

ANALISA PENGARUH PARTIAL DISCHARGE DAN TAN δ TERHADAP UMUR ISOLASI BELITAN STATOR AKIBAT IKATAN KUMPARAN GENERATOR LONGGAR

Mohammad Amir dan I Wayan Angga Juliawan
Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Tenaga Listrik, Institut Sains Teknologi Nasional,

Abstrak

Permasalahan yang sering menjadi faktor penyebab dari kegagalan atau breakdown pada generator terjadi pada belitan Stator. Banyak faktor yang menjadi penyebab kualitas isolasi generator menurun, seperti faktor tekanan yang bersifat *electric*, *thermal*, dan mekanis. Generator GT 2.3 terindikasi mengalami permasalahan adanya temuan ikatan longgar pada bagian *End Winding* saat pengecekan visual setelah pull out rotor. Data hasil pengujian elektrik sebelum perbaikan menunjukkan nilai *Partial Discharge* Fasa W cukup tinggi sebesar 135,68 nC dengan standar nilai *Partial Discharge* maksimum adalah 15 nC. Setelah dilakukan perbaikan ikatan longgar pada *End Winding* seluruh fasa, nilai pengujian *Partial Discharge* khususnya fasa W turun menjadi 0,61 nC. Dengan perhitungan menggunakan metode D Maps dan didukung parameter data-data pengujian elektrik sebelum perbaikan diperoleh nilai sisa tegangan tembus isolasi generator GT 2.3 sebesar 38,75 %. Nilai ini berada dibawah standart minimum yaitu sebesar 40 % menurut *Stator Insulation Requirment MELCO*. Mengacu dengan hasil pengujian elektrik khususnya *Partial Discharge Offline* pasca perbaikan yang sudah baik, maka dilakukan perhitungan estimasi sisa umur isolasi belitan Generator GT 2.3 dengan metode *Equivalen Operating Hours*. Diperoleh nilai sisa tegangan tembus isolasi sebesar 77,26 % dan estimasi sisa umur isolasi Generator GT 23 adalah 19 tahun lagi, dengan asumsi generator beroperasi *continuous running*.

Kata Kunci : Generator, Isolasi, End Winding, Partial Discharge

Abstract

The problem that is often the cause of failure or breakdown in the generator occurs in the stator winding. Many factors that cause the quality of generator insulation decreased, such as pressure factors that are electric, thermal, and mechanical. The GT 2.3 generator indicated problems with loose of tying on End Winding during visual checking after pull out rotor. Electrical test result data before the repair shows the value of Partial Discharge Phase W is high enough of 135.68 nC with the standard Partial Discharge maximum value is 15 nC. After a loose bonding of the entire End Winding phase, the value of Partial Discharge testing especially phase W down to 0.61 nC. With the calculation using D Maps method and supported parameters of electrical testing data before the repair obtained the residual voltage generated voltage insulation generator GT 2.3 is 38.75%. This value is below the minimum standard of 40% according to Stator Insulation Requirment MELCO. Referring to the results of electrical testing, especially Partial Discharge Offline after the repair is good, then calculate the estimated residual life of winding insulation Generator GT 2.3 with Equivalent Operating Hours method. Obtained residual insulation voltage value of 77.26% and residual life expectancy of GT 23 Generator is 19 years away, assuming the generator is running continuous running.

Keywords : Generator, Isolation, End Winding, Partial Discharge

I. PENDAHULUAN

Generator merupakan komponen yang vital dalam sistem pembangkitan listrik sebagai sumber pembangkitan energi listrik. Apabila terjadi *breakdown* atau kegagalan pada generator akan berakibat terhentinya proses bisnis dan kerugian yang cukup besar. Untuk menjaga keandalan operasi generator tersebut maka perlu dilakukan *predictive* dan *periodik maintenance* yang tepat sasaran demi mendeteksi lebih awal kegagalan yang mungkin akan terjadi.

Hal yang dominan menjadi faktor penyebab dari kegagalan atau *breakdown* pada generator terjadi pada belitan Stator. Belitan atau *winding*

stator harus menjadi perhatian penting khususnya pada kondisi isolasinya. Banyak faktor yang menjadi penyebab kualitas isolasi generator menurun, seperti faktor tekanan yang bersifat *electric*, *thermal*, dan mekanis.

Pada bulan Juli tahun 2017, GT 23 sedang dilakukan *Periodik Maintenance* atau *overhaul*. Setelah dilakukan pull out rotor generator GT 23, ditemukan adanya indikasi abnormal pada stator generator berupa longgarnya atau *loosness* pada *tying* stator generator bagian *End Winding*. Setelah dilakukan pengambilan data *Partial Discharge offline* pra-perbaikan, ditemukan aktivitas *Partial Discharge* pada phase W cukup tinggi. Berdasarkan

hal tersebut, dipandang perlu untuk melakukan analisa estimasi umur isolasi belitan stator pada generator akibat aktivitas Partial Discharge yang cukup tinggi untuk memastikan generator beroperasi secara berkelanjutan dan mendeteksi kegagalan generator secara dini.

II. SISTEM ISOLASI STATOR GENERATOR SINKRON

2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron (altenator) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (prime mover), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya. Gambar 1. memperlihatkan kontruksi generator sinkron secara keseluruhan.



Gambar 1. Generator Sinkron

Generator sinkron dengan defenisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensinya listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet yang diputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor.

