



Prediksi Arus Hubung Singkat Menggunakan Model Regresi Struktural dan Evaluasi Dampaknya terhadap Rating Peralatan Gardu Induk 500 kV

Bryan Bima Laksana*, Tri Wahyudi Adi

Program Studi Magister Teknik Elektro, Sekolah Pascasarjana, IT PLN, Jakarta, Indonesia

Email : ^{1,*}bryan2410013@itpln.ac.id, ²triwahyuadi@itpln.ac.id

Email Penulis Korespondensi: bryan2410013@itpln.ac.id

Abstrak—Perkembangan sistem tenaga listrik dan penguatan jaringan transmisi dapat meningkatkan level arus hubung singkat sehingga berpotensi mengurangi margin keamanan peralatan apabila arus gangguan mendekati atau melampaui breaking capacity. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi faktor yang memengaruhi perubahan arus hubung singkat, menganalisis hubungan antarvariabel, memprediksi perkembangan arus hubung singkat periode 2026–2030, serta mengevaluasi kecukupan rating peralatan gardu induk 500 kV. Solusi yang ditawarkan dalam penelitian ini adalah integrasi pemodelan prediktif berbasis data historis dengan evaluasi teknis rating peralatan, sehingga peningkatan arus gangguan dapat diidentifikasi sebelum berpotensi melampaui kemampuan pemutusan peralatan. Metode yang digunakan adalah Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) dengan data historis periode 2018–2025. Tahapan analisis meliputi pembentukan konstruk Pembangkit, Konfigurasi Jaringan, Sistem, dan Short Circuit, evaluasi outer model melalui outer loading, Composite Reliability, AVE, dan validitas diskriminan, serta evaluasi inner model menggunakan path coefficient, bootstrapping, t-statistic, dan p-value. Model yang memenuhi kriteria pengujian selanjutnya digunakan untuk membentuk skor variabel laten dan memproyeksikan perkembangan arus hubung singkat hingga 2030. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variabel Sistem berpengaruh positif dan signifikan terhadap Short Circuit dengan path coefficient 0,173, t-statistic 2,156, dan p-value 0,016, sedangkan pengaruh langsung Pembangkit dan Konfigurasi Jaringan terhadap Short Circuit tidak signifikan. Hasil proyeksi menunjukkan kecenderungan peningkatan arus hubung singkat pada sejumlah titik pengamatan. Evaluasi lebih lanjut menunjukkan terdapat 19 GITET yang nilai arus hubung singkatnya melebihi breaking capacity peralatan, sehingga memerlukan perhatian dalam perencanaan penguatan dan peningkatan keandalan sistem..

Kata Kunci: Arus Hubung Singkat; Sistem Transmisi 500 kV; Prediksi; Pemodelan Struktural; Rating Peralatan

Abstract—The development of power systems and the strengthening of transmission networks can increase short-circuit current levels, potentially reducing equipment safety margins when fault currents approach or exceed the rated breaking capacity. This study aims to identify the factors influencing short-circuit current variations, analyze the relationships among the relevant variables, predict short-circuit current development for the 2026–2030 period, and evaluate the adequacy of 500 kV substation equipment ratings. The proposed solution is an integrated approach that combines data-driven short-circuit current prediction with technical evaluation of equipment ratings, allowing potential increases in fault current levels to be identified before they exceed the interruption capability of installed equipment. The study employs Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) using historical power system data from 2018–2025. The analytical procedure includes the development of the Generation, Network Configuration, System, and Short Circuit constructs, evaluation of the measurement model using outer loading, Composite Reliability, Average Variance Extracted (AVE), and discriminant validity, followed by structural model evaluation using path coefficients, bootstrapping, t-statistics, and p-values. The validated model is subsequently used to generate latent variable scores and project short-circuit current development through 2030. The results indicate that the System variable has a positive and statistically significant effect on Short Circuit, with a path coefficient of 0.173, t-statistic of 2.156, and p-value of 0.016, whereas the direct effects of Generation and Network Configuration on Short Circuit are not statistically significant. The projection results indicate an increasing trend in short-circuit current at several observation points. Further equipment assessment shows that 19 extra-high-voltage substations have predicted short-circuit current levels exceeding the breaking capacity of their installed equipment, indicating the need for further attention in equipment reinforcement and system reliability planning.

Keywords: Short-Circuit Current; 500 kV Transmission System; Prediction; Structural Modeling; Equipment Rating

1. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik modern mengalami perkembangan yang semakin kompleks seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik, penambahan kapasitas pembangkit, pengembangan jaringan transmisi, serta penguatan interkoneksi antarwilayah. Kondisi tersebut juga terjadi pada sistem tenaga listrik Jawa–Bali yang merupakan sistem interkoneksi terbesar di Indonesia dan memiliki jaringan transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV. Jaringan tersebut menghubungkan berbagai pusat pembangkit dengan pusat beban melalui konfigurasi jaringan yang luas dan saling terintegrasi (Qays et al., 2023). Pertumbuhan kapasitas pembangkit dan penguatan jaringan secara terus-menerus menyebabkan karakteristik kelistrikan sistem berubah dari waktu ke waktu (Silva & Winkelmann, 2026). Salah satu parameter penting yang terdampak oleh perubahan tersebut adalah arus hubung singkat (*short-circuit current*/SCC). Peningkatan kontribusi sumber pembangkit dan penguatan interkoneksi dapat menyebabkan kenaikan level arus hubung singkat pada beberapa titik jaringan (Gomes Guerreiro et al., 2023; Kozarek et al., 2023; Silos-Sanchez et al., 2020). Data historis pada sistem Jawa–Bali periode 2018–2025 juga menunjukkan adanya perubahan level arus hubung singkat yang berkaitan dengan perkembangan konfigurasi sistem, kapasitas pembangkit, dan jaringan transmisi. Arus hubung singkat merupakan salah satu parameter fundamental dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik karena berhubungan langsung dengan kemampuan peralatan dalam menghadapi kondisi gangguan. Pada sistem tegangan 500 kV, nilai arus gangguan yang tinggi dapat menghasilkan tekanan termal dan elektromekanis yang signifikan terhadap



circuit breaker, *disconnecting switch*, busbar, *current transformer* (CT), dan komponen sistem lainnya. Circuit breaker, misalnya, harus memiliki kemampuan pemutusan (*breaking capacity*) yang lebih besar atau setidaknya mencukupi terhadap arus gangguan prospektif pada titik pemasangannya (Murugan & Raju, 2021). Apabila nilai arus hubung singkat berkembang mendekati atau melampaui kemampuan peralatan, maka margin keamanan sistem akan berkurang dan risiko kegagalan peralatan dapat meningkat. Penelitian (Kozarek et al., 2023) menunjukkan bahwa besarnya arus hubung singkat memiliki implikasi terhadap kondisi operasi dan kemampuan komponen pada gardu induk tegangan tinggi.

Secara konvensional, analisis arus hubung singkat dilakukan menggunakan pendekatan deterministik berdasarkan parameter sistem dan kondisi operasi tertentu (Mohammadi et al., 2022; Nur Annisa Dewi Nayla et al., 2023). Metode perhitungan tersebut sangat penting karena memberikan dasar teknis untuk menentukan besarnya arus gangguan yang harus dipertimbangkan dalam perencanaan sistem dan penentuan rating peralatan. Namun, pendekatan deterministik pada dasarnya menggambarkan kondisi sistem berdasarkan skenario tertentu dan belum secara langsung menjawab pertanyaan mengenai bagaimana nilai arus hubung singkat akan berkembang pada masa mendatang apabila terjadi perubahan kapasitas pembangkit, konfigurasi jaringan, impedansi, maupun karakteristik sistem. Dengan demikian, metode konvensional tetap diperlukan untuk verifikasi teknis, tetapi diperlukan pendekatan tambahan yang mampu memberikan perspektif prediktif berdasarkan perkembangan historis sistem (Ruikai et al., 2024). Perkembangan teknologi *data analytics* dan *machine learning* telah mendorong munculnya berbagai metode baru dalam analisis sistem tenaga listrik, termasuk prediksi dan estimasi parameter arus hubung singkat. (He et al., 2024) misalnya, mengembangkan model *Generalized Regression Neural Network* untuk melakukan perhitungan kapasitas hubung singkat pada lingkungan jaringan yang kompleks. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pendekatan berbasis *regression neural network* dapat digunakan untuk memperkirakan kapasitas hubung singkat dengan cepat dan tetap mempertahankan akurasi yang tinggi pada sistem kompleks (Stoffels et al., 2023). Pendekatan tersebut menunjukkan keunggulan metode *machine learning* dalam menangani hubungan yang kompleks antara parameter sistem dan kapasitas hubung singkat. Namun, model neural network pada umumnya lebih berorientasi pada kemampuan prediksi dibandingkan pada interpretasi hubungan struktural antarvariabel (Putra & Marbun, 2022). Dalam konteks perencanaan sistem transmisi, interpretabilitas menjadi penting karena operator dan perencana sistem tidak hanya membutuhkan nilai prediksi, tetapi juga perlu mengetahui faktor-faktor sistem yang berkontribusi terhadap perubahan arus hubung singkat (Song et al., 2024).

