

Evaluasi Proteksi Sistem Kelistrikan Pembangkit Jenis Gas Turbine Generator 3X18 pada PT Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri)

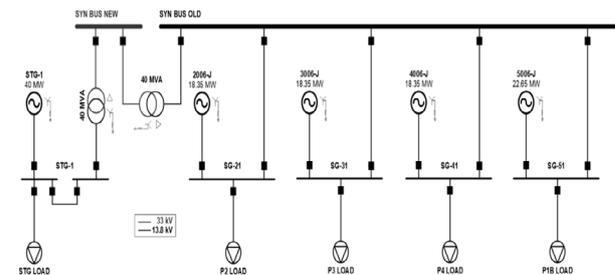
Chandra Agung Ramadhan, Margo Pujiantara, dan Ardyono Priyadi
 Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: margo@ee.its.ac.id

Abstrak—Salah satu perusahaan pengolahan pupuk di Indonesia yaitu PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang mengalami permasalahan sistem kelistrikan pada salah satu pabriknya. Permasalahan tersebut disebabkan oleh adanya hubung singkat pada salah satu bus di pabrik Pusri 4 dan disinyalir adanya miskoordinasi antar rele pengaman. Miskoordinasi rele pengaman menyebabkan circuit breaker pada generator open karena adanya arus hubung singkat kiriman. Saat circuit breaker generator open, maka terjadi ayunan daya pada pembebanan. Disinyalir generator hanya diatur default dan tidak dipersiapkan untuk mengatasi gangguan tersebut. Dari permasalahan tersebut menyebabkan adanya gangguan secara kompleks hingga menyebabkan blackout pada pabrik lama Pusri. Karena generator hanya diatur default, maka ketika ada kasus blackout, generator akan off secara tiba-tiba. Generator yang sering off secara tiba-tiba karena adanya gangguan dapat menyebabkan berkurangnya kapabilitas generator dalam membangkitkan daya serta berdampak pada lifetime dari generator tersebut. Blackout ini menyebabkan kerugian yang sangat besar untuk PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang, oleh karena itu perlu dilakukan evaluasi terhadap sistem proteksi internal generator. Tugas akhir ini berfokus pada beberapa rele internal generator sebagai sistem proteksinya. Rele tersebut antara lain adalah rele sinkronisasi, rele hilang eksitasi, rele arus lebih urutan negatif, rele arus lebih dengan kendali tegangan, rele frekuensi, dan rele diferensial. Studi evaluasi ini dilakukan dengan menggunakan software ETAP 12.6 agar mendapatkan hasil simulasi yang sesuai dengan kejadian di lapangan. Hasil dari Tugas Akhir ini dapat menjadi rekomendasi untuk PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang serta berbagai instansi guna melindungi generator ketika terjadi gangguan serupa.

Kata Kunci—Miskoordinasi, Blackout, Sistem Proteksi Internal Generator, ETAP 12.6.

I. PENDAHULUAN

GENERATOR merupakan sebuah peralatan listrik yang menyuplai daya ke beban pada sistem tenaga listrik. Kontinuitas pada generator sangat dibutuhkan agar produktivitas pada suatu perusahaan tidak mengalami penurunan akibat adanya gangguan pada sistem tenaga listrik. Gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan kejadian yang menyebabkan perubahan sistem kelistrikan dari keadaan normal menjadi keadaan abnormal hingga mengakibatkan kondisi darurat. Dalam hal ini sistem proteksi memiliki peran penting dalam melindungi serta mengamankan peralatan listrik apabila terindikasi adanya gangguan pada sistem kelistrikan. Mengingat sistem kelistrikan sangat kompleks, maka diperlukan koordinasi proteksi agar skema perlindungan pada peralatan berjalan sesuai dengan yang telah direncanakan. Namun, apabila



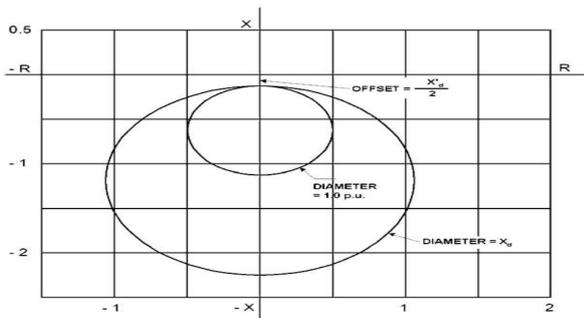
Gambar 1. Sistem Kelistrikan PT. Pusri.

Tabel 1.
Spesifikasi Generator

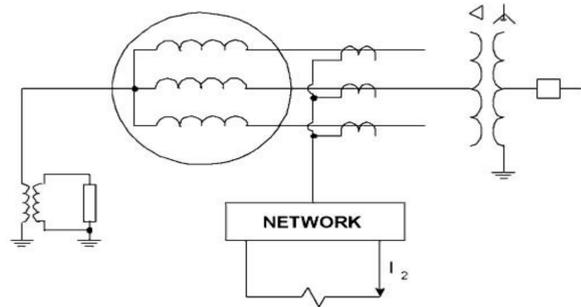
| Spesifikasi | GTG 2 | GTG 3 | GTG 4 |
|--|--------|--------|--------|
| Rated Capacity (MVA) | 21.59 | 21.59 | 21.59 |
| Rated Power (MW) | 18.35 | 18.35 | 18.35 |
| Power Factor | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Rated Voltage (kV) | 13.8 | 13.8 | 13.8 |
| Rated Amps (A) | 903.18 | 903.18 | 903.18 |
| Frequency (Hz) | 50.0 | 50.0 | 50.0 |
| Speed (RPM) | 3000.0 | 3000.0 | 3000.0 |
| Avail. Power (MW) | 10.0 | 12.0 | 12.0 |
| Direct Axis Reactance Synchronous (Xd) | 1.52 | 1.52 | 1.52 |
| Direct Axis Reactance Transient (X'd) | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| Direct Axis Reactance Sub Transient (X''d) | 0.09 | 0.09 | 0.09 |
| Quadrature Axis Reactance Synchronous (Xq) | - | - | - |
| Quadrature Axis Reactance Transient (X'q) | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| Quadrature Axis Reactance Sub Transient (X''q) | 0.09 | 0.09 | 0.09 |
| Direct Axis OC Time | 10.10 | 10.10 | 10.10 |
| Constant Transient (T'do) | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Direct Axis OCt Time | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Constant Sub-Transient (T''do) | 0.06 | 0.06 | 0.06 |

sistem koordinasi proteksi tersebut tidak bekerja sebagaimana mestinya akan menimbulkan kerusakan pada sistem kelistrikan dalam hal ini adalah generator.

