

Analysis of Power Swing Impact on Distance Relay Performance in a 500 kV Transmission System Based on Real-Time Digital Simulator Model

Analisis Pengaruh Power Swing terhadap Performa Distance Relay pada Sistem Transmisi 500 kV Berdasarkan Model Real-Time Digital Simulator

Muhammad Adityo Wiryawan^{1*}, Riana Defi Mahaji Puteri¹

Abstract

Distance relays in high-voltage transmission systems detect faults by measuring impedance; however, fluctuations caused by power swings can mimic fault patterns and trigger false trips. This paper analyzes the impact of power swings on the performance of distance relays in a 500 kV transmission system using Real-Time Digital Simulator (RTDS) simulations. The results indicate that power swings cause 267 to 299 false trip signals before the actual fault occurs in the observed system. Recommendations include the development of protection algorithms such as Power Swing Blocking (PSB) and artificial intelligence (AI) technologies, including Wavelet Transform, Support Vector Machine (SVM), Chaos Theory, Prony Analysis, as well as hybrid combinations such as Wavelet-Chaos Theory and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), to detect fault patterns in real-time. Although this study focuses on a 500 kV HVAC system, the findings can be generalized to other nominal voltage systems utilizing HVAC technology. However, further research is required for applications in HVDC-based systems.

Keywords

Distance Relay, Power Swing, Transmission System Protection, Relay, RTDS.

Abstrak

Distance relay pada sistem transmisi tegangan tinggi mendeteksi gangguan dengan mengukur impedansi, tetapi fluktuasi akibat power swing dapat menyerupai pola gangguan dan memicu kesalahan trip. Artikel ini menganalisis pengaruh power swing pada performa distance relay di sistem transmisi 500 kV menggunakan simulasi Real-Time Digital Simulator (RTDS). Hasil menunjukkan power swing menyebabkan kesalahan trip sebanyak 267 hingga 299 sinyal sebelum gangguan aktual terjadi pada sistem yang diamati. Rekomendasi mencakup pengembangan algoritma proteksi seperti Power Swing Blocking (PSB) dan teknologi kecerdasan buatan (AI), termasuk Wavelet Transform, Support Vector Machine (SVM), Chaos Theory, Prony Analysis, serta kombinasi hybrid seperti Wavelet-Chaos Theory dan Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), untuk mendeteksi pola gangguan secara real-time. Meskipun penelitian ini difokuskan pada sistem HVAC 500 kV, hasilnya dapat digeneralisasi untuk sistem tegangan nominal lainnya selama menggunakan teknologi HVAC. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk aplikasi pada sistem berbasis HVDC.

Kata Kunci

Relai Jarak, Power Swing, Proteksi Sistem Transmisi, Relai, RTDS.

¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang
Sekaran, Gunung Pati, Semarang City, Central Java 50229

* adityowiryawan@students.unnes.ac.id

Submitted : November 19, 2024. Accepted : November 29, 2024. Published : November 30, 2024

PENDAHULUAN

Sistem transmisi listrik merupakan bagian integral dalam pengiriman energi dari produsen hingga konsumen [1]. Pentingnya sistem transmisi listrik dalam menjaga stabilitas dan keandalan jaringan sangatlah krusial, terutama pada saluran transmisi tegangan tinggi yang menghubungkan pembangkit listrik dengan pusat beban yang jauh [2]. Sistem transmisi ini harus dilindungi oleh sistem proteksi yang andal, salah satunya adalah *distance relay*, yang digunakan untuk melindungi saluran transmisi dengan mendeteksi perubahan impedansi pada jaringan [3]. Impedansi digunakan sebagai parameter utama untuk mendeteksi adanya gangguan, baik internal maupun eksternal, dalam sistem transmisi [4], [5].

Namun, terdapat fenomena *power swing* yang menjadi tantangan dalam pengoperasian *distance relay* [6]. *Power swing* adalah kondisi fluktuasi arus dan tegangan yang terjadi akibat perubahan beban besar atau gangguan pada sistem pembangkit, yang tidak selalu disebabkan oleh gangguan internal pada jaringan transmisi [6], [7], [8]. Fenomena ini telah menyebabkan beberapa insiden *misoperation*, seperti pada sistem Jawa-Bali 500 kV yang mengakibatkan pemadaman akibat *tripping* tidak semestinya [9], serta pemadaman besar di India pada Juli 2012 karena ketidakmampuan *relay* membedakan gangguan nyata dan osilasi daya [10].

Kondisi perubahan arus dan tegangan tersebut dapat membuat perubahan pada besaran impedansi yang dirasakan oleh *distance relay* sehingga memungkinkan terjadi kondisi pemutusan listrik yang tidak semestinya. Padahal, pada sistem proteksi tenaga listrik dikenal prinsip *selectivity* [11], yang berarti setiap perangkat proteksi tenaga listrik harus dapat selektif dalam menentukan gangguan. Apabila prinsip ini tidak dipenuhi maka akan berdampak pada banyak timbulnya mala operasi pada sistem proteksi tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak *power swing* terhadap performa *distance relay* pada sistem transmisi tegangan tinggi berbasis HVAC (*High Voltage Alternating Current*). Simulasi dilakukan pada model sistem transmisi 500 kV menggunakan Real-Time Digital Simulator (RTDS). Temuan penelitian ini berlaku untuk berbagai model sistem transmisi HVAC, baik untuk tegangan 500 kV maupun pada nominal tegangan lainnya. Karena kajian ini didasarkan pada sistem HVAC, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengaplikasikan temuan pada sistem transmisi berbasis HVDC (*High Voltage Direct Current*), yang memiliki karakteristik operasional berbeda, seperti efisiensi lebih tinggi pada jarak sangat jauh, stabilitas yang lebih baik, dan kebutuhan peralatan konverter untuk mengontrol aliran daya [12].

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam meningkatkan keandalan proteksi sistem transmisi HVAC serta menjadi dasar untuk pengembangan standar proteksi yang lebih komprehensif dan adaptif, termasuk untuk aplikasi masa depan pada sistem HVDC.

Kajian Pustaka

Menurut Alexandra von Meier dalam bukunya *Electric Power Systems: A Conceptual Introduction*, saluran transmisi listrik memainkan peran penting dalam mentransmisikan energi dari pusat pembangkit ke pusat beban [13]. Jarak yang jauh antara pembangkit dan beban memerlukan penggunaan tegangan tinggi (HV) atau tegangan ekstra tinggi (EHV) untuk mengurangi rugi-rugi energi (*losses*) akibat resistansi pada penghantar [13]. Von Meier menekankan bahwa penggunaan tegangan tinggi ini bertujuan untuk mengurangi besarnya arus listrik [13]. Hal ini disebabkan apabila arus listrik pada sistem transmisi besar, maka akan meningkatkan rugi-rugi daya dalam bentuk panas sesuai dengan Persamaan 1.

$$P_{Losses} = I^2 Z \quad (1)$$

Dimana:

- P_{Losses} : Daya yang terbuang (W)
- I : Arus yang mengalir pada sistem (A)
- Z : Impedansi sistem (Ω)

Dengan begitu, berdasarkan Persamaan 1, semakin besar arus yang mengalir pada suatu sistem maka akan menyebabkan semakin besar pula daya yang terbuang. Oleh karena itu, peningkatan tegangan diperlukan agar arus dapat dikurangi sehingga rugi-rugi daya yang menyebabkan kerugian energi bisa ditekan.