Penelitian lain yang dilakukan oleh (Wang et al., 2022) menggunakan pendekatan *Ultra-Short-Time Data Window* (UDW) dan regresi eksponensial untuk memprediksi parameter arus hubung singkat. Pendekatan tersebut memanfaatkan informasi pada periode awal terjadinya gangguan sehingga dapat menghasilkan estimasi parameter arus hubung singkat dalam waktu yang relatif singkat (Plevris et al., 2022). Metode tersebut menunjukkan bahwa pendekatan regresi dapat memberikan alternatif yang efisien terhadap metode konvensional untuk kebutuhan prediksi parameter gangguan. Namun, orientasi penelitian tersebut berbeda dengan kebutuhan perencanaan jangka menengah sistem transmisi, karena fokusnya adalah prediksi parameter gangguan berdasarkan data dalam interval waktu yang sangat pendek, bukan memproyeksikan perkembangan level arus hubung singkat berdasarkan perubahan struktur sistem selama beberapa tahun. Pendekatan *machine learning* juga telah diterapkan untuk berbagai permasalahan lain yang berkaitan dengan gangguan sistem tenaga listrik. (Okumus et al., 2025a) misalnya, mengembangkan metode *ensemble learning* untuk estimasi lokasi gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi. Penelitian tersebut menggabungkan beberapa model, termasuk *Neural Network Ensemble* dan *Random Forest*, dan menunjukkan bahwa penggabungan model dapat meningkatkan performa estimasi lokasi gangguan. Meskipun demikian, tujuan penelitian tersebut adalah *fault-location estimation*, bukan prediksi perkembangan magnitudo arus hubung singkat pada sistem transmisi 500 kV. Perbedaan tujuan tersebut menunjukkan bahwa masih terdapat ruang penelitian untuk mengembangkan model yang secara khusus diarahkan pada prediksi jangka menengah level SCC pada sistem transmisi (Okumus et al., 2025b).

Selain itu, perkembangan pembangkit berbasis elektronika daya juga menambah kompleksitas analisis arus hubung singkat. Pembangkit berbasis *inverter* memiliki karakteristik kontribusi arus gangguan yang berbeda dengan pembangkit konvensional. (Gomes Guerreiro et al., 2023) membahas tantangan kontribusi arus hubung singkat dari pembangkit tenaga angin skala besar berbasis *full converter*. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan komposisi pembangkit dan karakteristik sistem perlu dipertimbangkan dalam analisis perkembangan SCC. (Qian et al., 2024) juga menunjukkan pentingnya evaluasi probabilistik terhadap potensi *short-circuit current over-limit* dalam integrasi pembangkit energi terbarukan berbasis inverter (Mbitu et al., 2025). Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, pendekatan yang digunakan dalam analisis SCC dapat dikelompokkan menjadi beberapa kategori (Alashqar et al., 2023). Pertama, pendekatan deterministik, yang sesuai untuk menghitung kondisi arus hubung singkat berdasarkan parameter sistem dan skenario operasi tertentu. Keunggulannya adalah dasar fisik dan interpretasi teknis yang kuat, tetapi pendekatan ini belum secara langsung menghasilkan proyeksi perubahan SCC berdasarkan tren historis (Nur et al., 2023). Kedua, pendekatan regresi statistik, yang relatif mudah diinterpretasikan dan dapat digunakan untuk membangun hubungan matematis antara variabel independen dan SCC, tetapi memiliki keterbatasan apabila hubungan antarvariabel sistem bersifat kompleks. Ketiga, pendekatan *machine learning*, seperti *neural network*, *random forest*, dan *ensemble learning*, yang mampu menangani hubungan nonlinear dan kompleks tetapi dapat memiliki keterbatasan dalam transparansi hubungan struktural antarvariabel (Yu et al., 2023). Keempat, pendekatan *time-series* atau *deep*



learning yang dapat menangkap pola temporal, tetapi umumnya membutuhkan jumlah data yang lebih besar dan tidak selalu memberikan interpretasi langsung mengenai hubungan struktural antarparameter sistem.

Perbandingan tersebut menunjukkan adanya research gap yang penting. Penelitian sebelumnya telah banyak membahas perhitungan SCC, estimasi parameter gangguan, estimasi lokasi gangguan, serta penerapan machine learning pada sistem tenaga listrik. Namun, masih terbatas penelitian yang secara simultan mengintegrasikan hubungan struktural faktor-faktor sistem, prediksi jangka menengah SCC, dan evaluasi kecukupan rating peralatan gardu induk dalam satu kerangka penelitian. Dengan kata lain, nilai prediksi SCC tidak seharusnya berhenti sebagai suatu angka statistik, tetapi perlu diterjemahkan menjadi informasi teknis yang dapat digunakan untuk mengevaluasi apakah peralatan yang terpasang masih memiliki margin keamanan yang memadai. Untuk menjawab kesenjangan tersebut, penelitian ini mengembangkan pendekatan yang mengintegrasikan Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) dengan analisis regresi. PLS-SEM digunakan untuk menganalisis hubungan struktural antara faktor-faktor yang diperkirakan memengaruhi perkembangan SCC. Dalam penelitian ini, faktor utama yang dipertimbangkan meliputi kapasitas pembangkit (GEN), konfigurasi jaringan (NET), karakteristik impedansi (IMP), dan karakteristik sistem (SYS). Penggunaan PLS-SEM memungkinkan hubungan antarvariabel dianalisis secara struktural sehingga tidak hanya menghasilkan prediksi, tetapi juga memberikan informasi mengenai arah dan kekuatan hubungan antarvariabel. Pendekatan PLS-SEM telah banyak digunakan untuk menganalisis model dengan hubungan kompleks antar konstruk dan variabel, dengan evaluasi model struktural dan pengukuran yang mengikuti prinsip metodologis yang dikembangkan oleh (J. Hair & Alamer, 2022).

Selanjutnya, hasil hubungan struktural tersebut digunakan sebagai dasar dalam pengembangan model regresi untuk memprediksi perkembangan SCC pada periode 2026–2030. Dengan demikian, pendekatan yang diusulkan memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan penelitian sebelumnya. Model ini tidak semata-mata berorientasi pada akurasi prediksi seperti pada neural network, tetapi juga mempertahankan interpretabilitas hubungan antarvariabel sistem. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan keseimbangan antara *explanatory capability* dan *predictive capability*, sehingga hasil penelitian lebih mudah diterjemahkan ke dalam kebutuhan perencanaan sistem tenaga listrik. Data penelitian berasal dari data historis sistem transmisi 500 kV Jawa–Bali selama periode 2018–2025. Data tersebut mencakup nilai arus hubung singkat dan parameter sistem yang berkaitan dengan perkembangan kapasitas pembangkit, konfigurasi jaringan, karakteristik impedansi, serta kondisi sistem. Analisis diawali dengan identifikasi tren historis SCC pada GITET 500 kV. Selanjutnya dilakukan pemodelan PLS-SEM untuk mengidentifikasi hubungan struktural antarvariabel, kemudian model regresi digunakan untuk menghasilkan prediksi SCC periode 2026–2030. Hasil prediksi selanjutnya dibandingkan dengan breaking capacity dan kemampuan peralatan pada GITET 500 kV untuk mengidentifikasi potensi penurunan margin keamanan. Data historis dalam tesis menunjukkan bahwa perubahan SCC pada GITET Jawa–Bali berkaitan dengan perkembangan konfigurasi sistem, kapasitas pembangkit, dan penguatan jaringan transmisi.

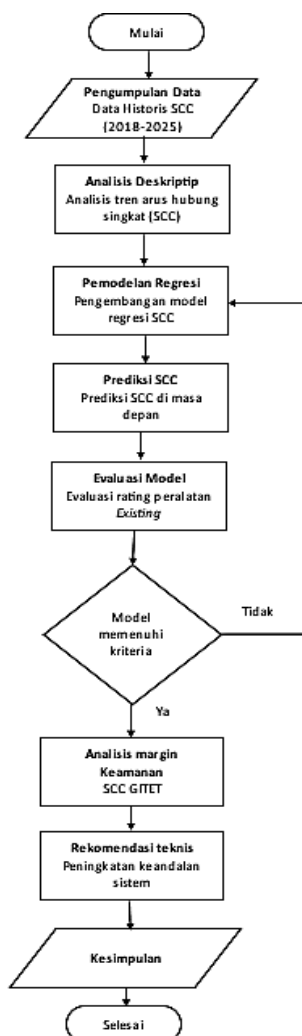
Dengan demikian, penelitian ini memiliki empat tujuan utama. Pertama, mengidentifikasi faktor-faktor sistem yang berpengaruh terhadap perkembangan arus hubung singkat pada sistem transmisi 500 kV Jawa–Bali. Kedua, menganalisis hubungan struktural antara kapasitas pembangkit, konfigurasi jaringan, impedansi, karakteristik sistem, dan arus hubung singkat menggunakan PLS-SEM. Ketiga, mengembangkan model prediksi arus hubung singkat untuk periode 2026–2030 berdasarkan hubungan struktural dan pola historis sistem. Keempat, mengevaluasi implikasi hasil prediksi terhadap kecukupan *breaking capacity* dan margin keamanan peralatan GITET 500 kV. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengintegrasian analisis struktural, prediksi berbasis data, dan evaluasi teknis peralatan dalam satu kerangka. Pendekatan ini memungkinkan hasil prediksi digunakan tidak hanya untuk mengetahui kemungkinan perkembangan SCC, tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan teknis. Apabila hasil prediksi menunjukkan bahwa SCC mendekati atau melampaui kemampuan peralatan, beberapa alternatif mitigasi dapat dipertimbangkan, antara lain *uprating* circuit breaker, pemasangan *Fault Current Limiter* (FCL), rekonfigurasi jaringan, maupun penyesuaian strategi operasi sistem. Hasil tesis menunjukkan bahwa beberapa GITET memiliki kecenderungan SCC yang perlu mendapatkan perhatian terhadap kemampuan *breaking capacity* peralatan pada periode 2026–2030. Secara keseluruhan, penelitian ini diarahkan untuk mengembangkan pendekatan prediktif yang dapat melengkapi metode perhitungan arus hubung singkat konvensional. Jika metode deterministik memberikan gambaran mengenai “berapa besar arus hubung singkat pada kondisi tertentu”, maka pendekatan penelitian ini diarahkan untuk menjawab pertanyaan “bagaimana kecenderungan arus hubung singkat berkembang berdasarkan perubahan faktor sistem, dan apakah kemampuan peralatan masih memadai terhadap perkembangan tersebut?”. Perspektif tersebut diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode perencanaan sistem transmisi yang lebih proaktif, khususnya dalam menghadapi pertumbuhan pembangkit, penguatan interkoneksi, dan perubahan konfigurasi sistem Jawa–Bali.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Desain dan Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis data historis sistem tenaga listrik untuk mengembangkan model prediksi arus hubung singkat (*short-circuit current*/SCC) pada sistem transmisi 500 kV Jawa–Bali. Pendekatan penelitian dirancang secara bertahap mulai dari pengumpulan dan validasi data, pengolahan data historis, pembentukan konstruk penelitian, analisis Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM), pengujian model

pengukuran dan model struktural, *bootstrapping*, penyusunan model prediksi, hingga evaluasi hasil prediksi terhadap rating peralatan GITET 500 kV. Rancangan tersebut mengikuti struktur analisis PLS-SEM yang mencakup evaluasi *outer model*, *inner model*, dan pengujian signifikansi hubungan struktural (J. Hair & Alamer, 2022). Secara khusus, penelitian ini tidak hanya diarahkan untuk menghasilkan nilai prediksi SCC, tetapi juga untuk mengidentifikasi hubungan struktural antara faktor sistem yang berpotensi memengaruhi perubahan SCC. Variabel yang digunakan dalam model berasal dari data historis sistem Jawa-Bali dan mencakup faktor pembangkit, konfigurasi jaringan, karakteristik sistem, serta indikator arus hubung singkat.