2.1.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan disuplai oleh arus searah sehingga menimbulkan fluks yang besarnya tetap terhadap waktu. Kemudian penggerak mula (Prime Mover) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya sesuai dengan persamaan:

$$n = \frac{120 \times f}{p}$$

dimana: n = Kecepatan putar rotor (rpm)
p = Jumlah kutub rotor
f = Frekuensi (Hz)

Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut. GGL induksi

(Ea) pada alternator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator bila rotor diputar di sekitar stator. Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan (If) yang diberikan pada rotor. Besarnya GGL induksi (Ea) rata-rata yang dihasilkan kumparan jangkar alternator ini dapat dilihat dalam persamaan sebagai berikut:

$$E = 4,44 \times f \cdot \Phi \cdot T$$

Jika $f = \frac{np}{120}$,

maka :

$$E = 4,44 \times \frac{np}{120} \cdot \Phi \cdot T$$

$$E = \frac{4,44np\Phi T}{120}$$

Bila $C = \frac{4,44pT}{120}$,

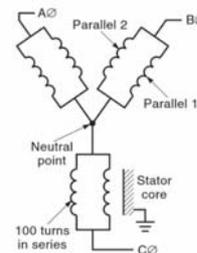
maka :

$$E = Cn\Phi$$

dimana : E = ggl induksi (Volt)
p = Jumlah kutub
n = Putaran (rpm)
Φ = Fluks magnetik (weber)
T = banyaknya lilitan /fase =1/2

2.2 Belitan Stator

Tiga komponen utama dalam stator adalah konduktor tembaga, inti stator, dan insulasi. Tembaga merupakan penghantar arus pada belitan stator. Pada generator, arus keluaran stator diinduksi mengalir ke konduktor tembaga sebagai reaksi medan magnet yang berputar dari rotor. Konduktor tembaga harus memiliki penampang melintang yang cukup besar untuk membawa semua arus yang dibutuhkan tanpa terjadinya panas berlebih . Gambar 2. adalah diagram rangkaian belitan stator generator.



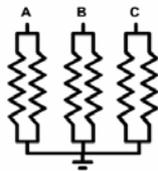
Gambar 2. Rangkaian Belitan Stator

2.2.1 Konfigurasi Belitan Stator

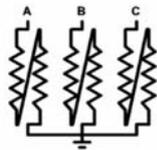
Gulungan stator dirancang dengan hubungannya antara tegangan operasi dan kemampuan penggerak arus. Ini kembali ke hubungan MVA dasar, yang merupakan kombinasi

dari tegangan terminal stator dan arus belitan stator. Untuk tingkat MVA yang sama, karena tegangan terminal belitan meningkat, arus stator yang dibutuhkan berkurang. Begitu pula sebaliknya, karena tegangan terminal berkurang, arus stator harus dinaikkan untuk menjaga rating MVA tetap konstan.

Hubungan di atas memiliki konsekuensi signifikan untuk desain generator, namun juga sangat berguna dalam memungkinkan optimalisasi desain generator tertentu. Sebagai contoh, generator dua kutub mungkin memiliki masing-masing dari dua sirkuit paralel dari setiap fase belitan stator yang dihubungkan sebagai dua jalur paralel seperti gambar 3. atau sebagai dua jalur yang dihubungkan secara seri seperti gambar 4.



Gambar 3. Konfigurasi Paralel Belitan Generator



Gambar 4. Konfigurasi Seri Belitan Generator

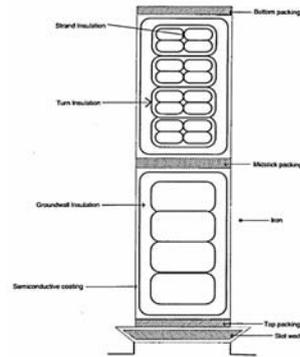
Jika sambungannya paralel, tegangan terminal cenderung lebih rendah dan arus stator lebih tinggi. Untuk rating MVA yang sama, jika sambungan lilitan stator secara seri, voltase terminal akan lebih tinggi dan arusnya lebih rendah. Konsekuensi fisik dari ini adalah bahwa mesin tegangan tinggi membutuhkan insulasi dinding tanah yang lebih tebal untuk menahan voltase yang lebih tinggi. Untuk rangkaian yang terhubung paralel, perlu penghantar tembaga dengan ukuran luas penampang yang lebih besar dan pendinginan yang maksimal untuk mengakomodasi arus stator yang lebih tinggi.

2.3 Isolasi Belitan Stator Generator

Sistem isolasi belitan stator generator terdiri dari beberapa komponen yang berbeda, namun sama-sama bertujuan untuk memastikan tidak terjadi hubung singkat elektrik. Panas yang bersumber dari konduktor yaitu I^2R akan disalurkan menuju pendingin panas sehingga konduktor tidak akan vibrasi walaupun adanya gaya magnetis. Adapun komponen dasar pada isolasi stator antara lain :

- a. Isolasi strand (Subkonduktor)
- b. Isolasi Turn
- c. Isolasi Groundwall (Ground)

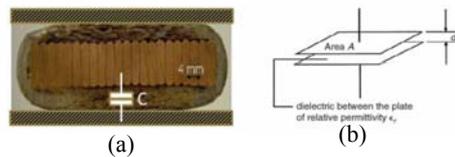
Pada gambar 5, dapat dilihat bagian detail dari komponen dasar isolasi winding stator generator.



Gambar 5. Komponen Dasar Winding Stator Generator

2.4 Isolator Merupakan Wujud Dari Kapasitor

Sebuah bahan isolasi yang digunakan pada mesin listrik pada prinsipnya memiliki fungsi untuk memisahkan atau mengisolasi dua buah konduktor yang berbeda tegangan baik antar fasa maupun antara fasa terhadap Neutral/Ground dari sebuah resiko hubung singkat. Jika dilihat dari konstruksinya dua buah konduktor dan isolasi tersebut sejatinya merupakan konstruksi sebuah kapasitor dimana bahan dielektriknya adalah bahan isolasi itu sendiri dengan konstanta dielektrik yang tentunya berbeda-beda sesuai bahan isolasi yang digunakan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. (a) Model Ekuivalen Ideal Dari Isolator
(b) Kontruksi Dasar Kapasitor

