

GSA dengan Skrining Faktor untuk Evaluasi Kinerja Relai Proteksi Saluran

Nanang Rohadi¹, Bambang Mukti Wibawa¹, Nendi Suhendi¹

¹ Departemen Teknik Elektro, Fakultas MIPA, Universitas Padjadjaran, Sumedang, Jawa Barat 45364, Indonesia

[Diserahkan: 6 Oktober 2023, Direvisi: 6 Januari 2024, Diterima: 5 Juli 2024]
Penulis Korespondensi: Nanang Rohadi (email: nanang.rohadi@unpad.ac.id)

INTISARI — Makalah ini menyajikan analisis kepekaan global (*global sensitivity analysis*, GSA) dengan skrining faktor untuk pengujian secara efisien terhadap model algoritma relai jarak konvensional ketika digunakan sebagai perangkat proteksi saluran transmisi dengan kompensator seri. Sejumlah parameter ketidakpastian (faktor) sistem dapat memengaruhi kinerja fungsional model algoritma pengukuran impedansi gangguan dari perangkat elektronik cerdas (*intelligent electronic devices*), yaitu relai jarak tipe SEL-421. Pengujian kepekaan global dimaksudkan untuk menentukan tingkat kekuatan pengaruh dari individu maupun interaksi antarfaktor terhadap keluaran algoritma pengukuran impedansi gangguan. GSA melalui analisis varians menggunakan kuasi-Monte Carlo dimaksudkan untuk melakukan komputasi terhadap kesalahan hasil pengukuran impedansi gangguan. Metode Morris sebagai langkah awal digunakan sebagai penyaringan terhadap faktor yang tidak terlalu dominan memengaruhi kinerja relai, sehingga mengurangi beban komputasi pada GSA. Sejumlah simulasi gangguan pada saluran transmisi dengan kompensator seri dan sejumlah faktor dimodelkan dengan DIGSILENT PowerFactory. Simulasi gangguan secara otomatis sebelum dan sesudah kompensator dikembangkan menggunakan DIGSILENT. Kepekaan keluaran algoritma relai diuji untuk setiap simulasi berdasarkan sinyal tegangan dan arus gangguan yang terbaca dan juga nilai dari sampel faktor pada ruang faktor melalui kedua metode, yaitu Morris dan Sobol. Untuk sejumlah vektor sampel, varians dari model keluaran algoritma yang dipengaruhi oleh sejumlah faktor dihitung melalui perangkat lunak SIMLAB. Resistansi kegagalan adalah faktor yang dominan memengaruhi kinerja algoritma untuk gangguan sebelum dan sesudah kompensator. Indeks kepekaan relai terhadap resistansi kegagalan sangat dominan, yaitu lebih dari 0,9 dan 0,7, masing-masing untuk gangguan sebelum dan sesudah kompensator. Teknik ini berhasil digunakan dalam pengujian algoritma relai jarak SEL-421.

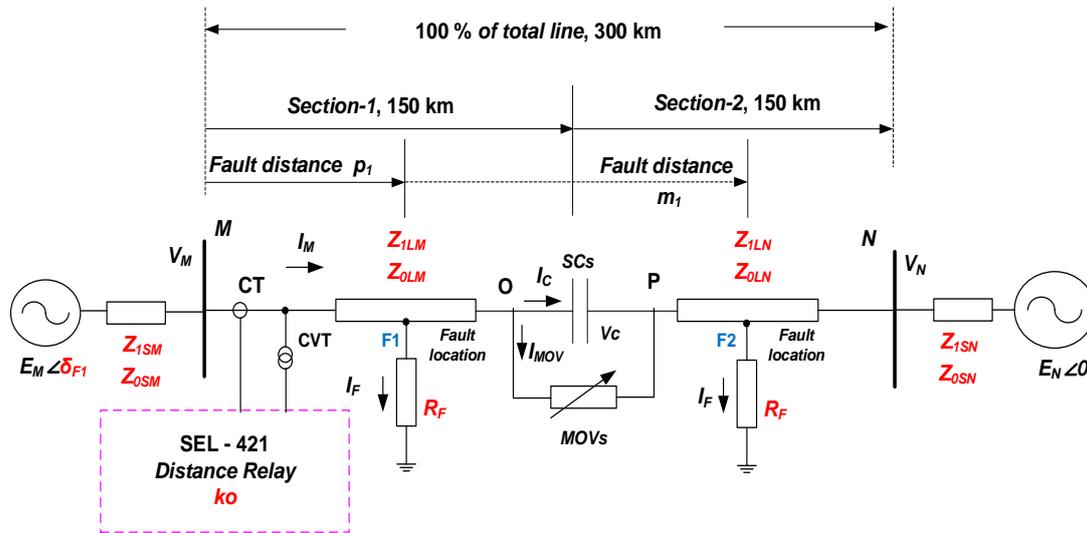
KATA KUNCI — Kinerja Relai, *Intelligent Electronic Devices*, *Global Sensitivity Analysis*, Metode Morris, DIGSILENT.

I. PENDAHULUAN

Saluran transmisi dengan kompensator seri merupakan salah satu alternatif yang sering dipertimbangkan untuk alasan peningkatan penyaluran daya listrik dan efisiensi [1]. Struktur dari jaringan tersebut tentu akan memengaruhi kerja relai jarak digital nonpilot yang dipasang untuk melindungi saluran transmisi yang dilindungi ketika terjadi gangguan [1], [2]. Gambar 1 menunjukkan rangkaian ekuivalen sistem daya dengan kompensator seri yang diletakkan di tengah saluran yang diproteksi. Arus gangguan yang terbaca oleh relai melalui trafo arus (*current transformer*, CT) ketika terjadi gangguan setelah kompensator (CVT+MOV) akan memengaruhi nilai dari pengukuran impedansi gangguan pada titik relai dan mengakibatkan terjadinya maloperasi pada kerja relai, yaitu dapat terjadi *overreaching* dan *undereaching* [1], [3], [4]. Nilai-nilai yang tidak pasti dan tidak diketahui dari parameter sistem, yaitu resistansi kegagalan tanah R_F , sudut tegangan sumber δ_F saat terjadi gangguan, kompensasi arus urutan nol k_0 , dan impedansi saluran Z_L , juga akan menimbulkan kesalahan tambahan dalam pengukuran impedansi serta dalam penentuan lokasi gangguan. Faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan terjadinya kegagalan operasi relai ketika gangguan terjadi sebelum kompensator dan makin parah untuk gangguan setelah kompensator [3]. Keterbatasan pada penggunaan relai jarak konvensional (relai jarak SEL-421) sebagai proteksi saluran dengan kompensator seri telah diselidiki sebelumnya [3], [5], [6]. Namun, pendekatan untuk pengujian secara sistematis untuk mengukur tingkat kepekaan algoritma dengan pendekatan perhitungan statistik terhadap

pengaruh sejumlah faktor belum pernah dilakukan pada penelitian sebelumnya.