Gambar 1. Kerangka Penelitian

Gambar 1 tersebut menggambarkan bahwa metode penelitian tidak berhenti pada proses pemodelan statistik. PLS-SEM menjadi inti analisis hubungan struktural, kemudian hasil hubungan tersebut digunakan untuk membangun prediksi SCC, dan hasil prediksi diterjemahkan menjadi evaluasi teknis terhadap peralatan. Hal ini sesuai dengan kerangka penelitian pada tesis yang menghubungkan analisis PLS-SEM, prediksi SCC, dan evaluasi kecukupan rating peralatan GITET 500 kV.

2.2 Desain dan Tahapan Penelitian

Data penelitian merupakan data historis sistem transmisi 500 kV Jawa-Bali selama periode 2018–2025. Data tersebut digunakan untuk menggambarkan perkembangan sistem dan perubahan nilai SCC pada GITET. Dalam tesis, data indikator mencakup parameter teknis seperti kapasitas pembangkit, konfigurasi jaringan, parameter sistem, serta nilai SCC pada GITET 500 kV. Data terlebih dahulu disusun dalam format *spreadsheet* dan kemudian dikonversi ke format CSV untuk diproses menggunakan SmartPLS. Konstruk utama yang digunakan dalam penelitian meliputi:

1. Pembangkit (GEN/PB), yang merepresentasikan karakteristik dan kontribusi pembangkit terhadap sistem;
2. Konfigurasi Jaringan (NET/KJ), yang merepresentasikan karakteristik jaringan dan keterhubungan sistem;
3. Karakteristik Sistem (SYS), yang merepresentasikan kondisi teknis sistem;
4. Short Circuit (SCC) sebagai konstruk endogen yang menggambarkan perubahan arus hubung singkat.

Pemilihan variabel tersebut didasarkan pada asumsi bahwa SCC merupakan hasil interaksi berbagai faktor sistem, sehingga peningkatan kapasitas pembangkit tidak dapat dianalisis secara terpisah dari konfigurasi jaringan dan



karakteristik sistem. Tesis menunjukkan bahwa faktor-faktor tersebut dimodelkan sebagai konstruk laten dengan indikator teknis yang berasal dari data sistem tenaga listrik.

2.3 Pengelolaan Awal dan Analisis data

Sebelum pemodelan dilakukan, data historis diperiksa untuk memastikan konsistensi, kelengkapan, dan kesesuaian format. Analisis statistik deskriptif digunakan untuk memperoleh informasi mengenai nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan simpangan baku dari masing-masing variabel. Pemeriksaan awal juga digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan nilai ekstrem, data tidak lengkap, atau ketidakkonsistenan pencatatan yang dapat memengaruhi proses estimasi model. Tahapan ini penting karena model prediksi hanya dapat memberikan hasil yang representatif apabila data masukan memiliki kualitas yang memadai. Setelah proses validasi selesai, data disusun dalam struktur indikator dan konstruk sesuai model PLS-SEM.

2.4 Algoritma Partial Least Squares Structural Equation Modeling

PLS-SEM digunakan sebagai metode utama untuk mengidentifikasi hubungan struktural antar faktor yang memengaruhi SCC. Metode ini dipilih karena penelitian melibatkan beberapa konstruk yang saling berhubungan dan perlu dianalisis secara simultan. PLS-SEM juga berorientasi pada kemampuan menjelaskan dan memprediksi variabel endogen, sehingga sesuai dengan tujuan penelitian yang tidak hanya mengidentifikasi hubungan tetapi juga mengembangkan model prediksi SCC (J. Hair & Alamer, 2022). Dalam konteks penelitian ini, struktur konseptual dapat direpresentasikan sebagai:

GEN → NET → SCC

SYS → NET → SCC

serta hubungan langsung:

GEN → SCC

NET → SCC

SYS → SCC

Model tersebut memungkinkan pengaruh langsung maupun pengaruh melalui variabel antara dianalisis secara bersamaan. Penerapan PLS-SEM pada tesis juga dimaksudkan untuk mengetahui kontribusi masing-masing faktor terhadap perubahan SCC dan memahami interaksi antarparameter sistem tenaga listrik. PLS-SEM pada penelitian ini dilakukan menggunakan SmartPLS dengan dua tahapan utama, yaitu evaluasi *measurement model/outer model* dan *structural model/inner model*, kemudian dilanjutkan dengan *bootstrapping* untuk menguji signifikansi hubungan.

2.5 Evaluasi Outer Model

Evaluasi *outer model* dilakukan untuk memastikan bahwa indikator yang digunakan mampu merepresentasikan konstruk laten secara valid dan reliabel. Parameter yang dievaluasi meliputi *outer loading*, *Composite Reliability (CR)*, *Average Variance Extracted (AVE)*, dan *discriminant validity*. Nilai *outer loading* digunakan untuk mengevaluasi kontribusi indikator terhadap konstruk. Dalam penelitian ini, nilai sekitar 0,60 atau lebih digunakan sebagai acuan validitas indikator sesuai pedoman PLS-SEM (J. F. Hair et al., 2021). Selanjutnya, *Composite Reliability* digunakan untuk mengevaluasi konsistensi internal konstruk, sedangkan AVE digunakan untuk menilai validitas konvergen. Nilai AVE di atas 0,50 menunjukkan bahwa konstruk mampu menjelaskan lebih dari 50% varians indikatornya. Evaluasi *discriminant validity* dilakukan untuk memastikan bahwa konstruk yang berbeda dalam model benar-benar dapat dibedakan secara empiris (J. Hair & Alamer, 2022). Hanya model pengukuran yang memenuhi kriteria validitas dan reliabilitas yang dilanjutkan ke tahap evaluasi *inner model*.

2.6 Evaluasi Inner Model dan Bootstrapping

Evaluasi *inner model* dilakukan untuk mengetahui kemampuan model struktural dalam menjelaskan hubungan antar konstruk. Parameter yang digunakan meliputi path coefficient, coefficient of determination (R^2), effect size (f^2), dan predictive relevance (Q^2). Nilai R^2 menunjukkan proporsi variasi konstruk endogen yang dapat dijelaskan oleh konstruk eksogen dalam model. Nilai f^2 digunakan untuk mengetahui kontribusi relatif suatu konstruk terhadap konstruk endogen, sedangkan Q^2 digunakan untuk mengevaluasi relevansi prediktif model. Setelah model struktural memenuhi kriteria kelayakan, dilakukan *bootstrapping*. Teknik ini merupakan prosedur *resampling* yang digunakan untuk membentuk distribusi empiris parameter model. Hasilnya digunakan untuk memperoleh path coefficient, t-statistic, dan p-value sebagai dasar pengujian signifikansi hubungan struktural. Tahapan ini menghasilkan informasi penting berupa arah, kekuatan, dan signifikansi hubungan antara faktor pembangkit, konfigurasi jaringan, karakteristik sistem, dan SCC. Informasi tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan model prediksi.

2.7 Penyusunan Model Prediksi SCC

Tahap berikutnya adalah mengembangkan model prediksi SCC berdasarkan hasil hubungan struktural yang diperoleh dari PLS-SEM. Model prediksi memanfaatkan koefisien jalur (*path coefficient*) dan pola historis data 2018–2025 untuk memperkirakan kecenderungan SCC pada periode 2026–2030. Pendekatan ini menggabungkan informasi hubungan struktural dengan analisis regresi sehingga hasil prediksi tidak hanya didasarkan pada tren SCC secara langsung.



Regresi digunakan karena memberikan bentuk hubungan matematis yang relatif mudah diinterpretasikan. Secara umum, bentuk regresi linear berganda dapat dituliskan sebagai:

$$SCC_t = \beta_0 + \beta_1 GEN_t + \beta_2 NET_t + \beta_3 IMP_t + \beta_4 SYS_t + \epsilon_t \quad (1)$$

Dengan SCC_t merupakan arus hubung singkat pada periode t , β_0 merupakan konstanta, β_i merupakan koefisien pengaruh variabel, dan ϵ_t merupakan residual model. Estimasi regresi pada tesis menggunakan prinsip *Ordinary Least Squares* (OLS), yaitu meminimalkan jumlah kuadrat kesalahan antara nilai aktual dan nilai hasil prediksi.

