

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Transformator Tegangan

Trafo tegangan adalah peralatan yang mentransformasi tegangan sistem yang lebih tinggi ke suatu tegangan sistem yang lebih rendah untuk kebutuhan peralatan indikator, alat ukur/meter dan relai.¹



Gambar 2.1 Transformator Tegangan 70 kV

2.2 Fungsi Transformator Tegangan²

Fungsi dari trafo tegangan yaitu:

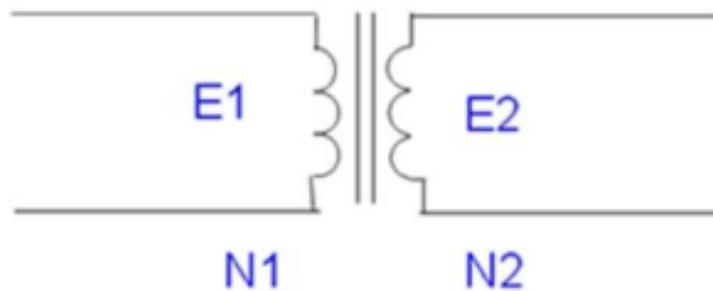
- Mentransformasikan besaran tegangan sistem dari yang tinggi ke besaran tegangan listrik yang lebih rendah sehingga dapat digunakan untuk peralatan proteksi dan pengukuran yang lebih aman, akurat dan teliti.
- Mengisolasi bagian primer yang tegangannya sangat tinggi dengan bagian sekunder yang tegangannya rendah untuk digunakan sebagai sistem proteksi dan pengukuran peralatan dibagian primer

¹ PT PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Primer Gardu Induk No. 0520-2* (Jakarta: PT. PLN, 2014), 1.

² *Ibid*, 2.

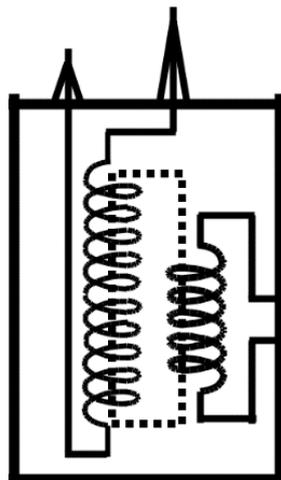
- Sebagai standarisasi besaran tegangan sekunder (100 , $100/\sqrt{3}$, $110/\sqrt{3}$ dan 110 volt) untuk keperluan peralatan sisi sekunder.
- Memiliki 2 kelas, yaitu kelas proteksi (3P, 6P) dan kelas pengukuran (0,1; 0,2; 0,5;1;3).

2.3 Prinsip Kerja Transformator Tegangan³



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Transformator Tegangan

Transformator tegangan mekanik mempunyai prinsip kerja yang sama dengan transformator daya dimana belitan primer menginduksikan tegangan sekunder yang ditimbulkan dari fluks magnet sisi primer dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Dalam hal ini jumlah belitan di sisi primer lebih banyak dibandingkan jumlah lilitan disisi sekunder.



Gambar 2.3 Transformator Tegangan Induktif

³ PT PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Primer Gardu Induk No. 0520-2* (Jakarta: PT. PLN, 2014), 1.

Walaupun transformator tegangan memiliki prinsip kerja yang sama dengan trafo tenaga tetapi rancangan trafo tegangan berbeda yaitu:

- Kapasitasnya kecil (10 – 150 VA), karena digunakan hanya pada alat-alat ukur, relai dan peralatan indikasi yang konsumsi dayanya kecil.
- Memiliki tingkat ketelitian yang tinggi.
- Salah satu ujung terminal tegangan tingginya selalu ditanahkan.

2.4 Bagian-Bagian Transformator Tegangan⁴

1. Kertas atau minyak isolasi

Berfungsi untuk memisahkan bagian yang bertegangan (belitan primer) dengan bagian yang bertegangan lainnya (belitan sekunder) ataupun dengan bagian yang tidak bertegangan (body). Terdiri dari minyak trafo dan kertas isolasi. Sebagai bahan isolasi minyak transformator memiliki beberapa kekentalan, hal ini sebagaimana dijelaskan dalam SPLN (49-1:1980). Adapun persyaratan yang harus dipenuhi oleh minyak transformator adalah sebagai berikut; kejernihan, massa jenis, angka kenetralan, tegangan tembus, kandungan air.

