

ANALISIS PENGUKURAN TANGEN DELTA PADA BAHAN ISOLASI GENERATOR

Abdul Multi¹, Sigit Pudji Handoyo²

Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Institut Sains dan Teknologi Nasional
Jl. Moch Kahfi II, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 12640
Tel: (021) 7270090
Email: amulti@istn.ac.id, sigitpudjih@gmail.com

ABSTRAK

Isolasi ideal ekuivalen dengan sebuah kapasitor ideal yang hanya menyimpan energi listrik dan tidak mendisipasikannya. Pada kenyataannya ketika terjadi beda potensial pada isolasi maka molekul polar didalamnya akan bergerak dan bergesekan secara kontinyu sehingga energi listrik terdissipasi dalam bentuk panas. Gejala pendisipasian energi ini ekuivalen dengan sebuah resistor. Mengukur besaran yang berhubungan dengan kapasitor dan resistor dan tendensi perubahan nilainya terhadap satuan waktu operasional merupakan cara terbaik untuk mengetahui kondisi dari sebuah isolasi. Nilai Kapasitansi C , Faktor Disipasi ($\tan \delta$) dan Faktor Daya ($\cos \theta$) adalah tiga besaran yang signifikan untuk memberikan gambaran kondisi sebuah isolasi. Ketiga besaran tersebut dapat dilakukan pengukurannya sekaligus dengan metode Jembatan Schering dalam sebuah alat uji yang dikenal dengan nama alat uji $\tan\delta$. Ketiga besaran tersebut bila digabungkan dengan pengukuran besaran AC dan DC lainnya yang juga meliputi pengujian dengan tegangan rendah, medium dan tinggi (Over Voltage) akan menjadi gambaran terkait dengan kondisi isolasi apakah masih dalam kondisi baik.

Kata kunci : Jembatan Schering, Faktor Disipasi, tangen delta

ABSTRACT

An ideal insulation is equivalent to an ideal capacitor which only stores electrical energy and does not dissipate it. In fact, when a potential difference occurs in the insulation, the polar molecules in it will move and rub together continuously so that electrical energy is dissipated in the form of heat. This energy dissipation phenomenon is equivalent to that of a resistor. Measuring the quantities associated with capacitors and resistors and their tendency to change in value with an operating time unit is the best way to determine the condition of an insulation. The value of Capacitance C , Dissipation Factor ($\tan \delta$) and Power Factor ($\cos \theta$) are three significant quantities to describe the condition of an insulation. These three quantities can be measured at the same time using the Schering Bridge method in an instrument test known as the $\tan\delta$ instrument test. These three quantities when combined with other AC and DC measurements which also include testing with low, medium and high voltages (Over Voltage) will be an illustration related to the condition of the insulation whether it is still in good condition.

Keywords: Schering Bridge, dissipation factor, tangent delta

1. PENDAHULUAN

Mesin-mesin listrik yang terdiri dari transformator, motor dan generator mempunyai peran yang penting di dunia industri. Dalam perkembangannya saat ini mesin listrik

menunjukkan tingkat kebutuhan yang terus meningkat seiring pertumbuhan industri dan perekonomian di dunia terutama di Indonesia sendiri. Kebutuhan penambahan daya 35.000 Mega watt yang saat ini sedang direalisasikan oleh

pemerintah membuktikan kecenderungan itu. Tentunya pemilihan produk dan pemeliharaan mesin listrik tersebut merupakan suatu hal yang sangat penting bukan saja karena nilai investasi mesin listrik tersebut yang begitu besar melainkan juga untuk menjamin kelangsungan ketersediaan energi listrik yang handal.

Teknologi yang dibutuhkan untuk pemeliharaan dan perbaikan mesin listrik baik meliputi metode maupun alat ukur telah berkembang pesat jauh melebihi perkembangan teknologi / desain dari mesin listrik itu sendiri yang cenderung sudah klasik. Perkembangan teknologi mesin listrik hanya berkisar pada perkembangan ilmu bahan yang digunakan untuk memperbaiki kemampuan dan kehandalan mesin itu sendiri (konduktor, isolasi, dan bahan ferro magnetic untuk core), perkembangan sistem pertukaran panas, konstruksi gulungan dan metode pembangkitan, tetapi secara umum konstruksi mesin listrik tersebut tidak banyak berubah.

Dalam Tulisan ini akan dibahas mengenai prinsip kerja dan kegunaan dari sebuah alat ukur bahan isolasi yang biasa digunakan mulai dari tahapan proses isolasi di pabrik, proses pemeliharaan dan proses perbaikan isolasi setelah mesin listrik tersebut dioperasikan. Alat ukur ini lebih dikenal dengan nama alat ukur Kapasitansi, Faktor Disipasi ($\tan \delta$) dan Faktor Daya ($\cos \theta$) yang berfungsi untuk mendapatkan gambaran tentang kondisi bahan isolasi tersebut.

Ibarat sebuah puzzle, hasil yang diperoleh dari pengukuran tersebut memberikan sebuah potongan-potongan dari suatu gambar utuh untuk mengetahui informasi mengenai kondisi bahan isolasi yang tengah diukur, apakah dalam kondisi baik sesuai desain atau mengindikasikan akan adanya kemungkinan kerusakan prematur dan untuk menunjukkan adanya proses penuaan.

Nilai kapasitansi stator generator sangat kecil mulai dari 10 nano farad sampai dengan 1 micro farad sehingga untuk mengukurnya dibutuhkan alat ukur dengan kepresisian dan sensitivitas tinggi. Penggunaan prinsip jembatan AC menjadi dasar dan kunci penting alat ukur ini. Prinsip kerja dasar dari alat ini adalah penggunaan jembatan schering sebagai salah satu jembatan AC dimana ini merupakan metode alat ukur yang biasa digunakan dalam teknik instrumentasi di laboratorium listrik untuk mendapatkan

pengukuran yang sangat presisi dan sensitive hanya perbedaannya besaran yang diukur dalam orde kilo volt.

Saat ini ada beberapa pabrik yang memproduksi alat ukur kapasitansi dan faktor disipasi ini dan pada dasarnya mereka menggunakan salah satu dari dua prinsip jembatan AC bertegangan tinggi yaitu Jembatan Schering atau Jembatan Transformer Lengan Pembanding yang disepakati penggunaannya dalam standar international yang dikeluarkan oleh IEEE, yaitu: IEEE Std. 4 – 1995 Standard Techniques for High Voltage Testing dan IEEE Std 286TM-2000 (R2006) Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation. Dan yang akan dianalisis di sini adalah penerapan alat ukur yang menggunakan metode jembatan schering.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Rangkaian dan Persamaan Jembatan Schering

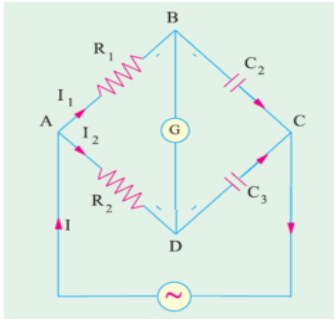
Jembatan Schering yang bentuk fisiknya ditunjukkan pada Gambar 1 merupakan jembatan yang memiliki peranan sangat penting untuk mendapatkan nilai kapasitansi dari kapasitor fisik C_1 yang tidak diketahui nilainya.



