

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Dengan adanya penelitian terlebih dahulu menjadi landasan dan referensi bagi penulis dalam menyusun tesis tersebut. Oleh karena itu, penelitian yang terlebih dahulu akan menjadi sangat penting sebagai bahan analisis dan pembandingan dalam penelitian ini, beberapa penelitian terkait pembahasan tesis tersebut baik dalam bentuk artikel dan jurnal dapat dikemukakan sebagai berikut:

1. (Soewono, 2022), menulis dalam penelitiannya; pemantauan *partial discharge* secara online pada stator motor dan generator untuk memprediksi kerusakan isolasi. Mereka melihat tren data PD dari ratusan mesin dan menemukan bahwa PD yang meningkat tajam dalam periode tertentu bisa menjadi indikator awal kegagalan isolasi. Mereka juga menemukan karakteristik pulsa PD yang berbeda untuk setiap mekanisme kegagalan. Tren peningkatan PD secara online dapat digunakan sebagai alat prediktif untuk mengetahui adanya proses kerusakan isolasi stator sebelum terjadi kegagalan besar. Data statistik yang diambil membantu dalam menilai kesehatan mesin dan menentukan waktu perawatan preventif.
2. (Mahardika & Prayogo, 2025), menulis dalam penelitiannya; sistem peringatan dini untuk generator dengan menggabungkan analisis PD dan parameter operasi nyata (misalnya tegangan, arus, dan lainnya) secara real-time. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan deteksi dini kerusakan isolasi sebelum terjadi kegagalan fatal. Integrasi parameter operasi dengan data PD secara real-time memberi wawasan diagnosis yang lebih baik daripada hanya melihat PD saja, sehingga bisa mengurangi risiko downtime yang tak terduga.
3. (Widodo et al., 2020b), menulis dalam penelitiannya; menggunakan metode regresi linear untuk memprediksi usia kelayakan isolasi stator berdasarkan data PD. Mereka menganalisis PD yang tinggi akibat penuaan dan kontaminasi minyak seal, kemudian menghitung linier hubungan antara PD dan usia isolasi. Partial discharge yang tinggi berhubungan dengan kegagalan

isolasi, dan regresi linear bisa dipakai sebagai alat prediksi usia operasional isolasi belitan stator. Ini bisa diaplikasikan sebagai analisis awal dalam strategi pemeliharaan.

4. (Kong et al. 2015), menulis dalam penelitiannya; Penelitian ini fokus pada pola PD pada stator generator dengan membandingkan generator yang sehat dan yang pernah mengalami kerusakan isolasi. Mereka melihat pola pulsa PD dan karakteristiknya dalam berbagai kondisi. Ada pola PD berbeda antara generator sehat dan yang mengalami kerusakan isolasi, sehingga analisis pola bisa membantu memahami tingkat deteriorasi isolasi.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 North Duri Cogeneration Powerplant

North Duri Cogeneration Power Plant adalah turbin gas yang terletak di Lapangan Minyak Duri, Pulau Sumatera, Indonesia. Ada tiga turbin pembakaran Westinghouse 501D5A, masing-masing dengan kapasitas 100 MW. Ketiga turbin gas dilengkapi dengan *Heat Recovery Steam Generators* (HRSG) untuk memberikan 5,5 Mlbs/hr uap dengan kualitas steam sekitar 80%. Uap ini kemudian dikirim ke PT. Pertamina Hulu Rokan (PHR) untuk *Enhanced Oil Recovery* (Peningkatan Pemulihan Minyak).

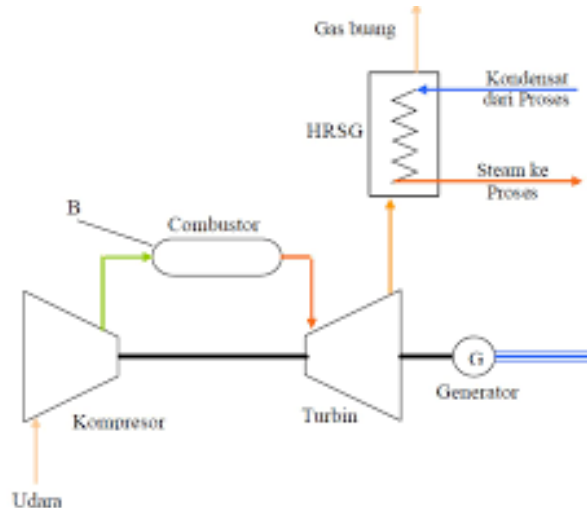
2.2.2 Cogeneration

Cogeneration adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan teknologi pembangkitan. Secara umum *cogeneration* adalah peralatan konversi energi yang berfungsi untuk menghasilkan uap dan listrik secara bersamaan. Perbedaan utama antara konversi energi *cogeneration* dan konvensional adalah sistem konvensional ini hanya menghasilkan uap atau listrik saja, sedangkan untuk sistem *cogeneration* menghasilkan keduanya dalam waktu yang sama. (*Manual Book*, 2018).

A. Klasifikasi Sistem *Cogeneration*

Ada dua jenis sistem *cogeneration* turbin gas:

1. Sistem *Cogeneration* Turbin Gas Siklus Terbuka



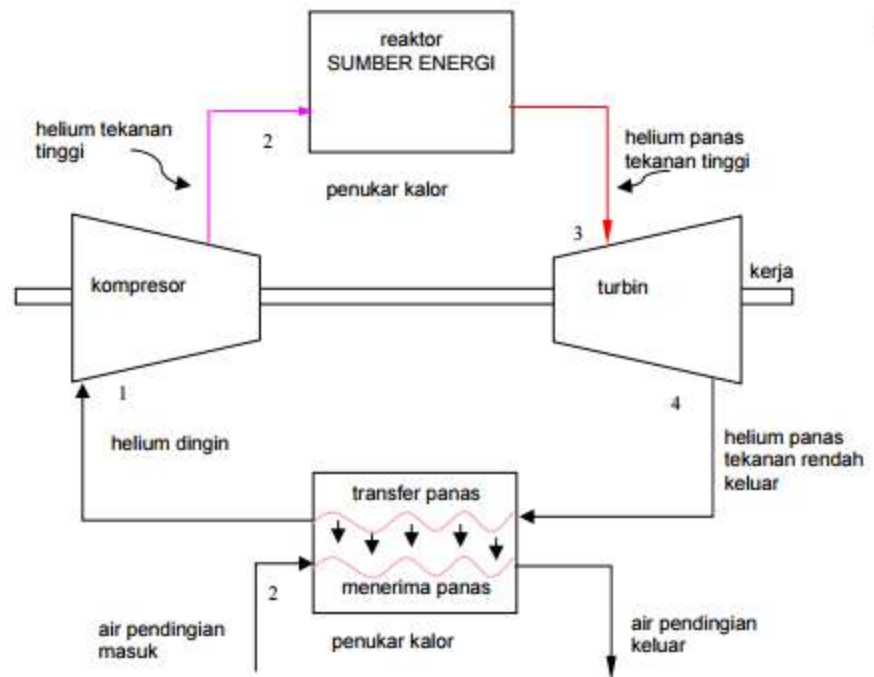
Gambar 2. 1 Sistem turbin gas cogeneration

