

Setting Differential Relay Transformer (87T) dengan Pertimbangan Vector Group pada PLTU Tenayan 2x110 MW

¹Margo Pujiantara, ²Teuku Rizki Firdausi, ³Vincentius Raki Mahindara, ⁴Vita Lystianingrum

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

¹margo@ee.its.ac.id, ²rizkifirdausi0806@gmail.com, ³vmahindara@gmail.com, ⁴vita@ee.its.ac.id

Article Info

Article history:

Received November 27th, 2020

Revised December 19th, 2020

Accepted January 27th, 2021

Keyword:

Differential Relay
Vector Group
Transformer
Electrical System of PLTU
Tenayan
ETAP 12.6.0

ABSTRACT

PT. Pembangkitan Jawa Bali (PJB) Unit Bisnis Jasa Operasi dan Pemeliharaan (UBJOM) PLTU Tenayan has protection equipment that serves as a support for power generation activities. One of the main protections used on PLTU Tenayan is differential relay transformer (87T). This Differential relay serves to protect main transformers from interference and work quickly and selectively in breaking interruptions. In electrical systems PLTU Tenayan, the main transformer and transformer UAT have a vector group configuration, thus causing the current flowing on both sides of the transformer will be different, and the current perceived by CT on both sides of the transformer will be different, so that the relay operates without any interference. On 9 December 2018, there was a trip on the generator Unit 1 PLTU Tenayan, causing blackout. This incident was allegedly due to lightning strikes on the transmission side of 150 kV. In this research will be conducted analysis of differential relay transformer (87T) with the consideration of vector group on PLTU Tenayan 2x110 MW. Research method with simulation using ETAP software 12.6.0. The results of the analysis of the simulations and calculations in the value of Idiff 1.5 Ie and slope of 120%, this value will be used for the setting differential relay transformer. From the test results obtained that differential relay transformer only works when internal disruption only and does not operate when external interference. So differential relay transformer (87T) safe from fault trip and operation fault.

Copyright © 2021 Jurnal FORTECH.
All rights reserved.

Abstrak—PT. Pembangkitan Jawa Bali (PJB) Unit Bisnis Jasa Operasi dan Pemeliharaan (UBJOM) PLTU Tenayan memiliki peralatan proteksi yang berfungsi sebagai penunjang kegiatan pembangkitan listrik. Salah satu proteksi utama yang digunakan pada PLTU Tenayan adalah *differential relay transformer* (87T). *Differential relay* ini berfungsi melindungi *main* transformator dari gangguan dan bekerja dengan cepat dan selektif dalam memutus gangguan. Pada sistem kelistrikan PLTU Tenayan, *main* transformator maupun transformator UAT memiliki konfigurasi *vector group*, sehingga menyebabkan arus yang mengalir pada kedua sisi transformator akan berbeda, dan arus yang dirasakan oleh CT pada kedua sisi transformator akan berbeda pula, sehingga *relay* beroperasi tanpa adanya gangguan. Pada tanggal 9 Desember 2018, terjadi *trip* pada generator unit 1 PLTU Tenayan, sehingga menyebabkan *blackout*. Kejadian ini diduga akibat sambaran petir di

sisi transmisi 150 kV. Pada penelitian ini akan dilakukan analisis *setting differential relay transformer* (87T) dengan pertimbangan *vector group* pada PLTU Tenayan 2x110 MW. Metode penelitian dengan simulasi menggunakan *software ETAP 12.6.0*. Hasil analisis dari simulasi dan perhitungan di dapatkan nilai Idiff 1,5 Ie dan slope sebesar 120%, nilai ini akan digunakan untuk *setting differential relay transformer*. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa *differential relay transformer* hanya bekerja ketika gangguan internal saja dan tidak beroperasi ketika gangguan eksternal. Sehingga *differential relay transformer* (87T) aman dari kesalahan *trip* dan kesalahan operasi.

Kata Kunci—*Differential Relay; Vector Group; Transformator; Sistem Kelistrikan PLTU Tenayan; ETAP 12.6.0*

I. PENDAHULUAN

Sistem kelistrikan pada industri dapat dikatakan baik ketika memiliki kontinuitas listrik yang baik. Salah satu faktor untuk menjaga kontinuitas listrik yang baik adalah dengan mencegah terjadinya gangguan. Gangguan sistem kelistrikan dapat diakibatkan oleh kerusakan peralatan, gangguan dari luar sistem kelistrikan, atau kesalahan pengoperasian [1]. Gangguan tersebut dapat dicegah dengan pemasangan sistem proteksi yang tepat. Sistem proteksi kelistrikan harus bekerja dengan cepat untuk mengisolasi gangguan. Selain itu, sistem proteksi kelistrikan harus selektif dalam menghilangkan gangguan, memiliki sensitivitas yang baik, dan memiliki keandalan yang tinggi [2]. Ketika arus gangguan muncul maka sistem proteksi harus mampu untuk memutus arus gangguan dengan cepat sebelum terjadi kerusakan atau kebakaran pada peralatan serta membatasi gangguan tersebut agar tidak meluas ke sistem. Oleh karena itu, sistem proteksi harus di *setting* dengan baik supaya dapat melakukan fungsinya dengan tepat.

Sebagai perusahaan pembangkitan, PT. Pembangkitan Jawa Bali (PJB) Unit Bisnis Jasa Operasi dan Pemeliharaan (UBJOM) PLTU Tenayan memiliki peralatan proteksi yang berfungsi sebagai penunjang kegiatan pembangkitan listrik. Namun, seiring berjalannya waktu, peralatan tersebut perlu dievaluasi ulang demi menjaga fungsi dan selektivitas sistem proteksi tenaga listrik. Tanpa adanya evaluasi secara komprehensif, dikhawatirkan peralatan proteksi justru menyebabkan *fault trip*.