2.8 Evaluasi Prediksi terhadap Rating Peralatan 500 kV

Tahap terakhir adalah menghubungkan hasil prediksi dengan kebutuhan teknis sistem. Nilai SCC hasil prediksi periode 2026–2030 dibandingkan dengan kemampuan nominal peralatan pada GITET 500 kV, terutama circuit breaker, disconnecting switch, busbar, dan current transformer. Perbandingan tersebut digunakan untuk menentukan apakah SCC masih berada dalam batas kemampuan peralatan atau telah mendekati/melebihi rating yang tersedia. Dalam konteks perhitungan arus hubung singkat, IEC 60909 merupakan rujukan internasional untuk perhitungan arus hubung singkat pada sistem AC tiga fasa, termasuk sistem tegangan tinggi. Standar tersebut menyediakan prosedur umum untuk menghitung arus hubung singkat pada kondisi gangguan seimbang maupun tidak seimbang dan juga mempertimbangkan kontribusi pembangkit tertentu. Pada penelitian ini, IEC 60909 diposisikan sebagai landasan teknis untuk memahami dan memvalidasi besaran SCC, sedangkan PLS-SEM dan regresi digunakan untuk menganalisis hubungan historis dan melakukan prediksi perkembangan SCC. Dengan demikian, pendekatan penelitian tidak dimaksudkan untuk menggantikan metode perhitungan short-circuit berbasis standar, tetapi untuk memberikan lapisan prediktif yang dapat mendukung perencanaan sistem. Jika hasil prediksi menunjukkan SCC mendekati atau melampaui rating peralatan, maka lokasi tersebut dikategorikan sebagai lokasi yang membutuhkan evaluasi teknis lebih lanjut. Alternatif mitigasi yang telah diidentifikasi dalam tesis meliputi peningkatan breaking capacity circuit breaker, pemasangan Fault Current Limiter (FCL), serta evaluasi konfigurasi jaringan dan strategi operasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Realisasi Output Pengukuran

3.1.1 Pemodelan PLS-SEM (SmartPLS)

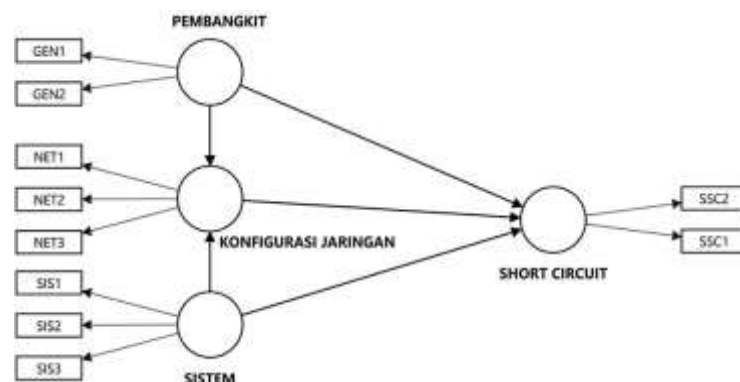
Penggunaan metode *Structural Equation Modeling* berbasis *Partial Least Squares* (SEM-PLS) pada penelitian ini dimaksudkan untuk memperkuat proses analisis hubungan antar variabel yang memengaruhi perkembangan arus hubung singkat pada sistem transmisi 500 kV Jawa–Bali. Metode ini digunakan sebagai pendekatan lanjutan setelah dilakukan analisis data historis terhadap perubahan nilai arus hubung singkat selama periode pengamatan tahun 2018–2025. Penerapan SmartPLS dalam penelitian ini didasarkan pada kebutuhan untuk memahami keterkaitan antar faktor sistem tenaga listrik yang tidak dapat dijelaskan hanya melalui analisis tren atau regresi sederhana. Dalam sistem interkoneksi Jawa–Bali, perubahan arus hubung singkat dipengaruhi oleh banyak faktor yang saling berkaitan, seperti pertumbuhan kapasitas pembangkit, perubahan konfigurasi jaringan, karakteristik impedansi sistem, serta kondisi operasional jaringan transmisi. Hubungan antar variabel tersebut bersifat kompleks dan terjadi secara simultan, sehingga diperlukan metode analisis yang mampu mengevaluasi pengaruh langsung maupun tidak langsung secara menyeluruh. Melalui pendekatan SEM-PLS, penelitian ini dapat mengidentifikasi tingkat pengaruh masing-masing variabel laten terhadap kenaikan arus hubung singkat, sekaligus mengevaluasi hubungan struktural antar konstruk yang dibangun dalam model penelitian. Selain digunakan untuk menguji hubungan kausal antar variabel, SmartPLS juga dimanfaatkan untuk mengetahui variabel mana yang memiliki kontribusi dominan terhadap peningkatan arus hubung singkat pada gardu induk 500 kV di sistem Jawa–Bali. Untuk memberikan gambaran mengenai konstruk dan indikator yang digunakan dalam pemodelan PLS-SEM, terlebih dahulu dilakukan identifikasi variabel laten beserta indikator teknis yang merepresentasikan masing-masing konstruk. Variabel tersebut mencakup Pembangkit, Konfigurasi Jaringan, Sistem, dan Short Circuit. Rincian konstruk, kode indikator, serta karakteristik masing-masing indikator disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Variabel Laten & Indikator PLS-SEM

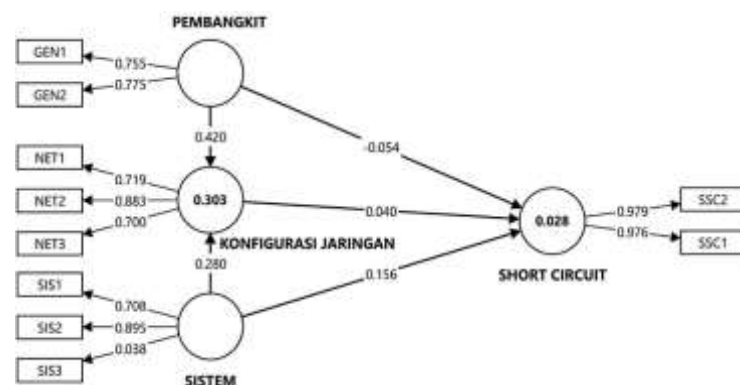
Variabel Laten	Indikator		Keterangan
Pembangkit	Jarak_Pembangkit	GEN_1	Jarak Kilometer Sirkuit (kms) dari Gardu Induk ke Pembangkit
	Kriteria_Pembangkit	GEN_2	Kriteria Supply Pembangkit ke Gardu Induk
Konfigurasi Jaringan	Jumlah_Line	NET_1	Jumlah Bay Line pada Gardu Induk
	Jumlah_Paralel_IBT	NET_2	Jumlah Paralel IBT pada Gardu Induk
	Jumlah_Busbar	NET_3	Jumlah Busbar pada Gardu In
Sistem	Mampu_Pasok_MVA	SIS_1	Jumlah Mampu pasok (MVA) pada Gardu Induk
	Beban_MVA	SIS_2	Jumlah Beban (MVA) pada Gardu Induk

Variabel Laten	Indikator		Keterangan
	X/R_Ratio	SIS_3	Perbandingan antara nilai reaktansi sistem (X) terhadap resistansi sistem (R)
Short Circuit	Arus_Hubung_Singkat_3_Fasa	SSC_1	Nilai Arus Hubung Singkat 3 Fasa pada Gardu Induk
	Arus_Hubung_Singkat_1_Fasa	SSC_2	Nilai Arus Hubung Singkat 1 Fasa pada Gardu Induk

Berdasarkan Tabel 1, konstruk Pembangkit direpresentasikan oleh indikator GEN_1 berupa jarak antara gardu induk dan pembangkit serta GEN_2 berupa kriteria suplai pembangkit. Konstruk Konfigurasi Jaringan terdiri atas NET_1, NET_2, dan NET_3 yang masing-masing menggambarkan jumlah bay line, jumlah paralel IBT, dan jumlah busbar. Sementara itu, konstruk Sistem direpresentasikan oleh SIS_1, SIS_2, dan SIS_3 yang mencerminkan kemampuan pasok, beban, serta rasio X/R sistem. Konstruk Short Circuit menggunakan SSC_1 dan SSC_2 sebagai indikator arus hubung singkat tiga fasa dan satu fasa. Dengan demikian, Tabel 1 menunjukkan bahwa model penelitian mengintegrasikan faktor pembangkit, jaringan, dan kondisi sistem untuk menjelaskan perubahan arus hubung singkat. Proses pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak SmartPLS dengan memanfaatkan data historis sistem Jawa-Bali 500 kV periode 2018–2025 yang diperoleh dari hasil pengukuran dan evaluasi sistem. Data indikator meliputi parameter teknis seperti kapasitas pembangkit, konfigurasi jaringan, impedansi sistem, serta nilai arus hubung singkat pada beberapa Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi. Sebelum dilakukan pengolahan, data disusun dalam format spreadsheet kemudian dikonversi ke dalam format CSV agar dapat diproses pada aplikasi SmartPLS. Melalui pendekatan ini, hubungan kausal antar variabel dapat dianalisis secara simultan sehingga mampu menggambarkan pengaruh masing-masing parameter terhadap peningkatan *short circuit current* pada sistem interkoneksi Jawa-Bali. Hasil estimasi model selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi kontribusi setiap indikator terhadap variabel laten serta mendukung pengembangan model prediksi arus hubung singkat dan evaluasi kecukupan rating peralatan gardu induk 500 kV, berikut adalah pemodelan hubungan antar indikator konstruk dan variabel laten yang telah dibuat.



