

Pemodelan Relai *Differensial* dan Relai Arus Lebih pada Transformator
GI BSD 150kV/20kV

*Modelling of Differential Relay and Overcurrent Relay on a 150kV/20kV
GI BSD Transformer*

Dimas Ali Mukhtar^{1*}, Edi Mulyana²

^{1,2}Teknik Elektro, UIN Sunan Gunung Djati Bandung, Indonesia

Jl. AH. Nasution 105 Bandung, Indonesia

dimasalimukhtar@gmail.com^{1*}, edim@uinsgd.ac.id²

Abstrak – Transformator memiliki peran penting dalam menjaga keandalan penyaluran tenaga listrik, sehingga diperlukan sistem proteksi yang efektif untuk mengantisipasi dampak gangguan hubung singkat. Laporan kerja praktik ini membahas pemodelan transformator dengan konfigurasi Yn-Yn pada GI BSD 150kV/20kV beserta sistem proteksi menggunakan relai diferensial dan relai arus lebih dengan bantuan perangkat lunak Software simulasi. Tujuan penelitian ini adalah memodelkan transformator, membangun sistem proteksi, menganalisis respons sistem terhadap berbagai skenario gangguan hubung singkat, serta melakukan validasi hasil simulasi. Pemodelan dilakukan berdasarkan data teknis aktual transformator dan pengaturan proteksi yang digunakan di lapangan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa relai diferensial dan relai arus lebih mampu mendeteksi serta merespons gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa, maupun tiga fasa dengan cepat dan akurat. Proses validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap perhitungan matematis, termasuk melalui simulasi gangguan pada sisi primer dan sekunder transformator terhadap hubung singkat antar fasa. Validasi ini menghasilkan selisih error maksimal sebesar 0,20% yang masih dalam batas toleransi. Hal tersebut membuktikan bahwa model yang dibangun dapat merepresentasikan kondisi aktual secara akurat dan layak dijadikan acuan dalam pengembangan sistem proteksi transformator.

Kata Kunci: Pemodelan, Relai diferensial, Relai arus lebih, Simulasi, Software simulasi, Transformator.

Abstract – Transformers play a vital role in maintaining the reliability of electric power delivery, thus requiring effective protection systems to mitigate the impact of short-circuit faults. This internship report discusses the modeling of a Yn-Yn configured transformer at GI BSD 150kV/20kV, along with the protection system using differential relays and overcurrent relays with the aid of simulation software. The objectives of this study are to model the transformer, develop the protection system, analyze system responses to various short-circuit fault scenarios, and validate the simulation results. The modeling was carried out based on actual technical data of the transformer and the applied protection settings in the field. The simulation results show that the differential relay and overcurrent relay were able to detect and respond to single line-to-ground, double-line, and three-phase faults quickly and accurately. The validation process was conducted by comparing the simulation results with mathematical calculations, including fault simulations on both the primary and secondary sides of the transformer under phase-to-phase short-circuit conditions. The validation yielded a maximum error of 0.20%, which is still within the acceptable tolerance limit. This demonstrates that the developed model can accurately represent actual conditions and can be used as a reliable reference for the development of transformer protection systems.

Keywords: Modelling, Differential relay, Overcurrent relay, Simulation, simulation software, Transformer.

1. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik merupakan infrastruktur kritis yang menopang kehidupan modern, di mana transformator memegang peranan sentral dalam transmisi dan distribusi energi [1]. Sebagai jantung dari sistem kelistrikan, keandalan transformator sangat menentukan stabilitas dan kontinuitas pasokan daya [2]. Namun, transformator rentan terhadap berbagai gangguan, terutama gangguan hubung singkat (short circuit) dan arus lebih (overcurrent) yang dapat menyebabkan kerusakan fatal jika tidak segera diatasi [3] [4]. Gangguan ini dapat berasal dari faktor internal, seperti kegagalan isolasi belitan, maupun faktor eksternal, seperti sambaran petir atau kerusakan pada jaringan di luar transformator [5]. Untuk mengatasi ancaman ini, diperlukan sistem proteksi yang andal dan efektif.

Relai proteksi adalah "otak" dari sistem proteksi, yang berfungsi mendeteksi kondisi tidak normal dan mengirimkan sinyal perintah ke pemutus sirkuit untuk mengisolasi bagian yang terganggu [6]. Relai diferensial, misalnya, adalah proteksi utama yang sangat peka terhadap gangguan internal dengan cara membandingkan arus masuk dan keluar transformator [7] [8]. Sementara itu, relai arus lebih berfungsi sebagai proteksi cadangan yang mendeteksi arus lebih baik akibat gangguan internal maupun eksternal [9]. Keduanya harus dikonfigurasi dan dikoordinasi dengan akurat agar dapat melindungi transformator secara optimal.

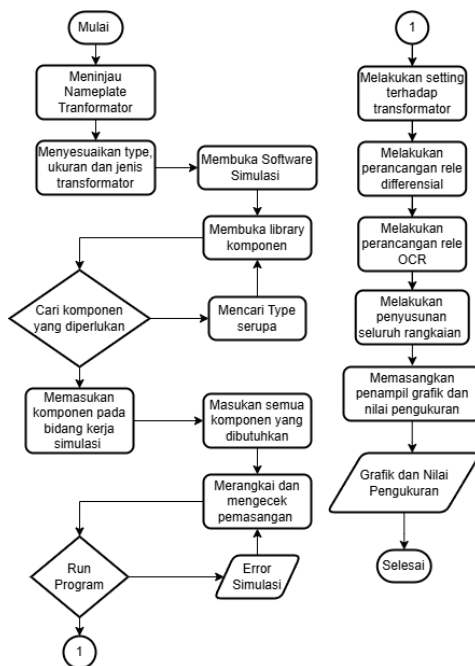
Studi ini berfokus pada pemodelan transformator GI BSD 150kV/20kV dengan konfigurasi Yn-Yn dan sistem proteksinya menggunakan relai diferensial dan relai arus lebih. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respons kedua relai tersebut terhadap berbagai skenario gangguan hubung singkat, meliputi gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa, dan tiga fasa. Dengan menggunakan perangkat lunak Software simulasi, penelitian ini tidak hanya memodelkan transformator dan sistem proteksinya berdasarkan data teknis aktual di lapangan, tetapi juga melakukan validasi dengan membandingkan hasil simulasi dengan perhitungan matematis. Analisis yang dilakukan diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai performa sistem proteksi dan mengidentifikasi anomali yang terjadi selama simulasi [10]. Seluruh proses ini bersifat simulatif dan tidak diimplementasikan langsung pada sistem fisik, menjadikannya acuan berharga untuk pengembangan sistem proteksi transformator di masa depan.

