

Investigasi Kinerja Relai Proteksi Saluran Transmisi dengan Kompensator Seri

Nanang Rohadi¹, Nendi Suhendi²

^{1,2} Departemen Teknik Elektro Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Padjadjaran, Sumedang, 45364 INDONESIA (tel.: 081290820565; email: ¹nanang.rohadi@unpad.ac.id, ²n.suhendi@unpad.ac.id)

[Diterima: 27 April 2023, Revisi: 3 Juli 2023]
Corresponding Author: Nanang Rohadi

INTISARI — Makalah ini bertujuan melakukan investigasi terhadap hasil pengukuran impedansi gangguan lingkaran tertutup oleh algoritma relai jarak konvensional (tipe *distance relay* SEL-421) ketika digunakan sebagai alat proteksi pada saluran transmisi dengan kompensator seri dan sejumlah parameter ketidakpastian (faktor). Sejumlah faktor dari sistem dapat muncul secara bersamaan dan keberadaan kompensator seri dapat memengaruhi kinerja algoritma relai, terutama pada gangguan fase ke tanah. Sejumlah investigasi terhadap kinerja relai telah dilakukan. Namun, metode pengujian yang dikembangkan hanya mengubah satu faktor, dengan faktor lain dijaga konstan pada waktu bersamaan. Teknik ini tidak lagi relevan ketika tidak mempertimbangkan sejumlah faktor secara bersamaan, sehingga dapat memengaruhi kinerja relai saat terjadi gangguan. Untuk keperluan investigasi algoritma seperti dalam kondisi nyata, sejumlah skenario gangguan perlu dilakukan pada titik gangguan sebelum dan setelah kompensator seri, sambil sekaligus melakukan perubahan nilai dari sejumlah faktor pada model sistem secara bersamaan melalui simulasi gangguan. Pada penelitian ini, perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory digunakan dalam pemodelan sistem daya dan simulasi gangguan. Rangkaian ekuivalen Thevenin dengan dua sumber dan kompensator seri sebesar 42% diletakkan di tengah saluran transmisi sepanjang 300 km dengan tegangan sistem 400 kV untuk simulasi pengujian gangguan. Sejumlah skenario gangguan dan perhitungan impedansi gangguan sebagai fungsi perubahan nilai dari sejumlah faktor dilakukan secara otomatis. Simulasi pengujian otomatis dikembangkan melalui DIGSILENT Programming Language (DPL) untuk melakukan pembacaan sampel data yang dibangkitkan melalui perangkat lunak SIMLAB untuk sejumlah faktor. Kinerja algoritma relai untuk perhitungan impedansi gangguan tidak dipengaruhi oleh keberadaan kompensator seri ketika gangguan terjadi sebelum kompensator, tetapi sebaliknya ketika gangguan terjadi setelah kompensator. Perubahan sejumlah faktor secara bersamaan memengaruhi akurasi relai dan menyebabkan kinerja relai memburuk untuk gangguan setelah kompensator, yaitu terjadinya kegagalan operasi relai berupa *underreaching* dan *overreaching*. Teknik pengujian yang dikembangkan diharapkan dapat digunakan sebagai alat bantu pengujian terkini untuk pengembangan dan implementasi relai secara tepat dan seperti pada kondisi nyata.

KATA KUNCI — Kinerja Relai, Relay Jarak, Parameter Ketidakpastian, Kompensator Seri, Algoritma Relai, DPL.

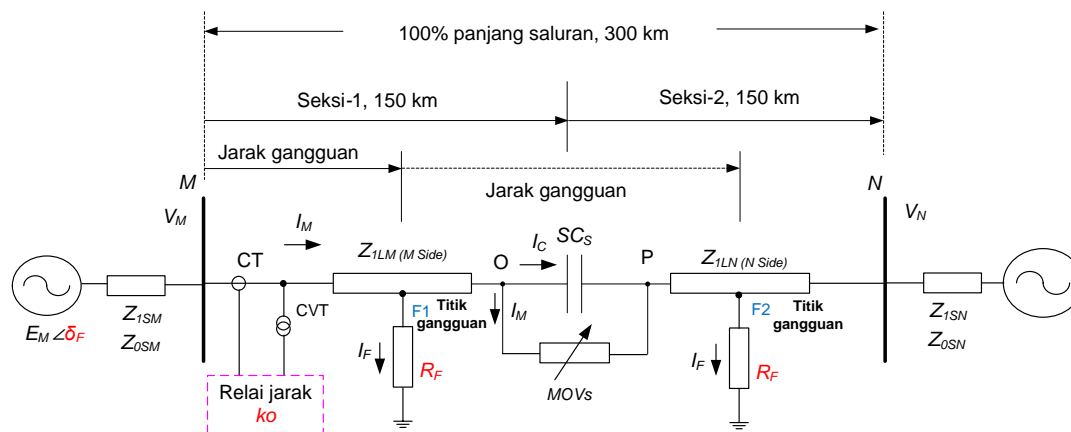
I. PENDAHULUAN

Relai jarak (*distance relay*) adalah salah satu relai proteksi yang merupakan bagian penting pada sistem saluran transmisi. Pada implementasinya, proteksi relai jarak berfungsi untuk melindungi saluran transmisi pada saat terjadi gangguan. Relai jarak harus beroperasi secara akurat pada saat terjadi gangguan, yaitu melalui tahapan identifikasi gangguan yang terjadi dan selanjutnya mengisolasinya hanya pada bagian yang mengalami gangguan [1]. Relai jarak konvensional dirancang untuk mampu mendeteksi nilai impedansi gangguan secara benar berdasarkan pengukuran secara lokal sinyal besaran arus dan tegangan gangguan [2]. Relai jarak yang bekerja berdasarkan besaran *phasor* arus dan tegangan untuk perhitungan impedansi oleh algoritma relai dipengaruhi oleh sejumlah faktor [3], [4].