Salah satu proteksi utama yang digunakan di PT. PJB PLTU Tenayan 2x110 MW adalah *differential relay transformer* (87T). *Differential relay* ini berfungsi melindungi *main* transformator dari gangguan dan bekerja dengan cepat dan selektif dalam memutus gangguan. Pada sistem kelistrikan PLTU Tenayan, *main* transformator maupun *Unit Auxiliary Transformer* (UAT) memiliki konfigurasi *vector group*, sehingga menyebabkan arus yang mengalir pada kedua sisi transformator akan berbeda, sehingga arus yang dirasakan oleh CT (*Current Transformer*) pada kedua sisi transformator akan berbeda pula dan menyebabkan *relay* beroperasi tanpa adanya gangguan.

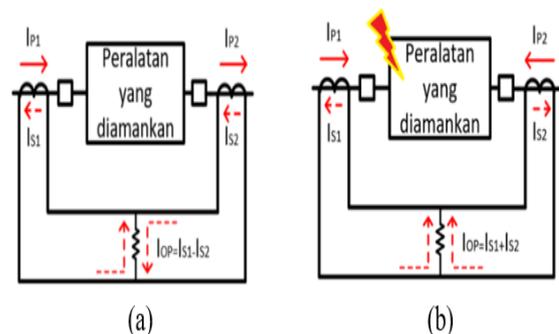
Pada tanggal 9 Desember 2018, terjadi *trip* pada generator unit 1 PT. PJB PLTU Tenayan 2x110 MW, sehingga menyebabkan *blackout*. Kejadian ini diduga akibat sambaran petir di sisi transmisi 150 kV. Kejadian ini memicu adanya *trigger* dari aktifnya fungsi *relay* diferensial.

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan analisis *setting differential relay transformer* (87T) dengan pertimbangan *vector group* pada PLTU Tenayan 2x110 MW. Metode penelitian yang digunakan yaitu dengan simulasi menggunakan *software ETAP 12.6.0*. Hasil analisis dari simulasi tersebut akan digunakan sebagai referensi untuk menentukan *setting differential relay transformer* yang tepat agar sistem proteksi *relay* diferensial (87T) dapat bekerja dengan cepat dan selektif dalam memutus arus gangguan. Sehingga sistem proteksi *relay* diferensial (87T) dapat bekerja dengan cepat dan selektif dalam mengatasi gangguan.

II. DIFFERENTIAL RELAY TRANSFORMER PADA SISTEM KELISTRIKAN

A. Relay Diferensial

Relay diferensial merupakan relay yang memanfaatkan perbandingan arus yang masuk ke *relay*. *Relay* diferensial dapat digunakan sebagai pelindung peralatan seperti generator, bus, transformator dan saluran. *Relay* diferensial akan memerintahkan CB untuk *trip* ketika terjadi gangguan di dalam daerah proteksi *relay* (gangguan internal). Daerah proteksi *relay* diferensial dibatasi oleh CT yang digunakan sebagai input *relay*. Pada kondisi normal atau pada saat terjadi gangguan di luar daerah proteksi *relay* (gangguan eksternal), *relay* diferensial tidak akan bekerja dikarenakan penjumlahan arus yang masuk ke *relay* akan sama dengan nol. Pemodelan *relay* diferensial saat kondisi normal dan gangguan internal ditunjukkan pada Gambar 1.

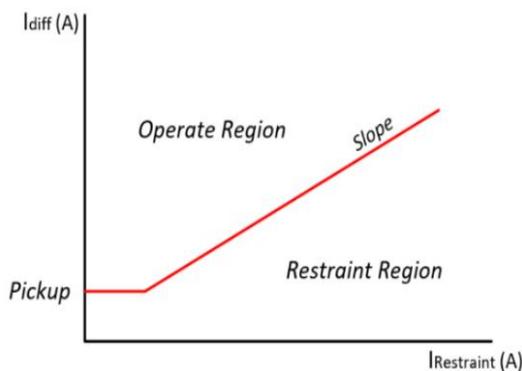


Gambar 1. (a) *Relay* Diferensial Saat Kondisi Normal dan Gangguan Eksternal, (b) *Relay* Diferensial Saat Terjadi Gangguan Internal [3]

Pada saat terjadi gangguan internal, penjumlahan arus yang masuk ke relay akan tidak sama dengan nol. Dalam penentuan setting relay diferensial, terdapat beberapa parameter yang perlu dihitung antara lain: 1.) Arus sekunder CT₁ yang terbaca oleh relay diferensial yang dinamakan dengan I_p, 2.) Arus sekunder CT₂ yang terbaca oleh relay diferensial yang dinamakan dengan I_s, 3.) Selisih arus yang

terbaca oleh relay diferensial yang dinamakan dengan I_{diff} . 4.) Arus maksimum yang terbaca oleh relay diferensial yang dinamakan dengan $I_{restraint}$, dan 5.) Perbandingan arus I_{diff} dan $I_{restraint}$ yang dinamakan dengan *Slope*.

Berdasarkan Gambar 2, garis kurva menunjukkan setting relay diferensial. Daerah diatas kurva merupakan daerah operasi relay diferensial. Pada kondisi ideal, nilai arus saat terjadi gangguan eksternal maupun kondisi normal akan sama dengan nol, tetapi pada kondisi nyata terdapat beberapa error yang dapat menyebabkan arus tidak akan tepat bernilai nol [3]. Oleh karena itu, nilai setting arus pada relay diferensial harus disesuaikan dengan mempertimbangkan setiap kondisi baik kondisi normal, gangguan eksternal maupun gangguan internal peralatan sehingga relay dapat bekerja dengan tepat.