Gambar 2. Model Struktural Penelitian



Gambar 3. Hasil Uji Outer Loading ke-1

Tahap awal evaluasi model pengukuran dilakukan melalui pengujian outer loading untuk mengetahui kemampuan setiap indikator dalam merepresentasikan konstruk laten. Hasil pengujian outer loading tahap pertama untuk seluruh indikator yang digunakan dalam model disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Matrix Hasil Uji Outer Loading ke-1

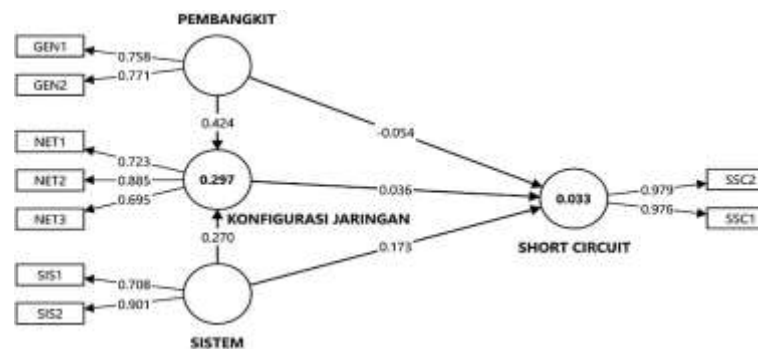
	KONFIGURASI JARINGAN	PEMBANGKIT	SHORT CIRCUIT	SISTEM
GEN1		0.755		
GEN2		0.775		
NET1	0.719			
NET2	0.883			



	KONFIGURASI JARINGAN	PEMBANGKIT	SHORT CIRCUIT	SISTEM
NET3	0.700			
SIS1				0.708
SIS2				0.895
SIS3				0.038
SSC2			0.979	
SSC1			0.976	

Berdasarkan Tabel 2, sebagian besar indikator memiliki nilai outer loading di atas 0,70, sehingga mampu merepresentasikan konstruk laten secara memadai. Nilai GEN1 dan GEN2 masing-masing sebesar 0,755 dan 0,775 menunjukkan kontribusi yang baik terhadap konstruk Pembangkit. Pada konstruk Konfigurasi Jaringan, NET1, NET2, dan NET3 masing-masing memiliki nilai 0,719, 0,883, dan 0,700. Konstruk Sistem memiliki nilai SIS1 sebesar 0,708 dan SIS2 sebesar 0,895. Sementara itu, indikator SSC1 dan SSC2 memiliki nilai sangat tinggi, masing-masing 0,976 dan 0,979. Namun, SIS3 hanya memperoleh nilai 0,038 sehingga tidak memenuhi kriteria outer loading dan perlu dieliminasi dari model. Dengan demikian, Tabel 2 menjadi dasar untuk melakukan penyempurnaan model pengukuran sebelum analisis dilanjutkan ke tahap berikutnya. Berdasarkan hasil pengujian *outer loading* pada model PLS-SEM yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa sebagian besar indikator memiliki nilai *loading factor* di atas batas minimum 0,70 sehingga dinyatakan mampu merepresentasikan variabel laten secara baik. Nilai *outer loading* yang memenuhi kriteria tersebut menunjukkan bahwa indikator memiliki hubungan yang kuat terhadap konstruk laten yang diukur serta telah memenuhi persyaratan validitas konvergen dalam model pengukuran.

Mengacu pada ketentuan evaluasi model pengukuran dalam metode PLS-SEM, indikator dengan nilai *outer loading* kurang dari 0,70 dianggap tidak cukup kuat dalam menjelaskan variabel laten dan berpotensi menurunkan kualitas model penelitian. Oleh karena itu, indikator SIS3 perlu dieliminasi dari model agar hasil analisis yang diperoleh menjadi lebih *valid, reliabel*, dan mampu merepresentasikan hubungan antar variabel secara lebih akurat.

**Gambar 3.** Hasil Uji *Outer Loading* ke-2

Setelah indikator SIS3 dieliminasi karena memiliki nilai outer loading yang sangat rendah, pengujian outer loading dilakukan kembali untuk memastikan peningkatan kualitas model pengukuran. Hasil pengujian outer loading tahap kedua setelah proses eliminasi indikator disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Matrix Hasil Uji *Outer Loading* ke-2

	KONFIGURASI JARINGAN	PEMBANGKIT	SHORT CIRCUIT	SISTEM
GEN1		0.758		
GEN2		0.771		
NET1	0.723			
NET2	0.885			
NET3	0.695			
SIS1				0.708
SIS2				0.901
SSC2			0.979	
SSC1			0.976	

Berdasarkan Tabel 3, terjadi perbaikan kualitas model pengukuran setelah indikator SIS3 dikeluarkan. Indikator GEN1 dan GEN2 masing-masing memperoleh nilai 0,758 dan 0,771, sedangkan NET1 dan NET2 masing-masing sebesar 0,723 dan 0,885. NET3 memperoleh nilai 0,695 yang berada sedikit di bawah 0,70, tetapi masih mendekati batas evaluasi yang digunakan. Pada konstruk Sistem, SIS1 dan SIS2 masing-masing memiliki nilai 0,708 dan 0,901, sedangkan SSC1 dan SSC2 tetap menunjukkan nilai tinggi sebesar 0,976 dan 0,979. Secara keseluruhan, Tabel 3 menunjukkan bahwa model pengukuran setelah eliminasi SIS3 lebih representatif untuk digunakan pada pengujian selanjutnya. Secara keseluruhan, hasil pengujian *outer loading* tahap kedua menunjukkan bahwa model pengukuran telah memenuhi kriteria validitas konvergen dengan kondisi yang lebih baik dibandingkan model awal. Eliminasi indikator SIS3 berhasil meningkatkan kualitas konstruk dan memperkuat hubungan antara indikator dengan variabel



laten masing-masing. Dengan demikian, model hasil pengujian kedua ini dinilai lebih *representatif* untuk digunakan pada tahap analisis lanjutan, khususnya dalam pengujian *inner model* dan evaluasi hubungan struktural antar variabel penelitian.

Setelah indikator yang tidak memenuhi kriteria outer loading dieliminasi, tahap berikutnya adalah mengevaluasi konsistensi internal dan validitas konvergen konstruk. Evaluasi tersebut dilakukan menggunakan Composite Reliability dan Average Variance Extracted (AVE), dengan hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. *Construct Reliability and Validity (SmartPLS)*

	Composite reliability	Average variance extracted (AVE)
KONFIGURASI JARINGAN	0.814	0.596
PEMBANGKIT	0.738	0.585
SHORT CIRCUIT	0.977	0.956
SISTEM	0.790	0.656

Berdasarkan Tabel 4, seluruh konstruk memiliki nilai Composite Reliability di atas batas minimum 0,60. Konstruk Konfigurasi Jaringan memperoleh nilai 0,814, Pembangkit sebesar 0,738, Short Circuit sebesar 0,977, dan Sistem sebesar 0,790. Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh konstruk memiliki konsistensi internal yang memadai. Selain itu, nilai AVE seluruh konstruk juga berada di atas 0,50, yaitu 0,596 untuk Konfigurasi Jaringan, 0,585 untuk Pembangkit, 0,956 untuk Short Circuit, dan 0,656 untuk Sistem. Dengan demikian, Tabel 4 menunjukkan bahwa konstruk dalam model telah memenuhi kriteria reliabilitas dan validitas konvergen sehingga dapat dilanjutkan pada evaluasi validitas diskriminan dan model struktural. Selain pengujian reliabilitas, dilakukan pula evaluasi validitas konvergen melalui nilai *Average Variance Extracted* (AVE). Berdasarkan hasil pengujian, seluruh variabel laten memiliki nilai AVE di atas 0,50, sehingga memenuhi kriteria validitas konvergen. Variabel Konfigurasi Jaringan memiliki nilai AVE sebesar 0,596, variabel Pembangkit sebesar 0,585, variabel *Short Circuit* sebesar 0,956, dan variabel Sistem sebesar 0,656. Nilai tersebut menunjukkan bahwa masing-masing konstruk mampu menjelaskan lebih dari 50% *varians* indikator yang digunakan dalam model penelitian.

Selanjutnya, validitas diskriminan dievaluasi melalui nilai cross loading untuk memastikan bahwa setiap indikator memiliki hubungan yang lebih kuat dengan konstruk yang diukurnya dibandingkan dengan konstruk lainnya. Hasil pengujian cross loading pada model yang telah disempurnakan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. *Cross Loading (SmartPLS)*

	KONFIGURASI JARINGAN	PEMBANGKIT	SHORT CIRCUIT	SISTEM
GEN1	0.360	0.758	-0.007	0.228
GEN2	0.369	0.771	0.002	0.071
NET1	0.723	0.293	-0.008	0.098
NET2	0.885	0.456	0.062	0.402
NET3	0.695	0.316	0.095	0.223
SIS1	0.195	0.053	0.135	0.708
SIS2	0.351	0.227	0.151	0.901
SSC2	0.067	-0.006	0.979	0.178
SSC1	0.071	-0.001	0.976	0.164

Pada variabel laten Konfigurasi Jaringan, indikator NET1, NET2, dan NET3 menunjukkan nilai *loading* terbesar. Berdasarkan Tabel 5, indikator NET1, NET2, dan NET3 memiliki loading tertinggi pada konstruk Konfigurasi Jaringan, masing-masing sebesar 0,723, 0,885, dan 0,695. Pada konstruk Pembangkit, GEN1 dan GEN2 memiliki loading masing-masing sebesar 0,758 dan 0,771. Selanjutnya, SIS1 dan SIS2 memiliki loading tertinggi pada konstruk Sistem, masing-masing sebesar 0,708 dan 0,901. Pada konstruk Short Circuit, SSC1 dan SSC2 memiliki nilai loading tertinggi sebesar 0,976 dan 0,979. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa setiap indikator lebih kuat merepresentasikan konstruk asalnya dibandingkan konstruk lainnya. Oleh karena itu, Tabel 5 menunjukkan bahwa persyaratan *discriminant validity* berdasarkan cross loading telah terpenuhi. Secara keseluruhan, hasil pengujian *cross loading* menunjukkan bahwa setiap indikator memiliki nilai loading tertinggi pada konstruk yang diukur dibandingkan dengan konstruk lainnya. Dengan demikian, model penelitian telah memenuhi persyaratan *discriminant validity*, yang berarti setiap variabel laten memiliki karakteristik yang berbeda dan dapat dibedakan secara jelas satu sama lain. Hasil ini memperkuat kualitas model pengukuran yang telah dibangun dan menunjukkan bahwa indikator-indikator yang digunakan mampu merepresentasikan konstruk penelitian secara tepat.