Perhatian yang lebih terhadap akurasi relai jarak melalui kinerja algoritma relai juga diperlukan ketika relai jarak digunakan pada saluran transmisi dengan kompensator seri dengan perangkat pengamanan tegangan lebih berupa *metal oxide varistors* (MOV). Kompensator seri untuk mengompensasi reaktansi induktif seri saluran transmisi dapat meningkatkan transfer daya listrik melalui saluran, meningkatkan stabilitas sistem daya, mengurangi rugi-rugi pada sistem daya, dan meningkatkan pengaturan tegangan di ujung penerima [2], [5], [6]. Selain itu, keberadaan kapasitor seri juga dapat menimbulkan sejumlah masalah pada kinerja proteksi relai jarak konvensional (tipe *distance relay* SEL-421), yang bekerja

berdasarkan besaran *phasor* (*non-pilot relay*) [7]. Kondisi ini makin buruk ketika nilai kapasitor seri yang terpasang lebih besar daripada impedansi saluran yang dikompensasi, yaitu persoalan pada perhitungan impedansi gangguan oleh algoritma relai, terutama saat terjadi gangguan setelah kompensator [2]. Pada kondisi tersebut, perhitungan impedansi gangguan oleh algoritma tidak lagi berbanding lurus terhadap jarak fisik saluran transmisi. Jarak saluran yang diukur oleh algoritma relai dari titik terjadinya gangguan ke lokasi relai terpasang adalah impedansi saluran pada gangguan di *zone-1* dan secara elektrik dapat terlihat lebih pendek [2], [5]. Lebih jauh lagi, sejumlah penelitian sebelumnya menjelaskan persoalan yang ditimbulkan terhadap kinerja relai proteksi akibat pemasangan kapasitor seri dan sejumlah faktor [7]-[10].

Rangkaian ekuivalen Thevenin (lihat Gambar 1) untuk simulasi gangguan berupa model diagram garis tunggal saluran transmisi pada sistem tegangan tinggi. Untuk keperluan investigasi terhadap kinerja algoritma relai jarak, digunakan saluran transmisi sepanjang 300 km. Saluran transmisi ini dilengkapi dengan relai jarak konvensional yang terpasang pada satu sisi saluran, dengan rangkaian kompensator seri $SC_S + MOV_S$ sebesar 42% dipasang di tengah saluran transmisi, yaitu antara dua sumber tegangan, E_M dan E_N . Seperti tampak pada Gambar 1, indikator berwarna merah menunjukkan sejumlah parameter yang dapat mengganggu kinerja relai, termasuk keberadaan kapasitor seri yang terpasang pada saluran transmisi.



Gambar 1. Saluran transmisi tunggal dengan kompensator seri: F₁- gangguan sebelum SC_s + MOV_s dan F₁- gangguan setelah SC_s + MOV_s.

Tujuan makalah ini adalah untuk melakukan investigasi terhadap kinerja algoritma relai melalui sejumlah simulasi pada saat kondisi gangguan fase A ke tanah sebagai fungsi perubahan nilai dari sejumlah faktor (seperti label merah pada Gambar 1). Investigasi kinerja relai dilakukan sebagai fungsi perubahan nilai faktor yang dilakukan secara bersamaan. Aplikasi teknik pengujian secara otomatis [1] sangat diperlukan untuk menginvestigasi kinerja algoritma relai saat terjadi gangguan sebelum dan setelah kompensator seri SC_s + MOV_s.

Penelitian sebelumnya terkait pengaruh kompensator seri dan sejumlah faktor serta solusi yang ditawarkan terhadap pengukuran kinerja relai jarak telah dilakukan [11], [12]. Namun, metode yang telah dikembangkan hanya melakukan pengamatan kinerja relai terhadap satu faktor, sementara faktor lain dijaga konstan pada satu waktu. Teknik ini tidak mewakili kondisi nyata, yaitu pengaruh sejumlah faktor yang dapat terjadi secara bersamaan, seperti pada metode pengujian yang sedang dikembangkan pada penelitian ini.

II. ISU PENGGUNAAN KOMPENSATOR SERI

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, penempatan kompensator seri pada saluran transmisi adalah salah satu alternatif metode untuk meningkatkan pengiriman daya listrik pada saluran transmisi, di samping untuk keperluan peningkatan kestabilan sistem tenaga. Pada penggunaan kapasitor seri, kestabilan relatif juga dapat ditingkatkan. Kestabilan ini diperlukan oleh generator untuk tetap dalam kondisi sinkron selama gangguan. Sebaliknya, kondisi yang tidak diinginkan akan muncul pada kinerja relai proteksi ketika terjadi gangguan akibat pengaruh kompensator seri.

Seperti tampak pada Gambar 1 dan berdasarkan hasil pengujian yang akan dijelaskan pada bagian berikutnya, keberadaan kompensator seri tidak berpengaruh terhadap akurasi perhitungan impedansi gangguan oleh algoritma untuk gangguan sebelum kompensator F₁. Saluran transmisi pada kondisi ini seolah tidak dalam kondisi terkompensasi, sehingga impedansi gangguan akan berbanding lurus terhadap jarak gangguan (lokasi gangguan), seperti ditunjukkan pada (1).

$$(R_{1m} + jX_{1m}) * p \quad (1)$$

dengan

p = jarak titik gangguan F₁ terhadap lokasi relai (km)

R_{1m} = resistansi saluran (Ω/km)

X_{1m} = reaktansi saluran (Ω/km).

Pada kondisi ini, saluran transmisi bersifat induktif, sehingga arus gangguan tertinggal terhadap tegangan gangguan

dan akan menghasilkan pengukuran impedansi gangguan secara proporsional sebagai fungsi dari jarak gangguan.

