



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Jalan MT Haryono 167 Telp & Fax. 0341 554166 Malang 65145

KODE  
PJ-01

**PENGESAHAN  
PUBLIKASI HASIL PENELITIAN SKRIPSI  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**NAMA : LUTHFAN BAGUS SAPUTRA**

**NIM : 105060305111001- 63**

**PROGRAM STUDI : TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

**JUDUL SKRIPSI : STUDI EVALUASI SETING RELE PROTEKSI HUBUNG  
SINGKAT TRANSFORMATOR 21 KV/ 512,5 KV TERHADAP  
GANGGUAN HUBUNG SINGKAT 3 FASA DI PT. YTL**

**TELAH DI-REVIEW DAN DISETUJUI ISINYA OLEH:**

**Pembimbing I**

**Pembimbing II**

**Ir. Hery Purnomo, M.T.**  
**NIP. 19550708 198212 1**

**Ir. Teguh Utomo, M.T.**  
**NIP. 19650913 199103 1 003**

**STUDI EVALUASI SETING RELE PROTEKSI HUBUNG  
SINGKAT TRANSFORMATOR 21 KV/512,5 KV TERHADAP  
GANGGUAN HUBUNG SINGKAT 3 FASA DI PT. YTL**

**Publikasi Jurnal Skripsi**



Disusun Oleh :

**LUTHFAN BAGUS SAPUTRA**

**NIM :105060305111001 - 63**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2014**

# STUDI EVALUASI SETING RELE PROTEKSI HUBUNG SINGKAT TRANSFORMATOR 21 kV/512,5 kV TERHADAP GANGGUAN HUBUNG SINGKAT 3 FASA DI PT. YTL

Luthfan Bagus Saputra<sup>1</sup>, Hery Purnomo, Ir., M.T.<sup>2</sup>, Teguh Utomo, Ir., M.T.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, <sup>2,3</sup>Dosen Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jalan MT Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: [luthfanbagus@gmail.com](mailto:luthfanbagus@gmail.com)

**Abstrak**—Gangguan yang paling berbahaya adalah gangguan hubung singkat 3 fasa [1]. Rele pengaman terhadap gangguan hubung singkat yaitu rele proteksi hubung singkat. Rele proteksi dikatakan baik jika rele tersebut bisa mengamankan peralatan listrik terhadap gangguan tersebut, sehingga diperlukan seting rele yang tepat. Pada penelitian ini dihitung seberapa besar arus hubung singkat 3 fasa simetris awal ( $I''_K$ ) yang gangguannya terjadi di sisi tegangan tinggi pada transformator. Dari hasil perhitungan dan analisis seting rele menunjukkan bahwa, rele tersebut tidak bekerja karena syarat rele untuk bekerja tidak terpenuhi. Sehingga transformator tersebut akan menerima arus hubung singkat 3 fasa simetris awal ( $I''_K$ ) sebesar 2,23 kA selama 3 detik. Padahal batas kemampuan transformator untuk menahan lamanya waktu gangguan hubung singkat maksimal selama 2 detik [1]. Maka arus tersebut berpotensi merusak transformator. Jadi seting dari rele tersebut yaitu kurang tepat. Sehingga seting yang tepat untuk rele tersebut yaitu dengan mengubah seting waktu dari 3 detik menjadi 2 detik, hal ini juga sesuai dengan batas kemampuan transformator untuk menahan lamanya waktu gangguan. Jadi dengan mengubah seting, diharapkan dapat mengurangi potensi kerusakan transformator 3 fasa 21 kV/512,5 kV pada pembangkit unit 5 dan 6 di PT. YTL semakin kecil.

**Kata kunci**— hubung singkat, transformator, rele proteksi hubung singkat, arus hubung singkat

## I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton yang berbahan bakar batubara yang merupakan pembangkit listrik terbesar di Asia Tenggara. PT. Yang Tiong Lai (YTL) Jawa Timur berperan dalam pengelolaan jasa penerangan, khususnya untuk wilayah Jawa - Bali melalui jaringan 500 kV Tegangan Ekstra Tinggi (TET).

Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik sangat beragam besar dan jenisnya. Gangguan hubung singkat 3 fasa sering dianggap sebagai gangguan yang paling berbahaya dibanding jenis gangguan hubung singkat yang lainnya [1]. Transformator tersebut memiliki batas kemampuan untuk menahan gangguan arus hubung singkat (*ability to withstand short circuit*) dengan waktu gangguan maksimal selama 2 detik [1]. Transformator 3 fasa tersebut dengan daya 765 MVA dan tegangan hubung singkat dalam persen sebesar 18% memiliki batas kemampuan menahan arus hubung singkat dengan waktu gangguan maksimal 2 detik dengan arus hubung singkat ( $I_F$ ) maksimal 4 kali arus nominal pada transformator [2]. Rele proteksi transformator terdiri dari dua bagian, yaitu rele utama

dan rele *backup*. Rele utamanya yaitu rele proteksi hubung singkat (*short circuit protection relay*). Rele ini berfungsi mengamankan transformator bila terjadi gangguan hubung singkat, dimana saat terjadi gangguan hubung singkat selama lebih dari atau sama dengan 3 detik dan nilai arus hubung singkatnya antara 1,2 kali sampai 10 kali arus nominalnya maka rele tersebut akan memerintahkan pemutus tenaga (*circuit breaker*) untuk membuka [3].

Gangguan hubung singkat pernah terjadi di reaktor yang dipasang di busbar selama 0,1 detik dan arus hubung singkat mengalir dari pembangkit unit 5 dan 6 di PT. YTL ke titik gangguan tersebut. Rele proteksi hubung singkat tidak memerintahkan *circuit breaker* untuk membuka padahal sudah mengidentifikasi adanya gangguan hubung singkat. Karena waktu gangguan hubung singkat yang tidak memenuhi syarat rele untuk bekerja yaitu minimal 3 detik. Pada gangguan tersebut nilai arus gangguan lebih dari 4 kali arus nominal yang merupakan batas toleransi dari transformator untuk menerima arus gangguan hubung singkat. Pada kondisi tersebut transformator terkena gangguan akibat arus gangguannya melebihi kemampuan transformator untuk menahan arus hubung singkat, tetapi transformatornya tidak mengalami kerusakan yang sangat parah. Oleh karena itu, penelitian ini akan diarahkan ke evaluasi seting rele proteksi hubung singkat pada transformator 3 fasa dengan kapasitas 21 kV/512,5 kV di PT. YTL terhadap gangguan hubung singkat 3 fasa.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Transformator

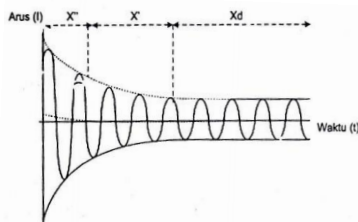
Transformator 3 fasa 21 kV/512,5 kV di PT. YTL memiliki batas kemampuan untuk menahan arus hubung singkat yaitu maksimal 2 detik [1]. Transformator 3 fasa tersebut dengan daya 765 MVA dan tegangan hubung singkat dalam persen sebesar 18% memiliki batas kemampuan menahan arus hubung singkat dengan waktu gangguan maksimal 2 detik dengan arus hubung singkat ( $I_F$ ) maksimal 4 kali arus nominal pada transformator [2].

### B. Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah keadaan tidak normal dimana keadaan ini dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Gangguan didefinisikan sebagai suatu kondisi fisis yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen untuk bekerja sesuai dengan

fungsinya [4]. Gangguan hampir selalu ditimbulkan oleh hubung singkat antar fasa atau hubung singkat fasa ke tanah. Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang tidak disengaja antara dua atau lebih konduktor yang memaksa perbedaan tegangan antara bagian konduktor sehingga nilainya sama atau mendekati nol [5]. Gangguan hubung singkat 3 fasa sering dianggap sebagai gangguan yang paling berbahaya dibanding jenis gangguan hubung singkat yang lainnya [1].

Pada saat terjadi gangguan hubung singkat, akan mengalir arus yang sangat tinggi dengan tiba-tiba dari sumber ke titik gangguan. Gambar 1 merupakan visualisasi dari bentuk gelombang arus hubung singkat. Reaktansi pada beberapa *cycle* pertama sangat kecil dan arus hubung singkatnya tinggi. Reaktansi pada saat ini disebut reaktansi subtransien atau *subtransien reactance* ( $X''_d$ ). Pada umumnya, reaktansi subtransien digunakan untuk menentukan arus awal atau arus hubung singkat simetris awal (*initial symmetrical short-circuit current*) yang mengalir pada saat gangguan hubung singkat terjadi. Beberapa *cycle* kemudian arus hubung singkat cenderung menurun dan reaktansi pada saat ini disebut reaktansi transien atau *transient reactance* ( $X'_d$ ), dan akhirnya kondisinya mencapai *steady state* dan pada saat ini reaktansinya disebut reaktansi sinkron atau *synchronous reactance* ( $X_d$ ).