Selain cross loading, hubungan antarvariabel laten perlu diperiksa untuk mengetahui tingkat korelasi antar konstruk dalam model penelitian. Nilai korelasi antar konstruk hasil pengolahan SmartPLS disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. *Latent Variable Correlations (SmartPLS)*

	KONFIGURASI JARINGAN	PEMBANGKIT	SHORT CIRCUIT	SISTEM
KONFIGURASI JARINGAN	1.000	0.476	0.071	0.352
PEMBANGKIT	0.476	1.000	-0.004	0.194



	KONFIGURASI JARINGAN	PEMBANGKIT	SHORT CIRCUIT	SISTEM
SHORT CIRCUIT	0.071	-0.004	1.000	0.175
SISTEM	0.352	0.194	0.175	1.000

Berdasarkan Tabel 6, korelasi antara Konfigurasi Jaringan dan Pembangkit sebesar 0,476 menunjukkan hubungan positif dengan tingkat yang lebih tinggi dibandingkan beberapa pasangan konstruk lainnya. Korelasi Konfigurasi Jaringan dengan Sistem sebesar 0,352, sedangkan korelasinya dengan Short Circuit sebesar 0,071. Konstruk Pembangkit memiliki korelasi sebesar -0,004 dengan Short Circuit dan 0,194 dengan Sistem. Sementara itu, korelasi antara Sistem dan Short Circuit sebesar 0,175. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa hubungan antar konstruk tidak seluruhnya memiliki kekuatan yang sama, sehingga diperlukan pengujian lanjutan menggunakan kriteria Fornell-Larcker untuk memastikan bahwa konstruk tetap dapat dibedakan secara empiris. Memperkuat evaluasi validitas diskriminan yang telah dilakukan melalui cross loading dan korelasi antar konstruk, pengujian selanjutnya menggunakan kriteria Fornell-Larcker. Hasil perbandingan nilai akar kuadrat AVE dengan korelasi antar konstruk disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Fornell-Larcker Criterion (SmartPLS)

	KONFIGURASI JARINGAN	PEMBANGKIT	SHORT CIRCUIT	SISTEM
KONFIGURASI JARINGAN	0.772			
PEMBANGKIT	0.476	0.765		
SHORT CIRCUIT	0.071	-0.004	0.978	
SISTEM	0.352	0.194	0.175	0.810

Berdasarkan Tabel 7, nilai akar kuadrat AVE Konfigurasi Jaringan sebesar 0,772 lebih tinggi dibandingkan korelasinya dengan Pembangkit sebesar 0,476, Short Circuit sebesar 0,071, dan Sistem sebesar 0,352. Konstruk Pembangkit memiliki nilai akar kuadrat AVE sebesar 0,765, sedangkan Short Circuit sebesar 0,978 dan Sistem sebesar 0,810. Nilai akar kuadrat AVE pada masing-masing konstruk lebih tinggi dibandingkan korelasinya dengan konstruk lain. Dengan demikian, Tabel 7 menunjukkan bahwa setiap konstruk memiliki kemampuan yang lebih kuat dalam menjelaskan indikator pembentuknya dibandingkan hubungannya dengan konstruk lain, sehingga persyaratan validitas diskriminan telah terpenuhi.

Berdasarkan perbandingan tersebut, dapat diketahui bahwa setiap konstruk memiliki nilai akar kuadrat AVE yang lebih besar daripada nilai korelasi dengan konstruk lain dalam model. Menurut (J. Hair & Alamer, 2022) validitas diskriminan dinyatakan terpenuhi apabila nilai akar kuadrat AVE dari suatu konstruk lebih besar dibandingkan korelasi antara konstruk tersebut dengan konstruk lainnya dalam model penelitian. Kondisi ini menunjukkan bahwa masing-masing variabel laten memiliki kemampuan yang baik dalam menjelaskan indikator-indikator pembentuknya dibandingkan dalam menjelaskan konstruk lain. Dengan kata lain, setiap konstruk telah mampu mempertahankan keunikannya dan tidak mengalami permasalahan diskriminasi antar variabel laten. Oleh karena itu, hasil pengujian menggunakan kriteria *Fornell-Larcker* mengindikasikan bahwa model pengukuran yang dikembangkan telah memenuhi persyaratan validitas diskriminan. Temuan ini memperlihatkan bahwa konstruk Konfigurasi Jaringan, Pembangkit, *Short Circuit*, dan Sistem merupakan variabel yang secara konseptual maupun empiris dapat dibedakan satu sama lain, sehingga layak digunakan pada tahap analisis model struktural untuk menguji hubungan antar konstruk dalam penelitian ini. Setelah model pengukuran dinyatakan memenuhi kriteria validitas dan reliabilitas, tahap berikutnya dalam analisis PLS-SEM adalah mengevaluasi model struktural (*inner model*). Evaluasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi arah, besaran, serta tingkat signifikansi hubungan antar konstruk laten yang telah dirumuskan dalam hipotesis penelitian.

Analisis hubungan antar konstruk dilakukan melalui pengujian *path coefficients*, *t-statistic*, dan *p-values*. Nilai *path coefficients* diperoleh dari proses estimasi model menggunakan algoritma PLS dan digunakan untuk menggambarkan arah hubungan antar variabel laten. Koefisien yang bernilai positif menunjukkan bahwa peningkatan pada suatu konstruk cenderung diikuti oleh peningkatan pada konstruk yang dipengaruhi. Sebaliknya, koefisien bernilai negatif mengindikasikan hubungan yang berlawanan arah. Selain arah hubungan, besarnya nilai koefisien juga mencerminkan tingkat pengaruh yang diberikan oleh suatu konstruk terhadap konstruk lainnya. Untuk mengetahui apakah hubungan tersebut terjadi secara signifikan, dilakukan pengujian menggunakan metode *bootstrapping*. Metode ini merupakan teknik pengambilan sampel ulang (resampling) yang dilakukan secara berulang terhadap data penelitian sehingga diperoleh distribusi empiris dari parameter yang diestimasi. Melalui prosedur tersebut, SmartPLS menghasilkan nilai *t-statistic* yang digunakan untuk mengukur tingkat signifikansi pengaruh antar konstruk dalam model.

Nilai *t-statistic* yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan nilai kritis pada tingkat kepercayaan tertentu. Pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$) dengan pengujian dua arah, hubungan antar variabel dinyatakan signifikan apabila nilai *t-statistic* lebih besar dari 1,96. Semakin tinggi nilai *t-statistic* yang dihasilkan, semakin kuat pula bukti statistik yang mendukung adanya hubungan antar konstruk yang diuji. Selain menggunakan *t-statistic*, tingkat signifikansi hubungan juga dievaluasi melalui nilai *p-values*. Nilai ini menunjukkan probabilitas kesalahan dalam menerima suatu hubungan yang sebenarnya tidak signifikan. Apabila nilai *p-values* lebih kecil dari 0,05, maka hubungan antar variabel dapat dinyatakan signifikan secara statistik. Sebaliknya, nilai *p-values* yang lebih besar dari 0,05 menunjukkan bahwa bukti empiris yang diperoleh belum cukup untuk mendukung keberadaan hubungan tersebut. Menurut (J. Hair &



Alamer, 2022), pengujian model struktural dalam PLS-SEM dilakukan melalui evaluasi koefisien jalur, nilai *t-statistic*, dan *p-values* untuk menilai arah, kekuatan, serta signifikansi hubungan antar konstruk yang diuji dalam model penelitian. Dengan demikian, interpretasi hasil model struktural dilakukan secara simultan dengan mempertimbangkan nilai *path coefficients*, *t-statistic*, dan *p-values*. Ketiga parameter tersebut menjadi dasar dalam menilai kekuatan pengaruh antar konstruk sekaligus menentukan apakah hipotesis yang diajukan dalam penelitian dapat diterima atau ditolak. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap hubungan kausal yang terbentuk dalam model PLS-SEM sehingga kesimpulan yang dihasilkan memiliki dasar statistik yang memadai. Setelah model pengukuran memenuhi kriteria validitas dan reliabilitas, analisis dilanjutkan pada evaluasi model struktural. Pengujian dilakukan menggunakan *path coefficient*, *standard deviation*, *t-statistic*, dan *p-values* melalui prosedur *bootstrapping* untuk menentukan arah, kekuatan, dan signifikansi hubungan antar konstruk. Hasil pengujian tersebut disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Path-Coefficient, STDEV, T-Values, P-Values (SmartPLS-Bootstrapping)

	Original sample (O)	Sample mean (M)	Standard deviation (STDEV)	T statistics (O/STDEV)	P values
KONFIGURASI JARINGAN -> SHORT CIRCUIT	0.036	0.037	0.061	0.583	0.280
PEMBANGKIT -> KONFIGURASI JARINGAN	0.424	0.430	0.052	8.110	0.000
PEMBANGKIT -> SHORT CIRCUIT	-0.054	-0.053	0.046	1.185	0.118
SISTEM -> KONFIGURASI JARINGAN	0.270	0.270	0.032	8.367	0.000
SISTEM -> SHORT CIRCUIT	0.173	0.179	0.080	2.156	0.016

Berdasarkan hasil analisis yang ditunjukkan pada Tabel 8, hubungan antara Konfigurasi Jaringan terhadap *Short Circuit* memiliki nilai *path coefficient* sebesar 0,036 dengan nilai *t-statistic* sebesar 0,583 dan *p-values* sebesar 0,280. Nilai koefisien yang positif menunjukkan adanya kecenderungan hubungan searah antara kedua variabel. Namun demikian, nilai *t-statistic* yang berada di bawah batas kritis 1,96 dan *p-values* yang lebih besar dari 0,05 menunjukkan bahwa pengaruh tersebut tidak signifikan secara statistik. Dengan demikian, perubahan pada konfigurasi jaringan belum terbukti memberikan pengaruh yang nyata terhadap peningkatan arus hubung singkat dalam model yang dikembangkan.