Standarisasi sistem kelistrikan di Indonesia, yaitu SPLN dalam [14], menegaskan bahwa efisiensi pengiriman daya melalui saluran transmisi sangat krusial untuk menjaga stabilitas sistem tenaga listrik, tetapi saluran ini sangat rentan terhadap gangguan, baik internal maupun eksternal. Gangguan internal didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi di dalam zona proteksi saluran transmisi, sementara gangguan eksternal terjadi di luar zona tersebut namun tetap dapat memengaruhi kestabilan sistem [14]. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan proteksi yang cepat dan andal, seperti yang dijabarkan [14], agar perubahan kondisi sistem dapat terdeteksi dan direspons dengan cepat. Hal ini sejalan dengan Peraturan Menteri ESDM No. 20 Tahun 2020 yang menekankan pentingnya proteksi untuk mencegah pemadaman meluas akibat gangguan pada transmisi [15]. Proteksi ini harus mampu mengisolasi bagian yang terkena gangguan dengan cepat sehingga pasokan energi tetap stabil [15].

Dalam konteks proteksi, *distance relay* menjadi salah satu perangkat yang sering digunakan dalam sistem transmisi [16]. Menurut pembahasan di dalam [17], *distance relay* bekerja dengan mengukur impedansi antara titik gangguan dan *relay* untuk mendeteksi apakah gangguan berada dalam zona proteksi. *Relay* menghitung impedansi berdasarkan tegangan dan arus yang terukur, dan jika impedansi terdeteksi dalam zona proteksi, *relay* akan memutuskan aliran listrik guna mencegah kerusakan lebih lanjut pada sistem. Teknologi ini krusial karena kecepatan dan akurasinya dalam mendeteksi jarak gangguan.

Pada saluran transmisi, dikenal pula kondisi *power swing* perubahan atau osilasi daya yang terjadi akibat perubahan besar dalam kondisi beban, *switching generator*, atau pemutusan dan penyambungan jalur transmisi baru yang memengaruhi stabilitas sistem [7]. Secara lebih detail, pembahasan pada [18] menjelaskan bahwa *power swing* dimulai ketika generator mengalami ketidakseimbangan daya mekanik dan listrik setelah suatu gangguan besar, seperti pemutusan beban atau hilangnya pembangkit. Akibatnya, generator-generator dalam sistem mulai berosilasi dengan frekuensi yang berbeda [18]. Pada titik ini, sudut rotor generator (sudut fase antar generator) mengalami variasi yang disebut sebagai sudut ayunan (*swing angle*) [18]. Bila osilasi ini cukup besar, bisa terjadi ketidaksinkronan (*loss of synchronism*) antara generator, yang memperbesar osilasi dan dapat memicu *blackout* atau kegagalan sistem secara menyeluruh [18].

Jika dikorelasikan dengan prinsip kerja perangkat proteksi, kondisi *power swing* dapat menyebabkan pengaturan proteksi tidak bekerja dengan baik, terutama saat ayunan daya berlangsung secara terus-menerus dan asimetris, seperti yang terjadi pada pembangkitan energi terbarukan atau sistem yang memiliki pembangkit berbasis inverter [19].

Penelitian yang dilakukan pada kajian [20] mengidentifikasi kelemahan dalam metode deteksi *power swing* pada *distance relay*, yang masih sering salah dalam membedakan antara kondisi ayunan daya dan gangguan sesungguhnya. Hal ini menyebabkan *relay* berisiko mengirimkan sinyal *tripping* yang tidak diperlukan, yang pada gilirannya dapat mengganggu stabilitas sistem tenaga. Berdasarkan temuan ini, rekomendasi lanjutan dari penelitian [20], yaitu pentingnya penelitian lanjutan untuk mengevaluasi dan mengembangkan metode deteksi

yang lebih canggih agar *distance relay* dapat membedakan antara *power swing* dan gangguan secara lebih andal, terutama dalam sistem yang beroperasi pada batas beban tinggi.

Untuk mengembangkan metode baru yang efektif dalam deteksi ini, pemahaman mendalam mengenai pengaruh *power swing* pada kinerja *distance relay* dalam mendeteksi lokasi gangguan menjadi sangat krusial. Tanpa analisis yang tepat tentang bagaimana *power swing* mengubah lintasan impedansi atau memengaruhi pembacaan impedansi *relay*, sulit untuk menciptakan teknik deteksi yang andal dan akurat. Maka, penelitian yang memperdalam pemahaman mengenai interaksi antara *power swing* dan respon *relay* sangat diperlukan sebagai dasar pengembangan teknik deteksi yang lebih baik.

Bukti yang diperlihatkan pada [21] menunjukkan bahwa *power swing* dapat menyebabkan pergeseran lintasan impedansi yang akhirnya memasuki zona proteksi *relay* sehingga memicu *tripping*, meskipun tidak ada gangguan nyata. Dalam studi ini, simulasi dilakukan menggunakan model sistem tenaga IEEE 9-bus yang sederhana, yang secara efektif menggambarkan pengaruh dasar *power swing* pada operasi *relay* dan menilai sistem blokade *power swing* sebagai metode untuk mencegah operasi *relay* yang salah [21].

Namun, penggunaan model 9-bus ini dirasa belum cukup untuk merepresentasikan berbagai situasi dalam jaringan listrik yang lebih kompleks atau dengan variasi beban yang berbeda. Agar metode deteksi *power swing* lebih andal, diperlukan penelitian lanjutan menggunakan model sistem tenaga yang lebih bervariasi. Penelitian dengan pendekatan model jaringan yang berbeda ini akan memberikan pandangan komprehensif tentang bagaimana *power swing* memengaruhi kinerja *distance relay* dalam kondisi jaringan yang lebih luas dan dinamis. Dengan demikian, penelitian-penelitian ini akan memperkuat dasar teoritis dan empiris untuk mengembangkan metode deteksi yang lebih handal, seperti yang diusulkan oleh kajian [20].

Prinsip Kerja *Distance Relay*

Distance relay adalah perangkat perlindungan utama pada sistem transmisi yang bekerja dengan mengukur impedansi antara titik pengukuran dan lokasi gangguan. *Relay* ini membandingkan nilai impedansi aktual dengan nilai batas pada setiap zona proteksi, dan jika impedansi berada di bawah nilai tertentu, *relay* akan mengirimkan sinyal *tripping*. Dengan tiga zona proteksi utama, perangkat ini memastikan cakupan proteksi yang optimal untuk menjaga keandalan sistem transmisi [22].

Namun, kinerja *distance relay* dapat terganggu oleh fenomena *power swing*, yaitu osilasi sudut fasa daya yang terjadi akibat gangguan besar seperti pemutusan beban atau hilangnya pembangkit. Fenomena ini menyebabkan perubahan impedansi yang menyerupai pola gangguan sehingga berpotensi memicu *tripping* yang tidak diinginkan. Untuk mengatasi masalah ini, *Power Swing Blocking* (PSB) sering digunakan sebagai metode tambahan. Dalam jaringan modern dengan penetrasi energi terbarukan, seperti PV atau angin, efek *power swing* menjadi lebih kompleks sehingga diperlukan metode adaptif untuk meningkatkan akurasi deteksi gangguan [23].

Untuk menguji dan mengevaluasi respons *distance relay* dalam menghadapi berbagai skenario gangguan, Real-Time Digital Simulator (RTDS) digunakan. Perangkat ini memungkinkan simulasi yang sangat akurat dalam kondisi mendekati nyata, baik untuk sistem berskala besar maupun jaringan dengan konfigurasi yang lebih kompleks, seperti sistem dengan kompensasi seri atau energi terbarukan [24]. Dengan kemampuan ini, RTDS menjadi alat penting untuk memastikan keandalan proteksi pada sistem transmisi modern [24], [25].