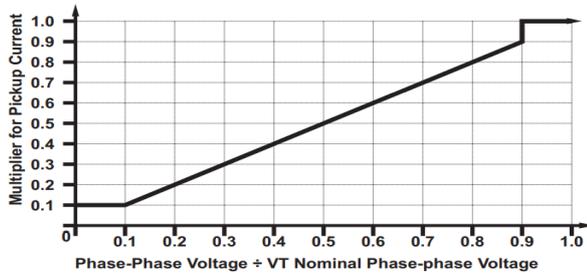
Salah satu perusahaan yang bergerak dalam bidang produksi pupuk urea di Indonesia yaitu PT Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) memiliki sistem kelistrikan yang kompleks. Jenis pembangkit pada PT Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) adalah gas turbine generator. Pada generator ini terdapat beberapa rele proteksi khusus internal yang berfungsi sebagai pengaman apabila terjadi gangguan dari sisi internal ataupun eksternal generator. Namun, seiring dengan adanya penambahan dan perubahan pada pada sistem



Gambar 5. Kurva operasi Loss of Field mengacu pada IEEE Std C37.102.2006.



Gambar 6. Skema rele arus lebih urutan negatif.

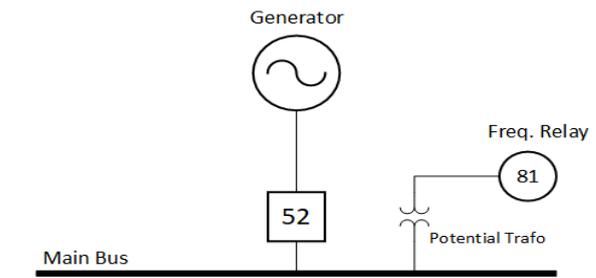


Gambar 7. Karakteristik rele arus lebih dengan penahan tegangan.

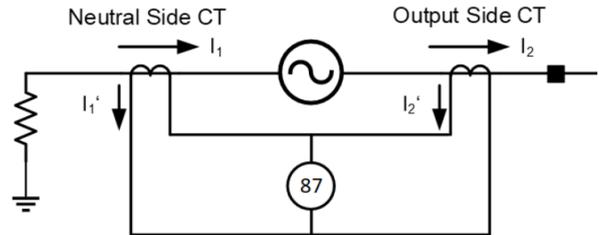
kelistrikan, rele proteksi tersebut perlu untuk dievaluasi ulang agar keandalan dan selektivitas kinerja rele dapat mengikuti perubahan pada sistem kelistrikan tersebut.

Pada kenyataan di lapangan terdapat banyak miskordinasi kinerja rele proteksi pada sistem kelistrikan yang berdampak pada kinerja generator. Miskordinasi rele tersebut disebabkan karena adanya gabungan hubung singkat pada pabrik tersebut. Penyebab gangguan tersebut yaitu adanya hubung singkat pada bus DS 4101 Pusri 4, kejadian ini menyebabkan pemutus pada bus sinkronisasi yang menghubungkan antara pembangkit STG dan GTG off, sehingga pembangkit yang saat itu beroperasi mengalami power swing dan trip. Berdasarkan kejadian tersebut dilakukan evaluasi dan resetting terhadap keseluruhan system agar mendapat setting rele yang tepat dan selektif. Tujuan dilakukan evaluasi dan resetting ini adalah untuk menghindari kegagalan yang akan terjadi, sehingga kontinuitas dari kinerja generator tetap terjaga.

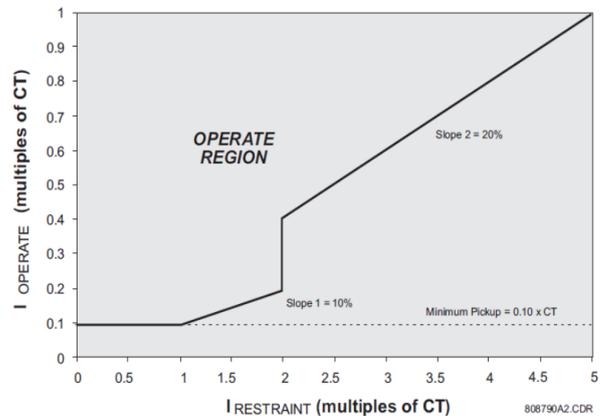
Oleh karena itu, tugas akhir ini memiliki fokus terhadap evaluasi proteksi internal gas turbine generator 3x18 MW pada PT Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri). Evaluasi ini mencakup pembahasan rele internal generator pada keadaan existing dan dilakukan setting ulang terhadap rele proteksi tersebut. Namun apabila hasil evaluasi setting dari kondisi existing dikatakan masih layak maka tidak dilakukan resetting. Hasil dari studi tersebut akan digunakan sebagai solusi untuk menentukan setting yang tepat, sehingga apabila terjadi gangguan pada generator maka peralatan listrik pada



Gambar 2. Skema Rele Frekuensi.



Gambar 3. Skema Differential Protection Generator.



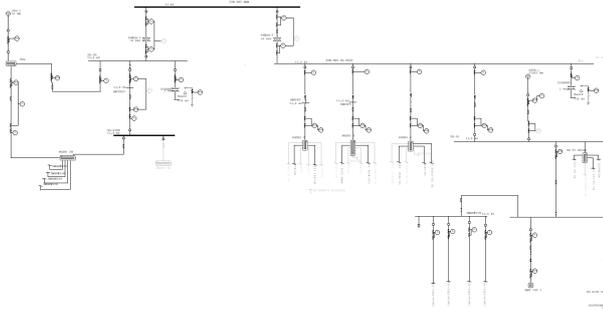
Gambar 4. Tripping Region Differential Relay GE 489.