Permukaan konduktor disebut Plat sedangkan bahan isolator disebut bahan Dielektrik. Bahan yang sering digunakan sebagai dielektrik khususnya di generator antara lain kapton, mica, glass, nomex, resin (epoxy, polyester dan silikon). Kemampuan kapasitor dalam menyimpan muatan disebut kapasitansi, secara eksperimen telah dibuktikan bahwa muatan Q yang tersimpan di dalam kapasitor berbanding lurus dengan tegangan yang jatuh kepadanya

$$Q \approx V$$

$$\frac{Q}{V} = C \text{ (konstanta)}$$

2.5 Konstanta Dielektrik atau Permittivitas Relatif

Bahan isolator yang memisahkan dua plat kapasitor disebut bahan dielektrik. Ketika kapasitor diberikan muatan maka akan terjadi medan elektro statik pada bahan dielektrik tersebut. Kehadiran bahan dielektrik menambah konsentrasi garis-garis gaya listrik antara plat sehingga akan mengisi tiap-tiap plat. Besarnya konsentrasi tersebut sangat tergantung dari karakteristik bahan dielektrik tersebut. Kemampuan dari bahan dielektrik untuk mengkonsentrasikan garis-garis gaya listrik antara dua plat kapasitor disebut Konstanta dielektrik atau permittivitas relatif dari material. Udara ditetapkan sebagai sebagai referensi standar konstanta dielektrik (permittivitas relatif) dengan nilai 1 dan nilai konstanta dielektrik material isolasi lainnya lebih besar dari 1. Kapasitor dengan bahan isolator mica yang memiliki konstanta dielektrik 6 artinya bahwa muatannya akan 6 kali lebih besar ketika bahan material yang digunakan sebagai dielektrik tersebut adalah udara.

2.6 Kapasitor Pelat Pararel dengan Media Seragam

Dua buah plat sejajar dari kapasitor yang memiliki luas area A meter persegi dan dipisahkan oleh bahan dielektrik seragam dengan jarak d meter dan konstanta dielektrik atau permittivitas seperti ditunjukkan pada gambar 6. Ketika tegangan sebesar V diberikan diantara kedua plat maka akan mengakibatkan muatan sebesar +Q dan -Q. Apabila E dan D berturut-turut adalah intensitas listrik dan kerapatan fluksi antar plat maka

$$D = \frac{Q}{A}$$

Dan $E = \frac{V}{d}$
tetapi $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$
maka $\frac{Q}{A} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{V}{d}$
 $\frac{Q}{V} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$

Dimana rasio $\frac{Q}{V}$ adalah kapasitansi dari sebuah kapasitor sehingga :

$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$ dielektrik padat
 $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$ dielektrik udara

Keterangan :

C = Kapasitansi dalam farad (F)

A = Luas penampang dalam meter persegi (m²)

d = Jarak antar pelat dalam meter (m)

ϵ_0 = Permittivitas ruang hampa atau vakum $8,85 \times 10^{-12}$ F/m

ϵ_r = Permittivitas relatif bahan dielektrik

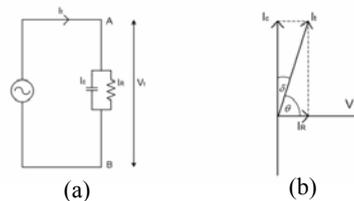
Dapat dilihat disini bahwa kapasitansi berbanding lurus dengan permittivitas relatif dari media ϵ_r , luas penampang A dari plat kapasitor dan berbanding terbalik dengan jarak d antara dua plat kapasitor tersebut. Pada tabel 1 akan ditunjukkan permittivitas relatif beberapa bahan dielektrik.

Tabel 1. Permittivitas Relatif Bahan Dielektrik

No	Bahan Dielektrik	Permittivitas Relatif (ϵ_r)
1	Mica	6 - 8
2	Karet Alam	2,7 - 4
3	Ebonit	2,7 - 2,9
4	Kertas	2 - 2,5
5	Parafin	1,9 - 2,4
6	Air	80
7	Amonia	21 - 23
8	Udara	1,0006
9	Oksigen	1,0005
10	Keramik	5 - 7
11	Gelas	3,5 - 9
12	Polyethylene	2,2 - 2,4
13	Polystyrene	2,5 - 2,7
14	Vinyl Chlorida	2,3 - 3,1

2.7 Faktor Disipasi atau Tan δ

Faktor Disipasi adalah nilai yang menjelaskan ketidak idealan dari kapasitansi isolasi stator generator. Karena resistansi tersebut bisa dipandang sebagai komponen yang terhubung seri maupun paralel seperti ditunjukkan pada gambar 7 dan gambar 8 maka keduanya dapat didekati dengan persamaan berikut.

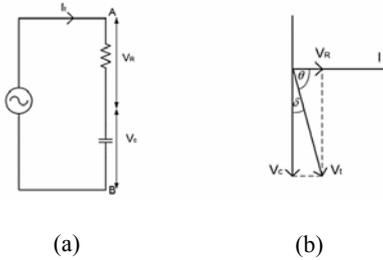


Gambar 7. (a) Rangkaian Ekuivalen Isolator Pararel (b) Diagram Fasor Isolator Terhubung Pararel

$$I_t = \frac{V}{Z} ; I_R = \frac{V}{R} ; I_C = \frac{V}{X_C}$$

$$\frac{P_R}{P_C} = \frac{\frac{V^2}{R}}{\frac{V^2}{X_C}} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega CR}$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C R P}$$



Gambar 8. (a) Rangkaian Ekuivalen Isolator Seri
(b) Diagram Fasor Isolator Terhubung Seri

$$V_t = I_t Z_t$$

$$V_C = I_t X_C$$

$$V_R = I_t R$$

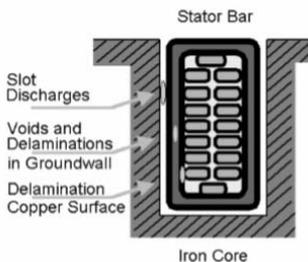
$$Z = \sqrt{R^2 + (-X_C)^2}$$

$$\frac{P_R}{P_C} = \frac{I_t^2 R}{I_t^2 X_C} = \frac{R}{X_C} = \frac{R}{\frac{1}{\omega C}} = \omega RC$$

