

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan topik skripsi yang saya akan bahas, ada beberapa referensi dari penelitian-penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya untuk menentukan batasan-batasan masalah yang akan saya bahas dalam skripsi ini. Referensi-referensi ini akan digunakan untuk mempertimbangkan permasalahan apa saja yang berhubungan dengan topik yang akan saya bahas. Adapun referensi yang saya ambil yaitu :

1. Muhammad Hamdani Rizal, Rudy Setiabudy (2013) melakukan penelitian dengan judul "*Analisis Kualitas Isolasi Belitan Dari Kumparan Stator Motor 6,6 Kv Berdasarkan Nilai Tahanan Isolasi, $\tan \Delta$, Dan Arus Bocor Pada Pengujian Tegangan Tinggi (DC)*". Dalam penelitian tersebut menjelaskan bahwa Pemanasan isolasi belitan sangat mempengaruhi besarnya nilai tahanan isolasi. Hal ini dikarenakan berkurangnya kadar air pada isolasi tersebut setelah dilakukan pemanasan dan juga menjelaskan betapa pentingnya tahanan isolasi yang merupakan faktor utama yang menentukan kualitas tahanan isolasi itu baik atau buruk.
2. Ningrum, Atik Setyo (2012) "*Analisa Partial Discharge pada Belitan Stator Generator GT.11 dan ST.10 PLTGU Grati dan Peramalan Usia*

Prediktif Generator dengan Metode Regresi Linier ” Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, menjelaskan tentang Pengoperasian dan pemeliharaan terhadap generator serta menganalisa kondisi isolasi pada belitan pada stator generator. Setelah menganalisa penulis dapat mengetahui adanya end winding discharge pada belitan stator generator.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Generator Sinkron

Generator ini adalah suatu mesin listrik yang biasanya dipakai untuk mengkonversikan suatu energi gerak menjadikan energi berupa listrik dengan menggunakan induksi medan magnet didalam nya sebagai perantara. Energi itu berubah karena adanya gerakan antara medan magnet pada generator dengan kumparan generator. Segingga dalam proses penggerakan magnet dengan kumparan tersebut maka munculnya GGL dalam induksi tersebut. Alternator ini biasanya disebut juga dengan generator sinkron dikarenakan berputarnya medan magnet sama dengan putaran pada rotor generator. Generator ini bianya akan menghasilkan energi listrik dengan arus bolak balik (*Alternating Current*) dan biasa generator ini diproduksi dengan keluaran 3 phasa.

2.2.2 Satuan Dasar

Ada satuan-satuan dasar generator yang besarnya perlu ditetapkan. Tegangan yang lebih tinggi akan mengakibatkan bertambah tebalnya isolasi, sehingga faktor

ruangan untuk penghantar menjadi lebih kecil dan harga generator menjadi mahal. Oleh karena itu, maka pilihan terhadap tegangan yang agak rendah memberikan keuntungan dalam perencanaan (*design*). Akan tetapi, tegangan yang terlalu rendah dibandingkan dengan kapasitasnya akan menyebabkan berkurangnya jumlah lilitan pada gulungan stator, sehingga membatasi keleluasaan perencanaan, dan tidak ekonomis. Bila kawat-kawat hubung dan peralatan penghubung (*switch gear*) antara generator dan transformator diperhitungkan, maka dinaikkannya tegangan menyebabkan berkurangnya biaya. Berhubung dengan hal-hal di atas, dapatlah diberikan secara kasar, standar tegangan 3,3 kV untuk 3 MVA atau kurang, 6,6 kV untuk 5 – 10 MVA, 11 kV untuk 10 – 50 MVA, 13,2 untuk 50 – 100 MVA, 15,4 kV atau 16,5 kV untuk kapasitas diatas 100 MVA.

Pada umumnya faktor daya dipilih antara 0,85 – 0,95. Akan tetapi pada keadaan faktor daya beban yang baik, faktor daya lebih dari 0,95 dapat dipilih untuk sentral-sentral yang dihubungkan pada saluran transmisi jarak jauh dengan tegangan sangat tinggi (EVH). Sekalipun pada umumnya perbandingan hubung-singkat (*short-circuit ratio*) ditetapkan kira-kira 1,0 (kecuali bila terdapat perincian lain), dapat juga diambil nilai kurang 1,0 bila dipandang perlu dari sudut ekonomi. Bagi generator turbin air yang sedikit jumlah kutubnya, peninggian faktor daya secara ekonomis lebih baik daripada pengurangan perbandingan hubung-singkat.

Kecepatan putar yang lebih tinggi sebaiknya dipilih dari angka-angka seperti yang tercantum dalam daftar-daftar standar, seperti tabel 2, dengan catatan bahwa kecepatan yang dipilih harus tetap ada dalam batas-batas kecepatan turbin. Apabila

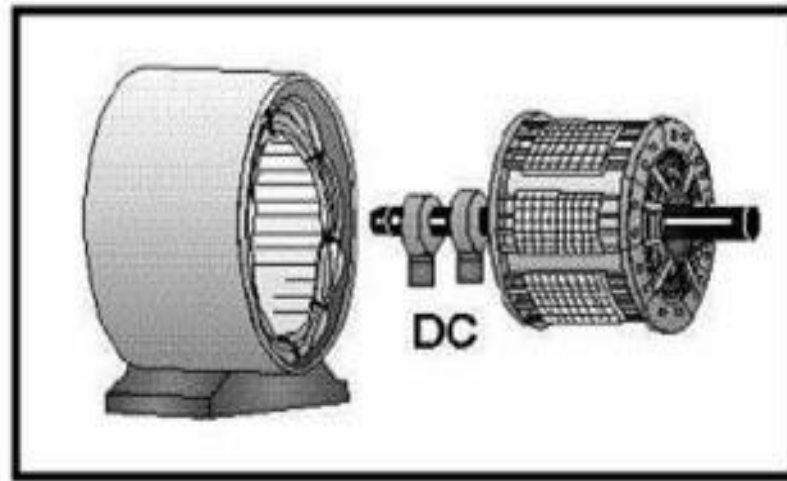
kecepatan yang dipilih tidak terdapat dalam tabel tetapi ternyata lebih menguntungkan, maka sebaiknya diminta penjelasan lebih lanjut dari pabriknya.

Tabel 2.1 Kecepatan Putar Sinkron dari Generator (rpm)

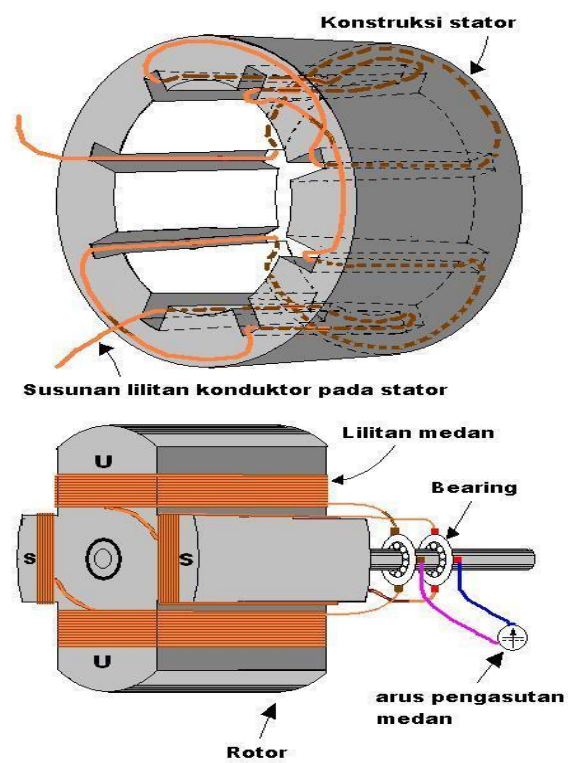
Jumlah Kutub	50 (Hz)	60 (Hz)		Jumlah kutub	50 (Hz)	60 (Hz)
6	1.000	1.200		32	188	225
8	750	900		36	167	200
10	600	720		40	150	180
12	500	600		48	125	150
14	429	514		56	107	129

2.2.3 Konstruksi Generator Sinkron

Generator sinkron memiliki dua komponen utama yaitu stator (bagian yang tidak bergerak) dan rotor (bagian yang bergerak). Generator sinkron mengubah energi mekanik yang akan menjadi energi listrik dengan arus bolak-balik secara elektromagnetik. Energi mekanik berasal dari gerakan yang memutar rotor, sedangkan energi listrik dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan-kumparan yang ada pada stator. Dapat dilihat konstruksi generator sinkron pada gambar 2.1, gambar 2.2, dan gambar 2.3.



Gambar 2.1 Bentuk Konstruksi Generator Sinkron



Konstruksi Generator Sederhana

Gambar 2.2 Bentuk Kontruksi Stator

Dapat dilihat pada gambar 2.1 dan 2.2, maka konstruksi stator ini terdiri dari:

1. Kerangka atau rumah yang menjadi penyangga inti jangkar.
2. Inti stator yang terbuat dari bahan laminasi baja atau besi magnetic.
3. slot dan gigi yaitu tempat meletakkan kumparan bentuk alurnya ada yang terbuka, setengah terbuka dan setengah tertutup.
4. Belitan jangkar biasanya terbuat dari tembaga, yang diletakkan pada alur. Kumparan ini yaitu tempat terjadinya GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi.

Generator sinkron yang menghasilkan daya yang besar, arus (DC) akan disuplai pada belitan rotor untuk menghasilkan elektromagnetik pada rotor, pada kumparan jangkar yaitu sebagai munculnya tegangan listrik yaitu pada stator. Rotor akan diputar oleh *prime mover* (penggerak mula) agar terjadi gesekan medan magnet yang akan berubah dibagian kumparan jangkar di stator. Adanya perpotongan medan magnet yang berubah ini, maka pada kumparan jangkar akan timbulnya tegangan induksi.