Gambar 1. Gelombang arus hubung singkat [6]

Akibat dari arus gangguan hubung singkat banyak pengaruh-pengaruh yang tidak diinginkan yang dapat terjadi [7] :

1. Rusaknya perlengkapan yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan oleh arus tak seimbang, atau tegangan rendah yang ditimbulkan oleh hubung singkat.
2. Ledakan-ledakan yang mungkin terjadi pada peralatan yang mengandung minyak isolasi sewaktu terjadinya suatu hubung singkat, dan yang mungkin menimbulkan kebakaran sehingga dapat membahayakan orang yang menanganinya dan merusak peralatan-peralatan yang lain.

### C. Rele sebagai Peralatan Pengaman

Rele merupakan bagian dari peralatan sistem tenaga listrik yang digunakan untuk memberikan sinyal kepada *circuit breaker* supaya untuk memutuskan atau menghubungkan pelayanan penyaluran pada sistem tenaga listrik. Rele ini akan memberikan sinyal kepada

*circuit breaker* untuk memutuskan sistem tenaga listrik jika terjadi gangguan. Syarat-syarat agar rele pengaman dapat dikatakan bekerja dengan baik dan benar, yaitu [8] :

1. Cepat bereaksi.
2. Selektif.
3. Peka atau sensitif.
4. Andal.
5. Sederhana.

### D. Rele Arus Lebih

Proteksi arus lebih adalah proteksi terhadap perubahan parameter arus yang sangat besar dan terjadi pada waktu yang cepat, yang disebabkan oleh hubung singkat. Pada proteksi arus lebih ini, rele akan *pick-up* jika besar arus melebihi nilai seting. Elemen dasar dari proteksi arus lebih adalah rele arus. Proteksi arus lebih meliputi proteksi terhadap gangguan hubung singkat yang dapat berupa gangguan hubung fasa ke tanah serta hubung singkat antar fasa. Proteksi terhadap hubung singkat antar fasa dikenal sebagai proteksi arus lebih dan rele yang digunakan disebut rele arus lebih (*over current relay*). Jika arus gangguan mengalir melalui tanah, gangguan ini disebut gangguan hubung singkat ke tanah dan rele yang digunakan disebut proteksi hubung tanah (*ground fault relay*). Secara umum rele arus lebih ada dua macam yaitu rele thermal beban lebih dan rele proteksi hubung singkat. Prinsip rele arus lebih terdapat tiga macam karakteristik pengamanannya, yaitu [8] :

1. Rele arus lebih seketika (*moment instantaneous*).  
Rele ini akan memberikan perintah trip pada *circuit breaker* pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besar arus hubung singkat ( $I_F$ ) mencapai arus setingnya.
2. Rele arus lebih waktu tertentu (*definite time*).  
Rele ini akan memberikan perintah trip pada *circuit breaker* pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besar arus hubung singkat ( $I_F$ ) mencapai arus setingnya dan jangka waktu kerja rele mulai *pick up* sampai rele kerja diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya  $I_F$  untuk mengerjakan rele untuk bekerja.
3. Rele arus lebih berbanding terbalik (*inverse*).  
Rele ini akan memberikan perintah trip pada *circuit breaker* pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan durasi waktu kerja rele mulai *pick-up* sampai kerja rele diperpanjang berbanding terbalik dengan besarnya arus hubung singkat ( $I_F$ ).

### E. Impedansi Hubung Singkat pada Unit Pembangkit Listrik (S)

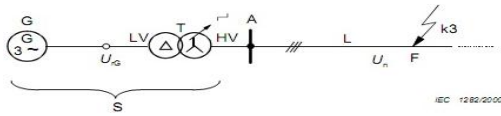
Impedansi hubung singkat pada transformator  $Z_T = R_T + jX_T$  dengan dan tanpa *on-load tap changer* harus dihitung data transformator :

$$Z_T = \frac{U_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rTHV}} \quad (1)$$

$$R_T = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = P_{krT} \times \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rTHV}} \quad (2)$$

$$X_T = \sqrt{Z_{THV}^2 - R_{THV}^2} \quad (3)$$

Dengan  $U_{rT}$  adalah tegangan transformator pada sisi tegangan tinggi (HV) atau sisi tegangan rendah (LV) dalam kilovolt,  $I_{rT}$  adalah arus transformator pada sisi tegangan tinggi (HV) atau sisi tegangan rendah (LV) dalam kiloampere,  $S_{rT}$  adalah daya semu transformator pada sisi tegangan tinggi (HV) atau sisi tegangan rendah (LV) dalam megavoltampere,  $P_{krT}$  adalah total rugi transformator pada belitan dalam megawatt, dan  $U_{kr}$  adalah tegangan hubung singkat dalam persen. Untuk perhitungan arus hubung singkat di unit pembangkit listrik dengan *on-load tap changer*, persamaan berikut untuk impedansi dari seluruh unit pembangkit listrik (S) digunakan untuk hubung singkat pada sisi tegangan tinggi (HV) di unit transformator, ini ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Hubung singkat dari satu unit pembangkit listrik (S) [5]