Sumber: MCTN *Manual Book* 1999

Hampir seluruh sistem turbin gas modern saat ini bekerja menggunakan siklus Brayton terbuka atau yang juga dikenal sebagai siklus Joule. Pada sistem ini, udara bertekanan tinggi dipanaskan di dalam ruang bakar (combustor) sebelum digunakan sebagai pemutar turbin. Gas buang yang keluar dari area turbin masih memiliki temperatur yang tinggi sehingga masih dapat dimanfaatkan kembali untuk meningkatkan efisiensi sistem. Pemanfaatan panas buang tersebut umumnya dilakukan melalui Heat Recovery Steam Generator (HRSG) untuk menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan dapat memiliki tekanan dan temperatur tinggi sehingga dapat dimanfaatkan dalam proses industri termal maupun untuk menggerakkan turbin uap guna menghasilkan tambahan energi listrik. Selain itu, uap juga digunakan dalam proses pencairan minyak berat atau bongkahan minyak padat yang berada di bawah permukaan tanah.

2. Sistem *Cogeneration* Turbin Gas Siklus tertutup

Pada sistem *cogeneration* dengan turbin gas siklus tertutup, fluida kerja seperti helium atau udara digunakan secara berulang dalam suatu rangkaian tertutup. Fluida tersebut dipanaskan terlebih dahulu melalui heat exchanger sebelum masuk ke turbin, kemudian didinginkan kembali setelah keluar dari turbin untuk selanjutnya disirkulasikan kembali ke dalam sistem. Sumber panas yang digunakan untuk memanaskan fluida kerja dapat berasal dari proses pembakaran eksternal bahan bakar maupun sumber energi lainnya, seperti energi nuklir dan sumber panas industri lainnya. Sistem ini memungkinkan proses pemanfaatan energi menjadi lebih efisien karena panas yang dihasilkan dapat digunakan kembali untuk kebutuhan lain secara bersamaan.

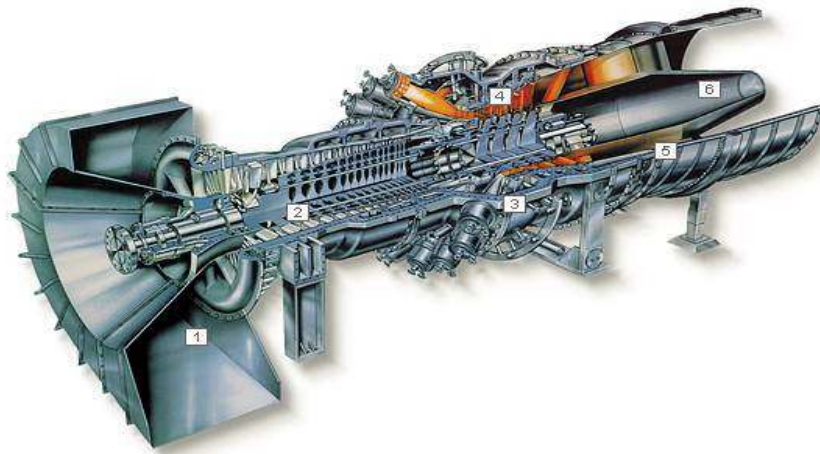


Gambar 2. 2 Sistem Turbin Cogeneration Siklus Tertutup

Sumber: MCTN Manual Book 1999

2.2.3 Westinghouse 501D5A Combustion Turbine

Cogeneration atau yang lebih dikenal sebagai sistem pembangkitan energi gabungan merupakan suatu teknologi pembangkit yang memanfaatkan panas sisa hasil proses pembakaran untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem pembangkit listrik. Dalam sistem ini, combustion turbine yang pada umumnya lebih dikenal sebagai turbin gas merupakan sebuah mesin konversi energi yang bekerja dengan cara mengubah energi kimia yang terkandung di dalam gas alam maupun bahan bakar cair lainnya menjadi



Gambar 2. 3 W501D5A Gas Turbine

Sumber: MCTN *Manual Book 1999*

energi dalam bentuk mekanik setelah melalui proses pembakaran dan ekspansi dengan gas bertekanan tinggi. Energi mekanik yang dihasilkan dari putaran turbin tersebut selanjutnya memutar generator sehingga dapat menghasilkan energi dalam bentuk listrik yang kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi dan distribusi tenaga listrik menuju konsumen, baik untuk kebutuhan rumah tangga maupun sektor industri. Pada pengoperasiannya, turbin gas tidak hanya menghasilkan energi mekanik dan energi listrik, tetapi juga menghasilkan gas buang dengan temperatur yang masih sangat tinggi. Gas buang tersebut masih memiliki kandungan energi panas yang cukup besar sehingga tidak langsung dibuang ke atmosfer, melainkan dimanfaatkan kembali melalui peralatan

yang disebut Heat Recovery Steam Generator (HRSG). Panas dari gas buang turbin gas ditangkap dan dimanfaatkan oleh peralatan tersebut untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi. Uap ini selanjutnya memutar turbin uap dalam sistem pembangkit siklus gabungan (combined cycle). Dengan memanfaatkan energi panas sisa tersebut, efisiensi pembangkit dapat meningkat secara signifikan dibandingkan dengan pembangkit konvensional, karena energi yang sebelumnya terbuang dapat diubah kembali menjadi energi listrik tambahan.



Gambar 2. 4 Template Westinghouse

Sumber : Nemaplate Equipment Plant

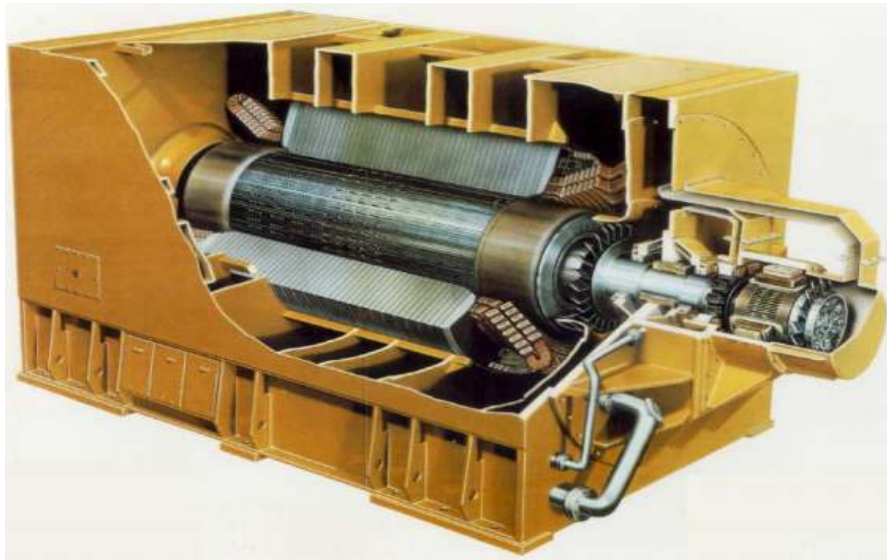
Tabel 2. 1 Westinghouse W501D5A

Manufacturer	Siemens Westinghouse
Model	W501D5A Combustion Turbine Engine
Nominal rating	120 MW
Heat rating	9,900 Btu/kW in simple cycle configuration
Net plant efficiency at 3,600 rpm under ISO conditions	35 percent
Self-sustaining speed	2304 rpm

