

# Studi Koordinasi Proteksi Internal *Steam Turbine Generator* 2 X 11 MW pada PT. Linde Gresik

Mohammad Arian Rahmatullah, Margo Pujiantara, dan Dedet Candra Riawan  
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: margo@ee.its.ac.id

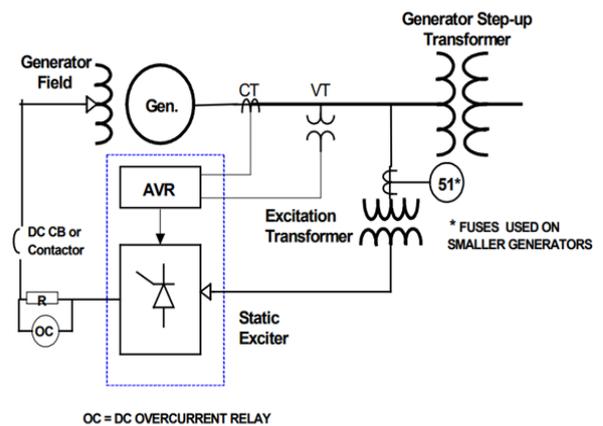
**Abstrak**—PT. Linde Gresik sebagai perusahaan yang bergerak dibidang pengolahan gas industri mengalami permasalahan sistem kelistrikan yang cukup krusial. Salah satu permasalahan tersebut yaitu, adanya gangguan berupa arus hubung singkat pada panel *voltage transformer*, sehingga akibatnya rele yang merasakan gangguan tersebut bekerja membuka *circuit breaker outgoing* generator. Disisi lain akibat titik gangguan tetap dirasakan oleh internal generator mengakibatkan terjadinya kesalahan operasi dari *automatic voltage regulator* (AVR) yang bertindak sebagai pemain utama pada sistem eksitasi generator, sehingga arus eksitasi terus diberikan kepada generator dan terjadilah kegagalan pada generator. Adanya kasus yang terbilang unik tersebut mengakibatkan sistem proteksi internal generator tersebut perlu dievaluasi kembali. Pada paper ini, sistem proteksi internal generator yang akan dievaluasi meliputi yaitu rele diferensial generator, rele arus lebih dengan kontrol tegangan, rele eksitasi lebih, dan rele hilang medan. Pada studi ini juga akan dipaparkan perihail dampak yang terjadinya kepada internal generator berdasarkan gangguan tersebut dan sekaligus akan dipaparkan secara khusus tentang solusi berupa rekayasa *intertrip* dan *interlock* yang dapat diimplementasikan kepada sistem proteksi internal generator apabila gangguan serupa terjadi kembali. Hasil studi proteksi internal generator ini dapat menjadi rekomendasi bagi perusahaan pembangkit listrik pada umumnya dalam melindungi generator dari gangguan hubung singkat di *voltage transformer*.

**Kata kunci**—*Automatic Voltage Regulator* (AVR), Rekayasa *Intertrip* dan *Interlock*, Sistem Proteksi Internal Generator, Sistem Eksitasi, *Voltage Transformer*.

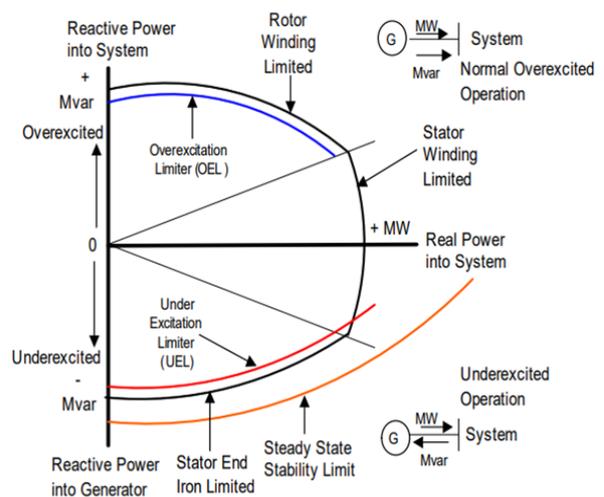
## I. PENDAHULUAN

GANGGUAN sistem tenaga listrik merupakan kejadian yang menyebabkan perubahan sistem kelistrikan dari keadaan normal ke keadaan darurat [1]. Pada kasusnya, gangguan sistem kelistrikan merupakan satu hal yang tidak dapat dihindarkan. Maka, dibutuhkan suatu sistem tertentu yang dapat bekerja untuk meminimalisir besar resiko yang dapat ditimbulkan akibat gangguan tersebut. Sistem proteksi memiliki peran penting untuk melindungi peralatan listrik jika suatu saat terjadi gangguan pada sistem kelistrikan yang begitu kompleks. Maka diperlukan koordinasi proteksi agar skenario perlindungan yang diharapkan dapat bekerja secara baik. Namun, apabila proteksi tersebut tidak terkoordinasi sebagaimana mestinya, maka selain berdampak kepada menurunnya keandalan, kontinuitas, dan *blackout* pada sistem kelistrikan, bahkan hal tersebut dapat mengakibatkan peralatan listrik utama mengalami kerusakan. Salah satu peralatan listrik utama di dalam sistem kelistrikan tersebut adalah generator.

Merujuk kepada insiden yang terjadi di lapangan, maka kinerja dari sistem proteksi yaitu rele proteksi internal STG pada PT. Linde Gresik dapat disimpulkan memiliki *track-*



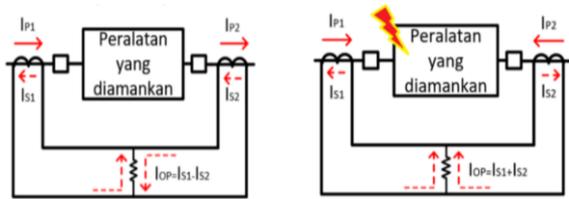
Gambar 1. Sistem Eksitasi dengan AVR.



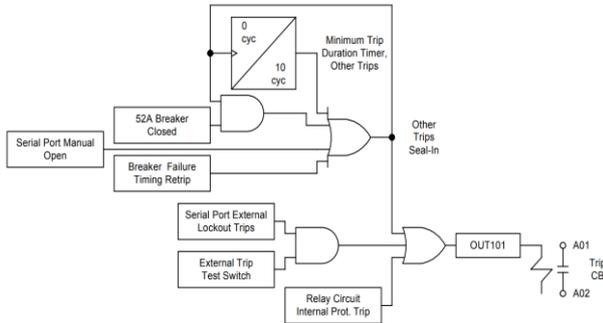
Gambar 2. Kurva Kemampuan Tipikal Generator dan Batas Operasi.

