggunakan *software* ETAP 19.0.1

dengan studi kasus pada saluran transmisi 150 kV Sunyaragi – Mandirancan – Arjawinangun yang diskenarioikan dengan beberapa gangguan simetris dan tidak simetris serta letak gangguan yang berbeda.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Prinsip kerja rele jarak berdasarkan pengukuran impedansi saluran transmisi yang nilainya sebanding dengan panjang salurannya [6]. Rele ini membandingkan tegangan dan arus yang akan kemudian diperoleh nilai impedansi hasil pengukuran rele tersebut. Impedansi yang terukur nantinya akan dibandingkan dengan impedansi *setting* [7].

1. Perhitungan Impedansi Gangguan Fasa-Fasa

Perhitungan impedansi gangguan fasa-fasa dapat dilakukan menggunakan Persamaan 1 berikut [8].

$$Z_f = \frac{V_f}{I_f} \quad (1)$$

2. Perhitungan Impedansi Gangguan Fasa-Tanah

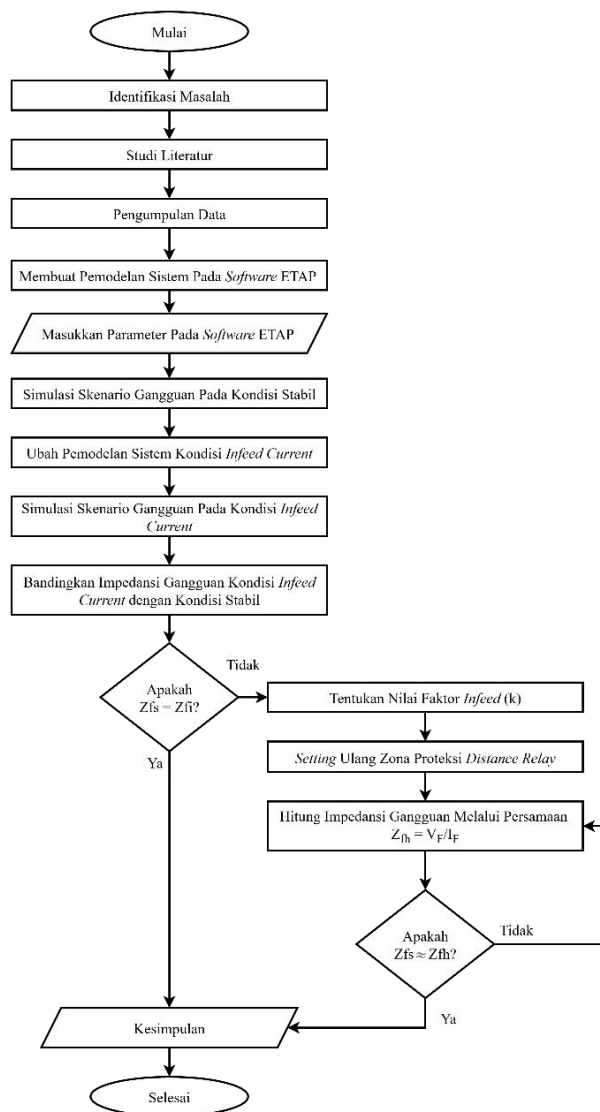
Pada gangguan fasa ke tanah, terdapat arus yang mengalir ke tanah ikut berperan sehingga impedansi yang terlihat dipengaruhi arus urutan nol. Sehingga untuk impedansi yang akan dibaca oleh rele pada gangguan fasa ke tanah dinyatakan dalam Persamaan 2 berikut [8].

$$Z_{fe} = \frac{V_f}{I_f + k_{z0} \cdot I_n} \quad (2)$$

Rele dikatakan bekerja, apabila impedansi yang terukur tidak melebihi impedansi *setting* rele itu sendiri ($Z_f < Z_s$). Apabila impedansi yang terukur melebihi impedansi *setting* relenya ($Z_f > Z_s$), maka rele tidak akan membaca bahwa impedansi tersebut merupakan sebuah gangguan sehingga rele tidak akan bekerja [9].

III. METODOLOGI

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana pengaruh kondisi *infeed current* terhadap pembacaan impedansi gangguan oleh *distance relay*. Hipotesis dari penelitian ini yakni kondisi *infeed current* berpengaruh terhadap pembacaan impedansi gangguan oleh *distance relay* sehingga akurasi berkurang. Pada kondisi *infeed current*, rele akan membaca impedansi gangguannya lebih besar atau lebih kecil yang dapat menyebabkan *distance relay* tidak akurat dalam mengamankan gangguan sesuai zona proteksinya. Selain itu, jenis gangguan saat kondisi *infeed* juga berpengaruh terhadap pembacaan impedansi gangguan terutama pada gangguan satu fasa ke tanah. Menentukan nilai faktor *infeed* (k) sebagai faktor koreksi dari kesalahan pembacaan impedansi gangguan oleh *distance relay* yang kemudian dikalikan ke dalam perhitungan impedansi *setting* ulang zona proteksi merupakan pembuktian dari hipotesis tersebut. Adapun langkah-langkah yang dilakukan secara umum dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gbr. 1 Flowchart Penelitian

A. Simulasi Skenario Gangguan

Software ETAP dipilih sebagai media dalam pemodelan sistem dan simulasi gangguan pada penelitian ini. Sistem yang dimodelkan pada studi kasus kali ini yakni meliputi saluran transmisi 150 kV yang terhubung dari GI Sunyaragi – Mandirancan – Arjawinangun dan rele jarak yang ditinjau adalah yang terpasang di GI Sunyaragi dengan memasukkan data parameter sistem. Pemodelan yang dibuat terdiri dari lima kondisi yakni satu kondisi stabil (tanpa *infeed*) dan empat kondisi *infeed current* meliputi kondisi adanya pembangkit di GI depan, perubahan saluran ganda ke tunggal, perubahan saluran ganda ke ganda, dan perubahan saluran tunggal ke ganda. Dari keempat kondisi *infeed current* tersebut impedansi gangguan hasil simulasinya akan dibandingkan dengan kondisi stabil (tanpa *infeed*).