2. Metode Penelitian

2.1. Alur Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan deskriptif analitis dengan fokus utama pada pemodelan dan simulasi numerik. Proses riset dilakukan secara sistematis melalui serangkaian tahapan yang terstruktur, dimulai dari inisiasi studi hingga evaluasi hasil akhir. Proses penelitian ini diawali dengan analisis data *nameplate* transformator, yang berfungsi sebagai basis data teknis untuk konfigurasi model. Data ini sangat krusial karena menentukan parameter listrik, seperti rating tegangan dan arus, yang harus direplikasi secara akurat dalam lingkungan simulasi. Setelah itu, dilakukan pemilihan komponen dari *library* perangkat lunak Software simulasi, termasuk blok-blok transformator, pemutus sirkuit, dan relai. Tahap selanjutnya adalah perancangan rangkaian proteksi, di mana komponen-komponen tersebut dirangkai menjadi sebuah sistem yang merepresentasikan kondisi fisik transformator. Setelah rangkaian terbentuk, langkah berikutnya adalah pengaturan parameter (*setting*) transformator dan relai proteksi, baik relai diferensial maupun relai arus lebih (OCR). Pengaturan ini mencakup penetapan nilai *pickup current*, karakteristik operasi relai, dan parameter-parameter lain yang relevan. Kemudian, panel pengukuran dipasang pada titik-titik strategis dalam rangkaian untuk mengakuisisi data arus dan tegangan selama simulasi. Setelah semua persiapan selesai, simulasi dijalankan untuk merekam respons sistem terhadap berbagai skenario gangguan. Apabila ditemukan *error* atau anomali yang tidak sesuai dengan teori, dilakukan pengecekan ulang dan penyesuaian parameter hingga simulasi berjalan dengan berhasil dan menghasilkan data yang valid. Alur kerja yang terperinci

ini digambarkan secara komprehensif pada Gambar 1, yang memandu seluruh proses simulasi proteksi transformator.



Gambar 2 Diagram alir proses simulasi menggunakan software simulasi

Selain itu, dilakukan tahapan tahapan dalam penelitian ini berupa susunan alur yang di mulai dari studi literature hingga analisis dan validasi hasil.

1. Studi Literatur: Tahap awal ini melibatkan kajian komprehensif terhadap literatur, jurnal, buku, dan standar teknis yang relevan dengan sistem tenaga listrik, proteksi transformator, dan jenis-jenis gangguan seperti hubung singkat. Kajian ini mencakup prinsip dasar relai diferensial dan relai arus lebih, serta validasi matematis.
2. Penguasaan Perangkat Lunak: Tahap ini berfokus pada penguasaan lingkungan simulasi MATLAB Software simulasi. Aktivitas yang dilakukan meliputi pemahaman terhadap blok-blok fungsional yang diperlukan untuk pemodelan sistem tenaga dan perancangan sistem proteksi, serta penetapan parameter yang akurat.
3. Pemodelan Sistem: Dilakukan pemodelan transformator daya GI BSD 150kV/20kV berdasarkan data *nameplate* aktual dari lapangan. Pemodelan ini mencakup konfigurasi belitan Yn-Yn serta perancangan model relai diferensial dan relai arus lebih yang mereplikasi fungsi aslinya.
4. Simulasi Gangguan: Setelah pemodelan selesai, dilakukan serangkaian simulasi untuk menguji respons sistem proteksi terhadap berbagai jenis gangguan hubung singkat yang disuntikkan secara buatan, termasuk gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa, dan tiga fasa.
5. Analisis dan Validasi Hasil: Tahap akhir adalah menganalisis data yang diperoleh dari simulasi, yang mencakup bentuk gelombang arus dan tegangan, serta waktu operasi relai. Hasil simulasi kemudian divalidasi dengan membandingkannya terhadap perhitungan matematis untuk mengukur tingkat akurasi dan keandalan model.

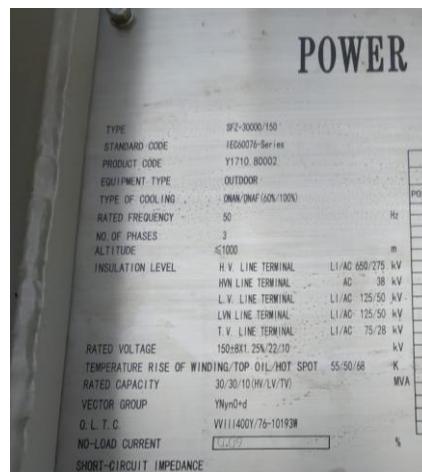
2.2. Metode Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini melibatkan evaluasi kuantitatif dan kualitatif. Data yang diperoleh dari simulasi mencakup bentuk gelombang arus dan tegangan, yang dianalisis untuk mengidentifikasi anomali dan respons sistem. Data ini diukur menggunakan blok pengukuran arus dan tegangan yang ditempatkan pada titik-titik krusial dalam model. Selanjutnya, hasil simulasi

divalidasi dengan membandingkannya terhadap perhitungan matematis. Proses validasi ini esensial untuk mengonfirmasi bahwa model yang dibangun dapat merepresentasikan kondisi fisik secara akurat.