Rumus untuk menghitung impedansi dari unit pembangkit listrik (S) dengan *on-load tap changer*, yaitu[5]:

$$Z_S = K_S (t_r^2 \times Z_G + Z_{THV}) \quad (4)$$

dengan:

$$Z_G = R_G + j X''_d \quad (5)$$

dan 
$$X''_d = \frac{x''_d}{100\%} \times \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} \quad (6)$$

dengan faktor koreksi :

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{C_{max}}{1 + |x''_d - x_T| \sin \phi_{rG}} \quad (7)$$

Dengan  $Z_S$  adalah impedansi koreksi dari unit pembangkit listrik dengan *on-load tap changer* mengacu pada sisi tegangan tinggi (HV) dalam ohm,  $Z_G$  adalah impedansi subtransien generator dalam ohm,  $Z_{THV}$  adalah impedansi transformator yang berhubungan dengan sisi tegangan tinggi (HV) dalam ohm,  $U_{nG}$  adalah tegangan nominal sistem di titik koneksi *feeder* (Q) pada unit pembangkit listrik (S) dalam kilovolt,  $U_{rG}$  adalah tegangan generator dalam kilovolt,  $S_{rG}$  adalah daya semu generator dalam megavoltampere,  $\phi_{rG}$  adalah sudut fasa antara  $I_{rG}$  dan  $U_{rG}/\sqrt{3}$ ,  $R_G$  adalah resistansi dari generator dalam ohm,  $X''_d$  adalah reaktansi subtransien pada mesin sinkron dalam ohm,  $x''_d$  adalah reaktansi relatif subtransien dari generator yang berhubungan dengan impedansi atau  $x''_d = X''_d / Z_{rG}$  dimana  $Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$  dalam ohm,  $x_T$  adalah reaktansi relatif unit transformator di posisi utama pada *on-load tap changer*,  $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$  dalam ohm,  $t_r$  adalah ratio transformasi pada unit

transformator,  $t_r = U_{rTHV} / U_{rTLV}$ , dan  $c_{max}$  adalah faktor tegangan sesuai Tabel 1[5].

Tabel 1. Faktor tegangan (c) [5]

Tegangan nominal ( $U_n$ )	Faktor Tegangan (c) untuk perhitungan dari	
	Arus hubung singkat maksimum ( $c_{max}$ )	Arus hubung singkat minimum ( $c_{min}$ )
Tegangan rendah 100 V sampai 1000 V	1,05 1,1	0,95
Tegangan menengah >1 kV sampai 35 kV	1,10	1,00
Tegangan tinggi >35 kV		

### F. Perhitungan Arus Hubung Singkat 3 Fasa Simetris Awal ( $\bar{I}''_K$ )

Arus hubung singkat 3 fasa simetris awal atau *initial symmetrical short-circuit current* ( $\bar{I}''_K$ ) adalah nilai efektif pada komponen simetris AC dari calon arus hubung singkat 3 fasa yang berlaku pada saat gangguan hubung singkat [5]. Secara umum,  $\bar{I}''_K$  harus dihitung dengan persamaan (9) pada gangguan di F. Arus  $\bar{I}''_{KS}$  dihitung dengan impedansi hubung singkat pada unit pembangkit listrik (S) dengan *on-load tap changer* berdasarkan persamaan (4), yaitu sebagai berikut:

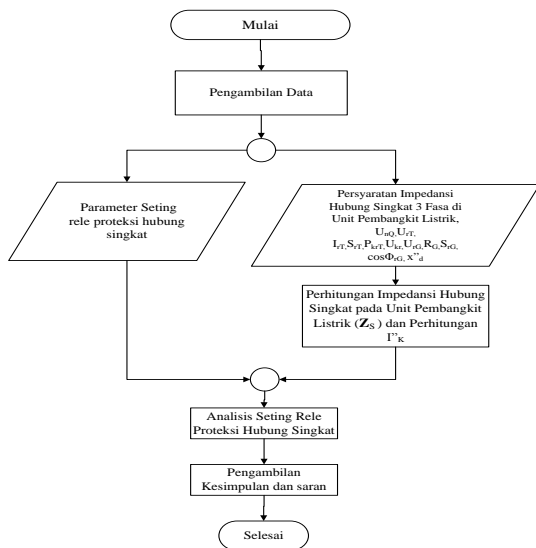
$$\bar{I}''_{KS} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} Z_S} \quad (8)$$

$$\text{sehingga } \bar{I}''_K = \bar{I}''_{KS} \quad (9)$$

Dengan  $U_{nQ}$  adalah tegangan nominal sistem dari *feeder* (Q) dalam kilovolt,  $Z_S$  adalah impedansi dari unit pembangkit listrik (S) dengan *on-load tap changer* dalam ohm,  $\bar{I}''_{KS}$  adalah arus hubung singkat 3 fasa simetris awal di unit pembangkit listrik (S) dengan *on-load tap changer* dalam kiloampere, dan  $\bar{I}''_K$  adalah arus hubung singkat 3 fasa simetris awal dalam kiloampere.