Gangguan satu fase ke tanah yang ditunjukkan pada Gambar 1 terletak di bagian segmen M-O sebelum kompensator (lokasi gangguan di F_1) atau di bagian kedua O-N setelah kompensator (lokasi gangguan di F_2), dengan sejumlah parameter ketidakpastian (faktor) ditunjukkan dengan warna merah. Sejumlah faktor akan memengaruhi kinerja pengukuran impedansi gangguan oleh relai (relai jarak SEL-421) [3]. Pada kasus yang diamati, analisis kepekaan dicoba digunakan untuk menilai pengaruh faktor tersebut terhadap kinerja algoritma pengukuran relai. Dalam makalah ini, disajikan metode analisis kepekaan global (*global sensitivity analysis*, GSA) berdasarkan nilai estimasi varians dari keluaran algoritma (variens kesalahan) melalui pengambilan sampel kuasi-Monte Carlo (*quasi-Monte Carlo*, QMC) dalam ruang faktor multidimensi. Metode ini awalnya diusulkan oleh Sobol [7] dan diimplementasikan melalui perangkat lunak SIMLAB [8]. GSA sebenarnya adalah proses komputasi dengan sejumlah besar sampel diperlukan untuk sejumlah besar faktor. Untuk mempercepat komputasi, disarankan untuk menerapkan tahap prapemrosesan untuk mengurangi dimensi ruang faktor. Oleh karena itu, pada penelitian ini, metode Morris [9] telah diimplementasi untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang tidak berpengaruh sebelum menerapkan GSA. Studi ini membutuhkan model matematis dari saluran transmisi dengan kompensator dalam kondisi gangguan dan elemen pengukuran kesalahan impedansi lingkaran tertutup, sebagaimana diimplementasikan pada *intelligent electronic device* (IED),



Gambar 1. Saluran transmisi tunggal dengan kompensator seri: F_1 -gangguan sebelum $SC_s + MOV_s$ dan F_2 -gangguan setelah $SC_s + MOV_s$.

seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Model IED multifungsi relay jarak SEL-421 [10] diimplementasikan menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory [11]. Implementasi GSA memerlukan langkah untuk memvariasikan nilai faktor secara otomatis dalam model saluran transmisi dan menjalankan simulasi untuk setiap skenario gangguan. Skrip program yang dikembangkan melalui DIgSILENT Program Language (DPL) digunakan untuk fungsi otomatisasi pada simulasi gangguan. Skrip program juga dikembangkan untuk melakukan fungsi perhitungan indeks kinerja untuk setiap skenario gangguan. Dengan menghitung secara sistematis efek dari sejumlah faktor dan sebagai bagian dari pengujian proteksi, maka teknik yang diusulkan dimungkinkan dapat membantu dalam memilih IED yang optimal untuk tugas pengamanan saluran tertentu yang diperlukan ketika sejumlah faktor diperhitungkan dalam melihat kinerja relay dan sekaligus pemilihan tipe proteksi yang tepat. Teknik pengujian yang dikembangkan dapat juga digunakan untuk pengembangan peralatan proteksi oleh pabrikan.

II. RUANG FAKTOR DAN KINERJA ALGORITMA PENGUKURAN IMPEDANSI GANGGUAN

Model saluran transmisi dengan kompensator seri terletak di tengah saluran yang diproteksi dan lokasi terjadinya gangguan ditunjukkan pada Gambar 1. Semua elemen dalam gambar tersebut dimodelkan dalam infrastruktur perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory. Model yang diusulkan digunakan untuk menentukan kinerja relay jarak untuk gangguan fase A ke tanah dengan sejumlah skenario gangguan, yaitu titik gangguan sebelum dan sesudah kompensator (F_1 dan F_2) dan melalui resistansi kegagalan R_F . Model ini mencakup set dari faktor, seperti yang ditunjukkan dengan warna merah pada Gambar 1. Nilai indeks kinerja yang dihitung oleh algoritma pengukuran impedansi SEL-421 bergantung pada sinyal tegangan dan arus yang dihasilkan dari skenario gangguan yang dilakukan.

Pada Gambar 1, sistem eksternal dimodelkan menggunakan rangkaian ekuivalen Thevenin dengan dua sumber tegangan E_M dan E_N , dengan impedansi sumber urutan positif masing-masing Z_{1SM} dan Z_{1SN} . Selama simulasi gangguan fase A ke tanah, impedansi gangguan (1) dan (8) dihitung oleh relay berdasarkan metode kompensasi arus urutan-nol I_0 menggunakan faktor koreksi k_0 [3], [12]. Faktor k_0 dalam (3) bergantung pada impedansi saluran urutan-nol Z_{0L} yang tidak

diketahui secara pasti. Untuk gangguan pada segmen-2 (antara P dan N pada Gambar 1), perhitungan impedansi gangguan dapat menjadi lebih kompleks karena keberadaan kompensator yang akan memengaruhi perhitungan impedansi gangguan [2], [3], [13]. Untuk lokasi gangguan di segmen-1, impedansi gangguan Z_m pada (1) yang diukur dari lokasi relay ke titik gangguan F_1 (jarak p_1 pada Gambar 1) tidak selalu merupakan impedansi gangguan sesungguhnya, yaitu $p_1 Z_{1LM}$. Impedansi gangguan Z_m (Ω) yang diestimasi oleh algoritma relay dapat diturunkan sebagai berikut [3].

$$Z_m(\text{before}) = \frac{V_{AM}^c}{I_{AM}^c} = p_1 Z_{1LM} + \Delta Z_{1(F1)} \quad (1)$$

dengan V_{AM} (V) adalah tegangan fase A dan I_{AM}^c (A) adalah arus I_{AM} yang terukur dari arus fase A melalui sekunder trafo arus (CT) dan terkompensasi oleh arus urutan nol I_{0AM} yang juga diukur oleh algoritma relay. Pengukuran arus fase A yang terkompensasi selanjutnya dinyatakan dengan (2).

$$I_{AM}^c = I_{AM} + k_0 I_{0AM}. \quad (2)$$

Faktor dari kompensasi urutan nol k_0 selanjutnya dinyatakan dengan (3) [12].

$$k_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}}. \quad (3)$$

Dapat dilihat bahwa pada perhitungan pengukuran impedansi dalam (1) untuk gangguan satu fase ke tanah Z_m dapat terjadi kesalahan pengukuran impedansi gangguan sebesar ΔZ_1 (Ω), yaitu pengaruh dari sejumlah faktor. Faktor kompensasi urutan nol k_0 pada (3) perlu diperbaiki untuk menghindari kesalahan perhitungan impedansi gangguan ketika terjadi kegagalan fase ke tanah [12]. Kesalahan impedansi urutan positif yang dapat dinyatakan dengan ΔZ_1 adalah fungsi nonlinier f_1 dari sejumlah faktor, yaitu vektor parameter $\mathbf{P}_L, \mathbf{P}_S, \mathbf{P}_E$, resistansi kegagalan R_F , jarak gangguan p_1 , dan sudut aliran beban δ_F , seperti dinyatakan pada (4).

$$\Delta Z_{1(F1)} = f_1(\mathbf{P}_E, \mathbf{P}_S, \mathbf{P}_L, R_F, p_1) \quad (4)$$

dengan

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_L &= [Z_{1LM}, Z_{1LN}, Z_{0LM}, Z_{0LN}]^T, \\ \mathbf{P}_S &= [Z_{1SM}, Z_{1SN}, Z_{0SM}, Z_{0SN}]^T, \\ \mathbf{P}_E &= [E_M \angle \delta_{F1}, E_N \angle \delta_{F2}]^T; \delta_{F2} = 0. \end{aligned}$$

Perhitungan impedansi gangguan akan lebih kompleks untuk lokasi gangguan setelah kompensator (gangguan di F_2). Konsep perhitungan impedansi untuk kasus ini adalah menggunakan rangkaian urutan komponen simetris.

Perhitungan impedansi untuk gangguan fase A ke tanah setelah kompensator (gangguan di F_2) dapat dijelaskan melalui rangkaian komponen simetris. Urutan tegangan simetris dengan faktor resistansi kegagalan R_F dinyatakan dengan (5) [3], [14].

$$\underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_0 = 3R_F I_F \quad (5)$$

Selanjutnya, tegangan simetris pada (5) dapat dinyatakan seperti pada (6).

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{1AM} - Z_{1LM} I_{1AM} - V_{1C} - mZ_{1LN} I_{1AN} \\ V_2 &= V_{2AM} - Z_{2LM} I_{2AM} - V_{2C} - mZ_{2LN} I_{2AN} \\ V_0 &= V_{0AM} - Z_{0LM} I_{0AM} - V_{0C} - mZ_{0LN} I_{0AN} \end{aligned} \quad (6)$$

dengan m adalah segmen P-N, yaitu jarak dari kapasitor ke titik gangguan F_2 , V_C adalah tegangan jatuh pada $SCS+MOV$ s, serta $V_{1,2,0}$ merupakan tegangan urutan positif, negatif, dan nol.