Gambar 2. Kurva Karakteristik Relay Diferensial [3]

B. Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat didefinisikan sebagai suatu hubungan abnormal terjadi secara kebetulan atau disengaja pada sistem tenaga listrik melalui impedansi yang relatif rendah antara dua titik yang mempunyai potensial yang berbeda pada keadaan normal [4]. Gangguan hubung singkat dalam sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi 2 jenis, yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tidak simetri (*asimetri*). Contoh dari gangguan hubung singkat simetri adalah hubung singkat 3 fasa, sedangkan hubung singkat tidak simetri (*asimetri*) yaitu hubung singkat satu fasa ke tanah, hubung singkat dua fasa, hubung singkat dua fasa ke tanah, dan hubung singkat tiga fasa ke tanah [5]. Gangguan hubung singkat menyebabkan kenaikan nilai arus yang dapat membahayakan peralatan listrik.

C. Perhitungan Arus Hubung Singkat

Sebelum melakukan perhitungan pada *setting* proteksi relay diferensial, perlu dilakukukan perhitungan arus hubung singkat. Perhitungan arus hubung singkat dapat dilakukan

dengan menggunakan rumus berikut [6].

- 1) Hubung singkat 3 fasa terjadi ketika ketiga fasanya terhubung, sehingga akan mengalir arus yang sangat besar. Hubung singkat 3 fasa juga disebut dengan arus hubung singkat maksimum. Dalam hal ini V_{LN} adalah tegangan fasa ke netral dan Z_1 adalah impedansi urutan positif.

$$I_{sc\ 3\ \phi} = \frac{V_{LN}}{Z_1} \tag{1}$$

- 2) Hubung singkat 2 fasa terjadi ketika dua fasa yang saling terhubung. Arus hubung singkat 2 fasa biasanya disebut dengan arus hubung singkat minimum karena dipengaruhi oleh banyaknya jumlah impedansi. Dalam hal ini V_{LL} adalah tegangan fasa ke fasa, Z_1 adalah impedansi urutan positif, dan Z_2 adalah impedansi urutan negatif.

$$I_{sc\ 2\ \phi} = \frac{V_{LL}}{Z_1 + Z_2} \tag{2}$$

- 3) Hubung singkat 1 fasa ke tanah terjadi apabila salah satu fasa terhubung ke tanah. Hubung singkat satu fasa ke tanah ini sangat dipengaruhi oleh jenis *grounding* yang digunakan. Dalam hal ini V_{LN} adalah tegangan fasa ke netral, Z_1 adalah impedansi urutan positif, Z_2 adalah impedansi urutan negatif, Z_0 adalah impedansi urutan nol, dan Z_R adalah impedansi pada pentanahan.

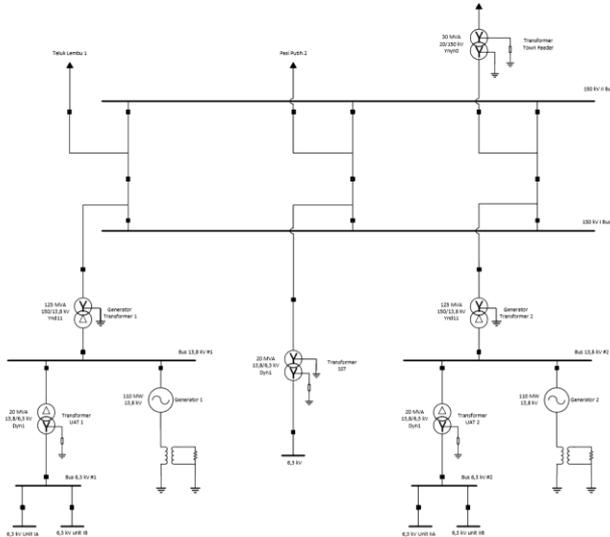
$$I_{sc\ 1\ \phi} = \frac{3V_{LN}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_R} \tag{3}$$

D. Sistem Kelistrikan PLTU Tenayan 2x110 MW

Sistem kelistrikan pada PLTU Tenayan 2x110 MW terdiri dari 2 unit generator dengan kapasitas 110 MW, *main* transformator dengan kapasitas 125 MVA, *Unit Auxiliary Transformer* (UAT) dengan kapasitas 20 MVA, *Station Service Transformer* (SST) dengan kapasitas 20 MVA, dan beban listrik lainnya yang terhubung dengan baik. Pada sistem kelistrikan PLTU Tenayan terdapat 4 level tegangan yang berbeda yaitu 0,4 kV, 6,3 kV, 13,8 kV, dan 150 kV. Sistem kelistrikan PLTU Tenayan 2x110 MW menggunakan konfigurasi radial. Sistem kelistrikan PLTU Tenayan 2x110 MW dapat dilihat pada Gambar 3.

Sistem distribusi di PLTU Tenayan 2x110 MW menggunakan 3 level tegangan yang berbeda yaitu 0,4 kV, 6,3 kV, 13,8 kV, dan 150 kV. Tegangan 0,4 kV dan 6,3 kV digunakan untuk kebutuhan beban internal dan beban

berkapasitas kecil. Tegangan 13,8 kV digunakan sebagai keluaran generator. Tegangan 150 kV digunakan untuk suplai ke grid PLN. Beban-belan yang ada di PLTU Tenayan 2x110 MW terdiri dari beban motor induksi dan *lumped load*. Beban-belan motor biasanya berfungsi sebagai penggerak pompa untuk pengisi air ketel, penggerak pompa air pendingin kondensor, penggerak penggiling batu-bara, dan lainnya.