Distance relay beroperasi berdasarkan prinsip pengukuran impedansi Z antara titik *relay* dan titik gangguan, yang representasikan oleh Persamaan 2.

$$Z = \frac{V}{I} \tag{2}$$

Dimana:

- Z : Impedansi yang dibaca oleh *distance relay* (Ω)
- V : Tegangan CVT yang diperoleh *distance relay* (V)
- I : Arus CT yang diperoleh *distance relay* (A)

Relay ini membandingkan nilai impedansi yang dihitung dengan batas impedansi pada zona proteksi yang telah ditentukan. Jika impedansi berada dalam batas zona tertentu, *relay* mengirimkan sinyal *tripping* untuk memutuskan saluran yang mengalami gangguan [26].

METODE PENELITIAN

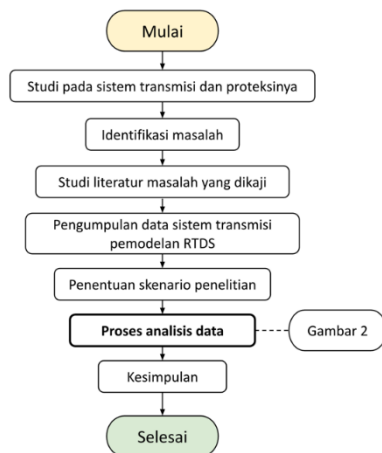
Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh *power swing* terhadap kinerja *distance relay* sebagai pengaman utama (*Main Protection Unit*) sistem transmisi, menggunakan pemodelan RTDS di PT PLN (Persero) Pusat Sertifikasi. Data pengujian berupa *file* COMTRADE yang mencakup tegangan, arus, dan sinyal digital dari simulator RTDS. *File* ini diolah menggunakan *Comtrade viewer* untuk menganalisis kondisi steady state dan gangguan, kemudian diekspor ke format CSV untuk perhitungan lebih lanjut menggunakan Microsoft Excel. *Comtrade Viewer* dipilih karena kemampuannya menganalisis *file* COMTRADE secara langsung sesuai standar industri, sementara Excel mampu menangani data CSV dalam jumlah besar, seperti 16.382 kolom pada penelitian ini, dengan tetap responsif. Dibandingkan MATLAB, Excel lebih efisien untuk tugas pengolahan sederhana tanpa memerlukan skrip tambahan yang dapat meningkatkan kebutuhan sumber daya komputasi.

Analisis dilakukan untuk mengamati respons algoritma perhitungan impedansi *distance relay* terhadap empat kondisi: (1) gangguan internal kondisi normal, (2) gangguan eksternal kondisi normal, (3) gangguan internal kondisi *power swing*, dan (4) gangguan internal *evolving* kondisi *power swing*.

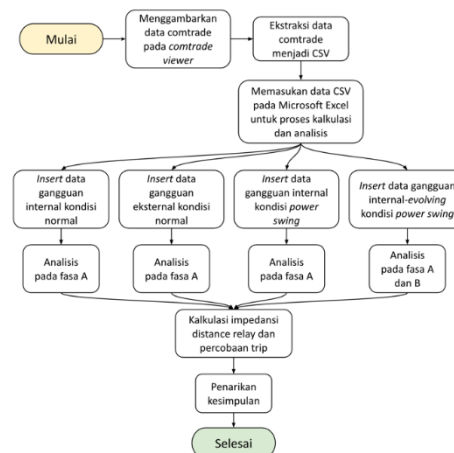
Berdasarkan analisis *file* COMTRADE dan hasil perhitungan, penelitian ini akan menarik kesimpulan mengenai pengaruh *power swing* terhadap kinerja *distance relay*. Kesimpulan tersebut mencakup:

1. Pengaruh *power swing* pada hasil impedansi saluran.
2. Pengaruh *power swing* pada kesalahan pembacaan *distance relay*.

Seluruh proses analisis dirangkum secara sistematis dalam diagram alir pada Gambar 1 dan Gambar 2 yang memberikan ilustrasi lengkap alur penelitian dari data hingga interpretasi.



Gambar 1. Flowchart proses penelitian



Gambar 2. Flowchart proses analisis data

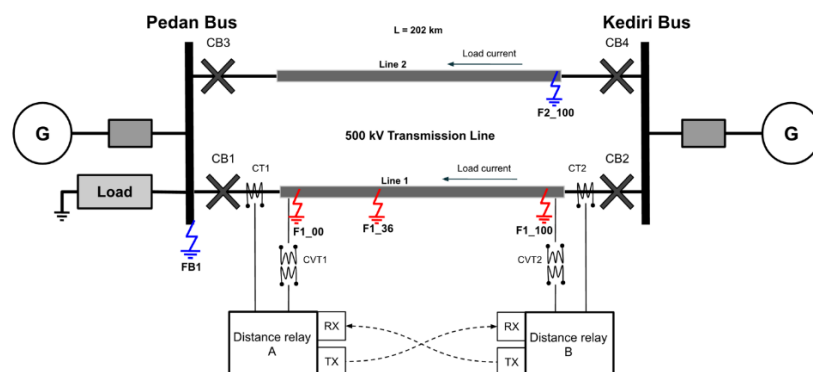
Model Sistem Transmisi 500 kV

Model sistem transmisi yang digunakan dalam penelitian ini adalah model yang digunakan untuk pengujian *distance relay* di PT PLN (Persero), diintegrasikan dengan perangkat RTDS sebagai simulator kondisi saluran transmisi. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak RSCAD dari RTDS. Model ini diambil dari kondisi nyata di lapangan, dengan sedikit penyesuaian pada input dan output untuk kebutuhan pengujian simulasi.

Sistem transmisi dengan tegangan 500 kV dipilih karena dapat mewakili kebutuhan proteksi saluran transmisi dengan tegangan di bawahnya. Saluran transmisi 500 kV memerlukan proteksi yang lebih baik sehingga jika *distance relay* mampu melindungi saluran ini, maka *relay* ini juga mampu menangani saluran dengan tegangan lebih rendah.

Model ini terdiri dari dua *substation* dengan dua bus, yaitu Pedan dan Kediri, yang terhubung oleh dua saluran transmisi (*Line 1 dan Line 2*). Beban terletak di bus Pedan sehingga aliran listrik mengalir dari Kediri ke Pedan. Dalam skenario pengujian, *Line 1* menjadi saluran utama dan fokus utama pengujian *distance relay*, yang dipasang di *substation* Pedan dan Kediri. *Line 2*, bus, dan generator dianggap sebagai komponen eksternal sehingga gangguan pada komponen tersebut disebut sebagai gangguan eksternal, sementara gangguan pada *Line 1* disebut sebagai gangguan internal.

Panjang saluran transmisi Pedan–Kediri adalah 202 km, yang memengaruhi pengaturan impedansi *distance relay*. Namun, penelitian ini menggunakan asumsi impedansi *setting* sesuai model sistem yang diuji. Model sistem secara keseluruhan dapat dilihat pada [Gambar 3](#).



[Gambar 3](#). Model sistem transmisi 500 kV yang digunakan

Spesifikasi Sistem Transmisi Model RTDS

Setiap model sistem transmisi dari setiap skenario yang digunakan dalam analisis ini dirangkum pada *file comtrade*. Masing-masing skenario sistem transmisi memiliki spesifikasi sistem dan spesifikasi gangguan yang berbeda-beda sesuai dengan data pada [Tabel 1](#), [Tabel 2](#), [Tabel 3](#), dan [Tabel 4](#).