Adapun data-data yang digunakan sebagai parameter yang dimasukkan ke dalam pemodelan sistem yakni data saluran, data setting rele jarak, data CT dan PT, dan data komponen sumber (pembangkit dan trafo *step-up*) seperti yang terdapat pada Tabel 1 berikut.

TABEL I

Data Parameter Saluran, *Setting Distance Relay*, Rasio CT dan PT, Komponen Sumber Sistem, dan Komponen *Infeed* (Pembangkit)

Saluran Transmisi 150 kV Sunyaragi - Mandirancan	
Jenis Penghantar	OHL-150kV-ZEBRA 2x484,5 mm ²
Impedansi Saluran (Ω/km)	0,0387 + j0,2807
Panjang Saluran (km)	12,13
Impedansi Urutan Positif (Ω)	0,47 + j3,4
Impedansi Urutan Negatif (Ω)	0,47 + j3,4
Impedansi Urutan Nol (Ω)	2,29 + j10,2
Saluran Transmisi 150 kV Mandirancan - Arjawinangun	
Jenis Penghantar	OHL-150kV-ZEBRA 2x484,5 mm ²
Impedansi Saluran (Ω/km)	0,0387 + j0,2807
Panjang Saluran (km)	30,757
Impedansi Urutan Positif (Ω)	1,19 + j8,63
Impedansi Urutan Negatif (Ω)	1,19 + j8,63
Impedansi Urutan Nol (Ω)	5,80 + j25,90
Setting Eksisting Distance Relay	
Jenis Rele	Schneider Electric MicOM P443
Sudut Saluran (deg)	82,2
Impedansi Zona 1 (Ω)	0,59
Time Delay Zona 1 (detik)	0 (Instan)
Impedansi Zona 2 (Ω)	1,78
Time Delay Zona 2 (detik)	0,4
Impedansi Zona 3 (Ω)	3,11
Time Delay Zona 3 (detik)	1,6
Rasio CT dan PT	
Rasio CT	1600 : 5
Rasio PT	150000 : 100
Komponen Sumber Sistem	
Generator Cirebon Power Unit 1	
Rating Daya (MW)	660
Tegangan (kV)	23
PF	0.85
Trafo Step-Up Cirebon Power Unit 1	
Rating Daya (MVA)	854
Tegangan Primer (kV)	23
Tegangan Sekunder (kV)	150
Impedansi (%)	14
Saluran Transmisi 150 kV Cirebon Power - Sunyaragi	
Jenis Penghantar	TACSR/AS 4x410 mm ²
Impedansi Saluran (Ω/km)	0,052 + j0,279
Panjang Saluran (km)	11
Impedansi Urutan Positif (Ω)	0,572 + j3,069
Impedansi Urutan Negatif (Ω)	0,572 + j3,069
Impedansi Urutan Nol (Ω)	2,222 + j9,207
Komponen Infeed (Pembangkit)	
Generator Cirebon Power Unit 2	
Rating Daya (MW)	1000
Tegangan (kV)	26
PF	0,8264
Trafo Step-Up Cirebon Power Unit 2	
Rating Daya (MVA)	1300
Tegangan Primer (kV)	26
Tegangan Sekunder (kV)	500
Impedansi (%)	17,5
Saluran Transmisi 500 kV Cirebon Power – Mandirancan	
Jenis Penghantar	TACSR/A 4x410 mm ²
Impedansi Saluran (Ω/km)	0,024 + j0,273
Panjang Saluran (km)	19
Impedansi Urutan Positif (Ω)	0,456 + j5,187
Impedansi Urutan Negatif (Ω)	0,456 + j5,187
Impedansi Urutan Nol (Ω)	3,306 + j15,561
Trafo IBT 1	
Rating Daya (MVA)	500/275/225
Tegangan Primer (kV)	500
Tegangan Sekunder (kV)	150
Tegangan Tersier (kV)	70

$$Z_{AF} = Z_{AB} + \frac{(2L-X)}{2L} \cdot Z_{BF} \quad (17)$$

Maka,

$$k = \frac{(2L-X)}{2L} \quad (18)$$

C. Setting Ulang Zona 2 dan Zona 3

Pada kondisi *infeed current* dengan impedansi zona proteksi *setting* eksisting menyebabkan rele membaca impedansi gangguan menjadi tidak akurat sehingga rele melihat gangguan lebih dekat ataupun lebih jauh. Oleh karena itu, perlu dilakukan perhitungan ulang *setting* zona 2 dan zona 3 dengan memasukkan nilai faktor *infeed* (k) yang telah dihitung sebelumnya. Hal ini bermaksud agar gangguan yang terjadi dapat dilihat oleh rele dengan akurat dan diamankan sesuai dengan zona proteksinya. Untuk menghitung *setting* zona 2 dan 3 dapat menggunakan Persamaan 19 dan 20 berikut.

1. *Setting* Zona 2

$$Z_{2p} = 0,8 \times (Z_{L1} + 0,8Z_{L2} \cdot k) \quad (19)$$

2. *Setting* Zona 3

$$Z_{3p} = 1,2 \times (Z_{L1} + Z_{L3} \cdot k) \quad (20)$$

Karena dari persamaan di atas menggunakan nilai primer, sehingga hasilnya juga dalam nilai primer. Maka, untuk merubah ke nilai sekunder dapat menggunakan Persamaan 21 dan 22 berikut.

$$Z_s = Z_p \times n_1 \quad (21)$$

$$n_1 = \frac{CT}{PT} \quad (22)$$

D. Menghitung Impedansi Gangguan (Z_{fh})

Sebagai metode validasi bahwa nilai faktor *infeed* (k) yang sudah dihitung sebelumnya adalah valid, maka dilakukan perbandingan antara impedansi gangguan hasil simulasi dengan impedansi gangguan hasil perhitungan. Untuk menghitung impedansi gangguan dapat menggunakan Persamaan 5.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan simulasi skenario gangguan dihasilkan nilai impedansi gangguan yang dibaca oleh *relay*. Data impedansi gangguan hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