*record* yang kurang baik. Salah satu insiden tersebut yaitu tidak bekerjanya beberapa rele proteksi yang mengakibatkan terbakarnya salah satu unit STG di PT. Linde Gresik. Kejadian ini diduga akibat adanya gangguan berupa arus hubung singkat pada panel *voltage transformer* yang mana titik gangguan tersebut berada di internal STG, sehingga akibatnya rele bekerja membuka *circuit breaker outgoing* generator. Disisi lain akibat titik gangguan yang berada pada *upstream* daripada *circuit breaker* tersebut alhasil gangguan tetap menempel dan masih dirasakan oleh internal STG. Akibat gangguan yang berada pada panel *voltage transformer* membuat terjadi kesalahan operasi dari sistem eksitasinya, sehingga arus eksitasi terus diberikan kepada generator yang akhirnya terjadilah kegagalan pada generator.

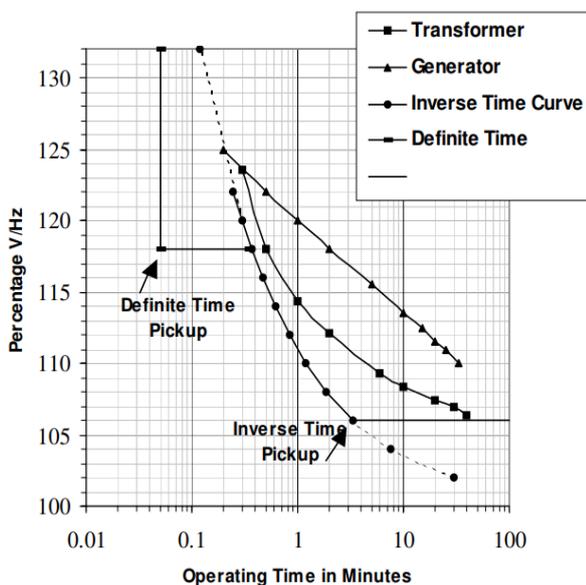
Oleh karena itu, pada Paper ini akan dilakukan studi koordinasi proteksi berikut dengan solusinya perihail gangguan khusus internal *steam turbine generator* 2x11 MW



Gambar 3. Kinerja rele diferensial saat keadaan normal dan gangguan.



Gambar 4. Trip Logic.



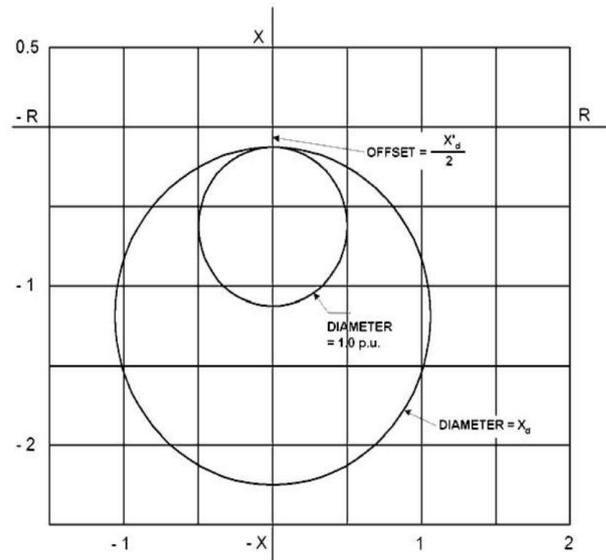
Gambar 5. Kurva karakteristik rele eksitasi lebih.

pada PT. Linde Gresik tersebut. Hasil studi koordinasi tersebut akan digunakan sebagai usulan sekaligus solusi untuk menentukan koordinasi rele proteksi internal generator yang tepat, sehingga diharapkan apabila gangguan serupa terjadi maka generator dapat dilindungi dengan benar.

## II. TEORI PENUNJANG

### A. Identifikasi Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Operasi normal dari sistem tenaga dapat terganggu dikarenakan kesalahan pada suatu sistem berupa arus tinggi abnormal yang mengalir melalui jalur yang tidak seharusnya. Hal tersebut terjadi akibat adanya kegagalan dari sebagian atau seluruh isolasi pada satu atau lebih titik pada sistem [2]. Kegagalan total isolasi tersebut biasa disebut dengan "short circuit" atau "fault". Berdasarkan keterangan yang disampaikan oleh dosen pembimbing kami yaitu Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT beliau mengatakan bahwa kegagalan pada isolasi pada PT. Linde Gresik terjadi pada panel khusus voltage transformer, sehingga hal tersebut disinyalir merupakan salah satu penyebab terjadi gangguan short



Gambar 6. Karakteristik setting kurva mho untuk zona 1 dan zona 2.

circuit dan miskordinasi rele proteksi pada perusahaan yang berkecimpung di minyak dan gas ini.

Gangguan short circuit merupakan suatu gangguan yang tidak dapat diprediksi terjadinya. Disisi lain, jenis gangguan short circuit yang bermacam-macam ini mengharuskan teknisi mempertimbangkan segala kemungkinan yang dapat terjadi. Secara istilah terdapat dua jenis gangguan hubung singkat, yaitu gangguan hubung singkat simetri dan hubung singkat asimetri. Penjelasan perihal jenis-jenis gangguan short circuit tersebut akan dijelaskan lebih rinci pada beberapa sub bab berikut ini.

### B. Perhitungan Arus Hubung Singkat

Berdasarkan gangguan yang terjadi pada sistem kelistrikan PT. Linde Gresik yang berupa arus hubung singkat, maka dalam menentukan setting koordinasi proteksi yang tepat dibutuhkan parameter yang dapat dijadikan acuan dalam penelitian paper ini. Perhitungan hubung singkat tersebut nantinya bisa menggunakan perhitungan berdasarkan rumus berikut ini.

#### Persamaan Hubung Singkat 3 Fasa

$$ISC_{3ph} = \frac{V_{LN}}{X_1} \tag{1}$$

Keterangan:

$V_{LN}$  = Tegangan Fasa Ke Netral

$X_1$  = Impedansi Urutan Positif

#### Persamaan Hubung Singkat 2 Fasa

$$ISC_{2ph} = \frac{V_{LL}}{X_1 + X_2} \tag{2}$$

Keterangan:

$V_{LN}$  = Tegangan Fasa Ke Netral

$X_1$  = Impedansi Urutan Positif

$X_2$  = Impedansi Urutan Negatif

#### Persamaan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

$$ISC_{1ph} = \frac{3V_{LN}}{X_1 + X_2 + X_0 + 3Z_G} \tag{3}$$

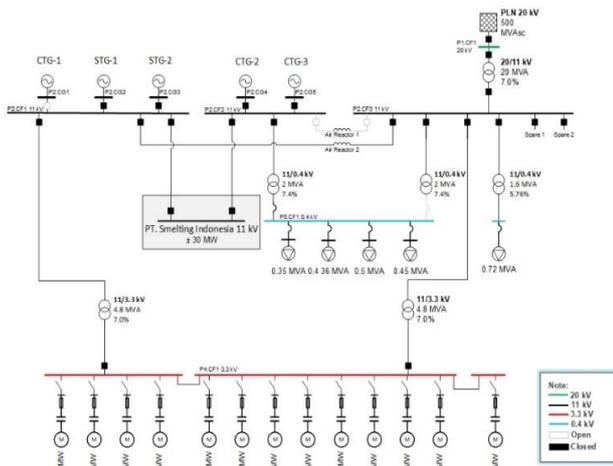
Keterangan:

$V_{LN}$  = Tegangan Fasa Ke Netral

$X_1$  = Impedansi Urutan Positif

$X_2$  = Impedansi Urutan Negatif

$X_0$  = Impedansi Urutan Nol



Gambar 7. SLD 3 PT. Linde Gresik.