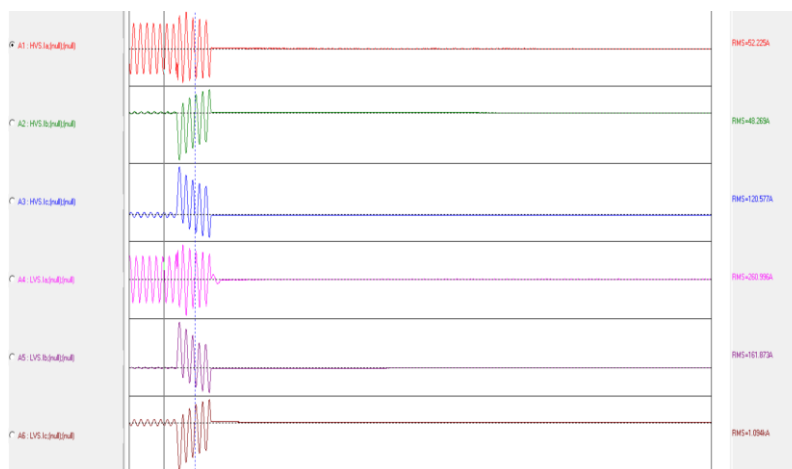
2.3. Data Pendukung Penelitian

Data pendukung utama dalam penelitian ini diperoleh dari Gardu Induk (GI) BSD, meskipun lokasi kerja praktik tidak berada di sana. Data ini mencakup parameter teknis transformator, seperti yang tertera pada **nameplate**, yang digunakan sebagai dasar untuk pemodelan di Software simulasi. Selain itu, digunakan pula data rekaman gangguan aktual yang terjadi di GI BSD yang diperoleh dari perangkat lunak ACOME Agile. Pada Gambar 2 ditunjukkan spesifikasi untuk menyesuaikan pemodelan pada simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini.



Gambar 3 Nameplate transformator yang dimodelkan.

Selanjutnya, mengenai data pendukung lainnya pada proses pemodelan ini yaitu dihadirkan data langsung hasil rekaman pengukuran pada lokasi terkait saat terjadinya gangguan hubung singkat secara nyata. Yaitu mencapai data pada arus primer yaitu 52 Ampere dan pada sekunder 262 Ampere. Data tersebut diperoleh dan terbaca dari perangkat lunak ACOME Agile yang menjadi instrumen untuk merekam anomali grafik saat terjadinya gangguan. Pada Gambar 3 ditunjukkan grafik masing-masing fasa berdasarkan rekaman yang tersedia.

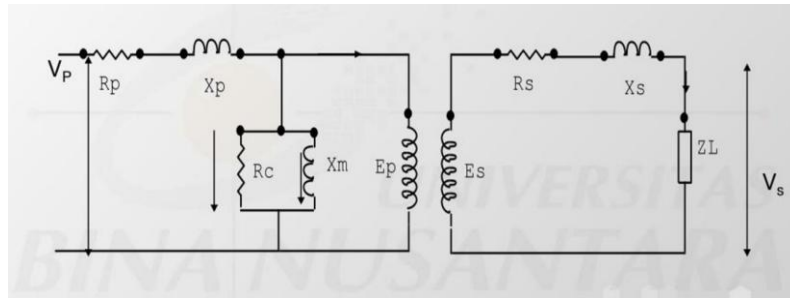


Gambar 4 Data nyata nilai anomali pada *software* ACOME Agile.

3. Hasil dan Pembahasan

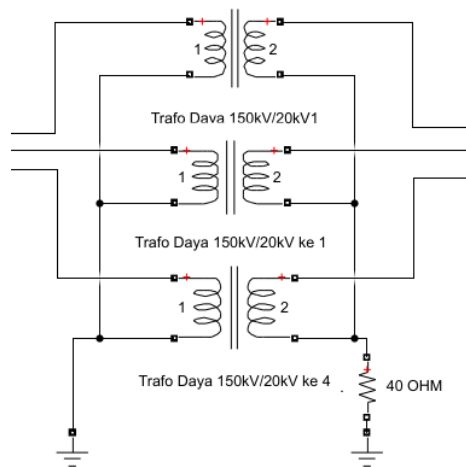
3.1. Pemodelan Transformator

Pemodelan transformator dalam penelitian ini menggunakan rangkaian ekuivalen untuk merepresentasikan karakteristik listrik yang mengalir pada rangkaian. Rangkaian ekuivalen ini ditunjukkan pada **Gambar 4** yang menunjuka Rangkaian ekuivalen transformator ini terdiri dari tegangan masukan V_p , resistansi R_p , reaktansi X_p , resistansi inti R_c , reaktansi magnetisasi X_m , serta tegangan keluaran V_s yang terhubung dengan impedansi beban Z_L .



Gambar 5 Rangkaian ekuivalen transformator.

Berdasarkan angkaan ekuivalen tersebut, peneliti melakukan pemodelan dengan dimulai dari rangkaian transformator terlebih dahulu dengan menggunakan konfigurasi Yn-Yn digambarkan model pada Software simulasi dengan nilai tegangan 150kV/20kV ditunjukkan pada Gambar 5.