TABEL II
Data Impedansi Gangguan Hasil Simulasi

Kondisi Stabil			
Jenis Gangguan	Impedansi Gangguan ($Z_f \angle \theta$)		
	30%	50%	70%
3L	1,29 $\angle$ 82,14°	1,66 $\angle$ 82,14°	2,03 $\angle$ 82,14°
LL	1,29 $\angle$ 82,14°	1,66 $\angle$ 82,14°	2,03 $\angle$ 82,14°
LG	1,10 $\angle$ 75,88°	1,41 $\angle$ 75,89°	1,73 $\angle$ 75,89°
2LG	1,29 $\angle$ 82,14°	1,66 $\angle$ 82,14°	2,03 $\angle$ 82,14°
Kondisi Adanya Pembangkit di GI Depan			
Jenis Gangguan	Impedansi Gangguan ($Z_f \angle \theta$)		
	30%	50%	70%
3L	2,14 $\angle$ 81,42°	3,08 $\angle$ 81,30°	4,02 $\angle$ 81,24°

LL	2,14 $\angle$ 81,42°	3,08 $\angle$ 81,30°	4,02 $\angle$ 81,24°
LG	3,17 $\angle$ 65,05°	4,84 $\angle$ 64,10°	6,31 $\angle$ 63,63°
2LG	2,14 $\angle$ 81,41°	3,08 $\angle$ 81,30°	4,02 $\angle$ 81,24°
Kondisi Adanya Perubahan Saluran Ganda ke Tunggal			
Jenis Gangguan	Impedansi Gangguan ($Z_f \angle \theta$)		
	30%	50%	70%
3L	1,85 $\angle$ 82,14°	2,59 $\angle$ 82,14°	3,33 $\angle$ 82,14°
LL	1,85 $\angle$ 82,14°	2,59 $\angle$ 82,14°	3,33 $\angle$ 82,14°
LG	1,57 $\angle$ 75,89°	2,20 $\angle$ 75,89°	2,84 $\angle$ 75,90°
2LG	1,85 $\angle$ 82,14°	2,59 $\angle$ 82,14°	3,33 $\angle$ 82,14°
Kondisi Adanya Perubahan Saluran Ganda ke Ganda			
Jenis Gangguan	Impedansi Gangguan ($Z_f \angle \theta$)		
	30%	50%	70%
3L	1,68 $\angle$ 82,14°	2,13 $\angle$ 82,14°	2,42 $\angle$ 82,14°
LL	1,68 $\angle$ 82,14°	2,13 $\angle$ 82,14°	2,42 $\angle$ 82,14°
LG	1,43 $\angle$ 75,89°	1,81 $\angle$ 75,89°	2,06 $\angle$ 75,89°
2LG	1,68 $\angle$ 82,14°	2,13 $\angle$ 82,14°	2,42 $\angle$ 82,14°
Kondisi Adanya Perubahan Saluran Tunggal ke Ganda			
Jenis Gangguan	Impedansi Gangguan ($Z_f \angle \theta$)		
	30%	50%	70%
3L	1,21 $\angle$ 82,14°	1,43 $\angle$ 82,14°	1,58 $\angle$ 82,14°
LL	1,21 $\angle$ 82,14°	1,43 $\angle$ 82,14°	1,58 $\angle$ 82,14°
LG	1,03 $\angle$ 75,88°	1,22 $\angle$ 75,88°	1,34 $\angle$ 75,89°
2LG	1,21 $\angle$ 82,14°	1,43 $\angle$ 82,14°	1,58 $\angle$ 82,14°

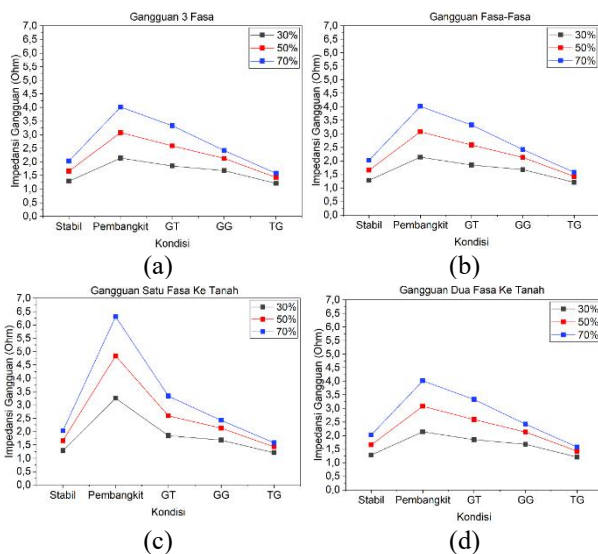
Dapat dilihat pada tabel data impedansi gangguan hasil simulasi di atas, terlihat ada perbedaan nilai pada gangguan satu fasa ke tanah. Setelah dianalisis, hal ini disebabkan *setting* kompensasi urutan nol pada *software* ETAP nilainya default (bawaan aplikasi) sebesar $0,98 \angle 6,84^\circ$, sedangkan seharusnya *setting* eksisting kompensasi urutan nol nya adalah $0,68 \angle -7,1^\circ$. Namun, setelah dihitung manual menggunakan Persamaan 2, impedansi gangguan pada gangguan satu fasa ke tanah pada setiap kondisi nilainya sama seperti gangguan yang lainnya (gangguan 3 fasa, fasa-fasa, dan dua fasa ke tanah). Maka, untuk data impedansi gangguan hasil simulasi diperbarui setelah analisis gangguan satu fasa ke tanah seperti yang termuat pada Tabel 3.