Gambar 3. Single Line Diagram PLTU Tenayan 2x110 MW

E. Sistem Proteksi Diferensial di PLTU Tenayan 2x110 MW

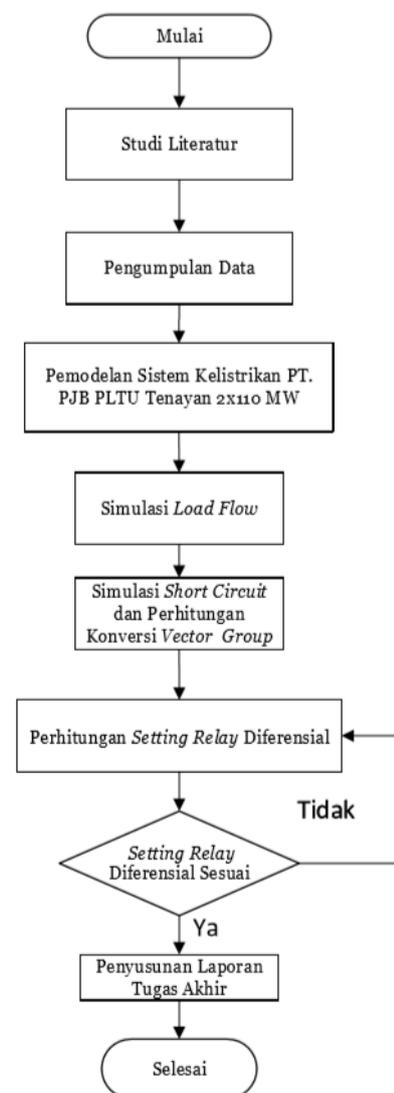
PLTU Tenayan 2x110 MW membutuhkan sistem proteksi untuk melindungi sistem kelistrikan dari gangguan sehingga proses pembangkitan energi listrik tetap berjalan dengan optimal. Salah satu pengaman yang digunakan di PLTU Tenayan 2x110 MW adalah *differential relay transformer* (87T). Data spesifikasi *relay* diferensial dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Spesifikasi *Differential Relay Transformer* (87T) [7]

Setting	Scope (Ie)	Setting Accuracy	Time (ms)
Pickup setting	0,1-1,5	±2,5% or ± 0,002 In	-
Setting of unrestrained	2-14	±2,5%	-
Setting of the first slope	0-0,5	-	-
Setting of the second slope	0,5-0,8	-	-
Operation time	-	-	25
Operation time of unrestrained	-	-	20

III. METODE PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4. Pertama, dimulai dengan studi literatur yaitu dengan mempelajari dasar teori yang berkaitan dengan penelitian, konsep perhitungan, dan cara *setting differential relay transformer* (87T). selanjutnya pengumpulan data, yaitu mengumpulkan data-data terkait dengan sistem kelistrikan PLTU Tenayan 2x110 MW yang meliputi *single line diagram* (SLD), dan data peralatan yang digunakan seperti *rating generator*, *transformator*, *busbar*, *Current Transformer* (CT), kabel, beban, dan juga manufaktur *relay*. Untuk tahap selanjutnya akan dibahas pada subbab selanjutnya.



Gambar 4. Metodologi Penelitian

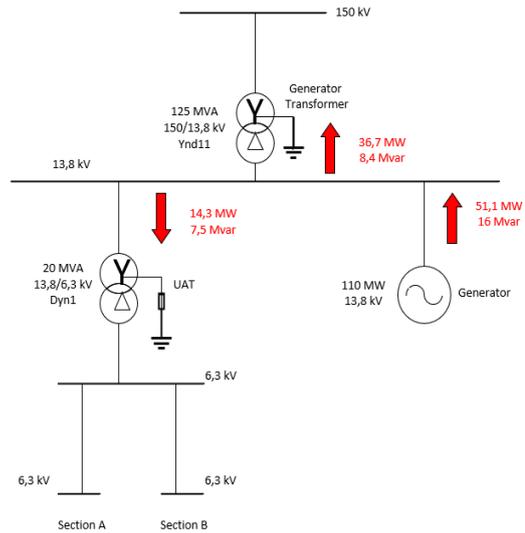
A. *Pemodelan Sistem Kelistrikan PLTU Tenayan 2x110 MW*

Dalam memodelkan sistem kelistrikan PLTU Tenayan 2x110 MW dilakukan dengan cara menggambarkan *single line diagram* menggunakan *software ETAP 12.6.0*. Pemodelan simulasi sistem kelistrikan ini memerlukan data di tiap peralatan sehingga perlu pengumpulan data tiap peralatan. Setelah dilakukan pemodelan pada *software ETAP 12.6.0* selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya untuk memastikan sistem dalam keadaan stabil dan berjalan dengan baik. Dengan analisis aliran daya ini bisa diketahui tegangan pada tiap bus, pembebanan pada tiap transformator, dan juga rugi-rugi daya listrik. Selanjutnya dilakukan simulasi hubung singkat untuk mengetahui besar arus hubung singkat ketika terjadi gangguan sebagai pertimbangan untuk melakukan *setting relay* diferensial.

B. *Aliran Daya (Power Flow)*

Pada sistem kelistrikan PLTU Tenayan 2x110 MW generator membangkitkan daya sebesar 51,1 MW (46,45 % dari rating-nya). Generator juga memberikan daya reaktif sebesar 16 Mvar. Daya yang dibangkitkan oleh generator akan digunakan untuk kebutuhan beban internal di pembangkit dan juga dialirkan menuju grid PLN. Untuk kebutuhan beban internal daya yang dialirkan sebesar 14,3 MW dan 7,5 Mvar, daya ini dialirkan melalui transformator UAT 20 MVA dengan level tegangan 13,8 kV/6,3 kV (*Step Down*). Sedangkan daya yang dialirkan menuju grid PLN sebesar 36,7 MW dan 8,4 Mvar, daya ini dialirkan melalui transformator GT 125 MVA dengan level tegangan 13,8 kV/150 kV (*Step Up*). Listrik yang dialirkan menuju grid PLN memiliki nilai PF (*Power Factor*) sebesar 0,97. Nilai tersebut masih diatas batas minimum yang diizinkan oleh PLN, yaitu 0,85. Ilustrasi aliran daya dapat dilihat pada Gambar 5.