Pengaruh kompensator untuk gangguan di titik F₂ dapat menimbulkan *voltage inversion*, yaitu sudut tegangan pada M terbaca berubah sebesar 180° [13]. Seperti terlihat pada Gambar 1, ketika diasumsikan bahwa proteksi tegangan lebih MOV tidak bekerja pada saat terjadi gangguan, *voltage inversion* dapat dinyatakan seperti pada (2).

$$X_{1SM} < X_C < (X_{1SM} + X_{1LM} + X_{1LN}(F_2)). \quad (2)$$

Fenomena *voltage inversion* pada busbar M yang terbaca oleh relai melalui sisi sekunder *capacitive voltage transformer* (CVT) akan dilihat sebagai impedansi arah balik karena saluran bersifat kapasitif ketika diasumsikan $X_C > X_{1LM}$, yaitu tegangan tertinggal terhadap arus sebesar 90°. Karakteristik saluran akan berubah karena terjadi kompensasi nilai reaktansi induktif dari saluran pada segmen N. Kesalahan pengukuran impedansi gangguan berupa malaoperasi dari relai akan dapat terjadi terutama pada gangguan setelah kapasitor seri karena dapat memengaruhi hubungan dasar antara kerja relai dan impedansi saluran [14]. Pada kondisi ini, secara elektrik seolah saluran terlihat menjadi lebih pendek dan kerja relai jarak pada daerah *zone-1* akan mengalami *overreaching*, sehingga batas jangkauan di *zone-1* (0,8 p.u.) perlu disesuaikan untuk menghindari malaoperasi relai saat terjadi gangguan. Sebaliknya, untuk gangguan sebelum kompensator, pengukuran impedansi gangguan arah maju akan dilakukan oleh relai karena saluran bersifat induktif, yaitu sudut tegangan mendahului arus gangguan. Pada kondisi ini, kesalahan pengukuran sesuai dengan (6) dan (7) hanya dipengaruhi oleh sejumlah faktor dari sistem.

Pengurangan impedansi saluran untuk gangguan di F₂ karena terjadinya kompensasi reaktansi saluran pX_L terhadap X_C dapat dinyatakan dengan persamaan $pX_L = X_L - X_C$. Simulasi dengan sejumlah n pada titik gangguan sebelum kapasitor, yaitu di titik F₁, dan setelah kapasitor F₂ dengan sejumlah faktor dapat memengaruhi kinerja relai. Kompensator seri (SC_s+MOV_s) dengan 42% kompensasi diletakkan di tengah saluran kapasitor. Hasil investigasi sebelumnya menunjukkan bahwa untuk gangguan sebelum kompensator, kerja relai tidak mengalami kesalahan [10]. Hasil simulasi untuk gangguan di F₁ dan tanpa pengaruh sejumlah faktor dapat dijelaskan melalui gambar hasil simulasi.

Tipikal dari saluran transmisi untuk gangguan sebelum kompensator (gangguan di titik F₁) dapat dikatakan sebagai saluran transmisi tanpa kompensator, sehingga pengukuran

impedansi gangguan yang diestimasi oleh algoritma memiliki hubungan yang linier dan proporsional terhadap panjang saluran sebagai fungsi dari lokasi gangguan sebelum kompensator. Pada kondisi ini, kesalahan perhitungan akan muncul ketika sejumlah faktor memengaruhinya [2], [10]. Perhitungan impedansi gangguan untuk gangguan pada saluran transmisi tanpa kompensator seri merupakan fungsi dari lokasi gangguan di F_1 . Impedansi saluran transmisi untuk gangguan sebelum kompensator bersifat induktif, sehingga arus gangguan dalam sistem lingkaran tertutup akan tertinggal terhadap tegangan pada bus M.

Ketika gangguan terjadi setelah kapasitor (gangguan di titik F_2), rangkaian kompensator seri SCs akan mengubah karakteristik keluaran perhitungan impedansi. Pada kondisi ini, jangkauan relai untuk *zone-1* pada pengaturan relai jarak adalah 80% (0,8 p.u.). Ketika terjadi gangguan pada titik F_2 , dengan mengasumsikan bahwa proteksi tegangan lebih dari kompensator seri MOV_s tidak bekerja, akan terjadi *overreaching* pada kerja relai karena pengurangan impedansi secara elektrik akibat kompensator [10]. Dalam hal ini, sejumlah teknik perlu dilakukan untuk mengubah pengaturan *zone-1* menjadi berkurang, sehingga kerja proteksi dapat lebih akurat, seperti yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya [15], [16]. Akibat pengaruh kapasitor seri, untuk gangguan di F_2 , estimasi impedansi gangguan seolah-olah masih berada di *zone-1* (luas jangkauan sebesar 0,8 p.u.) dan sejumlah faktor akan memperburuk akurasi kerja relai [2].

III. PERHITUNGAN IMPEDANSI GANGGUAN DENGAN KOMPENSATOR SERI DAN SEJUMLAH FAKTOR

Estimasi dari impedansi gangguan yang mengandung nilai kapasitansi dan induktansi didasarkan pada perhitungan impedansi lingkaran tertutup urutan positif [2]. Respons relai saat terjadi gangguan didasarkan pada pengukuran lokal sinyal tegangan dan arus gangguan oleh relai melalui sisi sekunder trafo instrumen (*current transformer/CT* dan *CVT*). Dalam hal ini, relai jarak konvensional sangat mudah digunakan, tetapi sejumlah faktor dari sistem, baik faktor eksternal maupun internal, yang tidak diketahui nilai sebenarnya dapat memengaruhi kinerja algoritma perhitungan impedansi urutan positif Z_{1m} dari relai tersebut [1], [10], [12]. Faktor-faktor tersebut dapat berupa *fault resistance* R_F , sudut aliran beban δ_F , dan impedansi urutan nol Z_{0L} , yang tentunya akan memengaruhi nilai kompensasi urutan nol, yaitu k_0 , yang akan digunakan pada algoritma perhitungan.

Perhitungan impedansi gangguan, sebagai fungsi dari rasio tegangan gangguan dan arus gangguan yang terkompensasi oleh kompensator seri, akan menghasilkan kesalahan pengukuran impedansi sebesar ΔZ_{1m} . Kesalahan pengukuran yang mengakibatkan timbulnya kegagalan operasi dari relai merupakan fungsi dari keberadaan kompensator (gangguan di F_2) dan sejumlah faktor. Keduanya memengaruhi akurasi perhitungan impedansi urutan positif oleh algoritma relai.