TABEL III
Data Impedansi Gangguan Hasil Simulasi Setelah Analisis Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Kondisi Stabil			
Jenis Gangguan	Impedansi Gangguan ($Z_{fs} \angle \theta$)		
	30%	50%	70%
3L	1,29 $\angle$ 82,14°	1,66 $\angle$ 82,14°	2,03 $\angle$ 82,14°
LL	1,29 $\angle$ 82,14°	1,66 $\angle$ 82,14°	2,03 $\angle$ 82,14°
LG	1,29 $\angle$ 82,07°	1,66 $\angle$ 75,89°	2,03 $\angle$ 75,89°
2LG	1,29 $\angle$ 82,14°	1,66 $\angle$ 82,14°	2,03 $\angle$ 82,14°
Kondisi Adanya Pembangkit di GI Depan			
Jenis Gangguan	Impedansi Gangguan ($Z_{fs} \angle \theta$)		
	30%	50%	70%
3L	2,14 $\angle$ 81,42°	3,08 $\angle$ 81,30°	4,02 $\angle$ 81,24°
LL	2,14 $\angle$ 81,42°	3,08 $\angle$ 81,30°	4,02 $\angle$ 81,24°
LG	3,25 $\angle$ 79,17°	4,84 $\angle$ 64,10°	6,31 $\angle$ 63,63°
2LG	2,14 $\angle$ 81,41°	3,08 $\angle$ 81,30°	4,02 $\angle$ 81,24°
Kondisi Adanya Perubahan Saluran Ganda ke Tunggal			
Jenis Gangguan	Impedansi Gangguan ($Z_{fs} \angle \theta$)		
	30%	50%	70%
3L	1,85 $\angle$ 82,14°	2,59 $\angle$ 82,14°	3,33 $\angle$ 82,14°
LL	1,85 $\angle$ 82,14°	2,59 $\angle$ 82,14°	3,33 $\angle$ 82,14°
LG	1,85 $\angle$ 82,15°	2,59 $\angle$ 75,89°	3,33 $\angle$ 75,90°
2LG	1,85 $\angle$ 82,14°	2,59 $\angle$ 82,14°	3,33 $\angle$ 82,14°
Kondisi Adanya Perubahan Saluran Ganda ke Ganda			

Jenis Gangguan	Impedansi Gangguan ($Z_{fs}\angle\theta$)		
	30%	50%	70%
3L	1,68 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	2,13 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	2,42 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$
LL	1,68 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	2,13 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	2,42 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$
LG	1,68 $\angle$ 82,07 $^{\circ}$	2,13 $\angle$ 75,89 $^{\circ}$	2,42 $\angle$ 75,89 $^{\circ}$
2LG	1,68 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	2,13 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	2,42 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$
Kondisi Adanya Perubahan Saluran Tunggal ke Ganda			
Jenis Gangguan	Impedansi Gangguan ($Z_{fs}\angle\theta$)		
	30%	50%	70%
3L	1,21 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	1,43 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	1,58 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$
LL	1,21 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	1,43 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	1,58 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$
LG	1,21 $\angle$ 82,07 $^{\circ}$	1,43 $\angle$ 75,88 $^{\circ}$	1,58 $\angle$ 75,89 $^{\circ}$
2LG	1,21 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	1,43 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$	1,58 $\angle$ 82,14 $^{\circ}$

A. Analisis Pengaruh Kondisi *Infeed current* Terhadap Pembacaan Impedansi Gangguan oleh *Distance relay*



Gbr. 6 Grafik Impedansi Gangguan Hasil Simulasi; (a) Gangguan 3 Fasa, (b) Gangguan Fasa- Fasa, (c) Gangguan Satu Fasa Ke Tanah, dan (d) Gangguan Dua Fasa Ke Tanah

Berdasarkan hasil simulasi ETAP dan dapat dilihat pada Gambar 6 di atas, pembacaan nilai impedansi gangguan oleh *distance relay* pada kondisi *infeed* menunjukkan perbedaan dibandingkan kondisi stabil, yang mengakibatkan terjadinya fenomena *underreach* dan *overreach*. Fenomena *underreach*, di mana *relay* membaca impedansi lebih besar dari nilai sebenarnya, terjadi pada kondisi *infeed* saat terdapat pembangkit di GI depan, serta pada perubahan konfigurasi saluran dari ganda ke tunggal maupun ganda ke ganda. Sebaliknya, fenomena *overreach*, yaitu ketika *relay* membaca impedansi lebih kecil dari nilai aslinya, terjadi khusus pada kondisi *infeed* saat saluran berubah dari tunggal menjadi ganda.

Berdasarkan Gambar 6(a) dapat dilihat pada letak gangguan 30%, impedansi gangguan yang terbaca oleh rele dalam kondisi stabil (tanpa *infeed*) adalah sebesar 1,29 Ω . Ketika kondisi *infeed current* ada pembangkit di GI depan, nilai impedansi gangguan mengalami kenaikan sebesar 65,89% menjadi 2,14 Ω . Nilai impedansi gangguan ini juga mengalami kenaikan pada kondisi perubahan saluran ganda ke tunggal sebesar 43,41%

menjadi 1,85 Ω . Kenaikan impedansi juga terjadi akibat perubahan saluran ganda ke ganda yang naik 30,23% menjadi 1,68 Ω . Namun, pada kondisi perubahan saluran tunggal ke ganda justru impedansi gangguan mengalami penurunan sebesar 6,20% dari kondisi tanpa *infeed* menjadi 1,21 Ω .

Terkait karakteristik jenis gangguan, grafik pada Gambar 6(a), Gambar 6(b), dan Gambar 6(c) menunjukkan bahwa gangguan tiga fasa, fasa-fasa, dan dua fasa ke tanah memiliki pola nilai yang serupa. Namun, penyimpangan signifikan terjadi pada gangguan satu fasa ke tanah seperti dalam kondisi *infeed* dengan pembangkit di GI depan pada Gambar 6(d). Pada skenario ini, nilai impedansi terbaca jauh lebih besar menjadi 3,25 Ω sehingga kenaikannya mencapai 151,93% akibat koneksi ke Trafo IBT Mandirancan yang menyebabkan peningkatan arus netral secara drastis.

B. Nilai Faktor *Infeed* (k) Pada Kondisi *Infeed current*

Nilai faktor *infeed* (k) dihitung berdasarkan perbandingan antara arus gangguan dengan arus *infeed* berdasarkan yang sudah diuraikan pada subbab sebelumnya. Berikut pada Tabel 4 adalah data hasil perhitungan nilai k pada setiap kondisi dan jenis gangguan.