Hubungan antara Pembangkit terhadap Konfigurasi Jaringan menunjukkan nilai *path coefficient* sebesar 0,424, dengan *t-statistic* sebesar 8,110 dan *p-values* sebesar 0,000. Hasil ini mengindikasikan adanya pengaruh positif dan signifikan. Nilai koefisien yang relatif besar menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas atau perkembangan pembangkit berkontribusi terhadap perubahan konfigurasi jaringan. Tingginya nilai *t-statistic* dan sangat kecilnya nilai *p-values* memperkuat bukti bahwa hubungan tersebut didukung secara empiris oleh data penelitian. Selanjutnya, hubungan antara Pembangkit terhadap *Short Circuit* menghasilkan nilai *path coefficient* sebesar -0,054, dengan *t-statistic* sebesar 1,185 dan *p-values* sebesar 0,118. Nilai koefisien negatif mengindikasikan kecenderungan hubungan berlawanan arah antara kedua variabel. Akan tetapi, karena nilai *t-statistic* masih berada di bawah 1,96 dan *p-values* melebihi 0,05, maka hubungan tersebut tidak signifikan secara statistik. Hasil ini menunjukkan bahwa pengaruh langsung variabel pembangkit terhadap arus hubung singkat belum dapat dibuktikan secara memadai dalam model penelitian.

Untuk hubungan Sistem terhadap Konfigurasi Jaringan, diperoleh nilai *path coefficient* sebesar 0,270, dengan *t-statistic* sebesar 8,367 dan *p-values* sebesar 0,000. Hasil tersebut menunjukkan adanya pengaruh positif yang signifikan. Artinya, perubahan kondisi sistem, seperti penguatan interkoneksi, pengembangan jaringan transmisi, maupun perubahan karakteristik operasi sistem, berkontribusi terhadap perubahan konfigurasi jaringan. Signifikansi hubungan ini ditunjukkan oleh nilai *t-statistic* yang jauh melampaui nilai kritis dan *p-values* yang mendekati nol. Sementara itu, hubungan Sistem terhadap *Short Circuit* memiliki nilai *path coefficient* sebesar 0,173, dengan *t-statistic* sebesar 2,156 dan *p-values* sebesar 0,016. Nilai tersebut menunjukkan adanya pengaruh positif yang signifikan pada tingkat kepercayaan 95%. Dengan demikian, variabel sistem terbukti memiliki kontribusi terhadap peningkatan arus hubung singkat, meskipun besarnya pengaruh yang diberikan relatif lebih kecil dibandingkan hubungan signifikan lainnya dalam model. Selain memperhatikan koefisien jalur dan tingkat signifikansinya, nilai *Standard Deviation* (STDEV) juga memberikan informasi mengenai stabilitas hasil estimasi yang diperoleh melalui proses *bootstrapping*. Nilai STDEV pada seluruh hubungan berada pada rentang 0,032 hingga 0,080, yang menunjukkan bahwa variasi hasil estimasi relatif rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa parameter yang dihasilkan cukup stabil dan konsisten pada proses pengambilan sampel ulang.

3.1.2 Prediksi Arus Hubung Singkat

Proses prediksi diawali dengan pembentukan skor variabel laten untuk setiap Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET). Skor tersebut diperoleh dari kombinasi indikator-indikator yang telah memenuhi persyaratan validitas dan reliabilitas pada tahap sebelumnya. Variabel laten yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas variabel Pembangkit (PB), Sistem (SYS), Konfigurasi Jaringan (KJ), dan Short Circuit (SSC). Tahap pertama dilakukan dengan menghitung nilai skor variabel laten Pembangkit (PB) dan Sistem (SYS). Nilai tersebut diperoleh melalui proses pembobotan



indikator menggunakan nilai *outer loading* yang dihasilkan oleh SmartPLS yang diambil dari *latent variable score*. Selanjutnya, perkembangan nilai PB dan SYS untuk periode 2026–2030 diproyeksikan menggunakan pendekatan tren berdasarkan data historis tahun 2018–2025. Tahap berikutnya adalah membentuk nilai latent variable score yang digunakan sebagai dasar dalam penyusunan prediksi arus hubung singkat. Nilai Pembangkit (PB) dan Sistem (SYS) diperoleh dari hasil pengolahan SmartPLS dan kemudian diproyeksikan untuk periode 2026–2030 berdasarkan pola historis. Hasil latent variable score tersebut disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. PB dan SYS *Latent Variable Score* SmartPLS

GI/GITET	Tahun	PB_score	SYS_score
ADIPALA7	2026	-0,07	-0,56
ADIPALA7	2027	-0,07	-0,56
ADIPALA7	2028	-0,07	-0,56
ADIPALA7	2029	-0,07	-0,56
ADIPALA7	2030	-0,07	-0,56
BANDUNG SELATAN7	2026	0,863	-0,436
BANDUNG SELATAN7	2027	0,863	-0,44
BANDUNG SELATAN7	2028	0,863	-0,534
BANDUNG SELATAN7	2029	0,863	-0,406
BANDUNG SELATAN7	2030	0,863	-0,394
BEKASI7	2026	0,022	-0,359
BEKASI7	2027	0,022	-0,516
BEKASI7	2028	0,022	1,285
...	...	...	...
...	...	...	...
UNGARAN7	2029	0,373	-0,213
UNGARAN7	2030	0,373	0,429

Berdasarkan Tabel 9, nilai PB_score dan SYS_score menunjukkan variasi antar-GITET dan antarperiode prediksi. Sebagai contoh, ADIPALA7 memiliki PB_score sebesar -0,07 dan SYS_score sebesar -0,56 secara konsisten selama periode 2026–2030, sedangkan BANDUNG SELATAN7 memiliki PB_score positif sebesar 0,863 dengan SYS_score yang berubah dari sekitar -0,436 dan mengalami variasi pada tahun-tahun berikutnya. Pada BEKASI7, SYS_score menunjukkan perubahan yang lebih besar, termasuk nilai positif pada 2028 dan 2029. Variasi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik pembangkit dan sistem tidak seragam pada setiap GITET. Oleh karena itu, Tabel 9 menjadi dasar untuk menghitung konstruk Konfigurasi Jaringan dan selanjutnya membentuk indeks Short Circuit untuk menghasilkan prediksi arus hubung singkat (Chicco et al., 2021).

Setelah nilai PB Score dan SYS Score diperoleh, langkah berikutnya adalah menghitung nilai Konfigurasi Jaringan (KJ) menggunakan persamaan struktural hasil estimasi PLS-SEM. Berdasarkan hasil pengujian model struktural, hubungan antara variabel Pembangkit, Sistem, dan Konfigurasi Jaringan dinyatakan sebagai berikut:

$$KJ = 0,420(PB) + 0,280(SYS)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan pada variabel Pembangkit dan Sistem akan memengaruhi perubahan nilai Konfigurasi Jaringan. Koefisien positif pada kedua variabel mengindikasikan bahwa peningkatan kapasitas pembangkit maupun penguatan sistem cenderung meningkatkan nilai konstruk Konfigurasi Jaringan. Tahap selanjutnya adalah menghitung indeks Short Circuit (SSC Index) menggunakan persamaan struktural hasil SmartPLS sebagai berikut:

$$SSC_{index} = -0,054(PB) + 0,040(KJ) + 0,156(SYS)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa variabel Sistem memiliki pengaruh terbesar terhadap perubahan arus hubung singkat, sedangkan variabel Pembangkit memberikan pengaruh negatif yang relatif kecil. Adapun variabel Konfigurasi Jaringan memberikan kontribusi positif, namun dengan pengaruh yang lebih rendah dibandingkan variabel Sistem. Nilai SSC yang diperoleh dari persamaan tersebut masih berupa skor laten (*latent variable score*) yang tidak memiliki satuan fisik. Oleh karena itu, diperlukan proses kalibrasi agar hasil prediksi dapat dikonversikan menjadi nilai arus hubung singkat aktual dalam satuan kiloampere (kA). Proses kalibrasi dilakukan dengan menghubungkan nilai SSC Index hasil SmartPLS terhadap data aktual arus hubung singkat historis yang diperoleh dari sistem Jawa–Bali. Melalui proses ini diperoleh persamaan konversi yang digunakan untuk menghasilkan prediksi arus hubung singkat tiga fasa dan satu fasa pada masing-masing GITET. Setelah diperoleh nilai PB_score dan SYS_score, nilai Konfigurasi Jaringan dan SSC Index dihitung menggunakan persamaan struktural hasil PLS-SEM. Karena SSC Index masih berupa skor laten tanpa satuan fisik, nilai tersebut kemudian dikalibrasi terhadap data arus hubung singkat aktual untuk memperoleh prediksi SCC dalam satuan kA. Hasil prediksi arus hubung singkat tiga fasa dan satu fasa serta perbandingannya dengan breaking capacity peralatan untuk periode 2026–2030 disajikan pada Tabel 10.

**Tabel 10.** Hasil Prediksi Arus Hubung Singkat Tahun 2026-2030

GITET	Tahun	KJ=0.420PB +0.280SYS	SSC_index=- 0.054PB+0.040KJ +0.156SYS	Prediksi		Breaking Capacity kA
				SSC 3 Fasa kA	SSC 1 Fasa kA	
ADIPALA7	2026	-0,186	-0,091	25,53	27,72	63
ADIPALA7	2027	-0,186	-0,091	25,44	27,63	63
ADIPALA7	2028	-0,186	-0,091	25,35	27,54	63
ADIPALA7	2029	-0,186	-0,091	25,26	27,45	63
ADIPALA7	2030	-0,186	-0,091	25,16	27,35	63
BANDUNG SELATAN7	2026	0,240	-0,105	42,14	35,79	40
BANDUNG SELATAN7	2027	0,239	-0,106	42,04	35,69	40
BANDUNG SELATAN7	2028	0,213	-0,121	41,92	35,57	40
BANDUNG SELATAN7	2029	0,249	-0,100	41,82	35,47	40
BANDUNG SELATAN7	2030	0,252	-0,098	41,72	35,37	40
BEKASI7	2026	-0,091	-0,061	38,29	37,64	40
BEKASI7	2027	-0,135	-0,087	38,20	37,55	40
BEKASI7	2028	0,369	0,214	38,42	37,77	40
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
UNGARAN7	2029	0,097	-0,049	39,78	36,07	40
UNGARAN7	2030	0,277	0,058	39,84	36,13	40