Investigasi kinerja relai berdasarkan perhitungan impedansi gangguan dijelaskan untuk keperluan analisis pengaruh rangkaian kapasitor seri ($SCs+MOV_s$) dan sejumlah parameter ketidakpastian (faktor) yang dapat memengaruhi akurasi kerja algoritma relai jarak saat terjadi gangguan di titik F_1 dan F_2 . Untuk keperluan perhitungan impedansi gangguan, diagram skematis dan sistem daya dimodelkan dengan rangkaian ekuivalen Thevenin (lihat Gambar 1) dengan dua sumber tegangan E_M dan E_N , serta impedansi sumber urutan positif

Z_{1SM} dan Z_{1SN} . Model yang ditawarkan dikonfigurasi dengan perangkat lunak DIGSILENT dengan warna merah (Gambar 1) sebagai sejumlah faktor yang juga akan diamati. Kinerja dari perhitungan impedansi pada algoritma relai didasarkan pada pengukuran sinyal tegangan dan arus gangguan yang ditangkap oleh relai melalui sisi sekunder trafo instrumen CT dan CVT.

Perhitungan impedansi gangguan pada algoritma relai didasarkan pada kompensasi arus urutan nol k_0 . Faktor kompensasi tersebut dipengaruhi oleh impedansi saluran urutan nol Z_{0L} dan impedansi saluran urutan positif Z_{1L} , yang tentunya tidak diketahui nilainya dengan pasti. Oleh karena itu, k_0 sebagai konstanta kalibrasi pengukuran mengandung ketidakpastian nilai, sehingga dapat diasumsikan juga sebagai faktor yang pada akhirnya dapat memengaruhi akurasi perhitungan impedansi.

Pada gangguan di titik F_1 , perhitungan impedansi Z_{1m} oleh relai tidak dipengaruhi oleh kompensator seri, berbeda dengan ketika gangguan terjadi di titik F_2 , sehingga analisis perhitungan impedansi harus dibedakan dan sejumlah faktor pada warna merah ikut diperhitungkan (lihat Gambar 1). Pada kondisi ini, impedansi gangguan yang dilihat oleh relai ke titik F_2 tidak sama dengan impedansi saluran tanpa kompensator. Hal ini terjadi akibat pengaruh sejumlah faktor dan kompensator seri.

Gambar 2 menunjukkan komponen simetris dari gangguan fase A ke tanah dengan *fault resistance* R_F (faktor). Urutan komponen simetris dari tegangan dapat dinyatakan dengan (3) [12].

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

Selanjutnya, (3) dapat dijabarkan sebagai berikut.

$$V_1 = V_{1SA} - Z_{1LS} I_{1SA} - V_{1C} - m Z_{1LR} I_{1SA} \quad (4a)$$

$$V_2 = V_{2SA} - Z_{2LS} I_{2SA} - V_{2C} - m Z_{2LR} I_{2SA} \quad (4b)$$

$$V_0 = V_{0SA} - Z_{0LS} I_{0SA} - V_{0C} - m Z_{0LR} I_{0SA} \quad (4c)$$

dengan m adalah jarak dari kapasitor ke titik gangguan F_2 ; V_C adalah jatuh tegangan $SCs+MOV_s$; 0,1,2 merepresentasikan simbol urutan nol, positif, dan negatif; sedangkan L, S, A masing-masing merupakan saluran sumber dan fase A.

Dengan menyatakan bahwa impedansi saluran urutan positif sama dengan impedansi urutan negatif, yaitu $Z_{1L} = Z_{2L}$, maka pengukuran tegangan dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$V_{MA} = V_C + Z_{1LM} \left[I_{MA} + \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}} I_{0MA} \right] + 3R_F I_F$$

$$V_{MA} = V_C + Z_{1LM} [I_{MA} + k_0 I_{0MA}] + 3R_F I_F \quad (5)$$

$$V_{MA} = V_C + Z_{1LM} I_{MA}^C + 3R_F I_F.$$

Selanjutnya, dapat dinyatakan bahwa

$$V_{MA} = V_{1MA} + V_{2MA} + V_{0MA}$$

$$V_C = V_{1C} + V_{2C} + V_{0C}$$

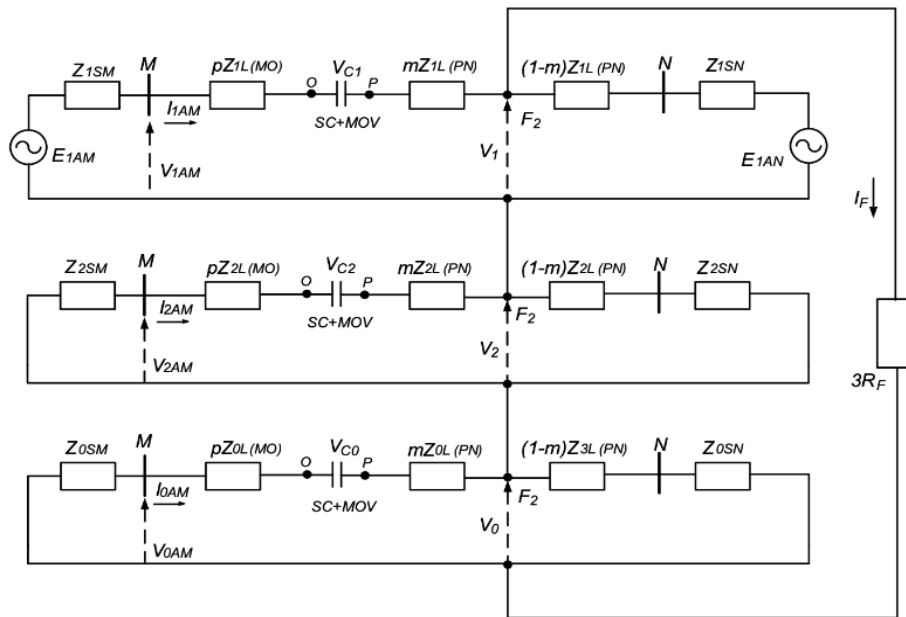
$$I_{MA} = I_{1MA} + I_{2MA} + I_{0MA}$$

$$Z_{1LMN} = Z_{1LM} + m Z_{1LN}$$

$$Z_{2LMN} = Z_{2LM} + m Z_{2LN}$$

$$Z_{0LMN} = Z_{0LM} + m Z_{0LN}$$

sehingga pengukuran impedansi pada gangguan di titik F_2 dapat dinyatakan dengan (6).