TABEL IV
Data Nilai Faktor *Infeed* (k)

Jenis Gangguan	Kondisi Stabil Nilai Faktor <i>Infeed</i> ($k\angle\theta$)		
	30%	50%	70%
3L	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$
LL	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$
LG	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$
2LG	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1 $\angle$ 0 $^{\circ}$
Jenis Gangguan	Kondisi Adanya Pembangkit di GI Depan Nilai Faktor <i>Infeed</i> ($k\angle\theta$)		
	30%	50%	70%
3L	2,53 $\angle$ -1,16 $^{\circ}$	2,53 $\angle$ -1,06 $^{\circ}$	253 $\angle$ -1,08 $^{\circ}$
LL	2,53 $\angle$ -1,17 $^{\circ}$	2,53 $\angle$ -1,06 $^{\circ}$	2,53 $\angle$ -1,16 $^{\circ}$
LG	3,33 $\angle$ -1,57 $^{\circ}$	3,33 $\angle$ -1,61 $^{\circ}$	3,33 $\angle$ -1,58 $^{\circ}$
2LG	2,53 $\angle$ -1,03 $^{\circ}$	2,52 $\angle$ -1,09 $^{\circ}$	2,53 $\angle$ -1,11 $^{\circ}$
Jenis Gangguan	Kondisi Adanya Perubahan Saluran Ganda ke Tunggal Nilai Faktor <i>Infeed</i> ($k\angle\theta$)		
	30%	50%	70%
3L	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$
LL	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$
LG	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$
2LG	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$	2 $\angle$ 0 $^{\circ}$
Jenis Gangguan	Kondisi Adanya Perubahan Saluran Ganda ke Ganda Nilai Faktor <i>Infeed</i> ($k\angle\theta$)		
	30%	50%	70%
3L	1,7 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1,5 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1,3 $\angle$ 0 $^{\circ}$
LL	1,7 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1,5 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1,3 $\angle$ 0 $^{\circ}$
LG	1,7 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1,5 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1,3 $\angle$ 0 $^{\circ}$
2LG	1,7 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1,5 $\angle$ 0 $^{\circ}$	1,3 $\angle$ 0 $^{\circ}$
Jenis Gangguan	Kondisi Adanya Perubahan Saluran Tunggal ke Ganda Nilai Faktor <i>Infeed</i> ($k\angle\theta$)		
	30%	50%	70%
3L	0,85 $\angle$ 0 $^{\circ}$	0,75 $\angle$ 0 $^{\circ}$	0,65 $\angle$ 0 $^{\circ}$
LL	0,85 $\angle$ 0 $^{\circ}$	0,75 $\angle$ 0 $^{\circ}$	0,65 $\angle$ 0 $^{\circ}$
LG	0,85 $\angle$ 0 $^{\circ}$	0,75 $\angle$ 0 $^{\circ}$	0,65 $\angle$ 0 $^{\circ}$
2LG	0,85 $\angle$ 0 $^{\circ}$	0,75 $\angle$ 0 $^{\circ}$	0,65 $\angle$ 0 $^{\circ}$

C. Hasil *Setting* Ulang Zona 2 dan Zona 3

Analisis membuktikan bahwa faktor *infeed* menyebabkan ketidakakuratan pembacaan impedansi *relay*. Oleh karena itu, *setting* ulang impedansi Zona 2 dan Zona 3 pada *distance relay* GI Sunyaragi wajib dilakukan menggunakan faktor pengali *infeed* (k) yang telah dihitung. Hal ini bertujuan mencegah *underreach* maupun *overreach* serta menjamin akurasi deteksi gangguan pada saluran Mandirancan-Arjawinangun.

Dengan menggunakan Persamaan 19, 20, 21 dan 22, maka didapatkan nilai impedansi hasil *setting* ulang Zona 2 dan 3 pada Tabel 5 berikut.

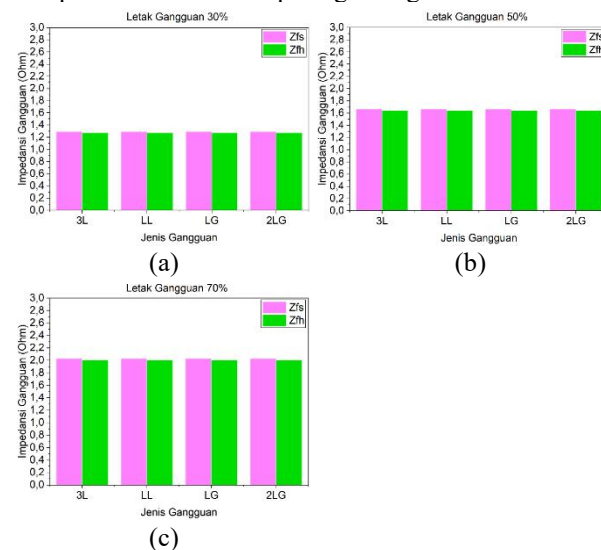
TABEL V
Data Hasil *Setting* Ulang Zona 2 dan Zona 3

Jenis Gangguan	Kondisi Stabil					
	Impedansi <i>Setting</i> (Ω)					
	30%		50%		70%	
	Z2	Z3	Z2	Z3	Z2	Z3
3L	1,78	3,11	1,78	3,11	1,78	3,11
LL	1,78	3,11	1,78	3,11	1,78	3,11
LG	1,78	3,11	1,78	3,11	1,78	3,11
2LG	1,78	3,11	1,78	3,11	1,78	3,11
Jenis Gangguan	Kondisi Adanya Pembangkit di GI Depan					
	Impedansi <i>Setting</i> (Ω)					
	30%		30%		30%	
	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2
3L	3,54	6,43	3,54	6,43	3,54	6,43
LL	3,54	6,43	3,54	6,43	3,54	6,43
LG	4,48	8,18	4,48	8,18	4,48	8,18
2LG	3,54	6,43	3,54	6,43	3,54	6,43
Jenis Gangguan	Kondisi Adanya Perubahan Saluran Ganda ke Tunggal					
	Impedansi <i>Setting</i> (Ω)					
	30%		30%		30%	
	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2
3L	2,77	5,26	2,77	5,26	2,77	5,26
LL	2,77	5,26	2,77	5,26	2,77	5,26
LG	2,77	5,26	2,77	5,26	2,77	5,26
2LG	2,77	5,26	2,77	5,26	2,77	5,26
Jenis Gangguan	Kondisi Adanya Perubahan Saluran Ganda ke Ganda					
	Impedansi <i>Setting</i> (Ω)					
	30%		30%		30%	
	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2
3L	2,57	4,60	2,34	4,16	2,10	3,72
LL	2,57	4,60	2,34	4,16	2,10	3,72
LG	2,57	4,60	2,34	4,16	2,10	3,72
2LG	2,57	4,60	2,34	4,16	2,10	3,72
Jenis Gangguan	Kondisi Adanya Perubahan Saluran Tunggal ke Ganda					
	Impedansi <i>Setting</i> (Ω)					
	30%		30%		30%	
	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2
3L	1,57	2,73	1,46	2,51	1,34	2,30
LL	1,57	2,73	1,46	2,51	1,34	2,30
LG	1,57	2,73	1,46	2,51	1,34	2,30
2LG	1,57	2,73	1,46	2,51	1,34	2,30