2. Belitan primer

Belitan primer berfungsi sebagai jalur input sebuah tegangan yang berasal dari tegangan sumber, yang nantinya akan diinduksikan pada lilitan sekunder melalui sebuah inti besi. Besarnya tegangan yang dihasilkan pada lilitan sekunder bergantung pada jumlah lilitan sekundernya.

3. Inti Besi

Inti besi berfungsi sebagai tempat mengalirnya fluks dari kumparan primer ke kumparan sekunder.

4. Expansion Chamber

Belitan yang merupakan bagian yang akan menghasilkan tegangan output yang memiliki nilai tersendiri, yang nantinya akan digunakan lebih

⁴ PT PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Primer Gardu Induk No. 0520-2* (Jakarta: PT. PLN, 2014), 3.

lanjut dalam rangkaian secara menyuluruh, dalam transformator tegangan biasanya digunakan untuk metering dan proteksi.

5. Struktur mekanikal

Struktur mekanikal adalah peralatan yang menyokong berdirinya trafo tegangan, terdiri dari :

- Pondasi
- Struktur penopang VT
- Isolator (keramik atau polyester)

6. Expansion Chamber

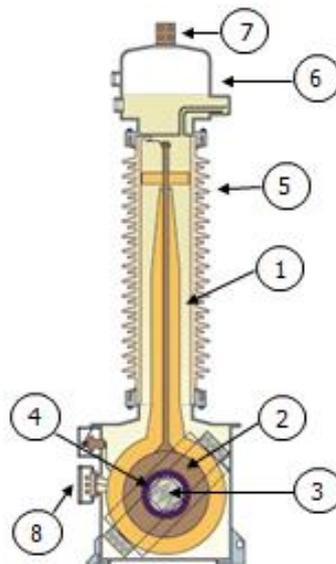
Peralatan yang digunakan untuk mengkompensasikan level ketinggian minyak akibat perubahan volume sebagai pengaruh temperature. Jenis yang umum digunakan adalah metallic bellow.

7. Terminal Primer

Terminal primer adalah terminal yang terhubung pada sisi tegangan tinggi (fasa) dan satu lagi terhubung pada sistim pentanahan (grounding).

8. Terminal Sekunder

Terminal sekunder adalah terminal yang terhubung pada sisi tegangan rendah, pada transformator tegangan output dari terminal sekunder adalah metering dan proteksi untuk sistem penyaluran tenaga listrik.



Gambar 2.4 Bagian-Bagian Transformator Tegangan Induktif

2.5 Pengujian Tahanan Isolasi dan Tangen Delta

1. Tahanan Isolasi

a. Pengertian Tahanan Isolasi

Pengukuran tahanan isolasi merupakan proses untuk mengukur nilai tahanan isolasi transformator tenaga antara bagian yang diberi tegangan (fasa) terhadap badan (body case) maupun antar belitan primer dan belitan sekunder.⁵

Dalam kegiatan pemeliharaan di Gardu Induk dikenal istilah pengukuran tahanan isolasi. Tahanan isolasi adalah hambatan yang ada antara dua komponen yang bertegangan atau komponen bertegangan dengan ground (PDM/PGI/01: 2014, halaman 38). Selain itu, tahanan isolasi merupakan hambatan yang berada pada kondisi antara dua elemen konduktif yang dipisahkan oleh bahan isolasi (IEV, 212-11-07). Pengukuran tahanan isolasi pada peralatan-peralatan Gardu Induk mempunyai peranan penting guna mengetahui status isolasi peralatan dan keamanan pada setiap peralatan. Tahanan isolasi merupakan keadaan dimana suatu peralatan memiliki nilai resistansi terhadap tegangan agar tidak terjadi short circuit atau kerusakan lainnya (Rusdjaja Tatang, 2014).⁶