Gambar 2. Komponen simetris untuk gangguan fase A ke tanah di titik F_2 .

$$Z_{1m} = \frac{V_{MA}}{I_{MA}^C} = Z_{1LMN} + 3R_F \frac{I_F}{I_{MA}^C} + \frac{V_C}{I_{MA}^C} \quad (6)$$

$$= Z_{1LMN} + \Delta Z_{1LMN}$$

dengan V_{MA} adalah tegangan fase A ke tanah yang terukur di sisi M dan I_{MA}^C adalah arus I_{MA} yang terkompensasi dengan arus urutan nol k_0 dan terukur oleh relai. I_{MA}^C dinyatakan dalam (7).

$$I_{MA}^C = I_{MA} + k_0 I_{0MA}. \quad (7)$$

Kompensasi urutan nol k_0 pada (5) didefinisikan sebagai (8).

$$k_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}}. \quad (8)$$

Dapat terlihat pada (6) dan (7) bahwa kesalahan pada perhitungan impedansi Z_{1m} oleh algoritma relai, khususnya pada gangguan di titik F_2 , dapat dinyatakan paling tidak sebagai fungsi dari sejumlah faktor dan terjadinya jatuh tegangan pada kapasitor seri V_C , yaitu didefinisikan dalam (9).

$$\Delta Z_{1m} = f(R_F, k_0, \delta_F, V_C). \quad (9)$$

Dari (6) dapat diketahui bahwa sejumlah faktor dan tegangan pada kapasitor seri dapat memengaruhi akurasi pengukuran impedansi. Selanjutnya, analisis kinerja algoritma akan berfokus pada pengaruh kesalahan pada (9), yaitu oleh sejumlah faktor pada pengukuran impedansi Z_{1m} .

IV. SIMULASI GANGGUAN DAN EVALUASI

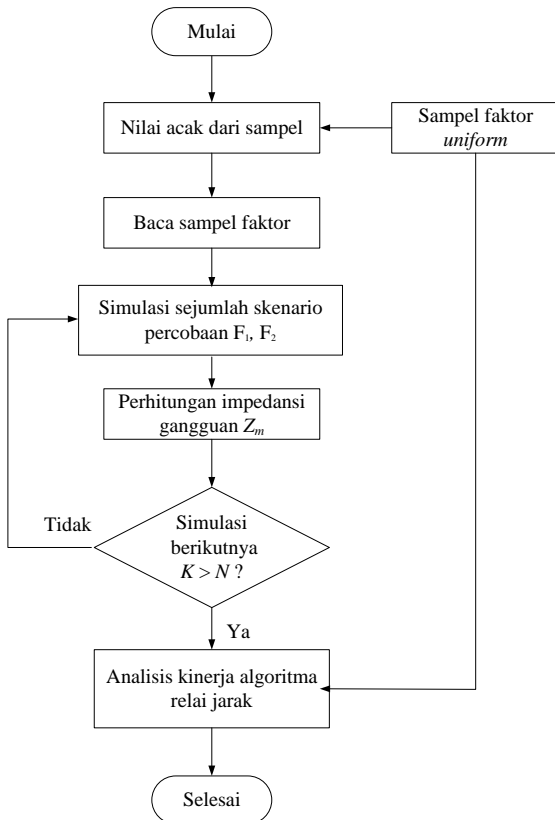
Pada penelitian sebelumnya, pengujian pengaruh sejumlah faktor diamati secara bergantian terhadap satu faktor dengan mempertahankan faktor lainnya tetap dalam keadaan konstan [16]. Teknik pengujian yang dilakukan tentu tidak mewakili kondisi yang sesungguhnya dalam mengamati kerja relai saat terjadi gangguan. Seperti dalam kondisi nyata, pengaruh sejumlah faktor terhadap kinerja relai dapat terjadi secara bersamaan pada saat ada gangguan. Pada penelitian ini, metode baru yang dikembangkan untuk menginvestigasi kinerja relai sama seperti pada kondisi nyata, yaitu bahwa nilai acak dari sejumlah faktor sistem dibangkitkan pada batas nilai tertentu (lihat Tabel I). Nilai parameter ketidakpastian yang

TABEL I
INTERVAL NILAI FAKTOR YANG MEMENGARUHI PENGUKURAN IMPEDANSI GANGGUAN (LIHAT GAMBAR 1)

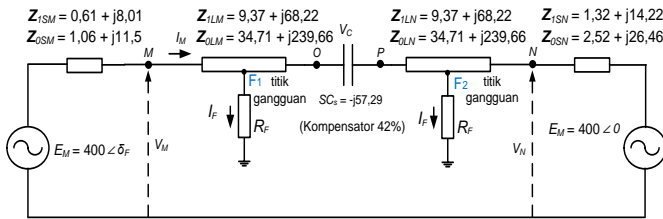
Parameter Ketidakpastian	Simbol	Interval Nilai
x_1	R_F	$[0 : 50] \Omega$
x_2	δ_F	$[-30 : 30]$ derajat
x_3	k_0	$[0,797 : 0,881]$

dibangkitkan secara acak selanjutnya dicuplik (dibaca) secara otomatis [1] melalui algoritma pengujian yang dikembangkan. Sejumlah nilai parameter ketidakpastian (faktor) dari model sistem tersebut secara bersamaan diadaptasi sesuai nilai acak sebelum dilakukan simulasi pada titik gangguan sebelum dan setelah kompensator seri, sebagai fungsi dari sejumlah faktor secara otomatis dan juga fungsi dari keberadaan kapasitor seri.