Tabel spesifikasi gangguan mencakup berbagai parameter yang berpengaruh pada hasil simulasi. *Fault type* menunjukkan jenis gangguan yang dianalisis, seperti gangguan fasa A ke netral (AN) dan kondisi meluas menjadi fasa B ke netral (BN). Analisis utama difokuskan pada gangguan fasa A ke netral. POW mencerminkan sudut gangguan, yang memengaruhi kondisi awal sistem saat gangguan terjadi. *Fault location* berperan penting karena posisi gangguan menentukan *relay* mana yang membaca gangguan berdasarkan zona proteksi. Gangguan di belakang *relay* akan dibaca oleh *relay* berbeda sehingga memengaruhi skema proteksi. PN-Resistance menunjukkan impedansi gangguan fasa ke netral, sedangkan PP-Resistance menggambarkan impedansi gangguan antar fasa. Kedua nilai ini memengaruhi pengaturan sensitivitas *distance relay*. Terakhir, *fault duration* membedakan gangguan *transient* (≤ 10

siklus pada frekuensi 50 Hz) dari gangguan permanen (>2 detik), yang berpengaruh pada respons sistem terhadap gangguan.

Tabel 1. Spesifikasi skenario gangguan internal kondisi normal

Fault Type	POW	Fault Location	PN-Resistance	PP-Resistance	Frequency	Fault Duration
AN	0	F100	0.04	0.04	50	Transient
AN	0	F100	0.04	0.04	50	Permanent

Tabel 2. Spesifikasi skenario gangguan eksternal kondisi normal

Fault Type	POW	Fault Location	PN-Resistance	PP-Resistance	Frequency	Fault Duration
AN	0.00	FB1	0.0400	0.0400	50.00	Transient
AN	0.00	FB1	0.0400	0.0400	50.00	Permanent

Tabel 3. Spesifikasi skenario gangguan internal kondisi power swing

Fault Type	Fault Location	PN-Resistance	PP-Resistance	Fault Time	Load Change	Open Phase B(Kediri)	Trans Line
AN	F100	0.0400	0.0400	10	No	No	Double

Tabel 4. Spesifikasi skenario gangguan internal evolving kondisi power swing

Fault Type	POW	Fault Location	PN-Resistance	PP-Resistance	Evolving Time	Frequency	Fault Duration
AN-BN	0.00	F136_F136	0.0400	0.0400	0.02	0.00	Transient
AN-BN	0.00	F1100_F2100	0.0400	0.0400	0.0	0.00	Transient

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada skenario [Tabel 1](#), sistem dalam kondisi normal kemudian mengalami gangguan *transient* pada fasa A. Gangguan ini menyebabkan perubahan signifikan pada tegangan dan arus fasa A, sebagaimana terlihat pada *file* COMTRADE yang dianalisis menggunakan *comtrade viewer*. Meski demikian, gangguan satu fasa ini juga memengaruhi fasa lainnya (B dan C), tetapi dampaknya tidak signifikan. Hal ini disebabkan oleh konfigurasi hubungan bintang (*star*) atau delta pada transformator dan generator, di mana gangguan pada satu fasa hanya menarik sedikit arus dari fasa lain sehingga menimbulkan sedikit lonjakan tegangan pada fasa tersebut. Pola perubahan arus dan tegangan ini juga diamati pada skenario lainnya yang dirangkum dalam [Tabel 2](#), [Tabel 3](#), dan [Tabel 4](#).

Pada gangguan *permanent*, pola perubahan arus dan tegangan memiliki kesamaan dengan gangguan *transient*. Namun, gangguan *permanent* berlangsung lebih lama dibandingkan

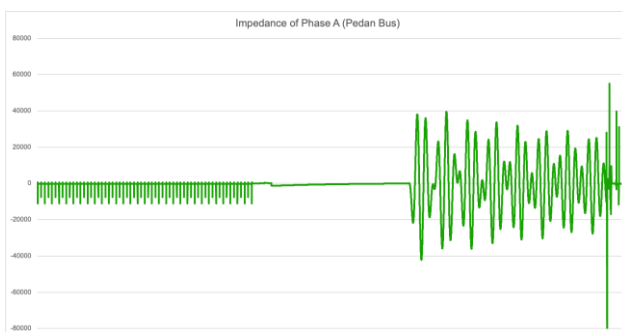
dengan gangguan *transient*. Dalam skenario gangguan *permanent*, *relay* harus melakukan *tripping* pada seluruh fasa sistem transmisi, baik pada gangguan internal maupun eksternal.

Sebaliknya, untuk gangguan *transient*, *relay* memiliki pengaturan yang lebih spesifik. Pada gangguan *transient* internal, *relay* hanya melakukan *tripping* sementara pada satu fasa yang terganggu. Namun, jika gangguan *transient* terjadi di zona eksternal, *relay* tidak diperbolehkan mengirimkan sinyal *tripping* karena berada di luar area proteksi. Apabila gangguan *transient* melibatkan lebih dari satu fasa (antar fasa), *relay* harus melakukan *tripping permanent* pada seluruh fasa.

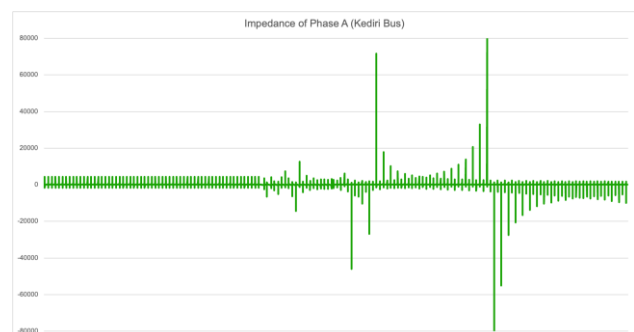
Dalam analisis ini, skenario difokuskan pada gangguan di fasa A (kecuali pada skenario gangguan *evolving* yang melibatkan fasa A dan fasa B). Pada kondisi normal dengan gangguan eksternal, pengamatan dilakukan dari sudut pandang *relay* di bus Kediri. Sementara itu, untuk skenario gangguan internal, sudut pandang pengamatan berasal dari *relay* di bus Pedan karena gangguan terjadi pada line 1 (internal).

Hasil

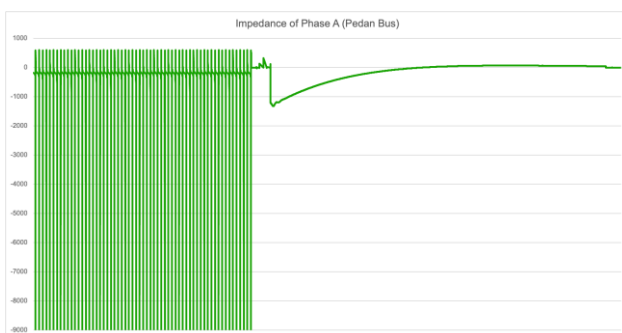
Dari hasil pengujian, penulis memperoleh data sistem dengan total 16.382 data discrete untuk kondisi normal dan 15.000 data untuk kondisi *power swing*. Data tersebut digunakan untuk melakukan kalkulasi impedansi tanpa sudut terhadap fasa yang dianalisis, dengan hasil yang disajikan pada Gambar 4–10.