PLTU Tenayan memiliki dua pembangkit dengan kapasitas yang sama, yaitu 110 MW, sehingga total daya yang dibangkitkan sebesar 102,2 MW dan 32 Mvar. Grid PLN menerima daya sebesar 73,4 MW dan 16,8 Mvar dengan PF sebesar 0,97. Sedangkan untuk kebutuhan beban internal secara keseluruhan membutuhkan daya sebesar 28,6 MW dan 15 Mvar.



Gambar 5. Ilustrasi Aliran Daya di PLTU Tenayan 2x110 MW pada Saat Kondisi Normal

C. *Arus Gangguan Hubung Singkat*

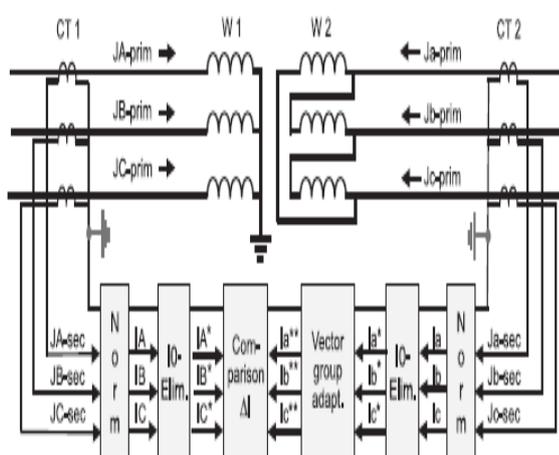
Analisis arus gangguan hubung singkat pada *software ETAP 12.6.0* berfungsi untuk mendapatkan nilai arus saat terjadi gangguan sebagai pertimbangan Ketika melakukan *setting relay* proteksi. Arus hubung singkat yang diperlukan untuk *setting relay* diferensial adalah arus hubung singkat pada kondisi $\frac{1}{2}$ cycle saat terjadi gangguan internal dan eksternal peralatan yang dilindungi. *Relay* proteksi diferensial bekerja sangat cepat dan selektif dengan waktu yang dibutuhkan sekitar 1 cycle (0.01-0.02 s) [8], karena waktu yang sangat singkat tersebut maka arus gangguan yang digunakan dalam *setting* proteksi diferensial adalah arus gangguan pada proteksi subtransient ($\frac{1}{2}$ cycle). Data arus hubung singkat $\frac{1}{2}$ cycle dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Arus Hubung Singkat $\frac{1}{2}$ Cycle

Bus			Arus Hubung Singkat (kA)		
ID	kV	Fasa	L-L-L	L-L	L-G
150 kV I Bus	150	R	28,18	0	29,72
		S	28,18	24,44	0
		T	28,18	24,44	0
Bus 13,8 kV #1	13,8	R	62,82	0	0,02
		S	62,82	56,74	0
		T	62,82	56,74	0
Bus 6,3 kV #1	6,3	R	27,55	0	0,4
		S	27,55	23,87	0
		T	27,55	23,87	0

D. Vector Group dan arus hubung singkat

Pada transformator terdapat hubungan koneksi *wye-delta* dan juga koneksi *vector group*. Variasi *vector group* sangat penting, karena variasi tersebut menyebabkan *lagging* atau *leading* dan perbedaan tegangan pada belitan yang sama [8]. Oleh karena itu, dalam proteksi *relay* diferensial yang dibandingkan adalah arus, sehingga harus di konversi terlebih dahulu supaya tidak menimbulkan kesalahan pembacaan pada *relay*. Untuk membandingkan arus pada sisi primer dan sisi sekunder ada beberapa pertimbangan yang harus diperhatikan. Untuk gambarannya dapat di lihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema Perbandingan Arus dengan Konversi *Vector Group* pada Transformator [9]

Persamaan umum untuk konversi *vector group* diberikan dalam persamaan (4), di mana *k* adalah angka dari *vector group*.

$$\begin{bmatrix} I_{a''} \\ I_{b''} \\ I_{c''} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos[k \cdot 30^\circ] & \cos[(k+4) \cdot 30^\circ] & \cos[(k-4) \cdot 30^\circ] \\ \cos[(k-4) \cdot 30^\circ] & \cos[k \cdot 30^\circ] & \cos[(k+4) \cdot 30^\circ] \\ \cos[(k+4) \cdot 30^\circ] & \cos[(k-4) \cdot 30^\circ] & \cos[k \cdot 30^\circ] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

Setelah konversi *vector group* dilakukan, maka arus dapat dibandingkan antara sisi primer dan sekunder transformator yang digunakan untuk *setting* proteksi *relay* diferensial.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Kondisi Eksisting

Setelah dilakukan pengumpulan data di PT. PJB PLTU Tenayan, terdapat nilai *setting eksisting differential relay transformer* dimana nilai I_{diff} adalah 0,4 I_e , *setting unrestrained instantaneous* adalah 5 I_e , *setting slope 1* adalah

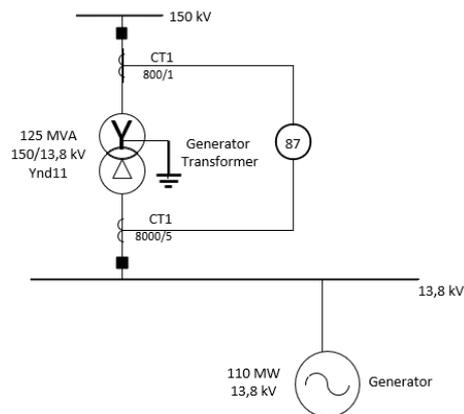
0,1 I_e , dan *setting slope 2* adalah 0,7 I_e . Nilai *setting* ini akan dijadikan acuan untuk melakukan evaluasi apabila *relay* sudah di *resetting*. Data *setting eksisting relay* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data *Setting Differential Relay Transformer* (87T) pada Transformator 125 MVA per Januari 2019