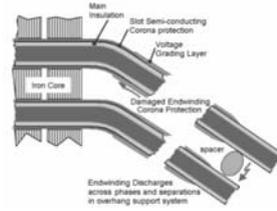
$$\tan \delta = \omega R_S C_S$$

2.8 Partial Discharge

Partial discharge atau pelepasan parsial adalah peristiwa pelepasan/loncatan bunga api listrik yang terjadi pada suatu bagian isolasi (pada rongga dalam atau pada permukaan) sebagai akibat adanya beda potensial yang tinggi dalam isolasi tersebut Partial discharge dapat terjadi pada bahan isolasi padat, bahan isolasi cair maupun bahan isolasi gas. Pada bahan isolasi gas mekanisme townsend dan mekanisme streamer merupakan penyebab kegagalan. Dari uraian di atas menunjukkan bahwa kegagalan isolasi ini berkaitan dengan adanya partial discharge. Umumnya pada isolasi belitan stator partial discharge terjadi pada ujung slot inti besi dan daerah overhang end winding, yang ditunjukkan pada gambar 9. dan gambar 10. Daerah tersebut merupakan daerah yang mengalami gaya elektromagnetik paling besar.



Gambar 9. Partial Discharge Pada Slot Inti Besi



Gambar 10. Partial Discharge Pada End Winding Stator

III. METODE PENGUJIAN DAN PERHITUNGAN SISA UMUR ISOLASI GENERATOR

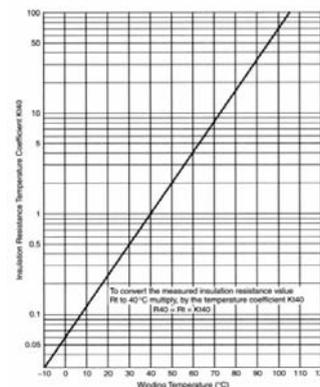
3.1 Pengukuran Tahanan Isolasi

Pengukuran tahanan isolasi bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi suatu belitan terhadap ground ataupun antar belitan. Metoda yang umum dilakukan adalah dengan memberikan tegangan dc dan merepresentasikan kondisi isolasi dengan satuan megaohm. Tahanan isolasi yang diukur merupakan fungsi dari arus bocor yang menembus melewati isolasi atau melalui jalur bocor pada permukaan eksternal. Standar minimum hasil pengujian yang diperbolehkan sesuai dengan IEEE Standar 43 adalah (V_{LL} dalam kV + 1) MΩ.

Hasil pengukuran tahanan isolasi dipengaruhi beberapa faktor – faktor seperti kelembaban, kontaminasi permukaan kumparan, dan suhu. Pembacaan hasil pengukuran harus dikoreksi ke suhu dasar yaitu 40° C, dengan persamaan sebagai berikut :

$$R(40^{\circ}C) = K \times R_{measured}(^{\circ}C)$$

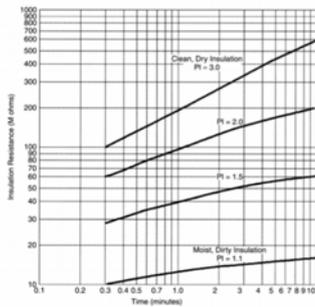
dimana K adalah koefisien suhu yang diperoleh sesuai dengan standar IEEE 43 seperti gambar 11.



Gambar 11. Kurva Hubungan Tahanan Isolasi Terhadap Temperatur Belitan

3.2 Pengukuran Polarization Index

Tujuan dari pengujian Polarization Index adalah untuk memastikan peralatan tersebut layak dioperasikan atau bahkan untuk dilakukan overvoltage test. Tahanan isolasi dipengaruhi oleh waktu sekaligus fungsi kondisi kering pada belitan. Ketika kondisi sistem isolasi dalam keadaan bersih dan kering, maka nilai tahanan isolasi akan cenderung meningkat karena muatannya diserap oleh bahan dielektrik dalam isolasi. Rasio antara pembacaan resistansi pada 10 menit dan pembacaan pada 1 menit menghasilkan angka atau "indeks polarisasi," yang pada dasarnya digunakan untuk menentukan seberapa bersih dan kering belitannya seperti gambar 12.



Gambar 12. Kurva Polarization Index Tahanan Isolasi Terhadap Waktu

Nilai Polarization Index minimum yang disarankan adalah sebagai berikut :

1. Isolasi Class A : 1,5
2. Isolasi Class B : 2,0
3. Isolasi Class F : 2,0

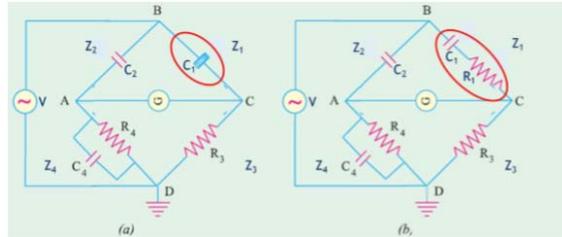
Polarization Index adalah rasio tahanan isolasi yang diukur setelah tegangan telah diinjeksikan selama 10 menit (R10) ke tahanan isolasi yang diukur hanya dalam satu menit (R1), yaitu ;

$$PI = \frac{R10}{R1}$$

3.3 Metode Pengukuran $Tan \delta$ atau Dissipation Factor Dengan Jembatan Schering

Jembatan Schering merupakan jembatan yang memiliki peranan sangat penting untuk mendapatkan nilai kapasitansi dari kapasitor fisik C1 yang tidak diketahui nilainya seperti ditunjukkan pada gambar 3.4a. Jembatan schering digunakan sebagai komplemen dari jembatan De-Sauty yang hanya digunakan mengukur kapasitor ideal yaitu dapat mengukur kapasitor tidak ideal yang akan mengukur kapasitansi dan faktor disipasi kapasitor tersebut secara bersamaan seperti ditunjukkan pada gambar 13a. Jembatan schering ini akan membandingkan kapasitor C1 dengan kapasitor ideal/standar C2 (kapasitor gas). Ketidak idealan