Hasil pengukuran tahanan isolasi belitan trafo dapat dipengaruhi oleh kebersihan permukaan isolator bushing, suhu trafo, faktor usia, dan kelembaban udara disekitarnya. Pengujian isolasi secara rutin dapat dilakukan dengan menggunakan Megger yang pembacaannya langsung dalam megaohm. Tahanan isolasi adalah ukuran kebocoran arus yang melalui isolasi. Tahanan berubah-ubah karena pengaruh temperatur dan lamanya tegangan yang diterapkan pada lilitan tersebut. Nilai tahanan yang rendah dapat menunjukkan lilitan dalam keadaan kotor atau basah.

⁵ Saputra, Dimas Abimanyu, "Analisa Pengujian Transformator Daya MT24 150 kV / 33 kV 90 MVA di PT. Vale Indonesia, Sorowako-Sulawesi Selatan", (Malang: Universitas Muhammadiyah Malang, 2017)

⁶ Novia Vidianti, *Analisis Tahanan Isolasi Peralatan Utama Gardu Induk*, (Jakarta: Universitas Negeri Jakarta, 2018)

Maka dapat disimpulkan bahwa, pengujian tahanan isolasi adalah pengujian yang dilakukan pada tahanan diantara belitan transformator tegangan terhadap bagian badan (body) transformator tegangan maupun diantara belitan primer dan belitan sekunder pada transformator tegangan dalam keadaan yang tidak bertegangan guna mengetahui ukuran kebocoran arus yang melalui isolasi.

Untuk memahami tentang pengukuran tahanan isolasi, perlu mengetahui persamaan sederhana yaitu “Hukum Ohm” dimana:

$$V = I \times R$$

Keterangan:

V = Tegangan (Volt)

I = Kuat Arus (Ampere)

R = Tahanan (Ohm)

Semakin besar tegangan (voltase) yang kita miliki, maka semakin besar arus yang ada. Selain itu, semakin rendah resistansi yang ada, maka semakin besar arus yang di dapat dalam tegangan yang sama. Tegangan yang lebih tinggi cenderung menyebabkan arus lebih melebihi isolasi. Jumlah arus kecil yang di dapat pada sebuah isolasi tentu saja tidak akan merusak isolasi yang baik, akan tetapi dapat menjadi masalah jika isolasi memburuk.

b. Tujuan Pengujian Tahanan Isolasi⁷

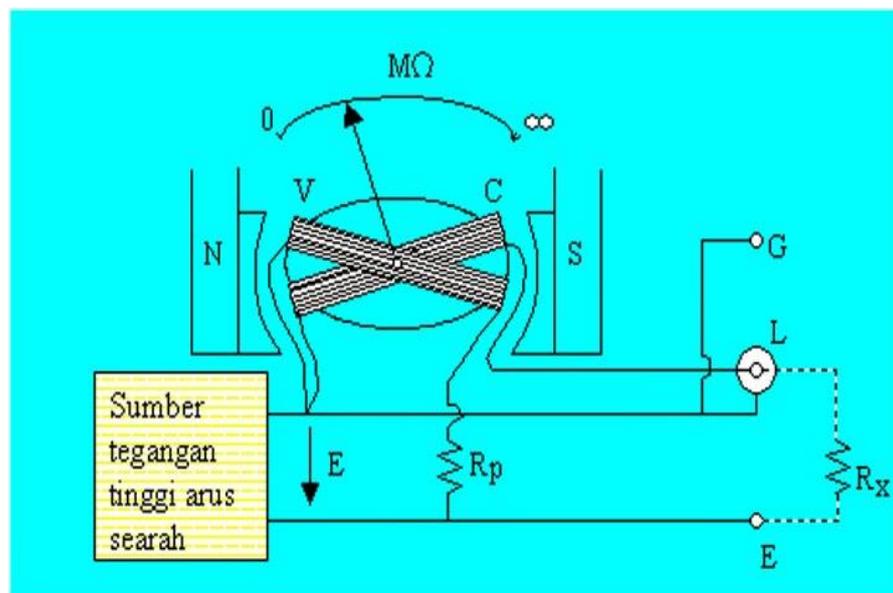
Tahanan isolasi bertujuan untuk mengetahui besar tahanan isolasi antara belitan dengan ground atau antara dua belitan, mengetahui secara dini kondisi dari isolasi transformator tegangan dan kemungkinan adanya gangguan hubung singkat serta memastikan transformator tegangan aman