internal generator dapat terlindungi dan kinerja generator tetap terjaga

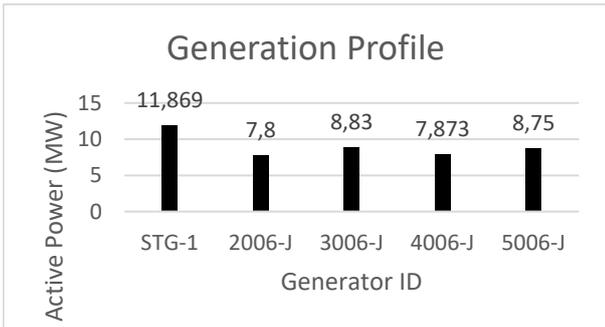
II. TEORI PENUNJANG

A. Kajian Penelitian Terdahulu

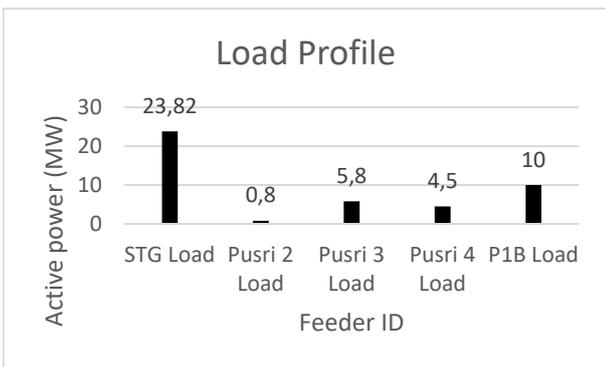
Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan setting generator berdasarkan gangguan kapasitas dari generator. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Ahmed Alhassan, et.al 2017 [1] penelitian ini bertujuan untuk menemukan setting yang paling efisien pada generator ketika terjadi adanya gangguan. Banyak hal yang harus dipertimbangkan seperti faktor ekonomi untuk operasional generator, umur dari generator serta ketahanan generator. Penelitian ini dilakukan setelah adanya kondisi tidak normal saat operasi, sehingga dilakukan sistem proteksi secara otomatis dengan fokus beberapa rele diantaranya over/under frequency relay, Loss of Excitation relay, dan Differential relay. Penelitian ini sama seperti penelitian M. Z. Jelvian, et.al, 2020 [2] penelitian ini berfokus pada gangguan yang terjadi pada pembangkit Asaluyeh, Iran. Terjadi gangguan pada grid karena adanya tegangan yang tidak normal ketika transformer melakukan starting atau energized. Dari kejadian itu sehingga perlu dilakukan evaluasi terhadap kinerja pengaman pada pembangkit untuk mengamankan ketika terjadi gangguan. Penelitian ini menggunakan software simulasi DigSILENT



Gambar 10. Pemodelan sistem kelistrikan menggunakan software ETAP.



Gambar 11. Data Pembangkitan PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang.



dan Matlab. Penelitian ini menyarankan untuk menetapkan bahwa tegangan minimum untuk eksitasi adalah 9V. Pada penelitian A. Hasani, F, et.all 2019[3] dilakukan pemodelan generator dan pola sistem eksitasinya untuk studi fenomena penghilang penguatan (Loss of Field). Pemodelan ini mengikuti standar dari IEEE standar C37.102-2006. Pada penelitian tersebut digunakan sistem menggunakan tipikal dan realistis sistem eksitasi dengan menggunakan PD generator untuk mendapatkan fenomena penghilang penguatan. Hasil dari simulasi tersebut adalah memastikan bahwa dinamika generator berbeda selama berbagai kegagalan tersebut dan harus dipertimbangkan untuk mengembangkan skema perlindungan LOF baru

B. Identifikasi Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan merupakan suatu anomali atau ketidak normalan dalam sistem tenaga listrik yang dapat mengakibatkan arus tidak seimbang pada sistem kelistrikan. Adapun dilakukan analisis gangguan adalah bertujuan untuk memastikan keadaan rele proteksi masih bagus, mengetahui kapasitas maksimum dari pemutus tenaga, dan untuk mengetahui distribusi arus gangguan saat terjadi hubung singkat. Arus hubung singkat adalah arus berlebih yang terjadi saat adanya gangguan pada suatu sistem kelistrikan.

Tabel 2.
Kontribusi Arus Hubung Singkat Tiga Fasa pada GTG

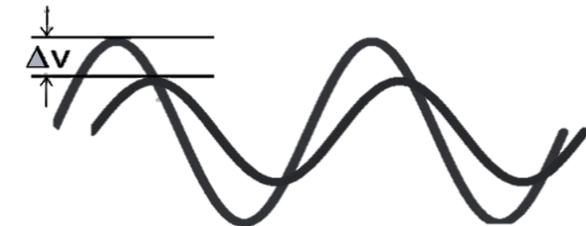
| Lokasi Bus | Jenis Gangguan | Isc Tiga Fasa Generator (kA) | | | | |
|------------|----------------|------------------------------|------------|------------|-------|------|
| | | Insiden | | | Max | Min |
| | | GTG P2 Off | GTG P3 Off | GTG P4 Off | | |
| SG-21 | 3 fasa | 10.01 | 1.35 | 1.37 | 10.01 | 1.17 |
| SG-31 | | 1.52 | 9.97 | 1.39 | 9.97 | 1.18 |
| SG-41 | | 1.53 | 1.38 | 10 | 10 | 1.18 |

Tabel 3.
Kontribusi Arus Hubung Singkat Tiga Fasa pada GTG

| Lokasi Bus | Jenis Gangguan | Isc Dua Fasa Generator (kA) | | | |
|------------|----------------|-----------------------------|-------|----------------|-------|
| | | GTG P2 | | GTG P3 | |
| | | Magnitude (kA) | Sudut | Magnitude (kA) | Sudut |
| SG-21 | 2 fasa | 0.548 | -87.3 | 0.668 | -86.5 |
| SG-31 | | 7.51 | 179.9 | 7.5 | 179.6 |
| SG-41 | | 7.5 | 4.1 | 7.49 | 4.8 |



Gambar 8. Visualisasi Perbedaan Sudut.



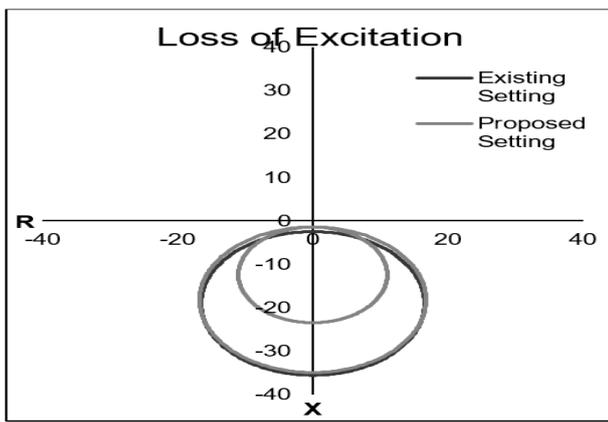
Gambar 9. Visualisasi Perbedaan Tegangan.