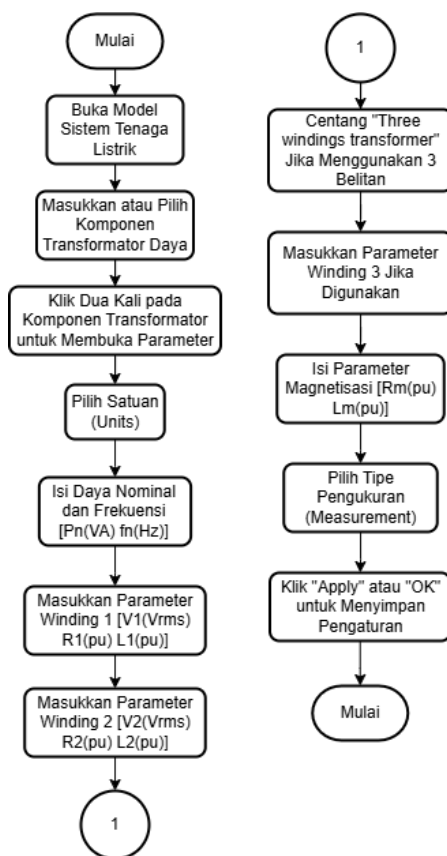


Gambar 6 Rangkaian transformator yang dimodelkan pada software simulasi.

Konfigurasi belitan transformator yang dimodelkan adalah Yn-Yn, yang menghubungkan ketiga fasa dengan titik netral yang diardekan. Pilihan konfigurasi ini didasarkan pada data teknis aktual dari transformator GI BSD 150kV/20kV. Rangkaian ini kemudian dimodelkan secara terperinci dalam lingkungan Software simulasi, seperti yang ditampilkan pada Gambar 5. Pemodelan ini tidak hanya mencakup belitan transformator, tetapi juga blok-blok lain seperti pemutus sirkuit, pengukuran, dan sistem proteksi.

Pengaturan parameter-parameter transformator, seperti daya nominal, resistansi, dan reaktansi, dilakukan dengan cermat untuk memastikan model memiliki validitas yang tinggi. Tahapan pengaturan ini, yang diuraikan secara sistematis dalam diagram alir pada Gambar 6, dimulai dari

input data teknis hingga penetapan nilai-nilai numerik pada blok Software simulasi. Setiap parameter, termasuk rasio belitan dan impedansi, disesuaikan berdasarkan data *nameplate* transformator yang digunakan sebagai referensi. Dengan pendekatan ini, model yang dibangun menjadi representasi digital yang andal dari transformator fisik, memungkinkan analisis dan simulasi yang akurat. Berikut pada Gambar 6 menunjukkan diagram alir proses dalam melakukan setting transformator yang dimodelkan.



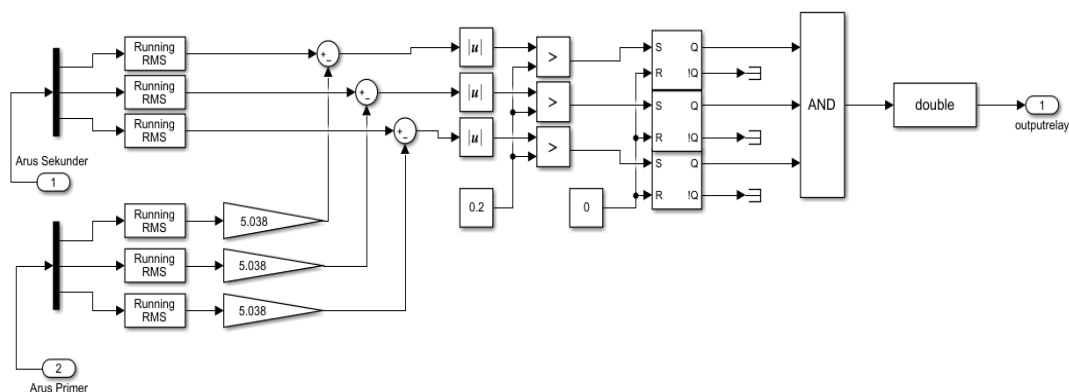
Gambar 7 Diagram alir tahapan *setting* transformator.

3.2. Pemodelan Proteksi

Setelah memodelkan transformator, dilakukan perancangan relai proteksi. Relai proteksi yang digunakan adalah terdiri dari relai differensial dan relai arus lebih. Pemodelan dimulai dengan rangkaian logika yang dirancang secara manual pada *software* Software simulasi.

3.2.1. Pemodelan Relai Differensial

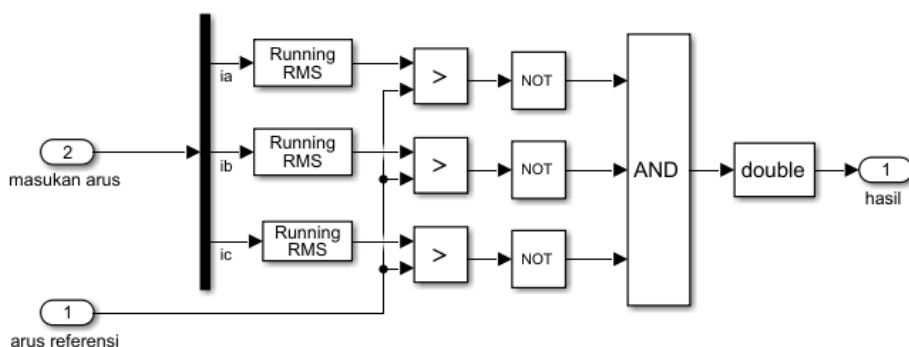
Pemodelan relai diferensial dirancang menggunakan blok-blok digital dan logika di dalam Software simulasi untuk meniru fungsi aslinya. Rangkaian logika ini membandingkan arus primer dan sekunder menggunakan blok Running RMS untuk mendapatkan nilai efektifnya, lalu mencari selisihnya. Jika selisih arus melebihi ambang batas, blok logika akan mengirimkan sinyal trip ke pemutus sirkuit. Rangkaian logika ini, yang bertujuan untuk melakukan pengukuran dan perlindungan, ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 8 Rangkaian logika pada *subsystem* relai *differensial*.