### III. METODE PENELITIAN

Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan penelitian, maka diperlukan untuk menyelesaikan masalah tersebut sesuai dengan Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir metode penelitian

#### IV. PERHITUNGAN dan ANALISIS

Pada penelitian ini, akan diarahkan ke evaluasi seting rele proteksi hubung singkat pada transformator 3 fasa dengan kapasitas 21 kV/512,5 kV di PT. YTL terhadap gangguan hubung singkat 3 fasa. Gangguannya terdapat di sisi tegangan tinggi (HV) transformator. Spesifikasi transformator dan generator pada pembangkit unit 5 dan 6 tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 dan 3 sebagai berikut :

Tabel 2. Spesifikasi transformator penaik tegangan [9]

Daya semu transformator pada sisi HV atau LV ( $S_{rT}$ )	765 MVA
Tegangan transformator pada sisi HV atau LV ( $U_{rT}$ )	512,5 kV / 21 kV
Arus transformator pada sisi HV atau LV ( $I_{rT}$ )	0,862 kA / 21 kA
Frekuensi	50 Hz
Tegangan hubung singkat dalam persen ( $U_{kr}$ )	18 %
Total rugi transformator pada belitan. ( $P_{krT}$ )	1,44 MW
Jumlah fasa	3

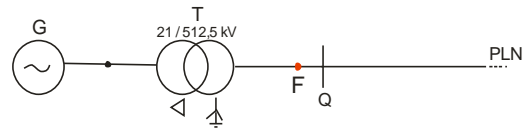
Tabel 3. Spesifikasi generator [9]

Daya semu generator ( $S_{rG}$ )	789 MVA
Tegangan generator ( $U_{rG}$ )	21 kV
Resistansi dari generator ( $R_G$ )	0,0009347 $\Omega$
Reaktansi relatif subtransien ( $x''_d$ )	23,5 %
Sudut fasa antara $I_{rG}$ dan $U_{rG}$ ( $\cos\Phi_{rG}$ )	0,85

Frekuensi	50 Hz
Jumlah fasa	3

#### A. Lokasi Gangguan

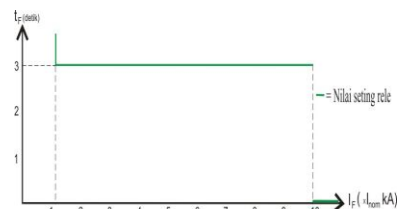
Lokasi gangguan hubung singkat 3 fasa (F) yang dianalisis pada pembangkit unit 5 dan 6 adalah sama yaitu pada sisi tegangan tinggi (512,5 kV) transformator. Karena data pembangkit unit 5 dan 6, dan lokasi gangguan adalah sama. Maka untuk bisa menghitung besarnya arus hubung singkat 3 fasa simetris awal ( $I''_k$ ) pada masing-masing unit, bisa direpresentasikan dengan diagram satu garis pada Gambar 4.



Gambar 4. Lokasi gangguan (F) pada pembangkit unit 5 dan 6 di PT. YTL

#### B. Rele Proteksi Hubung Singkat

Tipe rele proteksi hubung singkat (*short circuit protection relay*) merupakan jenis dari rele arus lebih dan termasuk buatan dari SIEMENS. Rele tersebut memiliki karakteristik yaitu karakteristik rele arus lebih waktu tertentu (*definite time*). Rele ini berfungsi mengamankan transformator 3 fasa 21 kV/512,5 kV bila terjadi gangguan hubung singkat. Rele proteksi hubung singkat akan bekerja jika waktu gangguan hubung singkat ( $t_F$ ) lebih dari atau sama dengan 3 detik dan nilai arus hubung singkatnya ( $I_F$ ) antara 1,2 kali sampai 10 kali arus nominalnya ( $I_{nom}$ ) maka rele tersebut akan memerintahkan *circuit breaker* untuk membuka [3]. Karakteristik seting rele proteksi hubung singkat ditunjukkan di Gambar 5.