Dilakukan studi hubung singkat untuk mengetahui parameter dari setiap perangkat yang ada pada sistem distribusi listrik baik itu pemutus, busbar, dan beberapa peralatan kelistrikan lainnya. Gangguan hubung singkat dapat menyebabkan kerusakan parah jika tidak segera dihentikan [4]

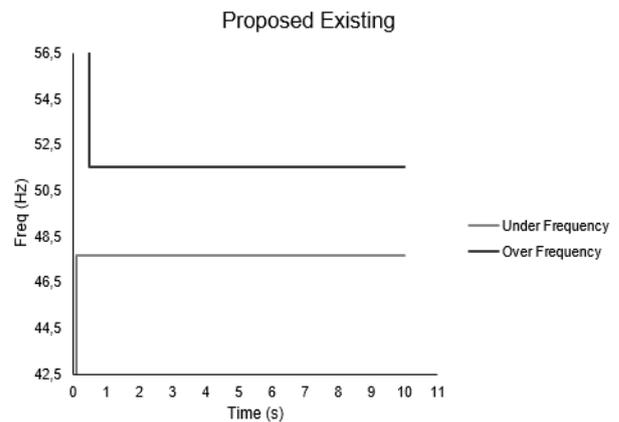
Menurut data yang telah dilaporkan oleh PT Pupuk Sriwidjaja Palembang terjadi beberapa gangguan antara lain gangguan hubung singkat pada DS 4101 yang menyebabkan GTG mengalami power swing, lalu gangguan pada terminal kabel DS 13,8kV TR 38 yang menuju ke TR AOP hal ini mengakibatkan GTG lepas karena over current eksport. Sehingga perlu dievaluasi terkait gangguan yang terjadi dan dilakukan resetting guna memastikan generator dapat beroperasi normal dan dapat mengantisipasi ketika terjadi gangguan. Gangguan hubung singkat ini sifatnya tidak bisa diperkirakan kapan terjadinya, hanya bisa mengantisipasi ketika disinyalir terjadi gangguan hubung singkat.

C. Analisis Hubung Singkat

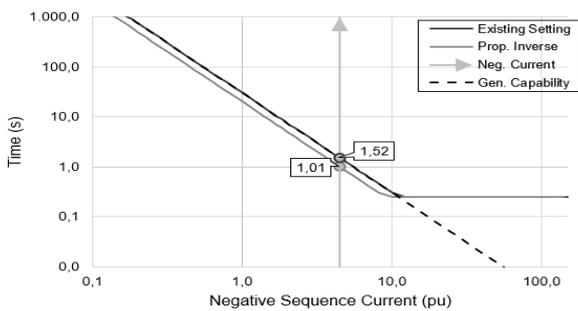
Analisis hubung singkat sangat penting untuk menentukan setting koordinasi proteksi dalam suatu sistem kelistrikan. Hal ini bertujuan agar mendapat nilai parameter yang terapan dan dapat dijadikan acuan dalam penelitian tugas akhir ini. Adapun jenis hubung singkat antara lain adalah hubung



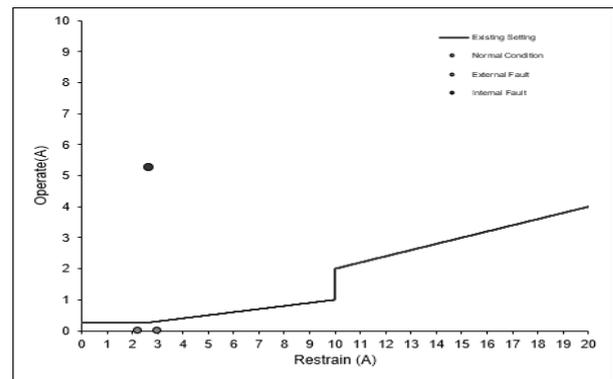
Gambar 15. Visualisasi perbandingan Eksisting dan Evaluasi pada rele 40.



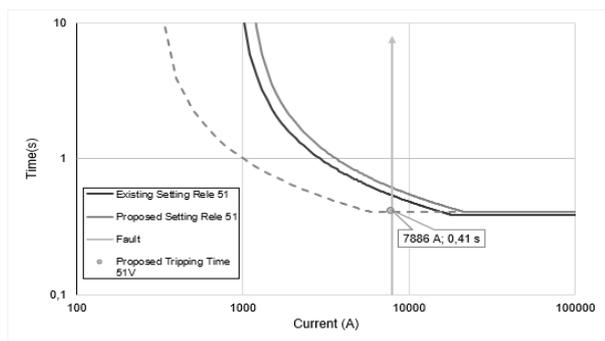
Gambar 13. Visualisasi frekuensi kerja pada generator.



Gambar 16. Setting Rekomendasi Rele 46.



Gambar 14. Visualisasi Tripping Relay Differential.



Gambar 17. Visualisasi rele 51 dan 51V pada R GTG P4.

singkat tiga fasa (L-L-L), hubung singkat antar fasa (L-L), hubung singkat fasa ke tanah (L-G). Berikut adalah persamaan untuk menentukan besaran hubung singkat. Hubung singkat simetri tiga fasa

$$I_{sc_{3ph}} = \frac{V_{LN}}{Z_1 + Z_f} \quad (1)$$

Hubung singkat antar fasa,

$$I_{sc_{2ph}} = \frac{V_{L-L}}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2)$$

Hubung singkat L-G, menurut T. Samin, 2019 [5] hubung singkat satu fasa ke tanah adalah gangguan hubung singkat yang terjadi karena flashover antara penghantar fasa dan tanah.

$$I_{sc_{L-G}} = \frac{3V_{L-N}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (3)$$

D. Gangguan pada Generator

Sistem proteksi generator merujuk pada standar [6] Protection yang didalamnya membahas tentang sistem perlindungan dengan menggunakan rele proteksi khusus

untuk generator. Adapun beberapa rele yang akan dievaluasi antara lain rele sinkronisasi (25), rele loss of excitation (40), rele *negatif sequence overcurrent* (46), rele *Voltage Restraint Phase Overcurrent* (51VR), rele *Over/Under Frequency* (81), rele Diferensial (87). Adapun beberapa gangguan pada generator adalah gangguan penggerak awal. Generator dengan penggerak awal mesin diesel harus dilengkapi dengan pengaman terhadap kerja balik atau gangguan monitoring karena gangguan-gangguan mekanik. Akibat adanya tekanan balik maka generator perlu dilengkapi dengan pengaman gangguan monitoring untuk menghindari kerusakan-kerusakan yang terjadi. Pada saat ada kerusakan pada penggerak awal, maka ada daya balik dalam kumparan stator sehingga generator perlu dilengkapi dengan relai daya balik (*Reverse Power Relay*) dengan karakteristik tunda waktu terbalik. Beikutnya adalah gangguan penghilang penguatan, menurut gangguan ini dapat terjadi karena adanya insiden terbukanya pemutus tenaga karena adanya gangguan pada internal maupun eksternal generator. Menurut S. Durrani et al, 2019 [7] Generator akan mengalami overspeed dan beroperasi sebagai motor induksi ketika mengalami kehilangan eksitasi. Gangguan arus lebih Gangguan arus lebih pada generator sering kali terjadi akibat adanya hubung singkat atau beban lebih. Gangguan putaran lebih, putaran lebih pada generator disebabkan adanya penurunan beban yang mendadak. Gangguan tegangan lebih, tegangan lebih yang dibangkitkan generator terutama disebabkan oleh putaran lebih akibat pelepasan beban yang mendadak. Gangguan beban tidak seimbang, ketidakseimbangan beban generator biasanya disebabkan adanya kebocoran atau hubung singkat penghantar ketanah atau antar penghantar. Penyebab paling umum adalah sistem asimetri (garis tidak