Pada Tabel 2.1 dapat di lihat spesifikasi dari turbin dimana:

Manufacturer	:Siemens Westinghouse
Model	:W501D5A Combustion Turbine Engine
Nominal Rating	:120 MW
Speed	:3600 RPM

2.2.4 Brush Generator BDAX82-445ERH



Gambar 2. 5 Brush 2-Pole TurboGenerator BDAX82-445ERH

Sumber: MCTN *Manual Book 1999*

Elektromagnetik induksi menjadi fondasi utama dalam pengoperasian generator, yang bertugas mengonversi energi mekanik menjadi tenaga listrik. Sebagai perangkat listrik, generator mengubah energi gerak menjadi energi listrik melalui mekanisme induksi elektromagnetik (Chapman, 2012). Energi mekanik yang menjadi penggerak awal generator dalam proses operasionalnya bersumber dari berbagai jenis prime mover, mencakup turbin gas, mesin diesel, turbin uap, kincir angin, serta aliran air. Pada

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro, turbin yang terhubung langsung dengan poros generator diputar dengan memanfaatkan aliran air sebagai sumber energi utamanya. Energi listrik yang dihasilkan generator mampu memenuhi kebutuhan masyarakat dan industri skala kecil. Konsep induksi elektromagnetik menjadi fondasi kerja generator, yakni fenomena munculnya gaya gerak listrik ketika medan magnet berubah dan memotong kumparan atau penghantar. Michael Faraday adalah ilmuwan yang pertama kali mengungkapkan prinsip fundamental tersebut. Perubahan fluks magnetik yang menembus suatu kumparan terhadap waktu akan memicu munculnya gaya gerak listrik induksi pada kumparan tersebut. Besarnya tegangan induksi yang terbentuk berbanding lurus dengan laju perubahan fluks magnet yang memotong kumparan. Semakin cepat medan magnet berubah, semakin besar pula tegangan listrik yang dihasilkan generator. Prinsip inilah yang menjadi dasar utama dalam pengoperasian berbagai jenis generator pada sistem pembangkit tenaga listrik modern. Fungsi Generator adalah untuk mengubah energi mekanik berputar yang dihasilkan turbin menjadi listrik arus bolak-balik (AC) tiga fase untuk transmisi dan konsumsi. Dasar desain dari peralatan pembangkitan tenaga listrik di *North Duri Cogeneration Plant* menggunakan *TurboGenerator Brush Electric Machine Ltd. BDAX82.445ERH - TEWAC (Totally Enclosed Water-Air-Cooled) generator-exciter assembly*. Data rating desain untuk generator ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. 2 Generator Design Data

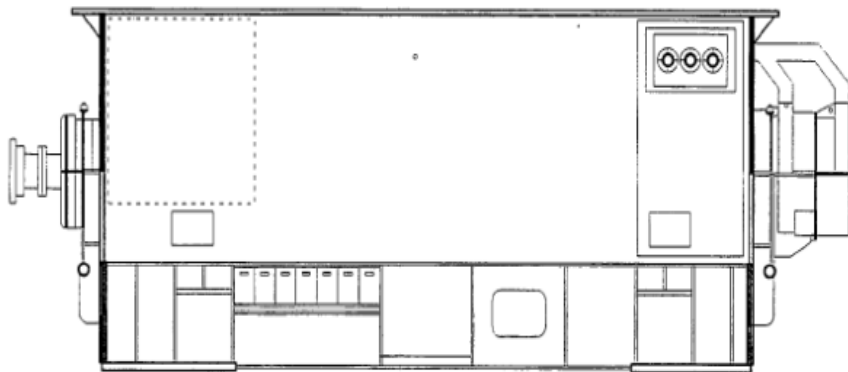
Rated MVA @ 59°F	141.176 MVA
Rated MW @ 59°F	120 MW
Power Factor	0.85
Phases	3
Frequency	60 Hz
Line Voltage	13.8 kV
Speed	3600 rpm
Rotation (Viewed from exciter end)	Clockwise



Gambar 2. 6 Nameplate Generator

Sumber : Nemaplate Equipment Plant

Sesuai dengan desainnya yaitu *TEWAC (Totally Enclosed Water-Air-Cooled)* Mesin ini sepenuhnya tertutup dengan Air-Udara sebagai *cooling system* nya, membuat mesin ini sangat cocok untuk bertugas mencapai beban dasar atau biasanya disebut juga dengan base load dan beban puncak *biasanya disebut juga dengan peak load* sesuai dengan keterangan yang ditulis pada rating *nameplate, data sheets* dan kurva *capability*.

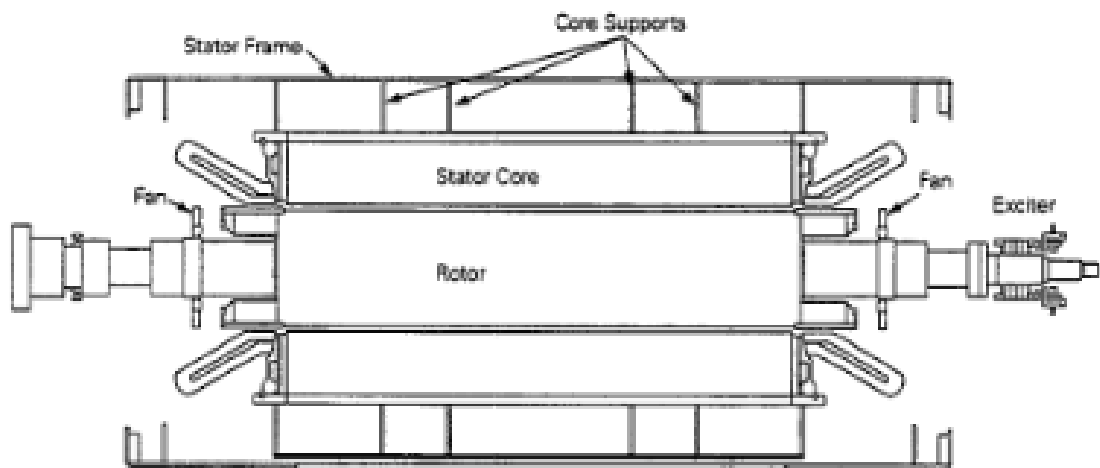


Gambar 2. 7 Generator Housing

Brush Generator BDAX82-445ERH terbagi dalam beberapa bagian, yaitu:

A. Stator

Pada Synchronous Generator, stator merupakan bagian utama yang bersifat diam dan memiliki peranan penting dalam proses pembangkitan energi listrik. Stator tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu rangka stator, inti stator, serta belitan stator atau yang sering disebut sebagai belitan jangkar. Ketiga komponen tersebut saling terintegrasi dan bekerja secara bersamaan untuk mendukung proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada generator. Keberadaan stator sangat menentukan kualitas tegangan keluaran, kestabilan operasi, serta kemampuan generator dalam menyalurkan daya listrik secara kontinu (Muhamad Fikri, 2025). Rangka stator umumnya

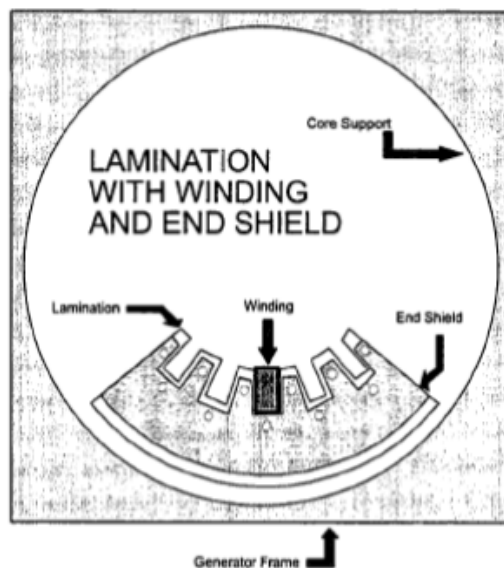


Gambar 2. 8 Stator Frame

Sumber: MCTN *Manual Book* 1999

dibuat dari material besi tuang yang memiliki kekuatan mekanis tinggi sehingga mampu menopang seluruh bagian generator secara kokoh. Selain berfungsi sebagai rumah atau pelindung seluruh komponen internal generator, rangka stator juga dirancang untuk mampu menahan pengaruh getaran mekanis yang muncul selama generator beroperasi. Bentuk rangka stator biasanya berupa konstruksi silinder atau

lingkaran dengan sambungan pada bagian rusuk-rusuk tertentu yang bertujuan meningkatkan kekuatan struktur serta menjaga kestabilan generator terhadap getaran maupun deformasi mekanis akibat putaran dan pembebanan yang berlangsung terus-menerus (Kong, 2015). Sementara itu, inti stator merupakan bagian tempat terbentuk dan mengalirnya fluks magnet pada generator. Dengan menggunakan material ferromagnetik, inti stator mampu menghantarkan fluks magnet dengan baik sehingga proses induksi elektromagnetik dapat berlangsung secara optimal. Pada bagian inti stator juga terdapat alur-alur yang digunakan sebagai tempat pemasangan belitan stator. Adapun belitan stator umumnya terbuat dari bahan tembaga karena memiliki konduktivitas listrik yang sangat baik serta mampu menghantarkan arus listrik dengan rugi-rugi yang relatif kecil. Belitan tersebut disusun di dalam slot atau alur pada inti stator sesuai dengan desain tertentu agar mampu menghasilkan distribusi medan magnet yang merata. Fungsi utama belitan yang terdapat pada stator adalah tempat timbulnya gaya gerak listrik (ggl) merupakan akibat adanya perubahan fluks pada magnet yang dihasilkan oleh rotor. Tegangan induksi yang muncul pada belitan stator inilah yang kemudian menjadi sumber energi listrik keluaran generator untuk disalurkan ke sistem tenaga listrik maupun ke beban listrik lainnya.



Gambar 2. 9 Stator Winding

Sumber: MCTN *Manual Book 1999*

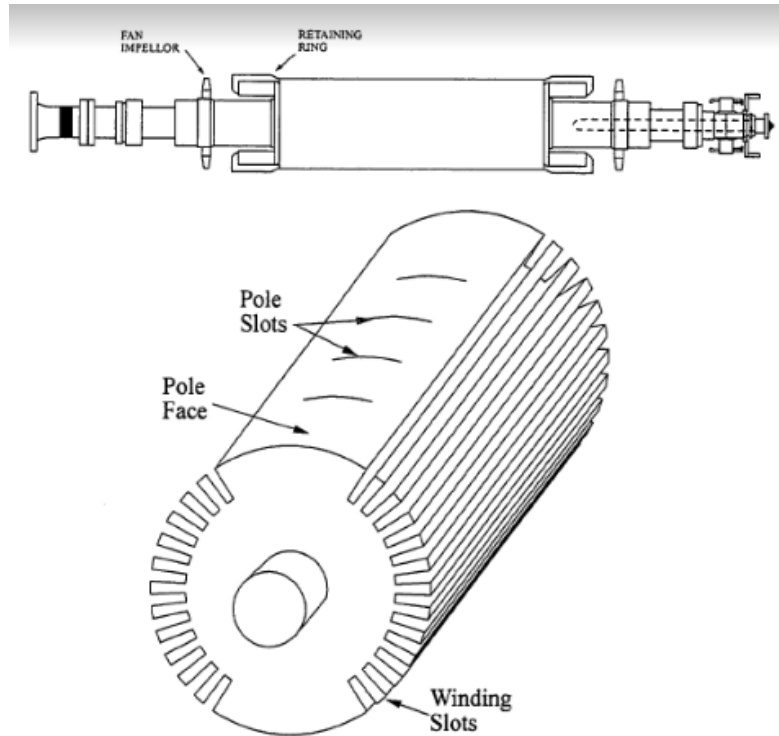
B. Rotor

Rotor adalah salah satu bagian dari Synchronous Generator yang berputar dan memiliki fungsi utama sebagai pembangkit medan magnet pada generator. Rotor memiliki kutub-kutub magnet yang dilengkapi dengan lilitan kawat medan (field winding) yang dialiri arus searah atau arus DC. Arus searah tersebut menghasilkan medan magnet yang kemudian berinteraksi dengan belitan stator sehingga menimbulkan proses induksi elektromagnetik dan menghasilkan energi listrik pada sisi stator. Perputaran rotor diperoleh dari penggerak mula, seperti turbin gas, turbin uap, mesin diesel, maupun turbin air, yang terhubung langsung dengan poros generator. Oleh karena itu, kondisi rotor sangat memengaruhi kestabilan medan magnet, kualitas tegangan keluaran, serta keandalan operasi generator secara keseluruhan. (Gozdowiak, A., 2020).