Kumparan jangkar pada stator disebut belitan stator atau kumparan stator. Pada generator 3 fasa biasanya belitan dapat dirangkai dalam 2 jenis sebagai berikut:

1. Belitan satu lapis (*single layer winding*), dengan 2 macam bentuk, yaitu:
 - a. Mata rantai (*cocertis or chain winding*)

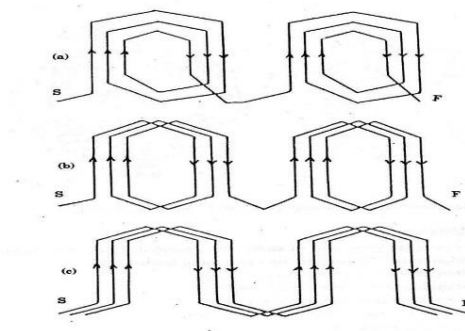
b. Gelombang (*Wave*)

2. Belitan dua lapis (*Double layer winding*), dengan 2 macam bentuk pula, yaitu:

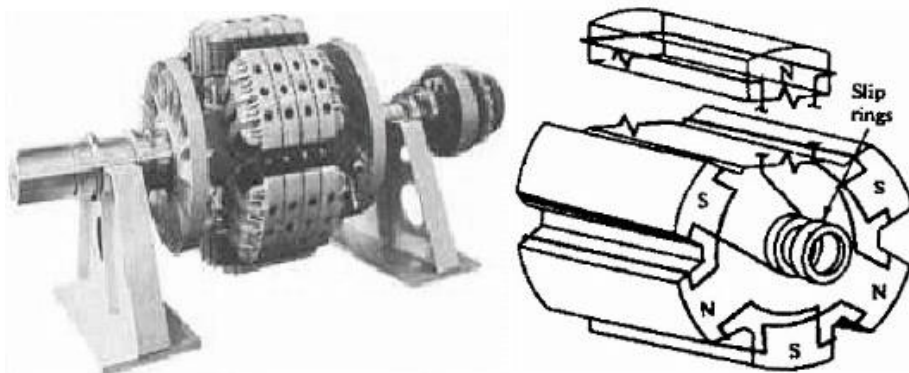
a. Jenis Gelombang (*Wave*)

b. Jenis gelung (*lap*)

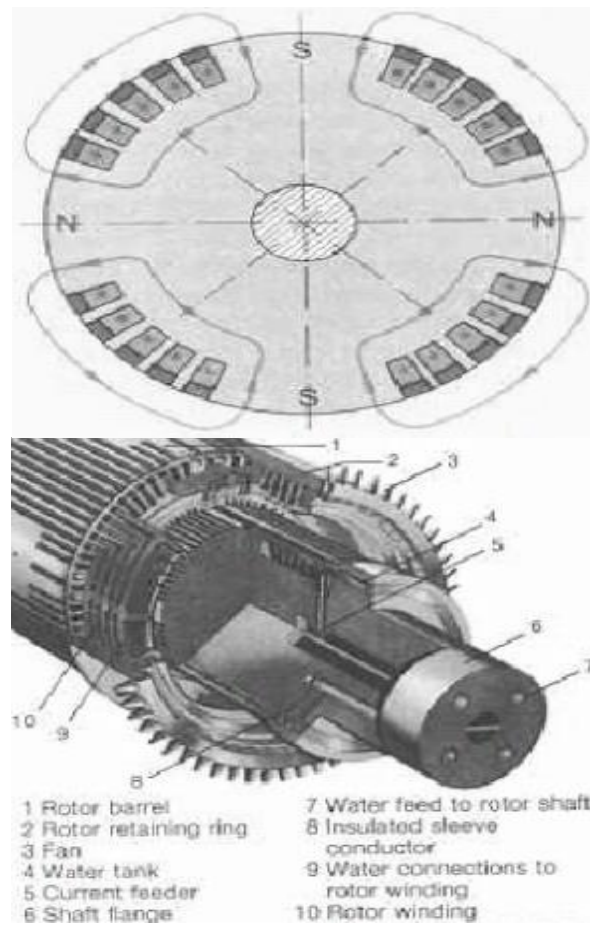
Bentuk kumparan stator akan membentuk kutub magnet pada belitan stator untuk menyesuaikan dengan kutub magnet pada rotor dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Rangkaian Belitan Jangkar Stator Generator Sinkron



a) Rotor *salient* (kutub menonjol) pada generator sinkron



b) Rotor silindris

c) Penampang rotor kutub silindris

Gambar 2.4 Bentuk Konstruksi Rotor pada Generator Sinkron

Ada 2 macam jenis kutub magnet yang biasanya dipakai pada generator sinkron yaitu:

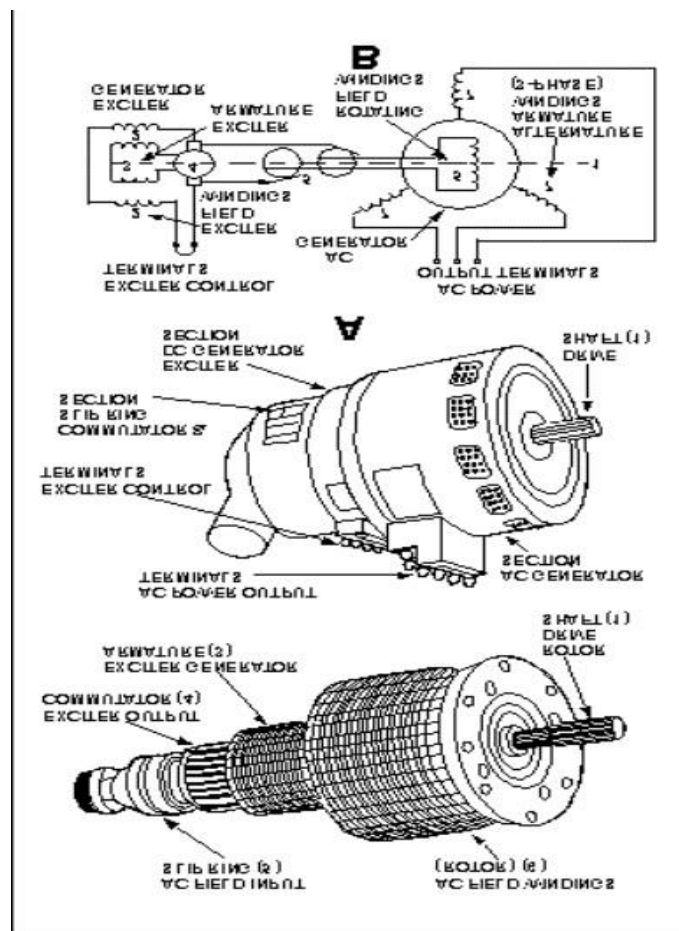
1. Kutub menonjol (*salient*). Kutub menonjol ini 3 bagian yaitu terdiri dari inti, badan dan sepatu kutub. Pada badan kutub belitan medan dililitkan pada bagian itu. Pada sepatu kutub juga dipasang belitan peredam (*damp winding*). belitan kutub biasanya terbuat dari tembaga, sedangkan sepatu kutub dan sepatu kutub biasanya terbuat dari bahan besi lunak.

2. Kutub dengan silindris (*Non salient*). Untuk menempatkan kumparan medan kutub ini terbagi dari alur-alur dan gigi yang telah dipasangkan. bentuk konstruksi rotor kutub menonjol dan kutub silindris dapat dilihat pada generator sinkron gambar 2.4.

Pemilihan konstruksi rotor tergantung tergantung pada kecepatan putaran penggerak mula-mula, frekuensi dan rating daya pada generator. Pada kutub menonjol (*salient*), kutub magnet menonjol akan keluar dari permukaan rotor. Rotor dengan kutub menonjol ini umumnya dipakai pada rotor dengan 4 kutub bahkan lebih. Karena kutub rotornya dipakai banyak, biasanya rotor ini digerakan dengan kecepatan yang rendah.

dibagian kutub dengan silindris, bagian kutub magnet yaitu membentuk silinder dan permukaannya rata dengan rotor. Rotor silinder ini biasanya dipakai untuk rotor dengan dua kutub bahkan samapi dengan empat kutub. Rotor ini umumnya digerakkan pada kecepatan lebih tinggi menjadikan generator yang memakai kutub ini umumnya disebut turbo generator. Generator berkecepatan 1500 rpm ke atas dan frekuensi 50 Hz juga rating daya yang berkisar 10 MVA biasanya memakai rotor silinder. Sementara itu pada daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka dipakailah rotor kutub menonjol. Generator-generator ini umumnya akan membentuk medan magnet dengan bantuan kumparan yang telah dililitkan pada bagian rotornya, dan juga kumparan ini diberi sumber arus (DC) dengan sistem pengaturan yang baik sehingga besar arus yang akan melewati kumparan itu dapat diatur untuk

mengatur kuatnya medan yang akan dihasilkan pada rotor. Dapat dilihat pada gambar 2.5 bentuk konstruksi generator kutup silindris lengkap dengan sistem pemasukan arus medannya.



Gambar 2.5 Bentuk Konstruksi Generator Kutup Silindris

Cara untuk memasukan arus searah (DC) (sebagai arus medan magnetnya) pada bagian medan rotor akan membentuk medan magnet pada bagian kumparan rotor, ada dua cara yaitu :

1. Memasukan daya dengan arus (DC) pada rangkaian rotor yang sumber dengan arus (DC) *eksternal* yaitu baterai dari luar dengan memakai sarana sikat dan juga *slip ring*. Apabila

generator ini memakai sumber dengan sumbernya dengan arus (DC) dari luar untuk melakukan *starter* awal, maka sumber dengan arus (DC) digunakan untuk penguat pada belitan medan yang seterusnya akan diambil dari hasil keluaran pada generator tersebut (setelah sumber dengan arus (DC) dilepaskan) dengan cara merubah keluaran arus bolak-balik (AC) pada generator tersebut akan menjadi arus searah (DC) (akan disearahkan terlebih dahulu lalu akan dialirkan pada bagian belitan medan pada rotor).

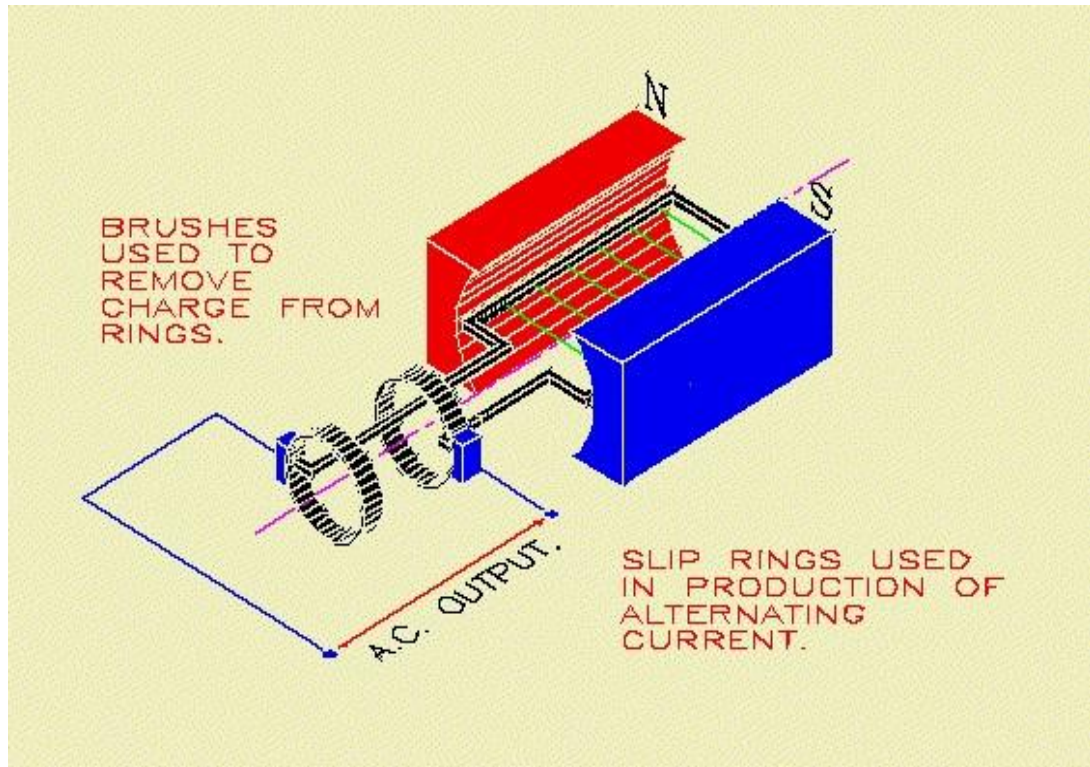
2. Memasukan daya sumber dengan arus (DC) yang berasal dari sumber dengan arus (DC) khusus yang dipasangkan ke bagian batang pada rotor generator sinkron. Sumber dengan arus (DC) ini umumnya berasal dari generator (DC) yang dipasangkan ke bagian rotor generator sinkron.