Gambar 1. Bentuk Fisik Jembatan Schering

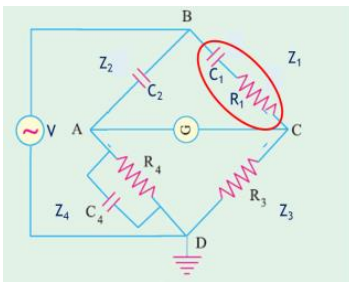
Jembatan schering digunakan sebagai komplemen dari jembatan De-Sauty yang hanya digunakan mengukur kapasitor ideal seperti ditunjukkan pada Gambar 2 berikut.

Sedangkan fungsi jembatan schering untuk mengukur kapasitor tidak ideal yang akan mengukur kapasitansi dan faktor disipasi kapasitor tersebut secara bersamaan seperti ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 2. Rangkaian Jembatan De-Sauty

Jembatan schering ini akan membandingkan kapasitor C1 dengan kapasitor ideal / standar C2 (kapasitor gas). Ketidak idealan kapasitor tersebut diwakili dengan sebuah kapasitor ideal yang faktor disipasinya nol yang terhubung seri dengan sebuah resistor yang mewakili rugi-rugi dielektriknya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian Jembatan Schering

Dalam rangkaian jembatan schering ini komponen-komponennya adalah sebagai berikut,

- C1 adalah kapasitansi yang nilainya a
- R1 adalah resistansi yang menggambarkan rugi-rugi pada C1
- C2 adalah kapasitor standar
- C4 adalah kapasitor variable
- R3 adalah resistor variabel non induktif
- R4 adalah resistor murni non induktif
- V adalah AC power supply tegangan tinggi
- Diantara kedua lengan ditempatkan detektor arus (galvanometer tipe getaran) AC yang presisi

Untuk aplikasi tegangan tinggi maka titik D dihubungkan ke titik pentanahan untuk keperluan keamanan saat dilakukan pengaturan komponen variabel untuk mendapatkan nilai kesetimbangan karena pada frekuensi rendah impedansi kapasitor jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nilai resistansi resistor terpasang sehingga

sebagian besar tegangan jatuh akan muncul pada kapasitor tersebut.

$$Z_1 = r_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$$

$$Z_3 = r_3$$

$$Z_4 = \frac{r_4/j\omega C_4}{1/j\omega C_4 + r_4}$$

$$= \frac{r_4/j\omega C_4}{(1 + j\omega C_4 r_4)/j\omega C_4}$$

$$= \frac{r_4}{(1 + j\omega C_4 r_4)}$$

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

$$\left(r_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) \left(\frac{r_4}{(1 + j\omega C_4 r_4)}\right) = \frac{1}{j\omega C_2} r_3$$

$$\left(r_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) r_4 = \frac{r_3}{j\omega C_2} (1 + j\omega C_4 r_4)$$

$$r_1 r_4 - j \frac{r_4}{\omega C_1} = \frac{r_3}{j\omega C_2} + \frac{j\omega C_4 r_3 r_4}{j\omega C_2}$$

$$r_1 r_4 - j \frac{r_4}{\omega C_1} = \frac{C_4 r_3 r_4}{C_2} - j \frac{r_3}{\omega C_2}$$

Komponen Aktif:

$$r_1 r_4 = \frac{C_4 r_3 r_4}{C_2}$$

$$r_1 = \frac{C_4 r_3}{C_2} \quad (1)$$

Komponen Reactive:

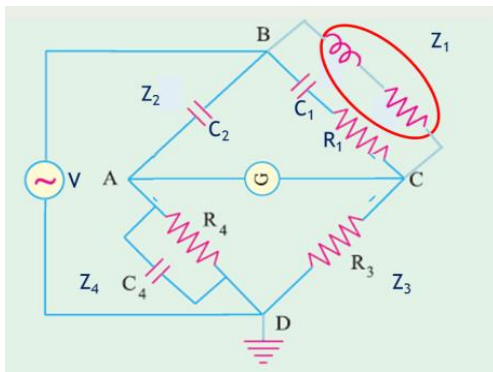
$$j \frac{r_4}{\omega C_1} = j \frac{r_3}{\omega C_2}$$

$$C_1 = \frac{r_4 C_2}{r_3} \quad (2)$$

Kualitas dari kapasitor yang diukur ditentukan oleh sudut rugi-rugi dielektrik atau sudut faktor disipasi δ (phase defect angle) yang terukur, yaitu sudut antara arus yang berangkat tegak lurus terhadap tegangan yang merupakan komplemen dari sudut fasa. Jika φ adalah sudut fasa aktual dan δ adalah sudut faktor disipasi maka $\delta = 90 - \varphi$ dimana pada sudut yang relatif kecil di bawah 5° maka nilai $\cos \theta = \sin \delta \approx \tan \delta$.

2.2 Permasalahan dengan Jembatan Schering

Karena pengujian isolasi coil dan stator generator membutuhkan Power supply ac tegangan tinggi maka untuk memperkecil kebutuhan arus dari Catu Daya diperlukan sebuah induktor sebagai kompensator (resonator berupa L dan R atau minimal sebuah komponen L jika R bisa diabaikan) yang ditempatkan paralel dengan obyek yang akan diukur seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Dengan demikian maka penurunan rumus jembatan Schering yang sebelumnya sederhana menjadi jauh lebih kompleks dimana variable yang hendak dicari nilainya C_1 dan R_1 saling mempengaruhi termasuk adanya variable tambahan berupa nilai inductor tersebut seperti ditunjukkan pada Persamaan 3 dan 4.



Gambar 4. Rangkaian Jembatan Schering dengan Resonator

$$Z_1 = \left[r_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right] // [r + j\omega L]$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$$

$$Z_3 = r_3$$

$$Z_4 = \frac{r_4/j\omega C_4}{1/j\omega C_4 + r_4}$$

Dengan cara yang sama maka akan didapatkan:

$$C_1 = \frac{r_4 \omega^2 L C_2 - r_3}{(r_1 r r_4 \omega^2 C_2 - r_3 r_4 \omega C_4 - r_3 \omega^2 L - r r_3 r_4 \omega^2 C_4)} \quad (3)$$

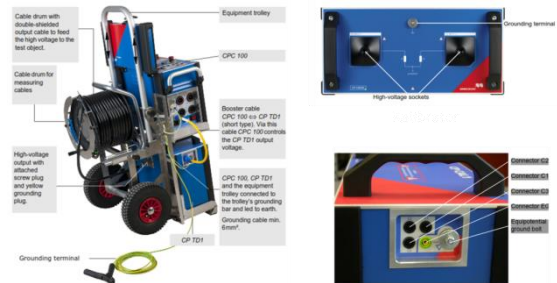
$$r_1 = \frac{r r_4 C_2 - r r_3 C_1 + (\omega^2 r_3 r_4 C_4 C_1 L) - r_3 r_4}{(r_3 C_1 + r_4 \omega^2 L C_2 C_1)} \quad (4)$$

Dengan dasar inilah penggunaan jembatan schering konvensional dirasakan tidak lagi menjadi praktis. Untuk itu dicarilah terobosan berupa alat digital yang masih mengadopsi konsep pengukuran jembatan schering untuk mengukur kapasitansi dan dissipation factor dimana ciri khasnya adalah adanya 4 buah lengan pembagi tegangan.