ditransposisikan), beban tidak seimbang, kesalahan sistem tidak seimbang, dan fase terbuka.

E. Sistem Proteksi Generator

Fungsi utama dari sistem proteksi adalah untuk membatasi durasi gangguan pada sistem serta meminimalkan kerusakan akibat gangguan yang terjadi. Secara sederhana cara kerja sistem peralatan proteksi terbagi menjadi 3 step, antara lain *Measurement equipment* (CT/PT) yang merupakan peralatan yang digunakan untuk mengukur parameter yang dibutuhkan relay. *Sensing and Logic Equipment* (Relay) yaitu peralatan yang berfungsi sebagai evaluator dan memberikan Tindakan sebagai output. *Close/Latching Equipment* (CB) merupakan peralatan yang berfungsi memutuskan jaringan ketika mengetahui ada indikasi gangguan dari relay. Proteksi pada generator berperan sangat krusial untuk menjaga agar generator tetap beroperasi secara normal. Adapun rele integrated tiap generator berbeda-beda sesuai dengan produk atau merk yang digunakan. Untuk proteksi generator pada PT Pupuk Sriwidjaja Palembang menggunakan rele merk GE Multilin seri 489. Adapun beberapa rele yang akan disetting adalah rele sinkronus (25), rele hilang penguatan (40), rele arus lebih urutan negatif (46), rele arus lebih kendali tegangan (51V), rele frekuensi (81), rele diferensial (87).

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Identifikasi Sistem Kelistrikan PT. Pusri

PT Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) didukung dengan sistem kelistrikan tipe radial open loop dan total kebutuhan pembebanan produksi dan utilitas sebesar ± 40.5 MW. Kebutuhan daya listrik tersebut disalurkan melalui sistem distribusi utama 13.8 kV dan 33 kV, kemudian disalurkan melalui jaringan distribusi sekunder pada tegangan 2.4 dan 0.4 kV. Seluruh kebutuhan tersebut dipenuhi melalui lima unit generator dengan total kapasitas daya mampu pembangkitan sebesar 68 MW sehingga kelangsungan proses baik dari sisi produksi dan kebutuhan listrik harus tercukupi dan terjaga kualitasnya. 3 generator dengan bahan bakar gas adalah tipikal dengan pembangkitan sebesar 18.35 MW dan 1 generator 22.65 MW. 1 generator bahan bakar uap (*steam*) dengan pembangkitan sebesar 40 MW. Kelima generator tersebut setara dengan 117 MW, 138.5 MVA, dengan *power factor* 0.85.

Pada garis warna hitam adalah bus dengan tegangan 13.8 kV sedangkan bus berwarna merah adalah bus sinkron dengan tegangan 33 kV. Pada kotak transparan warna hijau adalah area dimana peneliti melakukan penelitian terkait proteksi internal generator yaitu pada generator tipikal dengan masing-masing kapasitasnya adalah 18 MW. Sistem kelistrikan PT. Pusri dapat dilihat pada Gambar 1.

B. Kapasitas Pembangkitan

Pada data yang telah diterima dari PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang memiliki lima generator dengan empat tipe diantaranya adalah (Gas Turbine Generator) GTG dan satu tipe adalah (Steam Turbine Generator) STG. Dengan tegangan kerja adalah 13.8 kV. Jumlah total pembebanan eksisting pada PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang adalah 68 MW. Pembangkitan lima generator dan pembebanan yang dapat dilihat pada Tabel 1.

C. Syncrocheck Relay (25)

Rele sinkronisasi (25) adalah untuk mengontrol prosedur sinkronisasi total alternator atau sirkuit daya yang berbeda. Rele ini umumnya bertujuan untuk menggabungkan operasi dari dua atau lebih pembangkit pada suatu sistem kelistrikan. Rele ini mengevaluasi tegangan dari dua sisi yang berbeda dengan memperhatikan limit dari besaran, sudut fasa, dan perbedaan frekuensi. Waktu yang dibutuhkan terhadap dua sisi tegangan yang berbeda untuk mencapai sudut fasa yang diizinkan disebut dengan $\Delta\phi$ dan perbedaan frekuensi disebut ΔF (slip frekuensi). Waktu yang dibutuhkan dapat dilakukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$T = \frac{1}{\frac{360^\circ}{2 \times \Delta\phi} \times \Delta F} \quad (4)$$

D. Loss of Excitation Relay (40)

Kehilangan medan atau eksitasi dapat disebabkan pada generator karena kegagalan eksitasi. Dalam generator berukuran lebih besar, energi untuk eksitasi sering diambil dari sumber tambahan yang terpisah atau dari generator DC yang digerakkan secara terpisah. Kegagalan suplai bantu atau kegagalan motor penggerak juga dapat menyebabkan hilangnya eksitasi pada generator. Kegagalan eksitasi yaitu kegagalan sistem medan pada generator membuat generator berjalan pada kecepatan di atas kecepatan sinkron.