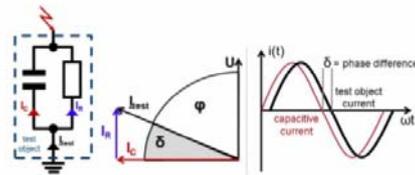
kapasitor tersebut diwakili dengan sebuah kapasitor ideal yang faktor disipasinya nol yang terhubung seri dengan sebuah resistor yang mewakili rugi-rugi dielektriknya seperti ditunjukkan pada gambar 13b.



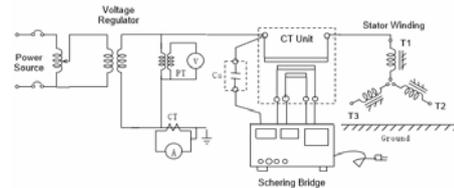
Gambar 13. (a) Rangkaian Jembatan Schering Mengukur C1
(b) Rangkaian Jembatan Schering

3.3.1 Alat Ukur Metode Jembatan Schering Digital Modern

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 14 Arus Kapasitif I_C dan Arus Resistif I_R



Gambar 15 Rangkaian Pengujian $Tan \delta$ atau Dissipation Factor Test Pada Generator

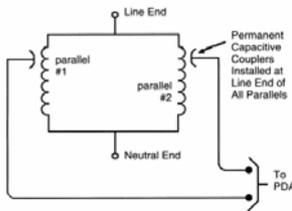
3.4 Metode Pengukuran Partial Discharge Offline

Pada prinsipnya, pengukuran PD didasarkan pada pengukuran langsung pulsa-pulsa frekuensi tinggi yang dibuat selama terjadinya pelepasan parsial. Beberapa metode offline didasarkan pada hubungan kapasitif antara keseluruhan belitan dan peralatan pengukuran. Uji *Partial Discharge Offline* memerlukan catu daya untuk memberi energi pada belitan setidaknya dengan rating tegangan fase ke tanah. Jadi, untuk generator besar, dibutuhkan transformator dengan rating daya 20 sampai 40

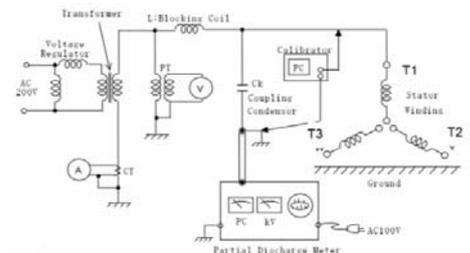
kVA. Sesuai dengan standart MELCO nilai Qm pada $23 \text{ kV} \leq 15 \text{ nC}$.

3.4.1 Monitoring Partial Discharge dengan Kapasitif Kapasitor

Untuk mengukur aktivitas *Partial Discharge* pada setiap fase, kapasitor yang disetel atau "coupler kapasitif" terhubung ke masing-masing terminal generator. Perancah kemudian dihubungkan ke filter band-pass RC yang outputnya adalah sinyal yang mengandung pulsa *Partial Discharge* frekuensi tinggi. Meskipun kopling kapasitif telah terbukti berperan penting dalam pendeteksian *Partial Discharge* secara online maupun offline, namun memerlukan banyak pengalaman dalam membedakan pulsa *Partial Discharge* di generator. Gambar 16 memperlihatkan instalasi Kapasitor Coupling pada sistem.



Gambar 16 Coupling Kapasitor



Gambar 17 Rangkaian Pengujian Partial Discharge Offline

3.5 Metode Perhitungan Sisa Umur Isolasi Belitan Generator

Metode perhitungan estimasi umur isolasi generator menggunakan analisa *Residual Breakdown Voltage* atau sisa tegangan tembus dengan perhitungan metode D Map dan dengan metode dari *Equivalent Operating Hours* sebuah unit pembangkit. Working Grup Discussion tentang Generator menyatakan bahwa sesuai dengan Stator Insulation Requirement MELCO, batas maksimal *Residual Breakdown Voltage* Generator adalah 40 % dari nilai inisial Dielectric Breakdown Voltage $2E + 1$ (kV). Gambar 18 memperlihatkan batas maksimal *Residual Breakdown Voltage*.



Gambar 18 Batas Maksimal Residual Breakdown Voltage

3.5.1 Estimasi Metode D Map

Metode D Map merupakan metode perhitungan residual breakdown voltage diperoleh dari parameter pengujian arus bocor (mA), $\tan \delta$ test, dan *Partial Discharge Offline* seperti pada tabel 2.

Tabel 2. Parameter Pengujian Electric Non Destructive

No	Parameter	Keterangan
1	Pengukuran Tahanan Isolasi	Megger
2	Pengukuran Indeks Polarisasi	PI : Megger (1 min, 10 min)
3	Pengujian Arus Bocor	$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0}$ Applied voltage (kV)
4	Pengujian $\tan \delta$	$\Delta \delta$ Applied voltage (kV)
5	Pengujian Partial Discharge	$Q_{max} = \text{Max. discharge charge amount}$

Berikut adalah formula yang digunakan dalam perhitungan metode D – Map :

$$VR = 100 - 1.8 (\Delta - 0.8) - 27.4 \log (Q_{max}/1500)$$

Dimana :

VR : Sisa Tegangan Tembus (%)

Δ : $\Delta 2 + \Delta I$ (%)

ΔI : $\frac{I - I_0}{I_0} \times 100$ % (%)

$\Delta 2$: $\tan \delta$ test hasil pengujian (%)