D. Impedansi Gangguan Hasil Perhitungan (Z_{fh})

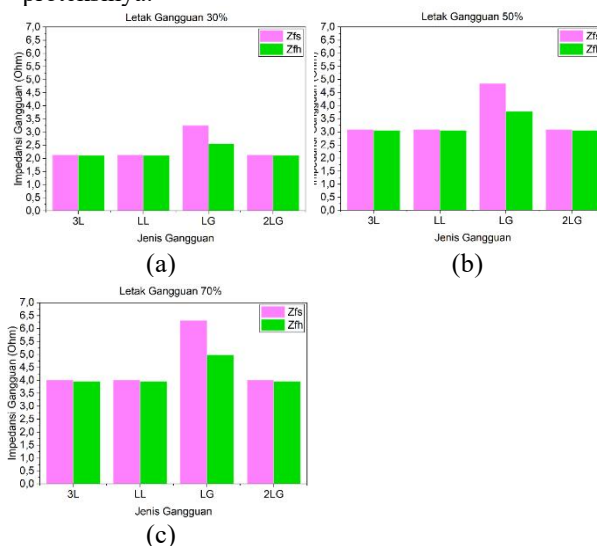
Untuk memvalidasi bahwa nilai k benar, maka dilakukan perhitungan impedansi gangguan menggunakan Persamaan 5. Jika nilai impedansi gangguan hasil perhitungan (Z_{fh}) mendekati dengan nilai impedansi gangguan hasil simulasi (Z_{fs}), maka nilai k dapat dikatakan valid. Perbandingan antara impedansi

gangguan hasil simulasi dengan hasil perhitungan pada setiap kondisi tercantum pada grafik-grafik berikut.



Gbr. 7 Perbandingan Impedansi Gangguan Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan Pada Kondisi Stabil; (a) Letak Gangguan 30%, (b) Letak Gangguan 50%, dan (c) Letak Gangguan 70%

Pada kondisi stabil seperti Gambar 7(a), impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan hasil perhitungan selisihnya kecil yakni 0,02 dan *error* 1,6%. Gambar 7(b) menunjukkan impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan selisih hasil perhitungan dengan simulasinya 0,02 dengan *error* 1,2%. Sedangkan, pada Gambar 7(c), impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan selisihnya 0,03 dengan *error* 1,5%. *Error* masih di bawah batas toleransi (<5%), sehingga k dapat dinyatakan valid sebagai koreksi *setting* zona proteksinya.

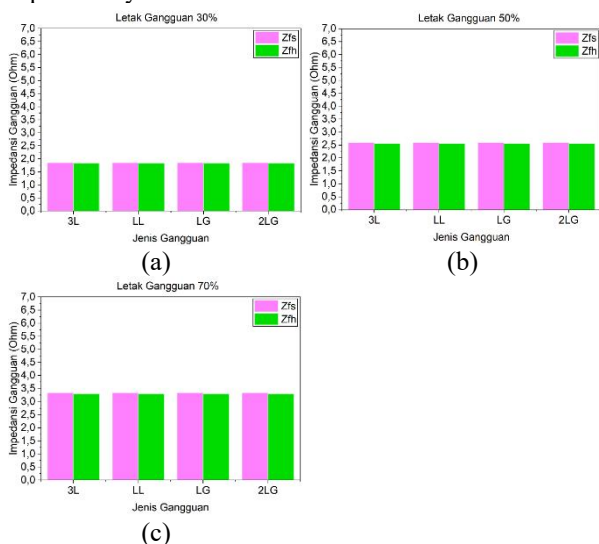


Gbr. 8 Perbandingan Impedansi Gangguan Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan Pada Kondisi Adanya Pembangkit di GI Depan; (a) Letak Gangguan 30%, (b) Letak Gangguan 50%, dan (c) Letak Gangguan 70%

Pada kondisi *infeed current* terdapat pembangkit dapat dilihat pada Gambar 8(a), impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan hasil perhitungan selisihnya kecil yakni 0,03 dan *error* 1,4%. Namun, pada gangguan

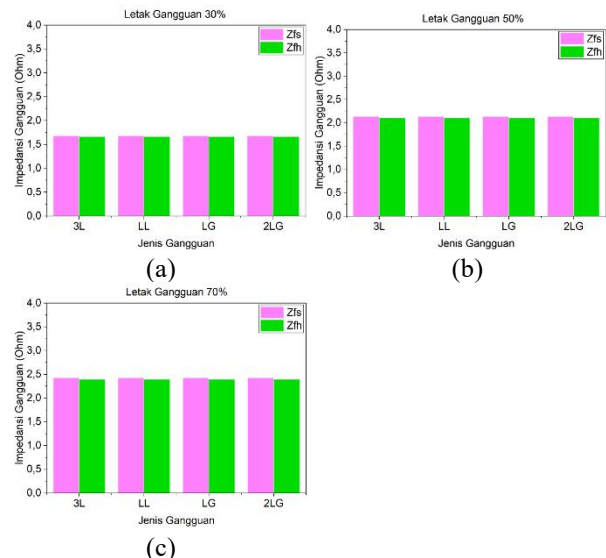
satu fasa ke tanah terlihat perbedaan yang sangat signifikan, *error*nya mencapai 21,5%. Gambar 8(b) menunjukkan impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan selisih hasil perhitungan dengan simulasinya 0,04 dengan *error* 1,3%. Sedangkan, pada gangguan satu fasa ke tanah terlihat perbedaan yang sangat signifikan, *error*nya mencapai 22,6%. Pada Gambar 8(c), impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan selisihnya 0,06 dengan *error* 1,5%. Begitupun, gangguan satu fasa ke tanah terlihat perbedaan yang sangat signifikan, *error*nya mencapai 24,2%.