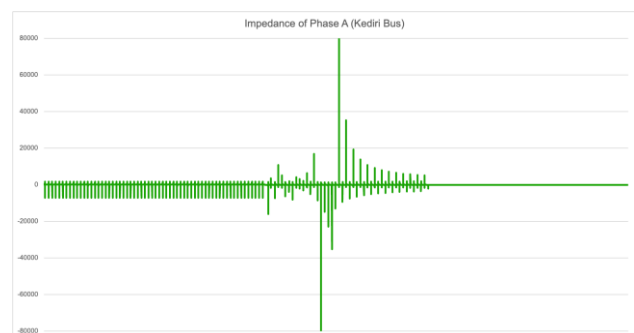
Gambar 4. Impedansi gangguan internal *transient* kondisi normal



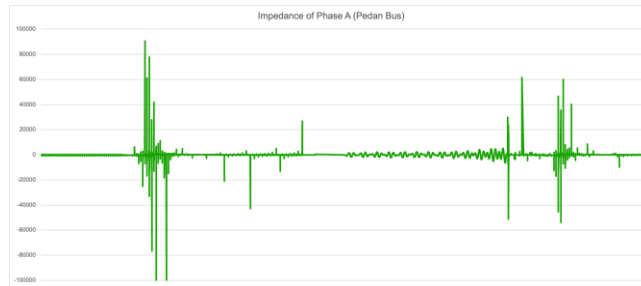
Gambar 6. Impedansi gangguan eksternal *transient* kondisi normal



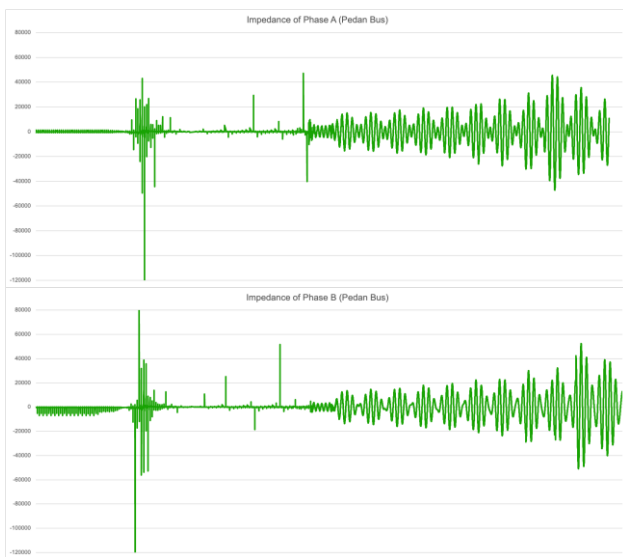
Gambar 5. Impedansi gangguan internal *permanent* kondisi normal



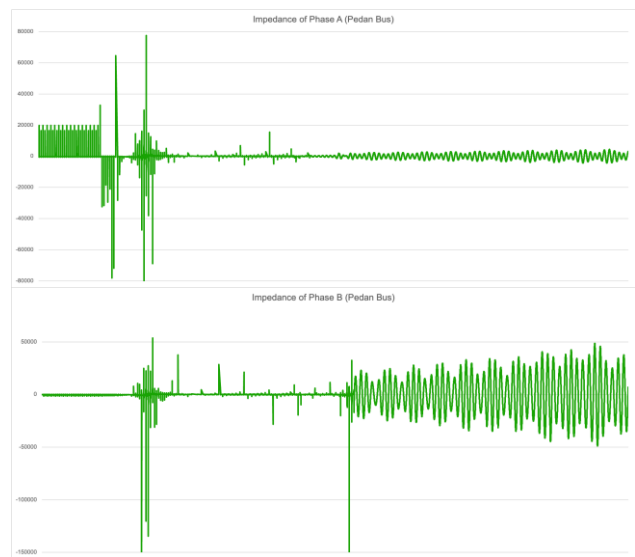
Gambar 7. Impedansi gangguan eksternal *permanent* kondisi normal



Gambar 8. Impedansi gangguan internal *transient* kondisi *power swing*



Gambar 9. Impedansi gangguan internal *evolving* 0 ms *transient* kondisi *power swing*



Gambar 10. Impedansi gangguan internal *evolving* 20 ms *transient* kondisi *power swing*

Berdasarkan data grafik impedansi pada Gambar 4–7 dan Gambar 8–10, terlihat perbedaan pola antara kondisi *power swing* dan kondisi normal. Pada kondisi *power swing*, impedansi berosilasi, sedangkan pada kondisi normal, impedansi tetap stabil meskipun terjadi fluktuasi akibat perubahan arus dan tegangan yang dihitung tanpa sudut. Fluktuasi ini tidak menghasilkan osilasi yang signifikan. Nilai impedansi yang tercatat mencerminkan sistem transmisi yang dimodelkan pada RTDS, dan kemudian pengaturan *relay* jarak diterapkan sesuai dengan pengaturan pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengaturan impedansi *distance relay* untuk perhitungan *trip relay*

No.	Kondisi sistem	Impedansi Zona 1 (Ω)	Impedansi Zona 2 (Ω)
1.	Gangguan internal <i>transient</i> kondisi normal	$-5 < TS^1 < 5$	-
2.	Gangguan internal <i>permanent</i> kondisi normal	$-5 < TS^1 < 5$	-
3.	Gangguan eksternal <i>transient</i> kondisi normal	-	$-20 < TS^2 < 20$
4.	Gangguan eksternal <i>permanent</i> kondisi normal	-	$-20 < TS^2 < 20$
5.	Gangguan internal <i>transient</i> kondisi <i>power swing</i>	$-5 < TS^1 < 5$	-
6.	Gangguan internal <i>transient evolving</i> 0 ms kondisi <i>power swing</i>	$-5 < TS^1 < 5$	-
7.	Gangguan internal <i>transient evolving</i> 20 ms kondisi <i>power swing</i>	$-5 < TS^1 < 5$	-

Keterangan:

- TS¹ = Trip signal tanpa waktu tunda (*trip instant*)
- TS² = Trip signal dengan waktu tunda dan memastikan signal *trip* kontinu sebagai validasi *trip*

Pengaturan impedansi pada **Tabel 5** diterapkan ke dalam sistem sesuai dengan kondisinya masing-masing. Lalu dihasilkan signal *trip* pada **Tabel 6** hingga **Tabel 4**.

Tabel 6. Hasil signal trip gangguan internal transient kondisi normal

Start time of fault	Trip signal	Time trip signal
	1	12.04.2023 10:12:54.299900
	2	12.04.2023 10:12:54.300000
	3	12.04.2023 10:12:54.300700
	4	12.04.2023 10:12:54.300800
	5	12.04.2023 10:12:54.300900
	6	12.04.2023 10:12:54.301000
	7	12.04.2023 10:12:54.301100
	8	12.04.2023 10:12:54.301200
	9	12.04.2023 10:12:54.301300
12.04.2023 10:12:54.299800	10	12.04.2023 10:12:54.301400
	11	12.04.2023 10:12:54.301500
	12	12.04.2023 10:12:54.301600
	13	12.04.2023 10:12:54.301700
	14	12.04.2023 10:12:54.301800
	15	12.04.2023 10:12:54.301900
	16	12.04.2023 10:12:54.302000
	17	12.04.2023 10:12:54.302100
	18	12.04.2023 10:12:54.302200
	19	12.04.2023 10:12:54.302300
	20	12.04.2023 10:12:54.302400

Tabel 7. Hasil signal trip gangguan internal permanent kondisi normal

Start time of fault	Trip signal	Time trip signal
	1	12.04.2023 10:31:30.852700
	2	12.04.2023 10:31:30.852800
	3	12.04.2023 10:31:30.853500
	4	12.04.2023 10:31:30.853600
	5	12.04.2023 10:31:30.853700
	6	12.04.2023 10:31:30.853800
	7	12.04.2023 10:31:30.853900
	8	12.04.2023 10:31:30.854000
12.04.2023 10:31:30.852600	9	12.04.2023 10:31:30.854100
	10	12.04.2023 10:31:30.854200
	11	12.04.2023 10:31:30.854300
	12	12.04.2023 10:31:30.854400
	13	12.04.2023 10:31:30.854500
	14	12.04.2023 10:31:30.854600
	15	12.04.2023 10:31:30.854700
	16	12.04.2023 10:31:30.854800
	17	12.04.2023 10:31:30.854900