Tabel 1. Data arus hubung singkat

SS	kV	Lokasi Gangguan	Fasa	Arus Gangguan Hubung Singkat (kA)	
				2 fasa	3 fasa
P2.CF1	11	P2.CG3	A	0	37.4
			B	28.4	37.4
			C	28.4	37.4

$Z_G$  = Impedansi Grounding

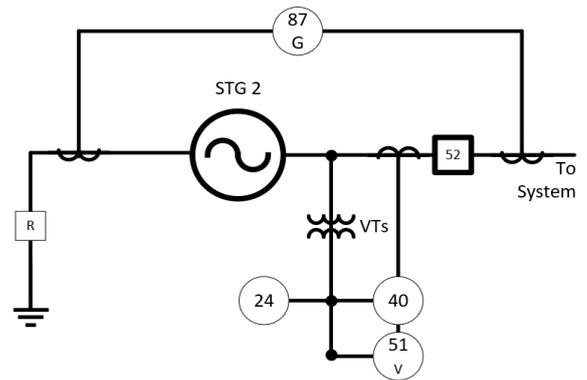
C. Dasar Kontrol Eksitasi

Dalam sistem pembangkitan generator, kontrol eksitasi generator merupakan sistem terpenting pada generator, sehingga dapat beroperasi secara optimal. Sistem eksitasi pada generator berfungsi menyediakan energi dalam bentuk medan magnet sehingga generator tetap sinkron dengan sistemnya [3]. Meningkatnya arus eksitasi akan meningkatkan daya output reaktifnya. Disisi lain, penurunan arus eksitasi akan berdampak sebaliknya, dan di kasus lebih ekstrim, akan menyebabkannya hilang sinkronisasi generator dengan sistemnya. Sistem eksitasi juga berperan dalam mengatur tegangan terminal generator. Kontrol tegangan yang paling sering digunakan adalah *Automatic Voltage Regulator (AVR)* seperti yang ditunjukkan Gambar 1. Dengan adanya kontrol tegangan ini maka akan membantu menjaga tegangan sistem masih dalam standard dengan cara menambah atau mengurangi daya reaktifnya [3].

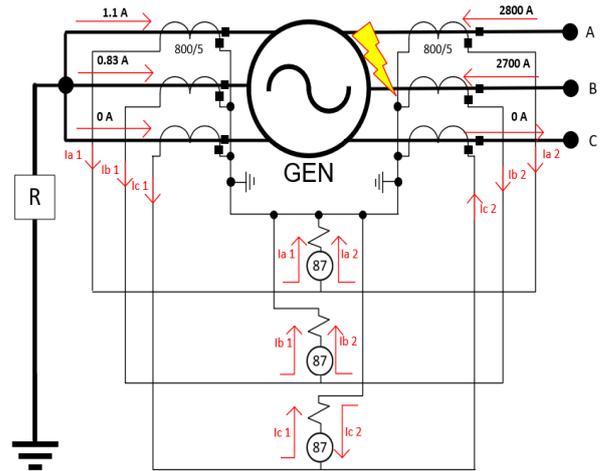
D. Kapabilitas Generator (*Generator Watt/Var Capability*)

Kurva kemampuan generator menggambarkan keadaan generator secara kontinu dan sebagai batas operasi dari generator itu sendiri. Kurva pada Gambar 2 juga menunjukkan bagaimana AVR juga berperan untuk mengontrol dan membatasi operasi beberapa kondisi antara eksitasi dengan kemampuan generator [3].

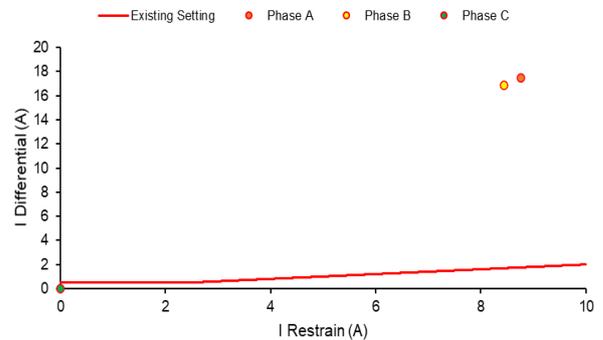
Kapabilitas generator pada Gambar 2 terdiri dari tiga kurva yang berbeda yang menjadi satu : *stator winding limited*, *rotor winding limited*, dan *stator end iron limited*. Pada gambar 2 juga dipaparkan bahwa dalam pengoperasiannya terdapat suatu kontrol eksitasi dengan menggunakan *Automatic Voltage Regulator (AVR)*. Disaat yang bersamaan, AVR berfungsi untuk membatasi eksitasi melebihi atau kurang dari batas kapabilitas generator, tiga istilah dalam pembatasan/limiters eksitasi tersebut yaitu, *over excitation limiters (OEL)*, *under excitation limiters (UEL)*,



Gambar 8. Lingkup Penelitian Relé Proteksi Internal STG.



Gambar 9. Ilustrasi aliran arus saat hubung singkat.

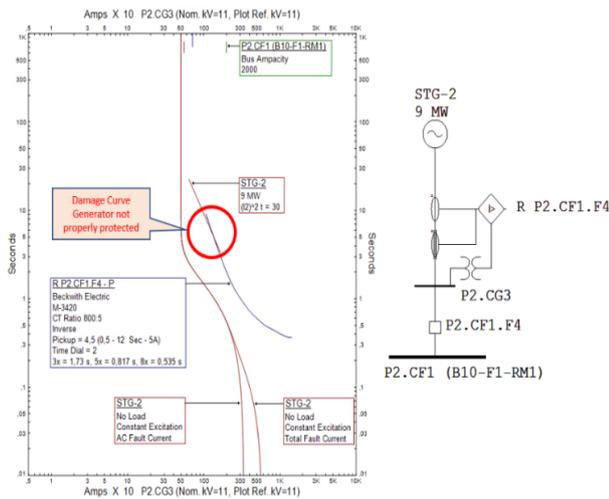


Gambar 10. Kinerja rele diferensial saat gangguan terjadi.