2.3 Alat Ukur Metode Jembatan Schering Digital Modern

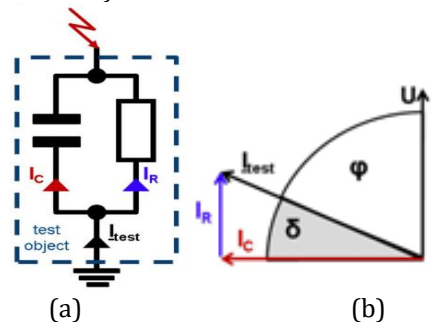
2.3.1 Konsep Dasar Alat Ukur Metode Jembatan Schering Digital Modern

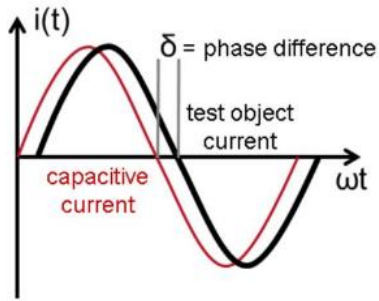
Alat ukur modern seperti ditunjukkan pada Gambar 5 yang sekarang ini tersedia di pasaran sudah menggunakan sistem digital yang tidak perlu lagi melakukan pengaturan kesetimbangan jembatan secara manual tetapi dengan mengitung perbedaan arus dan beda fasa yang terjadi secara otomatis.



Gambar 5. Contoh Alat Ukur Metode Jembatan Schering Digital Modern

Namun demikian alat ukur digital modern masih tetap menerapkan konsep pengukuran jembatan schering tetapi dengan metoda yang lebih mudah yaitu dengan menggunakan shunt resistor sebagai alat ukur tegangan, dari masing-masing lengan dua pembagi tegangan yang berfungsi merubah besaran arus menjadi besaran tegangan V_{ref} dan V_{test} (Gambar 6).





(c)

Gambar 6. Arus Kapasitif I_C dan Arus Resistif I_R

Perbedaan yang signifikan antara alat ukur yang menggunakan metode jembatan Schering konvensional dan alat ukur metode jembatan schering digital modern adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran C_1 dan R_1 dengan Jembatan Schering dilakukan dengan terlebih dahulu mengatur 3 buah komponen variabel R_3 , R_4 dan C_4 sehingga pada satu titik akan didapatkan kesetimbangan jembatan ditunjukkan dengan nilai alat ukur yang menunjukkan angka nol. Setelah C_1 dan R_1 diperoleh maka selanjutnya nilai faktor disipasi ditentukan dengan Persamaan 5 sebagai berikut

$$\tan-\delta = \omega.C_1. R_1 \quad (5)$$

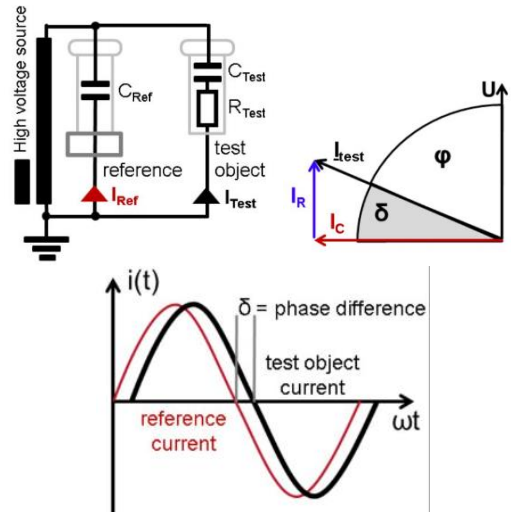
2. Pengukuran C_1 dan R_1 dengan alat modern dilakukan dengan mengukur arus yang mengalir pada lengan reference I_{Ref} dan arus yang mengalir pada lengan obyek I_{Test} dan beda fasa yang terjadi antara kedua arus tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Dengan mendapatkan besar sudut fasa (δ) tersebut didapatkan nilai tangensialnya yang juga merupakan nilai dari faktor disipasi DF ($\tan \delta$). Setelah itu ditentukanlah nilai impedansi dari obyek tersebut dengan menggunakan Persamaan 6 berikut.

$$Z_{Abs} = \frac{V}{I_{Test}} \quad (6)$$

Kemudian menghitung nilai C_1 dan R_1 dengan persamaan 5 dan 6

$$C_1 = Z_{Abs} \cos \delta \quad (7)$$

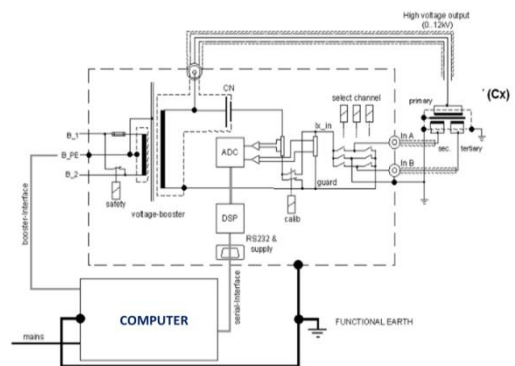
$$R_1 = Z_{Abs} \sin \delta \quad (8)$$



Gambar 7. Arus Reference dan Arus Test Obyek

2.3.2 Diagram Blok Alat Ukur Metode Jembatan Schering Modern

Diagram blok dari alat ukur modern ditunjukkan pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Diagram blok Alat Ukur Metode Jembatan Schering Digital Modern

Bagian-bagian terpenting dalam Diagram Kotak tersebut adalah sebagai berikut: Sebuah Catu Daya AC tegangan tinggi dengan kemampuan arus yang cukup untuk menginjeksi generator-generator besar ditambah dengan hadirnya induktor sebagai kompensator arus (resonator), empat buah lengan pembagi tegangan yang di satu lengannya ditempatkan sebuah kapasitor standar berisi gas dan masing-masing lengannya dilengkapi dengan sebuah R_{shunt} yang akan mengubah nilai arus menjadi tegangan, saklar digital pemilih kanal yang digunakan untuk mempermudah pengukuran obyek yang kompleks seperti trafo daya yang memiliki gulungan primer, sekunder dan tersier dan sebagai fasilitas pemisah

agar arus yang tidak diinginkan untuk diukur nilainya bisa dibypass melalui guard langsung tanpa melalui ampermeter. Rangkaian Op-Amp Pembanding tegangan yang diumpankan pada rangkaian Pengubah Analog ke Digital (ADC) dan rangkaian Pemrosesan Sinyal Digital (DSP). Adapun keakuratan dan kepresisian alat tersebut dijelaskan pada Tabel 1 berikut ini,