Start time of fault	Trip signal	Time trip signal
	18	12.04.2023 10:31:30.855000
	19	12.04.2023 10:31:30.855100
	20	12.04.2023 10:31:30.855200

Tabel 8. Hasil signal trip gangguan eksternal transient kondisi normal

Start time of fault	Trip signal	Time trip signal	Description
	1	12.04.2023 10:52:30.509100	Before an actual fault
	2	12.04.2023 10:52:30.509200	
	3	12.04.2023 10:52:30.519100	
	4	12.04.2023 10:52:30.519200	
	5	12.04.2023 10:52:30.529100	
	6	12.04.2023 10:52:30.529200	
	7	12.04.2023 10:52:30.539100	
	8	12.04.2023 10:52:30.539200	
	9	12.04.2023 10:52:30.549100	
	10	...	
12.04.2023 10:52:31.109200	11	12.04.2023 10:52:31.109200	After an actual fault
	12	12.04.2023 10:52:31.116400	
	13	12.04.2023 10:52:31.116500	
	14	12.04.2023 10:52:31.116600	
	15	12.04.2023 10:52:31.116700	
	16	12.04.2023 10:52:31.116800	
	17	12.04.2023 10:52:31.116900	
	18	12.04.2023 10:52:31.117000	
	19	12.04.2023 10:52:31.117100	
	20	12.04.2023 10:52:31.117200	

Tabel 9. Hasil signal trip gangguan eksternal permanent kondisi normal

Start time of fault	Trip signal	Time trip signal	Description
	1	12.04.2023 11:06:26.815900	Before an actual fault
	2	12.04.2023 11:06:26.825900	
	3	12.04.2023 11:06:26.835900	
	4	12.04.2023 11:06:26.845900	
	5	12.04.2023 11:06:26.855900	
	6	12.04.2023 11:06:26.865900	
	7	12.04.2023 11:06:26.875900	
	8	12.04.2023 11:06:26.885900	
	9	12.04.2023 11:06:26.895900	
	10	...	
12.04.2023 11:06:27.426000	11	12.04.2023 10:31:30.854300	After an actual fault
	12	12.04.2023 10:31:30.854400	
	13	12.04.2023 10:31:30.854500	
	14	12.04.2023 10:31:30.854600	
	15	12.04.2023 10:31:30.854700	
	16	12.04.2023 10:31:30.854800	
	17	12.04.2023 10:31:30.854900	
	18	12.04.2023 10:31:30.855000	
	19	12.04.2023 10:31:30.855100	
	20	12.04.2023 10:31:30.855200	

Tabel 10. Hasil signal trip gangguan internal transient kondisi power swing

Start time of fault	Trip signal	Time trip signal	Description
12.04.2023 13:54:15.547800	1	...	Before an actual fault
	2	12.04.2023 13:54:15.286800	
	3	12.04.2023 13:54:15.287000	
	4	12.04.2023 13:54:15.287200	
	5	12.04.2023 13:54:15.287400	
	6	12.04.2023 13:54:15.287600	
	7	12.04.2023 13:54:15.287800	
	8	12.04.2023 13:54:15.288000	
	9	12.04.2023 13:54:15.288200	
	10	12.04.2023 13:54:15.288400	
	11	12.04.2023 13:54:15.288600	
	12	...	
	13	12.04.2023 13:54:15.548000	
	14	12.04.2023 13:54:15.548200	
	15	12.04.2023 13:54:15.548400	
	16	12.04.2023 13:54:15.548600	
	17	12.04.2023 13:54:15.548800	
	18	12.04.2023 13:54:15.549000	
	19	12.04.2023 13:54:15.549200	
	20	12.04.2023 13:54:15.549400	
	21	12.04.2023 13:54:15.549600	
	22	12.04.2023 13:54:15.549800	
	23	...	

Tabel 11. Hasil signal trip gangguan internal transient evolving A 0ms kondisi power swing

Start time of fault	Trip signal	Time trip signal	Description
12.03.2023 15:21:48.178800	1	...	Before an actual fault
	2	12.03.2023 15:21:47.927400	
	3	12.03.2023 15:21:47.927600	
	4	12.03.2023 15:21:47.927800	
	5	12.03.2023 15:21:47.928000	
	6	12.03.2023 15:21:47.928200	
	7	12.03.2023 15:21:47.928400	
	8	12.03.2023 15:21:47.928600	
	9	12.03.2023 15:21:47.928800	
	10	12.03.2023 15:21:47.929000	
	11	12.03.2023 15:21:47.929200	
	12	...	
	13	12.03.2023 15:21:48.183200	
	14	12.03.2023 15:21:48.192600	
	15	12.03.2023 15:21:48.192800	
	16	12.03.2023 15:21:48.193000	
	17	12.03.2023 15:21:48.193200	
	18	12.03.2023 15:21:48.193400	
	19	12.03.2023 15:21:48.193600	
	20	12.03.2023 15:21:48.202800	
	21	12.03.2023 15:21:48.203000	
	22	12.03.2023 15:21:48.212400	
	23	...	

Tabel 12. Hasil signal trip gangguan internal transient evolving B 0ms kondisi power swing

Start time of fault	Trip signal	Time trip signal	Description
12.03.2023 15:21:48.178800	1	...	Before an actual fault
	2	12.03.2023 15:21:47.924200	
	3	12.03.2023 15:21:47.924400	
	4	12.03.2023 15:21:47.924600	
	5	12.03.2023 15:21:47.924800	
	6	12.03.2023 15:21:47.925000	
	7	12.03.2023 15:21:47.925200	
	8	12.03.2023 15:21:47.925400	
	9	12.03.2023 15:21:47.925600	
	10	12.03.2023 15:21:47.925800	
	11	12.03.2023 15:21:47.926000	
	12	...	
	13	12.03.2023 15:21:48.178800	
	14	12.03.2023 15:21:48.179000	
	15	12.03.2023 15:21:48.180400	
	16	12.03.2023 15:21:48.188600	
	17	12.03.2023 15:21:48.188800	
	18	12.03.2023 15:21:48.189000	
	19	12.03.2023 15:21:48.189200	
	20	12.03.2023 15:21:48.189400	
	21	12.03.2023 15:21:48.189600	
	22	12.03.2023 15:21:48.189800	
	23	...	

Tabel 13. Hasil signal trip gangguan internal transient evolving A 20ms kondisi power swing

Start time of fault	Trip signal	Time trip signal	Description
12.03.2023 15:14:27.903200	1	...	Before an actual fault
	2	12.03.2023 15:14:27.632400	
	3	12.03.2023 15:14:27.632600	
	4	12.03.2023 15:14:27.632800	
	5	12.03.2023 15:14:27.633000	
	6	12.03.2023 15:14:27.633200	
	7	12.03.2023 15:14:27.633400	
	8	12.03.2023 15:14:27.633600	
	9	12.03.2023 15:14:27.633800	
	10	12.03.2023 15:14:27.634000	
	11	12.03.2023 15:14:27.634200	
	12	...	
	13	12.03.2023 15:14:27.906200	
	14	12.03.2023 15:14:27.906400	
	15	12.03.2023 15:14:27.906600	
	16	12.03.2023 15:14:27.906800	
	17	12.03.2023 15:14:27.915200	
	18	12.03.2023 15:14:27.915400	
	19	12.03.2023 15:14:27.915600	
	20	12.03.2023 15:14:27.915800	
	21	12.03.2023 15:14:27.916000	
	22	12.03.2023 15:14:27.916200	
	23	...	