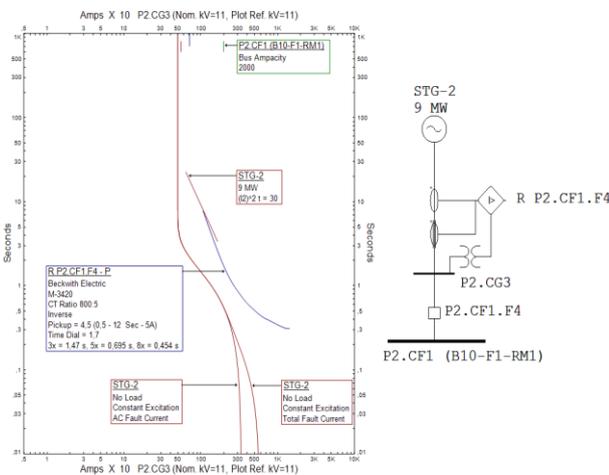
dan *steady state stability limit (SSSL)*. Namun, dalam beberapa kasus AVR tidak mampu beroperasi membatasi eksitasi generator sebagaimana mestinya. Sehingga, dibutuhkan suatu rele proteksi yang bekerja sebagai cadangan/*back-up* apabila AVR tidak mampu bekerja sebagaimana mestinya. Oleh karena itu, pada paper ini juga akan dibahas tentang rele eksitasi lebih/*overexcitation (24)* yang berperan sebagai *back-up* dari *over excitation limiters (OEL)* dan rele hilang medan/ *loss of field (40)* yang berperan sebagai *back-up* dari *under excitation limiters (UEL)*.

E. Sistem Proteksi pada Generator

Sistem proteksi adalah suatu perlengkapan untuk mendeteksi gangguan atau kondisi ketidaknormalan pada sistem tenaga listrik, dalam rangka untuk membebaskan/ mengisolasi gangguan, menghilangkan kondisi tidak normal, dan untuk menghasilkan sinyal atau indikasi. Adapun cara sistem proteksi mengisolasi gangguan yang ada dengan cara



Gambar 11. Evaluasi setting rele 51V dengan karakteristik STG-2.



Gambar 12. Resetting rele 51V dengan karakteristik STG-2.

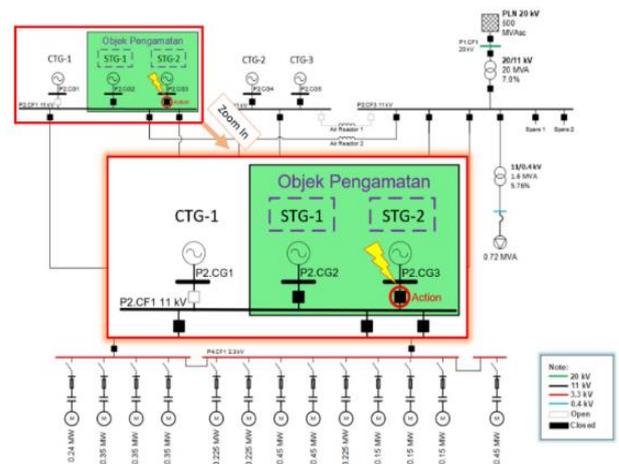
menerima dan memproses sinyal gangguan yang ada pada sistem kelistrikan dengan menggunakan rele dan kemudian rele mengirimkan sinyal ke *circuit breaker*/kontaktor yang menyebabkan terputusnya sirkuit atau pemutus tenaga pada *circuit breaker* tertentu yang dengan gangguan. Proteksi dibagi kedalam dua yaitu proteksi utama dan proteksi cadangan/ backup.

F. Rele Diferensial Generator (87G)

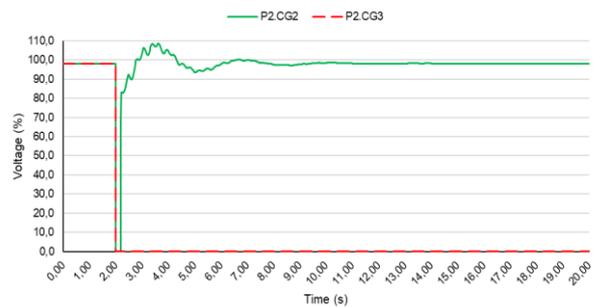
Pada saat terjadinya gangguan pada internal generator salah satu rele yang kemungkinan besar bekerja adalah rele diferensial. Prinsip kerja proteksi diferensial adalah membandingkan dua besaran arus dan fasa antara dua titik pada batasan batasan daerah pengaman [4]. Oleh karena itu, pada proteksi diferensial ini arus menjadi parameter utama yang digunakan untuk mengetahui adanya gangguan pada peralatan yang diamankan. Disisi lain, proteksi diferensial ini hanya akan bekerja apabila terjadi gangguan pada internal peralatan saja, lebih jelasnya yaitu rele ini tidak akan bekerja apabila gangguan tersebut terjadi di eksternal peralatan yang dilindungi. Hal tersebut dapat divisualisasikan pada Gambar 3.

G. Rele Arus Lebih Generator dengan Penahan/Kontrol Tegangan (51 V)

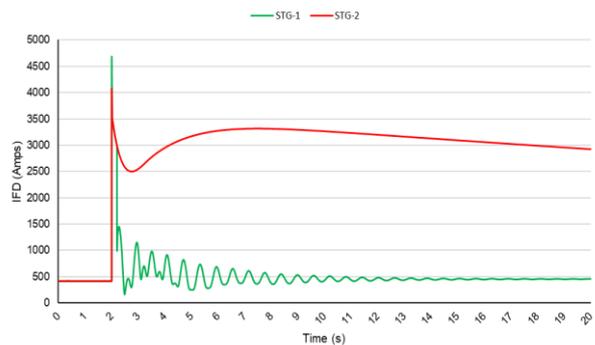
Rele arus lebih biasa digunakan untuk memutuskan jalur pada sistem kelistrikan secara selektif dan biasa digunakan untuk koordinasi dengan rele lain pada sisi *downstream*. Rele proteksi arus lebih merupakan rele yang dapat bekerja



Gambar 13. Pengamatan respon STG saat terjadi gangguan.



Gambar 14. Respon Tegangan Saat Terjadi Hubung Singkat.

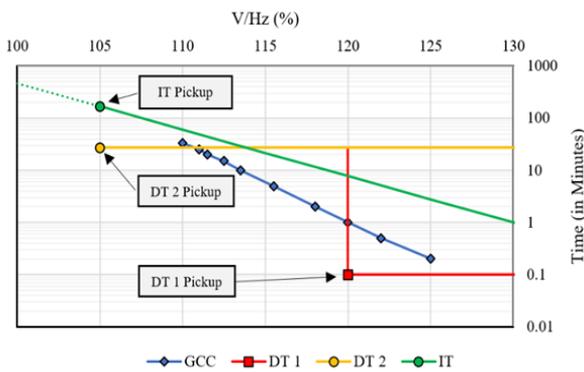


Gambar 15. Respon Arus Eksitasi STG (IFD) Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat dalam Ampere.