Berdasarkan Tabel 10, nilai prediksi arus hubung singkat menunjukkan karakteristik yang berbeda pada setiap GITET. ADIPALA7 memiliki prediksi SCC tiga fasa yang menurun dari 25,53 kA pada 2026 menjadi 25,16 kA pada 2030, sedangkan breaking capacity yang tersedia sebesar 63 kA sehingga masih terdapat margin yang cukup besar. Sebaliknya, BANDUNG SELATAN7 memiliki prediksi SCC tiga fasa sekitar 42 kA dengan breaking capacity 40 kA, sehingga nilai prediksi telah berada di atas kemampuan pemutusan yang tercantum dalam tabel. Kondisi yang lebih tinggi juga terlihat pada CIBATU7, dengan prediksi SCC tiga fasa sekitar 48 kA dan breaking capacity 40 kA, serta CIBINONG7 dengan prediksi sekitar 60–61 kA dan breaking capacity 40 kA. Pada CILEGONBARU7, prediksi SCC tiga fasa berada di atas 51 kA dengan breaking capacity 50 kA. Temuan tersebut menunjukkan bahwa Tabel 10 tidak hanya memberikan proyeksi numerik SCC periode 2026–2030, tetapi juga mengidentifikasi GITET yang memerlukan evaluasi teknis lebih lanjut terhadap kecukupan breaking capacity.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan keseluruhan proses penelitian yang meliputi pengolahan data historis sistem Jawa–Bali periode 2018–2025, pembentukan model PLS-SEM, pengujian validitas dan reliabilitas, analisis hubungan struktural, penyusunan model prediksi, hingga evaluasi kecukupan rating peralatan GITET 500 kV, dapat disimpulkan bahwa perkembangan arus hubung singkat merupakan hasil interaksi karakteristik pembangkit, konfigurasi jaringan, dan kondisi sistem tenaga listrik. Hasil pengujian model struktural menunjukkan bahwa hubungan Pembangkit terhadap Konfigurasi Jaringan dan Sistem terhadap Konfigurasi Jaringan terbukti signifikan, sedangkan pengaruh Sistem terhadap Short Circuit juga terbukti signifikan dengan koefisien sebesar 0,173, t-statistic 2,156, dan p-value 0,016; sebaliknya, pengaruh langsung Pembangkit maupun Konfigurasi Jaringan terhadap Short Circuit belum menunjukkan signifikansi statistik dalam model yang dibangun. Model prediksi yang dikembangkan berdasarkan skor variabel laten dan pola historis mampu menghasilkan proyeksi arus hubung singkat tiga fasa dan satu fasa untuk periode 2026–2030, dengan kecenderungan perubahan yang berbeda pada setiap GITET sesuai karakteristik sistemnya. Hasil evaluasi juga memperlihatkan bahwa tingkat risiko tidak bersifat seragam, karena GITET dengan interkoneksi tinggi, kedekatan terhadap pusat pembangkit, atau impedansi sistem yang lebih rendah memiliki potensi peningkatan arus hubung singkat yang lebih besar. Dengan demikian, hasil penelitian memberikan dasar teknis untuk melakukan evaluasi lebih dini terhadap kemampuan peralatan 500 kV, khususnya ketika nilai arus hubung singkat hasil prediksi semakin mendekati kemampuan nominal peralatan, sehingga perencanaan uprating circuit breaker, penerapan Fault Current Limiter, evaluasi konfigurasi jaringan, maupun strategi operasi dapat dilakukan secara lebih proaktif. Pendekatan yang dihasilkan tidak dimaksudkan menggantikan perhitungan hubung singkat berbasis standar, tetapi melengkapinya dengan informasi mengenai kecenderungan perkembangan SCC sebagai bahan pendukung perencanaan dan pengelolaan aset sistem transmisi 500 kV Jawa–Bali.

REFERENCES

Alashqar, M., Yang, C., Xue, Y., Liu, Z., Zheng, W., & Zhang, X.-P. (2023). Enhancing transient stability of power systems using a resistive superconducting fault current limiter. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1106836>



- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- Gomes Guerreiro, G. M., Sharma, R., Martin, F., Ghimire, P., & Yang, G. (2023). Concerning Short-Circuit Current Contribution Challenges of Large-Scale Full-Converter Based Wind Power Plants. *IEEE Access*, 11, 64141–64159. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3288610>
- Hair, J., & Alamer, A. (2022). Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) in second language and education research: Guidelines using an applied example. *Research Methods in Applied Linguistics*, 1(3), 100027. <https://doi.org/10.1016/j.rmal.2022.100027>
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., Sarstedt, M., Danks, N. P., & Ray, S. (2021). *Evaluation of Reflective Measurement Models* (pp. 75–90). https://doi.org/10.1007/978-3-030-80519-7_4
- He, S., Zhao, S., Wang, S., Huang, J., Zhang, C., & Wang, H. (2024). A fast short circuit capacity calculation model based on regression neural network in complex grid environment. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2024-3325>
- Kozarek, Ł., Cichecki, H., Bogacki, M., Tyryk, M., Szulborski, M., Łapczyński, S., Kolimas, Ł., Rasolomampionona, D., Lange, A., Berowski, P., Sul, P., & Owsinski, M. (2023). Impact of the Short-Circuit Current Value on the Operation of Overhead Connections in High-Voltage Power Stations. *Energies*, 16(8), 3462. <https://doi.org/10.3390/en16083462>
- Mbitu, E. T., Jamlaay, M., & Sahusilawane, F. R. (2025). Short-Circuit Analysis of the Saparua Distribution Feeder Network. *International Journal of Science, Technology & Management*, 6(4), 608–615. <https://doi.org/10.46729/ijstm.v6i4.1337>
- Mohammadi, S., Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Yazdani, A., & Shafiullah, G. (2022). Decaying DC Offset Current Mitigation in Phasor Estimation Applications: A Review. *Energies*, 15(14), 5260. <https://doi.org/10.3390/en15145260>
- Murugan, R., & Raju, R. (2021). Evaluation of in-service power transformer health condition for Inspection, Repair, and Replacement (IRR) maintenance planning in electric utilities. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 12(2), 318–336. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01083-1>
- Nur, A. D. N., T Mangesa, R., Imran, A., Firdaus, F., & Zuhajji, Z. (2023). Short Circuit Fault Analysis In The Electric Power Distribution System At Pt Pln (Persero) UP3 South Makassar Ulp Kalebajeng Using Etap. *Journal of Electrical Engineering and Informatics*, 1(1), 35–44. <https://doi.org/10.59562/jeeni.v1i1.420>
- Nur Annisa Dewi Nayla, T Mangesa, R., Imran, A., Firdaus, F., & Zuhajji, Z. (2023). Short Circuit Fault Analysis In The Electric Power Distribution System At Pt Pln (Persero) UP3 South Makassar Ulp Kalebajeng Using Etap. *Journal of Electrical Engineering and Informatics*, 1(1), 35–44. <https://doi.org/10.59562/jeeni.v1i1.420>
- Okumus, H., Nuroglu, F. M., & McLoone, S. (2025a). Ensemble learning for short circuit fault location estimation in distribution networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 159, 111640. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111640>
- Okumus, H., Nuroglu, F. M., & McLoone, S. (2025b). Ensemble learning for short circuit fault location estimation in distribution networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 159, 111640. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111640>
- Plevris, V., Solorzano, G., Bakas, N., & Ben Seghier, M. (2022). Investigation of performance metrics in regression analysis and machine learning-based prediction models. *8th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. <https://doi.org/10.23967/eccomas.2022.155>
- Putra, P. D., & Marbun, M. P. (2022). Adaptive Defense Scheme Implementation in Muarakarang Subsystem to Prevent Island Operation Failure. *2022 11th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, 88–93. <https://doi.org/10.1109/EECCIS54468.2022.9902921>
- Qays, M. O., Ahmad, I., Habibi, D., Aziz, A., & Mahmoud, T. (2023). System strength shortfall challenges for renewable energy-based power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113447. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113447>
- Qian, W., Zhang, R., Zou, Y., Zhou, N., Wang, Q., & Yang, T. (2024). Quantifying the Inverter-Interfaced Renewable Energy Critical Integration Capacity of a Power Grid Based on Short-Circuit Current Over-Limits Probability. *Electronics*, 13(8), 1486. <https://doi.org/10.3390/electronics13081486>
- Ruikai, Y., Huifang, W., Bashir, T., & Yixiang, Z. (2024). Fast and accurate method for short-circuit current calculation in distribution network with IIDGs. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155, 109622. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109622>
- Silos-Sanchez, A., Villafila-Robles, R., & Lloret-Gallego, P. (2020). Novel fault location algorithm for meshed distribution networks with DERs. *Electric Power Systems Research*, 181, 106182. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106182>
- Silva, J. M. C. S., & Winkelmann, R. (2026). Misspecified Exponential Regressions: Estimation, Interpretation, and Average Marginal Effects. *Review of Economics and Statistics*, 1–8. https://doi.org/10.1162/rest_a_01443
- Song, X., Deng, L., Wang, H., Zhang, Y., He, Y., & Cao, W. (2024). Deep learning-based time series forecasting. *Artificial Intelligence Review*, 58(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10989-8>



- Stoffels, M., Torre, D. M., Sturgis, P., Koster, A. S., Westein, M. P. D., & Kusurkar, R. A. (2023). Steps and decisions involved when conducting structural equation modeling (SEM) analysis. *Medical Teacher*, 45(12), 1343–1345. <https://doi.org/10.1080/0142159X.2023.2263233>
- Wang, M., Wei, X., & Zhao, Z. (2022). Short-Circuit Fault Current Parameter Prediction Method Based on Ultra-Short-Time Data Window. *Energies*, 15(23), 8861. <https://doi.org/10.3390/en15238861>
- Yu, R., Jahdi, S., Mellor, P., Liu, L., Yang, J., Shen, C., Alatise, O., & Ortiz-Gonzalez, J. (2023). Degradation Analysis of Planar, Symmetrical and Asymmetrical Trench SiC MOSFETs Under Repetitive Short Circuit Impulses. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(9), 10933–10946. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3290387>