Tabel 1. Data Akurasi dan Kepresisian Kapasitansi Output Catu Daya

Terminal	U / f	THD	I	S	t _{max}
High volt. output	10 ... 12kV AC	< 2%	300mA	3600VA	> 2min
	15 ... 400Hz		100mA	1200VA	> 60min

Range	Resolution	Typical accuracy
0 ... 12000V AC	1V	error < 0.3% of reading + 1V

Terminal	Range	Resolution	Typical accuracy	Conditions
IN A or IN B ¹	0 ... 5A AC	5 digits	error < 0.3% of reading + 100nA	I _x < 8mA
			error < 0.5% of reading	I _x > 8mA

Range	Resolution	Typical accuracy	Conditions
1pF ... 3μF	6 digits	error < 0.05% of reading + 0.1pF	I _x < 8mA, V _{test} = 300V ... 10kV
		error < 0.2% of reading	I _x > 8mA, V _{test} = 300V ... 10kV

Range	Resolution	Typ. accuracy	Conditions
0 ... 10% (capacitive)	5 digits	error < 0.1% of reading + 0.005% ¹	f = 45 ... 70Hz, I < 8mA, V _{test} = 300V ... 10kV
0 ... 100 (0...10000%)	5 digits	error < 0.5% of reading + 0.02%	V _{test} = 300V ... 10kV

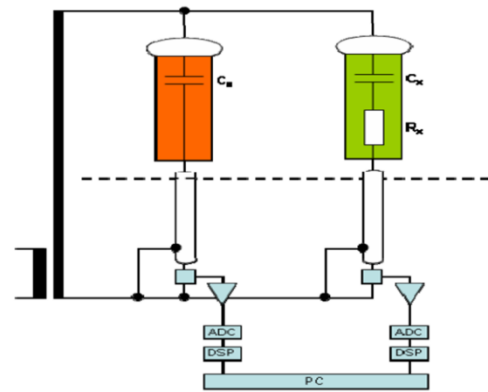
Range	Resolution	Typ. accuracy	Conditions
0 ... 10% (capacitive)	5 digits	error < 0.1% of reading + 0.005% ¹	f = 45 ... 70Hz, I < 8mA, V _{test} = 300V ... 10kV
0 ... 100%	5 digits	error < 0.5% of reading + 0.02%	V _{test} = 300V ... 10kV

Range	Resolution	Typ. accuracy	Conditions
-90° ... +90°	4 digits	error < 0.01°	V _{test} = 300V ... 10kV

Range	Resolution	Typ. accuracy	Conditions
1kΩ ... 1200MΩ	6 digits	error < 0.5% of reading	V _{test} = 300V ... 10kV

Prinsip kerja dari metode ini adalah dengan menghitung kapasitansi dan faktor disipasi secara langsung dengan mengukur arus seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Arus dari kedua sisi pembagi tegangan akan ditransformasikan dan disesuaikan impedansinya dengan rangkaian

penyesuaian impedansi pengukuran. Setelah itu akan digitalkan dengan menggunakan rangkaian pengubah sinyal analog ke digital (ADC) dan hasilnya yang merupakan nilai yang diperlukan akan dikalkulasi oleh pemroses sinyal digital (DSP).



Gambar 9. Empat Lengan Pembagi Tegangan

Hasil dari DSP ini akan ditransfer ke sebuah komputer dengan menggunakan penghubung optikal (fibre optic) untuk tujuan safety yaitu pengukuran bebas tegangan. Pengaturan kesetimbangan yang dilakukan pada jembatan schering konvensional tidak lagi diperlukan. Perbedaan fasa dan juga amplitudo dari tegangan input secara langsung diolah dari signal digital yang diperoleh sebelumnya. Pengolahan data dilakukan dengan transformasi Fourier digital (DFT) untuk mendapatkan keakuratan yang tinggi khususnya beda fasa antara dua vektor arus (referensi dan test) yang nilainya sama dengan nilai faktor disipasi (Tan δ)

3. METODOLOGI

3.1 Gambaran Umum Pengujian

Pengujian menggunakan alat ukur modern dilakukan baik pada coil individu maupun pada stator generator di lapangan dengan tujuan untuk mendapatkan informasi nilai kapasitansi saat tegangan rendah (C_{lv}) maupun saat tegangan tinggi (C_{hv}), Faktor Disipasi (Tan δ) dan juga pengujian selisih dari dua pengukuran Faktor Disipasi pada tegangan yang berbeda (Δ Tan δ). Dengan membandingkan dan mencari korelasi hubungan dari besaran-besaran tersebut akan dapat diperoleh gambaran yang lebih baik tentang kondisi sebuah isolasi.

Pengujian dilakukan dengan menginjeksikan tegangan dari level terendah s.d. level operasional

generator tersebut (0.58 Un) dengan kenaikan 20% dan ditahan untuk beberapa saat sebelum dinaikkan ke level berikutnya. Setelah mencapai level tertinggi 100% maka dilakukan pengujian dengan cara sebaliknya yaitu menurunkan tegangan injeksi dengan penurunan 20%.

3.2 Pengujian Obyek Stator Generator sebelum dan sesudah Overhaul

Pengujian pertama adalah dengan mengambil obyek sebuah stator generator yang akan dilakukan pekerjaan pemeliharaan rutin berupa overhaul dimana stator generator yang kotor karena sudah lama beroperasi tersebut akan dibersihkan dengan dicuci kemudian di oven. Ada dua kondisi yang dapat ditinjau untuk diambil datanya yaitu sebelum dibersihkan dan setelah di oven (drying). Tabel 2 merupakan data pengujian yang diambil sebelum dan sesudah overhaul dengan level tertinggi tegangan injeksi sedangkan untuk data pengukuran lengkap tiap level tegangan dapat dilihat di lampiran data-data pengujian.

Dapat dijelaskan di sini pengertian dan istilah dari parameter-parameter yang berlaku untuk setiap pengujian sebagai berikut:

- V_{meas} = Tegangan uji kecil untuk mendapatkan nilai kapasitansi C_p dan impedansi Z_{abs}
- I_{meas} = Arus yang terukur untuk mendapatkan nilai kapasitansi C_p dan impedansi Z_{abs}
- Frekuensi = Adalah Frekuensi jala-jala dari tegangan yang disuplai
- R_p = Adalah resistor obyek yang diuji dalam hubungan paralel dengan kapasitor
- R_s = Adalah resistor obyek yang diuji dalam hubungan seri dengan kapasitor
- C_p = Adalah kapasitor obyek yang diuji dalam hubungan paralel
- C_s = Adalah kapasitor obyek yang diuji dalam hubungan seri
- Z_{abs} = Impedansi absolut dari obyek yang diuji baik dengan hubungan seri maupun paralel
- Z_{phase} = Sudut impedansi absolut dari obyek yang diuji baik dengan hubungan seri maupun paralel (φ)
- δ = Sudut disipasi dielektrik ($90 - \varphi$)
- DF = Faktor Disipasi ($\tan \delta$)
- PF = Faktor Daya ($\cos \varphi$)
- C_{hv} = Nilai kapasitansi obyek terukur pada tegangan yang lebih tinggi