2.2.4 Prinsip Kerja Generator Sinkron

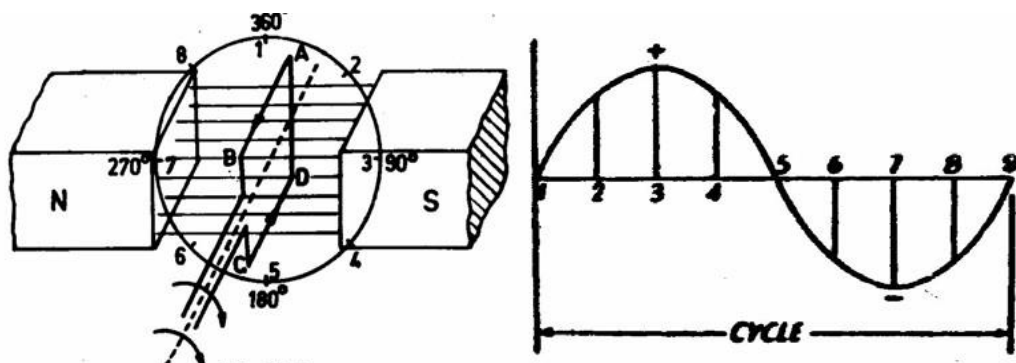
Generator akan mengeluarkan energi listrik dengan cara gerakan antara medan magnet dengan kumparan jangkar pada bagian dalam generator (bagian kumparan jangkar yang bisa bergerak memutar pada bagian medan magnet, atau bisa juga sebaliknya) Jadi, bila sebuah belitan berputar dengan kecepatan yang konstan pada bagian medan magnet, maka akan munculnya induksi tegangan *sinusoidal* pada belitan tersebut. Medan magnet ini akan dapat dihasilkan pada belitan yang telah teraliri oleh arus searah (DC) atau bisa dengan magnet

permanen. Dapat dilihat pada gambar 2.6 bentuk gambaran proses pembangkitan energi listrik pada generator sinkron.

Proses terbentuknya dapat dilihat pada pada gambar 2.7 gelombang (AC) yang dihasilkan pada keluaran rotor.



Gambar 2.6 Kumparan Jangkar pada Rotor Berputar di Sekitar Medan Magnet



Gambar 2.7 Proses terbentuknya gelombang (AC) pada generator sinkron

Dapat dilihat pada gambar 2.6. dan gambar 2.7, proses timbulnya GGL induksi pada generator dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Belitan tembaga pada gambar $BA(DC)$ berputar dibagian tengah magnet permanen N-S.
2. Pada bagian kedua ujung belitan telah dipasankan dengan cincin sikat (*slip ring*).
3. GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi yang akan menimbulkan arus dan tegangan (sebab baban tersambung pada generator) yang akan mengalir lewat sikat-sikat arang menuju beban yang sudah tersambung dengan generator.

Saat belitan $BA(DC)$ pada gambar 2.6 diputar ke arah kanan, satu bagian pada kumparan dari kutub yang berwarna merah telah bergerak menuju arah atas sedangkan bagian yang lain kumparan dari bagian kutub yang berwarna biru, bergerak menuju kearah bawah (perhatikan gambar 2.7). Belitan yang telah membuat garis gaya magnet yang makin sedikit, menyebabkan pada kedua bagian kumparan akan bangkitnya tegangan yang menjadi kecil. jika generator diberi beban, maka mengalirlah arus listrik yang lebih kecil mengitari pada bagian belitan bahkan mencapai posisi belitan vertikal dan arus akan hilang karena tegangan yang telah dihasilkan menjadi nol (dilihat gambar 2.7).

Pada posisi vertikal belitan tidak akan terjadi suatu perubahan pada garis gaya magnet maka tidak ada arus yang masuk pada belitan (gelombang listrik (AC) berada pada posisi no 1 pada gambar 2.7).

Apabila pada bagian belitan ini terus mengalami putaran hingga pada bagian merah akan berputar ke arah kanan (S) dan pada bagian biru akan berputar ke arah kiri (N). Pada bagian belitan akan terjadi perubahan pada garis gaya magnetnya dari garis minimum ke garis maksimum namun dengan arah yang berlawanan dari pada posisi semula (dapat dilihat pada gambar 2.7), maka setiap bagian kumparan akan menghasilkan tegangan yang maksimum (belitan yaitu pada keadaan horizontal dan gelombang pada posisi no 3).

Belitan akan bergerak, hingga bagian merah berputar terus ke arah bagian bawah dan bagian biru berputar ke arah atas. Pada waktu ini maka belitan akan berubah garis gaya magnetnya dari maksimum ke arah minimum. Maka tegangan yang dihasilkan pada belitan akan melemah bahkan sampai mendekati nol (pada posisi no 5).

Setelah itu pada bagian belitan $BA(DC)$ yang terus bergerak ke arah kutub utara (N) dan akan membalik arah gelombang yang dihasilkan (posisi no 6 dan 7). Jika pada bagian belitan yang terus bergerak sehingga belitan $BA(DC)$ akan balik ke posisi di atas sehingga gelombang tegangan yang dihasilkan berada pada (posisi no 8 dan 9). Proses tersebut menghasilkan gelombang (AC) dari adanya putaran belitan pada bagian medan magnet didalam kumparan jangkar akan menghasilkan gelombang tegangan.

Pada generator yang menghasilkan daya kapasitas kecil, medan magnet dapat diletakkan pada bagian stator yang sering disebut generator kutub eksternal karena GGL dibangkitkan pada belitan rotor. Bila hal tersebut dipakai pada generator yang menghasilkan daya kapasitas besar, maka akan timbulnya masalah pada cicin sikat dan karbon sikat. Untuk menyelesaikan masalah tersebut, sehingga generator yang menghasilkan daya kapasitas besar dipakai dengan menggunakan jenis generator dengan kutub internal dengan medan magnet dibangkitkan pada bagian kutub rotor dan tegangan (AC) dibangkitkan pada bagian stator. Tegangan keluarannya yaitu berbentuk sinusoidal apabila kerapatan fluks medan magnet pada celah udara tersalurkan secara sinusoidal dan bagian rotor digerakan dengan kecepatan yang konstan. Bagian yang berupa kumparan generator yang akan membangkitkan tegangan disebut juga dengan kumparan jangkar, sedangkan bagian berupa belitan generator yang akan membangkitkan medan magnet disebut juga dengan kumparan medan.

2.2.5 Generator sinkron Turbo

Konstruksi dari generator sinkron memiliki kesamaan dengan konstruksi pada mesin sinkron. Terdapat dua jenis struktur belitan pada mesin sinkron yaitu sebagai dasar kerja dari mesin itu sendiri yaitu belitan yang menghantarkan penguatan pada arus (DC) umumnya disebut sistem eksitasi dan pada belitan biasanya disebut jangkar sebagai munculnya GGL arus bolak-balik (AC).

Generator sinkron turbo yaitu generator dengan gaya putarannya dalam kondisi putaran yang tinggi seperti tubin.

2.2.6 Stator Sinkron

Stator sinkron pada generator adalah gulungan kawat konduktor yang telah disusun dengan rapi dan diposisikan pada alur-alur inti besi stator. Pada kawat konduktor itu merupakan area dibangkitkannya GGL induksi disebabkan gaya pada medan magnet berputar dari rotor yang memotong belitan penghantar stator.

Belitan tersebut terbagi atas tiga grup, yang menjadikan keluarannya 3 fasa, juga telah disambungkan dengan sistem bintang (Y). Inti besi pada bagian stator ini terdiri dari laminasi plat besi yang satu dan yang lainnya terisolasi dengan menggunakan vernis atau kertas isolasi (*implegnated paper*). Fungsi dari laminasi itu yaitu mengurangi besarnya pada arus pusar (*Eddy Current*), sebab pada arus pusar tersebut telah menghasilkan panas pada inti stator dan biasanya sering menimbulkan berkurangnya tahana terhadap sistem isolasi belitan penghantar.

2.2.7 Rotor Sinkron

Rotor pada generator adalah sebagai area untuk memposisikan belitan medan magnet eksitasi. Belitan medan magnet telah disusun pada alur-alur yang ada pada bagian inti besi rotor, apabila jika pada belitan tersebut disalurkan dengan menggunakan arus searah (*DC*) maka akan menghasilkan dan membentuk kutub utara dan kutub selatan.

Pada bagian medan rotor yang dipakai sangat bergantung pada kecepatan mesin yang dipakai, mesin yang memiliki kecepatan sangat tinggi seperti turbo generator memiliki bentuk yaitu silinder. Pada mesin-mesin pembangkit energi listrik umumnya dipakai dengan putaran tinggi seperti pembangkit *thermal*, kutub magnet nya memiliki bentuk yaitu silindris. Biasanya jumlah kutub magnetnya pada mesin putaran tinggi yaitu sebanyak 2 buah kutub magnet atau 4 buah kutub.

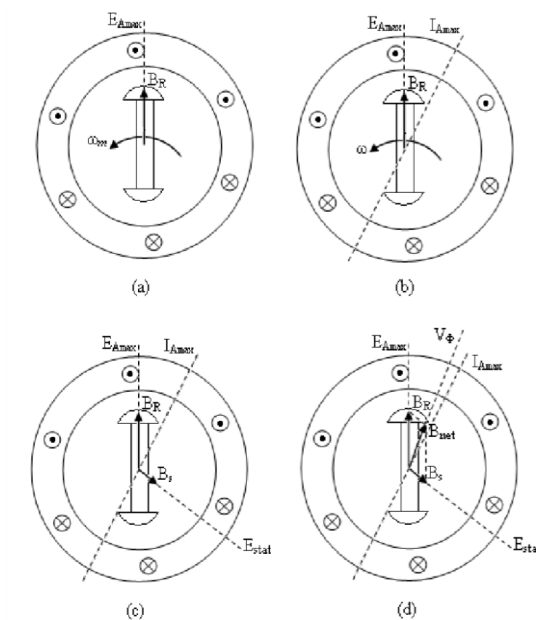
Yang sudah diketahui oleh umum untuk mengolah kutub magnet pada bagian rotor adalah dengan sistem elektromagnetik yaitu dengan dialirkannya arus listrik searah (DC) pada bagian belitan. Untuk mengalirkan arus listrik tersebut yang biasanya disebut eksitasi pada rotor dapat dilakukan dengan media "*Slip Ring*" atau juga dapat dengan langsung melalui poros dari mesin eksitasi menggunakan sistem penyearah.