Gambar 5. Karakteristik seting rele proteksi hubung singkat pada pembangkit unit 5 dan 6 di PT. YTL

#### C. Perhitungan Impedansi Hubung Singkat pada Unit Pembangkit Listrik (S)

Perhitungan impedansi dari seluruh unit pembangkit listrik (S) dengan *on-load tap changer* digunakan untuk perhitungan arus hubung singkat 3 fasa simetris awal ( $I''_k$ ) pada sisi tegangan tinggi (HV) di transformator 3 fasa. Untuk menghitung impedansi hubung singkat pada transformator 3 fasa di sisi tegangan tinggi ( $Z_{THV}$ ), yaitu :

$$Z_{THV} = \frac{U_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rTHV}} = \frac{18\%}{100\%} \times \frac{512,5^2 \text{ kV}}{765 \text{ MVA}} = 61,8015 \Omega$$

$$R_{THV} = P_{krT} \times \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rTHV}^2}$$

$$R_{THV} = 1,44 \text{ MW} \times \frac{512,5^2 \text{ kV}}{765^2 \text{ MVA}} = 0,6463 \Omega$$

$$X_{THV} = \sqrt{Z_{THV}^2 - R_{THV}^2}$$

$$X_{THV} = \sqrt{(61,8015)^2 - (0,6463)^2} = 61,7981 \Omega$$

Jadi impedansi hubung singkat transformator 3 fasa di sisi tegangan tinggi (HV), yaitu:

$$Z_{THV} = R_{THV} + j X_{THV} = (0,6463 + j 61,7981) \Omega$$

Untuk menghitung impedansi hubung singkat impedansi subtransien generator ( $Z_G$ ), yaitu:

$$X''_d = \frac{x_d''}{100\%} \times \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{23,5\%}{100\%} \times \frac{21^2 \text{ kV}}{789 \text{ MVA}} = 0,1314 \Omega$$

Jadi impedansi hubung singkat impedansi subtransien generator, yaitu:

$$Z_G = R_G + j X''_d = (0,0009347 + j 0,1314) \Omega$$

Sedangkan untuk rasio transformasi ( $t_r$ ) pada transformator, yaitu:

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{512,5 \text{ kV}}{21 \text{ kV}} = 24,4048$$

Untuk menghitung faktor koreksi untuk impedansi unit pembangkit listrik (S) dengan *on-load tap changer*, maka terlebih dahulu menghitung  $x_T$  dan  $x''_d$  yaitu sebagai berikut :

$$x_T = \frac{X_{THV}}{\frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}}} = \frac{61,7981}{\frac{512,5^2 \text{ kV}}{765 \text{ MVA}}} = 61,7981 \times \frac{765 \text{ MVA}}{512,5^2 \text{ kV}} = 0,1799 \Omega$$

dan

$$x''_d = \frac{X_d''}{\frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}} = \frac{0,1314}{\frac{21^2 \text{ kV}}{789 \text{ MVA}}} = 0,1314 \times \frac{789 \text{ MVA}}{21^2 \text{ kV}} = 0,2349 \Omega$$

Jadi faktor koreksi untuk impedansi unit pembangkit listrik dengan *on-load tap changer* ( $K_S$ ), yaitu:

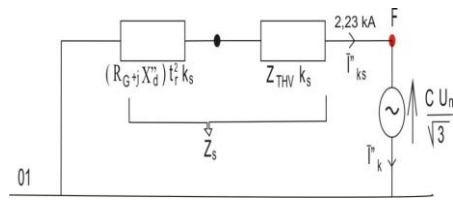
$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{C_{max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \phi_{rG}}$$

$$K_S = \frac{(500 \text{ kV})^2}{(21 \text{ kV})^2} \times \frac{(21 \text{ kV})^2}{(512,5 \text{ kV})^2} \times \frac{1,1}{1 + |0,2349 - 0,1799| \sin 31,788^\circ} = 1,0175$$

Sehingga impedansi hubung singkat pada unit pembangkit listrik (S) dengan *on-load tap changer*, yaitu:

$$\begin{aligned} Z_S &= K_S (t_r^2 \times Z_G + Z_{THV}) \\ &= 1,0175 [ ((24,4048)^2 \times (0,0009347 + j 0,1314)) + (0,6463 + j 61,7981) ] \\ &= (1,2241 + j 142,4811) \Omega \end{aligned}$$

Diagram rangkaian ekuivalen dan aliran arus hubung singkat 3 fasa simetris awal di unit pembangkit listrik dengan *on-load tap changer* ( $\bar{I}''_{KS}$ ) yang gangguannya terjadi di sisi tegangan tinggi transformator (F) ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram rangkaian ekuivalen ketika terjadi gangguan di F [10]