Qmax : Maksimal Nilai Partial Discharge (pC)

3.5.2 Estimasi Dengan Metode Equivalent Operating Hours

Equivalent Operating Hours atau EOH merupakan gabungan jumlah jam operasi suatu unit pembangkit dan faktor koreksi seperti jumlah start

unit, jenis bahan bakar, dan jumlah trip unit. Perhitungan dengan metode ini dilakukan mengacu dengan hasil pengujian elektrik pada generator yang dianggap normal dan sesuai dengan standart parameter atau kriterianya. Jam operasi setara adalah jam operasi yang dihitung secara ekuivalen, dimana dengan satu start atau stop yang setara dengan 20 jam operasi. Berikut adalah formula yang digunakan dalam perhitungan menggunakan metode Equivalen Operating Hours :

$$BDV_{3\sigma} (\%) = (-6 \times 10^{-10}) \cdot Y_E^2 + (-6 \times 10^{-5}) \cdot Y_E + 77,276$$

Dimana :

Y_E = Equivalent Operating Hour
(Equivalent Operating Hours) = (Jumlah Jam Operasi) + 20 x (Jumlah start atau stop)

IV. DATA DAN ANALISIS

4.1 Gambaran Umum Objek Studi

Blok 1 dan Blok 2 PLTGU Priok terdiri dari 3 unit Gas Turbin Generator serta 1 unit Steam Turbin Generator pada masing – masing blok. Daya Mampu Netto pada tiap blok adalah 562,5 MW, sehingga total Daya Mampu Netto Blok 1 dan Blok 2 adalah 1.125 MW. Pada tabel 4.1 dan tabel 4.2 diperlihatkan Spesifikasi Gas Turbin Generator dan Steam Turbin Generator pada Blok 1 dan Blok 2 :

Tabel 3. Spesifikasi Gas Turbin Generator Blok 1 dan Blok 2

Spesifikasi Gas Turbin Generator	
Manufacture	ABB (Asea Brown Boveri)
Type	WY21L – 097LLT
Tahun Pembuatan	1993
Daya Semu	210 MVA
Tegangan Stator	15,75 kV
Tegangan Eksitasi	310 V
Jumlah Fasa	3
Frekuensi	50 Hz
Rpm	3000 Rpm
Power Factor	0,8
Rating Arus	7698 A
Arus Eksitasi	1473 A
Sistem Eksitasi	Static Excitation
Sistem Pendinginan	Air Cooled
Kelas Isolasi	F

4.2 Hasil Pengujian Insulation Resistance Test dan Polarization Index

Tabel 4. Hasil Pengujian Insulation Resistance dan Polarization Index Sebelum Perbaikan

Menit	R - Gnd	S - Gnd	T - Gnd	R - S	S - T	R - T
1	1,33 GΩ	1,36 GΩ	1,38 GΩ	3,23 GΩ	3,54 GΩ	3,12 GΩ
10	4,46 GΩ	5,2 GΩ	6,16 GΩ	9,41 GΩ	13,08 GΩ	10,82 GΩ
Polarization Index	3,2	3,82	4,46	2,91	3,69	3,46

Tabel 5. Hasil Pengujian Insulation Resistance dan Polarization Index Pasca Perbaikan

Menit	R - Gnd	S - Gnd	T - Gnd	R - S	S - T	R - T
1	1,33 GΩ	1,2 GΩ	1,36 GΩ	3,03 GΩ	2,21 GΩ	2,73 GΩ
10	5,40 GΩ	4,49 GΩ	6,64 GΩ	10,38 GΩ	8,61 GΩ	11,20 GΩ
Polarization Index	4,03	3,72	5,08	3,42	3,89	4,10

Adapun rekomendasi minimum nilai hasil pengujian Insulation Resisten Test (IR) dan Polarization Index (PI) disesuaikan dengan standart IEEE 43-2000, yaitu :

1. Nilai minimum tahanan isolasi setelah 1 menit pada temperatur 40° C : 100 MΩ
2. Nilai minimum Polarization Index (PI) untuk isolasi Class F : 2

Berdasarkan hasil pengujian sesuai dengan tabel 4.3, kondisi resistansi isolasi belitan generator GT 2.3 masih dalam kondisi baik, kering serta tidak ada kontaminasi.

4.3 Data Hasil Pengujian Tan δ

Tabel 6. Nilai Pengujian Tan δ Generator GT 2.3 Sebelum dan Pasca Perbaikan

Parameter	Stator Winding Generator GT 2.3					
	Sebelum		Setelah		Setelah	
	Fasa U		Fasa V		Fasa W	
Initial Value at 0,2 Un	0,60 %	0,56 %	0,59 %	0,55 %	0,60 %	0,52 %
Δ Tan δ 0,2 Un up to Un	0,45 %	0,45 %	0,47 %	0,48 %	0,45 %	0,44 %
Tip up value (between tan δ 0,6 Un and 0,2 Un)	0,73 %	0,72 %	0,74 %	0,75 %	0,72 %	0,69 %

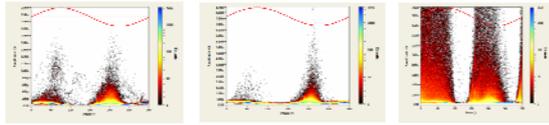
Dissipation Factor atau Tan δ pada generator GT 2.3, nilai tan δ telah memenuhi 2 kriteria parameter, sedangkan untuk parameter “Dissipation Factor tip-up between 0,6 U_N and 0,2 U_N ”, nilai tan δ pengujian belum sesuai dengan standart yaitu maksimum sebesar 0,5 %. Hasil pengujian Tan δ menunjukkan bahwa isolasi belitan stator generator GT 2.3 seluruh fasa memiliki masalah serius terhadap void yang kemungkinan disebabkan oleh thermal stress akibat pola pengoperasian yang melebihi nilai nominal generator.