Dari timbulnya arus eksitasi tersebut pada rotor dapat menghasilkan arus pusar (*eddy current*), sehingga bagian rotor tersebut membutuhkan proses pendinginan. Pada proses pendinginan rotor generator yaitu menggunakan cara menyalurkan udara pada rongga-rongga dibagian sisi belitan dan harus melakukan sistem pendinginan pada bagian stator.

Supaya dapat bersirkulasi media pendingin pada bagian rotor dan stator, sehingga bagian rotor generator dipasangkan berupa baling-baling sebagai blower untuk proses pendinginannya.

2.2.8 Reaksi Jangkar

Bila generator sinkron (alternator) melayani beban yang terhubung ke terminal generator maka pada belitan stator akan mengalir arus, sehingga timbul medan magnet pada belitan stator yang akan berinteraksi dengan medan rotor. Medan magnet ini akan mendistorsi medan magnet yang dihasilkan belitan rotor sehingga menghasilkan fluks resultan. Seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.8 :



Gambar 2.8 Model Reaksi Jangkar

Pada Gambar 2.8.a Medan magnet yang berputar akan menghasilkan tegangan induksi E_a . Bila generator melayani beban dengan induktif, maka arus pada stator akan tertinggal seperti pada Gambar 2.8.b. Arus stator tadi akan menghasilkan medan magnet sendiri B_s dan tegangan stator E_{stat} seperti pada Gambar 2.8.c. Vektor penjumlahan antara B_s dan B_R akan menjadi B_{net} dan penjumlahan E_{stat} dan E_a , akan menghasilkan ϕ , V pada terminal jangkar.

Saat beban terhubung ke beban induktif, arus jangkar akan tertinggal terhadap tegangan jangkar. Arus pada belitan stator akan menghasilkan medan magnet B , yang kemudian akan menghasilkan tegangan stator E_{stat} . Dua tegangan yaitu tegangan jangkar E_a dan tegangan reaksi jangkar E_{stat} akan menghasilkan V_t dimana ditunjukkan pada persamaan (2.14)

$$V_t = E_a + E_{stat} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\text{Tegangan Reaksi Jangkar } E_{stat} = -j X I_a$$

Sehingga persamaan 2.14 dapat ditulis kembali pada persamaan (2.2).

$$V_t = E_a - jX I_a \dots\dots\dots(2.2)$$

Selain pengaruh reaksi jangkar ini, pengurangan tegangan induksi generator sinkron juga karena adanya tahanan R_a dan Induktansi belitan stator X_a , dan penjumlahan X dan X_a sering disebut Reaktansi Sinkron X_s , sehingga persamaan (2.2) dapat ditulis kembali sebagai persamaan (2.3).

$$V_t = E_a - jX I_a - jX_a I_a - I_a R_a \dots\dots\dots(2.3)$$

Lalu menjadi persamaan (2.4)

$$V_t = E_a - jX_s I_a - I_a R_a \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

V_t = Tegangan terminal jangkar

R_a = Tahanan Jangkar

E_a = Tegangan Jangkar

B_s = Medan Magnet Stator

E_{stat} = Tegangan Reaksi Jangkar

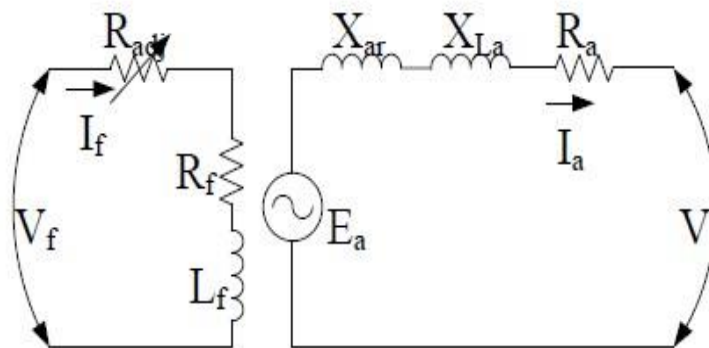
B_R = Medan Magnet Rotor

X_s = Reaktansi Sinkron

I_a = Arus Jangkar

2.2.9 Rangkaian Ekivalen

Stator terdiri dari belitan-belitan. Suatu belitan konduktor akan terdiri dari tahanan R_a dan induktansi X_{ta} maka rangkaian ekivalen suatu generator sinkron dapat dibuat seperti Gambar 2.9



Gambar 2.9 Rangkaian ekivalen generator sinkron

Dengan melihat Gambar 2.9 maka tegangan generator sinkron dapat ditulis pada persamaan (2.18).

$$E_a = V + jX_{ar} I_a + jX_{La} I_a + R_a I_a \dots\dots\dots(2.5)$$

Dan persamaan terminal generator sinkron dapat ditulis pada persamaan (2.6)

$$V_t = E_a - jX_{ar} I_a - jX_{La} I_a - R_a I_a \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron, atau $X_s = X_{ar} + X_{La}$, maka menjadi persamaan (2.7).

$$V_t = E_a - jX_s I_a - R_a I_a \text{ [Volt]} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

V_t = Tegangan Terminal

I_a = Arus Jangkar

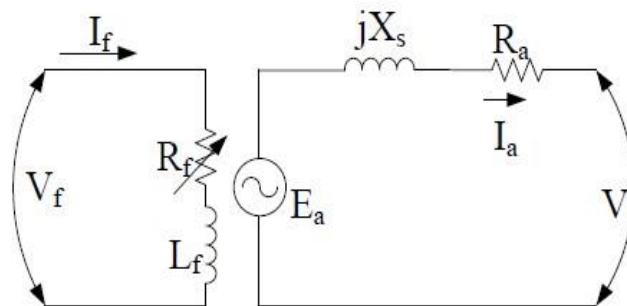
E_a = Tegangan Induksi

R_a = Tahanan Jangkar

X_s = Reaktansi Sinkron

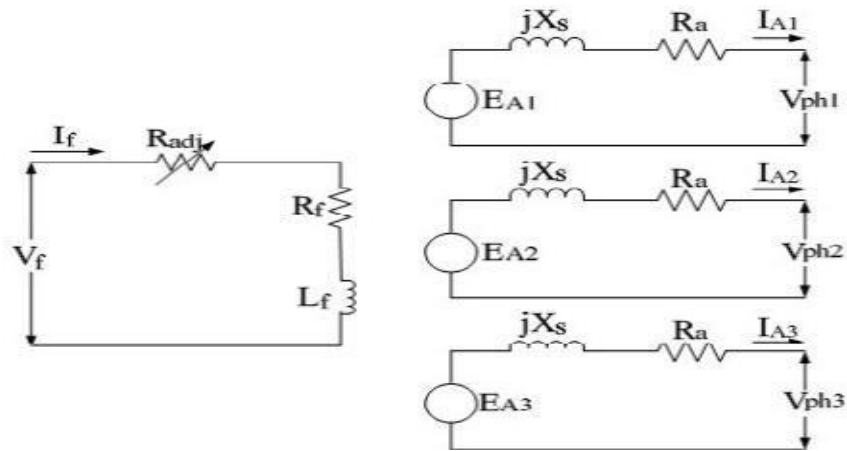
X_{ar} = Reaktansi Jangkar

X_{La} = Reaktansi Fluks Bocor



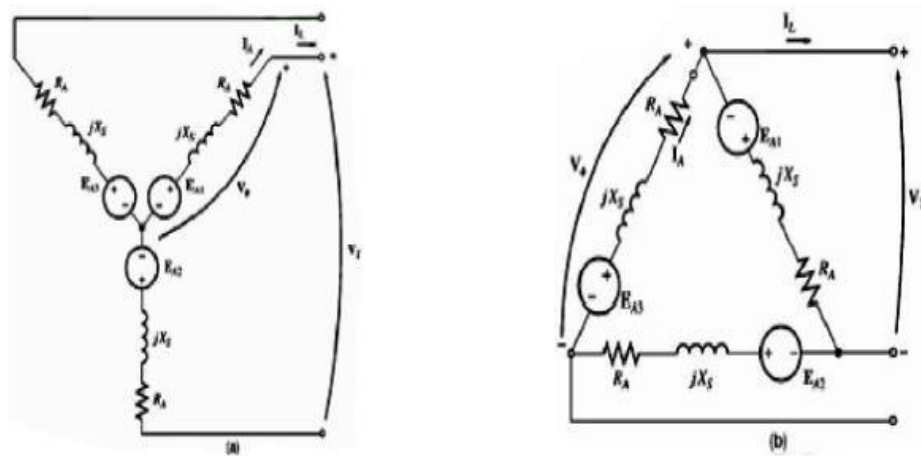
Gambar 2.10 Penyederhanaan rangkaian ekuivalen generator sinkron

Karena tegangan yang dibangkitkan oleh generator sinkron adalah tegangan bolak-balik tiga fasa maka gambar yang menunjukkan hubungan tegangan induksi perfasa dengan tegangan terminal generator akan ditunjukkan pada Gambar 2.11 berikut:



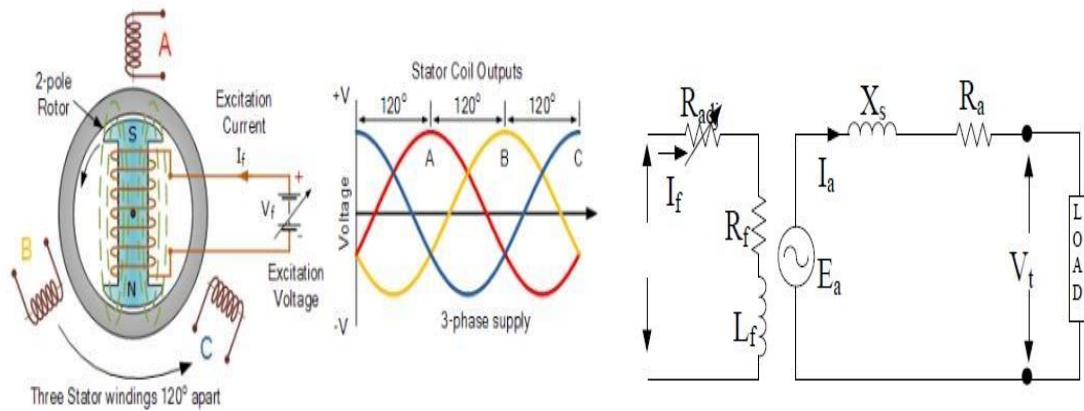
Gambar 2.11 Rangkaian ekivalen generator sinkron 3 fasa