Impedansi saluran urutan positif dapat dinyatakan sama dengan urutan negatif, yaitu $Z_{1L} = Z_{2L}$. Maka, pengukuran tegangan fase dapat dijelaskan seperti pada (7).

$$\begin{aligned} V_{AM} &= V_C + Z_{1LM} \left[I_{AM} + \frac{Z_{0LM} - Z_{1LM}}{Z_{1LM}} I_{0AM} \right] + 3R_F I_F \\ V_{AM} &= V_C + Z_{1LM} [I_{AM} + k_0 I_{0AM}] + 3R_F I_F \\ V_{AM} &= V_C + Z_{1LM} I_{AM}^C + 3R_F I_F \end{aligned} \quad (7)$$

dengan

$$\begin{aligned} V_{AM} &= V_{1AM} + V_{2AM} + V_{0AM} \\ V_C &= V_{1C} + V_{2C} + V_{0C} \\ I_{AM} &= I_{1AM} + I_{2AM} + I_{0AM} \\ Z_{1LMN} &= Z_{1LM} + mZ_{1LN} \\ Z_{2LMN} &= Z_{2LM} + mZ_{2LN} \\ Z_{0LMN} &= Z_{0LM} + mZ_{0LN} \end{aligned}$$

sehingga pengukuran impedansi pada gangguan di titik F_2 dapat dinyatakan dengan (8).

$$\begin{aligned} Z_m(after) &= \frac{V_{AM}}{I_{AM}^C} = Z_{1LMN} + 3R_F \frac{I_F}{I_{AM}^C} + \frac{V_C}{I_{AM}^C} \\ &= Z_{1LMN} + \Delta Z_{1(F_2)} \end{aligned} \quad (8)$$

dengan V_{AM} adalah tegangan fase A ke tanah yang terukur oleh relai pada sisi M dan I_{MA}^C adalah arus fase I_{AM} yang telah terkompensasi dengan arus urutan nol I_0 yang terukur oleh relai dan dinyatakan dengan (2). Kompensasi urutan nol k_0 pada (2) didefinisikan seperti pada (3). Selanjutnya, dari persamaan pengukuran pada (8), kesalahan pengukuran dapat dinyatakan seperti pada (9).

$$\Delta Z_{1(F_2)} = f_2(\mathbf{P}_E, \mathbf{P}_S, \mathbf{P}_L, R_F, p_2, C) = f_2(\mathbf{x}_i), \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

dengan \mathbf{x} adalah vektor dari faktor sebanyak n , p_2 merupakan jarak lokasi gangguan, dan C adalah kompensator seri.

Untuk melihat pengaruh sejumlah faktor terhadap kesalahan pengukuran impedansi gangguan oleh relai, sejumlah simulasi percobaan dilakukan. Model rangkaian yang

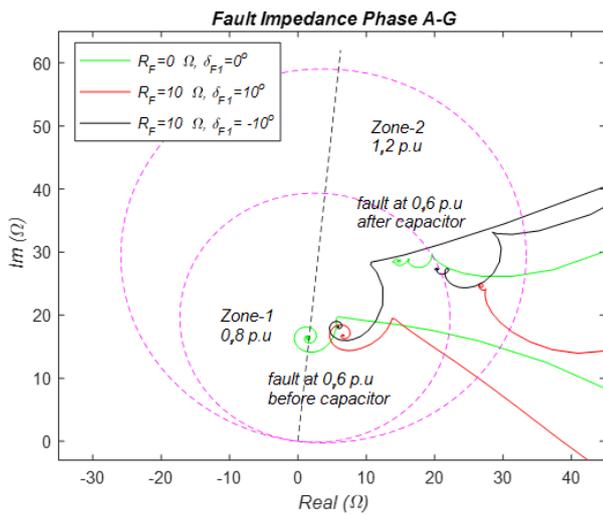
TABEL I
DATA SISTEM

| Saluran (P_L) | | |
|----------------------------|----------|--------------------------------|
| Panjang | km | 300 |
| Tingkat kompensasi (C) | % | 70 |
| Lokasi gangguan | p.u | 0,4; 0,6; 0,8; 1 |
| Impedansi urutan positif | Ω | $8,4+j94,5$ |
| Impedansi urutan nol | Ω | $82,5+j308,1$ |
| Kapasitansi urutan positif | nF/km | 4,7 |
| Kapasitansi urutan nol | nF/km | 9,67 |
| MOV (Gambar 1) | | |
| Arus referensi | kA | 1 |
| Tegangan referensi | kV | 150 |
| Eksponen | - | 23 |
| Sistem M (P_S) | | |
| Impedansi urutan positif | Ω | $0,656+j7,5$ |
| Impedansi urutan nol | Ω | $1,167+j11,25$ |
| Sistem N (P_S) | | |
| Impedansi urutan positif | Ω | $1,31+j15$ |
| Impedansi urutan nol | Ω | $2,33+j26,6$ |
| Sumber (P_E) | | |
| Frekuensi sistem | Hz | 50 |
| Tegangan sistem (E_M) | kV | $230 \angle \delta_{F1}^\circ$ |
| Tegangan sistem (E_N) | kV | $230 \angle \delta_{F2}^\circ$ |

digunakan ditunjukkan pada Gambar 1 dengan nilai parameter untuk simulasi percobaan disajikan pada Tabel I.

Jangkauan proteksi relai jarak untuk daerah *Zone-1* diatur sepanjang 0,8 p.u dari total urutan positif impedansi saluran, yaitu sepanjang saluran segmen-1 (M-O dalam Gambar 1) ditambah panjang saluran setelah kompensator (segmen-2, P-N). Saluran dibuat homogen sehingga impedansi saluran persatuan panjang kedua segmen sama. Gambar 2 menunjukkan hasil pengukuran impedansi gangguan untuk kegagalan satu fase A ke tanah yang disimulasi pada titik 0,6 p.u sebelum dan sesudah kompensator. Ditunjukkan pada Gambar 2 bahwa kesalahan pengukuran impedansi gangguan yang dapat dianggap berbanding lurus dengan jarak titik gangguan dapat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, misalnya resistansi kegagalan tanah R_F dan sudut aliran beban δ_F . Terlihat bahwa dampak dari pengaruh resistansi kegagalan tanah terhadap pengukuran impedansi akan terlihat besar sebagai fungsi dari resistansi kegagalan. Begitu juga dengan pengaruh ketika terjadi kombinasi dengan sudut aliran beban. Akibat pengaruh resistansi tanah, hasil pengukuran akan tergeser ke kanan. Selanjutnya, dampak dari sudut aliran beban mengakibatkan nilai impedansi akan tergeser ke atas atau ke bawah, seperti ditunjukkan pada Gambar 2 dengan warna hitam dan merah. Kondisi terburuk dari pengukuran impedansi adalah gangguan setelah kompensator, yaitu dapat terjadi *overreaching* dari kerja relai, seperti terlihat pada Gambar 2.

