



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator Daya¹

Transformator Daya adalah suatu peralatan tenaga listrik statis yang berfungsi untuk memindahkan daya satu rangkaian ke rangkaian lain, dengan mengubah tegangan, tanpa mengubah frekuensi. Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan jantung dari transmisi dan distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal. Mengingat kerja keras dari suatu transformator seperti itu, maka cara pemeliharaan juga dituntut sebaik mungkin. Oleh karena itu transformator harus dipelihara dengan menggunakan system dan peralatan yang benar, baik dan tepat. Untuk itu regu pemeliharaan harus mengetahui bagian-bagian transformator dan bagian-bagian mana yang perlu diawasi melebihi bagian lainnya.



Gambar 2.1 Transformator Daya

Berdasarkan tegangan operasinya dapat dibagi menjadi transformator 500/150 KV dan 150/70 KV biasa disebut *Interbus Transformator* (IBT)

¹ Kadir, Abdul.1998. Transmisi Tenaga Listrik. Jakarta : Universitas Indonesia (UI Press) hal. 43



Transformator 150/20 kV dan 70/20 kV disebut juga trafo distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan untuk system pengamanan / proteksi, sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi.

Arus nominal pada transformator daya dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

- Arus nominal pada sisi primer :

$$IN_1 = \frac{S}{V_p \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.1)$$

- Arus nominal pada sisi sekunder :

$$IN_2 = \frac{S}{V_s \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

IN_1 = Arus nominal transformator daya sisi primer

IN_2 = Arus nominal transformator daya sisi sekunder

S = Daya pada transformator

V_p = Tegangan pada sisi primer

V_s = Tegangan pada sisi sekunder

2.1.1 Bagian – bagian Transformator ²

Bagian-bagian pada transformator terdiri dari :

1. Inti besi

Inti besi tersebut berfungsi untuk membangkitkan fluks yang timbul karena arus listrik dalam belitan atau kumparan trafo, sedang bahan ini terbuat dari lempengan-lempengan baja tipis, hal ini dimaksudkan untuk mengurangi panas yang diakibatkan oleh arus eddy (eddy current).

2. Kumparan primer dan kumparan sekunder

Kawat email yang berisolasi terbentuk kumparan serta terisolasi baik antar kumparan maupun antara kumparan dan inti besi. Terdapat dua

² PT. PLN (Persero), 2014, Buku pedoman trafo tenaga final, No.0512-2.K/DIR/2014. hal 2



kumparan pada inti tersebut yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder, bila salah satu kumparan tersebut diberikan tegangan maka pada kumparan akan membangkitkan fluks pada inti serta menginduksi kumparan lainnya sehingga pada kumparan sisi lain akan timbul tegangan.

3. Minyak trafo

Belitan primer dan sekunder pada inti besi pada trafo terendam minyak trafo, hal ini dimaksudkan agar panas yang terjadi pada kedua kumparan dan inti trafo oleh minyak trafo dan selain itu minyak tersebut juga sebagai isolasi pada kumparan dan inti besi.

4. Isolator bushing

Pada ujung kedua kumparan trafo baik primer ataupun sekunder keluar menjadi terminal melalui isolator yang juga sebagai penyekat antar kumparan dengan body badan trafo.

5. Tangki dan konservator

Bagian-bagian trafo yang terendam minyak trafo berada dalam tangki, sedangkan untuk pemuaian minyak tangki dilengkapi dengan konservator yang berfungsi untuk menampung pemuaian minyak akibat perubahan temperatur.

6. Katub pembuangan dan pengisian

Katub pembuangan pada trafo berfungsi untuk menguras pada penggantian minyak trafo, hal ini terdapat pada trafo diatas 100 kVA, sedangkan katup pengisian berfungsi untuk menambahkan atau mengambil sample minyak pada trafo.

7. Oil level

Fungsi dari oil level tersebut adalah untuk mengetahui minyak pada tangki trafo, oil level ini pun hanya terdapat pada trafo diatas 100 kVA.

8. Pernapasan trafo

Karena naik turunnya beban trafo maupun suhu udara luar, maka suhu minyaknya akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki, sebaliknya bila suhu turun, minyak akan menyusut maka



udara luar akan masuk kedalam tangki. Kedua proses tersebut diatas disebut pernapasan trafo, akibatnya permukaan minyak akan bersinggungan dengan udara luar, udara luar tersebut lembab. Oleh sebab itu pada ujung pernapasan diberikan alat dengan bahan yang mampu menyerap kelembaban udara luar yang disebut kristal zat Hygrokopsis (Clilicagel).

9. Pendingin trafo

Perubahan temperatur akibat perubahan beban maka seluruh komponen trafo akan menjadi panas, guna mengurangi panas pada trafo dilakukan pendingin pada trafo. Sedangkan cara pendinginan trafo terdapat dua macam yaitu : alamiah/natural (Onan) dan paksa/tekanan (Onaf). Pada pendinginan alamiah (natural) melalui sirip-sirip radiator yang bersirkulasi dengan udara luar dan untuk trafo yang besar minyak pada trafo disirkulasikan dengan pompa. Sedangkan pada pendinginan paksa pada sirip-sirip trafo terdapat fan yang bekerjanya sesuai setting temperaturnya.

10. Tap changer trafo (perubahan tap)

Tap changer adalah alat perubah pembanding transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah-ubah. Tap changer hanya dapat dioperasikan pada keadaan trafo tidak bertegangan atau disebut dengan “Off Load Tap Changer” serta dilakukan secara manual.