Sementara itu, rangkaian ekivalen generator sinkron tiga fasa untuk tiap jenis hubungan ditunjukkan oleh Gambar 2.12 berikut ini:



Gambar 2.12 Rangkaian ekivalen belitan stator generator sinkron 3 fasa (a). Belitan-Y, (b). Belitan-Δ

2.2.10 Pengaturan Tegangan Terminal



Gambar 2.13 Prinsip Kerja Generator sinkron 3 fasa

Dimana tegangan terminal dituntut untuk bekerja stabil dalam sistem. Seiring perubahan beban maka akan mengalir arus beban (I_a) yg berubah-ubah sesuai dengan perubahan beban. Yang berpengaruh pada tahanan (R_a) dan reaktansi sinkron (X_s) atau yang disebut dengan impedansi sinkron (Z_s). arus beban akan merubah harga tegangan induksi jangkar (E_a) sesuai dengan persamaan (2.8) yaitu $V_t = E_a - I_a (R_a + jX_s)$. oleh sebab itu untuk menjaga

tegangan terminal agar tetap stabil seiring dengan perubahan arus beban yaitu dengan mengatur tegangan induksinya (E_a). dimana tegangan induksi seperti persamaan (2.13) dimana $E_a = Cn\Phi$ pada beban nol. Sehingga untuk mengatur tegangan induksi dilakukan dengan mengatur jumlah putaran (n) dan fluksi magnetik (Φ).

Pengaturan jumlah putaran mengakibatkan Penggerak mula (*Prime Mover*). karena kecepatan putaran rotor diputar dengan menggunakan energi

mekanis yang berasal dari penggerak mula. Penggerak mula dioperasikan dengan menggunakan energi primer (E_p) dan energi sekunder (E_s) yang berhubungan dengan bahan bakar.

Sedangkan pengaturan fluksi magnetik berdasarkan eksitasi yang diberikan. Yaitu dengan memberikan tegangan (DC) (V_f) pada kumparan medan. Pada rangkaian tertutup akan mengalir arus (DC) (I_f). Arus (DC) yang mengalir pada kumparan medan akan menimbulkan medan magnet (B) yang menghasilkan fluksi yang besarnya sama terhadap waktu. Ketika rotor diputar oleh penggerak mula maka fluks akan ikut berputar sehingga akan timbul medan putar yang akan memotong kumparan jangkar sehingga dihasilkan ggl induksi pada kumparan stator akibat adanya peristiwa induksi elektromagnetik.

2.2.11 Rugi-Rugi Generator Sinkron

Rugi-rugi yang terdapat pada generator sinkron dibagi menjadi beberapa bagian diantaranya :

1. Rugi-rugi tembaga rotor dan stator (*copper losses*)
2. Rugi-rugi inti (*core losses*)
3. Rugi-rugi mekanik (*mechanical losses*)
4. Rugi-rugi nyasar (*stray losses*)

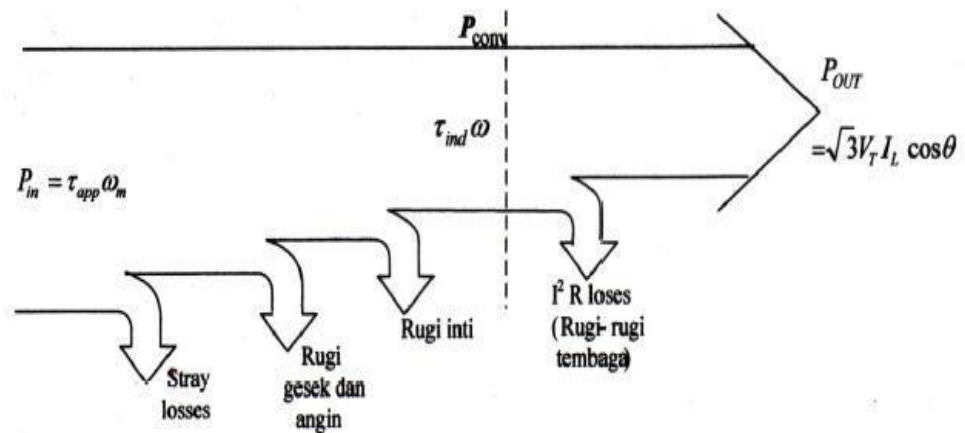
Rugi-rugi angin dan gesekan dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk dari bagian yang berputar, rancangan sudu kipas rotor, desain bantalan (*bearing*) dan

susunan rumah (*housing*) mesin. Rugi yang hilang tersebut berupa daya yang diperlukan untuk memutar kipas guna mensirkulasi udara pendingin dan gesekan bantalan dan sikat.

Rugi-rugi inti dan besi (P_i) disebabkan oleh fluksi utama mesin dan terjadi terutama pada gigi-gigi stator (jangkar), pada bagian inti jangkar dekat gigi-gigi stator dan pada permukaan kutub rotor. Inti stator umumnya dibentuk dari laminasi tipis baja silikon yang terisolasi satu sama lain untuk membatasi rugi-rugi *hysteresis* dan arus *eddy* pada baja.

Rugi-rugi mekanik dan inti sering digabung bersama yang disebut dengan rugi-rugi beban nol pada mesin. Pada keadaan beban nol, daya input mesin digunakan untuk mengatasi rugi-rugi ini. Oleh karena itu pengukuran daya input stator.

Rugi-rugi tembaga rotor ($P_{RLC} = I_f^2 \cdot R_f$) dihitung dari arus medan dan 0 tahanan arus searah dari kumparan penguat pada suhu 75° C. Jatuh tegangan pada cincin kolektor sikat umumnya diabaikan, tapi bisa juga disertakan dalam rugi2 rugi penguat. Rugi-rugi tembaga kumparan jangkar ($P_{SCL} = 3I_A^2 \cdot R_A$) pada umumnya dihitung dari tahanan arus searah kumparan jangkar pada suhu 75°



Gambar 2.14 Diagram Aliran daya Generator sinkron

Dari gambar 2.25 dapat dilihat bahwa persamaan (2.8) di bawah ini:

$$P_{out} = \sqrt{3} x V_t x I_L x \cos \varphi \dots \dots (2.8)$$

Maka semakin baik faktor daya yang dihasilkan maka daya out put juga semakin besar, dengan kata lain rugi – rugi yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Maka dari Persamaan 2.39 dapat disimpulkan semakin baik faktor daya, maka efisiensi yang dihasilkan juga semakin baik.

2.2.12 Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi adalah membrikan aliran arus listrik yang bertujuan untuk mengolah kutub magnet pada generator. Dengan cara pengaturan pada besar dan kecilnya arus listrik tersebut, maka dapat mengatur berapa tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator atau dengan cara mengatur pada besarnya daya reaktif

yang akan diatur pada generator yang dalam sistem paralel pada sistem jaringan besar (*infinite bus*).

Ada dua jenis system eksitasi yaitu :

1. Sistem Eksitasi Statik
2. Sistem Eksitasi Dinamik

2.2.12.1 Sistem Eksitasi Statik

Sistem Eksitasi Statik yaitu sistem eksitasi pada generator yang disalurkan dari eksiter pada mesin tidak bergerak, yaitu dari sistem penyearah yang disuplai dari hasil keluaran dari generator itu sendiri atau dengan sumber lain yaitu dari trafo. Dengan prinsip sebagai berikut :

Dari saluran daya listrik untuk eksitasi yaitu mengambil dari keluaran generator dengan *excitation transformer*, berikutnya arus akan disearahkan dengan *power rectifier* dan akan disalurkan pada bagian rotor generator yaitu untuk eksitasi dengan melalui sikat arang.

Pada pengaturan besaran tegangan keluaran generator akan diatur dengan (DC) regulator dan juga (AC) regulator, sehingga hasil arus eksitasi akan dapat diatur sesuai keinginan. Kemudian jika generator tersebut pada saat akan melakukan waktu start awal maka tegangan tidak akan keluar, sehingga untuk menyalurkan arus eksitasi biasanya digunakan daya berupa baterai

2.2.12.2 Sistem Eksitasi Dinamik

Sistem Eksitasi Dinamik yaitu sebuah sistem eksitasi yang sumbernya disalurkan oleh arus eksitasi diambil dari mesin yang dapat bergerak, mesin bergerak tersebut biasanya disebut *Eksiter*. *Eksiter* tersebut digunakan untuk penggerak yang akan dipasang satu poros pada generator.

Seperti yang sudah diketahui pada umumnya bahwa pada arus eksitasi adalah arus yang nya searah, maka eksiter yang digunakan adalah mesin dengan arus searah (generator (DC)) atau bisa juga dengan menggunakan mesin yang nya arus bolak-balik (generator (AC)) tetapi akan disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*.

Sistem eksitasi yang menggunakan *eksiter* generator (DC) untuk menyuplai arus eksitasi pada generator utama yaitu menggunakan media sikat arang dan slip ring serta keluaran arus searah dari generator (DC) *eksiter* akan melalui sikat arang. Dilihat dari segi pemeliharaan sistem ini kurang baik, dengan sistem “*Brushless Excitation*” yaitu sistem tanpa sikat dapat lebih baik karena ini adalah perkembangan dari sistem dengan menggunakan sikat.

2.2.13 Fungsi Dan Prinsip Kerja Peralatan Bantu Generator

2.2.13.1 Sistem Pendingin Generator

A. Fungsi Pendingin

Panas yang telah dihasilkan oleh generator disebabkan oleh adanya rugi besi dan juga rugi tembaga. Rugi tembaga yaitu panas yang dihasilkan oleh adanya arus

dari proses pembebanan yang telah mengalir pada penghantar berupa tembaga stator dan juga rotor yang daya keluarannya dapat dihitung dengan $I^2.R$.

Sedangkan rugi besi adalah kerugian yang dihasilkan oleh adanya panas yang telah ditimbulkan dengan adanya arus pusar (*eddy current*) pada inti bagian stator ataupun rotor. Selain panas yang telah dihasilkan oleh hal tersebut diatas, juga dapat dihasilkan panas dari gesekan dan angin.

Timbulnya panas yang dihasilkan dari seperti yang telah diterangkan diatas pada generator perlu adanya cara untuk pencegahan, karena dengan adanya panas yang berlebih itu maka mengakibatkan kerusakan pada sistem isolasi penghantar hingga juga dapat terbakar, oleh sebab itu proses pendinginan harus dilakukan. Kerugian yang akan menimbulkan penyebab panas tersebut harus diminimalisir sehingga tidak akan lebih dari 2% dari keluaran pada generator.