⁷ Dimas Abimanyu Saputra, Skripsi: “Analisis Pengujian Transformator Daya MT24 150 kV/33 kV 90 MVA di PT. Vale Indonesia, Sorowoko-Sulawesi Selatan”(Malang: Universitas Muhammadiyah Malang, 2017), 34.

untuk beroperasi. Pengujian tersebut menggunakan insulation tester dengan satuan mega ohm meter.

c. Prinsip Kerja Pengujian Tahanan Isolasi Transformator Tegangan

Prinsip pengujian tahanan isolasi adalah dua kumparan V dan C yang ditempatkan secara menyilang gambar dibawah. Kumparan V besarnya arus yang mengalir adalah E/R_p dan kumparan C besarnya arus yang mengalir adalah E/R_x . R_x adalah tahanan yang akan diukur. Jarum akan bergerak disebabkan oleh perbandingan dari kedua arus, yaitu sebanding dengan R_p/R_x atau berbanding terbalik terhadap tahanan yang akan diukur.



Gambar 2.5 Prinsip Kerja Tahanan Isolasi

Pada dasarnya pengukuran tahanan isolasi belitan trafo adalah untuk mengetahui besar nilai kebocoran arus (leakage current) yang terjadi pada isolasi belitan atau kumparan primer, sekunder atau tertier. Kebocoran arus yang menembus isolasi peralatan listrik memang tidak dapat dihindari. Oleh karena itu, salah satu cara meyakinkan bahwa trafo cukup aman untuk diberi tegangan adalah dengan mengukur tahanan isolasinya.

Kebocoran arus yang memenuhi ketentuan yang ditetapkan akan memberikan jaminan bagi trafo itu sendiri sehingga terhindar dari kegagalan isolasi. Insulation tester banyak jenisnya (merk dan type Insulation Tester), masing-masing memiliki spesifikasi yang berbeda antara yang satu dengan yang lainnya. Mulai dari type sederhana, menengah sampai dengan yang canggih. Display (tampilannya) juga banyak ragamnya, mulai dari tampilan analog, semi digital dan digital murni. Pada panel kendali (Front Panel) ada yang sangat sederhana, namun ada pula yang super canggih. Tapi seluruhnya memiliki prinsip kerja yang sama.⁸

Prinsip pengujian tahanan isolasi (mega ohm meter) sama dengan ohm meter, yaitu memberikan tegangan dc dari alat ukur ke isolasi peralatan, dan karena nilai resistansi isolasi ini cukup tinggi maka diperlukan tegangan yang cukup tinggi pula agar arus dapat mengalir. Tegangan pengukuran yang digunakan tergantung pada tegangan kerja dari alat yang akan diukur. Pada Peralatan uji tahanan isolasi jenis digital, skala dapat diubah sesuai besarnya tahanan isolasi yang akan diukur, caranya dengan mengubah selector (tombol) pada peralatan pengujian menuju batas ukur tahanan isolasi pada meeger jenis digital ini menggunakan baterai sebagai penghasil tegangan, berikut tegangan uji yang dapat diubah bergantung pada tegangan kerja pada transformator tegangan;

Tabel 2.1

Tegangan Uji Tahanan Isolasi Transformator Tegangan

No.	Sisi Pengujian	Tegangan Uji (Volt)
1	Primer - (Ground)	5000
2	Sekunder - (Primer, Sekunder, Ground)	500

⁸ M Faiz, *Prinsip Kerja Transformator*, (academia.edu/39940782/Prinsip_kerja_Transformator, diakses pada tanggal 01 Maret 2020, pukul 14.00)