2.1.2 Prinsip Kerja Transformator ³

Prinsip kerja suatu transformator adalah induksi bersama (mutual induction) antara dua rangkaian yang dihubungkan oleh fluks magnet. Dalam bentuk yang sederhana, transformator terdiri dari dua buah kumparan yang secara listrik terpisah tetapi secara magnet dihubungkan oleh suatu alur induksi. Kedua kumparan tersebut mempunyai mutual induction yang tinggi. Jika salah satu kumparan dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, fluks bolak-balik timbul di dalam inti besi. yang dihubungkan dengan kumparan yang lain menyebabkan atau

³ Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator PT.PLN(Persero) No.0512-2.K/DIR/2014. Hal



menimbulkan ggl (gaya gerak listrik) induksi (sesuai dengan induksi elektromagnet) dari hukum Faraday.

Berdasarkan hukum Faraday yang menyatakan magnitude dari electromotive force (emf) proporsional terhadap perubahan fluks terhubung dan hukum Lenz yang menyatakan arah dari emf berlawanan dengan arah fluks sebagai reaksi perlawanan dari perubahan fluks tersebut didapatkan persamaan:

$$e = - \left(\frac{d\Psi}{dt} \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

- e = emf sesaat (instantaneous emf)
- Ψ = fluks terhubung (linked fluks)

Dan pada transformator ideal yang dieksitasi dengan sumber sinusoidal berlaku persamaan:

$$E = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot N \cdot f \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

- E = tegangan (rms)
- N = jumlah lilitan
- f = frekuensi
- Φ_m = fluks puncak (peak fluks) atau:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dikarenakan pada transformator ideal seluruh mutual flux yang dihasilkan salah satu kumparan akan diterima seutuhnya oleh kumparan yang lainnya tanpa adanya leakage flux maupun loss lain misalnya berubah menjadi panas. Atas dasar inilah didapatkan pula persamaan :

$$P_1 = P_2 \dots\dots\dots (2.6)$$

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots (2.7)$$

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots (2.8)$$



2.1.3 Gangguan pada Transformator Daya⁴

Gangguan yang berpengaruh terhadap kerusakan transformator tidak hanya karena adanya gangguan didalam transformator atau didalam daerah pengaman transformator, tetapi juga adanya diluar daerah pengaman.

1. Gangguan di luar daerah pengamananya

Gangguan di luar daerah pengamanan transformator daya ini sering terjadi dan dapat merupakan beban lebih, hubung singkat satu fasa ke tanah maupun gangguan antar fasa. Gangguan ini pada daerah ini mempunyai pengaruh terhadap transformator ini, sehingga transformator harus dilepaskan/dipisahkan bila gangguan tersebut terjadi setelah waktu tertentu untuk memberi kesempatan pengamanan daerah yang terganggu bekerja. Kondisi beban lebih yang berlanjut dapat dideteksi dengan relay thermal atau thermometer yang memberi sinyal sehingga dapat mengatur ataupun mengadakan manipulasi jaringan sehingga beban berkurang tetapi bila perlu diputuskan suplainya.

Untuk kondisi gangguan diluar daerahnya misalnya gangguan hubung singkat pada rel atau gangguan hubung singkat di saluran keluaranya, maka relay arus lebih dengan perlambatan waktu atau sekring digunakan sebagai pengamannya. Koordinasi yang baik untuk pengaman cadangan transformator ini. perlu diciptakan terhadap pengaman daerah berikutnya yang terkait. Pengaman utama dari transformator ini dibuat semedikian rupa sehingga tidak boleh bekerja terhadap gangguan tersebut di atas.

2. Gangguan di daerah pengamannya

Pengamanan utama transformator daya ditunjukan sebagai pengaman di dalam daerah pengamanannya. Gangguan di dalam sangat serius dan selalu ada risiko terjadinya kebakaran, gangguan dalam dapat digolongkan menjadi dua kelompok, yaitu:

Kelompok (a)

⁴ Dwi Putra, 2015, "tugas akhir teknik Listrik pengaruh rele differensial" diakses dari <http://eprints.polsri.ac.id/1734/3/BAB%202.pdf> pada tanggal 5 April 2020



Gangguan listrik akan dengan segera menyebabkan kerusakan yang serius tetapi pada umumnya dapat dideteksi oleh adanya arus atau tegangan yang tidak seimbang, diantaranya :

- Gangguan satu fasa atau antar fasa pada sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah di terminal luar.
- Gangguan satu fasa atau antar fasa pada lilitan sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah. Hubung singkat antar lilitan di sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah.
- Gangguan tanah pada lilitan tersier, atau hubung singkat antar belitan di lilitan tersier.

Apa yang dinamakan gangguan ialah suatu gangguan yang dimulai gangguan yang kecil atau tidak berarti, namun secara lambat akan menimbulkan kerusakan. gangguan ini tidak dapat dideteksi adanya tegangan atau bertambah besarnya arus pada ujung lilitan. yang termasuk gangguan lilitan ini ialah :

- Sambungan secara elektrik dari konduktor jelek dan gangguan inti misalnya tembusnya lapisan isolasi inti serta baut atau ring klem kurang kencang, yang akan menimbulkan busur yang terbatas pada minyak.
- Gangguan sistem pendingin, yang akan menyebabkan pemanasan lebih walaupun bebannya belum mencapai nominal. Sehubungan butir 2 adalah kemungkinan kurang minyak atau tersumbatnya aliran minyak sehingga menimbulkan pemanasan setempat pada lilitan.
- Gangguan dari pengatur tegangan dan pembagian beban yang tidak baik antara transformator yang bekerja paralel, yang akan menyebabkan pemanasan lebih karena adanya arus sirkulasi.