B. Media Pendingin

Menghilangkan panas yang ditimbulkan oleh generator yang sedang dijalankan dapat digunakan cara media pendingin. Jenis media pendingin yang biasa digunakan yaitu :

1. Udara
2. Gas Hidrogen
3. Air

Secara alami, semakin besar kapasitas generator yang digunakan maka akan menghasilkan panas yang semakin besar pula. Media pendingin yang paling efektif digunakan adalah media air, tetapi media air biasanya banyak masalah yang akan

ditangani, disamping dengan biayanya yang relatif lebih mahal pemeliharaannya juga terbilang lebih rumit, maka generator yang media pendinginnya yaitu pada bagian stator dan rotor menggunakan media hidrogen.

1. Kerapatannya cukup besar
2. Daya hantaran panas rendah
3. Koefisien perpindahan panas rendah
4. Kebersihannya kurang

Pendinginan dengan menggunakan media udara juga terbatas pada generator yang berkapasitas lebih kecil atau digunakan pada mesin *exciter*. Kemudian untuk generator yang menghasilkan kapasitas lebih besar, penanganan yang terbilang sederhana tetapi bukan berarti penanganan yang paling mudah, dan lebih efektif dalam penyerapan panasnya dibandingkan dengan menggunakan media udara adalah dengan menggunakan media gas hidrogen.

2.2.13.2 Sistem Pendingin Eksiter

Eksiter sebagai bagian dari pendukung operasi generator yang berperan memberikan pasok sumber arus searah untuk eksitasi generator utama. Seperti kita ketahui bahwa setiap generator sistem eksitasinya belum tentu sama, ada yang sistem statik dan ada juga sistem dinamik.

Pada sistem eksitasi dinamik, eksiternya merupakan mesin yang berputar seporos dengan generator utama, yang sistem pendinginannya terpisah dengan generator. Karena panas yang timbul pada eksiter tidak terlalu besar, maka pada umumnya sistem pendinginan eksiter cukup dengan media udara

2.2.13.3 Sistem Pentanahan (*Grounding system*)

Sistem pentanahan atau juga disebut sistem *grounding* generator adalah sistem sambungan bintang sistem 3 (tiga) fasa yang memiliki titik netralnya yang telah dihubungkan dengan tanah (bumi). Bertujuan untuk siklus yang tertutup arus hubung langsung ke tanah dan sistem proteksi.

Pentanahan (*grounding*) pada titik netral generator biasanya yaitu jenis pentanahan tidak langsung yaitu pada penghantar tanah tersebut dihubungkan dengan Transformator Pentanahan (NGT = *Netral Grounding Transformer*) dan juga akan dihubungkan secara paralel dengan Tahanan (NGR = *Neutral Grounding Resistance*).

2.2.14 Efek Roda Gila (*Flywheel*)

Generator perlu direncanakan sesuai dengan efek roda gila (*flywheel effect*) GD^2 untuk turbin air. Nilai GD^2 dari generator yang direncanakan secara ekonomis disebut GD^2 normal dari generator. Sekalipun GD^2 normal, tergantung kepada perhitungan perencana, bahan dan metoda perencanaan, agak berbeda, ada kecenderungan untuk menggunakan rumus :

$$GD^2_{\text{normal}} = \frac{132 \times (kVA)^{\frac{4}{5}}}{n^{2,15}} (\text{tm}^2)$$

di mana n = kecepatan putar (rpm) bila GD^2 dipilih lebih besar dari pada GD^2 normal dibutuhkan oleh turbin air, maka berat generator bertambah.

$$W = 10 \times \left(\frac{kVA}{n} \right)^{\frac{5}{7}} (t)$$

2.2.15 Isolator

Sistem isolasi generator menggabungkan beberapa material berbeda untuk memproteksi lilitan medan dan lilitan stator, sehingga bagian utama sistem melibatkan banyak pengujian untuk mendapatkan batasan – batasan isolasi. Ini meliputi kekuatan dielektrik yang telah berhasil dengan menggunakan mika dalam bermacam – macam bentuk. Generator yang disusun dengan isolasi lilitan asphalt-mika

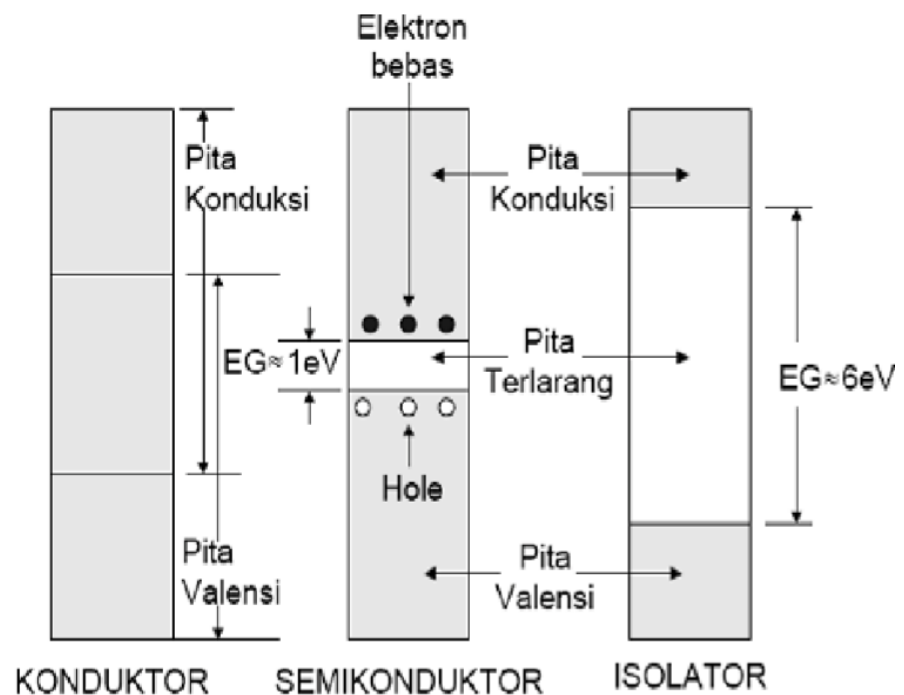
mempunyai sejarah dapat menyerap kelembaban yang dalam beberapa kasus membutuhkan pengeringan lilitan untuk mendapatkan level resistansi isolasi yang memuaskan. Sekarang lilitan menggunakan isolasi.

epoxy-mica karena mempunyai kekuatan mekanik dan kedap terhadap air, oli atau kontaminasi lain terhadap isolasi, yang ditimbulkan selama kondisi abnormal.

Kualitas isolasi merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhatikan dalam melakukan suatu perbaikan *rewinding* (melilit ulang) ataupun *reinsulation* (melapis ulang isolasi). Pengujian tegangan tinggi pada isolasi belitan adalah salah satu cara untuk mengetahui arus bocor yang terjadi. Pengujian tegangan tinggi pada isolasi belitan, menunjukkan kualitas isolasi terhadap tegangan kerja yang akan diterima oleh belitan tersebut.

Besarnya nilai arus bocor yang muncul pada saat pengujian, menjadi indikasi ketahanan kualitas isolasi terhadap tegangan tinggi. $\tan \delta$ atau faktor disipasi juga merupakan salah satu indikasi yang menunjukkan karakteristik ketahanan isolasi. $\tan \delta$ akan berpengaruh pada rugi daya yang disebabkan oleh

besarnya daya reaktif yang timbul dikarenakan nilai $\tan \delta$ yang tinggi. Selain itu, pengukuran tahanan isolasi juga perlu dilakukan untuk mengetahui kondisi belitan sebelum dan sesudah dilakukan pengujian tegangan tinggi, karena pengujian tegangan tinggi yang bersifat merusak, maka pengukuran tahanan isolasi sesudahnya pun perlu dilakukan.



Gambar 2.15 Celah energi pada bahan

2.2.16 Bahan isolasi

Bahan isolasi atau bahan isolator sangat berbeda aslinya dan kekayaan, mereka adalah sangat utama mono metalik, adalah tidak tersusun teratur atau organik, seragam atau heterogen di komposisi, alami atau buatan. Banyak di antara mereka dari asal alami sebagai contoh, menutupi dengan kertas, kain, mika dan lilin lilin.

1. Kekayaan bahan isolasi elektrik.

Ada banyak kekayaan yang menentukan pantas tidaknya suatu material untuk penggunaan sebagai suatu bahan isolasi. daya hambat atau hambat spesifik, tegangan atau kekuatan elektrik, histeresis dielektrik dan keuletan. suatu bahan isolasi ideal perlu mempunyai:

(i) . kekuatan Dielectric tinggi, menopang pada temperatur diangkat

(ii) . Resitivitas tinggi atau hambat spesifik

(iii) . Histeresis dielektrik rendah.

(iv) . Keterhantaran termal baik

(v) . Derajat tinggi stabilitas yang berkenaan dengan panas i.e.it mestinya tidak memburuk pada tinggi temperatur,

Sungguh sial, kekayaan bahan isolasi yang elektrik sangat luas dengan banyak faktor, termasuk:

- a. Dimensi potongan tes.
- b. r.m.s. format gelombang dan prekuensi tentang voltase,
- c. mekanik memaksa pada potongan tes.

Data yang diperoleh oleh laboratorium menguji pada spesimen mungkin diambil nilai khas dan suatu faktor keamanan tinggi harus selalu disiapkan dalam bentuk sekatan elektrik.

2.2.17 Tahanan Isolasi

Jika tegangan (DC) diberikan isolator yang terbuat dari bahan polimer, arus listrik lewat melalui bagian dalam dan permukaannya. Perbandingan tegangan (DC) yang diberikan dan arus listrik total disebut tahanan isolasi, antara tegangan dengan arus listrik dalam (arus volume) disebut tahanan volume, dan antara tegangan dengan arus permukaan disebut tahanan permukaan. Selanjutnya, tahanan volume per satuan tebal dan per satuan luas disebut ketahanan volume (Ω cm), sedangkan tahanan permukaan per satuan jarak permukaan, yaitu satuan panjang dari elektroda disebut ketahanan permukaan (Ω).

2.2.18 Isolasi Belitan Stator

Fungsi utama dari isolasi adalah untuk memisahkan konduktor dari inti stator sehingga memungkinkan terjadinya perbedaan tegangan antara konduktor dari inti stator. Material yang biasa digunakan untuk isolasi adalah k(AC)a dan mika yang memiliki sifat isolasi elektrik yang bagus tetapi tidak bagus dalam sifat mekanik. K(AC)a dan mika cenderung pecah ketika terjadi vibrasi pada motor. Untuk mengurangi stres mekanik pada isolasi, biasanya digunakan *tape* dengan bahan campuran organik. Bahan organik yang sering digunakan seperti aspal, polyester, dan epoksi.