2. Tangen Delta

a. Pengertian Tangen Delta

Pada trafo tegangan yang menggunakan minyak untuk isolasinya, minyak memiliki nilai konduktansi yang cukup rendah dan nilai kapasitansi yang cukup tinggi. Pengujian tangen delta dilakukan untuk mengetahui besarnya nilai faktor disipasi ($\tan \delta$) dan kapasitansi dari VT. Peningkatan nilai dari kapasitansi mengindikasikan adanya pemburukan pada isolasi kertas isolasi.⁹

Isolasi yang baik akan bersifat kapasitif sempurna, dalam hal ini trafo dianggap sebagai kapasitor murni. Tegangan dan arus fasa bergeser 90° pada kapasitor murni dan arus yang melewati isolasi merupakan kapasitif. Adanya kontaminasi akan menurunkan nilai tahanan isolasi yang berdampak pada tingginya arus resistif yang melaluinya. Besarnya pergeseran antara tegangan dan arus menjadi kurang dari 90° , selisih pergeseran dari 90° ini yang menunjukkan nilai tingkat kontaminasi yang disebut $\tan \delta$. Semakin rendah tangen delta semakin bagus. Apabila semakin tinggi tangen delta kondisi isolasi jelek.¹⁰

Selama peralatan beroperasi ada berbagai faktor yang dapat mempengaruhi nilai isolasi, seperti electrical, thermal (suhu), mekanis (mechanical), kimia (chemical), umur (ageing). Beberapa faktor tersebut menyebabkan isolasi mengalami deteriorasi (pemburukan nilai isolasi karena corona dan karbon) dan kontaminasi (bercampurnya zat lain kedalam mediasi). Kedua hal tersebut menyebabkan timbulnya arus resistif (I_R) yang bersifat sejajar dengan tegangan. Arus resistif (I_R) yang timbul akan menyebabkan adanya rugi-rugi daya (losses daya), sehingga

⁹ PT PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Primer Gardu Induk No. 0520-2* (Jakarta: PT. PLN, 2014), 14.

¹⁰ Miranti Fajarwati, Naskah Publikasi: “*Analisa Kondisi Hasil Pengujian Transformator III 150/20 kV 16 MVA GI Jajar Dalam Keadaan Padam*”, (Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2018), 6.

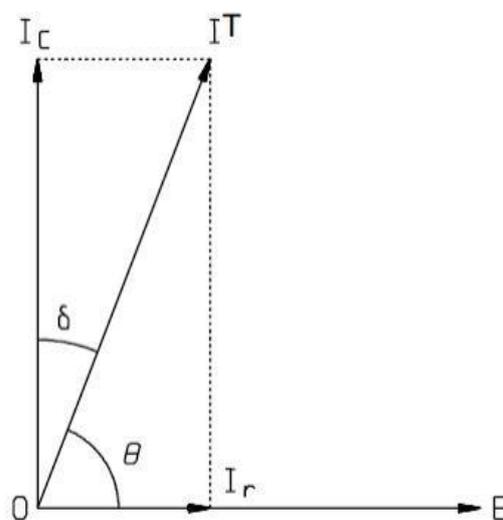
semakin besar nilai rugi-rugi daya semakin besar pula nilai arus resistif (I_R).¹¹

b. Tujuan Pengujian Tangen Delta

Pengujian tangen delta dilakukan untuk mengetahui besarnya nilai faktor disipasi ($\tan \delta$) dan kapasitansi dari VT. Peningkatan nilai dari kapasitansi mengindikasikan adanya pemburukan pada isolasi kertas isolasi.