Secara umum untuk gangguan pada kelompok (a) sangat penting bahwa peralatan yang terganggu harus secepat mungkin dipisahkan setelah terjad gangguan, tidak hanya untuk membatasi kerusakan transformator daya tersebut tetapi juga membatasi lama waktu tegangan sistem turun. Bila tegangan turun terlalu lama dapat menimbulkan hilangnya sinkronisasi antar mesin, bila hal ini terjadi arus lebih yang besar akan muncul karena adanya lepas sinkron dari unit pembangkit sehingga akan ada relay yang salah kerja menyebabkan gangguan yang



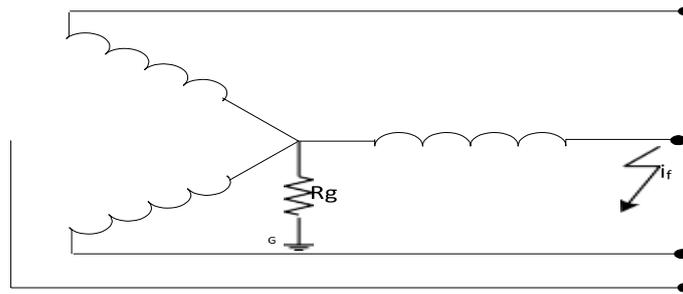
beruntun. Gangguan pada kelompok (b) tidak merupakan hal yang serius pada masa gangguan *incipient*, tetapi dapat menjadi gangguan yang parah tergantung dari waktu, maka juga harus dihilangkan secepat mungkin. Dalam hal bila pengamanan untuk kelompok (a) tidak mampu mengamankan gangguan pada kelompok (b), maka untuk pengamanan untuk kelompok (b) tidak perlu mendeteksi gangguan pada terminal dan untuk menghilangkan gangguan tidak perlu secepat seperti gangguan pada kelompok (a). Inilah merupakan filosofi dasar pengamanan transformator daya, dan ini artinya bahwa pengamanan kelompok (a).

2.2 Sistem Pembumian

Sistem pembumian adalah masa konduktif bumi yang potensial listriknya di setiap titik manapun menurut konversi adalah nol. Pembumian adalah sistem pengamanan terhadap perangkat-perangkat yang mempergunakan listrik sebagai sumber tenaga. Pembumian dapat digambarkan sebagai hubungan antara suatu peralatan atau sirkit dengan bumi. Pembumian mulai dikenal pada tahun 1990. Sebelumnya sistem-sistem tenaga listrik tidak diketanahkan karena ukurannya masih kecil dan tidak membahayakan. Namun setelah sistem-sistem tenaga listrik berkembang semakin besar dengan tegangan yang semakin tinggi dan jarak jangkauan semakin jauh, maka diperlukan pembumian. Jika tidak, hal ini dapat menimbulkan potensi bahaya listrik yang sangat tinggi, baik bagi manusia, peralatan, dan sistem pelayanannya sendiri. Pembumian juga diasumsikan sebagai hubungan pengantar yang menghubungkan sistem, badan peralatan dengan bumi atau tanah sehingga dapat mengamankan manusia dari sengatan listrik, dan mengamankan komponen-komponen peralatan dari bahaya tegangan atau arus abnormal. Oleh karena itu, pembumian menjadi bagian penting dari system.

2.2.1 Sistem Pembumian Dengan Tahanan

Sistem pembumian dengan tahanan memiliki dua metode, yaitu tahanan tinggi dan tahanan rendah. Sistem pembumian tahanan rendah dapat digunakan pada sistem yang kecil hingga menengah. Nilai tahanan dipilih sedemikian rupa sehingga memungkinkan arus 1 – 10 A selama terjadi gangguan.



Gambar 2.2 Hubungan wye dengan fase B terganggu

2.3 Netral Grounding Resistor (NGR)⁵

Netral Grounding Resistor adalah Pembumian titik netral yang melalui tahanan (*resistance grounding*) adalah suatu sistem yang mempunyai titik netral yang dihubungkan dengan tanah melalui tahanan atau resistor. Pembumian jenis ini lebih dikenal dengan sebutan pembumian dengan resistor (*Neutral Grounding Resistance*) atau NGR. Dengan kata lain NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang seri dengan netral sekunder pada Trafo sebelum terhubung ke tanah peralatan yang digunakan untuk membatasi arus gangguan 20 kV sebagai titik netral skunder Trafo Daya .



Gambar 2.3 NGR

NGR Terbagi menjadi 2 type :

2.3.1 Liquid

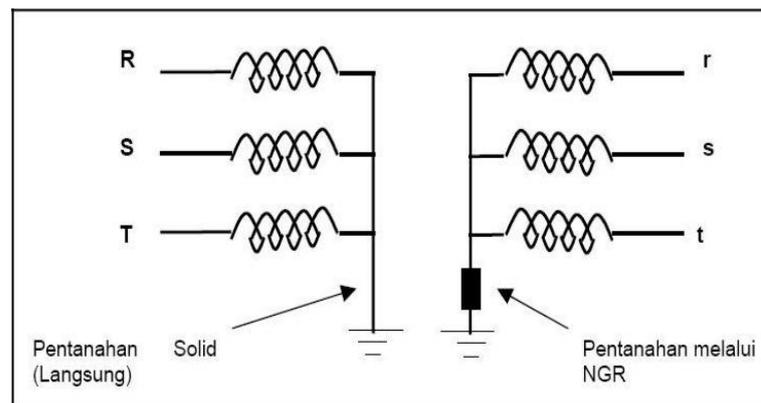
⁵PT.PLN(Persero), 2014, Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator tenaga Final, No.0512-2.K/DIR/2014. Hal 13



Berarti resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung di dalam bejana dan ditambahkan garam (NaCl) untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan.

2.3.2 Solid

Sedangkan NGR jenis padat terbuat dari *Stainless Steel*, *FeCrAl*, *Cast Iron*, *Copper Nickel* atau *Nichrome* yang diatur sesuai nilai tahanannya.



Gambar 2.4 Pentanahan langsung dan Pentanahan NGR

Berikut ini adalah klasifikasi sistem pembumian dengan NGR :

- a) Sistem pembumian dengan tahanan rendah, dengan tahanan 12 dan 40 Ohm serta arus primer 50 – 600 A.
- b) Sistem pembumian dengan tahanan tinggi dengan tahanan 200 dan 500 Ohm, serta arus primer 1 – 10 A.