- C_{lv} = Nilai kapasitansi obyek terukur pada tegangan yang lebih rendah
- ΔC = Selisih nilai kapasitansi dari dua level pengujian yang berbeda

Dalam pengujian yang sudah dilakukan ada parameter yang didapatkan dari hasil pengukuran langsung dengan metoda yang sudah dibahas sebelumnya namun ada juga parameter yang didapatkan melalui perhitungan menggunakan persamaan-persamaan umum. Parameter yang didapatkan langsung dari pengukuran yaitu V_{meas} , I_{meas} , Frekuensi, Z_{phase} (φ) dan PF ($\cos \varphi$), sedangkan parameter yang didapatkan dari perhitungan adalah:

- C_s persamaan $C_p = \frac{C_s}{DF^2 + 1}$
- R_s , persamaan $R_p = \frac{1+DF^2}{DF^2} \times R_s$
- DF persamaan $DF = \frac{PF}{\sqrt{1-PF^2}}$
- ΔC persamaan $\Delta C = \frac{C_{hv}}{C_{hv}-C_{lv}}$
- Z_{abs} , persamaan (4)
- C_p , C_{lv} dan C_{lv} persamaan (5)
- R_p persamaan (6)

Dari tabel pengujian 2 dan 3 dapat kita bandingkan data pengukuran sebelum stator generator dilakukan proses cleaning dan data pengukuran setelah cleaning dan pengeringan. Karena sudah beroperasi sangat lama maka kondisi generator sangat kotor dan kotoran tadi mengisi setiap rongga sempit dari coil individu-coil individu yang terpasang pada stator. Beberapa parameter yang berubah karena kondisi tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

Tabel 2. Data pengukuran Stator Pusri sebelum Overhaul

Data Pengukuran (Sebelum)		
V_{meas}		1912.0V
I_{meas}		0.071639587A
Frekuensi		50.01A
R_p		338573.2613 Ω
R_s		2104.0125 Ω
C_s		1.19610E-07
C_p		0.000000118866413F
Z_{abs}		26690.1172 Ω
Z_{phase}		-85.4786 $^\circ$
$\cos \theta$		0.078831
DF		7.9077%
PF		7.8831%
C_{hv}		0.00000011968985F
C_{lv}		0.000000118866413F
ΔC		0.69274%

Tabel 3. Data pengukuran Stator Pusri setelah Overhaul

Data Pengukuran (Sesudah)		
Vmeas		1912.0V
Imeas		0.067235026A
Frekuensi		50.01 Hz
Rp		1179669.1593Ω
Rs		685.443Ω
Cs		1.11950E-07
Cp		0.000000111884848F
Zabs		28435.8222Ω
Zphase		-88.6188°
cos θ		0.024104
DF		2.4112%
PF		2.4105%
C _{hv}		0.000000112211688F
C _{lv}		0.000000111884848F
Δ C		0.29212%

1. Kotoran yang mengisi rongga tersebut identik dengan penambahan area dari plat kapasitor sehingga menggunakan Persamaan (9)

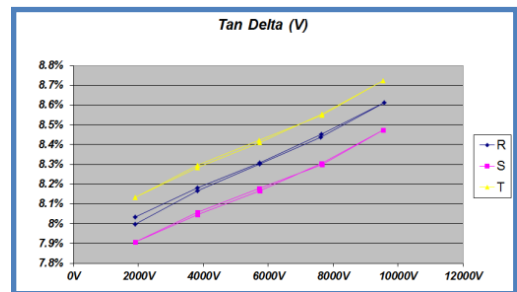
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (9)$$

maka nilai kapasitansi C_p akan lebih tinggi dari nilai kapasitansi generator yang bersih (baru ataupun selesai overhaul) seperti ditunjukkan pada tabel 2 sehingga otomatis nilai DF pun akan berubah lebih tinggi sesuai persamaan (3) nilai kapasitansi yang berubah. Dari pengalaman yang ada nilai DF awal untuk isolasi dengan kualitas baik nilainya <5%. Menurut data empiris kenaikan lebih dari 1% dari nilai awal mengindikasikan adanya perubahan kondisi yang signifikan dari isolasi tersebut.

2. Beberapa kotoran yang mengisi rongga tersebut berasal dari beberapa jenis bahan sekaligus seperti debu, lemak, oli, uap air dll. Kejadian tersebut bisa digambarkan sebagai gabungan dari beberapa kapasitor dengan konstanta dielektrik (ε_r) masing-masing bahan kontaminan yang berbeda-beda sehingga membentuk kapasitor baru yang tersusun seri maupun paralel dengan kapasitor aslinya. Akibatnya nilai kapasitansi C_p DF pun akan berubah nilainya menjadi lebih tinggi.
3. Analisa dari perhitungan dua nilai kapasitansi dari dua tegangan yang berbeda level dan dihitung selisihnya menggunakan

persamaan (ΔC) di atas seperti dapat dilihat pada Tabel 2 yaitu C_{hv} (0.58 U_N) dan C_{lv} 0.2 (U_N). Menurut data empiris yang ada apabila nilainya > 1% maka diyakini terjadi aktifitas partial discharge yaitu terjadinya arching pada kapasitansi di dalam isolasi yang dielektriknya udara sehingga otomatis kapastansinya menjadi nol (terhubung singkat) maka nilai kapasitansi totalnya menjadi turun. Sebaliknya bila nilai ΔC < 1% maka bisa dianggap tidak ada aktifitas partial discharge. Ini bisa disebut pengujian partial discharge secara tidak langsung.

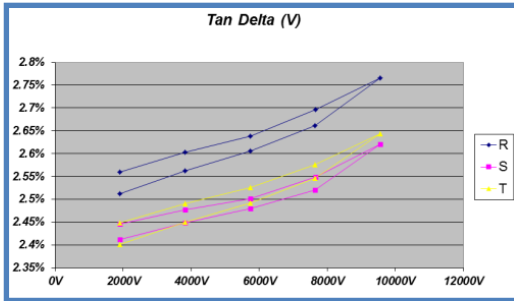
4. Juga untuk nilai Z_{abs} akan memiliki nilai yang lebih besar karena dengan bertambahnya nilai kapasitansi C_p akibat kotoran di atas maka nilai reaktansi kapasitif Xc dan R_p akan mengecil yang menunjukkan bahwa bahan kontaminan tersebut cenderung lebih konduktif dibandingkan isolasi mika.
5. Dalam sebuah stator generator 3 fasa walaupun masing-masing fasa terdiri dari susunan coil individu yang identik dengan jumlah yang sama tetapi tidak menjamin bahwa kapasitansi masing-masing fase tersebut memiliki nilai yang sama seperti ditunjukkan pada Gambar 10.
6. sehingga arus I_{meas} yang mengalir menjadi lebih besar.