3.2.2. Pemodelan Relai Arus Lebih Relai Arus Lebih (OCR)

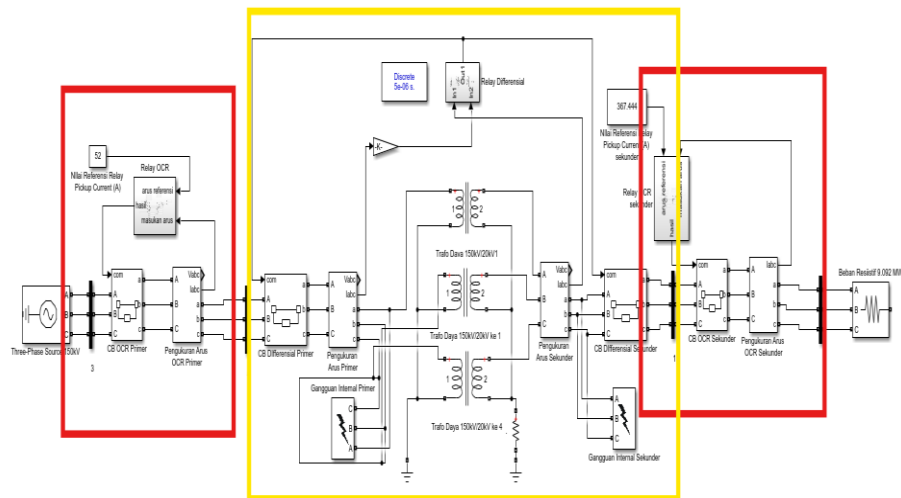
Pemodelan relai jenis ini berfungsi sebagai tambahan relai untuk melakukan pencadangan atau *backup protection* atau Cadangan proteksi untuk melindungi transformator serta melakukan koordinasi proteksi antara relai arus lebih dengan relai *differensial*. Modelnya dirancang untuk mendeteksi arus lebih dengan membandingkan nilai arus efektif dari tiap fasa dengan arus referensi (*pickup current*). Rangkaian logika untuk relai OCR ditunjukkan pada Gambar 8 yang terdiri dari berbagai rangkaian logika yang dirancang untuk membentuk *subsystem* relai arus lebih.



Gambar 9 Rangkaian pemodelan relai arus lebih.

Pada sistem proteksi yang telah dirancang yaitu relai *Overcurrent (OCR)* dan Relai *Differential* untuk melindungi transformator daya. Konsep utamanya adalah membagi area tanggung jawab proteksi Relai *Differential* digunakan sebagai proteksi utama pada daerah internal transformator, sedangkan Relai *OCR* berfungsi sebagai proteksi *backup* di sisi primer dan sekunder. Koordinasi antara kedua relai ini penting agar saat terjadi gangguan internal, hanya relai *differensial* yang bekerja sehingga gangguan dapat segera diisolasi tanpa memengaruhi bagian sistem lainnya. Sebaliknya, ketika gangguan terjadi di luar daerah proteksi *differensial*, *OCR* akan berperan sebagai proteksi *backup* untuk memutuskan arus gangguan dengan waktu tunda yang telah disesuaikan. Pada Gambar 9 ditunjukan rangkaian lengkapnya untuk memetakan rangkaian secara umum dan menyeluruh terdapat beberapa petunjuk warna diantaranya yang ditunjukan bahwa yang di tandai dengan kotak berwarna merah merupakan daerah kerja dari relai *backup* yang merupakan tugas dari *OCR* primer dan sekunder, sedangkan penanda berwarna

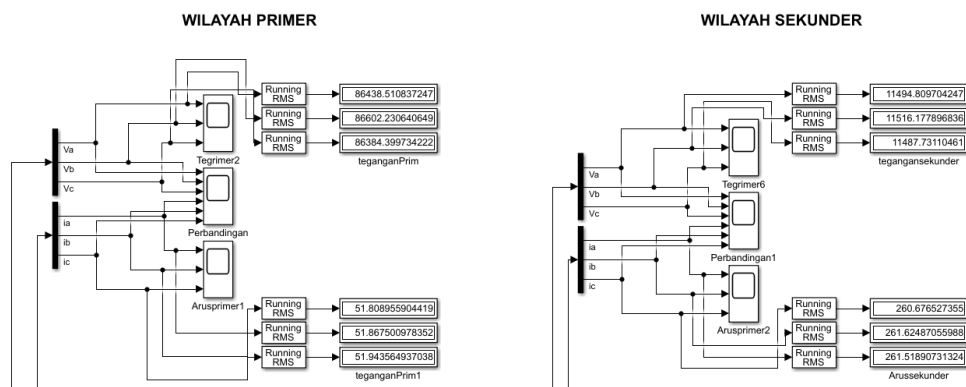
kuning merupakan daerah kerja dari *main protection* atau daerah inti yang dilindungi dengan proteksi relai *difference*.



Gambar 10 Pembagian wilayah masing-masing relai.

3.3. Simulasi dan Validasi

Untuk menguji performa model, dilakukan pengujian aliran daya dan hubung singkat. Wilayah pengujian pada sistem, yang menampilkan pengukuran arus dan tegangan, ditunjukkan pada Gambar 10. Pada Gambar 10 ini ditunjukkan pada sisi primer yang merupakan pada sisi sebelum masuk ke dalam transformator dan langsung dari sumber generator terdapat pengukuran masing-masing fasa serta hal serupa pada wilayah sekundernya.



Gambar 11 Tampilan wilayah primer dan sekunder dalam menampilkan hasil pengukuran arus dan tegangan.