4.3.1 Data Hasil Pengujian Arus Bocor

Tabel 7. Hasil Uji Arus Bocor Sebelum dan Pasca Perbaikan

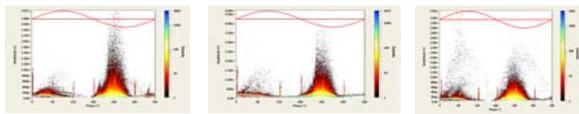
Parameter	Stator Winding Generator GT 2.3					
	Sebelum		Setelah		Setelah	
	Fasa U		Fasa V		Fasa W	
Persentase Arus Bocor (ΔI)	3,87 %	1,80 %	4,61 %	2,81 %	0,95 %	3,25 %

4.4 Data Hasil Pengujian Partial Discharge Offline



Gambar 19. Pattern Partial Discharge Seluruh Fasa Sebelum Perbaikan

Dengan menggunakan tegangan pengujian sebesar tegangan nominal generator GT 2.3 yaitu sebesar 15,75 kV, maka diperoleh nilai discharge muatan terukur fasa U = 0,38 nC, fasa V = 0,9 nC, fasa W = 135,68 nC, berdasarkan standart *Site Test Procedure* MELCO menyatakan bahwa nilai maksimum discharge muatan atau Qmax adalah 15 nC. Nilai yang terukur untuk fasa W melebihi batasan maksimum, sehingga terindikasi fenomena PD yang cukup tinggi pada isolasi belitan fasa W.



Gambar 20. Pattern Partial Discharge Seluruh Fasa Pasca Perbaikan

Dengan menggunakan tegangan pengujian sebesar tegangan nominal generator GT 2.3 yaitu sebesar 15,75 kV, maka diperoleh nilai discharge muatan terukur fasa U = 0,88 nC, fasa V = 1,18 nC, fasa W = 0,61 nC, berdasarkan standart *Site Test Procedure* MELCO menyatakan bahwa nilai maksimum discharge muatan atau Qmax adalah 15 nC. Sebelum perbaikan, nilai discharge muatan pada fasa W terukur sebesar 135,68 nC. Langkah perbaikan parsial pada belitan stator terbukti signifikan dengan menurunnya nilai discharge muatan fasa W dibawah nilai maksimumnya.

4.5 Perhitungan Estimasi Sisa Umur Belitan Stator Generator GT 2.3

4.5.1 Perhitungan Kondisi Sebelum Perbaikan

Perhitungan estimasi sisa umur belitan stator dilakukan berdasarkan metode D-Map dengan formula pada sub-bab 3.5 yang sudah dijelaskan. Perhitungan ini menggunakan parameter data-data PD Magnitude, Arus Bocor AC, dan tip – up tan delta sebelum perbaikan, dengan nilai ukur terburuk dari fasa U, V, dan W. Berikut adalah perhitungan estimasi sisa umur belitan stator Generator GT 2.3 :

Tabel 8 . Parameter Perhitungan Metode D Maps

Tan delta Test "Δ2" (%)	Presentase Arus Bocor "Δ1" (%)	Δ = Δ2 + Δ1 (%)	Partial Discharge Magnitude "Q _{max} " (pC)
0,47	4,61	5,08	135680

Sehingga :

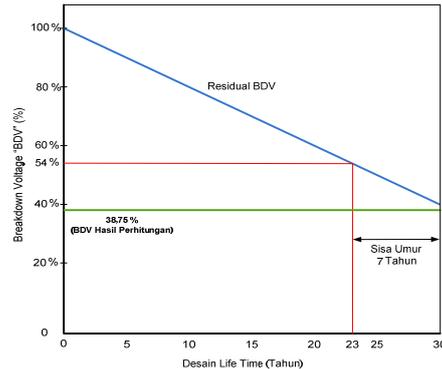
$$VR (%) = 100 - 1.8 (\Delta - 0.8) - 27.4 \log (Q_{max}/1500)$$

$$VR (%) = 100 - 1.8 ((4,61+0,47) - 0.8) - 27.4 \log (135680/1500)$$

$$VR (%) = 100 - 7,704 - 27,4 \log 90$$

$$VR (%) = 38,75 \%$$

Gambar 21 akan memperlihatkan grafik *Remaining Life Breakdown Voltage* sesuai dengan hasil perhitungan.



Gambar 21 . Grafik Remaining Life Breakdown Voltage

Mengacu dengan hasil sisa tegangan tembus yaitu 38,75 % yang diperhitungannya dilakukan pada tahun ke 23 operasi generator GT 2.3, maka seharusnya nilai sisa tegangan tembus adalah 54 % dan sisa umur generator GT 2.3 diperkirakan sekitar 7 tahun lagi.

4.5.2 Perhitungan Kondisi Pasca Perbaikan

Mengacu hasil pengujian Partial Discharge Offline generator GT 2.3 pasca perbaikan, diperoleh nilai Partial discharge terkecil sebesar 0,61 nC. Berdasarkan hal tersebut maka metode perhitungan estimasi sisa umur isolasi generator GT 2.3 pasca perbaikan, dilakukan berdasarkan parameter data *Equivalent Operating Hours* (terlampir) unit pembangkit GT 2.3 yaitu sebesar 202.105 jam operasi. Berikut adalah perhitungan estimasi sisa umur belitan stator Generator GT 2.3 :

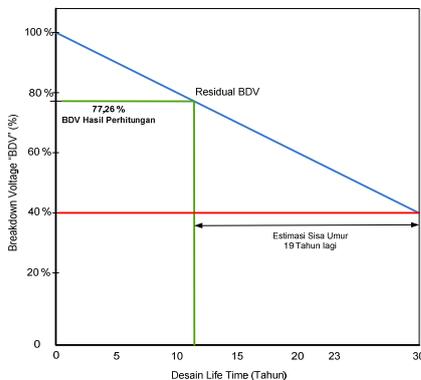
$$BDV_{3\sigma} (%) = (-6 \times 10^{-10}) \cdot Y_E^2 + (-6 \times 10^{-5}) \cdot Y_E + 77,276$$

$$Y_E = \text{Equivalent Operating Hour}$$

$$BDV_{3\sigma} (%) = (-6 \times 10^{-10}) \cdot Y_E^2 + (-6 \times 10^{-5}) \cdot Y_E + 77,276$$

$$BDV_{3\sigma} (%) = (-6 \times 10^{-10}) \cdot 202105^2 + (-6 \times 10^{-5}) \cdot 202105 + 77,276 = 77,26 \%$$

Gambar 22 akan memperlihatkan kurva korelasi antara nilai sisa tegangan tembus hasil perhitungan dengan lifetime generator.