Error yang masih di bawah batas toleransi (<5%), sehingga k dapat dinyatakan valid sebagai koreksi *setting* zona proteksinya. Namun, pada gangguan satu fasa ke tanah yang *error* mencapai lebih dari 20% disebabkan pada kondisi *infeed* ini GI depan atau GI Mandirancan terhubung ke trafo IBT yang menyebabkan impedansi gangguannya sangat besar karena ada arus *infeed* berupa arus urutan nol yang cukup besar, sehingga impedansinya naik.



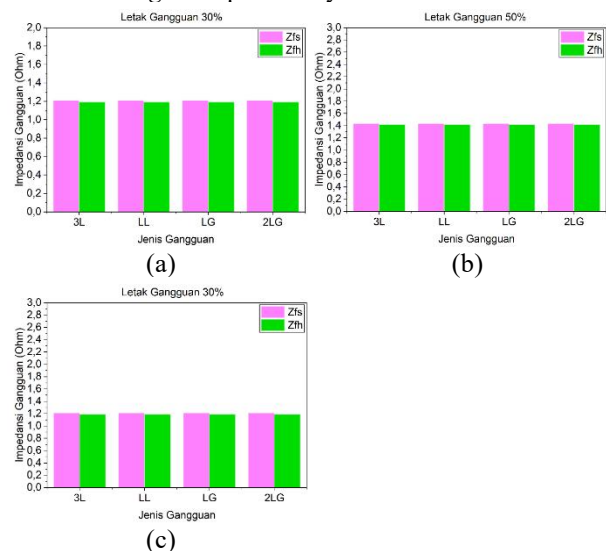
Gbr. 9 Perbandingan Impedansi Gangguan Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan Pada Kondisi Adanya Perubahan Saluran Ganda Ke Tunggal; (a) Letak Gangguan 30%, (b) Letak Gangguan 50%, dan (c) Letak Gangguan 70%

Saat adanya perubahan saluran ganda ke tunggal dapat dilihat pada Gambar 9(a), impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan hasil perhitungan selisihnya kecil yakni 0,03 dan *error* 1,6%. Gambar 9(b) menunjukkan impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan selisih hasil perhitungan dengan simulasinya 0,04 dengan *error* 1,5%. Sedangkan, pada Gambar 9(c), impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan selisihnya 0,04 dengan *error* 1,2%. *Error* masih di bawah batas toleransi (<5%), sehingga k dapat dinyatakan valid sebagai koreksi *setting* zona proteksinya.



Gbr. 10 Perbandingan Impedansi Gangguan Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan Pada Kondisi Adanya Perubahan Saluran Ganda Ke Ganda; (a) Letak Gangguan 30%, (b) Letak Gangguan 50%, dan (c) Letak Gangguan 70%

Ketika kondisi perubahan saluran ganda ke ganda seperti Gambar 10(a), impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan hasil perhitungan selisihnya kecil yakni 0,02 dan *error* 1,2%. Gambar 10(b) menunjukkan impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan selisih hasil perhitungan dengan simulasinya 0,03 dengan *error* 1,4%. Sedangkan, pada Gambar 11(c), impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan selisihnya 0,03 dengan *error* 1,2%. *Error* masih di bawah batas toleransi (<5%), sehingga k dapat dinyatakan valid sebagai koreksi *setting* zona proteksinya.



Gbr. 11 Perbandingan Impedansi Gangguan Hasil Simulasi dan Hasil Perhitungan Pada Kondisi Adanya Perubahan Saluran Tunggal ke Ganda; (a) Letak Gangguan 30%, (b) Letak Gangguan 50%, dan (c) Letak Gangguan 70%

Pada kondisi adanya perubahan saluran tunggal ke ganda seperti Gambar 11(a), impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan hasil perhitungan selisihnya kecil yakni 0,02 dan *error* 1,7%. Gambar 11(b) menunjukkan impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan selisih

hasil perhitungan dengan simulasinya 0,01 dengan *error* 0,7%. Sedangkan, pada Gambar 11(c), impedansi gangguan pada setiap jenis gangguan selisihnya 0,02 dengan *error* 1,3%. *Error* masih di bawah batas toleransi (<5%), sehingga k dapat dinyatakan valid sebagai koreksi *setting* zona proteksinya.

E. Analisis Pengaruh Jenis Gangguan Terhadap Pembacaan Impedansi Gangguan oleh *Distance relay*

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi *infeed* secara umum menyebabkan fenomena *underreach*, kecuali pada perubahan saluran tunggal ke ganda yang memicu *overreach*. Dari hasil analisis, interaksi antara gangguan satu fasa ke tanah dan keberadaan pembangkit di GI depan merupakan kondisi paling kritis karena kenaikan impedansinya sebesar 151,93% dari kondisi tanpa *infeed* dengan impedansi gangguan sebenarnya 1,29 Ω menjadi 3,25 Ω . Pada skenario ini, kontribusi arus urutan nol yang signifikan dari titik netral trafo IBT menyebabkan lonjakan pembacaan impedansi yang ekstrem, berbeda signifikan dengan gangguan antar fasa lainnya yang cenderung menunjukkan respon impedansi yang stabil.

F. Analisis Komparasi Akurasi Impedansi Gangguan dan Relevansinya di Lapangan

Evaluasi penyimpangan dilakukan dengan membandingkan nilai impedansi setiap kondisi *infeed* terhadap kondisi stabil di jarak 30% sebagai acuan. Tabel 6 berikut mengurutkan hasilnya mulai dari kondisi yang paling akurat (paling mendekati acuan) hingga yang paling menyimpang.