Untuk memastikan akurasi dan keandalan model sistem tenaga listrik yang telah dibangun, langkah validasi merupakan tahapan krusial dalam analisis. Validasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran yang diperoleh dari simulasi terhadap perhitungan matematis berdasarkan prinsip-prinsip dasar kelistrikan. Perhitungan ini secara khusus mencakup tegangan dan arus yang terukur pada setiap fasa untuk mengonfirmasi bahwa nilai-nilai tersebut sesuai dengan kondisi teoretis. Untuk memvalidasi nilai tegangan fasa-ke-netral, digunakan persamaan yang mendefinisikan hubungan antara tegangan fasa-ke-fasa dengan tegangan fasa-ke-netral dalam sistem tiga fasa. Perhitungan ini esensial karena pengukuran simulasi umumnya

menampilkan nilai fasa-ke-netral, yang harus dikonfirmasi dengan data nominal fasa-ke-fasa, untuk melakukan perhitungan tegangan pada masing-masing fasanya digunakan Persamaan 1.

$$V_{line - netral} = \frac{V_{lineline}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

Tegangan fasa-ke-fasa yaitu $V_{lineline}$ didefinisikan sebagai selisih potensial antara dua fasa, misalnya antara fasa R dan S, S dan T, atau T dan R. Sementara itu, tegangan fasa-ke-netral yaitu $V_{line - netral}$ merupakan selisih potensial antara satu fasa dengan titik netralnya. Keterkaitan antara kedua jenis tegangan ini esensial untuk perhitungan dalam sistem kelistrikan. Selanjutnya, untuk memvalidasi nilai arus yang terukur, dilakukan perhitungan berdasarkan daya semu nominal sistem dan tegangan fasa-ke-fasa. Perhitungan ini menjadi acuan untuk memverifikasi apakah arus yang mengalir dalam simulasi berada pada kisaran nilai nominal yang diharapkan, maka untuk mengetahui nilai arusnya digunakan Persamaan 2.

$$I = \frac{S}{V_{lineline} \times \sqrt{3}} \quad (2)$$

Untuk menentukan nilai arus penghantar (I) dalam sistem tiga fasa, digunakan persamaan yang menghubungkan daya semu dan tegangan. Daya semu (S) mengacu pada daya nominal sistem, sedangkan tegangan fasa-ke-fasa ($V_{lineline}$) adalah tegangan terukur antara dua konduktor fasa. Perhitungan ini sangat penting untuk mengetahui besar arus yang mengalir pada saluran. Perlu dicatat bahwa dalam konfigurasi Wye (bintang), arus penghantar ($line$) memiliki nilai yang sama dengan arus fasa.

Untuk memvalidasi tingkat akurasi model simulasi, data yang diperoleh dari hasil pengukuran di Software simulasi dibandingkan secara sistematis dengan nilai-nilai yang dihitung menggunakan persamaan matematis yang telah diuraikan sebelumnya. Perbandingan ini dilakukan terhadap parameter-parameter kritis seperti tegangan dan arus yang terukur pada masing-masing fasa. Selisih antara nilai hasil perhitungan teoretis dan nilai hasil pengukuran simulasi kemudian dihitung untuk mendapatkan nilai error. Hasil perbandingan yang komprehensif, termasuk nilai-nilai yang dihitung dan diukur serta persentase error-nya, disajikan secara rinci pada Tabel 1. proteksi.

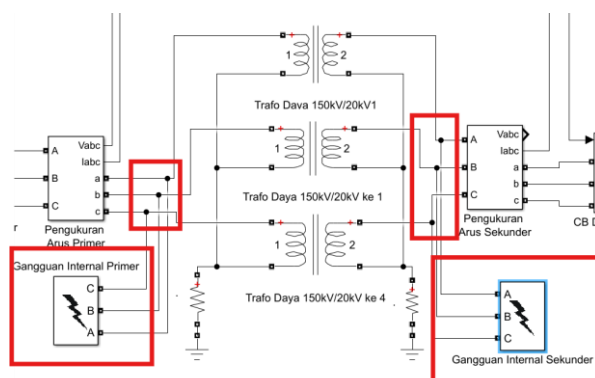
Tabel 1 Tabel perbandingan hasil perhitungan matematis dan simulasi.

Tegangan Primer				
Variabel	Matematis (kV)	Simulasi (kV)	Nilai Error (kV)	Persentase Error (%)
Fasa A	86,6	86,44	0,162	0,19%
Fasa B	86,6	86,60	0,002	0,00%
Fasa C	86,6	86,83	0,234	0,27%
Rata-rata Error				0,15%
Tegangan Sekunder				
Variabel	Matematis (kV)	Simulasi (kV)	Nilai Error (kV)	Persentase Error (%)
Fasa A	11,547	11,49	0,053	0,46%
Fasa B	11,547	11,52	0,031	0,27%
Fasa C	11,547	11,49	0,06	0,52%
Rata-rata Error				0,42%

Arus Primer				
Variabel	Matematis (kV)	Simulasi (kV)	Nilai Error (kV)	Persentase Error (%)
Fasa A	51,87	51,8	0,070	0,13%
Fasa B	51,87	51,86	0,01	0,02%
Fasa C	51,87	51,94	0,07	0,13%
Rata-rata Error				0,10%
Arus Sekunder				
Variabel	Matematis (kV)	Simulasi (kV)	Nilai Error (kV)	Persentase Error (%)
Fasa A	261,15	261,68	0,530	0,20%
Fasa B	261,15	261,62	0,47	0,18%
Fasa C	261,15	261,15	0	0,00%
Rata-rata Error				0,13%
Rata-rata Total Error				0,20%

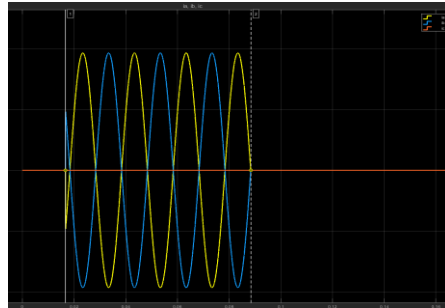
Berdasarkan Tabel 1 terlihat bahwa seluruh variabel memiliki persentase *error* yang relatif kecil dengan rata-rata total *error* sebesar 0,20%. Nilai *error* yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa pemodelan memiliki tingkat ketepatan yang baik, karena hasil simulasi sangat mendekati hasil perhitungan matematis. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa model simulasi yang digunakan cukup valid dan dapat diandalkan untuk merepresentasikan kondisi sistem secara akurat.