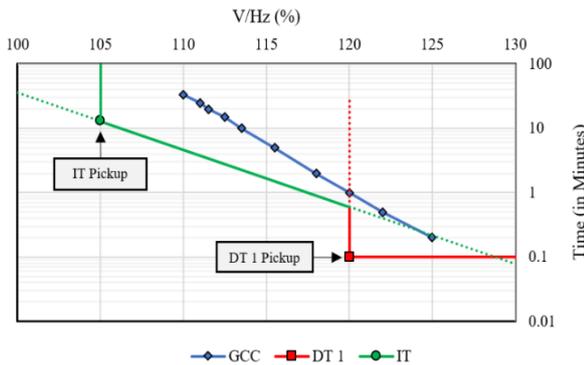
berdasarkan arus dan waktu, artinya rele ini akan bekerja ketika nilai arus yang terbaca oleh rele telah melewati nilai arus dan berlangsung dalam waktu tertentu. Rele proteksi arus lebih dapat berupa rele dengan waktu *inverse* dan rele dengan waktu *definite/instantaneous* [3]. Diketahui bahwa jenis rele arus lebih yang digunakan pada STG di PT. Linde Gresik ini adalah rele *inverse time phase overcurrent with voltage control/restraint* (ANSI 51V).

H. Rele Eksitasi Lebih (24)

Tugas utama relai eksitasi lebih pada pembangkit adalah untuk melindungi peralatan pembangkit dari timbulnya eksitasi lebih, baik pada stator maupun pada transformator *step-up*. Eksitasi lebih dapat terjadi pada saat *start up* ataupun pada saat putaran rendah. Eksitasi lebih memberikan dampak pemanasan yang selanjutnya dapat mengakibatkan kerusakan isolasi pada belitan stator maupun transformator. Eksitasi lebih pada generator akan terjadi pada kondisi rasio V/Hz yang diterapkan pada terminal generator melebihi 1,05 pu (*generator base*), sedangkan eksitasi lebih pada



Gambar 16. Koordinasi *Setting* Eksisting Rele 24.



Gambar 17. Koordinasi Akhir *Setting* Rele 24.

transformator generator terjadi pada kondisi rasio V/Hz pada sisi sekunder (*high voltage*) melebihi 1,05 pu (*transformator base*) dengan kondisi beban penuh dan power factor 0,8, dan 1,1 pu pada kondisi tidak berbeban (*IEEE Std C37.102-2006*). Hal utama yang harus diperhatikan dari pengaman eksitasi lebih ini yaitu adanya kemungkinan eksitasi V/Hz yang melebihi kapabilitas generator.

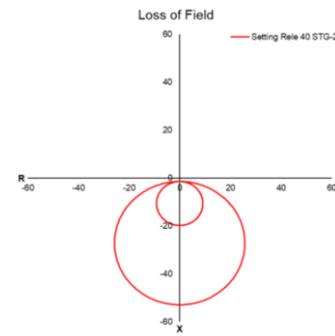
I. *Intertrip dan Interlock Rele*

Sistem proteksi intertrip dan interlock merupakan suatu jenis rekayasa ilmiah pada sistem tenaga listrik yang dilakukan dengan sengaja untuk dapat menghasilkan koordinasi antara rele proteksi yang sesuai dengan yang diharapkan. Intertrip dan interlock rele bisa dilakukan dengan cara mengkoordinasikan dua atau lebih rele yang berbeda jenis kerjanya untuk dapat bekerja dalam waktu yang relatif sama.

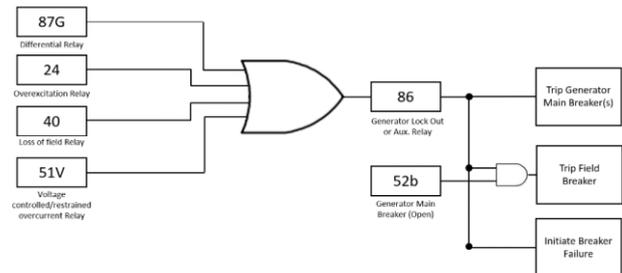
Dari Gambar 4 dapat diambil sebuah simpulan bahwasannya diagram logika pada sistem proteksi tidak lain bertujuan untuk menggambarkan tentang urutan kerja sistem proteksi yang koordinatif dalam melindungi peralatan yang diamankan seperti pada kurva yang ditunjukkan Gambar 5 [4-5].

J. *Rele Arus Medan Hilang (40)*

Salah satu rele yang digunakan pada sistem proteksi internal generator PT. Linde Gresik adalah rele arus medan hilang/ loss of field (40). Secara fungsi, relai arus medan hilang bertugas untuk mengamankan generator dari pemanasan lebih pada ujung-ujung lilitan stator dan rotor generator oleh kondisi asinkron karena arus eksitasi generator tidak cukup (untuk mempertahankan kondisi sinkron). Eksitasi dapat hilang karena terbukanya *circuit breaker* secara tidak sengaja, dan *open circuit* atau *short circuit* pada belitan



Gambar 18. *Setting* Rele 40 STG-2.



Gambar 19. Usulan Diagram Logic Interlock Rele STG-2 PT. Linde Gresik.

medan. Kehilangan eksitasi dapat merusak mesin dan merusak pengoperasian sistem. Ketika generator sinkron kehilangan eksitasi, maka generator sinkron akan bertindak sebagai generator induksi: generator beroperasi di atas kecepatan normal, dan menerima eksitasi (VAR) dari sistem. Kejadian tersebut dapat mengakibatkan kerusakan termal apabila terjadi terus menerus seperti yang ditunjukkan Gambar 6 [5].

III. SISTEM KELISTRIKAN PT. LINDE GRESIK

A. *Sistem Kelistrikan PT. Linde Gresik*

Linde Gresik memiliki enam generator penyuplai energi listrik dalam proses produksinya. Sistem kelistrikan PT. Linde Gresik pada dasarnya menggunakan konfigurasi radial. Namun, pada sistem ini juga bisa dioperasikan secara ring bus dengan cara memparalelkan kinerja dari dua transformator yang memiliki tipikal spesifikasi yang sama. Namun pada realitanya hanya transformator 11/3.3 kV saja yang diparalelkan pada sistem tersebut, sedangkan transformator 11/0.4 kV tidak diparalelkan, serta air reactor 1 kondisi *normally open*, dikarenakan mempertimbangkan potensi short circuit yang akan ditimbulkan. Ditambah lagi bahwasannya PT. Linde Gresik ini memiliki beban yang dimiliki oleh pabrik yang berbeda, yaitu PT. Smelting Indonesia menjadi salah satu pelanggan dan sekaligus menjadi beban mayoritas dalam sistem dari PT. Linde Gresik dengan beban yang dimilikinya sebesar ± 30 MW.