Rotor pada generator sinkron terbagi ke dalam dua kategori pokok, yakni rotor silinder yang juga dikenal sebagai rotor kutub tidak menonjol (non-salient pole rotor) serta rotor kutub menonjol (salient pole rotor). Pada rotor kutub menonjol, kutub-kutub magnetnya tampak mencuat keluar dari permukaan rotor. Umumnya, tipe rotor semacam ini diaplikasikan pada generator berkecepatan rendah sampai sedang, misalnya pada pembangkit listrik tenaga air. Rotor dengan kutub menonjol dirancang untuk mengakomodasi jumlah kutub yang lebih besar, sehingga frekuensi sistem yang dihasilkan tetap sesuai meskipun kecepatan putarnya rendah. Diameter rotor jenis ini cenderung lebih besar, sementara panjang porosnya lebih pendek apabila dibandingkan dengan rotor silinder.

Sementara itu, rotor kutub tidak menonjol atau rotor silinder merupakan rotor yang memiliki permukaan halus dan berbentuk silinder tanpa adanya kutub yang menonjol pada permukaannya. Rotor jenis ini dirancang khusus untuk generator dengan kecepatan putar tinggi, seperti turbo generator yang digerakkan oleh turbin uap maupun turbin gas. Konstruksi rotor silinder dibuat lebih kuat secara mekanis agar mampu menahan gaya sentrifugal yang besar akibat putaran tinggi selama operasi. Selain itu, rotor silinder umumnya memiliki diameter yang lebih kecil namun panjang rotor lebih besar dibandingkan rotor kutub menonjol. Rotor tipe ini banyak digunakan pada pembangkit listrik modern, termasuk pada sistem North Duri Cogeneration Plant yang

menggunakan turbo generator berkecepatan tinggi sebagai bagian dari sistem pembangkitan energinya.



Gambar 2. 10 Generator Rotor

Sumber: MCTN *Manual Book 1999*

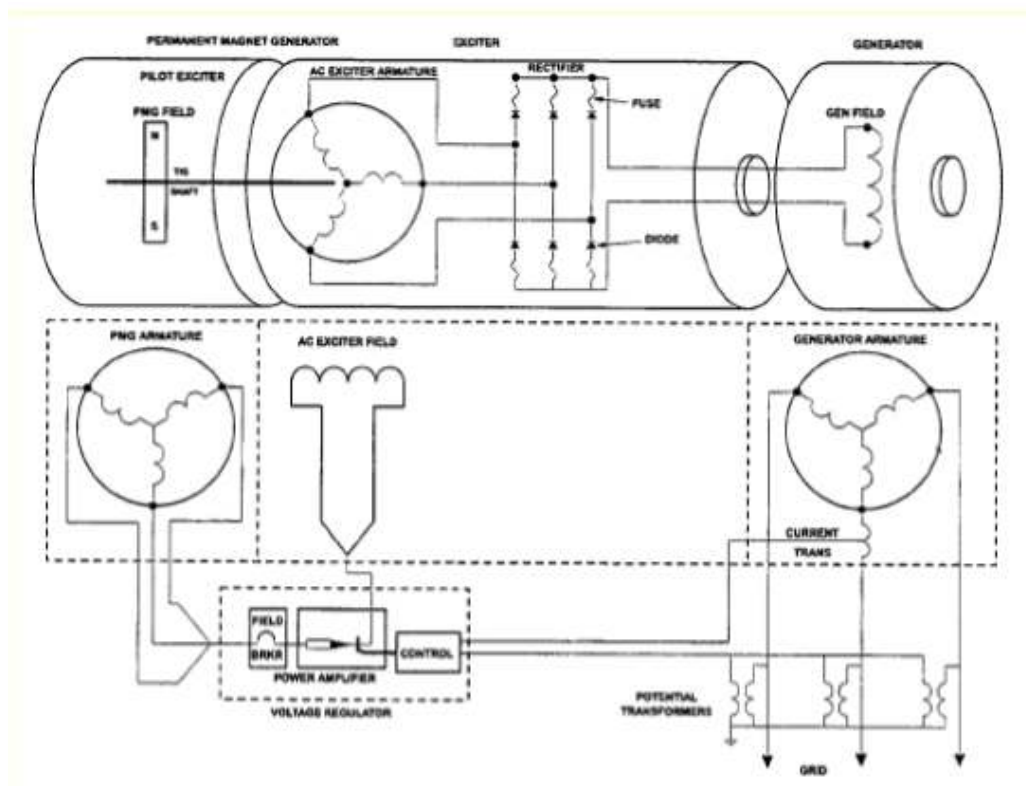
C. Brushless Exciter

Pada Electromagnetic Induction generator sinkron, arus searah atau arus eksitasi yang dialirkan ke belitan rotor memiliki fungsi utama untuk membentuk medan magnet pada kutub-kutub rotor. Ketika arus DC mengalir melalui lilitan medan tersebut, akan terbentuk fluks magnet yang keluar dari kutub utara rotor kemudian melintasi celah udara menuju inti stator. Setelah melewati inti stator, fluks magnet akan kembali melintasi celah udara dan masuk ke kutub selatan rotor sehingga membentuk lintasan medan magnet tertutup. Proses pembentukan medan magnet ini berlangsung secara terus-menerus

selama rotor berputar mengikuti putaran penggerak mula yang terhubung dengan poros generator.

Inti stator pada generator terdiri dari laminasi-laminasi baja tipis yang disusun berlapis-lapis yang bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar (eddy current) serta meningkatkan efisiensi kerja generator. Material baja laminasi tersebut memiliki sifat ferromagnetik sehingga mampu menghantarkan fluks magnet dengan baik dan dapat mengalami perubahan kondisi magnetisasi secara cepat ketika medan magnet rotor berputar. Saat rotor bergerak, medan magnet yang dihasilkan rotor juga ikut berputar sehingga menyebabkan perubahan fluks magnet yang memotong konduktor-konduktor pada belitan stator.

Perubahan fluks magnet yang terjadi secara kontinu tersebut menyebabkan timbulnya gaya gerak listrik induksi pada kumparan tembaga yang dipasang di slot-slot inti stator sesuai dengan prinsip Michael Faraday melalui hukum Faraday. Tegangan akan dihasilkan oleh belitan pada stator berbentuk tegangan bolak-balik atau arus AC karena polaritas medan magnet yang memotong kumparan berubah secara periodik seiring dengan putaran rotor. Tegangan dan arus listrik yang muncul pada sisi stator inilah yang kemudian menjadi daya keluaran utama generator untuk disalurkan ke sistem tenaga listrik maupun ke berbagai jenis beban listrik lainnya.