Penggunaan NGR dengan jenis rendah maupun tinggi tergantung dari desain subsistem tenaga listrik, pada dasarnya semakin besar nilai NGRnya maka arus gangguan fasa ke tanahnya semakin kecil.



Gambar 2.5 Posisi Peletakan NGR

Gambar 2.5 menunjukkan posisi peletakan NGR tidak jauh dari Netral belitan sekunder trafo daya, sistem pentanahan diharapkan tidak menyatu dengan pentanahan peralatan dan sistem pentanahan surja petir.

2.3.3 Keuntungan dari NGR

- Mengurangi arus gangguan fasa tunggal untuk mengamankan setiap peralatan dalam jaringan listrik MVA
- Mengurangi tegangan berlebih sementara yang dapat terjadi selama gangguan
- fasa – tanah, dan dapat dimonitor serta digunakan untuk mengaktifkan reley
- kasalahan (gangguan) fasa-tanah dalam perlindungan Generator,
- Transformator, dan Peralatan lainnya.
- mengurangi biaya pemeliharaan operasi.
- Menyediakan cara perlindungan yang selektif, sederhana, dan andal.
- Memungkinkan penggunaan peralatan, dan khususnya kabel dengan tingkat
- isolasi lebih rendah dari pada untuk sekenario netral yang terisolasi.
- Mengurangi langkah tegangan



Nilai arus gangguan harus dibatasi ke nilai yang dapat ditangani dengan aman oleh peralatan atau Transformator, ini juga harus cukup tinggi untuk disarankan oleh relay proteksi gangguan fasa-tanah. Jika nilai resistansi NGR terlalu tinggi, arus gangguan akan sangat rendah dan tidak akan dapat mengaktifkan relay perlindungan gangguan fasa-tanah selama kondisi gangguan fasa-tanah.

Dalam koneksi bintang tiga fase, kapasitansi terbentuk dengan tanah. Jika terjadi kerusakan pembumian, kapasitansi ini dapat terisi tegangan listrik dan menyebabkan tegangan lebih transien. NGR harus memiliki nilai yang memungkinkan membiarkan arus yang memungkinkan kapasitansi untuk debit.

Resistansi juga dikategorikan oleh waktu bahwa mereka dapat menahan arus gangguan. Durasi yang khas adalah 5-10 detik.

2.3.4 Pengujian Karakteristik NGR

Desain trafo daya dengan sekunder netral ditanahkan melalui tahanan (resistor 40 Ohm), bekerja pada arus kontinyu 30 Ampere, dengan batas kemampuan arus sebesar 300 Ampere selama 10 detik melalui karakteristik Long Time Invers (LTI) batas waktu kerja rele yaitu:

$$t = \frac{120}{\left(\frac{i}{i_{sh}}\right)^{-1}} \times TMS \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan :

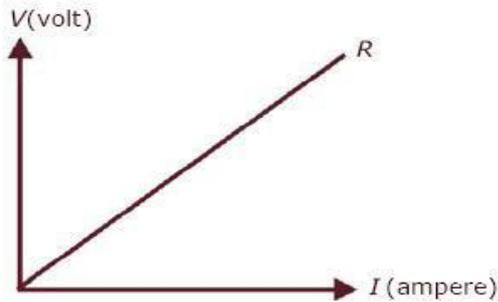
t = waktu kerja rele (detik)

i = arus yang mengalir (ampere)

i_{sh} = batas arus yang mengalir (ampere)

TMS : T / β , waktu maksimum (10) / 13,33 = 0.75

maka dapat ditunjukkan grafik dari karakteristik NGR.



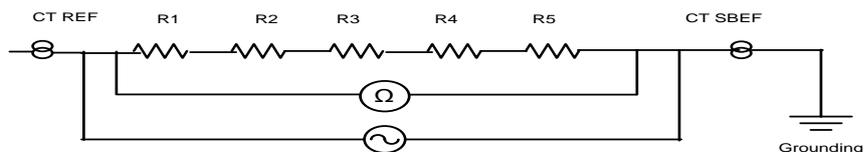
Gambar 2.6 Grafik Karakteristik NGR

Dari persamaan (2.9) dijadikan acuan pada sistem, lamanya arus hubung singkat maupun arus kontinyu akibat dari ketidak seimbangan beban terjadi. Yang menyebabkan NGR mengalami kerusakan.

2.3.5 Tes Uji Tahanan Isolasi NGR

Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan ground atau antara dua belitan. Metoda yang umum dilakukan adalah dengan memberikan tegangan dc dan merepresentasikan kondisi isolasi dengan satuan mega ohm. Tahanan isolasi yang diukur merupakan fungsi dari arus bocor yang menembus melewati isolasi atau melalui jalur bocor pada permukaan eksternal. Pengujian tahanan isolasi dapat dipengaruhi suhu, kelembaban dan jalur bocor pada permukaan eksternal seperti kotoran pada bushing atau isolator. Mega ohm meter biasanya memiliki kapasitas pengujian 500V, 1000V, 2500V atau 5000V dc. Dan dapat dilakukan perhitungan dengan:

$$V = I \times R \dots\dots\dots(2.10)$$



Gambar 2.7. Skema Pengujian Tahanan Isolasi NGR



Gambar 2.8 Alat Uji Tahanan Isolasi NGR

Dalam pengukuran ini bertujuan untuk mengukur tahanan pada body NGR terhadap titik pentanahan.