Selanjutnya, dilakukan pengujian hubung singkat. Rangkaian yang disambungkan dengan blok gangguan, gangguan yang disediakan ini merupakan salah satu fitur yang tersedia di Software simulasi untuk melakukan pengujian secara simulasi dalam kasus *fault* atau kegagalan dalam bentuk hubung singkat antar masing-masing fasa. Pada Gambar 11 ditunjukkan rangkaian yang diberikan *fault* pada masing-masing wilayah baik primer maupun sekunder.



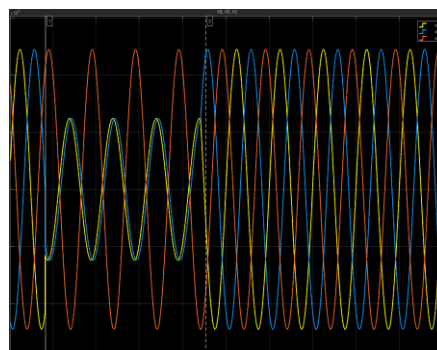
Gambar 12 Rangkaian yang disambungkan dengan blok gangguan pada bagian primer dan sekunder.

Percobaan hubung singkat ini, digunakan satu kasus sebagai sampel yaitu terjadinya *fault* berupa hubung singkat yang terjadi antara fasa A dan B yang kemudian disimulasikan dan diamati untuk hasil dari simulasinya melalui grafik sinusoid dari setiap respon fasa. Hasil simulasi hubung singkat menunjukkan bahwa ketika terjadi gangguan, arus pada fasa yang terpengaruh yaitu fasa A dan B meningkat tajam, sementara tegangan menurun. Fenomena ini konsisten dengan prinsip dasar kelistrikan. Gelombang hasil simulasi arus dan tegangan pada sisi primer ditunjukkan pada Gambar 12 yang menunjukkan fasa A (kuning) dan fasa B (biru) mengalami peningkatan tajam pada arus, sedangkan fasa C (jingga) tidak naik karena tidak mengalami *fault*.



Gambar 13 Gelombang hasil simulasi arus pada *short-circuit* gangguan

Sedangkan peristiwa sebaliknya terjadi yaitu pada pengamatan tegangan ketika tepat mengalami hubung singkat diantara fasa A dan fasa B maka tegangan mengalami penurunan nilai yang signifikan sehingga sesuai dengan hukum ohm yang menunjukkan bahwa tegangan dan arus saling berkebalikan. Pada Gambar 13 ini merupakan hasil dari fenomena hubung singkat fasa A dan fasa B dalam tinjauan tegangan.



Gambar 14 Gelombang hasil simulasi tegangan pada *short-circuit*.

Hasil pengujian berbagai variabel gangguan, baik di sisi primer maupun sekunder, disajikan dalam Tabel 2 dan Tabel 3. Data ini menunjukkan bahwa semakin kompleks jenis gangguan, semakin besar kenaikan arus dan semakin signifikan penurunan tegangan. Namun, terdapat anomali di beberapa kasus di mana tegangan pada fasa yang tidak terganggu justru mengalami kenaikan. Fenomena ini diduga disebabkan oleh ketidakseimbangan sistem, efek transien, atau keterbatasan model simulasi. Pada Tabel 2 dan Tabel 3 yang ditunjukkan terdapat warna kuning yang bermakna terjadi kenaikan nilai yang signifikan dan jingga mengalami nilai penurunan yang terukur. Pada Tabel 2 disajikan data para bagian wilayah kerja primer.

Tabel 2 Data arus dan tegangan pada gangguan *short-circuit* sisi primer.

Gangguan	PRIMER					
	Arus (A)			Tegangan (V)		
	Phasa A	Phasa B	Phasa C	Phasa A	Phasa B	Phasa C
AB	3063904,200	3063907,200	51,500	81891,100	82007,090	86602,320
AC	3164907,600	51,998	3164904,920	81857,790	86602,320	81397,980
AG	1875020,710	51,490	51,740	81955,450	86602,330	86602,330
BC	51,997	3051309,170	3051312,420	86601,680	81831,960	82046,410
BG	51,800	1849398,170	51,480	86601,680	82085,770	86602,330

Gangguan	PRIMER					
	Arus (A)			Tegangan (V)		
	Phasa A	Phasa B	Phasa C	Phasa A	Phasa B	Phasa C
CG	51,490	51,740	1823364,130	86601,860	86602,330	82215,370
ABC	3502844,480	3554783,430	3480955,680	80254,711	80385,460	80546,650
ABG	3140011,936	3122666,951	51,364	80957,691	81107,704	86602,336
ACG	3203193,030	51,361	3260434,927	80937,849	86602,336	80427,777
BCG	51,425	3122273,953	3104804,536	86601,686	81074,485	81223,573
ABCG	3502844,489	35547834,338	3480955,686	80254,712	80385,462	80546,650

Sedangkan pada bagian sekundernya terjadi secara normal naik dan turunnya tegangan maupun arus. Namun terjadi anomali pada kasus yang pada idealnya terjadi nilai yg tetap tanpa terpengaruh oleh gangguan namun terjadi penurunan dan peningkatan nilai pada lokasi yang tidak ideal. Data pengukuran pada wilayah sekunder di tunjukan Tabel 3.

Tabel 3 Data arus dan tegangan pada gangguan *short-circuit* sisi sekunder.