Dalam kondisi nyata, sejumlah parameter sistem tidak dapat diketahui secara pasti (diperlihatkan pada Gambar 1 dengan warna merah). Maka, diasumsikan rentang nilai parameter seperti ditunjukkan pada Tabel II terhadap parameter $\mathbf{P}_E, \mathbf{P}_S, \mathbf{P}_L, R_F, \delta_F, k_0$ (sejumlah faktor) yang dapat menimbulkan kesalahan pada pengukuran impedansi gangguan. Total faktor yang diasumsikan pada penelitian ini adalah sebanyak 19 faktor, dengan variasi nilai secara acak (uniform) sebesar 10%, dan dapat dinyatakan sebagai faktor dengan multidimensi tinggi dalam ruang data. Untuk mengilustrasikan pengaruh dari faktor, sejumlah skenario percobaan gangguan sebelum dan sesudah kompensator dilakukan dengan perubahan nilai parameter sesuai sampel data yang sudah



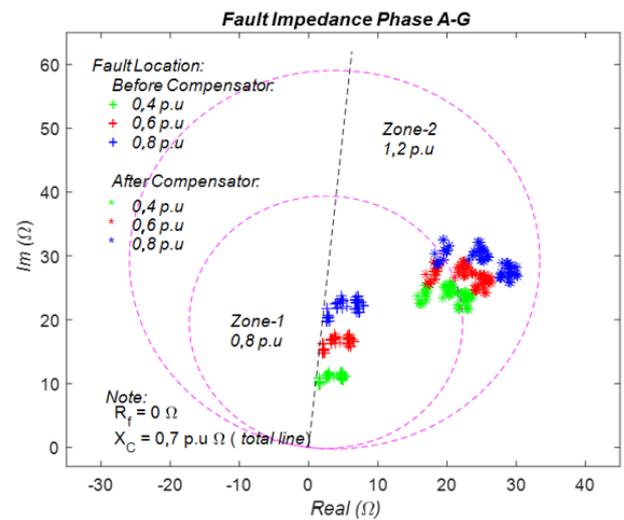
Gambar 2. Pengaruh resistansi kegagalan (R_F) dan sudut aliran beban (δ_{F1}) terhadap pengukuran impedansi gangguan Z_{1m} sebelum dan sesudah kompensator.

TABEL II
 SPESIFIKASI FAKTOR

| Parameter Ketidakpastian x_i | Deskripsi x_i | Variasi Interval |
|--------------------------------|-----------------|------------------------------|
| x_1 | R_F | [0 ; 10 Ω] |
| x_2 | δ_{F1} | [-10 ; 10] |
| x_3 | k_o | [0,714 ; 0,873] |
| x_4 | $Re\{Z_{1SM}\}$ | [0,590 ; 0,721 Ω] |
| x_5 | $Im\{Z_{1SM}\}$ | [6,75 ; 8,25 Ω] |
| x_6 | $Re\{Z_{0SM}\}$ | [1,05 ; 1,28 Ω] |
| x_7 | $Im\{Z_{0SM}\}$ | [10,125 ; 12,375 Ω] |
| x_8 | $Re\{Z_{1SN}\}$ | [1,18 ; 1,44 Ω] |
| x_9 | $Im\{Z_{1SN}\}$ | [13,5 ; 16,5 Ω] |
| x_{10} | $Re\{Z_{0SN}\}$ | [2,09 ; 2,56 Ω] |
| x_{11} | $Im\{Z_{0SN}\}$ | [23,94 ; 29,26 Ω] |
| x_{12} | $Re\{Z_{1LM}\}$ | [0,025 ; 0,030 Ω] |
| x_{13} | $Im\{Z_{1LM}\}$ | [0,283 ; 0,346 Ω] |
| x_{14} | $Re\{Z_{0LM}\}$ | [0,247 ; 0,302 Ω] |
| x_{15} | $Im\{Z_{0LM}\}$ | [0,924 ; 1,129 Ω] |
| x_{16} | $Re\{Z_{1LN}\}$ | [0,025 ; 0,031 Ω] |
| x_{17} | $Im\{Z_{1LN}\}$ | [0,283 ; 0,346 Ω] |
| x_{18} | $Re\{Z_{0LN}\}$ | [0,247 ; 0,302 Ω] |
| x_{19} | $Im\{Z_{0LN}\}$ | [0,924 ; 1,129 Ω] |

di buat. Setiap simulasi gangguan akan membaca perubahan setiap nilai dari vektor variabel acak $x_i \in S$, dari sampel S secara bersamaan melalui algoritma yang dikembangkan. Algoritma yang dikembangkan untuk simulasi dari model relai jarak SEL-421 akan membaca setiap nilai dari vektor sampel (sebagai faktor) dan menghitung impedansi gangguan untuk setiap simulasi. Hasil perhitungan impedansi ditandai dengan ‘*’ dan ‘+’ sebagai fungsi vektor sampel $y_i = f(x_i)$, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Sejumlah faktor dengan nilai acak akan memengaruhi kinerja algoritma relai yang diamati untuk dua lokasi gangguan: gangguan sebelum kompensator pada segmen-1 dan gangguan setelah kompensator segmen-2. Dari Gambar 3 dapat dilihat pengaruh ketidakpastian faktor x_i terhadap akurasi algoritma perhitungan impedansi gangguan, yaitu berupa ketidakpastian keluaran y_i . Lebih jauh dapat diamati bahwa faktor akan



Gambar 3. Pengaruh sejumlah faktor (Gambar 1) terhadap pengukuran impedansi gangguan sebelum dan sesudah kompensator.

memengaruhi kinerja relai dan kesalahan perhitungan impedansi akan ditambahkan akibat adanya kompensator. Gangguan di segmen-2 akan menghasilkan pengukuran seolah lokasi gangguan berada di *Zone-2* untuk semua lokasi gangguan 0,4, 0,6, dan 0,8 p.u setelah kompensator. Maloperasi kerja relai berupa *underreach* atau *overreach* dapat terjadi pada relai jarak. Dapat dijelaskan bahwa terjadi kesalahan pengukuran impedansi gangguan secara sistematis atau terjadi penyimpangan dari hasil pengukuran pengaruh dari faktor tunggal x_i atau interaksi antarfaktor $x_i \dots x_n$. Kelemahan kinerja relai terhadap pengaruh faktor tentunya dapat diantisipasi dengan melakukan perbaikan algoritma perhitungan impedansi pada relai (misalnya perhitungan impedansi dengan mengabaikan faktor yang memengaruhinya). Penelitian ini hanya mendalami melalui pengujian sistematis, yaitu pengamatan pengaruh faktor terhadap kinerja algoritma.

Kinerja algoritma diamati melalui kuantifikasi kesalahan klduaran $y_i(error)$ (10) sebagai fungsi dari vektor faktor x_i . Teknik yang dikembangkan untuk analisis kepekaan algoritma terhadap faktor adalah berdasarkan analisis *error variance* terhadap ekspektasi kesalahan sejumlah sampel $x_i = \mathbb{R}^n$ dengan n adalah dimensi sampel. Nilai dimensi faktor $n = 19$ cukup besar untuk kasus yang diamati, sehingga akan memakan waktu komputasi yang sangat tinggi ketika pendekatan analisis varians menggunakan teknik Sobol dilakukan. Dalam hal ini, metode skrining faktor perlu dilakukan untuk menaikkan efisiensi komputasi pada analisis varians kesalahan pengukuran dilakukan. Teknik analisis kepekaan ini menggunakan teknik pencuplikan, sehingga memungkinkan dilakukannya estimasi kepekaan terhadap kesalahan impedansi hasil pengukuran yang ditimbulkan oleh sejumlah faktor, baik secara individu maupun akibat interaksi antara dua atau lebih faktor.

III. ANALISIS KEPEKAAN ALGORITMA PENGUKURAN IMPEDANSI GANGGUAN

Pengaruh faktor tunggal dan interaksi sejumlah faktor dievaluasi berdasarkan nilai kesalahan impedansi gangguan pada (10) dari hasil pengukuran oleh algoritma relai untuk setiap simulasi ke- i . Indeks kinerja dari kesalahan pengukuran diperoleh dari nilai mutlak selisih antara nilai hasil pengukuran

impedansi y_i (pengukuran sebenarnya) dengan nilai ekspektasi $E[y_i]$, yaitu:

$$y_{i(error)} = |y_i - E[y_i]| \Omega. \tag{10}$$

Pengukuran kesalahan impedansi sebagai keluaran algoritma relai adalah fungsi nonlinier dari sejumlah faktor dan dinyatakan dengan $y_i = f(\mathbf{x}_i)$, seperti dijelaskan pada (1) dan (8). Sejumlah faktor yang digunakan dan tersimpan pada faktor $\mathbf{x} = \mathbb{R}^n$ (\mathbb{R} adalah set bilangan riil dengan dimensi faktor n) ditunjukkan pada Tabel II. Untuk simulasi gangguan berbasis pencuplikan data, semua faktor \mathbf{x}_i divariasikan secara terusan-merus berdasarkan urutan dari data kuasiacak yang dibangkitkan pada rentang interval yang telah ditentukan dan terdistribusi secara uniform. Teknik kuasiacak yang digunakan dengan sejumlah n faktor tentu akan menghasilkan semesta data Ω yang cukup besar. Akibatnya, dibutuhkan waktu komputasi yang besar untuk kebutuhan GSA terhadap kesalahan pengukuran (10).