Pengaruh kompensator seri terhadap pengukuran impedansi juga diamati, terutama gangguan setelah kompensator. Simulasi pengujian algoritma relai untuk sejumlah skenario gangguan melibatkan dua lingkup komputasi, yaitu perangkat lunak SIMLAB [17] dan DIGSILENT PowerFactory [18]. DIGSILENT digunakan untuk pemodelan sistem proteksi dan model simulasi sistem daya gangguan, sedangkan SIMLAB digunakan untuk membangkitkan nilai acak dari faktor pada rentang nilai tertentu (lihat Tabel I). Pada percobaan ini, pengujian dan komputasi nilai impedansi gangguan dilakukan secara otomatis melalui program yang dikembangkan melalui alat bantu *compiler* DPL yang disediakan oleh DIGSILENT. Langkah kerja dari sistem pengujian otomatis [1] ini adalah algoritma (yang dikembangkan melalui DPL) membaca nilai parameter acak secara bersamaan dari sejumlah sampel dengan distribusi *uniform* yang dibangkitkan secara acak. Lalu, sejumlah skenario percobaan dijalankan untuk simulasi gangguan di titik F_1 dan F_2 (lihat Gambar 3). Perhitungan impedansi gangguan oleh algoritma dari model relai jarak didasarkan pada nilai pengukuran arus yang terkompensasi I_{MA}^C dan tegangan gangguan V_{MA} yang diperoleh dari pembacaan pada keluaran sisi sekunder CT dan CVT sebagai masukan dari algoritma [19]. Sejumlah skenario simulasi gangguan dijalankan secara otomatis untuk sejumlah titik gangguan sepanjang saluran yang dilindungi, yaitu di area



Gambar 3. Diagram prosedur pengujian algoritma relai.

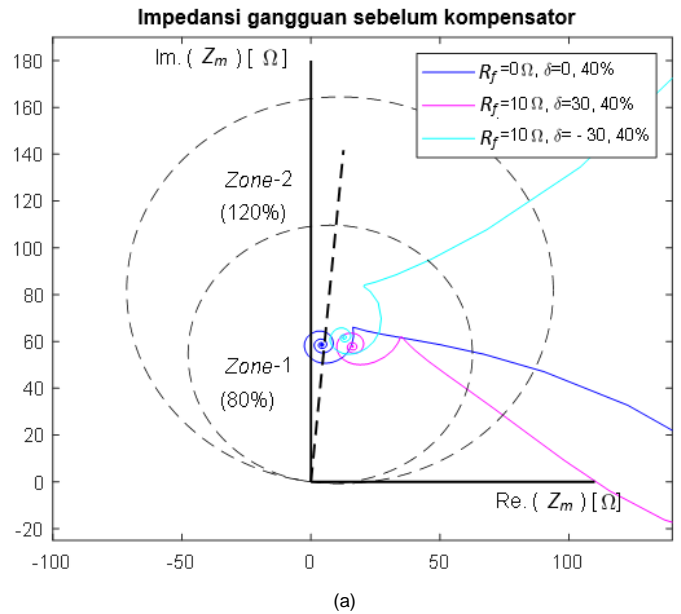


Gambar 4. Parameter sistem untuk simulasi gangguan.

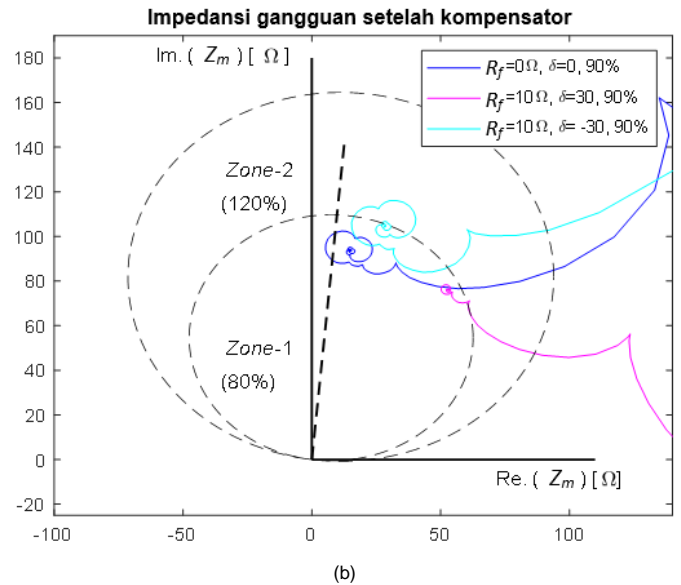
sebelum dan setelah kompensator seri, dengan sejumlah sampel dari faktor yang akan diujikan. Hal ini dilakukan untuk melihat akurasi perhitungan impedansi gangguan oleh algoritma. Investigasi pengujian relai lebih difokuskan pada area gangguan di *zone-1* sampai garis batas yang merupakan daerah kritis, yaitu relai proteksi harus bekerja secara instan.

Dalam skenario percobaan, seperti terlihat pada Gambar 1 dan Gambar 3, tipe gangguan fase A ke tanah (atau dapat juga dengan tipe gangguan yang lain) disimulasi pada titik gangguan di F_1 dan F_2 untuk keperluan pengujian kinerja algoritma relai. Perhitungan impedansi gangguan urutan positif Z_{1M} dilakukan oleh algoritma relai seperti pada (6), yaitu sebagai fungsi nilai acak dari sejumlah faktor dan juga pengaruh dari kompensator seri SC_s untuk gangguan di F_1 dan F_2 .

Untuk mendemonstrasikan pengaruh perubahan faktor pada kesalahan pengukuran impedansi, seperti pada (9), sejumlah simulasi gangguan pada titik F_1 dan F_2 dilakukan dengan parameter sistem seperti ditunjukkan pada Gambar 4. *Zone-1* pada relai jarak diatur sebesar 80% dari panjang total saluran yang diproteksi dan *zone-2* diatur sebesar 120%, sehingga dapat menjangkau saluran berikutnya. Karakteristik saluran sebelum dan setelah 42% dari SC_s dianggap identik. Penelitian ini berfokus pada investigasi kinerja relai berdasarkan skenario pengujian yang telah ditentukan, dengan parameter dari sistem untuk pemodelan dan pengujian diambil dari sumber yang valid.