Ada dua skema yang digunakan untuk rele hilang penguatan ini untuk mendeteksi impedansi yang terlihat selama hilangnya medan. Skema pertama adalah menggunakan elemen mho offset negatif dan skema 2 menggunakan elemen mho offset positif. Rele ini diterapkan ke terminal generator dan diatur diatur untuk pemakaian internal generator. Pada unit yang kecil dapat hanya menggunakan skema satu yaitu menggunakan mho offset negatif dengan diameter karakteristik melingkar ditetapkan sama dengan reaktansi sinkron (X_d) dan dengan offset sama dengan setengah reaktansi transien sumbu langsung ($X'd$). Kurva operasi loss of field mengacu pada IEEE Std C37.102.2006 dapat dilihat pada Gambar 2.

$$Z_G = \frac{V_G^2}{MVA_G} \times \frac{CT \text{ Ratio}}{VT \text{ Ratio}} \quad (5)$$

Dimana Z merupakan nilai impedansi generator, V_G merupakan tegangan nominal generator, dan MVA_G adalah kapasitas nominal generator (MVA). Untuk mendapatkan diameter dan offset dari lingkaran tersebut dapat diperoleh melalui persamaan berikut.

$$Offset = \frac{-(X'_D \times Z_G)}{2} \quad (6)$$

$$Diameter \text{ zona operasi } 1 = 1 \text{ pu}$$

$$Diameter \text{ zona operasi } 2 = X_D \times Z_G$$

E. Negative Sequence OCR (46)

Aliran arus fasa yang tidak seimbang pada stator generator menyebabkan arus putaran balik berfrekuensi ganda bersirkulasi di badan rotor yang dapat merusak tempa rotor, baji, belitan tembaga, dan cincin penahan. Tegangan suplai seimbang tiga fase yang diterapkan pada belitan tiga fase simetris menghasilkan fluks dengan magnitudo konstan di

celah udara mesin, yang berputar pada kecepatan sinkron di sekitar keliling mesin.

Konsep *negative sequence* atau urutan negatif adalah berasal dari metode analisis vector komponen simetris. Metode ini memungkinkan sistem tiga fase yang tidak seimbang antara positif, negatif dan zero. Semakin besar daya yang tidak seimbang semakin besar komponen urutan negatif. Rele ini mengamankan dari generator dari gangguan arus lebih urutan negatif yang telah diatur dalam standar IEEE Std C50.12 dan IEEE Std C50.13. Skema proteksi pada rele arus lebih urutan negatif ini dapat dilihat pada Gambar 3.

F. Voltage Restraint Phase OCR (5IV)

Proteksi arus lebih yang dibatasi tegangan memberikan peningkatan sensitivitas rele arus lebih dengan membuat nilai operasi arus lebih yang disetel sebanding dengan tegangan input yang diterapkan. Relai arus lebih penahan tegangan sering digunakan sebagai alternatif relai impedansi pada generator ukuran kecil hingga menengah (5-150MVA) untuk menyediakan cadangan bagi relai diferensial. Aplikasi lain dari relai arus lebih penahan tegangan ada dalam jaringan untuk memberikan koordinasi dan deteksi gangguan yang lebih baik daripada relai arus lebih biasa. Fitur ini memanfaatkan fungsi dari *time multipliers* yang sesuai dengan tegangan fasa-fasa dari kurva karakteristik penahan tegangan, dapat dilihat pada Gambar 4.

Rele urutan negatif bekerja dengan cara mengonversi pembacaan arus pada masing-masing fasa ke dalam komponen simetris. Nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan kemampuan generator untuk menahan adanya arus tidak seimbang yang dimodelkan dengan persamaan.

$$t_{eksisting} = \frac{K_{eksisting}}{I_2^2} \tag{7}$$

K merupakan suatu konstanta ketahanan generator dalam menahan arus tidak seimbang. T merupakan waktu yang diizinkan, dan I_2 merupakan arus urutan negatif yang dapat diperoleh melalui persamaan.

$$I_{0,1,2} = A^{-1} * I_{a,b,c} \tag{8}$$

$$I_0 = \frac{1}{3} x (I_a + I_b + I_c) \tag{9}$$

$$I_1 = \frac{1}{3} x (I_a + aI_b + a^2I_c) \tag{10}$$

$$I_2 = \frac{1}{3} x (I_a + a^2I_b + aI_c) \tag{11}$$

G. Frequency Relay (81O/U)

Rele ini berfungsi sebagai pengaman jika frekuensi sistem turun hingga berada di luar batas yang diijinkan. Relai frekuensi-kurang ini digunakan selain untuk membaca perubahan frekuensi juga sebagai pengaturan bagi sistem pelepasan sebagian beban sebagai tindak lanjut dari terjadinya abnormal frekuensi dan menghindari *cascading effect* yang mengakibatkan blackout pada generator. Bagian yang paling rentan terhadap frekuensi adalah turbine. Pada IEEE Std C37.102. menguraikan bahwa generator yang beroperasi pada kondisi under frequency menyebabkan overheating dan berujung berkurangnya usia generator, sedangkan kejadian overfrequency yang menyebabkan putaran shaft berlebih tiidak terlalu menimbulkan dampak serius. Akan tetapi melihat generator yang beroperasi dengan kondisi over frequency secara terus menerus juga akan

mengurangi usia dari shaft generator. Adapun standar operasi frekuensi yang diizinkan, dapat dilihat pada Gambar 5.

H. Differential Relay (87)

Rele diferensial adalah relai yang beroperasi ketika terdapat selisih antara dua atau lebih besaran listrik yang sejenis melebihi nilai yang telah ditentukan. Pada rangkaian skema relai diferensial, terdapat dua arus yang berasal dari dua bagian rangkaian tenaga listrik. Kedua arus ini bertemu di titik persimpangan di mana kumparan relay terhubung. Menurut Hukum Arus Kirchhoff, arus resultan yang mengalir melalui kumparan relai tidak lain adalah penjumlahan dari dua arus, yang berasal dari dua bagian rangkaian tenaga listrik yang berbeda. Jika polaritas dan amplitudo kedua arus diatur sedemikian rupa sehingga jumlah fasor dari kedua arus ini adalah nol pada kondisi operasi normal. Dengan demikian tidak akan ada arus yang mengalir melalui kumparan relai pada kondisi operasi normal. Tetapi karena adanya kelainan pada rangkaian daya, jika keseimbangan ini rusak, itu berarti jumlah fasor dari kedua arus ini tidak lagi tetap nol dan akan ada arus bukan nol yang mengalir melalui kumparan relai sehingga relai dioperasikan. Rele ini memiliki selektifitas yang sangat tinggi, sehingga sangat disarankan untuk perlindungan internal generator, dapat dilihat pada Gambar 6.