2.2.19 Temperatur bahan isolasi dan Kenaikan

Tiap-Tiap mesin elektrik adalah suatu kuasa yang *counverting* alat. Kemampuan suatu alat generator ke dalam daya listrik, suatu motor daya listrik,

suatu motor menyalurkan daya listrik ke dalam gaya mekanis dan yang trafo menyalurkan daya listrik pada voltase ke daya listrik pada voltase yang lain .
Selama

proses kerugian ini di dalam energi untai elektrik dan di dalam porsi untai magnetik yang membawa berm(AC)am-m(AC)am perubahan terus menerus. kerugian terjadi di dalam onderdil mesin yang diperlakukan ke friksi mesin.

Kerugian diproduksi didalam mesin diubah jadi energi, sebagai hasil yang mana berbagai komponen dari mesin tadi, yaitu temperatur mereka naik di atas yang melingkup.

Dalam rangka memastikan operasi yang memuaskan dan dapat dipercaya mesin elektrik, pemanasan tiap-tiap komponen harus dikendalikan di dalam definite tertentu membatasi. Kerugian suatu mesin elektrik menjadi arti penting bukan sebab mereka suatu sumber *inficiency*, tetapi, karena di antara mereka mengakibatkan temperatur naik. Kenaikan ini di dalam temeperatur mempengaruhi bahan isolasi dikeluarkan mengisolasikan lilitan dari besi komponen, adalah penting pada temperatur kecil.

Seperti dinyatakan diatas, masing-masing bahan isolasi mempunyai suatu batas suhu yang diijinkan tertentu, mungkin beroperasi dapat dipercaya untuk suatu periode yang cukup lama dengan operasi mesin. Kita dapat mempertimbangkan contoh untuk menggambarkan pentingnya temperatur naik.

Langsung kelas A suatu bahan isolasi dapat dinyatakan oleh suatu hubungan empiris,

$$T_{ufe} = 72 \times 10^3 \exp[-0,09 Q]$$

Dimana :

T_{ufe} = hidup bahan isolasi didalam tahun

θ = suhu maksimum dimana material dapat diperlakukan, 0°

Mesin yang sempit di atas temperatur bisa diijinkan yang maksimum, dengan serius mempengaruhi hidup bahan isolasi. Seperti operasi mesin tergantung atas kondisi isolasi, adalah jelas bahwa bahan isolasi harus dikerjakan di dalam temperatur.

Sebagai tambahan terhadap mempengaruhi isolasi, kenaikan temperatur berlebihan boleh juga dengan kurang baik mempengaruhi mekanik yang beroperasi kondisi-kondisi onderdil mesin ditentukan. Begitu, sebagai contoh, pergantian aliran listrik boleh hilangkan dimensi yang aslinya atau sambungan yang solderan antara comutator dan lilitan boleh membuka ke luar bearing, boleh pecah, roboh. Bagaimanapun masalah ini apakah di bawah pelengkap secara relatif dan dapat dipecahkan dengan perancangan mesin dengan baik dan beroperasi di bawah kondisi-kondisi benar.

Tidak mengikuti dari atas masalah isolasi atau mekanik yang lain dan permasalahan elektrik yang diciptakan oleh temperatur naik, berada didalam beroperasi mesin dengan temperatur rendah naik.

Panas memproduksi suatu mesin tergantung atas kerugian hanyalah kehadiran udara berkenaan dengan lingkungan, suatu pendingin atau suatu ventilasi

sistem cenderung untuk menyingkirkan panas ketika memproduksi. Temperatur naik benar-benar memperoleh tergantung atas hubungan antara kondisi-kondisi pendingin dan jumlah panas produksi.

Temperatur naik di suatu mesin dapat dijaga di dalam batas aman dengan baik merancang sistem ventilasinya. suatu yang lebih tinggi keluaran dapat mengambil dari bingkai mesin ditentukan dengan mempunyai suatu yang baik ventilasi sistem dan bahan isolasi yang sesuai.

Di tahun terakhir masalah ini sudah memperoleh suatu arti penting dalam hubungan dengan identifikasi mesin dan banyak perhatian telah dibayarkan kepada output untuk beban material yang ditentukan oleh peningkatan di ventilasi yang menentang kekayaan bahan isolasi.

2.2.20 Klasifikasi bahan isolasi

klasifikasi bahan isolasi untuk piranti dan permesinan elektrik dalam hubungan dengan stabilitas yang berkenaan dengan panas mereka tidak disampaikan dalam penerbitan india standard. 1271-1958. klasifikasi. kelas bahan isolasi dan temperatur yang ditugaskan kepada mereka sebagai berikut:

Tabel 2.2 kelas dan temperatur bahan isolasi

Kelas	Temperatur
Y (formely 0)	90 ⁰ C
A	105 ⁰ C
E	120 ⁰ C

B	130 ⁰ C
F	155 ⁰ C
H	180 ⁰ C
G	diatas 180 ⁰ C

Kelas material mempunyai suatu temperatur yang membatasi lebih rendah dari kelas Y, bukanlah tercakup di penggolongan ini. Karena material runtuh kelas tidaklah secara luas digunakan sebagai isolasi untuk lilitan mesin, trafo atau switchgear. Isolasi mungkin dikelompokkan ke dalam kelas berikut

- Kelas Y.

Isolasi ini terdiri dari kombinasi atau material-material, seperti kapas, sutera dan kertas tanpa, material lain Kombinasi material dapat tercakup di kelas ini, jika oleh pengalaman atau menerima test mereka dapat menunjukkan untuk menjadi mampu operasi pada kelasA suatu temperature

1. Kelas A

Isolasi ini terdiri dari kombinasi atau material, seperti kapas, sutera dan kertas ketika dipenuhi terbenam di dalam suatu cairan dielektrikan seperti minyak. kombinasi atau Material lain mungkin tercakup di kelas ini, jika oleh pengalaman atau menerima test yang mereka dapat menunjukkan untuk menjadi operasi pada kelas A suatu temperatur.

2. Kelas E.

Isolasi ini terdiri dari kombinasi atau material material yang oleh pengalaman atau menerima test dapat ditunjukkan untuk menjadi mampu operasi pada kelas E temperatur.

3. Kelas F.

Isolasi ini terdiri dari kombinasi atau material, seperti mika, serabut kaca, asbes, dll, dengan mengikat pantas baik seperti kombinasi atau material lain, tidak harus tidak tersusun teratur, yang menerima test dapat ditunjukkan untuk menjadi mampu operasi pada kelas F temperatur material memiliki suatu derajat tingkat stabilitas yang berkenaan dengan panas yang membiarkan mereka untuk dioperasikan pada suatu temperatur 250C yang lebih tinggi dibanding kelas B material.

4. Kelas H.

Isolasi ini terdiri dari material, seperti silium dan kombinasi material seperti mika, serat kaca, asbes, dll, dengan unsur mengikat pantas, seperti damar silium sesuai. kombinasi atau Material material lain mungkin tercakup di kelas ini, jika oleh pengalaman atau menerima test mereka dapat ditunjukkan untuk menjadi mampu operasi pada kelas H temperatur.

5. Kelas G.

Isolasi ini terdiri dari kombinasi atau material material seperti, mika, porselin, kwarsa dan kaca dengan atau tanpa suatu binder tidak tersusun teratur. kombinasi atau Material material lain mungkin tercakup di kelas, jika oleh

pengalaman atau menerima test mereka dapat ditunjukkan untuk menjadi mampu operasi pada temperatur di atas kelas H material limit. spesipik. Atau kombinasi material di kelas ini mempunyai suatu temperatur membatasi yang mana independe atas phisik mereka, kekayaan elektrik dan kimia.

2.2.21 Isolasi bahan listrik yang digunakan pada mesin listrik modern

a. Mika.

Digunakan dalam status lembar atau format pertamanya sukar untuk dikerjakan. Oleh karena itu, gunakan dalam lembaran tipis dengan, aspal atau Sintetik atau polyester.

b. Mikfolium.

Merupakan suatu pembungkus terdiri dari mika tipis yang akan dilapisi dengan kertas dan kering karena udara.

c. Kaca berserat.

dibuat dari material yang mana logam alkali oksida cuma-cuma boleh membentuk suatu permukaan mantel yang boleh menyerang silikat kaca.

d. Asbes

Material ini dengan mesin lemah, bahkan ketika ditenun dengan serat katun, adalah suatu bahan isolasi lebih miskin sebagai gelas serat.

e. Serat katun.

serabut Kapas menenun dari kapas, baru-baru ini dikembangkan, mempunyai perlawanan luar biasa, angkat sedikit higroskopik kemudian kapas biasa materias.

f. Polyamiides

Dalam wujud tape nilon mempunyai kekuatan mekanis tinggi dan mempunyai suatu yang baik ruang aktor oleh karenanylon film mereka adalah pada minoritas film plastik yang mempunyai perlawanan cukup ke temperatur dan kaleng yang menyobek.

1. Damar buatan

Cat buatan ini meyangkut plastik atau nilon jenis mempunyai suatu penghabisan yang lembut sempurna dan telah digunakan untuk banyak lilitan, dengan peningkatan didalam panjang dan berarti putaran. Mereka juga memberi yang baik bersetuju untuk - lilitan.lapisan slot Material.

2. Kayu

Tentang damar buatan format memenuhi laminasi kompres, telah membuktikan untuk menjadi sempurna dan material untuk pengepakan blok, coll mendukung dan pengatur jara.

3. Silikon

Setengah material tidak tersusun teratur dengan suatu struktur dasar atom oksigen dan helium pengubah. Mereka sangat berlawanan. Mereka bertindak bindersin class H isolasi dan surat ijin mereka bersambung operasi pada 180 °C.

4. Resin Epoxy

Material sangat penting karena mempunyai daya rekat yang hebat dan bisa digunakan untuk vanish terutama untuk trafo yang kecil

5. Minyak yang berasal dari mineral oil

Banyak digunakan didalam mendinginkan isolasi trafo, karakteristik arti penting adalah sifat kimia yang stabil, tahan terhadap karat, kekentalannya adalah kekuatan elektris adalah yang paling baik , bersih kedap air.

6. Askarels

adalah bahan sintetik dengan cairan isolasi yang tidak mudah terbakar ketika di campur dengan listrik bukan cairan insuling mudah terbakar, secara umum askarel ukurannya adalah 60/40, dari *Hexachlorodiphenyl trichlorovenzine* akan memberikan titik cair yang rendah dan kekentalan yang baik/ untuk untuk karakteristik panas.

2.2.22 Aplikasi bahan isolasi

Kita akan memilih beberapa material penting di dalam penggunaan umum dipiranti dan mesin elektrik, seperti yang dilakukan untuk isolasi.

- A. Memasang kawat untuk coil yang magnetis dan lilitan mesin
- B. Laminasi
- C. Trafo dan Mesin.
 - a. Bahan isolasi untuk kawat.

Kawat bulat kecil digunakan didalam mahabesar uantas untuk oli instrumen, piranti electromagnetis dan mesin elektrik. utama Kebutuhan dari bahan isolasi untuk digunakan di dalam kasus ini adalah fleksibilitas, yang kepunyaan kamu, kecepatan aplikasi, kemampuan ke withstand menekankan dan tindakan abrasive

sepanjang proses lilitan, material di dalam penggunaan umum adalah alam kelas A mencakup.