(a)

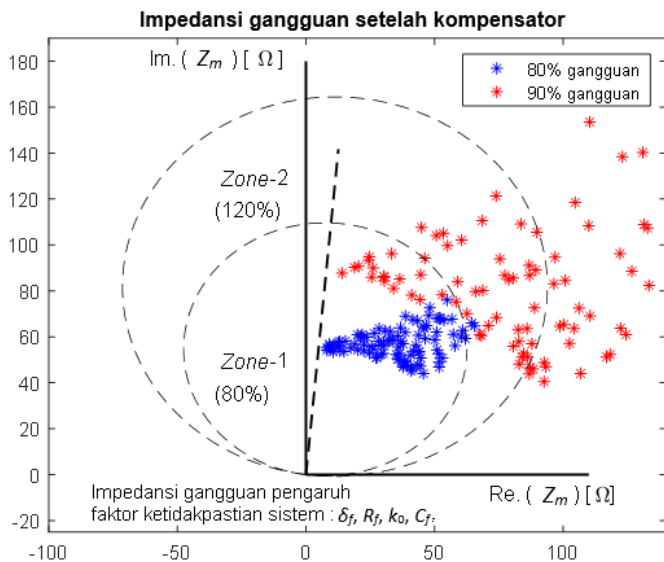


(b)

Gambar 5. Pelacakan pengukuran impedansi gangguan, (a) untuk gangguan di F_1 , (b) untuk gangguan di F_2 .

Gambar 5(a) memperlihatkan pelacakan pengukuran impedansi gangguan fase A ke tanah untuk simulasi gangguan 0,4 p.u (40%) dari total saluran yang dilindungi, yaitu di titik F_1 , dan dipengaruhi oleh sejumlah faktor, yaitu $R_F = 10 \Omega$ dan $\delta_F = 0^\circ, \pm 30^\circ$. Terlihat bahwa pengukuran impedansi gangguan lingkaran tertutup, yaitu $pZ_{1m} + \Delta Z_{1m}$, mengalami deviasi dari pengukuran yang sebenarnya pZ_{1LM} (warna biru). Kesalahan pengukuran ΔZ_{1m} sebagai fungsi dari faktor R_F dan δ_F akan memengaruhi akurasi pengukuran [20] dan dibuktikan pada Gambar 5(a). Terlihat bahwa perubahan nilai impedansi gangguan bergeser ke kanan karena penambahan nilai R_F dan juga dapat bergeser ke atas atau ke bawah karena perubahan sudut aliran beban δ_F (warna magenta dan cyan).

Gambar 5(b) menunjukkan pelacakan pengukuran impedansi pada simulasi gangguan setelah kompensator seri, yaitu di F_2 , 0,9 p.u. (90%), dengan $R_F = 0^\circ, 10 \Omega$ dan $\delta_F = 0^\circ, \pm 30^\circ$. Terlihat bahwa kesalahan perhitungan impedansi ΔZ_m sangat dipengaruhi oleh sejumlah faktor dan jatuh tegangan pada kapasitor seri V_C . Oleh karena itu, efek dari ketidakpastian pada pengukuran impedansi di lokasi tersebut, yaitu dZ_m , dianggap tidak pasti dan kejadian malaoperasi



Gambar 6. Pengukuran impedansi gangguan pada sejumlah lokasi gangguan setelah kompensator dengan perubahan nilai parameter secara acak (Tabel I).

karena dua kemungkinan kegagalan dapat terjadi, yaitu berupa *overreaching* and *underreaching*. Gambar 6 memperlihatkan penjelasan lebih detail terkait perubahan karakteristik dari impedansi gangguan sebagai fungsi sejumlah sampel dari sejumlah faktor (δ_f, R_f, k_o) dan kompensator seri (SC_s).

Untuk lebih mendemonstrasikan pengaruh parameter ketidakpastian sistem (faktor) terhadap pengukuran impedansi gangguan Z_{1m} , dilakukan simulasi untuk sejumlah lokasi gangguan dan juga memperhitungkan keberadaan kompensator. Pengukuran impedansi merupakan fungsi sejumlah nilai sampel acak dari faktor (Gambar 3) yang dibangkitkan (distribusi *uniform*) dengan spesifikasi seperti pada Tabel I dan interval nilai yang diimplementasikan dari faktor R_f, δ_f , dan k_o . Simulasi dan perhitungan impedansi dilakukan secara otomatis oleh algoritma dengan program yang dikembangkan menggunakan alat bantu DPL dari DIGSILENT, untuk pengambilan data, simulasi, dan komputasi impedansi [1].

Dari Gambar 6 terlihat bahwa perhitungan impedansi gangguan oleh algoritma, yang ditunjukkan dengan tanda bintang, adalah gangguan di daerah batas (0,8 p.u.) *zone-1* dan daerah di *zone-2* (0,9 p.u.). Simulasi dan perhitungan impedansi dilakukan sebagai fungsi dari sejumlah faktor dan menunjukkan bahwa telah terjadi malaoperasi dari relai, yaitu berupa *overreaching* dan *underreaching*, baik untuk gangguan 0,8 p.u. maupun 0,9 p.u. Kondisi ekstrem terlihat untuk lokasi gangguan di *zone-2* (0,9 p.u), yaitu perhitungan impedansi dapat menunjukkan bahwa seolah-olah gangguan berada di *zone-1* maupun di *zone-3*. Hal ini terjadi akibat pengaruh kolaborasi dari sejumlah faktor dan keberadaan kompensator seri. Kondisi ini harus dihindari karena dapat berdampak pada keamanan sistem akibat terjadinya kegagalan kerja proteksi sesuai yang diharapkan. Dalam hal ini, dapat diasumsikan bahwa relai jarak konvensional (*distance relay SEL-421*) tidak baik digunakan sebagai penganaman saluran transmisi dengan kompensator seri.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menyajikan hasil investigasi terhadap fungsi pengukuran impedansi gangguan pada algoritma relai yang diimplementasikan pada model relai jarak konvensional (tipe *distance relay SEL 421*) pada saluran transmisi dengan dua sumber tegangan, kompensator seri, dan sejumlah faktor. Hasil