Disisi lain sistem PT. Linde Gresik ini memiliki kondisi awal sumber yaitu 2xSTG, 2xCTG, dan PLN sebagai pemasok suplai daya pada beban. Oleh karena itu, penggambaran kondisi singkat yang telah dipaparkan dalam Gambar 7 tersebut akan menjadi *intial condition* yang menjadi dasar pada simulasi nantinya.

B. *Sistem Proteksi Steam Turbine Generator*

Pada PT. Linde Gresik, memiliki beberapa rele yang digunakan sebagai sistem proteksi untuk internal generator.

Adapun beberapa rele yang akan teliti pada Paper ini terdiri dari rele dengan kode 40, 51V, 50/27, 87. Berikut merupakan detail setting dari rele-rele proteksi STG PT. Linde Gresik tersebut sebagai berikut:

1. Beckwith Electric M-3420  
*Phase Differential Current (87G)*  
 Pickup = 0.5 A  
 Time Delay = 5 Cycles  
 Percent Slope = 20%
2. Beckwith Electric M-3420  
*Inverse Time Phase Overcurrent (51V)*  
 Pickup = 4.5 A  
 Time Dial = 2  
 Inverse Time Curves = Beco Inverse  
 Voltage Control = 99
3. Beckwith Electric M-3420  
*Loss of Field (24)*  
*Definite Time 1*  
 Pickup = 120%  
 Time Delay = 30 Cycles  
*Definite Time 2*  
 Pickup = 105%  
 Time Delay = 8160 Cycles  
 Inverse Time  
 Pickup = 105%  
 Time Dial = 6  
 Reset Rate = 999  
 Inverse Time Curves = #2
4. Beckwith Electric M-3420  
*Loss of Field (40)*  
 #1  
 Circle Diameter = 18.3 Ω  
 Offset = -1.5 Ω  
 Time Delay = 10 Cycles  
 #2  
 Circle Diameter = 51.4 Ω  
 Offset = -1.5 Ω  
 Time Delay = 25 Cycles

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### A. Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Linde Gresik

Dalam memodelkan sistem kelistrikan PT. Linde Gresik dilakukan dengan cara menggambarkan single line diagram menggunakan ETAP Power Station Software. Pemodelan simulasi sistem kelistrikan ini dilakukan dengan menyesuaikan data peralatan yang ada pada sistem tersebut. Setelah dilakukan pemodelan sistem kelistrikan, selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya dengan asumsi pembebanan sebesar ±32.5 MW untuk memastikan sistem dalam keadaan stabil dan berjalan dengan baik.

##### B. Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat

Data arus gangguan hubung singkat merupakan salah satu parameter yang dibutuhkan baik dalam penentuan *setting* rele proteksi arus lebih maupun rele proteksi diferensial. Adapun data arus gangguan hubung singkat yang diperlukan meliputi data arus hubung singkat minimum dan arus hubung singkat maksimum. Arus hubung singkat maksimum merupakan arus hubung singkat tiga fasa sedangkan arus hubung singkat minimum merupakan arus hubung singkat antar fasa (*line to*

*line*) [6]. Arus hubung singkat minimum merupakan arus hubung singkat *line to line* yaitu saat arus dalam keadaan *steady state (30 cycle)* pada kondisi pembangkitan minimum. Kondisi pembangkitan minimum pada PT. Linde Gresik merupakan kondisi sistem kelistrikan dengan empat generator aktif dan PLN. Nilai arus hubung singkat minimum ini digunakan untuk *setting* rele OCR 51V ditunjukkan pada Tabel 1.

##### C. Analisis Setting Rele Proteksi Internal Generator

Tujuan sub bab ini yaitu melakukan perhitungan, analisis, serta validasi dari *setting* proteksi yang telah ada (eksisting) untuk dapat diketahui benar atau salahnya. Hal ini penting untuk dilakukan dikarenakan ada kemungkinan bahwa terjadinya kegagalan proteksi internal generator dalam mengisolir gangguan terjadi akibat kesalahan *setting* eksisting sebelumnya. Beberapa rele yang akan dilakukan evaluasi dan perhitungan *setting* antara lain yaitu rele 51 V, 87 G, 24, dan 40 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 [6].

##### D. Proteksi Diferensial Generator (Rele 87G)

Evaluasi *setting* dilakukan dengan melakukan perhitungan rele diferensial berdasarkan data-data generator STG-2 dan data gangguan hubung singkat yang penulis dapatkan pada paper ini. Saat terjadi gangguan hubung singkat L-L-G di sisi internal STG-2, aliran arus akan menuju ke titik gangguan seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

Oleh karena itu, apabila data hubung singkat tersebut dimasukkan kedalam perhitungan pada persamaan yang dapat ditulis sebagai berikut:

Fasa A

$$I_{a1} = \frac{I_{A1}}{CT\ Ratio} \qquad I_{a2} = \frac{I_{A2}}{CT\ Ratio}$$

$$I_{a1} = \frac{1.1}{800/5} \qquad I_{a2} = \frac{2800}{800/5}$$

$$I_{a1} = 0.0069\ Ie \qquad I_{a2} = 17.5\ Ie$$

$$I_d = |I_1 + I_2| \qquad I_r = \frac{|I_1| + |I_2|}{2}$$

$$I_d = |0.0069\ Ie + 17.5\ Ie| \qquad I_r = \frac{|0.0069\ Ie| + |17.5\ Ie|}{2}$$

$$I_d = 17.507\ Ie \qquad I_r = 8.75\ Ie$$

Fasa B

$$I_{b1} = \frac{I_{B1}}{CT\ Ratio} \qquad I_{b2} = \frac{I_{B2}}{CT\ Ratio}$$

$$I_{b1} = \frac{0.83}{800/5} \qquad I_{b2} = \frac{2700}{800/5}$$

$$I_{b1} = 0.0052\ Ie \qquad I_{b2} = 16.87\ Ie$$

$$I_d = |I_1 + I_2| \qquad I_r = \frac{|I_1| + |I_2|}{2}$$

$$I_d = |0.0052\ Ie + 16.87\ Ie| \qquad I_r = \frac{|0.0052\ Ie| + |16.87\ Ie|}{2}$$

$$I_d = 16.88\ Ie \qquad I_r = 8.44\ Ie$$

Fasa C

$$I_{c1} = \frac{I_{C1}}{CT\ Ratio} \qquad I_{c2} = \frac{I_{C2}}{CT\ Ratio}$$

$$I_{c1} = \frac{0.17}{800/5}$$

$$I_{c2} = \frac{0}{800/5}$$

$$I_{c1} = 0.001 Ie$$

$$I_{c2} = 0 Ie$$

$$Id = |I_1 + I_2|$$

$$I_r = \frac{|I_1| + |I_2|}{2}$$

$$Id = |0.001 Ie + 0 Ie|$$

$$I_r = \frac{|0.001 Ie| + |0 Ie|}{2}$$

$$Id = 0.001 Ie$$

$$I_r = 0.0005 Ie$$

Dari Gambar 10 maka dapat disimpulkan bahwa rele 87G bekerja dengan sesuai. Adapun rinciannya adalah fasa A (titik merah) dan fasa B (titik kuning) yang terindikasi mengalami gangguan berada di zona operasi dari rele diferensial, sedangkan fasa C (titik hijau) yang tidak mengalami gangguan berada diluar zona operasi rele diferensial.