TABEL VI
Data Perbandingan Impedansi Gangguan Pada Setiap Kondisi *Infeed current*

Kondisi	Impedansi Gangguan (Ω)	Fenomena Jangkauan
Stabil	1,29	Normal
Perubahan Saluran Tunggal ke Ganda	1,21	<i>Overreach</i>
Perubahan Saluran Ganda ke Ganda	1,68	<i>Underreach</i>
Perubahan Saluran Ganda ke Tunggal	1,85	<i>Underreach</i>
Adanya Pembangkit di GI Depan	1,85	<i>Underreach</i>

Secara umum, akurasi pembacaan impedansi *distance relay* sangat bergantung pada kondisi *infeed* sistem. Jika dibandingkan dengan kondisi stabil (tanpa *infeed*), kondisi perubahan saluran tunggal ke ganda dinilai paling sistematis dan akurat karena memiliki selisih *error* terkecil impedansi 1,21 Ω , meskipun menyebabkan fenomena *overreach*. Sebaliknya, penyimpangan terbesar terjadi pada kondisi adanya pembangkit di GI depan, di mana impedansi terbaca naik menjadi 2,14 Ω . Kondisi ini menyebabkan *underreach* ekstrem, yang membuat rele mendeteksi gangguan jauh

lebih jauh dari lokasi sebenarnya, bahkan berpotensi di luar zona proteksi.

Situasi ini menjadi sangat kritis ketika dikaitkan dengan kondisi lapangan bahwa 70-80% gangguan adalah jenis satu fasa ke tanah. Ketika kondisi *infeed* dengan pembangkit di GI depan mengalami gangguan satu fasa ke tanah, nilai impedansi melonjak drastis dari kondisi stabil 1,29 Ω menjadi 3,25 Ω . Lonjakan ini dipicu oleh kontribusi arus urutan nol yang sangat besar yang mengalir bebas melalui titik netral trafo IBT yang ditanahkan (*grounding*), sehingga menyebabkan kenaikan tegangan dan impedansi semu.

Dengan demikian, kondisi adanya pembangkit di GI depan merupakan skenario paling berisiko dalam operasional sistem proteksi. Kombinasi antara kesalahan pembacaan terbesar (*error* tinggi) dan jenis gangguan yang paling sering terjadi (satu fasa ke tanah) menciptakan probabilitas kegagalan proteksi yang tinggi. Hal ini mengakibatkan *distance relay* tidak mampu mengamankan gangguan secara efektif sesuai dengan zona yang telah ditetapkan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada studi kasus saluran transmisi gardu induk Sunyaragi – Mandirancan – Arjawinangun dapat disimpulkan bahwa kondisi *infeed current* menyebabkan ketidakakuratan pembacaan impedansi gangguan oleh *distance relay* berupa *underreach* dan *overreach*. Kondisi *infeed current* yang menyebabkan *underreach* (jangkauan jauh) yakni adanya pembangkit di GI depan, perubahan saluran ganda ke tunggal dan perubahan saluran ganda ke ganda. Sedangkan, *overreach* terjadi pada kondisi *infeed current* adanya perubahan saluran tunggal ke ganda. Secara spesifik, tingkat penyimpangan impedansi gangguan paling signifikan terjadi pada kondisi *infeed current* terdapat pembangkit saat gangguan satu fasa ke tanah yang disebabkan oleh kontribusi arus urutan nol cukup besar pada trafo yang terhubung ke gardu induk depan. Penentuan nilai faktor *infeed* (k) yang merepresentasikan perbandingan arus gangguan terhadap arus yang terukur rele merupakan metode koreksi dari penyimpangan nilai impedansi gangguan. Nilai faktor *infeed* (k) ini kemudian dikalikan ke dalam pengaturan ulang (*resetting*) zona proteksi, yang terbukti efektif mengatasi kesalahan pembacaan impedansi gangguan oleh rele jarak. Sehingga, akurasi pembacaan impedansi dan selektivitas tetap terjaga walaupun dalam kondisi *infeed current*. Pengembangan penelitian yang lebih lanjut diperlukan untuk menyempurnakan implementasi metode ini dengan pengujian berbasis perangkat keras (*hardware*) serta evaluasi koordinasi kinerja rele jarak untuk memastikan sinkronisasi dan selektivitas pemutusan gangguan sesuai zona proteksinya.

REFERENSI

- [1] Corio, D., Adrianti, Maulana, R., Yunesti, P., Hendri, Z., Rauf, R., Baqaruzi, S., & Wahyu, R.

- (2023). *Perencanaan dan Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Lampung Selatan: ITERA Press.
- [2] Sumiyati, A., Rahman, P. S., Gusti, M. H. C., Melkior, G. D. A., Hidayat, J., & Aribowo, D. (2024). Konsep Dasar Transmisi Tenaga Listrik: Klasifikasi, Komponen serta Gangguannya. *Jurnal Surya Teknik*, 11(2), 612-617. <https://doi.org/10.37859/jst.v12i1.8195>.
- [3] Utami, P. N., Volta, Y. A., & Fatin, M. H. (2024). Simulation of Electric Power System Protection Coordination using ETAP. *Medika Trada*, 5(1), 25–35. <https://doi.org/10.59485/jtemp.v5i1.52>.
- [4] Ahmad, H., Shintawaty, L., & Amatullah, S. (2023). Perhitungan Rele Jarak sebagai Proteksi pada Penghantar Sutet 500 kV–Muara Enim ke GITET 500 kV New Aur Duri PT. PLN (Persero) UIP Sumbagsel. *Jurnal Desiminasi Teknologi*, 11(1), 45-54.
- [5] Romdhani, D., & Muljono, A. B. (2021). Proteksi Rele Jarak pada Jaringan SUTT 150 kV GI Ampenan–PLTU Lombok Energy Dynamic (LED). *Dielektrika*, 8(1), 36-43. <https://doi.org/10.29303/dielektrika.v8i1.263>.
- [6] Sugianto, S., & Yusuf, E. M. (2020). Analisis Proteksi Rele Jarak pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV. *Sinusoida*, 22(4), 1–12. <https://doi.org/10.37277/s.v22i4.864>
- [7] Ardianto, M. (2021). *Analisa Sistem Proteksi Distance Relay SUTT GI Randu Garut Kaliwungu I*. Semarang: Universitas Semarang.
- [8] Ziegler, G. (2011). *Numerical distance protection: principles and applications*. John Wiley & Sons.
- [9] Wahyuningsih, R. A., Muljono, A. B., & Supriyatna, S. (2020). Proteksi Rele Jarak (Distance Relay) pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Sistem Kelistrikan Lombok. *Dielektrika*, 7(1), 15-24.
- [10] PT. PLN (Persero). (2013). Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali. *PT PLN (Persero)*, September, 513.