Gambar 2.9. Alat Ukur Pentanahan

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan:

R= Tahanan Pembumian (Ω)

ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ωm)

L = Panjang Batang yang Tertanam (m)



2.3.6 Pengujian Rasio NGR

Pengujian ini bertujuan mengetahui apakah relay bekerja dengan baik apabila terjadi gangguan pada sisi sekunder trafo



Gambar 2.10. Alat Uji Relay/ CT Test Megger MRCT

Rasio dari CT adalah sama dengan rasio dari CT referensi yang dikalikan rasio antara arus sisi sekunder CT referensi dengan arus sisi sekunder CT

yang diuji, seperti persamaan :

$$\frac{N_t}{N_r} \times \frac{I_r}{I_t} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$N_t = \frac{N_r \times I_r}{I_t} \dots\dots\dots (2.13)$$

N_t : Rasio CT yang diuji

N_r : Rasio CT referensi

I_r : Arus CT referensi

I_t : Arus CT yang diuji (~ nominal)

Standard yang digunakan : IEEE Std C57.13-1993 “Standard Requirements for Instrument Transformers”. Error ratio hasil pengukuran dan nameplate dikategorikan menjadi dua batasan yaitu :

- CT untuk keperluan metering : error maksimum + 0.1%
- CT untuk keperluan lain (proteksi, load control dan keperluan sejenisnya) : error maksimum + 1.2%

Neutral Grounding Resistor dirancang untuk menyerap sejumlah besar energi tanpa melebihi batasan suhu yang ditetapkan dalam IEEE 32. NGR dapat digunakan untuk Indoor dan Outdoor, dan titik netral terhubung dengan bushing



porcelain atau dengan tegangan tinggi kabel (XLPE), biasanya (minimum penampang 70mm² tembaga atau 95mm² aluminium) dari bawah, atas, atau samping.

Salah satu metoda pentanahan trafo daya adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan netral sekunder pada trafo daya sebelum terhubung ke ground/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral trafo daya ke tanah.



Gambar 2.11. Neutral Grounding Resistor (NGR)

Spesifikasi yang terdapat pada *nameplate* NGR, yaitu :

<i>Voltage System</i>	: 20kV (Tegangan Kerja)
<i>Frequency Rate</i>	: 50 Hz (Frekuensi Kerja)
<i>Max. Temperature Rise</i>	: 760°C (Nominal maksimal suhu kerja)
<i>Resistance</i>	: 40 Ohm (Tahanan yang dihasilkan)
<i>Rated Current</i>	: 300 Ampere (Arus kerja maksimum)
<i>Rated Time</i>	: 10 second (Waktu kerja maksimum pada saat arus 300 Ampere)



Untuk perhitungan Resistansi pada NGR dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$R = \frac{Vn}{I} \dots\dots\dots(2.14)$$

$$R = \frac{11.547}{300} = 38,49 \Omega$$

Keterangan :

R = Resistansi NGR (Ohm)

Vn = Tegangan fasa netral $\frac{20kv}{\sqrt{3}} = 11.547$ (kV)

I = Arus maksimum pada name plate NGR (Ampere)

2.4 *Current Transformer (CT)*⁶

Trafo Arus (Current Transformator - CT) yaitu peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada intalasi tenaga listrik disisi primer (TET, TT dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi.

Transformator arus berfungsi untuk memperoleh arus yang sebanding dengan arus yang hendak diukur (sisi sekunder 5A atau 1A) dan untuk memisahkan sirkuit dari sistem yang arusnya hendak diukur (yang selanjutnya disebut sirkuit primer) terhadap sirkuit di mana instrumen tersambung (yang selanjutnya disebut sirkuit sekunder). Berbeda dari transformator tenaga yang arusnya tergantung beban disisi sekunder, tetapi pada trafo arus seperti halnya amperemeter yang disisipkan ke dalam sirkuit primer, arusnya tidak bergantung beban disisi sekunder, melainkan semata-mata tergantung pada arus disisi primernya.

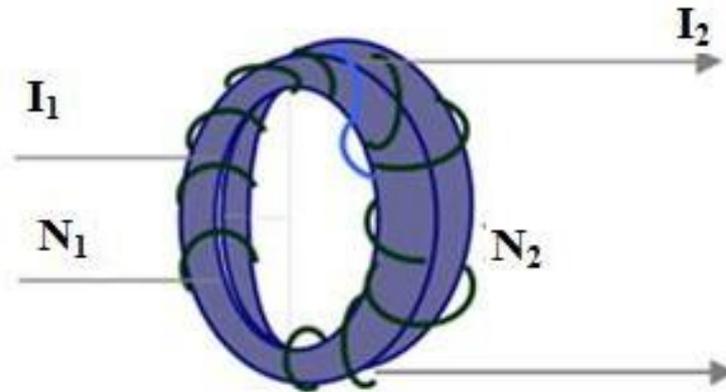
Pada transformator arus prinsip kerja transformator arus sama dengan Transformator daya. Jika pada kumparan primer mengalir arus I_1 , maka pada kumparan primer timbul gaya gerak magnet sebesar $N_1 I_1$. Gaya gerak magnet ini memproduksi fluks pada inti, kemudian membangkitkan gaya gerak listrik

⁶ PT. PLN (Persero), 2014. Buku Pedoman Trafo Arus Final. No.0512-2.K/DIR/2014.Hal 1



(GGL) pada kumparan sekunder. Jika terminal kumparan sekunder tertutup, maka pada kumparan sekunder mengalir arus I_2 , arus ini menimbulkan gaya gerak magnet $N_2 I_2$ pada kumparan sekunder.

Prinsip kerja trafo arus adalah sebagai berikut:



Gambar 2.12. Rangkaian trafo arus

Untuk trafo pada kondisi tidak berbeban

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_1}{I_2} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

$$a = \frac{N_1}{N_2} \dots \dots \dots (2.16)$$

$I_1 > I_2$ sehingga $N_1 < N_2$

N_1 = Jumlah lilitan primer

N_2 = Jumlah Lilitan Sekunder

Tegangan induksi pada sisi sekunder adalah

$$E_2 = 4,44 \cdot B \cdot A \cdot f \cdot N_2 \text{ Volt} \dots \dots \dots (2.17)$$

Di mana:

- B = kerapatan fluksi (tesla)
- A = luas penampang (m^2)



f = frekuensi (Hz)

N_2 = jumlah lilitan sekunder

2.4.1 Spesifikasi Transformator Arus

Trafo Arus (*Current Transformer*) umumnya selain digunakan sebagai media proteksi juga digunakan dalam sistem metering (pembacaan). Trafo arus dalam penggunaannya sangatlah kompleks sehingga CT itu sendiri dibuat dengan spesifikasi dan kelas yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan sistem yang ada.