Gangguan	SEKUNDER					
	Arus (A)			Tegangan (V)		
	Phasa A	Phasa B	Phasa C	Phasa A	Phasa B	Phasa C
AB	36529,704	36469,380	261,844	10901,060	10883,300	11521,900
AC	34583,820	261,844	34645,380	10956,706	11521,890	10924,120
AG	318,230	261,810	261,840	10660,420	13026,370	13114,230
BC	261,843	36382,755	36322,694	11521,813	10906,462	10888,631
BG	261,847	316,843	261,816	13032,586	10684,892	13028,796
CG	261,816	261,848	315,436	12946,835	13034,887	10709,110
ABC	40984,671	42769,777	41099,785	10686,172	10676,005	10702,025
ABG	36545,977	36453,175	261,832	10660,403	10651,391	12576,834
ACG	34567,269	261,833	34661,991	10751,063	12470,360	10709,094
BCG	261,831	36306,551	36306,551	12496,276	10684,879	10675,683
ABCG	40986,535	42767,999	41099,785	10660,416	10651,415	10826,514

Berdasarkan pengamatan yang dilakukan terdapat tiga penyebab anomali yaitu karena ketidakseimbangan sistem tiga fasa dan redistribusi tegangan yakni dalam sistem tenaga listrik tiga fasa, ketidakseimbangan beban atau impedansi antar fasa dapat menyebabkan distribusi tegangan yang tidak merata. Ketika terjadi gangguan pada salah satu fasa, tegangan pada fasa tersebut cenderung menurun, sementara tegangan pada fasa lainnya dapat meningkat sebagai akibat dari redistribusi tegangan dalam sistem [11]. Efek *transient* pada Tegangan Selama Gangguan: Selama periode transien setelah terjadinya gangguan, tegangan dalam sistem dapat mengalami fluktuasi sebelum mencapai kondisi stabil. Fluktuasi ini dapat menyebabkan peningkatan tegangan sementara pada fasa tertentu [5]. keterbatasan model simulasi dalam mewakili kondisi nyata yaitu model-model simulasi transformator dalam perangkat lunak seperti Software simulasi sering kali menggunakan asumsi dan simplifikasi yang dapat menyebabkan

hasil simulasi berbeda dari kondisi nyata. Keterbatasan ini mencakup representasi impedansi saluran, efek kapasitif, dan karakteristik beban [10]

4. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh rangkaian kegiatan dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pemodelan transformator dengan konfigurasi Yn-Yn dan sistem proteksinya menggunakan relai diferensial serta relai arus lebih telah berhasil dilakukan secara akurat. Model yang dibuat mampu merepresentasikan kondisi transformator GI BSD dan memberikan respons proteksi yang tepat terhadap berbagai jenis gangguan hubung singkat. Hasil validasi dengan perbandingan perhitungan matematis menghasilkan nilai *error* maksimal 0,20%, membuktikan bahwa model yang dibangun memiliki tingkat keandalan yang baik. Namun, ada beberapa anomali yang ditemukan dalam data simulasi, yang menunjukkan adanya ruang untuk pengembangan model lebih lanjut. Oleh karena itu, disarankan untuk penelitian selanjutnya dapat menyempurnakan model simulasi agar dapat mereplikasi kondisi nyata dengan lebih presisi, serta menggabungkan pengalaman lapangan yang lebih intensif untuk pemahaman yang lebih komprehensif.

Ucapan Terimakasih

Penulis berterima kasih kepada pihak yang telah turut berpartisipasi dalam penelitian ini baik penyedia fasilitas penelitian maupun narasumber serta teman-teman yang telah turut serta mengsucceskan penelitian ini.

Referensi

- [1] S. Suripto, Buku Ajar Sistem Tenaga Listrik, Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- [2] IEEE Standards Association, "IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers, IEEE Std C37.91-2021," IEEE Standards Association, 2021. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/C37.91/5904/>. [Accessed 12 5 2025].
- [3] A. S. Sampeallo, Nursalim and P. J. Fischer, "Analisis Gangguan Hubung Singkat Pada Jaringan Pemakaian Sendiri PLTU Bolok PT. SMSE (IPP) Unit 3 dan 4 Menggunakan Software ETAP 12.6.0," *Jurnal Media Elektro*, vol. 3, no. 1, pp. 76-85, 2021.
- [4] M. S. Sodiq, M. S. and S. Hani, "Analisis Sistem Proteksi Transformator Daya (3×60 MVA) di Gardu Induk 150 KV Bantul Terhadap Gangguan Arus Lebih," *Jurnal Elektrikal*, vol. 5, no. 2, pp. 62-71, 2018.
- [5] Y. Liu, Q. Gao, J. Zhou, S. Qin and L. Wang, "Transient overvoltage response performance of transformer windings with short-circuit fault," : *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, pp. 1-8, 2017.
- [6] D. R. Syahputra, Proteksi Sistem Tenaga Listrik, Yogyakarta: Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2022.
- [7] A. Yolanda, C. N. Anshar and Y. Ridal, "Analisis Sistem Proteksi Generator Menggunakan Over Current Relay Di PLTA Singkarak," *Jurnal Mesil (Mesin Elektro Sipil)*, vol. 6, no. 1, pp. 78-89, 2025.
- [8] M. Samami, H. Yaghobi and M. N. Azari, "Modelling and Simulation of a Transformer With Inter-turn Fault Considering Magnetic Saturation," *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 13, no. 2, p. 172–180, 2017.
- [9] R. A. Efriansah, "Mengenal Sistem Proteksi Generator," Kelas Teknisi, 19 Agustus 2023. [Online]. Available: <https://www.kelasteknisi.com/2022/07/proteksi-generator-yuk-cari-tahu-disini.html>. [Accessed 5 Juni 2025].

- [10] S. Lakshminarayana, "Model of the Three Phase Unbalanced System," in *Chapter 5: ABC Reference Frame Controller*, Cookeville, USA, Center for Energy Systems Research, Tennessee Technological University, 2018, pp. 1-12.
- [11] ALL-TEST Pro Technical Team, "The Impact of Voltage Unbalance," ALL-TEST Pro, 2021. [Online]. Available: <https://alltestpro.com/effects-of-voltage-unbalance/>. [Accessed 2 5 2025].