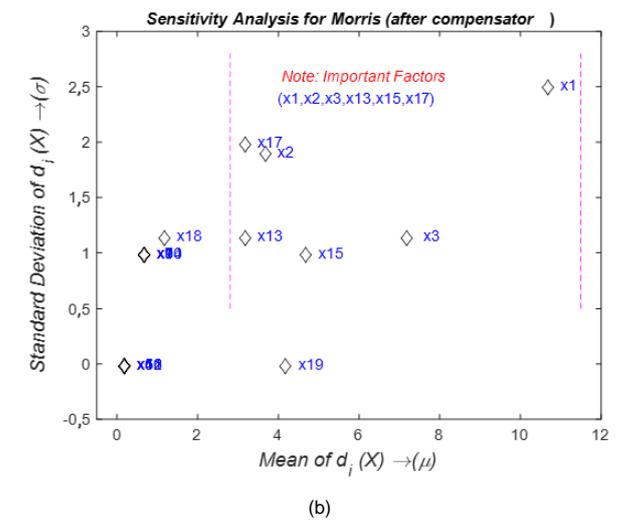
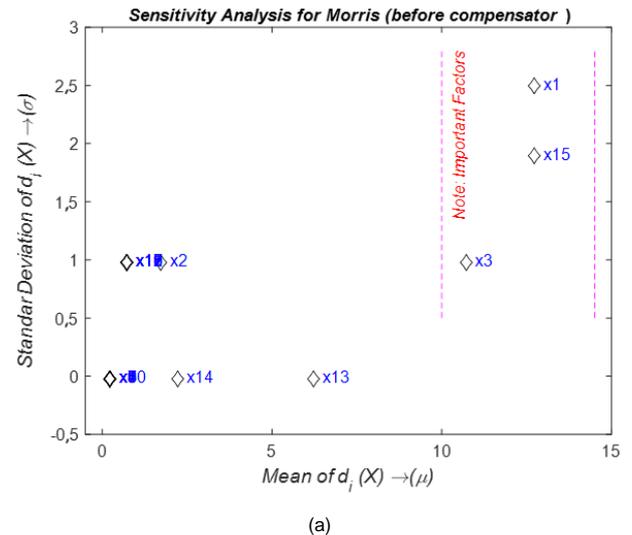
A. ANALISIS KEPEKAAN LOKAL

Pendekatan klasik (penelitian sebelumnya) untuk analisis kepekaan relai hanya membutuhkan sejumlah kecil sampel, yaitu hanya melihat pengaruh satu faktor dengan sejumlah faktor lainnya dijaga konstan. Dalam hal ini, teknik klasik digunakan hanya untuk melihat peringkat faktor yang dapat memengaruhi kinerja relai, tetapi tidak memperhatikan tingkat ketidakpastian faktor secara keseluruhan (bersamaan) dan menganalisis kepekaannya. Oleh karena itu, pada penelitian ini, teknik gabungan (pendekatan analisis lokal dan global) digunakan untuk analisis kepekaan secara akurat dan efisien [15]. Analisis kepekaan secara lokal dengan menggunakan metode Morris digunakan untuk mengukur tingkat pengaruh dari faktor (individu) terhadap kinerja relai (lihat Gambar 4). Skrining sejumlah faktor melalui metode Morris akan mengidentifikasi tingkat pengaruhnya terhadap kinerja relai secara individu, sehingga selanjutnya GSA dengan pendekatan teknik Sobol dan kuasiacak sampel akan membutuhkan semesta data sampel lebih sedikit.

Pada penelitian ini, metode Morris adalah metode untuk analisis kepekaan lokal. Metode ini sederhana tetapi efektif untuk melakukan skrining terhadap faktor masukan yang dapat memengaruhi karakteristik model algoritma relai [9], [16]. Teknik ini berupa skema acak secara unik dari variasi faktor tunggal pada satu waktu. Indeks hasil evaluasi dari metode Morris disebut dengan efek satu faktor dan untuk melihat efek faktor ke- i , dilakukan komputasi hanya dengan faktor ke- i . Jika dianggap bahwa model perhitungan dari relai algoritma yang dipengaruhi sejumlah faktor masukan seperti ditunjukkan pada warna merah (Gambar 1) dan dinyatakan dengan $x_i, i = 1, 2, \dots, n$, variasi nilai N_s dari faktor acak \mathbf{x} pada rentang unit interval $[0,1]$ berada pada level partisi $(p - 1)$ dengan p , yang berupa bilangan genap, adalah level yang ditentukan dan $N_s \in \Omega$. Untuk nilai vektor faktor yang diberikan pada setiap simulasi \mathbf{x} , pengaruh faktor ke- i terhadap model didefinisikan dengan (11) [9].

$$d_i(\mathbf{x}) = \frac{|y(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_k) - y(\mathbf{x})|}{\Delta} \tag{11}$$

Nilai Δ dapat ditentukan dari set data $\{1/(p - 1), \dots, 1 - 1/(p - 1)\}$, nilai $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ditentukan pada semesta data Ω sehingga dari (10), nilai \mathbf{x}_i akan bertransformasi menjadi $(\mathbf{x}_i + \mathbf{e}_i \Delta) \in \Omega$. Nilai \mathbf{e}_i adalah vektor nol dan akan teradaptasi sesuai sampel data ke- i .

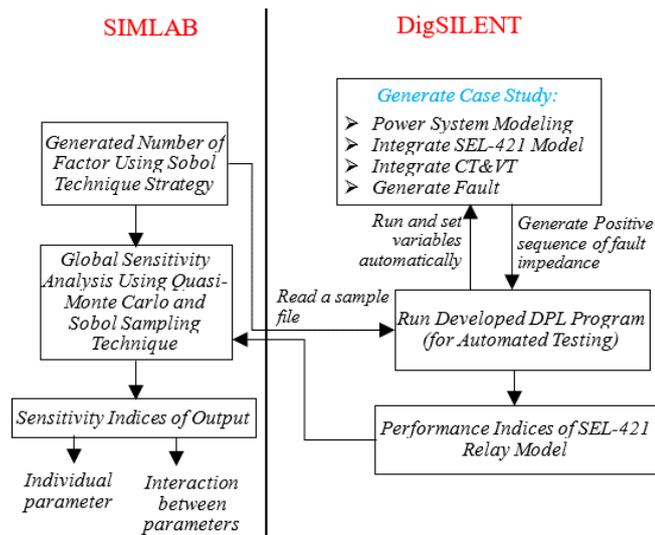


Gambar 4. Sensitivitas lokal dengan metode Morris, (a) sebelum kompensator, (b) setelah kompensator.