Trafo Arus (*Current Transformer*) umumnya selain digunakan sebagai media proteksi juga digunakan dalam sistem metering (pembacaan). Trafo arus dalam penggunaannya sangatlah kompleks sehingga CT itu sendiri dibuat dengan spesifikasi dan kelas yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan sistem yang ada.

Spesifikasi pada CT antara lain:[2]

1. *Ratio* CT, rasio CT merupakan spesifikasi dasar yang harus ada pada CT, di mana representasi nilai arus yang ada di lapangan dihitung dari besarnya rasio CT. Misal CT dengan rasio 2000/5A, nilai yang terukur di sekunder CT adalah 2.5A, maka nilai aktual arus yang mengalir di penghantar adalah 1000A. Kesalahan *ratio* ataupun besarnya presentasi *Error* (%err.) dapat berdampak pada besarnya kesalahan pembacaan di alat ukur, kesalahan penghitungan tarif, dan kesalahan operasi sistem proteksi.
2. *Burden* atau nilai maksimum daya (dalam satuan VA) yang mampu dipikul oleh CT. Nilai daya ini harus lebih besar dari nilai yang terukur dari terminal sekunder CT sampai dengan koil relay proteksi yang dikerjakan.
3. *Class*, kelas CT menentukan untuk sistem proteksi jenis apakah *core* CT tersebut. Misal untuk proteksi arus lebih digunakan kelas 5P20, untuk kelas tarif metering digunakan kelas 0.2 atau 0.5, untuk sistem proteksi busbar digunakan *Class X* atau PX.



4. *Kneepoint*, adalah titik saturasi/jenuh saat CT melakukan excitasi tegangan. Umumnya proteksi busbar menggunakan tegangan sebagai penggerak koilnya. Tegangan dapat dihasilkan oleh CT ketika sekunder CT diberikan *impedansi* seperti yang tertera pada Hukum Ohm. *Kneepoint* hanya terdapat pada CT dengan *Class X* atau *PX*. Besarnya tegangan *kneepoint* bisa mencapai 2000Volt, dan tentu saja besarnya *kneepoint* tergantung dari nilai atau desain yang diinginkan.
5. *Secondary Winding Resistance (RCT)*, atau *impedansi* dalam CT. *Impedansi* dalam CT pada umumnya sangat kecil, namun pada *Class X* nilai ini ditentukan dan tidak boleh melebihi nilai yang tertera disana. Misal: $<2.5\text{Ohm}$, maka *impedansi* CT pada *Class X* tidak boleh lebih dari 2.5Ohm atau CT tersebut dikembalikan ke pabrik untuk dilakukan penggantian.

2.4.2 Fungsi Current Transformator⁷

Current transforme berfungsi mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi. Kumputan primer CT dihubungkan secara seri dengan jaringan atau peralatan yang akan diukur arusnya, sedangkan kumputan sekunder dihubungkan dengan peralatan ukur dan relai proteksi.

Secara fungsi trafo arus dibedakan menjadi dua yaitu:

- 1) Trafo arus pengukuran

Trafo arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya), trafo arus digunakan untuk pengukuran Amperemeter, Watt-meter, VARh-meter, dan $\cos \phi$ meter.

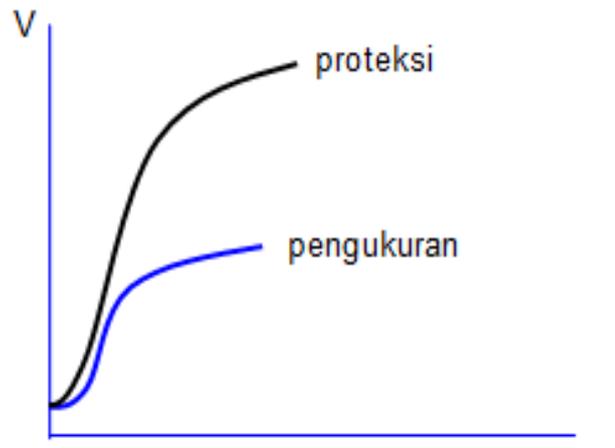
- 2) Trafo arus proteksi

Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus

⁷ PT. PLN (Persero), 2014. Buku Pedoman Trafo Arus Final. No.0512-2.K/DIR/2014. Hal 3



pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi. Perbedaan mendasar trafo arus pengukuran dan proteksi adalah pada titik saturasinya seperti pada kurva saturasi dibawah.



Gambar 2. 13. Kurva Kejenuhan CT untuk Pengukuran dan Proteksi

Trafo arus yang digunakan didalam NGR adalah trafo arus jenis isolasi cast resin, trafo arus ini biasanya digunakan pada tegangan menengah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (indoor).



Gambar 2.14. Trafo Arus jenis isolasi cast resin yang ada didalam NGR



2.5. Rele REF (Restricted Earth Fault)⁸

Restricted Earth Fault (REF) atau relai gangguan tanah terbatas digunakan bila terjadi gangguan satu fasa ke tanah didekat titik netral transformator guna melindungi transformator tersebut. Gangguan tersebut biasanya merupakan gangguan yang tidak dirasakan oleh relai diferensial yang berfungsi untuk melindungi belitan transformator dari gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

Prinsip kerja relai REF membandingkan arus sekunder dari kedua CT yang digunakan, namun batas wilayah relai tersebut bekerja hanya antara CT fasa dan CT titik netralnya saja. Bila arus mencapai pick up pada relai, atau lebih besar dari nilai arus setting, maka relai akan bekerja. Relai akan memerintahkan PMT sisi primer dan sekunder untuk membuka, dengan demikian gangguan tidak meluas ke sisi lain yang normal.