Tabel 14. Hasil signal trip gangguan internal transient evolving B 20ms kondisi power swing

Start time of fault	Trip signal	Time trip signal	Description
	1	...	
	2	12.03.2023 15:14:27.629200	
	3	12.03.2023 15:14:27.629400	
	4	12.03.2023 15:14:27.629600	
	5	12.03.2023 15:14:27.629800	
	6	12.03.2023 15:14:27.630000	Before an actual fault
	7	12.03.2023 15:14:27.630200	
	8	12.03.2023 15:14:27.630400	
	9	12.03.2023 15:14:27.630600	
	10	12.03.2023 15:14:27.630800	
	11	12.03.2023 15:14:27.631000	
12.03.2023 15:14:27.903200	12	...	
	13	12.03.2023 15:14:27.903200	After an actual fault
	14	12.03.2023 15:14:27.913200	
	15	12.03.2023 15:14:27.913400	
	16	12.03.2023 15:14:27.923000	
	17	12.03.2023 15:14:27.923200	
	18	12.03.2023 15:14:27.930600	
	19	12.03.2023 15:14:27.930800	
	20	12.03.2023 15:14:27.931000	
	21	12.03.2023 15:14:27.931200	
	22	12.03.2023 15:14:27.931400	
	23	...	

Sinyal *trip* pada Tabel 6 dan Tabel 7 masing-masing menunjukkan data *trip* untuk gangguan internal *transient* dan gangguan internal *permanent*. Data tersebut mencerminkan bahwa sinyal *trip* dihasilkan sesuai dengan kondisi gangguan yang terjadi. Pada Tabel 6, *relay* mengirimkan sinyal *trip* pertama kali pada waktu 12.04.2023 10:12:54.299900, sedangkan gangguan sebenarnya dimulai pada 12.04.2023 10:12:54.299800, dengan selang waktu hanya 0.1 ms. Hal ini menunjukkan keandalan dan kecepatan *relay* dalam mendeteksi serta menangani gangguan. Pola serupa terlihat pada Tabel 7, di mana gangguan dimulai pada 12.04.2023 10:31:30.852600, dan sinyal *trip* pertama kali dikirimkan pada 12.04.2023 10:31:30.852700, juga dengan selang waktu 0.1 ms. Analisis pola impedansi dan grafik tegangan mendukung keandalan *relay*, yang terbantu oleh kondisi sistem yang normal sehingga memudahkan deteksi dan penanganan gangguan.

Gambar 4–7, yang merupakan grafik impedansi pada kondisi normal menunjukkan pola identik, tetapi mengalami perbedaan pola saat terjadi gangguan karena lokasi gangguan yang berbeda. Pola-pola tersebut juga terlihat pada hasil sinyal *trip* di Tabel 8 dan Tabel 9, yang masing-masing mencakup data gangguan eksternal *transient* dan eksternal *permanent* pada kondisi normal. Berdasarkan Tabel 8, sinyal *trip* pertama yang dikirimkan oleh *relay* terjadi pada 12.04.2023 10:52:30.509100, sedangkan gangguan sebenarnya dimulai pada 12.04.2023 10:52:31.109200, dengan indikasi bahwa *relay* mendeteksi gangguan sebelum gangguan sesungguhnya terjadi. Pada kondisi ini, sejatinya *relay* akan mengirimkan sinyal *trip* ke CB (*Circuit Breaker*). Namun, seperti dijelaskan dalam Tabel 5, algoritma *distance relay* pada zona 2 memerlukan waktu tunda dan validasi berupa sinyal *trip* kontinu untuk memastikan gangguan sesungguhnya. Oleh karena itu, sinyal *trip* awal (*before an actual fault*) pada Tabel 8 tidak dianggap valid karena tidak kontinu. Setelah gangguan terjadi, *relay* mengirimkan sinyal *trip* kontinu, namun sistem menunggu waktu tunda sebelum sinyal dianggap sah untuk diteruskan ke CB. Pada Tabel 8, sinyal *trip* final tidak diteruskan karena gangguan bersifat *transient*. Situasi serupa pada Tabel 9 menunjukkan bahwa gangguan *permanent* yang lebih

lama akhirnya menyebabkan sinyal *trip* final diteruskan setelah validasi dan waktu tunda selesai.

Gangguan pada kondisi *power swing*, baik berupa gangguan *transient* maupun gangguan *transient evolving*, menunjukkan pola impedansi yang identik, seperti yang terlihat pada Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10. Kesamaan pola ini juga dikonfirmasi melalui algoritma *trip distance relay* berdasarkan Tabel 10 hingga Tabel 14. Berdasarkan Tabel 5, dalam skenario *power swing* dengan gangguan internal, *relay* menjalankan algoritma *trip* pada zona 1 (*trip instant*). *Trip instant* mengirimkan sinyal *trip* ke CB secara langsung begitu impedansi masuk ke zona kerja *relay*.

Sebagai contoh, pada Tabel 10, untuk gangguan internal *transient* dalam kondisi *power swing*, sinyal *trip instant* (sebelum gangguan sesungguhnya) terjadi secara berurutan mulai 12.04.2023 13:54:15.286800 selama 1.8 ms, menghasilkan total 10 sinyal *trip* dengan interval 0.2 ms. Sementara itu, gangguan sesungguhnya dimulai pada 12.04.2023 13:54:15.547800. Karena pengaturan *relay* adalah *trip* zona 1, 10 sinyal *trip* tersebut langsung diteruskan, menghasilkan *trip* pada sistem transmisi meskipun gangguan aktual belum terjadi.

Kesalahan *trip* ini terjadi akibat kondisi *power swing*, yang ditandai oleh ayunan arus dan tegangan sehingga menyebabkan impedansi berayun (impedansi membesar dan mengecil), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8–10. Impedansi yang mengecil akibat arus yang membesar dan tegangan yang menurun sering kali disalahartikan oleh algoritma *impedance calculation* pada *distance relay* sebagai gangguan. Pada 12.04.2023 13:54:15.286800, data file COMTRADE menunjukkan arus yang membesar dan tegangan yang menurun sehingga apabila dikorelasikan dengan Tabel 10–14, menunjukkan bahwa fluktuasi ini memicu *trip* tidak diinginkan karena algoritma *relay* mendeteksi perubahan impedansi mendadak sebagai gangguan.

Kesalahan pengiriman sinyal *trip* juga dibuktikan melalui Tabel 11 hingga Tabel 14. Sinyal *trip* pada tabel-tabel tersebut terjadi lebih awal dibandingkan gangguan aktual, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 15.

Tabel 15. Interval waktu *trip* dan waktu gangguan aktual Tabel 11–14

Nomor Tabel	Skenario	Interval waktu <i>trip</i> dan waktu gangguan aktual
Tabel 11	Gangguan internal <i>transient evolving</i> 0 ms	251.4 ms lebih cepat
Tabel 12	Gangguan internal <i>transient evolving</i> 0 ms	254.6 ms lebih cepat
Tabel 13	Gangguan internal <i>transient evolving</i> 20 ms	270.8 ms lebih cepat
Tabel 14	Gangguan internal <i>transient evolving</i> 20 ms	274.0 ms lebih cepat

Diskusi

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi *power swing* dapat menyebabkan *distance relay* masuk ke dalam zona proteksi dan memicu *trip* yang tidak diinginkan. Hal ini mendukung temuan dalam penelitian sebelumnya oleh Yusoff et al. [18], yang juga menyatakan bahwa *power swing* memengaruhi kinerja *distance relay* dengan menyebabkan aktivasi yang tidak diinginkan dalam zona proteksinya. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan menganalisis pengaruh *power swing* dalam kondisi gangguan aktual, baik gangguan internal, eksternal, maupun *evolving*. Penelitian sebelumnya hanya membahas pengaruh *power swing* pada kondisi tanpa gangguan, sementara penelitian ini menambahkan kombinasi skenario gangguan aktual untuk memberikan gambaran yang lebih realistis terhadap

tantangan yang dihadapi *distance relay*. Selain itu, pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini berbeda, dengan melakukan perhitungan impedansi menggunakan algoritma *distance relay* alih-alih RX diagram, tetapi hasilnya tetap konsisten dengan temuan Yusoff et al. [18]. Hal ini memperkuat validitas hasil penelitian sebelumnya dan memberikan gambaran yang lebih luas tentang pengaruh *power swing* terhadap algoritma proteksi