Berdasarkan penjelasan di atas, pola sebaran nilai dari F_i dinyatakan dengan $d_i(\mathbf{x}) \sim F_i$ dalam (11). Data dari variabel acak masukan, yaitu elemen dari F_i adalah $p^{k-1}[p - \Delta(p - 1)]$. Analisis kepekaan lokal dari algoritma pengukuran impedansi pada (1) dan (8) adalah tingkat kepekaan lokal berdasarkan metode Morris. Kepekaan lokal dari pengukuran impedansi gangguan ditentukan dari pemetaan nilai F_i (sebaran nilai) berupa nilai rata-rata μ terhadap nilai standar deviasi σ . Tingkat pengaruh dari faktor x_i terhadap algoritma pengukuran impedansi relai Z_m ditentukan oleh hasil perhitungan nilai μ dan σ berdasarkan sebaran nilai $d_i(\mathbf{x}) \sim F_i$. Nilai μ akan menentukan tingkat pengaruh faktor tunggal dan nilai σ adalah tingkat pengaruh hasil dari interaksi antara sejumlah faktor (lihat Gambar 4).

B. ANALISIS KEPEKAAN GLOBAL

Kepekaan global dengan teknik QMC menggunakan data pencuplikan kuasiacak dapat diimplementasi dengan baik ketika proses skrining faktor \mathbf{x} dengan metode Morris seperti dijelaskan di atas telah dilakukan, sehingga dapat mengurangi dimensi faktor yang dikomputasi melalui teknik Sobol untuk GSA. GSA dengan QMC menggunakan pencuplikan kuasiacak adalah metode kepekaan global yang paling baik untuk dimensi semesta faktor n yang kecil dan memiliki konvergensi yang cepat [15], [17], [18]. GSA dilakukan berdasarkan data



Gambar 5. Metode GSA yang diusulkan.

pencuplikan, yang prosedur penyelesaiannya dijelaskan pada Gambar 5.

Ketidakpastian keluaran algoritma relai, yaitu berupa indeks kinerja dari perhitungan impedansi, dihitung sebagai nilai varians dari kesalahan perhitungan. Untuk menentukan tingkat pengaruh faktor x , baik secara individu maupun akibat interaksi antara sejumlah faktor, perlu dihitung bagian varians faktor. Teknik ini dilakukan dengan menghitung rata-rata dari f_i , pada (12), yang dipengaruhi oleh sejumlah faktor x kecuali faktor yang sedang diamati. Selanjutnya varians dari f_i yang hanya dipengaruhi oleh faktor individu x_i dijelaskan sebagai berikut.

$$f_i(x_i) = \int f(x) \prod_{k \neq i} dx_k - f_0 \quad (12)$$

$$V_i = f_i(x_i)^2 = \int f(x)^2 \prod_{k \neq i} dx_k - f_0^2 \quad (13)$$

dengan V_i adalah indeks kinerja varians karena x_i dan dinyatakan dengan

$$D_i = \sigma_{x_i}^2 \{E\{f(x)|x_i\}\} \quad (14)$$

dengan $E\{*\}$ adalah nilai ekpektasi dari varians keluaran yang dinyatakan dengan

$$f_0 = \int f(x) dx. \quad (15)$$

Maka, kepekaan global karena pengaruh faktor individual S_i dapat dinyatakan dengan (16).

$$S_i = \frac{\sigma_{x_i}^2 \{E\{f(x)|x_i\}\}}{\sigma_x^2 \{E\{f(x)\}\}} = \frac{V_i}{\sigma^2 \{f(x)\}} \quad (16)$$

dengan $\sigma^2 \{f(x)\}$ adalah total varians kinerja indeks keluaran yang juga dihitung dengan integral melalui QMC. Ketika hasil penjumlahan probabilitas kepekaan dari S_i tidak sama dengan nol, kepekaan total dapat ditimbulkan karena kontribusi pengaruh hasil interaksi antarfaktor [19]. Varians V_{ij} dan kepekaan D_{ij} hasil dari interaksi antara dua faktor x_i dan x_j selanjutnya dapat didefinisikan seperti pada (17) sampai (19).

$$f_{ij}(x_i, x_j) = \int f(x) \prod_{k \neq i, j} dx_k - f_0 - f_i(x_i) - f_j(x_j) \quad (17)$$

$$D_{ij} = f_{ij}(x_i, x_j)^2 = \int f(x)^2 \prod_{k \neq i, j} dx_k - f_0^2 - V_i - V_j \quad (18)$$

$$V_{ij} = \sigma_{x_{ij}}^2 \{E\{f(x)|x_i, x_j\}\}. \quad (19)$$

Selanjutnya, indeks kepekaan dari interaksi antarfaktor dapat didefinisikan dengan (20).

$$S_{ij} = \frac{\sigma_{x_{ij}}^2 \{E\{f(x)|x_i, x_j\}\}}{\sigma_x^2 \{E\{f(x)\}\}} = \frac{V_{ij}}{\sigma^2 \{f(x)\}} \quad (20)$$

Dinyatakan bahwa analisis varians menggunakan teknik Sobol didasarkan pada dekomposisi dari model f ke dalam sejumlah dimensi dari subfungsi, yaitu (21).

$$f(\mathbf{X}) = f_0 + \sum_i f_i(x_i) + \sum_{i < j} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{i..d}(x_i, \dots, x_n) \\ = f_0 + \sum_{u \subset D} f_u(x_u) \quad (21)$$

dengan $D = \{1, \dots, n\}$, x_u adalah subvektor dari x , yaitu variabel acak dan faktor yang dinyatakan dengan subset $u = \{i_1, \dots, i_S\}$, $S \leq n$. Untuk sejumlah parameter ketidakpastian (faktor) n , total varians indeks adalah penjumlahan dari total subvariens [20], [21], seperti pada (22).

$$\sigma^2 \{f(\mathbf{X})\} = V_u^T = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \dots + V_{1,2,\dots,n}. \quad (22)$$

Selanjutnya, total indeks sensitivitas dapat dinyatakan dengan

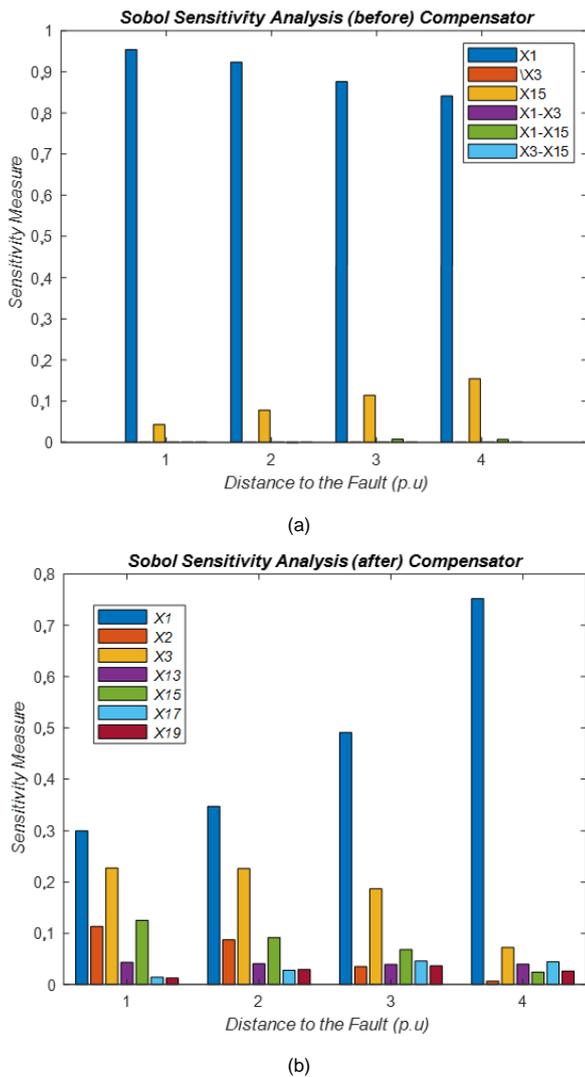
$$\sum_{i=1}^d S_i + \sum_{i < j} S_{ij} + \dots + S_{1,2,\dots,d} = 1. \quad (23)$$

Prosedur GSA seperti pada Gambar 5 dapat digunakan untuk uji kepekaan global pengukuran impedansi terhadap pengaruh sejumlah faktor. Gambar 6 memperlihatkan hasil pengujian kepekaan untuk gangguan sebelum dan sesudah kompensator.