No	Setting Name	Value
1	I_pkp_PcntDiff_Tr	0,40 I_e
2	I_InstDiff_Tr	5,00 I_e
3	Slope1_PcntDiff_Tr	0,10 I_e
4	Slope2_PcntDiff_Tr	0,70 I_e
5	K_harm_PcntDiff_Tr	0,15 I_e
6	TrpLog_Diff_Tr	1A7F

B. Analisis Kondisi Resetting

Differential relay transformer berfungsi untuk mendeteksi dan melindungi dari gangguan internal di dalam daerah *transformer* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Area yang dilindungi adalah *transformer* 125 MVA. *Setting* pada *differential relay transformer* (87T) dapat dilakukan dengan cara perhitungan manual. Parameter yang dihitung antara lain arus yang terbaca pada sekunder CT, selisih arus pada sekunder CT, arus *restraint* pada sekunder CT, dan juga *slope*. Parameter *setting* harus memperhatikan arus diferensial yang melalui *relay* 87T dan *slope* saat kondisi normal dan gangguan hubung singkat di luar daerah pengamanan.



Gambar 7. Skema *Wiring* dan Pemodelan Area Perlindungan *Differential Relay Transformer* (87T) pada transformator 125 MVA

Berdasarkan *manual book I* [7], nilai arus diferensial (I_{diff}) adalah:

$$I_d = |I_p + I_s| \quad (5)$$

Sedangkan untuk menghitung arus *restraint*, berdasarkan *manual book* [7], persamaan yang digunakan adalah:

$$I_{Restraint} = \frac{|I_p| + |I_s|}{2} \tag{6}$$

I_p adalah arus maksimum di sekunder CT₁ di sisi 150 kV, dan I_s adalah arus maksimum di sekunder CT₂ di sisi 13,8 kV.

Tabel 4. Hasil Simulasi dan Perhitungan Untuk Pengujian Setting *Differential Relay Transformer* (87T) Ketika Terjadi Gangguan Kelistrikan

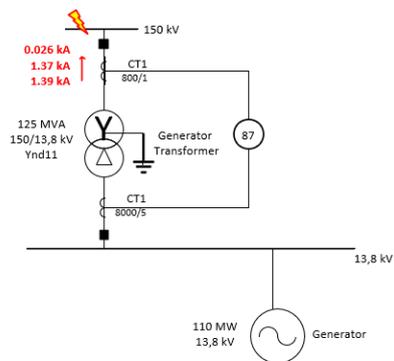
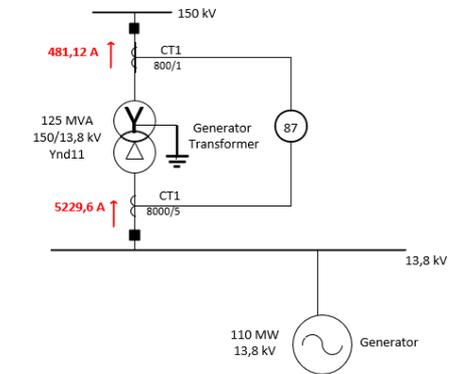
Kasus	I_{Diff} (Ie)	I_{Diff} (%)	$I_{Restraint}$ (Ie)	Slope	Keterangan
Normal	0,115	2,3	0,6288	18,29	Tidak beroperasi
Gangguan eksternal L-L di sisi primer	1,0847	21,69	1,9534	55,53	Tidak beroperasi
Gangguan eksternal 3 fasa di sisi primer	0,376	7,52	2,0642	18,21	Tidak beroperasi
Gangguan eksternal L-G di sisi primer	1,1566	23,13	1,9748	58,56	Tidak beroperasi
Gangguan eksternal L-L di sisi sekunder	1,9366	38,73	3,6713	52,75	Tidak beroperasi
Gangguan eksternal 3 fasa di sisi sekunder	0,7317	14,63	3,9758	18,40	Tidak beroperasi
Gangguan eksternal L-G di sisi sekunder	0	0	0	0	Tidak beroperasi
Gangguan internal L-L di sisi primer	29,6754	593,50	14,837	200	Beroperasi
Gangguan internal 3 fasa di sisi primer	33,8397	676,79	16,919	200	Beroperasi
Gangguan internal L-G di sisi primer	34,1477	682,95	17,073	200	Beroperasi
Gangguan internal L-L di sisi sekunder	3,9775	79,55	1,9887	200	Beroperasi
Gangguan internal 3 fasa di sisi sekunder	4,0378	80,75	2,0189	200	Beroperasi
Gangguan internal L-G di sisi sekunder	0	0	0	0	Beroperasi

Pada kondisi normal arah aliran arus berasal dari generator menuju transformator dan dari transformator menuju grid PLN. Berdasarkan Gambar 8, nilai arus maksimum di sisi primer (150 kV) adalah 481,12 A dan nilai arus maksimum di sisi sekunder (13,8 kV) adalah 5229,6 A. berdasarkan perhitungan, nilai $I_{Restraint}$ yang didapatkan adalah 0,6288 Ie,

nilai I_{diff} yang didapatkan adalah 0,115 Ie (2,3 %), dan nilai slope yang didapatkan adalah 18,29 %.

Ketika terjadi gangguan eksternal antar fasa (L-L) di sisi primer (150 kV) transformator 125 MVA, aliran arus akan menuju ke titik gangguan. Berdasarkan hasil dari simulasi pada Gambar 9, terlihat bahwa fasa yang mengalami gangguan adalah fasa S dan T di sisi primer (150 kV). Dalam hal ini, untuk menghitung arus di sisi sekunder, perlu adanya pertimbangan *vector group* pada transformator, karena mempengaruhi nilai arus hubung singkat di sekunder. Oleh karena itu perlu adanya perhitungan konversi *vector group* pada arus tersebut. Dalam menghitung konversi *vector group*, sisi dengan koneksi *wye* selalu menjadi acuan. Untuk rangkaian transformator dengan *vector group* dapat dilihat pada Gambar 10. Berdasarkan perhitungan, di dapatkan nilai resultan arus *trip* dari proteksi diferensial yaitu $I_{\Delta-R} = -0,0360$, $I_{\Delta-S} = 0,0041$, dan $I_{\Delta-T} = 0,0318$ yang mana semua nilai tersebut mendekati nol. Karena selisih arus adalah 0, maka proteksi diferensial tidak bekerja.