Dengan tujuan adalah ketika ada gangguan pada internal generator maka generator akan fault sedangkan yang dimaksud dari eksternal fault adalah ketika ada arus inrush dari trafo atau starting dari motor nilai arus tersebut tidak akan terdeteksi oleh relay pada generator, sehingga generator tidak akan trip. Rumus untuk mengetahui perbandingan

$$I_{diff} = I_A + I_a \tag{12}$$

$$I_{rest} = \frac{|I_A| + |I_a|}{2} \tag{13}$$

Tripping Region Differential Relay GE 489 dapat dilihat pada Gambar 7.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Pusri

Dalam memodelkan sistem kelistrikan PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang menggunakan bantuan dari software *ETAP Power Station Software* dengan cara menggambar *single line diagram* sesuai dengan yang terpasang eksisting. Pemodelan kelistrikan ini menyesuaikan dengan data yang didapatkan pada PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang. Data yang didapatkan berupa data pembangkitan dari beberapa generator, data pembebanan dari masing-masing feeder, data trafo sebagai distribusi, serta data relay proteksi yang terpasang. Pemodelan ini bertujuan untuk dapat menganalisis aliran daya pada software simulasi sebelum dapat dilanjutkan untuk simulasi sistem proteksi serta memperbaiki sistem proteksi sesuai dengan gangguan yang telah terjadi, dapat dilihat pada Gambar 8.

B. Analisis Aliran Daya

Berdasarkan data yang telah diterima dari PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang, diketahui bahwa total pembebanan utilitas keadaan eksisting pada pabrik tersebut adalah sekitar ±40.5 MW. Pembebanan tersebut terbagikan secara merata sesuai dengan kebutuhan pada setiap feeder. Terdapat 5

pembagian feeder yaitu STG Load, Pusri 2, Pusri 3, Pusri 4, PIB Load. Gambar 9 dan Gambar 10 adalah hasil analisis aliran daya berdasarkan simulasi.

C. Analisis Hubung Singkat

Data yang diambil dari analisis hubung singkat merupakan nilai awal untuk menentukan setting proteksi pada rele internal generator. Untuk mendapatkan data hubung singkat pada bus yang terindikasi ada gangguan menggunakan software simulasi ETAP. Adapun data arus hubung singkat yang diambil adalah hubung singkat minimum dan maksimum. Pada arus hubung singkat maksimum merupakan hubung singkat tiga fasa, sedangkan hubung singkat minimum adalah hubung singkat antar fasa (*line to line*).

Menurut insiden hubung singkat gabungan pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang terjadi pada bus DS 4101 generator 4 (GTG4). Saat terjadi hubung singkat rele arus lebih terdekat yaitu R 41C tidak merasakan adanya arus hubung singkat sehingga tidak mengamankan area yang terjadi hubung singkat, serta adanya. Akibat dari insiden itu GTG 4 mengalami power swing dan trip. Untuk itu perlu adanya evaluasi sistem proteksi internal pada generator untuk menangani insiden tersebut. Tabel 2 adalah data arus hubung singkat yang didapat pada masing-masing bus utama generator.

Data yang telah didapatkan pada Tabel 3 akan digunakan untuk menentukan evaluasi setting pada proteksi internal generator yang akan dijelaskan pada subbab selanjutnya.

D. Analisis Rele Proteksi Generator

Pada keadaan eksisting generator hanya disetting default, sehingga tidak dapat mengamankan ketika terjadi gangguan. Maka dari itu dilakukan evaluasi dan berikut adalah hasilnya

1) Synchrocheck Relay (25)

Perbedaan sudut fasa ($\Delta\phi$) yang diperbolehkan adalah maksimum 10 derajat [8]. Hal ini berpengaruh pada waktu circuit breaker untuk menutup. Secara ideal circuit breaker akan menutup saat perbedaan sudut fasa adalah 0 derajat. Berdasarkan standar diberi error toleransi yaitu maksimum 10 derajat perbedaan fasa agar generator dapat bekerja parallel. Visualisasi Perbedaan Sudut dapat dilihat pada Gambar 11. Perbedaan frekuensi (ΔF) harus kurang dari 0.1% dari frekuensi sistem, maka didapatkan.

$$\Delta F = 0.1\% \times F \quad (14)$$

$$\Delta F = 0.1\% \times F = 0.05$$

Perbedaan tegangan (ΔV) yang diperbolehkan menurut standar IEEE Std C37.102-2006 yaitu maksimum 5% dari tegangan sistem. Hal ini bertujuan untuk menjaga stabilitas sistem dengan memastikan aliran VAR ke dalam sistem. Namun berdasarkan pengalaman dari pembimbing disarankan untuk diturunkan lagi menjadi maksimum 4% karena 5% dianggap masih terlalu banyak VAR yang akan disuplai ke dalam sistem. Maka maksimum perbedaan tegangan yang diizinkan adalah

$$\Delta V = 5\% \times \text{Tegangan sistem} \quad (15)$$

$$\Delta V = 5\% \times 13.8 \text{ kV} = 0.552 \text{ kV}$$

Visualisasi Perbedaan Tegangan dapat dilihat pada Gambar 12.

2) Loss of Excitation Relay (40)

Berdasarkan insiden yang terjadi yaitu hubung singkat pada bus DS 4101 atau bus yang dekat dengan generator menyebabkan generator *power swing* dan trip. Menurut M. Sarwar, et.al 2019 [9] *power swing* merupakan variasi dalam aliran daya tiga fasa yang terjadi ketika sudut rotor generator maju atau mundur relatif satu sama lain sebagai respons terhadap perubahan besar dan arah beban, peralihan saluran, kehilangan pembangkitan, gangguan, dan gangguan sistem lainnya, dan dapat kita lihat pada Gambar 13.

3) Negative Sequence Overcurrent Relay (46)

Kejadian beban tidak seimbang sangat berkaitan dengan urutan negative atau *negative sequence*. Arus urutan negatif menghasilkan jumlah magnitude pada arus urutan positif dengan frekuensi yang berlipat. Apabila terjadi hubung singkat karena munculnya arus urutan negatif pada suatu rangkaian tertutup seperti rotor generator, maka dapat terjadi peningkatan temperature dalam waktu singkat kejadian ini dinamakan *thermal cyclic*. Kejadian *thermal cyclic* yang terlalu sering dapat mengakibatkan kegagalan material pada permukaan rotor, retaining ring generator, dan slot wedges, dan dapat kita lihat pada Gambar 14.

4) Voltage Restraint Phase Overcurrent Relay (51V)

Pada Gambar 15 terlihat bahwa telah dilakukan rekomendasi waktu trip dari generator ketika terjadi gangguan dengan jeda 0.51 detik hal ini memungkinkan gangguan arus hubung singkat urutan negatif tidak akan melampaui dari kapabilitas generator dalam menahan arus tersebut.

5) Frequency Relay (81 O/U)

Setting rele frekuensi ini berdasarkan keadaan saat load shedding, sehingga dapat disetting berdasarkan gangguan yang terjadi [10]. Batas atas frekuensi yang disarankan dari IEEE Std C37.102-2006 adalah 51.5 Hz sedangkan batas bawah yang disarankan adalah 47.67 Hz. Gambar 16 adalah visualisasi dari hasil resetting rele frekuensi.