pengujian yang dilakukan dapat menunjukkan bahwa kinerja algoritma relai pada saat gangguan sebelum dan setelah kompensator dipengaruhi oleh sejumlah faktor. Selain itu, kompensator seri juga dapat diamati. Untuk gangguan sebelum kompensator (di titik F_1), sejumlah faktor sangat berkontribusi pada akurasi perhitungan impedansi di *zone-1*. Kesalahan perhitungan impedansi gangguan masih didominasi oleh *fault resistance* R_f , tetapi relai masih dapat bekerja dengan baik untuk percobaan gangguan, misalnya di 0,4 p.u. Kontribusi kompensator seri memengaruhi akurasi algoritma terhadap gangguan setelah kompensator seri dan diperburuk oleh kehadiran sejumlah faktor. Kegagalan operasi relai dapat terjadi untuk simulasi gangguan di *zone-1* (0,8 p.u.) atau *zone-2* (0,9 p.u.). Pada kondisi ini, perhitungan gangguan dapat terbaca oleh relai seolah-olah masing-masing berada di *zone-2* dan *zone-3* atau bahkan terjadi *overreaching* untuk titik gangguan di 0,9 p.u. (*zone-2*) dan *underreaching* karena pengaruh sejumlah faktor. Teknik pengujian kinerja relai yang dikembangkan untuk investigasi dapat diimplementasi melalui sejumlah skenario simulasi gangguan yang dilakukan secara otomatis menggunakan algoritma yang dikembangkan dengan perangkat lunak DPL.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan dengan siapa pun dalam penulisan publikasi ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Universitas Padjadjaran dan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Padjadjaran yang telah membantu memberikan dana dan dukungan lain untuk pelaksanaan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] 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.
- [2] M.T. Hoq, J. Wang, dan N. Taylor, "An Incremental Quantity Based Distance Protection with Capacitor Voltage Estimation for Series Compensated Transmission Lines," *IEEE Access*, Vol. 9, hal. 164493-164502, Des. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3134558.
- [3] P.-C. Chen, V. Malbasa, dan M. Kezunovic, "Sensitivity Analysis of Voltage Sag Based Fault Location Algorithm," *2014 Power Syst. Comput. Conf.*, 2014, hal. 1-7, doi: 10.1109/PSCC.2014.7038389.
- [4] S. Roy, N.V.P. Babu, P.S. Babu, dan N.N. Reddy, "Correlation Factor-based Fault-Phase Detection for Series Compensated Transmission Line," *2020 IEEE Appl. Signal Proces. Conf. (ASPCON)*, 2020, hal. 344-348, doi: 10.1109/ASPCON49795.2020.9276705.
- [5] W.M. Elhadad, A.Y. Hatata, dan E.A. Badran, "A Proposed Adaptive Distance Relay Model in ATPDraw," *2018 Twentieth Int. Middle East Power Syst. Conf. (MEPCON)*, 2018, hal. 754-759, doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635105.
- [6] S. Das, B.K. Panigrahi, dan P.K. Jaiswal, "Qualitative Assessment of Power Swing for Enhancing Security of Distance Relay in a TCSC-Compensated Line," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 36, No. 1, hal. 223-234, Feb. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2975955.
- [7] W.-S. Seo, S.-H. Kang, Y.-D. Yoon, dan J.-S. Yoon, "A Conventional Distance Protection for Series-Compensated Lines Considering TCSC Protected by a Metal Oxide Varistor," *2019 IEEE 8th Int. Conf. Adv. Power Syst. Automat., Prot. (APAP)*, 2019, hal. 1622-1628, doi: 10.1109/APAP47170.2019.9224877.
- [8] M.T. Hoq, J. Wang, dan N. Taylor, "Impact of High Levels of Series Compensation on Line Distance Protection," *15th Int. Conf. Develop. Power Syst. Prot. (DPSP 2020)*, 2020, hal. 1-6, doi: 10.1049/cp.2020.0037.
- [9] S.K. Mohanty, A. Karn, dan S. Banerjee, "Decision Tree Supported Distance Relay for Fault Detection and Classification in a Series Compensated Line," *2020 IEEE Int. Conf. Power Electron. Smart Grid*,

- Renew. Energy (PESGRE2020)*, 2020, hal. 1-6, doi: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070724.
- [10] 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.
- [11] A. ElMehdi, M. Benslim, A. Ben-Ashour, dan B. Johnson, "Effects of Low Frequency Oscillations on Distance Relay in Series Compensated Transmission Systems," *2021 IEEE 6th Int. Forum Res., Technol. Soc., Ind. (RTSI)*, 2021, hal. 261-266, doi: 10.1109/RTSI50628.2021.9597273.
- [12] 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.
- [13] B. Vyas, R.P. Maheshwari, dan B. Das, "Protection of Series Compensated Transmission Line: Issue and State of Art," *Elect. Power Syst. Res.*, hal. 93-108, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2013.09017.
- [14] E.O. Schweitzer, III, "A Review of Impedance-Based Fault Locating Experience," *14th Annu. Iowa-Nebraska Syst. Prot. Seminar*, 1988, hal. 1-31.
- [15] H. Abdollahzadeh, B. Mozafari, A. Tavighi, dan J. Martí, "Impact of Shunt Capacitance of a SSSC-Compensated Transmission Line on Performance of Distance Relays," *2013 IEEE Power, Energy Soc. Gen. Meet.*, 2013, hal. 1-5, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672807.
- [16] M. Kezunovic dkk., "An Advanced Method for Testing of Distance Relay Operating Characteristic," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 11, No. 1, hal. 149-157, Jan. 1996, doi: 10.1109/61.484011.
- [17] S. Tarantola dan W. Becker, "SIMLAB Software for Uncertainty and Sensitivity Analysis," dalam *Handbook of Uncertainty Quantification*, R. Ghanem, D. Higdon, dan H. Owahdi, Eds., Cham, Swiss: Springer International Publishing, 2015, hal., 1-21, doi: 10.1007/978-3-319-11259-6_61-1.
- [18] DigSILENT GmbH, Gomaringen, Germany. *DIGSILENT PowerFactory Version 2020*. (2020). Tanggal akses: 19-Mar-2023. [Online]. Available: <https://www.digsilent.de/>
- [19] P.M. Anderson dan R.G. Farmer, *Series Compensation of Power Systems*, Encinitas, AS: PBLSH! Inc., 1996.
- [20] S. Prajapati, H. Dholiya, U. Wani, dan J.A. Patel, "A Novel Characteristic Design of Distance Relay to Abolish Effects of Load Encroachment and Fault Resistance," *2016 IEEE 1st Int. Conf. Power Electron. Intell. Control, Energy Syst. (ICPEICES)*, 2016, hal. 1-4, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853480.