Untuk perhitungan setting arus maksimum CT REF adalah sebagai berikut :

$$I_{maksCTREF} = 0,2 (SI) \times I_{MaksCTterpasang} \dots \dots \dots (2.18)$$

$$I_{maksCTREF} = 0,2 (SI) \times 1000 \dots \dots \dots (2.19) \\ = 200 \text{ A}$$

REF dipasang pada belitan transformator/reaktor dengan konfigurasi Y yang ditanahkan. REF terdiri dari 2 jenis, yaitu:

1. REF jenis low impedance, parameter kerjanya adalah arus minimum.
2. REF jenis high impedance, parameter kerjanya adalah tegangan minimum, ataupun arus minimum.

Bila digunakan relai diferensial berimpedansi tinggi, maka pada kondisi gangguan tanah internal akan timbul suatu tegangan yang tinggi pada terminal relai. Untuk mengamankannya maka digunakan tahanan non linear atau yang disebut dengan varistor. Varistor ini sifatnya membatasi tegangan, yaitu harga resistansinya akan menurun makin kecil bila terkena tegangan yang tinggi.

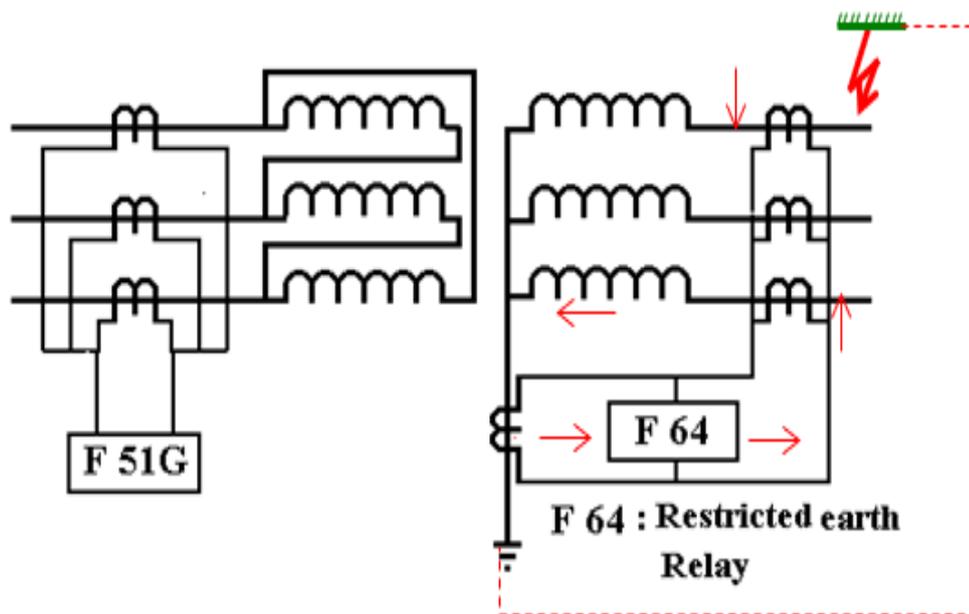
⁸ PT. PLN (Persero) Buku Pedoman Pemeliharaan "Proteksi dan Kontrol Transformator" PDM / SGI /16:2014, hal. 18



2.5.1 Prinsip Kerja Relé Restricted Earth Fault (REF)

Prinsip kerja relai REF sama dengan dengan relai differensial, yaitu membandingkan besarnya arus sekunder kedua trafo arus yang digunakan, akan tetapi batasan daerah kerjanya hanya antara CT fasa dengan CT titik netralnya. REF ditujukan untuk memproteksi gangguan 1-fasa ketanah. Pada waktu tidak terjadi gangguan/keadaan normal atau gangguan di luar daerah pengamanan, maka ke dua arus sekunder tersebut di atas besarnya sama, sehingga tidak ada arus yang mengalir pada relai, akibatnya relai tidak bekerja.

Pada waktu terjadi gangguan di daerah pengamanannya, maka kedua arus sekunder trafo arus besarnya tidak sama oleh karena itu, akan ada arus yang mengalir pada relai, selanjutnya relai bekerja. Fungsi dari REF adalah untuk mengamankan transformator bila ada gangguan satu satu fasa ke tanah di dekat titik netral transformator yang tidak dirasakan oleh rele differensial.



Gambar 2.15 Rangkaian Arus Relai REF Saat terjadi Gangguan Eksternal



2.5.1. Pengujian Relai REF Pengujian REF ini tergantung dari jenis REF yang dipergunakan.

1. Pengujian arus kerja minimum jika yang dipergunakan adalah REF jenis low impedance atau REF high impedance jenis arus
2. Pengujian tegangan kerja jika yang dipergunakan adalah REF high impedance jenis tegangan.
3. Pengujian waktu kerja.

2.6 Relai SBEF (Stand By Earth Fault) ⁹

Stand By Earth Fault (SBEF) adalah proteksi yang dipasang pada NGR untuk melindungi NGR terhadap arus lebih serta untuk mengamankan NGR dari hubung singkat fasa tanah. Relai SBEF ini harus dikoordinasikan dengan relai GFR karena relai SBEF harus bekerja paling akhir sebagai pengaman NGR. Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan untuk penyetelan SBEF adalah ketahanan termis dari NGR perlu diperhatikan untuk pemilihan waktu dan karakteristik relai SBEF ini dikarenakan arus yang mengalir menuju NGR telah dibatasi oleh resistansi yang terpasang pada NGR.