IV. HASIL DAN DISKUSI

Simulasi gangguan fase A ke tanah dengan sejumlah lokasi gangguan (Gambar 1) dilakukan menggunakan perangkat lunak DigSILENT PowerFactory. Variasi nilai dari sejumlah faktor $x = \mathbb{R}^{19}$ terdistribusi secara uniform dalam rentang nilai tertentu, seperti pada Tabel II. Kinerja pengukuran impedansi gangguan pada relai diuji untuk gangguan sebelum dan sesudah kompensator untuk ruang semesta data dari faktor x . Ruang semesta data dari sejumlah faktor dihasilkan melalui perangkat lunak SIMLAB berdasarkan metode Morris dan runtun kuasiacak Sobol. Perhitungan dua metode kepekaan, yaitu lokal dan global juga diaplikasikan menggunakan SIMLAB untuk semua perhitungan statistik dan ukuran kepekaan terhadap indeks kinerja keluaran algoritma. Kepekaan lokal atau disebut dengan *one at a time* (OET) adalah kepekaan yang hanya diamati berdasarkan perubahan pada satu faktor. Sementara itu, kepekaan global adalah kepekaan berdasarkan seluruh ruang faktor.

Hasil pengukuran kepekaan lokal melalui metode Morris ditunjukkan pada Gambar 4. Teknik ini menyajikan hasil kepekaan untuk keperluan pemeringkatan faktor, yaitu melalui pemetaan antara nilai standar deviasi σ dan nilai rata-rata μ untuk semua efek dari faktor x_i . Pada penelitian ini, hasil perhitungan dengan teknik Morris menggunakan 80 sampel data yang dianggap cukup untuk sejumlah faktor x_i . Pada Gambar 4 ditampilkan bahwa nilai μ yang besar menunjukkan dominasi faktor terhadap indeks kinerja relai dan nilai σ menunjukkan pengaruh interaksi antarfaktor yang besar. Gambar 4(a) menampilkan hasil simulasi sebelum kompensator dan teridentifikasi faktor yang dominan, yaitu $x_1 (R_F)$, $x_{15} (imZ_{1LM})$, $x_3 (k_o)$. Gambar 4(b) menampilkan hasil simulasi setelah kompensator dan teridentifikasi faktor dominan yang memengaruhi kinerja relai algoritma meliputi



Gambar 6. GSA dari sejumlah faktor, (a) kepekaan global untuk gangguan sebelum kompensator, (b) kepekaan individual faktor setelah kompensator.

$x_1(R_F)$, $x_2(\delta_{F1})$, $x_3(k_0)$, $x_{13}(reZ_{1LM})$, $x_{15}(imZ_{1LM})$, $x_{17}(reZ_{1LM})$, dan $x_{19}(imZ_{1LM})$.

Dari hasil yang diperoleh dengan metode Morris, dapat dianalisis bahwa faktor x_1 memiliki varian μ yang besar, sehingga dapat diduga bahwa kinerja indeks model, yaitu nilai kesalahan pengukuran impedansi, dapat dipengaruhi oleh nilai x_1 secara individu. Standar deviasi σ dari x_1 juga menunjukkan nilai yang besar, sehingga dapat diduga bahwa dampak hasil interaksi faktor x_1 dengan faktor lainnya akan berkontribusi besar memengaruhi kinerja relai. Pengaruh x_3 juga memiliki nilai yang signifikan setelah x_1 , yaitu berkontribusi secara individu dan hasil interaksi dengan faktor lain untuk akurasi dari kinerja relai. Lebih jauh, hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4 adalah analisis nilai kepekaan dengan metode Morris untuk lokasi gangguan 0,6 p.u pada dua segmen, yaitu sebelum dan sesudah kompensator. Berdasarkan pemahaman di atas, pada Gambar 1 dan Tabel II diduga terdapat tujuh faktor yang dianggap sebagai faktor dominan memengaruhi indeks kinerja algoritma relai untuk contoh lokasi gangguan 0,6 p.u, yaitu X_1 , X_2 , X_3 , X_{13} , X_{15} , X_{17} , dan X_{19} .

Sensitivitas lokal menggunakan metode Morris digunakan untuk melakukan skrining faktor $x = \{x_1, x_2, \dots, x_{19}\}$, yaitu dari 19 faktor menjadi 3 faktor sebelum kompensator dan 7 faktor setelah kompensator. Hasil skrining faktor yang dominan dapat mengurangi komputasi untuk melihat kepekaan

secara menyeluruh dengan GSA berdasarkan pencuplikan kuasiacak. Nilai optimal dari data semesta terhadap tujuh faktor yang terpilih melalui metode Morris dapat dibangkitkan melalui SIMLAB, yaitu sebesar 80 sampel data. Selanjutnya, untuk analisis GSA, simulasi gangguan dengan DigSILENT melakukan estimasi gangguan impedansi terhadap lokasi gangguan 0,4 p.u, 0,6 p.u, 0,8 p.u, dan 1 p.u dari dua segmen saluran MN. Pada setiap simulasi gangguan, variasi nilai dari sejumlah tiga dan tujuh faktor dilakukan dengan total simulasi masing-masing sebanyak 16.384 dan 15.360 sampel data berdasarkan pencuplikan kuasiacak. Perhitungan indeks kinerja terhadap fungsi pengukuran impedansi gangguan berdasarkan variasi nilai faktor dilakukan oleh algoritma relai. Selanjutnya, prosedur untuk perhitungan indeks kepekaan diestimasi menggunakan SIMLAB (lihat Gambar 5). Hasil estimasi perhitungan indeks kepekaan menggunakan pendekatan perhitungan statistik dapat ditunjukkan pada Gambar 6. Kesimpulan dari GSA, seperti ditunjukkan pada Gambar 6, dapat dijelaskan untuk hal yang spesifik sebagai berikut.

Seperti pada Gambar 6(a), faktor $x_1(R_F)$ memiliki karakteristik menurun ketika gangguan terjadi sebelum kompensator dan makin menjauh terhadap lokasi relai. Sebaliknya, ketika gangguan terjadi setelah kompensator (Gambar 6(b)), pengaruh resistansi kegagalan menaik. Kedua kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengaruh resistansi kegagalan R_F masih sangat dominan untuk setiap lokasi gangguan.

Faktor $x_2(\delta_{F1})$ berpengaruh dominan terhadap kinerja relai setelah resistansi kegagalan dan terjadi ketika gangguan setelah kompensator (lihat Gambar 6(b)). Pengaruh $x_3(k_0)$ terjadi untuk gangguan setelah kompensator dan memiliki karakteristik menurun terhadap lokasi gangguan. Demikian juga untuk $x_2(\delta_{F1})$ (lihat Gambar 6(b)).

Untuk pengaruh faktor hasil interaksi, pengamatan difokuskan pada pengaruh faktor hasil interaksi antara x_1 dan x_{15} . Karakteristik hasil interaksi kedua faktor ini meningkat untuk lokasi gangguan setelah kompensator dan karakteristik menurun setelah gangguan 0,8 p.u serta 1 p.u. Hal ini diakibatkan oleh pengaruh dari pemasangan kompensator seri sebesar 70% dari total saluran.

Teknik pengujian yang dikembangkan sangat berguna untuk pengujian relai proteksi. Pengujian dapat mendekati kondisi nyata dengan semua faktor dapat dianalisis secara bersamaan. Teknik ini dapat meningkatkan hasil pengujian dibandingkan dengan pengujian sebelumnya karena pengaruh individu dan interaksi antarfaktor terhadap kinerja relai dapat diamati.