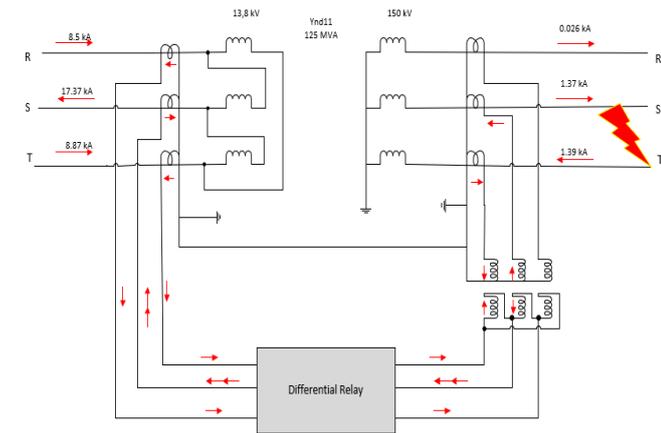
Gambar 8. Skema *Differential Relay Transformer* (87T) pada Transformator 125 MVA Saat Kondisi Normal



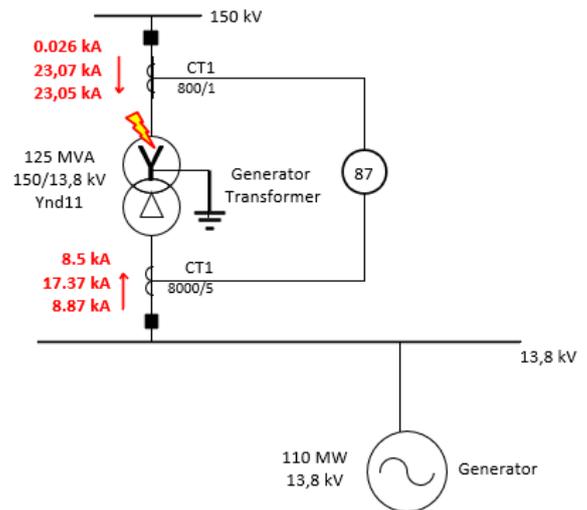
Gambar 9. Skema *Differential Relay Transformer (87T)* Saat Terjadi gangguan Hubung Singkat Eksternal L-L di Sisi Primer (150 kV) Transformator 125 MVA

Dalam *setting relay* diferensial, perhitungan untuk arus dilakukan tiap fasa, karena arus yang mengalir di setiap fasa ketika gangguan akan berbeda, kecuali ketika gangguan 3 fasa. Berdasarkan perhitungan, nilai $I_{restraint}$ yang di dapatkan adalah $1,9534 I_e$, nilai I_{diff} yang di dapatkan adalah $1,0847 I_e$ (21,69 %), dan nilai *slope* yang di dapatkan adalah 55,53 %.

Berdasarkan perhitungan I_{diff} dan *slope* ketika kondisi normal dan gangguan di luar daerah pengamanan baik hubung singkat satu fasa (L-G), antar fasa (L-L) dan 3 fasa (L-L-L) di dapatkan nilai I_{diff} terbesar adalah 38,73 % atau $1,93 I_e$ dan nilai *slope* terbesar adalah 58,56 %. *Relay* diferensial tidak boleh bekerja saat kondisi normal maupun ketika terjadi gangguan di luar zona pengaman *relay* (eksternal). Oleh karena itu, rekomendasi *setting* berdasarkan perhitungan adalah sebagai berikut: 1.) *Setting pickup*, dalam hal ini terdapat dua alternatif, yaitu a.) Memperhatikan error CT, I_{diff} kondisi normal, dan *safety factor*. Di dapatkan hasil perhitungan $I_{diff pickup}$ sebesar $0,173 I_e$ (0,865 A). b.) Berdasarkan I_{diff} terbesar saat kondisi normal dan gangguan eksternal, di dapatkan $0,3873 I_e$. Sehingga *setting pickup* dipilih 150 % I_e (7,5 A). kedua pilihan *setting* tersebut masih dalam batas range dari manufaktur yaitu $0,1 I_e - 1,5 I_e$. Untuk *setting slope* dipilih berdasarkan *slope* terbesar pada saat kondisi normal dan gangguan eksternal, karena itu dipilih *slope* sebesar 120 %.



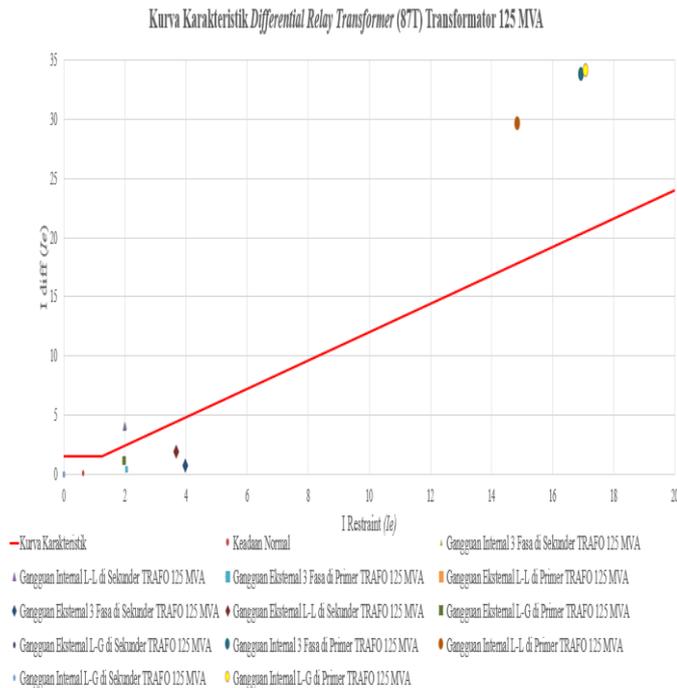
Gambar 10. Rangkaian Transformator 125 MVA dengan *Vector Group Ynd11* Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat Eksternal L-L di Sisi Primer (150 kV)