#### D. Perhitungan Arus Hubung Singkat 3 Fasa Simetris Awal ( $I''_K$ )

Jika gangguan hubung singkat di lokasi gangguan (F) seperti Gambar 4 yaitu lokasi gangguan didekat sisi tegangan tinggi transformator. Besar arus hubung singkat 3 fasa simetris awal di pembangkit unit 5 dan 6 dengan *on-load tap changer* ( $I''_{KS}$ ) yaitu:

$$\begin{aligned} I''_{KS} &= \frac{C_{max} U_{nQ}}{\sqrt{3} Z_S} = \frac{1,1 \times 500 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times (1,2241 + j 142,4811)} \\ &= (0,0191 - j 2,2285) \text{ kA} \end{aligned}$$

$$\bar{I}''_K = \bar{I}''_{KS} = \sqrt{(0,0191)^2 + (-2,2285)^2} = 2,23 \text{ kA}$$

Jadi arus hubung singkat 3 fasa simetris awal ( $\bar{I}''_K$ ) sama dengan arus hubung singkat 3 fasa simetris awal di unit pembangkit listrik dengan *on-load tap changer* ( $\bar{I}''_{KS}$ ) yang terjadi pada lokasi gangguan (F) atau gangguan yang terjadi di sisi tegangan tinggi transformator di pembangkit unit 5 dan 6 adalah sebesar 2,23 kA. Besar arus hubung singkat ( $I_F$ ) terhadap arus nominalnya adalah:

$$I_F = \frac{\bar{I}''_K}{I_{nom}} \times I_{nom} = \frac{2,23 \text{ kA}}{0,862 \text{ kA}} \times I_{nom} = 2,59 I_{nom}$$

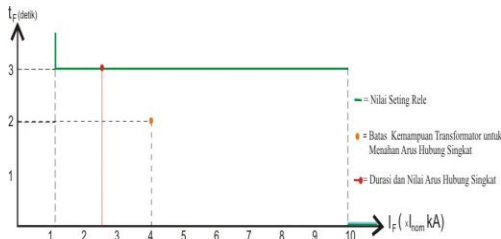
Jadi jika didasarkan pada seting rele proteksi hubung singkat maka arus hubung singkat ( $I_F$ ) adalah 2,59 kalinya dari arus nominal ( $I_{nom}$ ) pada transformator.

#### E. Analisis Seting dari Rele Proteksi Hubung Singkat

Saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa, rele proteksi hubung singkat sebenarnya sudah mendeteksi adanya gangguan tersebut karena arus hubung singkat ( $I_F$ ) yaitu 2,59 kalinya dari arus nominal ( $I_{nom}$ ) pada transformator sudah memenuhi syarat rele tersebut untuk bekerja, tetapi waktu gangguan hubung singkat ( $t_F$ ) belum memenuhi syarat rele untuk bekerja yaitu lebih dari atau sama dengan 3 detik. Sehingga rele proteksi hubung singkat tidak bekerja.

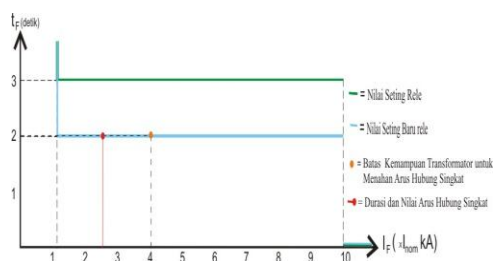
Karena syarat rele tersebut bekerja yaitu jika waktu gangguan hubung singkat ( $t_F$ ) selama lebih dari atau sama dengan 3 detik dan nilai arus hubung singkat ( $I_F$ ) antara 1,2 kali sampai 10 kali arus nominalnya ( $I_{nom}$ ) maka rele tersebut akan memerintahkan *circuit breaker* untuk membuka [3]. Untuk lebih jelas mengenai karakteristik seting rele tersebut pada Gambar 7. Karena rele baru bekerja saat 3 detik, maka transformator tersebut akan menerima arus hubung singkat 3 fasa simetri awal ( $\bar{I}''_K$ ) sebesar 2,23 kA

selama 3 detik. Padahal batas kemampuan transformator untuk menahan lamanya waktu gangguan hubung singkat ( $t_F$ ) maksimal selama 2 detik [1], ini ditunjukkan pada Gambar 7. Sehingga arus sebesar 2,23 kA dengan waktu gangguan hubung singkat ( $t_F$ ) 3 detik ini akan sangat berbahaya bagi transformator dan berpotensi merusak transformator tersebut. Jadi seting dari rele proteksi hubung singkat pada pembangkit unit 5 dan 6 di PT. YTL yaitu kurang tepat.