V. KESIMPULAN

Pada makalah ini, metodologi untuk studi kepekaan secara sistematis terhadap fungsi pengukuran impedansi gangguan dari model IED relai jarak SEL-421 dalam konteks saluran transmisi tunggal dengan kompensator seri telah disajikan. Teknik pengujian dikembangkan melalui analisis varians dari kesalahan pengukuran komputasi oleh algoritma yang dipengaruhi oleh sejumlah faktor. Untuk menghilangkan faktor yang tidak terlalu berpengaruh, yaitu mengurangi dimensi ruang faktor, metode skrining faktor dengan metode Morris perlu dilakukan terlebih dahulu. Untuk kasus yang disajikan, dimensi ruang faktor dikurangi menjadi 7 faktor, dari 19 faktor sistem, dan analisis global berdasarkan kuasiacak pencuplikan ruang faktor. Dari hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa resistansi kegagalan tanah $x_1(R_F)$ merupakan faktor yang

penting untuk diperhatikan. Ketelitian kerja relai sangat dipengaruhi oleh kemampuan algoritma relai dalam mengatasi pengaruh faktor R_F yang dominan untuk semua lokasi gangguan dalam perhitungan impedansi gangguan. Impedansi gangguan juga sensitif terhadap kompensator urutan nol $x_3(k_0)$. Nilai ini sangat dipengaruhi oleh ketidakpastian nilai impedansi urutan nol dari saluran dan juga impedansi urutan positif saluran, yang sudah tentu dipengaruhi oleh sudut aliran beban ketika terjadi gangguan.

Metodologi diimplementasikan dalam dua lingkup perangkat lunak: DIGSILENT untuk melakukan pemodelan sistem, simulasi gangguan, dan pengukuran impedansi gangguan oleh algoritma relai jarak SEL-421; dan SIMLAB untuk pengambilan urutan sampel dan estimasi tingkat kepekaan algoritma sebagai pengaruh dari parameter ketidakpastian. Metodologi yang diusulkan dapat sangat berguna dalam pengujian aplikasi kinerja IED yang berbeda ketika harus dibandingkan dan ketika mengidentifikasi faktor yang dapat memengaruhi keputusan dalam penggunaan relai untuk pengaturan dan strategi dalam pencadangan relai. Teknik pengujian ini diharapkan akan bermanfaat untuk pengguna relai maupun pabrikan relai dalam rangka penggunaan dan pengembangan relai ketika faktor ketidakpastian perlu diamati.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam publikasi ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Nanang Rohadi; metodologi, Nanang Rohadi; perangkat lunak, Nanang Rohadi; validasi, Nanang Rohadi; analisis formal, Nanang Rohadi; visualisasi, Nanang Rohadi; administrasi proyek, Bambang Mukti Wibawa dan Nendi Suhendi; penyuntingan, Bambang Mukti Wibawa dan Nendi Suhendi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Universitas Padjadjaran dan Fakultas MIPA atas bantuan finansial yang diberikan selama melakukan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] A. Purohit dan V. Gohokar, "Maloperation of distance relay under faulty conditions in presence of static synchronous series compensator," *2019 IEEE 2nd Int. Conf. Power Energy Appl. (ICPEA)*, 2019, hal. 66–70, doi: 10.1109/ICPEA.2019.8818520.
- [2] D.K. Ibrahim, G.M. Abo-Hamad, E.E.-D.M.A. Zahab, dan A.F. Zobaa, "Comprehensive analysis of the impact of the TCSC on distance relays in interconnected transmission networks," *IEEE Access*, vol. 8, hal. 228315–228325, Des. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3046532.
- [3] N. Rohadi dan N. Suhendi, "Investigasi kinerja relai proteksi saluran transmisi dengan kompensator seri," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 12, no.3, hal. 190–196, Agu. 2023, doi: 10.22146/jnteti.v12i3.4810.
- [4] A. Kalita, "Overreaching of reactive reach in distance protection relay for faults involving earth path and soil resistivity as a limiting determinant," *2022 22nd Nat. Power Syst. Conf. (NPSC)*, 2022, hal. 385–389, doi: 10.1109/NPSC57038.2022.10069392.
- [5] N. Rohadi, N. Suhendi, dan L.K. Men, "Teknik pengujian kinerja algoritma relay jarak menggunakan DIGSILENT," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 10, no. 1, hal. 85–90, Feb. 2021, doi: 10.22146/jnteti.v10i1.735.
- [6] Y. Liang dkk., "A novel fault impedance calculation method for distance protection against fault resistance," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 35, no. 1, hal. 396–407, Feb. 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2920690.
- [7] I. Ahmad dkk., "Sensitivity analysis of entrained flow coal gasification process through Fourier amplitude sensitivity test (FAST) and Sobol techniques," *2018 Int. Conf. Appl. Eng. Math. (ICAEM)*, 2018, hal. 79–84, doi: 10.1109/ICAEM.2018.8536285.
- [8] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, dan M. Ratto, *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. Chichester, Inggris: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [9] Y. Zhou dkk., "Candidate bus selection method for VAR planning of wind-penetrated power system based on Morris screening method," *2019 IEEE 3rd Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. (EI2)*, 2019, hal. 2487–2492, doi: 10.1109/EI247390.2019.9061879.
- [10] *SEL-421 Relay Protection and Automation System Instruction Manual User's Guide*, Schweitzer Engineering Laboratories, INC, Pullman, WA, AS, 2007.
- [11] *User's Manual DiGSILENT PowerFactory Version 14.0*, DiGSILENT GmbH, Gomariningen, Jerman, 2008.
- [12] A.M. Tsimsios dan V.C. Nikolaidis, "Setting zero-sequence compensation factor in distance relays protecting distribution systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, no. 3, hal. 1236–1246, Jun. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2762465.
- [13] M.N. Uddin, N. Rezaei, dan M.S. Arifin, "Hybrid machine learning-based intelligent distance protection and control schemes with fault and zonal classification capabilities for grid - Connected wind farms," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 59, no. 6, hal. 7328–7340, Nov./Des. 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3302836.
- [14] H. Junjie dkk., "Analysis of the effect of UHV series compensation capacitor on distance protection," *2018 2nd IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. (EI2)*, 2018, hal. 1–5, doi: 10.1109/EI2.2018.8582587.
- [15] S. Wu, Z. Liu, dan J. Li, "Global sensitivity analysis based on Inception-CNN," *2020 Chin. Control Decis. Conf. (CCDC)*, 2020, hal. 3818–3823, doi: 10.1109/CCDC49329.2020.9164657.
- [16] P. Zhang, Y. Wang, X. Peng, dan S. Yang, "An improved screening method based on standard Morris for learning neural network," *2018 13th World Congr. Intell. Control Automat. (WCICA)*, 2018, hal. 88–92, doi: 10.1109/WCICA.2018.8630508.
- [17] K. Ye dkk., "Global sensitivity analysis of large distribution system with PVs using deep Gaussian process," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 5, hal. 4888–4891, Sep. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3084455.
- [18] K. Ye dkk., "A data-driven global sensitivity analysis framework for three-phase distribution system with PVs," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 5, hal. 4809–4819, Sep. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3069009.
- [19] N. Rohadi dan R. Živanović, "Sensitivity analysis of impedance measurement algorithms implemented in intelligent electronic devices," *2022 30th Mediterr. Conf. Control Automat. (MED)*, 2022, hal. 1042–1046, doi: 10.1109/MED54222.2022.9837121.
- [20] J. Guo, J. Xiao, S. Liu, dan T. Wang, "Research on global uncertainty and sensitivity analysis (SA) algorithms based on the development of energy internet," *2019 IEEE Int. Conf. Energy Internet (ICEI)*, 2019, hal. 86–91, doi: 10.1109/ICEI.2019.00022.
- [21] K. He, X. Xu, H. Wang, dan Z. Yan, "Global sensitivity analysis of islanded microgrid power flow," *2018 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. (PESGM)*, 2018, hal. 1–5, doi: 10.1109/PESGM.2018.8586617.