Gambar 11. Skema *Differential Relay Transformer (87T)* Saat Terjadi gangguan Hubung Singkat Internal L-L di Sisi Primer (150 kV) pada Transformator 125 MVA

Untuk menguji hasil *setting differential relay transformer (87T)* sudah tepat, maka dilakukan pengujian dengan simulasi ketika terjadi gangguan internal pada transformator, yaitu gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah (L-G), antar fasa (L-L), dan tiga fasa (L-L-L). Ketika terjadi gangguan internal antar fasa (L-L) di sisi primer (150 kV) pada transformator 125 MVA, aliran arus akan menuju ke titik gangguan. Berdasarkan hasil dari simulasi pada Gambar 11, terlihat bahwa fasa yang mengalami gangguan adalah fasa S dan T di sisi primer (150 kV).

Saat terjadi gangguan hubung singkat internal antar fasa (L-L) di sisi primer (150 kV) pada transformator 125 MVA, *slope* yang terukur adalah 200 % dan I_{diff} sebesar 593,5 %. Kedua nilai tersebut jauh lebih besar daripada *setting slope* dan I_{diff} yang telah dipilih, yaitu *setting slope* 120 % dan I_{diff} $1,5 I_e$ (150 %). Karena kedua syarat terpenuhi, yaitu kedua nilai *setting* telah terlampaui nilai *pickup*, maka *relay* diferensial akan bekerja dengan memberikan perintah *tripping* pada CB. Sedangkan ketika terjadi gangguan hubung singkat eksternal antar fasa (L-L) di sisi primer (150 kV) transformator 125 MVA, *slope* yang terukur adalah 55,53 % dan I_{diff} sebesar 21,69 %. Kedua nilai tersebut lebih kecil daripada *setting slope* dan I_{diff} yang telah dipilih. Karena nilai tersebut lebih kecil dari nilai *setting* yang dipilih, maka *relay* diferensial tidak akan bekerja ketika gangguan terjadi di luar zona proteksi. Untuk rangkuman hasil pengujian dari simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 12. Kurva Karakteristik *Differential Relay Transformer* (87T) Transformator 125 MVA dengan $I_{diff\ pickup} = 1,5 I_e$

Daerah di atas kurva merupakan daerah kerja *differential relay transformer* (87T). *Relay* diferensial akan bekerja apabila gangguan yang terjadi berada di atas kurva karakteristik *relay*. Berdasarkan Gambar 12, dapat disimpulkan bahwa ketika terjadi gangguan internal pada transformator 125 MVA baik gangguan 1 fasa, 2 fasa maupun 3 fasa, nilai *slope* dan I_{diff} berada di atas kurva *setting slope relay*, dengan kata lain *relay* akan bekerja. Sedangkan ketika terjadi gangguan di luar zona pengaman *relay* diferensial, maka *relay* tidak akan beroperasi, sehingga aman dari kesalahan *trip* dan operasi *relay*. Oleh karena itu, pemilihan setting tersebut sudah sesuai dan bisa di aplikasikan ke *differential relay transformer* (87T).

V. KESIMPULAN

Permasalahan yang terjadi di PLTU Tenayan 2x110 MW adalah *differential relay transformer* beroperasi ketika gangguan eksternal terjadi di sisi 150 kv, sehingga menyebabkan *blackout*. Nilai *setting eksisting* pada *differential relay transformer* yaitu I_{diff} sebesar $0,4I_e$, *setting slope* 1 adalah $0,1 I_e$, dan *setting slope* 2 adalah $0,7 I_e$. Penentuan *setting* baru (*resetting*) *differential relay transformer* (87T) ini telah mempertimbangkan *vector group*,

kondisi normal, kondisi gangguan eksternal dan kondisi gangguan internal daerah proteksi *relay* diferensial. Rekomendasi setting *relay* diferensial yang disarankan adalah $I_{diff\ pickup}$ sebesar $1,5 I_e$ dan *slope* sebesar 120 %, di mana nilai I_{diff} pickup dipilih berdasarkan nilai I_{diff} saat kondisi normal atau nilai I_{diff} yang terbesar. Setelah dilakukan pengujian dengan gangguan antar fasa, tiga fasa, dan satu fasa ke tanah di dalam daerah pengaman *relay*, nilai *slope* dan I_{diff} yang terukur berada di atas nilai *pickup* dan *setting slope* sehingga *relay* bekerja saat gangguan internal dan tidak akan bekerja saat gangguan di luar zona pengaman *relay*.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE Industry Applications Society, "*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*". New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001.
- [2] T. Gonen, "*Modern Power System Analysis*", 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [3] J. L. Blackburn dan T. J. Domin, "*Protective Relaying: Principles and Applications*", 3 ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [4] "*IEC-60909-0 International Standard*". International Electrotechnical Commission, 2001.
- [5] J. D. Glover, T. J. Overbye, dan M. S. Sarma, "*Power system analysis & design*", 6 ed. Boston: Cengage Learning, 2017.
- [6] B. D. Metz-Noblat, F. Dumas, dan G. Thomasset, "*Calculation of short-circuit currents*". Schneider Electric, 2000.
- [7] "*RCS-985A Generator Protection Instruction Manual*". China: NR Electric, 2011.
- [8] S. Slumstrup dan F. F. da Silva, "Differential Protection of Transformers," *Aalborg University*, 2018.

- [9] G. Ziegler, "*Numerical differential protection: principles and applications*", 2 ed. Erlangen: Publicis, 2012.