Gambar 10. Tan Delta Pusri Sebelum Overhaul

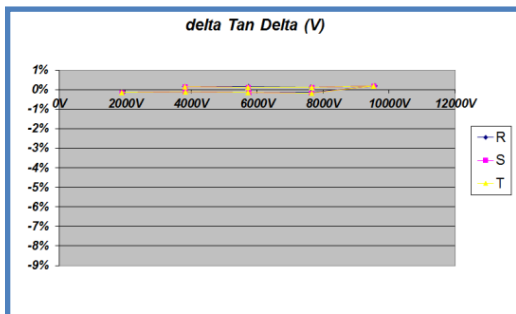
7. Idealnya nilainya identik tetapi bila dari sejak awal sudah dilakukan pengambilan data sebagai baseline maka perbedaan nilai yang terjadi antar fasa saat pengujian berikutnya dengan kondisi yang sudah bersih paska overhaul seperti pada Gambar 11 bisa disebabkan karena laju proses penuaan yang memang berbeda. Hal ini bisa akibat dari pembebanan antar fasa yang mungkin saja berbeda sepanjang perjalanan waktunya sehingga masing-masing fasa

mengalami temperature operasi yang berbeda .

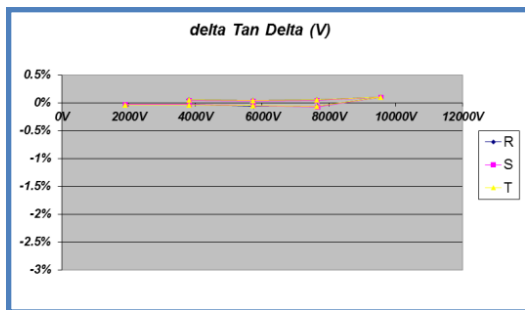


Gambar 11. ΔTan Delta Pusri Setelah Overhaul

8. Untuk analisa tambahan seperti pada poin no. 3 di atas bisa juga dilakukan perhitungan dari dua nilai faktor disipasi dari dua tegangan yang berbeda level DF_{lv} ($0.58 U_N$) dan DF_{lv} $0.2 (U_N)$ dan dihitung selisihnya ($\Delta \text{Tan}\delta$) dan hasilnya diplot pada grafik sehingga bisa didapatkan informasi tambahan yang berguna. Seperti pada penjelasan mengenai ΔC perhitungan ini bisa mengindikasikan ada tidaknya aktifitas partial discharge. Perubahan ini diiringi juga dengan perubahan disipasi karena aktifitas arcing tersebut menambah disipasi daya

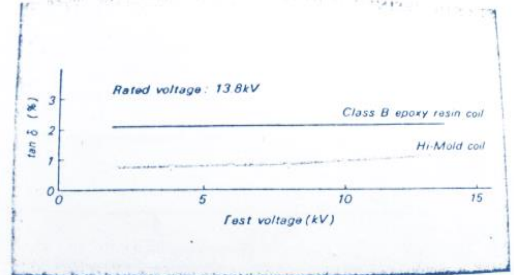


Gambar 12. ΔTan Delta Pusri Sebelum Overhaul



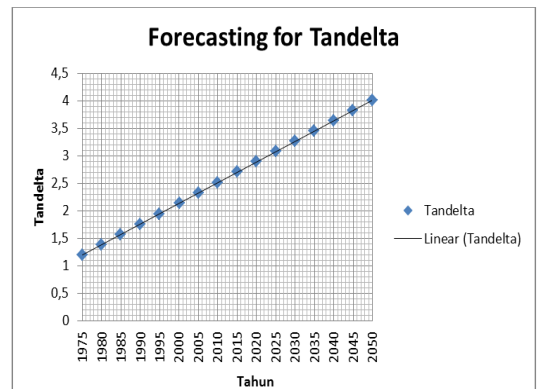
Gambar 13. ΔTan Delta Pusri Setelah Overhaul

9. Khusus pada pengujian pertama stator generator ini terdapat buku manual pabrik yang masih lengkap dimana di dalamnya terdapat data pengujian awal di pabrik saat generator ini dibuat pada tahun 1975 seperti pada Gambar 14 berikut.



Gambar 14. Data awal pabrikasi Tan Delta

Data faktor disipasi ini kita jadikan baseline data untuk keperluan analisa tren yang akan sangat berguna untuk mendapatkan gambaran dari faktor penuaan sebuah isolasi yang idealnya akan mengalami penambahan nilai faktor disipasi yang linier seperti ditunjukkan pada Gambar 15 berikut. Ketika pengujian dilakukan secara reguler maka semakin banyak data semakin jelas tren yang bisa diamati sehingga bisa didapat gambaran apakah isolasi tersebut sedang mengalami penuaan yang normal atau yang terlalu cepat. Dengan demikian analisa tren tersebut dapat digunakan sebagai informasi pendukung pengambilan keputusan dari pemilik generator perlakuan apakah yang akan dikenakan pada generator tersebut, apakah masih layak beroperasi atau harus digulung ulang.



Gambar 15 Nilai Prediksi Tan Delta

3.3 Pengujian Obyek Coil Individu # 1

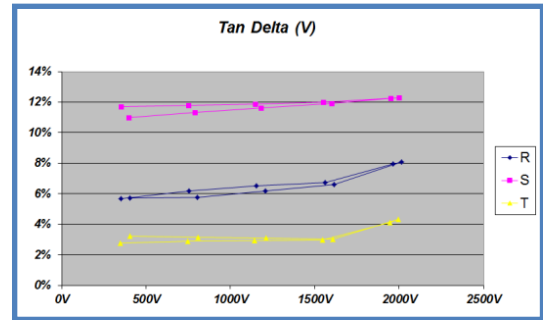
Hasil data pengujian pengukuran Coil individu # 1 ditampilkan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Data pengukuran Coil individu # 1

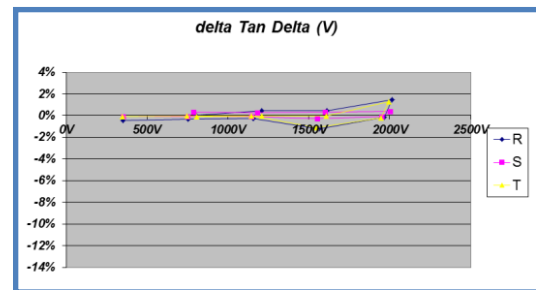
Data Pengukuran Coil Individu #1			
	Awal	Dibasahi	Sesudah di oven
Vmeas	2016,0V	2001,0V	1995,0V
Imeas	0,000731255A	0,002513099A	0,000676747A
Frekuensi	50,01 Hz	50,01 Hz	50,01 Hz
Rp	34312869,7888Ω	6522093,7491Ω	68384594,2874Ω
Rs	222740,4159Ω	97328,7251Ω	127820,1819Ω
Cs	1,15491E-09	4,02452E-09	1,07743E-09
Cp	0,000000001147416F	0,000000003964463F	0,00000000107542F
Zabs	2764572,822Ω	796735,2567Ω	2956506,6008Ω
Zphase	-85,3787°	-82,9833°	-87,5221°
cos θ	0,0805694	0,1221586	0,043234
DF	8,0832%	12,3081%	4,3274%
PF	8,057%	12,2159%	4,3234%
C _{hv}	0,000000001135909F	0,000000003923962F	0,000000001064092F
C _{lv}	0,000000001133694F	0,000000003875445F	0,000000001063478F
Δ C	0,19538%	1,25191%	0,05774%