Gambar 22 . Grafik Remaining Life Breakdown Voltage Pasca Perbaikan

Mengacu dengan standar IEC 60126 – 2, minimum sisa tegangan tembus sebuah generator adalah 40 %, nilai sisa tegangan tembus pasca perbaikan sebesar 77,26 % masih memenuhi syarat atau dengan kata lain generator GT 2.3 masih layak untuk dioperasikan dengan estimasi lifetime selama 19 tahun lagi. Namun sesuai kondisi yang ada, pola operasi pembangkit berpengaruh besar terhadap proses kemerosotan atau *deterioration* isolasi belitan stator generator. Khusus PLTGU Priok blok 1 dan 2 memiliki frekuensi pola operasi start dan stop yang cukup tinggi tergantung beban yang dibutuhkan jaringan. Selain itu, dengan adanya permintaan daya reaktif yang cukup tinggi di jaringan, mengharuskan generator PLTGU Priok Blok 1 dan 2 mensuplai daya reaktif yang berpengaruh terhadap kenaikan tegangan di stator melebihi tegangan nominalnya. Dengan, kondisi ini maka kenaikan temperatur generator akan berbanding lurus dengan proses penurunan kualitas isolasi belitan stator generator. Menurut *IEEE Standart 1*, lifetime isolasi belitan stator akan berkurang separuhnya setiap kenaikan 10°C dari suhu operasi konstan.

V. KESIMPULAN

1. Untuk parameter “Dissipation Factor tip-up between $0,6 U_N$ and $0,2 U_N$ ” pada pengujian $\tan \delta$, rata-rata hasil pengujian keseluruhan fasa sebelum dan pasca perbaikan adalah 0,72 %. Nilai tersebut belum sesuai dengan standart IEC 60034-27-3 yaitu maksimum sebesar 0,5 %.
2. Mengacu nilai pengujian $\tan \delta$ yang belum memenuhi standar, maka langkah signifikan yang dilakukan untuk mencegah terjadinya breakdown pada belitan stator adalah

membatasi tegangan operasi generator di bawah nilai nominal tegangan operasi generator GT 2.3 yaitu 15,75 kV.

3. Perbaikan ikatan longgar pada bagian *End Winding* stator generator GT 2.3 berpengaruh besar terhadap penurunan nilai *Partial discharge* Fasa W menjadi 0,61 nC pasca perbaikan, sedangkan sebelum perbaikan nilai *Partial Discharge* fasa W adalah 135,68 nC mengacu standart Site Test Procedure MELCO yaitu nilai maksimum *Discharge* muatan adalah ≤ 15 nC.
4. Berdasarkan hasil perhitungan dengan metode D Maps, diperoleh nilai sisa tegangan tembus stator generator GT 2.3 sebesar 38,75 %, sehingga mengacu dengan standart MELCO terkait batas minimum *Breakdown Voltage* isolasi generator adalah 40 % maka dipandang perlu untuk mengkaji Generator GT 2.3 dilakukan rewinding total mengingat usia generator yang sudah 24 tahun.
5. Mengacu dengan hasil perhitungan estimasi umur isolasi generator GT 2.3 dengan metode *Equivalen Operating Hour*, diperoleh nilai sisa tegangan tembusnya pasca perbaikan sebesar 77,26 % dan sesuai grafik estimasi sisa umur isolasi generator GT 2.3 adalah 19 tahun lagi dengan asumsi pola operasi generator yang *continuous running*.

DAFTAR PUSTAKA

1. Handojo, Sigit Pudji. 2015. *Analisa Penerapan Jembatan Schering Pada Alat Ukur Bahan Isolasi*. Jakarta : Institut Sains dan Teknologi Nasional
2. IEEE std 286-2000 (R2006). *Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*.
3. IEEE Guide for *Online Monitoring of Large Synchronous Generators* (10 MVA and Above) , 2014. IEEE Power and Energy Society, New York,
4. IEEE Guide for *Insulation Maintenance of Electric Machines*, 2016. IEEE Power and Energy Society, New York,
5. Klempner, Geoff dan Isidor Kerszenbaum, *Operation And Maintenance Of Large Turbo Generator*. John Wellely & Sons Inc, Hoboken, New Jerse.
6. Kim, Hee-Dong. 2014. “Characteristic of Insulation Diagnosis and Failure in Gas Turbin Generator Stator Windings”, *Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 9 No.1*, pp 280-285.
7. PGT-06-01: *Best Practices for Power Generation*, The Federation of Electric Power

- Companies of Japan.
8. Stone, Greg C, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani. 2004. *Electrical Insulation For Rotating Machines : Design, Evaluation, Aging Testing and Repair*. Willey Interscience.
 9. <http://repository.usu.ac.id/bitstream/handle/123456789/41134/Chapter20.pdf> . Diakses pada 12 Desember 2017.
 10. <https://translarsyifa.wordpress.com/2010/09/02/tangen-delta/>. Diakses pada 2 Januari 2018.
 11. <https://www.electrical4u.com/tan-delta-test-loss-angle-test-dissipation-factor-test/>. Diakses pada 22 Januari 2018.