Temuan ini menyoroti perlunya algoritma *relay* yang lebih adaptif terhadap *power swing*, terutama dalam kondisi kombinasi gangguan aktual. Salah satu pendekatan potensial adalah integrasi algoritma berbasis *machine learning* untuk mengenali pola impedansi selama *power swing* dan membedakannya dari gangguan aktual.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa *power swing* memiliki pengaruh signifikan terhadap akurasi *distance relay* dalam menentukan lokasi gangguan pada sistem transmisi 500 kV. Selama kondisi *power swing*, fluktuasi impedansi yang tidak linier menyebabkan *relay* salah mendeteksi kondisi sebagai gangguan internal sehingga mengirimkan sinyal *trip* secara instan dan memicu *tripping* yang tidak diinginkan. Jumlah sinyal *trip* instan yang terdeteksi selama pengujian berkisar antara 267 hingga 299 sinyal sebelum gangguan sesungguhnya terjadi. Kesalahan ini terjadi secara masif pada saat arus besar dan tegangan menurun drastis, yang sesuai dengan pola osilasi selama *power swing*. Akibatnya, circuit breaker (CB) dapat terpicu tanpa adanya gangguan nyata, menurunkan keandalan sistem proteksi.

Hasil penelitian ini tidak hanya berlaku untuk sistem transmisi 500 kV, tetapi juga dapat digeneralisasi untuk sistem transmisi dengan tegangan nominal lain yang menggunakan teknologi HVAC dan *distance relay*. Prinsip yang digunakan dalam penelitian ini dapat diterapkan pada sistem dengan tegangan lebih rendah, karena sifat perhitungan impedansi dan algoritma *relay* yang sama.

Saran

Penelitian ini merekomendasikan pengembangan algoritma *distance relay* untuk meningkatkan keandalan dalam membedakan gangguan aktual dari *power swing* dan mencegah kesalahan *trip*, seperti dengan menerapkan metode *Power Swing Blocking* (PSB) atau pendekatan berbasis pola impedansi. Selain itu, algoritma berbasis kecerdasan buatan, seperti *Wavelet Transform*, *Support Vector Machine* (SVM), *Chaos Theory*, *Prony Analysis*, *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS), serta kombinasi *hybrid* seperti *Wavelet* dan *Chaos Theory*, dapat diuji atau diteliti lebih lanjut untuk menilai efektivitasnya. Algoritma tersebut dapat menganalisis parameter *real-time* seperti arus, tegangan, impedansi, dan frekuensi untuk membedakan pola gangguan aktual dari *power swing*.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] A. G. Ter-Gazarian, *Energy Storage for Power Systems*. in *Energy Engineering*. Institution of Engineering and Technology, 2020. [Online]. Available: https://books.google.co.id/books?id=38_gDwAAQBAJ
- [2] G. M. Baleboina and M. Rudramoorthy, "Stability analysis of power system under n-1 contingency condition," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 13, no. 4, pp. 2940–2950, 2024.
- [3] S. Seghir and T. Bouthiba, "Impedance correction method of distance relay on high voltage transmission line," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 97, 2021.
- [4] J. L. Kirtley, *Electric power principles: sources, conversion, distribution and use*. John Wiley & Sons, 2020.

-
- [5] J. de J. Jaramillo Serna and J. M. López-Lezama, "Calculation of distance protection settings in mutually coupled transmission lines: A comparative analysis," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 7, p. 1290, 2019.
- [6] Z. Melhem, "Electricity transmission, distribution and storage systems," 2013.
- [7] S. A. Hosseini, B. Taheri, H. A. Abyaneh, and F. Razavi, "Comprehensive power swing detection by current signal modeling and prediction using the GMDH method," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 1–11, 2021.
- [8] J. Desai and V. Makwana, "Power swing blocking algorithm based on real and reactive power transient stability," *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no. 16–17, pp. 1673–1683, 2021.
- [9] R. M. Azmi, O. Penangsang, N. K. Aryani, and G. Manuella, "Power Swing Phenomenon on Jawa Bali 500 kV and Its Mitigation," in *2019 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, IEEE, 2019, pp. 189–194.
- [10] V. Ashok, A. Yadav, C. C. Anthony, K. K. Yadav, and U. Yadav, "A reliable decision-making algorithm for fault during power swing in 400 kV double-circuit transmission line: a case study of Chhattisgarh state power system network," in *Decision making applications in modern power systems*, Elsevier, 2020, pp. 473–506.
- [11] B. Ram, *Power system protection and switchgear*. Tata McGraw Hill, 2022.
- [12] A. Alassi, S. Bañales, O. Ellabban, G. Adam, and C. MacIver, "HVDC transmission: Technology review, market trends and future outlook," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 530–554, 2019.
- [13] A. Von Meier, *Electric power systems: a conceptual introduction*. John Wiley & Sons, 2024.
- [14] PT PLN (Persero), "Pola Proteksi Saluran Transmisi (SPLN T5.002:2021)," 2021, *PT PLN (Persero), Jakarta Selatan*.
- [15] Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 2020 Tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code)," 2020.
- [16] M. A. Bhaskar and A. Indhirani, "Impact of FACTS devices on distance protection in transmission system," in *2014 IEEE National Conference on Emerging Trends in New & Renewable Energy Sources and Energy Management (NCET NRES EM)*, IEEE, 2014, pp. 52–58.
- [17] Y. Liang, Z. Lu, W. Li, W. Zha, and Y. Huo, "A novel fault impedance calculation method for distance protection against fault resistance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 1, pp. 396–407, 2019.
- [18] R. Muminović and A. Muminović, "Power Swing: Detection and Prevention," *B&H Electrical Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 32–41, 2023.
- [19] A. Jalilian and D. A. Robinson, "Impact of inverter-based resources on transmission line relaying-part ii: Power swing protection," *Frontiers in Electronics*, vol. 4, p. 1144383, 2023.
- [20] P. K. Nayak, J. G. Rao, P. Kundu, A. K. Pradhan, and P. Bajpai, "A comparative assessment of power swing detection techniques," in *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*, IEEE, 2010, pp. 1–4.
- [21] N. Yusoff, A. F. Abidin, and M. E. Mahadan, "The impact of power swing to the operation of distance relay," in *2015 5th IEEE International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, IEEE, 2015, pp. 39–42.
- [22] Z. Y. Xu *et al.*, "A distance protection relay for a 1000-kV UHV transmission line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 1795–1804, 2008.
- [23] J. T. Rao and B. R. Bhalja, "Prevention of Malfunctioning of Distance Relay during Symmetrical and Asymmetrical Power Swing," in *2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, IEEE, 2021, pp. 1–5.
-

-
- [24] A. Zeno, J. R. Orillaza, and M. L. Kolhe, "Analytical modelling of power swing and validation using real time digital simulator," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, p. 012010.
- [25] P. D. Talbot *et al.*, "Real-time simulation of critical evolving fault condition on a 500 kV transmission network for testing of high performance protection relays," in *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)*, IEEE, 2000, pp. 1923–1927.
- [26] M. Ayache, B. BOUSAADIA, and H. BENTARZI, "A New Model of Numerical MHO Distance Relay Associated with Power Swing Detector," *Algerian Journal of Signals and Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 121–128, 2016.