Pengujian kedua adalah dengan mengambil obyek sebuah coil individu yang merupakan coil cadangan sisa pekerjaan rewinding yang sudah tersimpan lama sehingga dapat diasumsikan bahwa coil individu tersebut sudah lembab karena menyerap uap air. Kemudian coil dikondisikan dengan membasahi isolasinya dengan air agar terjadi kondisi yang lebih buruk dan setelah itu dilakukan pengeringan coil dengan cara dioven dan dilakukan uji ulang. Sama seperti pengujian sebelumnya poin-poin pada poin 1 s.d poin 6 paragraf 3.2 masih berlaku. Dapat dilihat secara umum pada tabel 3 dan juga Gambar 16 - 17 terjadi kenaikan drastis nilai faktor disipasi dari sebelumnya 8,0832% menjadi 12,3081% ketika coil tersebut dibasahi dan kembali terjadi penurunan drastis setelah coil tersebut dikeringkan dengan di oven menjadi 4,3274%.

Karena ini adalah coil individu yang tidak terpasang di stator maka kontaminasi yang disebabkan debu tidak terlalu signifikan mempengaruhi perubahan Cp namun adanya kandungan uap air pada isolasi tersebut (lembab) menambah nilai konstanta dielektrik ε_r (air) isolasi sehingga otomatis nilai kapasitansi ikut membesar 1.6463nF dari sebelumnya 1.5224nF



Gambar 16. Perbandingan Tan Delta coil individu #1



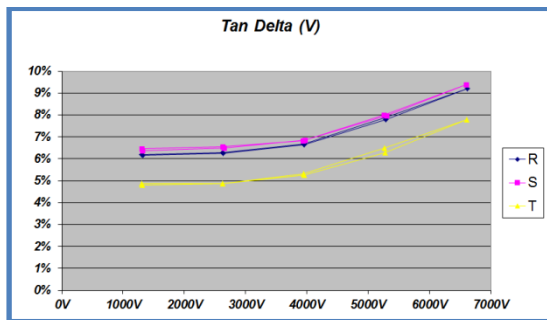
Gambar 17. Perbandingan ΔTan Delta coil individu #1

3.4 Pengujian Obyek Coil Individu # 2

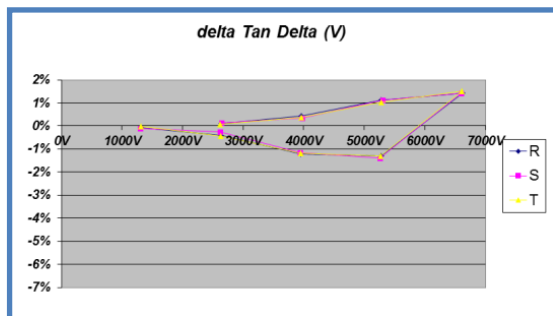
Pengujian ketiga adalah dengan mengambil obyek sebuah coil individu yang merupakan coil cadangan sisa pekerjaan rewinding yang sudah tersimpan lama sehingga dapat diasumsikan bahwa coil individu tersebut sudah lembab karena menyerap uap air. Kondisi lembab ini sangat tergantung dari kualitas dan jenis coil yang dipabrikasi, ada jenis coil yang isolasinya memang dibuat untuk relatif tahan air sehingga relatif kering pada kondisi tidak digunakan ataupun beroperasi. Dapat dilihat pada Tabel 4 dilakukan pengujian langsung tanpa pemanasan terlebih dahulu dan kemudian dilakukan pengujian setelah pemanasan untuk mendapatkan kondisi yang kering. Poin-poin pada poin 1 s.d poin 6 paragraf 3.2 masih berlaku. Dapat dilihat secara umum pada Tabel 5 berikut dan juga Gambar 18 s.d 19 menunjukkan adanya terjadi kenaikan nilai faktor disipasi dari sebelumnya 9,2022%. menjadi 9,3524% ketika coil tersebut dibasahi dan kembali terjadi penurunan setelah coil tersebut dikeringkan dengan di oven sehingga menjadi 7,7739%.

Tabel 5. Data pengukuran Coil individu #2

Data Pengukuran Coil Individu #2			
	Awal	Dibasahin	Sesudah di oven
Vmeas	6619,0V	6598,0V	6613,0V
Imeas	0,003444889A	0,003482861A	0,003179291A
Frekuensi	50,01 Hz	50,01 Hz	50,01 Hz
Rp	21005907,7707Ω	20292498,6797Ω	26807480,8714Ω
Rs	176385,1783Ω	177491,8641Ω	162007,8972Ω
Cs	1,66032E-09	1,68428E-09	1,53173E-09
Cp	0,000000001646381F	0,000000001669547F	0,000000001522478F
Zabs	1924871,6289Ω	1897828,6059Ω	2083992,2275Ω
Zphase	-84,7423°	-84,6336°	-85,5414°
cos θ	0,091635	0,093524	0,077738
DF	9,2022%	9,3935%	7,7975%
PF	9,1635%	9,3524%	7,7739%
C _{hv}	0,000000001599655F	0,000000001622818F	0,000000001477228F
C _{lv}	0,000000001591654F	0,000000001613635F	0,000000001469154F
Δ C	0,50268%	0,56909%	0,54957%



Gambar 18. Perbandingan Tan Delta coil individu #2



Gambar 19. Perbandingan ΔTan Delta coil individu #2

3.5 Pengujian dan perbandingan 2 Obyek Stator Generator

Pengujian keempat adalah dengan mengambil dua buah obyek stator generator dari dua merk ternama yang berbeda, di dua tempat berbeda dan waktu yang berbeda. Keduanya diuji saat setelah dilakukan overhaul untuk membandingkan kondisi dari keduanya. Sama seperti pengujian sebelumnya poin-poin pada poin 1 s.d poin 6 paragraf 3.2 masih berlaku. Dapat dilihat secara umum pada Tabel 5 dan juga Gambar 20 s.d 23 bahwa untuk generator dengan kualitas baik (dapat dilihat dari reputasi produsen generator tersebut) maka nilai faktor disipasinya

rata-rata < 5%, ini terbukti dengan yang ditunjukkan pada Tabel 6 bahwa kedua generator tersebut berturut-turut memiliki nilai faktor disipasi sebesar 2.3629% dan 1.5193%.