Gambar 2. 11 Exciter Configuration

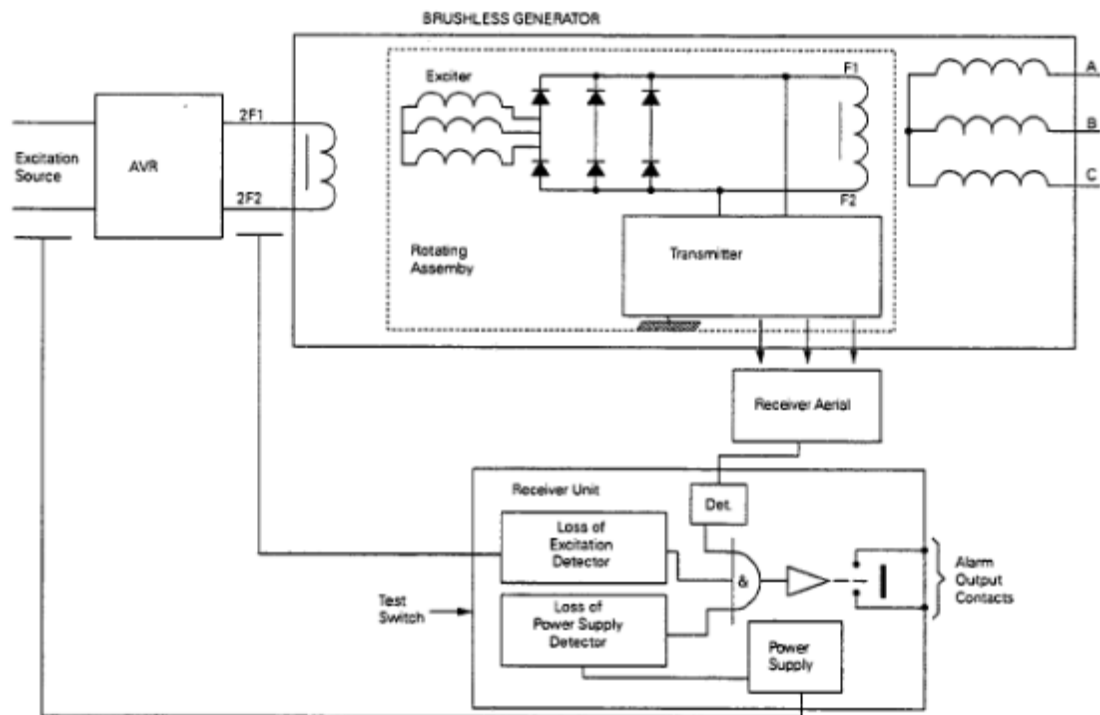
Sumber: MCTN *Manual Book 1999*

D. Generator Neutral Grounding System

Pada sistem Generator Neutral Grounding System, pentanahan netral pada generator adalah salah satu bagian yang penting didalam sistem proteksi generator yang berfungsi untuk meningkatkan keamanan operasi serta melindungi peralatan listrik dari gangguan hubung tanah (ground fault). Sistem ini umumnya ditempatkan di dalam kompartemen tahan cuaca (weatherproof compartment) yang dipasang secara langsung pada sisi generator, tepat di atas terminal netral generator. Penempatan tersebut dilakukan agar sistem pentanahan dapat terhubung secara efektif dengan titik netral generator sekaligus memudahkan proses pemantauan, pengujian, dan pemeliharaan selama generator beroperasi. Sistem pentanahan netral generator dirancang untuk mendeteksi adanya gangguan tanah yang dapat terjadi

pada berbagai bagian sistem pembangkit, seperti pada lilitan generator, bus output generator, maupun sisi input dari transformator penaik tegangan atau Step-Up Transformer. Gangguan ground fault merupakan salah satu jenis gangguan listrik yang berbahaya karena dapat menyebabkan kerusakan isolasi, kenaikan temperatur berlebih, percikan listrik, hingga kerusakan serius pada generator apabila tidak segera terdeteksi dan ditangani. Oleh sebab itu, sistem pentanahan netral memiliki peranan yang sangat penting dalam menjaga kontinuitas dan keandalan operasi pembangkit tenaga listrik.

Pada pengoperasiannya, sistem ini biasanya menggunakan neutral grounding transformer yang dihubungkan dengan relai proteksi. Relai tersebut bekerja dengan cara memonitor perubahan atau pergeseran tegangan yang terjadi pada transformator pentanahan netral. Dalam kondisi operasi normal, tegangan pada sistem berada dalam keadaan seimbang sehingga tidak terjadi pergeseran tegangan yang signifikan. Namun, apabila terjadi gangguan hubung tanah pada area yang diproteksi, maka akan timbul ketidakseimbangan tegangan yang kemudian dideteksi oleh relai proteksi sebagai indikasi adanya ground fault. Setelah gangguan terdeteksi, sistem proteksi akan memberikan sinyal alarm atau bahkan melakukan pemutusan sistem secara otomatis untuk mencegah kerusakan yang lebih besar pada generator dan peralatan pendukung lainnya. Dengan adanya sistem pentanahan netral generator, tingkat keamanan dan keandalan operasi generator dapat ditingkatkan karena gangguan tanah dapat dideteksi lebih cepat dan lebih akurat. Selain itu, sistem ini juga membantu meminimalkan risiko kerusakan isolasi serta memperpanjang umur operasi generator dan peralatan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.



Gambar 2. 12 Rotor Ground Fault Monitor

Sumber: MCTN *Manual Book 1999*

2.2.5 Partial Discharge

Partial Discharge merupakan suatu fenomena ditandai dengan pelepasan muatan listrik atau loncatan bunga api listrik yang biasanya terjadi secara lokal pada bagian kecil sistem isolasi akibat adanya tegangan listrik tinggi yang melebihi kemampuan dielektrik bahan isolasi tersebut. Fenomena ini biasanya terjadi pada bagian isolasi yang mengalami kelemahan, seperti adanya rongga udara (void), retakan kecil, permukaan isolasi yang terkontaminasi, maupun ketidakseragaman medan listrik pada material isolasi. Walaupun pelepasan listrik yang terjadi tidak langsung menghubungkan dua elektroda secara penuh, degradasi isolasi pada peralatan tegangan tinggi dapat terjadi secara bertahap akibat aktivitas partial discharge yang berlangsung terus-menerus, sehingga proses penuaan isolasi menjadi semakin cepat. Berbagai jenis bahan isolasi, baik yang berwujud padat, cair, maupun gas, memiliki potensi untuk mengalami fenomena partial discharge tersebut. Pada bahan isolasi padat, kegagalan isolasi dapat disebabkan oleh beberapa mekanisme,

seperti kegagalan intrinsik (intrinsic breakdown), kegagalan elektromekanik, pembentukan streamer, pengaruh termal (thermal breakdown), serta erosi akibat pelepasan muatan listrik yang terjadi secara berulang. Aktivitas partial discharge pada isolasi padat akan menimbulkan kerusakan mikro pada permukaan maupun bagian dalam isolasi sehingga kekuatan dielektrik material semakin menurun. Apabila kondisi ini dibiarkan dalam jangka waktu lama, maka dapat menyebabkan kegagalan total pada sistem isolasi peralatan listrik.