Di antara serangkaian pengujian yang harus dilakukan untuk menguji mutu alat yang diuji adalah pengujian faktor rugirugi dielektrik ($\tan \delta$ atau δ). Pengujian $\tan \delta$ ditujukan untuk mendeteksi besarnya rugi-rugi dielektrik pada isolasi peralatan listrik yang berpengaruh pada umur pakai suatu peralatan listrik.¹²

c. Prinsip Kerja Pengujian Tangen Delta¹³



Gambar 2.6 Diagram power factor dan disipasi factor

¹¹ Aris Magetan, 2010, “Tangen Delta”, (<https://translarsyifa.wordpress.com/2010/09/02/tangen-delta/> diakses pada tanggal 25 Februari 2020, pukul 15.34)

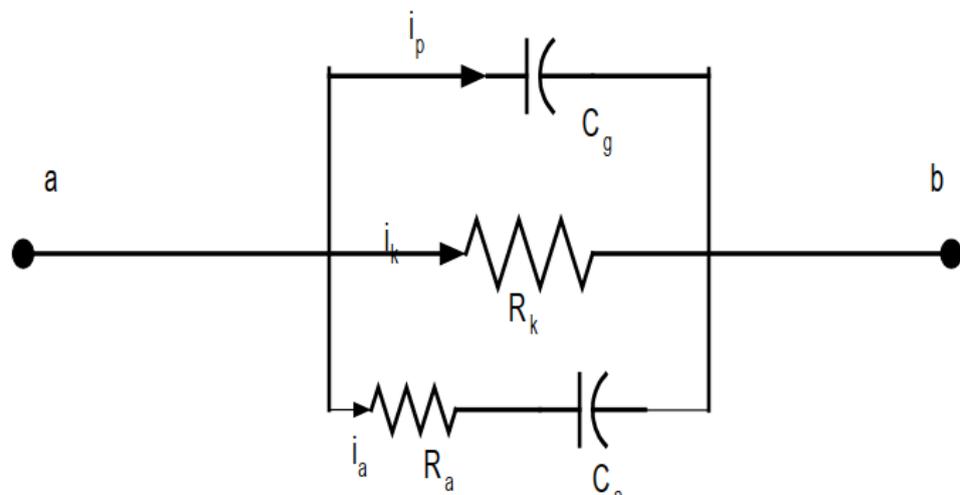
¹² Abdul Syakur dkk, “Pengujian $\tan (\delta)$ pada Kabel Tegangan Menengah”, Jurnal Teknik Elektro: Transmisi, Vol. 11, No. 2, Juni 2009, 107.

¹³ Abidin, Luqi, “Pengujian Dissipation Factor Pada Transformator dengan Jumper dan tanpa Jumper Bushing”, Jurnal Ilmiah: Energi dan Kelistrikan, Vol. 11, No. 2, Juli-Desember 2019, 190.

Delta (δ) adalah sudut rugi-rugi yang terbentuk ketika sebuah arus yang terukur dari isolasi yang tidak ideal atau kurang dari sudut 90° (90°), arus yang menghasilkan sudut 90° bersifat kapasitif (I_C), namun dalam realitanya terdapat arus yang bersifat resistif (I_R), yang membuat sudut yang dihasilkan kurang dari 90° , dalam hal ini dapat dikatakan semakin tinggi nilai kapasitansi semakin bagus nilai isolasi dari perangkat elektronik, dan Tan Delta (δ) delta adalah sebuah metode yang digunakan untuk mengukur nilai kapasitansi sebuah isolasi dari perangkat elektronik.

d. Pendekatan Rumus Tangen Delta¹⁴

Pendekatan berupa rumus yang digunakan pada penyelesaian laporan akhir ini ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.



Gambar 2.7 Rangkaian Listrik Ekuivalen Bahan Isolasi

Keterangan :

C_g = kapasitansi geometris;

R_k = resistansi bahan isolasi;

R_a = resistansi arus absorpsi;

C_a = kapasitansi arus absorpsi;