E. Proteksi Generator Arus Lebih dengan penahan/kontrol tegangan (Rele 51V)

1) Pick-up Setting

Sehingga, perhitungan *setting low-set* rele 51V STG-2 dapat ditulis sebagai berikut.

$$1,05 \times 555.7A \leq I_{set} \leq 1,4 \times 555.7 A$$

$$583.5 A \leq I_{set} \leq 778 A$$

Dipilih  $I_{set}$  sebesar 720 A atau  $1.3 \times FLA$ .

Setelah didapatkan nilai  $I_{set}$ , maka berdasarkan buku panduan *M3425A Generator Protection Beckwith Electric* perlu dilakukan pengaturan tap dengan membandingkan nilai  $I_{set}$  dengan rasio belitan dari CT (CT Ratio). Adapun kemudian perhitungan tersebut dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT Ratio}$$

$$Tap = \frac{720 A}{160}$$

$$Tap = 4.5$$

2) Time Dial Setting

Dari Gambar 11 kita dapat melihat bahwasanya rele R P2.CF1.F4 memiliki *setting* eksisting yang kurang sesuai dengan seharusnya. Hal tersebut dikarenakan, rele 51 V R P2.CF1.F4 tidak mampu melindungi *damage curve generator* STG-2 secara sempurna. Oleh karena itu, untuk memaksimalkan fungsi dari rele 51 V R P2.CF1.F4 time dial dapat diatur hingga dapat melindunginya.

Sehingga, berdasarkan pertimbangan diatas dipilihlah time dial bernilai 1.7. Pada Gambar 12 merupakan kurva TCC dari hasil *resetting* rele 51 V.

3) Voltage Control

Diketahui bahwa, kontrol tegangan biasanya disetting dalam rentang 70% hingga 90% dari tegangan nominal. Sehingga, perhitungan *setting* tegangan rele 51V STG-2 dapat ditulis pada persamaan sebagai berikut:

$$70\% \times V_{nominal} \leq V_{set} \leq 90\% V_{nominal}$$

$$70\% \times 11000 V \leq V_{set} \leq 90\% \times 11000 V$$

$$7700 V \leq V_{set} \leq 9900 V$$

Maka dipilih  $V_{set}$  sebesar 9900 V

F. Identifikasi Permasalahan Pasca Mitigasi

Tujuan dari identifikasi masalah ini yaitu untuk membuktikan terjadinya kerusakan pada internal STG akibat gangguan hubung singkat seperti yang ditunjukkan Gambar 13. Pada sub bab ini akan dipaparkan perihal kondisi atau respon pada sistem kelistrikan PT. Linde Gresik pasca mitigasi (CB open). Pada Paper kali ini studi hanya dikhususkan untuk internal STG (STG-1 dan STG-2) dengan gangguan hubung singkat terjadi pada bus P2.CG3 seperti yang ditunjukkan Gambar 14 dan Gambar 15. Kemudian, beberapa saat setelah gangguan terjadi maka CB STG-2 atau CB P2.CF1.F5 akan bekerja (*Action to Open*).

G. Proteksi Generator dari Eksitasi Lebih (Rele 24)

Analisis *setting* rele 24 kali ini dilakukan dengan cara melakukan *software* bantuan excel untuk melakukan plotting terhadap beberapa data kapabilitas eksitasi generator berdasarkan standard *IEEE Std. C37.102-2006* dan *Instruction Book of M-3425A Generator Protection*. Kemudian untuk mengetahui *setting* eksisting rele 24 sudah sesuai standard atau tidak maka dilakukan plotting data *setting* eksisting untuk mendapatkan analisis yang komprehensif.

Dari Gambar 16 kita dapat mengetahui bahwasannya *setting* eksisting rele 24 tidak sesuai dengan standard yang semestinya. *Setting* tersebut tidak dapat melindungi kapabilitas eksitasi generator apabila terjadi gangguan. Oleh karena itu Time Dial yang dipilih pada kurva inverse tersebut adalah:

$$Time Dial = 1$$

Kemudian kita dapat mengetahui bahwasannya kurva Definite Time 2 atau DT 2 (dengan garis orange) tidak berfungsi sehingga kurva tersebut dapat dinon-aktifkan atau *disabled* seperti yang ditunjukkan Gambar 17.

H. Proteksi Generator dari Kegagalan Eksitasi (Rele 40/Arus Medan Hilang)

1) Zone #1

Circle Diameter :

Diameter dari lingkaran terkecil (#1) diatur pada 1.0 pu dari impedansi pada basis mesin/generator. Penurunan rumus menjadi seperti berikut.

$$Z_{base} = \frac{kv^2}{MVA} \times \frac{nCT}{nVT} \times X_{p.u.}$$

$$Z_{base} = \frac{11^2}{10.588} \times \frac{160}{100} \times 1$$

$$Z_{base} = 18.285 \text{ ohm}$$

Offset :

Disini, baik elemen-elemen offset mho #1 dan #2 diatur dengan rumus  $-Xd' \div 2$ , dimana  $Xd'$  adalah reaktansi transient sumbu langsung (*direct axis*) dari generator. Maka, perhitungan dapat ditulis sebagai berikut:

$$X_{offset}(p \cdot u) = -Xd' \div 2 \quad X_{offset}(\Omega) = X_{offset}(p \cdot u) \times Z_{base}$$

$$X_{offset}(p \cdot u) = -0.164 \div 2 \quad X_{offset}(\Omega) = -0.082 \times 18.285$$

$$X_{offset}(p \cdot u) = -0.082 p \cdot u \quad X_{offset}(\Omega) = -1.5 \Omega$$

Time Delay :

Time delay singkat yang disarankan adalah sekitar 0.1 s (5 cycles), hal ini direkomendasikan untuk mencegah kegagalan akibat gangguan transien [5]. Maka time delay yang dipilih adalah sebagai berikut.