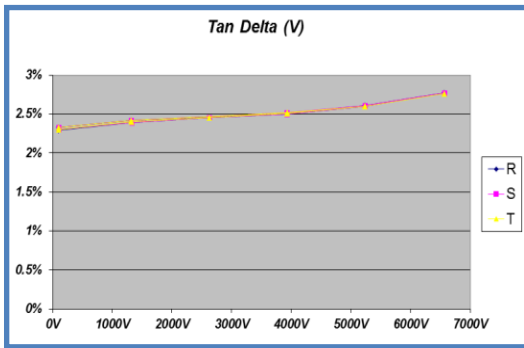
Tabel 6a. Data pengukuran Stator PKT setelah Overhaul

Data Pengukuran Stator PKT	
Vmeas	1304.0V
Imeas	0.077257099A
Frekuensi	50.0 Hz
Rp	714709.5595Ω
Rs	398.8124Ω
Cs	1.88592E-07
Cp	0.000000188486311F
Zabs	16882.9801Ω
Zphase	-88.6464°
cos θ	0.023622
DF	2.3629%
PF	2.3622%
C _{hv}	0.000000190113748F
C _{lv}	0.00000018887598F
Δ C	0.65533%

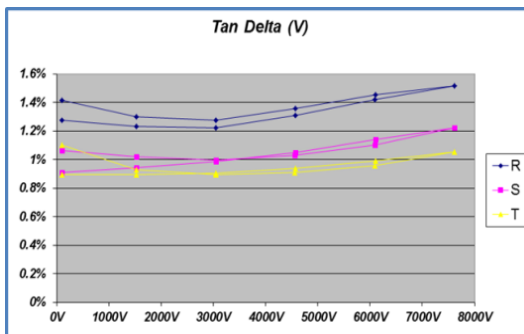
Akan lebih baik bila tersedia data awal dari pabrikan yang akan menjadi baseline data dan apabila tidak ada maka pengujian pertamalah yang akan digunakan sebagai baseline data. Sehingga bila pengujian tersebut dilakukan secara rutin maka akan didapatkan informasi yang sama pada poin 7 paragraf 3.2 berupa data tren yang bisa digunakan untuk melihat kondisi isolasi generator tersebut.

Tabel 6b. Data pengukuran Stator PLN setelah Overhaul

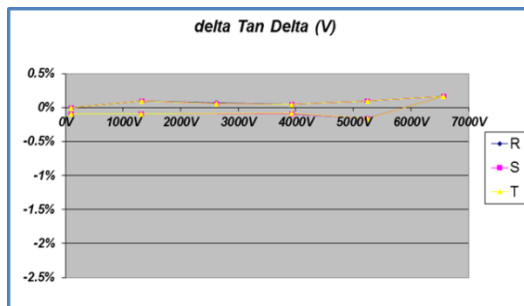
Data Pengukuran Stator PLN	
Vmeas	100.0V
Imeas	0.00638466A
Frekuensi	50.01 Hz
Rp	1034731.7859Ω
Rs	238.8456Ω
Cs	2.02461E-07
Cp	0.000000202414052F
Zabs	15720.722Ω
Zphase	-89.1295°
cos θ	0.015192
DF	1.5195%
PF	1.5193%
C _{hv}	0.00000020385886F
C _{lv}	0.000000201913596F
Δ C	0.96341%



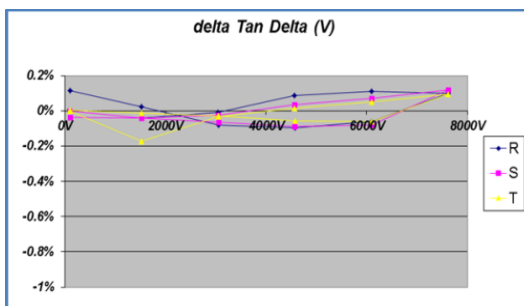
Gambar 20. Tan Delta Stator PKT Setelah Overhaul



Gambar 21. Tan Delta Stator PLN Setelah Overhaul



Gambar 22. Δ Tan Delta Stator PKT Setelah Overhaul



Gambar 23. Δ Tan Delta Stator PLN Setelah Overhaul

4. SIMPULAN

Dari beberapa macam pengujian yang telah dilakukan baik pada stator generator maupun pada coil individu berikut analisisnya maka dapat diambil beberapa simpulan sebagai berikut:

1. Diantara beberapa metode Jembatan DC dan AC yang ada maka untuk dapat mengukur nilai kapasitansi dari sebuah kapasitor tak ideal yang ekuivalen dengan gabungan antara kapasitor dan resistor, metode Jembatan Schering adalah yang paling tepat untuk digunakan.
2. Metode jembatan schering digital modern yang merupakan pengembangan dari jembatan schering konvensional terbukti dapat mengukur kapasitansi, resistansi dan faktor disipasi pada rangkaian AC dengan akurasi dan kepresisian yang tinggi dengan cara yang lebih mudah.
3. Dengan tingkat keakurasian dan kepresisian yang tinggi dalam pengukuran besaran-besaran AC di atas, apabila pengukuran dilakukan beberapa kali atau rutin pada obyek yang sama dalam kondisi dan atau waktu yang berbeda terbukti hasil pengukurannya bisa dimanfaatkan untuk menggambarkan ada tidaknya perubahan kondisi obyek yang diukur. Perubahan nilai $< 1\%$ baik dari nilai kapasitansi maupun faktor disipasi terbukti menggambarkan kondisi isolasi yang bersih dan kering.
4. Pengukuran nilai faktor disipasi untuk isolasi stator generator pada kondisi setelah overhaul yang bersih dan kering nilainya teruji maksimum 2.41%.
5. Penambahan kompensator arus yang dilakukan dengan menambah induktor sebagai resonator pada lengan obyek yang diukur dan mengalirkan arusnya melewati guard tanpa melalui ampere meter terbukti dapat memperkecil kapasitas catu daya yang dibutuhkan tanpa mempengaruhi keakuratan dan kepresisian hasil pengukuran.

DAFTAR PUSTAKA

1. CP TD1 Reference Manual V 1.44 Article Number: VESD0606 Manual Version: CPC100TD1.AE.6
2. John Bird BSc(Hons), CEng, CSci, CMath, FIET, MIEE, FIIE, FIMA, FcollT, Electrical and

Electronic Principles and Technology, 3rd edition

3. Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani ELECTRICAL INSULATION FOR ROTATING MACHINES: Design, Evaluation, Aging Testing and Repair. Willey Interscience 2004.
4. <http://www.nct-tech.edu.lk/Download/TechnologyZone/ACBridges.pdf>
5. IEEE std 4-1995, Standard Techniques for High Voltage Testing
6. IEEE std 286-2000 (R2006) , Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.
7. IEEE std 56-1997, Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10 000 kVA and Larger).
8. Mahon, L.L.J., Diesel Generator Handbook Elsevier Butterworth Heinemann 1992
9. Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, Operational Amplifier & Integrated Circuit
10. S. Kornhuber, S. Markalous, M. Muhr, T. Strehl, C. Sumereder, "Comparison of methods for the dissipation factor measurement at Practical Examples", Institute of High Voltage Engineering and System Management Graz University of Technology, Inffeldgasse 18, 8010, Graz, Austria
11. V.K. Mehta, Rohit Mehta: Principles of Electrical Engineering S.Chand & Company ltd, 2005