6) Differential Relay (87)

Berdasarkan pada hasil visualisasi sistem (pada Gambar 17) proteksi rele diferensial menunjukkan bahwa sistem eksisting sudah sesuai dengan yang diharapkan. Dua titik berwarna hijau mengartikan bahwa saat kondisi normal dan external fault, maka rele diferensial pada generator tidak akan mengirim sinyal untuk trip, sebaliknya ketika terjadi gangguan internal maka rele diferensial akan mengirim sinyal untuk trip. Sehingga dapat disimpulkan setting rele diferensial eksisting sudah memenuhi standar yang ditentukan

V. KESIMPULAN

Dari analisis evaluasi rele internal generator pada PT Pupuk Sriwidjaja Palembang saat terjadi gangguan hubung singkat pada salah satu bus, maka dapat dibuat beberapa kesimpulan sebagai berikut.

Terdapat enam rele yang telah dilakukan evaluasi ketika terjadi gangguan yaitu rele sincrocek (25), rele hilang penguatan (40), rele arus lebih urutan negatif (46), rele arus lebih dengan kendali tegangan (51V), rele frekuensi (81O/U), serta rele diferensial (87). Masing-masing rele ini mempunyai fungsi yang berbeda-beda namun memiliki tujuan yang sama

yaitu mengamankan generator ketika ada indikasi gangguan pada internal maupun eksternal generator.

Pada setting eksisting rele frekuensi GTG tidak diatur sehingga ada kemungkinan GTG akan tetap beroperasi ketika terjadi fenomena power swing dan frekuensi berada dibawah atau diatas batas yang telah ditentukan standar. Dilakukan evaluasi terhadap setting rele frekuensi dimana batas aman beroperasi generator menurut standar C37.102-2006 adalah 95% - 103% dari frekuensi normal atau minimal 47.5 Hz – 51.5 Hz.

Untuk melindungi adanya potensi hubung singkat dua fasa pada generator maka dilakukan evaluasi terhadap rele arus lebih urutan negatif. Pada kondisi eksisting tidak adanya interval atau jeda antara setting eksisting dan kapabilitas generator untuk menahan arus hubung singkat urutan negatif, sehingga akan terjadi potensi overheating atau pemanasan berlebih pada rotor dan dapat menyebabkan rotor terbakar. Maka dari itu diberikan jeda atau interval antara setting pengaman dan kapabilitas generator dengan cara merubah nilai time dial (Faktor K) dari 30 menjadi 20 agar didapatkan jeda 0.5 detik hal ini sesuai dengan standar C37.102-2006.

Pada Gambar 15 terlihat bahwa kurva R GTG P4 menyentuh kurva generator saat beroperasi full load hal ini dapat mengakibatkan trip. Oleh karena itu dilakukan evaluasi terhadap terhadap arus pickup nya agar ada interval antara kurva R GTG P4 dengan generator saat operasi. Pada rele ini diberikan pengaman tambahan yaitu kendali tegangan. Hal ini dilakukan agar ketika terjadi hubung singkat namun tidak terdeteksi pada setting arus pickupnya maka rele 51V ini dapat dijadikan sebagai batasan. Ketika ada hubung singkat tegangan akan menurun, menurunnya tegangan ini menjadi batasan apakah generator dapat beroperasi atau harus stop. Berdasarkan standar dari manufaktur GE Multilin 489 menjelaskan bahwa kendali tegangan didapatkan sebesar 20% dari tegangan nominal dalam hal ini yang merasakan adalah trafo tegangan maka ketika dikonversikan menjadi 24 Volt.

Dengan mempertimbangkan jumlah generator yang lebih dari satu dan saling terhubung maka dilakukan analisis setting

rele synchrocheck (25). Rele ini bertujuan untuk melakukan seleksi terhadap keselarasan generator sebelum terhubung paralel ke dalam sistem kelistrikan. Aspek yang akan diseleksi antara lain adalah Perbedaan sudut fasa ($\Delta\phi$), Perbedaan frekuensi (ΔF), dan Perbedaan tegangan (ΔV).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Ahmed, "Study of Generation Protection at Garri 4 Power Station," University of Khartoum, Khartoum, 2017.
- [2] M. Zaman Jelvian, M. Jahani, and G. B. Gharehpetian, "Coordination of Generator Underexcitation Protection with Underexcitation Limiterto PreventGenerator TrippingDuring Power TransformerEnergization:Asaluyeh Power Plant Case," in *in 14thInternational Conference on Protection & Automationin Power System*, 2019, pp. 26–32.
- [3] Abbas Hasani, Farhad Haghjoo, Claus Leth Bak, and Filipe Faria da Silva, "Synchronous Generator LOF Protection Using a Detailed Model Based on IEEE Standard C37.102-2006," in *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC&CPS Europe)*, 2019, pp. 1–5.
- [4] J Duncan Glover, Mulukutla S Sarma, and Thomas J Overbye, *Power System Analysis and Design*, 4th ed. Stamford : Cengage Learning, 2012.
- [5] T. Samin, "Analisa Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Jaringan Distribusi 20 KV PT. PLN (PERSERO) Sebatik menggunakan Software ETAP Power Station 12.6. 0," *Jurnal ElektriKa Borneo (JEB)*, vol. 5, no. 1, pp. 19–24, 2019.
- [6] G. G. Protection, *IEEE Guide for AC Generator Protection*. IEEE, 2006. doi: 10.1109/IEEESTD.2006.320495.
- [7] S. and K. M. J. Durrani, M. Sarim, A. Abdullah, F. Khan, M. Aftab, and H. Ali, "Smart Fault Detection and Generator Protection scheme using Arduino and HMI," in *Proc. of the 1st International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE)*, 2019, pp. 1–6.
- [8] D. Celeita, M. Gutierrez, M. Toro, and G. Ramos, "Out-of-Step Protection Modeling for Playback Testing Applied to Industrial Generators," in *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 2018, pp. 1–6.
- [9] M. Sarwar, M. Abubakar, M. Mahmood, M. Azam, and B. Hussain, "Design and Implementation of an Automatic Synchronizing and Protection Relay Throug Phower-Hardware-in-the-Loop (PHIL) Simulation," in *2019 15th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, 2019, pp. 1–6.
- [10] M. N. Pala, A. Thakar, and A. Patel, "Power Swing and out of step Protection using Equal area Criteria," in *2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 2019, pp. 1–7.