$T_d = 10$  Cycles

2) Zone #2

Circle Diameter :

Diameter dari lingkaran terbesar (#2) diatur sama dengan  $X_d$ , dimana  $X_d$  merupakan (*unsaturated*) reaktansi sumbu langsung (*direct axis*) dari mesin/generator. Penurunan rumus menjadi seperti berikut:

$$X_d = 2.81 \text{ p.u}$$

$$Z_{base} = \frac{kv^2}{MVA} \times \frac{nCT}{nVT} \times X_{p.u.}$$

$$Z_{base} = \frac{11^2}{10.588} \times \frac{160}{100} \times 2.81$$

$$Z_{base} = 51.4 \text{ ohm}$$

Offset :

Disini, baik elemen-elemen offset mho #1 dan #2 diatur dengan rumus  $-X_d' \div 2$ , dimana  $X_d'$  adalah reaktansi transient sumbu langsung (*direct axis*) dari generator. Maka, perhitungan dapat ditulis sebagai berikut:

$$X_{offset}(p \cdot u) = -X_d' \div 2 \quad X_{offset}(\Omega) = X_{offset}(p \cdot u) \times Z_{base}$$

$$X_{offset}(p \cdot u) = -0.164 \div 2 \quad X_{offset}(\Omega) = -0.082 \times 18.285$$

$$X_{offset}(p \cdot u) = -0.082 \text{ p.u} \quad X_{offset}(\Omega) = -1.5 \Omega$$

Time delay singkat yang disarankan adalah sekitar 0.5 s (25 cycles), hal ini direkomendasikan untuk mencegah kegagalan akibat kondisi ayunan daya (*power swing condition*) seperti yang ditunjukkan Gambar 18 [5]. Maka time delay yang dipilih adalah sebagai berikut:

$$T_d = 25 \text{ Cycles}$$

### I. Intertrip dan Interlock Sistem Proteksi

Berdasarkan analisis dan evaluasi rele-rele internal generator di atas maka dapat disimpulkan bahwa sebagian besar *setting* rele proteksi tersebut bekerja dengan baik dikarenakan telah sesuai dengan standard. Namun, khusus rele eksitasi lebih 24 terdapat misoperasi dari pada rele tersebut. Sehingga, untuk menghindari kesalahan sistem proteksi akibat gangguan serupa terjadi. Diusulkan untuk dilakukan intertrip dan interlock sistem proteksi seperti yang ditunjukkan Gambar 19.

Berdasarkan Gambar 19 dapat diketahui bahwa diketahui bahwa apabila rele diferensial 87, rele eksitasi lebih 24, rele hilang medan 40, dan OCR 51V. Kemudian salah satunya membaca adanya gangguan, maka rele tersebut akan memberikan sinyal output kepada *lock out relay* 86 untuk selanjutnya rele 86 memberikan perintah untuk membuka *main circuit breaker* generator STG-2. Maka dari itu, rele internal generator bisa disimpulkan bekerja secara *intertrip*. Sementara itu, apabila *main* CB STG-2 telah open, maka dilanjutkan dengan bekerjanya *circuit breaker* pada *field*/medan eksitasinya. Sehingga, dengan begitu generator STG-2 akan terlindungi dan dapat terisolir baik dari gangguan eksternal maupun gangguan internal. Maka dari itu, jenis koordinasi antara *main* CB STG-2 dengan *field*

*circuit breaker* adalah sistem interlock.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis perhitungan *setting* rele internal *steam turbine generator* PT. Linde Gresik akibat titik gangguan yang terjadi pada panel *voltage transformer*, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut : (1) Analisis dan evaluasi yang dilakukan pada rele diferensial generator (87G) pada saat gangguan terjadi menunjukkan rele diferensial generator (87G) bekerja dengan baik dan tidak terdapat indikasi kesalahan *setting* pada kondisi eksistingnya. (2) Analisis dan evaluasi yang dilakukan pada rele OCR 51V menunjukkan bahwa perlu sedikit perubahan *setting* khususnya pada time dial rele OCR 51 V dari time dial : 2 menjadi time dial : 1.7. (3) Pada saat terjadi gangguan hubung singkat L-L-G, rele yang berkerja untuk menghilangkan gangguan tersebut adalah rele diferensial generator (87G) dan bukanlah rele OCR 51 V, dikarenakan rele diferensial generator (87G) memiliki *setting* waktu trip lebih cepat (0.1s) dari pada rele OCR 51 V (0.639s). (4) Meskipun kontak *circuit breaker* STG-2 berhasil open, namun hubung singkat masih tetap ‘menempel’ pada panel *voltage transformer* STG-2. Sehingga mengakibatkan tegangan tetap drop hingga 0 volt. Dan mengakibatkan arus eksitasi pada sisi internal STG-2 meningkat drastis hingga 3000 A akibat kesalahan operasi dari AVR. Hal tersebut, mengakibatkan terjadi eksitasi terus menerus pada generator sehingga mengakibatkan *overheating* dan kegagalan pada STG-2. (5) Analisis dan evaluasi yang dilakukan pada rele eksitasi lebih (24) menunjukkan bahwa terdapat indikasi kegagalan trip akibat kesalahan *setting* pada rele eksitasi lebih (24), sehingga perlu dilakukan perubahan *setting* dikarenakan sudah tidak sesuai dengan standard. (6) Analisis dan evaluasi yang dilakukan pada rele hilang medan (40) menunjukkan bahwa tidak terdapat indikasi kesalahan *setting* pada rele hilang medan (40), sehingga tidak perlu dilakukan perubahan *setting* pada kondisi eksistingnya. (7) Indikasi terbesar kegagalan yang terjadi pada STG-2 yaitu, tidak adanya koordinasi yang tepat antara rele diferensial 87G sebagai proteksi utama dengan rele eksitasi lebih 24 maupun rele medan hilang 40. Sehingga, apabila gangguan serupa terjadi maka perlu dilakukan rekayasa intertrip dan interlock pada sistem proteksi tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Gonen, *Modern Power System Analysis*. Broken Sound Parkway NW: CRC Press, 2013.
- [2] P. T. PLN, “Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali,” PT. PLN, Jakarta, 2013.
- [3] P. M. Anderson, *Power System Protection*. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [4] M. Thompson, “The Power of Modern Relays Enables Fundamental Changes in Protection and Control System Design,” in *2007 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2007, pp. 71–84.
- [5] C. J. Mozina *et al.*, “Coordination of Generator Protection with Generator Excitation Control and Generator Capability,” in *Conference Record of 2008 54th Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 2008, pp. 62–76.
- [6] M. Pujiantara and N. Adi Brahmantia Putra, “Evaluasi koordinasi proteksi pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan dengan mempertimbangkan integrasi PLN,” *SinarFe7*, vol. 2, no. 1, pp. 509–515, 2019.