Gambar 7. Perbandingan arus hubung singkat terhadap batas kemampuan transformator serta karakteristik rele proteksi hubung singkat

Sehingga seting yang tepat untuk rele proteksi hubung singkat pada pembangkit unit 5 dan 6 di PT. YTL yaitu dengan mengubah seting waktu dari 3 detik menjadi 2 detik. Karakteristik seting baru rele proteksi hubung singkat ditunjukkan pada Gambar 8. Dengan mengubah waktu rele proteksi hubung singkat untuk bekerja yaitu lebih dari atau sama dengan 2 detik maka jika terjadi gangguan lagi dengan nilai arus hubung singkat ( $I_F$ ) yang sama dan terjadi pada sisi tegangan tinggi (HV) transformator 3 fasa maka rele akan langsung memerintahkan *circuit breaker* untuk bekerja pada waktu 2 detik. Hal ini juga sesuai dengan batas kemampuan transformator untuk menahan lamanya waktu gangguan hubung singkat ( $t_F$ ) maksimal selama 2 detik [1]. Jadi dengan mengubah seting tersebut, diharapkan dapat mengurangi potensi kerusakan transformator 3 fasa 21 kV/512,5 kV pada pembangkit unit 5 dan 6 di PT. YTL semakin kecil.



Gambar 8. Perbandingan karakteristik seting lama dan baru dari rele proteksi hubung singkat di pembangkit unit 5 dan 6 di PT. YTL

## V. KESIMPULAN dan SARAN

### A. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Tahap-tahap untuk melakukan seting rele proteksi hubung singkat pada pembangkit unit 5 dan 6 di PT. YTL, yaitu:

- Menghitung impedansi hubung singkat pada unit pembangkit listrik (S) dengan *on-load tap changer*. Setelah dilakukan perhitungan, maka  $Z_S = (1,2241 + j 142,4811) \Omega$
- Menghitung arus hubung singkat 3 fasa simetris awal ( $I''_K$ ). Setelah dilakukan perhitungan, maka  $I''_K = 2,23 \text{ kA}$ .
- Melakukan analisis seting dari rele proteksi hubung singkat. Ternyata seting waktu rele proteksi hubung singkat pada unit 5 dan 6 di PT. YTL kurang tepat.

2. Seting waktu rele proteksi hubung singkat pada unit 5 dan 6 di PT. YTL kurang tepat. Karena rele ini akan menyuruh *circuit breaker* untuk membuka jika waktu gangguan hubung singkat ( $t_F$ ) sama dengan 3 detik dan ini tidak sesuai dengan batas kemampuan transformator untuk menahan lamanya waktu gangguan hubung singkat ( $t_F$ ) yaitu maksimal selama 2 detik [1]. Agar sesuai dengan batas kemampuan transformator menahan gangguan hubung singkat, maka seting waktu rele tersebut yang tepat adalah 2 detik.

### B. Saran

Sehingga dengan adanya penelitian ini, diharapkan bisa dijadikan acuan oleh PT. YTL bila ingin membuat seting yang tepat pada rele proteksi hubung singkat (*short circuit protection relay*) saat terjadi gangguan hubung singkat di sisi tegangan tinggi pada transformator 3 fasa di pembangkit unit 5 dan 6 PT. YTL yaitu dengan mengubah seting waktu rele proteksi hubung singkat dari 3 detik menjadi 2 detik. Jadi dengan mengubah seting tersebut, diharapkan dapat mengurangi potensi kerusakan transformator 3 fasa 21 kV/512,5 kV pada pembangkit unit 5 dan 6 di PT. YTL semakin kecil.

## REFERENSI

- [1] IEC. 1976. *IEC 60076-5: Ability to withstand Short Circuit*. Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- [2] IEEE Std. C57.109. 1993. *IEEE Standard Definitions for Power Switchgear*. USA: IEEE Inc.
- [3] Siemens AG. 1995. *Numerical Overcurrent Time Protection and Overload Protection*. Germany: Siemens AG.
- [4] IEEE Std. C37.100. 1992. *IEEE Guide for Liquid-Immersed Transformer Through-Fault-Current Duration*. USA: IEEE Inc.
- [5] IEC. 2001. *IEC 60909-0: Calculation of Currents*. Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- [6] Lazar, Irwin. 1980. *Electrical System Analysis and Design for Industrial Plant*. USA: McGraw-Hill.
- [7] Stevenson, William D. 1996. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- [8] Saksomo, Setiyo. Tanpa tahun. *Diktat Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Malang: Universitas Brawijaya.
- [9] Siemens AG. 1998. *Generator Transformer*. Germany: Siemens AG.
- [10] IEC. 2000. *IEC 60909-4: Examples for The Calculation of Short-Circuit Currents*. Switzerland: International Electrotechnical Commission.