Penyetelan relai SBEF ini mempertimbangkan faktor – faktor sebagai berikut:

- Pola pentanahan netral trafo;
- Ketahanan termis tahanan netral trafo (NGR);
- Ketahanan shielding kabel disisi dipasang NGR (khususnya pada sistem dengan netral yang ditanahkan langsung atau dengan NGR tahanan rendah);
- Sensitifitas relai terhadap gangguan tanah;
- Pengaruh konfigurasi belitan trafo (dilengkap dengan belitan delta atau tidak).

Untuk pemilihan waktu dan karakteristik SBEF dengan memperhatikan ketahanan termis NGR. Karena arus yang mengalir ke NGR sudah dibatasi oleh resistansi

⁹ PT. PLN (Persero) Buku Pedoman Pemeliharaan “Proteksi dan Kontrol Transformator” PDM / SGI /16:2014, hal. 19



terpasang pada NGR itu sendiri. Karena nilai arus yang flat, maka pemilihan karakteristik waktu disarankan menggunakan Definite atau Long Time Inverse.

- a. Tahanan Rendah, NGR 40 Ohm, 300 A, 10 detik
 - Jenis relai gangguan tanah (SBEF, simbol 51NS)
 - Karakteristik Long Time Inverse
 - Setelan arus $(0.3 - 0.4) \times I_n$ NGR
 - Setelan waktu $\leq 50\%$ x ketahanan termis NGR, pada $I_f=300$ A
 - Setelan highset tidak diaktifkan

Untuk perhitungan arus maksimum CT SBEF dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$I_{maksNGR} = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot R_{ngr}} \dots\dots\dots(2.20)$$

$$I_{maksNGR} = \frac{20kv}{\sqrt{3} \cdot 38,49 \Omega} \dots\dots\dots(2.21)$$

$$= 300 \text{ A}$$

Untuk arus maksimum NGR ke tanah adalah 10% dari arus maksimum NGR, yaitu $I_o = 300 \times \frac{10}{100} = 30$ A Dengan waktu (t) SBEF adalah 0,38 detik (LTI)

Perhitungan Arus maksimum gangguan satu fasa tanah pada penyulang adalah sebagai berikut

$$I_{nom} = I_{set} \cdot 0.5 (SI)$$

$$I_{nom} = 320 \cdot 0.5 (SI)$$

$$I_{nom} = 32 \text{ A}$$

Dengan waktu (t) gfr adalah 0,11 detik (Standar Inverse)

Perhitungan arus gangguan penyulang adalah sebagai berikut

$$I_{hs} = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots(2.22)$$

Keterangan :

I_{hs} = Arus hubung singkat satu fasa tanah

V = Tegangan fasa netral 20 kV

Z = Jumlah Impedansi urutan positif (Z_1) , Impedansi urutan negative (Z_2) , Impedansi urutan nol (Z_0)



2.7. Kriteria Sistem Proteksi ¹⁰

Pada sistem tenaga listrik, sistem proteksi adalah perlindungan atau untuk mengisolir pada bagian yang memungkinkan akan terjadi gangguan atau bahaya. Tujuan utama proteksi adalah untuk mencegah terjadinya gangguan atau memadamkan gangguan yang telah terjadi dan melokalisirnya, dan membatasi pengaruh pengaruhnya, biasanya dengan mengisolir bagian-bagian yang terganggu tanpa mengganggu bagian- bagian yang lain (Hutauruk, 1991). Sistem proteksi ini mendeteksi kondisi abnormal dalam suatu rangkaian listrik dengan mengukur besaran- besaran listrik yang berbeda antara kondisi normal dengan kondisi abnormal. Ada beberapa kriteria yang perlu diketahui pada pemasangan suatu sistem proteksi dalam suatu rangkaian sistem tenaga listrik yaitu (Tofan aryanto:2013) :

1. Kepekaan (*sensitivitas*)

Sensitivitas adalah istilah yang sering dikaitkan dengan harga besaran penggerak minimum, seperti level arus minimum, tegangan, daya dan besaran lain dimana rele atau skema proteksi masih dapat bekerja dengan baik.

Sensitivitas adalah kepekaan rele proteksi terhadap segala macam gangguan dengan tepat yakni gangguan yang terjadi di daerah perlindungannya. Kepekaan suatu sistem proteksi ditentukan oleh nilai terkecil dari besaran penggerak saat peralatan proteksi mulai beroperasi. Nilai terkecil besaran penggerak berhubungan dengan nilai *minimum* arus gangguan dalam daerah yang dilindunginya.

2. Kecepatan

Sistem proteksi perlu memiliki tingkat kecepatan sebagaimana ditentukan sehingga meningkatkan mutu pelayanan, keamanan manusia, peralatan dan stabilitas operasi. Mengingat suatu sistem tenaga mempunyai batas-batas stabilitas serta kadang- kadang gangguan sistem bersifat sementara, maka rele yang semestinya bereaksi dengan cepat kerjanya perlu diperlambat (*time delay*)

¹⁰ Pandjaitan, Bonar. 2012. Praktik Praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik. Yogyakarta : Penerbit ANDI



3. Selektivitas

Selektivitas suatu system proteksi jaringan tenaga adalah kemampun rele proteksi untuk melakukan tripping secara tepat sesuai rencana yang telah ditentukan pada waktu mendesain system proteksi tersebut.

Selektif berarti suatu sistem proteksi harus dapat memilih bagian sistem yang harus diisolir apabila rele proteksi mendeteksi gangguan.

Bagian yang dipisahkan dari sistem yang sehat sebisanya adalah bagian yang terganggu saja. Diskriminatif berarti suatu sistem proteksi harus mampu membedakan antara kondisi normal dan kondisi abnormal. Ataupun membedakan apakah kondisi abnormal tersebut terjadi di dalam atau di luar daerah proteksinya. Dengan demikian, segala tindakannya akan tepat dan akibatnya gangguan dapat dieliminir menjadi sekecil mungkin.