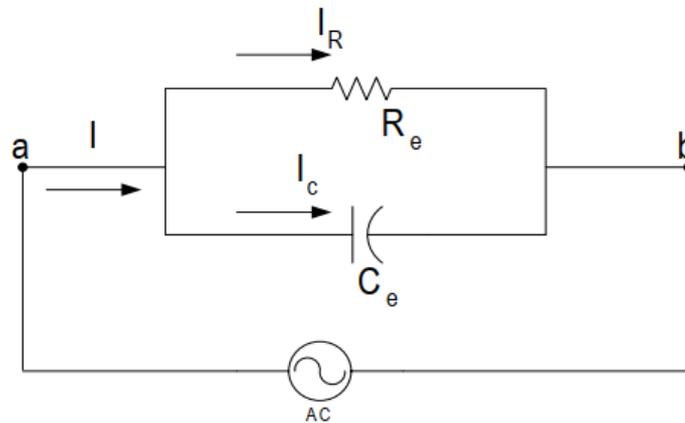
¹⁴ Febry Faturochman, Naskah Publikasi Skripsi: "Pengujian Tingkat Isolasi Transformator Daya Tegangan 150/20 kV Kapasitas 60 MVA Pada Gardu Induk Dengan Metode Tangen Delta". (Magelang: Universitas Tidar, 2018), 3.

I_p = arus pengisian;

I_a = arus absorpsi;

I_k = arus konduksi

Parameter pada Gambar 2.7 terdiri dari kapasitor dan resistor. Karena itu, impedansi ekuivalen dari semua parameter tersebut pada tegangan bolak-balik bersifat kapasitif. Sehingga rangkaian pada Gambar 2.7 dapat disederhanakan menjadi seperti gambar 2.8. Jika terminal ab rangkaian dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik, maka arus pada tiap komponen adalah sebagai berikut :



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen yang Disederhanakan

Dari gambar 2.8 diperoleh rumus sebagai berikut :

$$I_R = \frac{V}{R_e} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$I_C = \omega C_e V \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

I_R = arus resistif (Ampere);

V = tegangan (Volt);

I_C = arus kapasitif (Ampere);

R_e = resistansi (ohm);

C_e = kapasitansi (Farad)

Untuk arus total I , yaitu arus yang diberikan sumber tegangan pada rangkaian adalah jumlah vektori kedua komponen arus di atas, yaitu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \dots\dots\dots(2.3)$$

Arus I_R menimbulkan rugi-rugi daya P_d (P losses) pada resistor R_e . Rugirugi ini disebut rugi-rugi dielektrik. Rugi-rugi dielektrik ini adalah perkalian antara V dengan I_R atau;

$$P_d = V \cdot I_R = V I \cos \varphi = V I \sin \delta \dots\dots\dots (2.4)$$

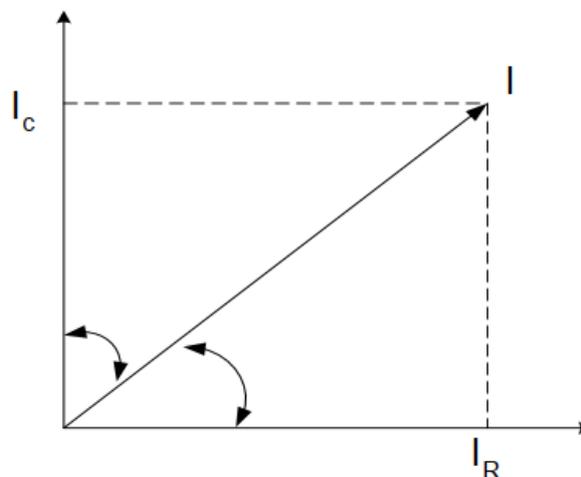
$$\sin \delta = \frac{P_d}{VI} \dots\dots\dots (2.5)$$

Menurut Gambar 2.9, $\cos \delta = I_C / I$, sehingga arus sumber dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I = \frac{I_C}{\cos \delta} \dots\dots\dots (2.6)$$

Substitusi dari Pers. 2 dengan Pers. 5 menghasilkan :

$$I = \frac{\omega C e V}{\cos \delta} \dots\dots\dots (2.7)$$



Gambar 2.9 Komponen Arus Menurut Rangkaian Gambar 2.8

Untuk substitusi Pers. 2.7 ke dalam Pers. 2.4 diperoleh :

$$P_d = \frac{\omega C e V}{\cos \delta} V \sin \delta = \omega C e V^2 \operatorname{tg} \delta$$

$$P_d = 2\pi f C e V^2 \operatorname{tg} \delta \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_d}{2\pi f C e V^2} \dots\dots\dots(2.9)$$