Pada bahan isolasi cair, kegagalan isolasi umumnya dipengaruhi oleh adanya gelembung gas atau kavitasi, partikel-partikel pengotor di dalam cairan, serta kontaminasi akibat tercampurnya bahan lain pada media isolasi cair. Ketidakmurnian tersebut menyebabkan distribusi medan listrik menjadi tidak merata sehingga memicu terjadinya pelepasan muatan sebagian. Sementara itu, pada bahan isolasi gas, mekanisme Townsend Discharge dan mekanisme streamer menjadi penyebab utama terjadinya kegagalan isolasi. Proses ionisasi gas yang berlangsung secara cepat menyebabkan terbentuknya jalur konduksi listrik yang akhirnya memicu terjadinya pelepasan muatan listrik di dalam media gas. Berdasarkan uraian tersebut, dapat dipahami bahwa kegagalan sistem isolasi memiliki hubungan yang sangat erat dengan aktivitas partial discharge. Semakin tinggi intensitas partial discharge yang terjadi, maka semakin besar pula tingkat kerusakan isolasi yang akan dialami oleh suatu peralatan listrik. Oleh karena itu, pengujian dan pemantauan partial discharge menjadi salah satu metode penting dalam sistem pemeliharaan prediktif untuk mengetahui kondisi kesehatan isolasi pada generator, transformator, kabel daya, dan peralatan tegangan tinggi lainnya sebelum terjadi kegagalan yang lebih serius. Pernyataan ini sejalan dengan penelitian yang dikemukakan oleh Tadjuddin yang menjelaskan bahwa fenomena kegagalan isolasi sangat berkaitan dengan aktivitas partial discharge pada material isolasi listrik.



Gambar 2. 13 Broken Stator Winding

Sumber: MCTN *Manual Book 1999*

2.2.5.1 Penyebab Partial Discharge

- **Mekanisme Kegagalan Bahan Isolasi Padat**

Mekanisme kegagalan pada bahan isolasi padat dapat terjadi dalam beberapa bentuk yaitu tergantung pada lamanya waktu dan besarnya tegangan yang diberikan pada material isolasi tersebut. Antara Lain:

- a. Kegagalan intrinsik merupakan jenis kegagalan isolasi yang dipengaruhi oleh sifat dasar material dan temperatur bahan itu sendiri, tanpa dipengaruhi faktor luar seperti tekanan, bentuk elektroda, ketidakmurnian material, maupun adanya rongga udara di dalam isolasi. Kegagalan ini terjadi ketika tegangan listrik yang diberikan meningkat hingga mencapai tekanan listrik tertentu, sekitar 10^6 volt/cm, dalam waktu yang sangat singkat yaitu sekitar 10^{-8} detik.
- b. Kegagalan elektromekanik terjadi ketika isolasi padat tidak mampu menahan tekanan mekanik yang ditimbulkan oleh medan listrik. Medan listrik ini berasal dari perbedaan polaritas antara dua elektroda yang mengapit material isolasi tersebut. Gaya tarik-menarik antar elektroda akibat tekanan mekanik inilah yang kemudian merusak struktur internal bahan isolasi. Pada kekuatan

medan sekitar 10^6 volt/cm, tekanan yang dihasilkan mampu mencapai kisaran 2 sampai 6 kg/cm².

- c. Kegagalan streamer terjadi akibat proses avalanche elektron pada bahan isolasi. Elektron yang bergerak dari katoda ke anoda memperoleh energi tinggi sehingga menghasilkan ionisasi baru. Saat tegangan diberikan, gas atau udara di sekitar isolasi lebih mudah mengalami kegagalan dibanding bahan padat karena memiliki permitivitas lebih rendah. Kondisi ini menimbulkan medan listrik lokal yang sangat tinggi pada permukaan isolasi dan secara bertahap dapat menyebabkan kerusakan hingga kegagalan total pada bahan isolasi.
- d. Kegagalan termal terjadi ketika panas yang dihasilkan di dalam bahan isolasi lebih besar dibandingkan panas yang dapat dilepaskan ke lingkungan. Kondisi ini menyebabkan suhu terus meningkat hingga material menjadi tidak stabil dan akhirnya mengalami kegagalan.
- e. Kegagalan erosi terjadi akibat bahan isolasi padat memiliki rongga atau lubang kecil yang tidak sempurna. Rongga tersebut biasanya terisi gas atau cairan yang memiliki kekuatan isolasi lebih rendah dibanding bahan padat, sehingga lebih mudah mengalami pelepasan listrik dan menyebabkan kerusakan secara bertahap pada isolasi.

2.2.5.2 Teori *Partial Discharge* Pada Stator Generator

Energi mekanik dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui sebuah perangkat bernama generator yang bekerja dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Dua komponen pokok penyusun generator sinkron adalah rotor serta stator. Medan magnet dihasilkan oleh rotor yang berputar, sementara stator yang bersifat statis menerima induksi dari rotor hingga terbentuklah tegangan listrik.

$$Br = \mu \cdot Nr \cdot Ir / l \quad (2.1)$$

Garis gaya medan magnet yang dihasilkan rotor akan memotong kumparan stator sehingga menimbulkan fluks magnetik pada kumparan tersebut. Karena stator menerima pengaruh medan magnet dari rotor dan menghasilkan tegangan listrik, maka stator pada generator sinkron disebut sebagai kumparan jangkar. Besarnya fluks magnetik yang terbentuk dipengaruhi oleh kuat medan magnet dan luas penampang yang dilalui medan tersebut. $\Phi = Br.A.\cos\theta$

(2.2)

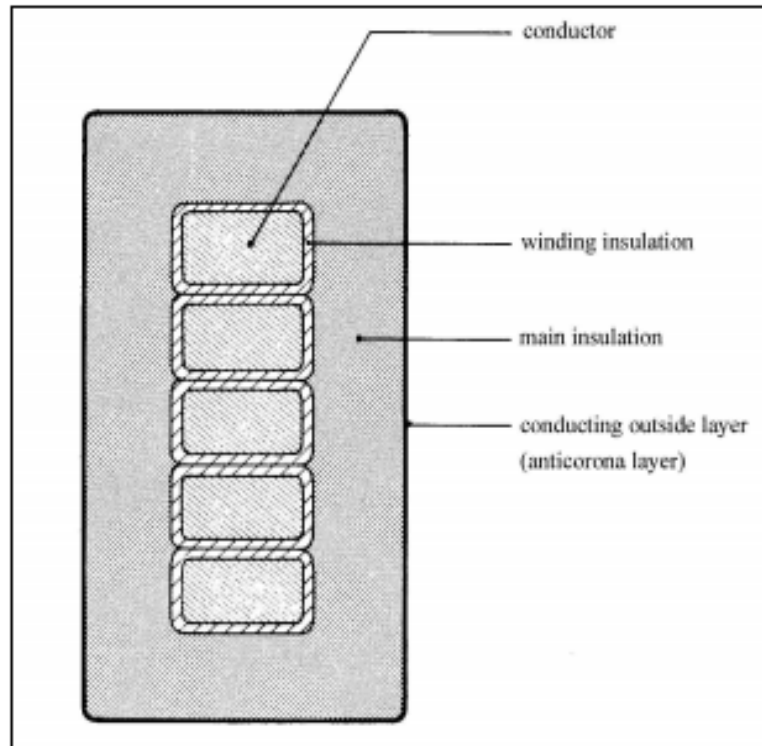
Karena kumparan rotor diberi catu tegangan searah, medan magnet yang dihasilkan akan tetap terhadap waktu sehingga fluks magnetik pada stator juga bersifat konstan. Agar terjadi perubahan fluks yang dapat menghasilkan tegangan induksi, rotor harus diputar menggunakan penggerak utama (prime mover). Kecepatan putaran rotor berhubungan dengan frekuensi dan jumlah kutub generator. Persamaannya:

$$n = \frac{120 f}{p} \quad (2.3)$$

perputaran rotor menyebabkan sudut antara medan magnet rotor dan kumparan stator terus berubah. Perubahan ini mengakibatkan fluks magnetik pada stator berubah terhadap waktu sehingga timbul tegangan induksi pada kumparan jangkar sesuai dengan prinsip induksi elektromagnetik. Persamaannya :

$$E_{ind} = -Ns \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

Belitan stator generator dibuat dari konduktor tembaga yang dilapisi isolasi. Konduktor-konduktor tersebut dipasang mengelilingi inti stator dengan jarak yang sama agar distribusi medan lebih merata. Setiap slot pada stator biasanya berisi dua batang konduktor, yaitu satu berada di bagian atas dan satu lagi di bagian bawah dalam satu alur yang sama. Susunan ini membentuk struktur belitan stator pada generator.



Gambar 2. 14 Penampang melintang stator generator

Sumber: MCTN Manual Book 1999

Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi penurunan kualitas isolasi pada stator generator antara lain:

1. Tekanan mekanis.

Getaran ini dapat mempercepat degradasi isolasi karena menimbulkan tekanan berulang pada bagian celah stator. Selain itu, vibrasi juga dapat mengubah karakteristik dan nilai partial discharge (peluahan parsial) di dalam slot stator serta mempengaruhi pola hasil pengukurannya..

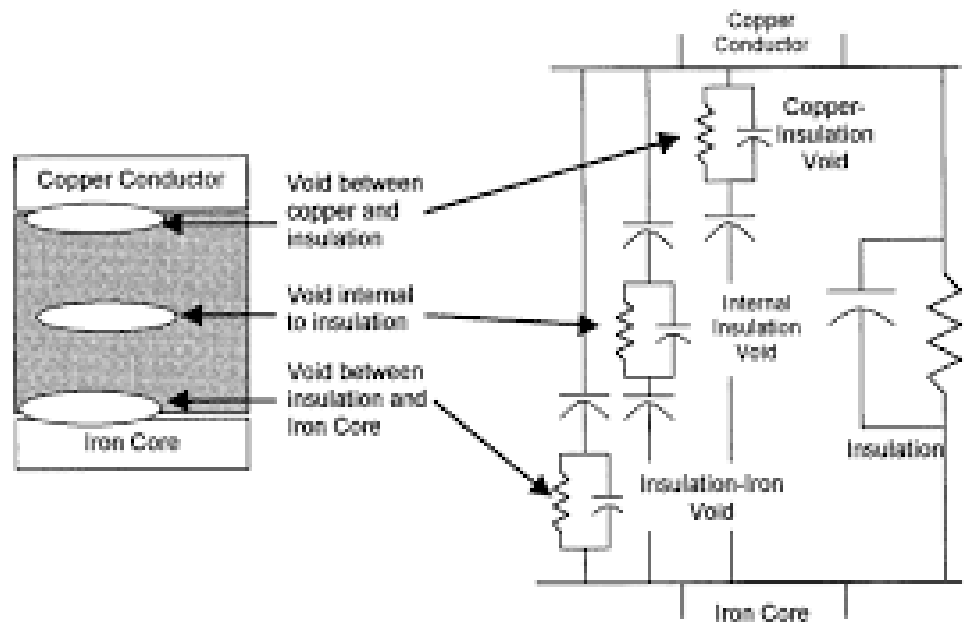
2. Tekanan termal.

Kondisi tersebut dapat menyebabkan terjadinya dekomposisi molekul dan oksidasi pada material isolasi organik. Akibatnya, daya rekat antara epoxy

dan mika menurun, sehingga struktur isolasi menjadi lebih lemah. Jika kondisi ini berlangsung bersamaan dengan tekanan mekanis dan peluahan parsial, maka proses erosi pada sistem isolasi akan semakin cepat terjadi.

3. Tekanan elektris.

Peluhan parsial pada sistem isolasi berpotensi dipicu oleh kondisi tersebut, yang pada akhirnya mempercepat degradasi isolasi stator, khususnya ketika tekanan mekanis dan beban termal turut menyertainya. Pemodelan sederhana terhadap fenomena ini pada belitan stator generator dapat dilakukan melalui rangkaian ekivalen yang terdiri atas kapasitor dan resistor yang dirangkai secara paralel. Model isolasi ini juga berperan dalam penentuan faktor daya (power factor), yang diperoleh dari nilai cosinus sudut fasa antara arus bocor total dengan komponen arus bocor resistifnya. Sementara itu, rongga atau kekosongan di dalam material isolasi dapat direpresentasikan sebagai elemen kapasitor yang menunjukkan adanya media dielektrik berbeda di dalam struktur isolasi.



Gambar 2. 15 Gambar peluahan parsial isolasi stator generator

Sumber: MCTN *Manual Book* 1999

Jenis peluahan parsial dikelompokkan menjadi 3 jenis, antara lain:

1. Peluahan parsial pada celah isolasi stator

Terjadi jika terdapat kerusakan proteksi korona dan adanya ketidaksempurnaan proses injeksi resin di antara isolasi belitan dengan celah stator generator. Umumnya pada generator dengan tegangan diatas 6 kV terdapat slot discharge dengan nilai tertentu akibat adanya void kecil pada isolasi dan adanya kerusakan kecil pada proteksi korona. Kerusakan pada proteksi korona dapat diakibatkan adanya vibrasi pada belitan stator.

2. Peluahan parsial pada bagian dalam isolasi stator

Terjadi jika terdapat void di dalam isolasi. Void ini timbul karena proses yang tidak sempurna pada proses manufaktur. Peluahan akan terjadi pada void tersebut dan secara perlahan menimbulkan pohon elektris yang pada akhirnya menyebabkan kegagalan.

3. Peluahan parsial pada belitan akhir isolasi stator.

Terjadi secara langsung antar-belitan dari fasa yang berbeda di daerah belitan akhir. Hal ini terjadi karena adanya kontaminasi debu atau oli yang bersifat konduktif pada permukaan isolasi daerah tersebut.