Selanjutnya, mensubstitusikan persamaan 2.4 dan persamaan 2.2 ke dalam persamaan 2.9 :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_d}{2\pi f C e V^2} = \frac{V I_R}{\omega C e V^2}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} \dots\dots\dots(2.10)$$

Rugi-rugi dielektrik tergantung pada frekuensi tegangan sumber. Oleh karena itu, rugi-rugi dielektrik tidak terjadi pada bahan isolasi yang dihubungkan ke sumber tegangan searah. Rugi-rugi dielektrik sebanding dengan faktor rugi-rugi dielektrik ($\operatorname{tg} \delta$), faktor yang tergantung pada jenis bahan isolasi. Jika $\operatorname{tg} \delta$ suatu bahan isolasi besar, maka rugi-rugi dielektrik bahan isolasi tersebut akan besar.

2.6 Standar atau Acuan Pengujian¹⁵

Standar ini mengatakan satu kesatuan dengan SPLN 69-1 : 1986 : “Standardisasi Peralatan Uji, Bagian Satu: Komisioning Instalasi dan Pengujian Peralatan”. Standar ini sebagai petunjuk bagi pelaksana, untuk mengetahui spesifikasi alat uji yang akan dipakai dalam melaksanakan tugas komisioning maupun pengujian peralatan.

¹⁵ PT PLN (Persero).2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Primer Gardu Induk* No. 0520-2 Hal 21

1. Standar Tahanan Isolasi

Standard: SK-DIR 0520-2.K.DIR.2014 (Buku Pedoman Transformator tegangan Final) VDE (catalogue 228/4) minimum besarnya tahanan isolasi kumparan trafo, pada suhu operasi dihitung “ **1 Kilo Volt = 1 MOhm**”

Tabel 2.2

Standar Minimum Tahanan Isolasi

No.	Hasil Uji	Rekomendasi
1	$\geq 1 \text{ Mohm} / 1 \text{ kV}$	Normal
2	$< 1 \text{ Mohm} / 1 \text{ kV}$	Lakukan Pengujian Lebih Lanjut

2. Standar Tangen Delta

Berdasarkan standar ANSI C 57.12.90 interpretasi hasil uji tangen delta sebagai berikut:

Tabel 2.3

Standar Tangen Delta ANSI C 57.12.90

No.	Hasil Uji	Keterangan
1	$\leq 0.5 \%$	Baik
2	0.5 % - 0.7 %	Memburuk
3	0.7 % - 1 %	Perlu dilakukan pemeriksaan lebih lanjut
4	$\geq 1 \%$	Buruk

Standar yang digunakan IEC 60044-5 “Instrument Transformer Part-5” Edisi I tahun 2004 dan manual book peralatan atau yang tertera pada nameplate peralatan, sebagai berikut:

Tabel 2.4

Standar Tangen Delta Transformator Tegangan

No.	Hasil Uji	Keterangan	Rekomendasi
1	$< 1 \%$	Dapat Diterima	Lakukan Pengujian Sesuai yang Dijadwalkan
2	$\geq 1 \%$	Tidak Dapat Diterima	<ol style="list-style-type: none">a. Lakukan pengujian sekali lagi untuk memastikan akurasi hasil uji atau mengacu ke manual book.b. Lihat trend hasil pengujian / hasil uji periode sebelumnya atau mengacu pada hasil uji pabrikan.c. Bandingkan dengan hasil pengujian yang lain (tahanan isolasi), Jika mengindikasikan hal yang sama (poor) maka:<ol style="list-style-type: none">1. Lakukan pengujian kualitas minyak isolasi dan DGA (khusus untuk PT jenis non hermetically sealed).2. Cek Kondisi metalic/rubber bellows, jika terindikasi kemasukan air/udara maka laksanakan penggantian minyak sesuai manual instruction atau hubungi pabrikan.3. Lakukan penggantian bila hasil perbaikan tetap menunjukkan $> 1 \%$.