Ini terdiri dari suatu film yang encer meminyaki atau buatan mendasarkan pernis yang diterapkan oleh kawat suatu palung pernis dan dibanding melalui suatu beated chamer agar supaya membakar kue pernis yang convering ke dalam suatu tabah dan film kuat dielektrik tinggi. Proses adalah murah dan cepat dan oleh karena itu, kawat berlapis email digunakan hampir yang bersifat universal untuk motor [yang] kecil dan piranti industri.

Dalam kaitan dengan tipis pernis mantel (0,055 sampai 0,075 mm) suatu faktor spasi tinggi diperoleh untuk oli yang melilit, hasil yang didalam suatu penghematan kawat dan mengurangi keseluruhan dimensi untuk oli dibandingkan dengan format lain dalam mencakup.

1. Kapas

Terdiri dari suatu benang kapas nomor jumlah akan secara seperti bentuk sekerup pada kawat di dalam mesin.

2. Sutera

Digunakan sebagai melindungi dengan tanggung jawab kawat itu memberi suatu faktor ruangtinggi. Sekarang, oleh karena; berhubungan dengan mahalnyatidaklah secara normal digunakan

3. Kaca Berserat

Berisi pada umumnya suatu ganda memukul-mukul benang serat kaca berlanjut. Ketebalan ganda memukul-mukul untuk kawat bulat adalah sekitar 0,15

ke 0,22mm. kaca dipekerjakan untuk lilitan yang diperlukan untuk beroperasi di kelas B cakupan temperatur.

4. Abestos mencakup

Ini mencakup secara formal digunakan untuk kawat bulat ketika kelas B isolasi diperlukan. Tetapi mencakup seperti telah digantikan dengan mencakup kaca berserat.

2.2.23 Bahan isolasi untuk laminasi

laminasi harus *insulated* berikut baik menjadi bahan isolasi yang umum untuk laminasi.

a. Insulin

Ini adalah suatu kaolin(china) campuran yang ke atas satu atau kedua sisi menyangkut laminasi itu. Total ketebalan mantel saban laminasi akan 0,01 sampai 0,025 mm.

b. Oksida

Suatu oksida alami yang mantel dibentuk pada lembar sepanjang bergulung yang panas proses, tetapi isolasi/penyekatan ini cannot tergantung pada mungkin saja tidak cukup. Ekstra oxidecoating, dengan suatu perlawanan tentang sepuluh item setinggi perlawanan oksida alami mantel, diterapkan. Proses ini dimasukkan arus biru.

c. pernis

Ini menjadi yang paling efektif jenis isolasi/penyekatan sekarang tersedia. membuat bukti karat laminasi dan tidaklah diakibatkan oleh temperatur diproduksi di mesin elektrik. Pernis pada umumnya diberlakukan bagi kedua sisi laminasi [bagi/kepada] suatu ketebalan sekitar 0,006 mm pada plat 0,05 mm ketebalan. Pernis memberi suatu faktor yang tumpukan sekitar 0,95.

2.2.24 Bahan isolasi mesin

Generator dan motor (AC) / (DC) untuk tujuan industri pada umumnya dibatasi material kelas A atau E, tetapi untuk dinamo, turbo generator motor traksi dan mesin kapal terbang dibatasi dengan kelas B material untuk memungkinkan yang lebih tinggi yang beroperasi temperatur untuk digunakan untuk kepentingan perolehan keluaran lebih besar dari ukuran bingkai ditentukan. isolasi Kelas E biasanya di gunakan motor induksi.

Material banyak di gunakan untuk kawat bulat dan juga digunakan untuk isolasi kabel segi-empat.

Konduktor bertekanan (bar) seperti yang digunakan untuk armature (jangkar) pada mesin-mesin besar, untuk penggunaan bahan isolasinya adalah sebagai berikut :

1. Kelas A

Bahan berserat dari kelas Y yang telah dicelup dalam pernis atau kompon yang terbenam dalam cairan dielektrikum (misalnya penyekat : *fiber* yang dipakai dalam transformator yang terendam dalam minyak).

bahan ini adalah katun, sutera dan kertas yang telah dicelup, termasuk juga kawat – kawat Enamel yang berlapis sebangsa Damar.

a. katun dan meminyaki tape kain

Ketebalan pada umumnya 0,125 sampai 0,25 mm tebal. kapas Tape dipenuhi untuk mencegah penyerapan air.

b. material Berserat

Ini digunakan lapisan slot volyase rendah, mesin voltase didalam ketebalan dari 0,25 sampai 0,5 mm, contoh khas adalah serat terompet, papan-kempaan dll.

c. Nilon dan terylene

Material ini mempunyai kekuatan-tarik tinggi dan kekayaan dielektrikum baik (sekitar 80 kv / mm untuk kertas dipernis).

2. Kelas B material

Mereka biasanya digunakan sebagai penyekat. Material ini adalah gelas/kaca berserat, mika dan asbes.

a. kaca berserat

digunakan di ketebalan dari 0,075 sampai 0,275 mm. ditenun dari kawat pijar benang berlanjut dan dipenuhi dengan pernis. the kuat dielektrik adalah 40 kv sampai 48 kv saban mm.the jenis pernis menentukan temperatur operasi yang aman sampai serat k(AC)a sendiri dapat berdiri disuatu temperatur 25⁰C.

b. Mika

Mika digunakan dari pemisahan lapisan atas (0,0125 sampai 0,025 mm dimana dalam pembuatan lembar mikanit yang disebut, dengan mesin digeser kepada ketebalan yang diperlukan atas suatu yang terikat atau paper, dengan lak atau suatu damar buatan, dan ditekan panas untuk memindahkan bahan pelarut dan memperkuat keseluruhan ke dalam suatu plat padat.

mika terdiri dari mika tipis yang merobek lapisan atas yang terikat ke suatu dukungan dari kertas bermutu tinggi tipis, kain kapas atau kaca berserat untuk memberi kekuatan mekanis.

Ketika kapas atau catatan/kertas dipekerjakan sampai material dukungan yang ketebalan harus mengurangi menurunkan yang minimum memerlukan untuk kekuatan mekanis, sampai di batas atas dari kelas B temperatur material ini akan akhirnya diubah.

Mika sebagian besar dipekerjakan untuk kumparan-medan dinamo dan perlengkapan perekaman *tracdon* motor (jika ketika mika kaca berserat tidaklah digunakan) dan untuk perekaman coil tegangan tinggi dinamo arus tukar. yang formal, pernis dibuat dari damar atau getah alami (dengan bahan pelarut pantas) dan mengoksidasi minyak. pernis silisium Yang baru jadinya lebih memanasakan

bersifat menentang dan tahan air dibanding porselin lain, dan memungkinkan mesin dengan kaca berserat dan penyekatan tidak tersusun teratur lain untuk beroperasi pada temperatur 200-250 °C.

Laminasi kertas, kain kapas dan asbes membentuk dengan lapisan yang mengikat material ini dengan damar buatan dipekerjakan untuk terminal dan tegangan rendah pada mesin, dan bagian lain menuntut suatu alat penyekat isolasi kaku dengan suatu permukaan datar.

Porselin atau alat penyekat/bahan isolasi yang dicetak dipekerjakan untuk membatasi terminal tegangan tinggi mesin.

2.2.25 Pengujian Tegangan Tinggi

Pengujian tegangan tinggi dilakukan untuk mengetahui apakah peralatan tegangan tinggi yang diuji masih memenuhi standar kualitas dan kebutuhan yang dispesifikasikan pada peralatan tersebut. Terdapat tiga jenis tegangan tinggi yang digunakan sebagai pengujian tegangan tinggi, yaitu tegangan tinggi bolak-balik (AC), tegangan tinggi searah (DC), dan tegangan tinggi impuls. Tujuan pengujian tegangan tinggi antara lain² :

1. Untuk meneliti sifat-sifat listrik dielektrik yang baru ditemukan, sebagai usaha dalam menemukan bahan isolasi yang lebih murah
2. Untuk verifikasi hasil rancangan isolasi baru, yaitu hasil rancangan yang telah dikurangi volume isolasinya

3. Untuk memeriksa kualitas peralatan sebelum terpasang, hal ini dilakukan untuk menghindarkan kerugian bagi pemakai peralatan
4. Untuk memeriksa kualitas peralatan setelah beroperasi dalam rangka mengurangi kerugian semasa pemeliharaan.

2.2.26 Pengujian Tangent Delta

Setiap peralatan listrik yang beroperasi pastilah mengalami stres terhadap faktor tegangan operasi, vibrasi, temperatur, kotoran dan lain sebagainya. Semua faktor tersebut akan menyebabkan penurunan ketahanan isolasi peralatan listrik secara terus menerus.

Dalam sebuah jaringan sistim tenaga listrik yang kompleks, penurunan atau penuaan tahanan isolasi peralatan listrik merupakan suatu masalah serius yang dapat menimbulkan kerugian yang besar seperti kerusakan transformator, meledaknya Circuit Breake dan kerusakan pada Generator.

Untuk menghindari breakdown peralatan yang tidak terduga dan kestabilan distribusi power sangatlah penting untuk mengetahui kondisi isolasi peralatan tersebut dan memonitor secara berkala untuk mendapatkan degradasi ketahanan isolasi.

Dalam sistim kelistrikan, Disipasi Fakor atau Pengukuran Tangen Delta bertujuan untuk mengetahui kualitas isolasi suatu peralatan listrik. Oleh karena itu, suatu peralatan listrik yang baru perlu diketahui hasil uji tangen delta-nya yang nantinya berguna sebagai referensi untuk pengukuran tangen delta berikutnya yang dilakukan secara berkala, sehingga didapat grafik degradasi tahanan isolasi

peralatan tersebut. Grafik hasil uji tanden delta tersebut akan memperlihatkan efek penuaan tahahanan isolasi suatu peralatan mulai dari awal pembuatan sampai selama pengoperasian. Dengan data ini, dapat ditentukan kapan dilakukan pemeliharaan, penggantian peralatan tersebut secara terencana, sehingga kerusakan secara tidak terduga dapat ditekan. Hal inipun menjamin keamanan dan kestabilan supplay listrik.

Sebenarnya tidak ada standar yang jelas untuk menyatakan tahanan isolasi suatu peralatan dapat dinyatakan baik atau buruk terhadap nilai hasil pengukuran tangen delta. Hal ini tergantung dar masing-masing pabrikan yang memproduksi alat tersebut dan bahan yang digunakan. Pengukuran tangen delta lebih ditujukan untuk mengetahui laju penurunan kualitas tahanan isolasi suatu peralatan atau efek penuaannya. Oleh karena itulah pengukuran tangen delta memerlukan nilai awal sebagai referensi untuk pengukuran selanjutnya yang dilakukan secara berkala.

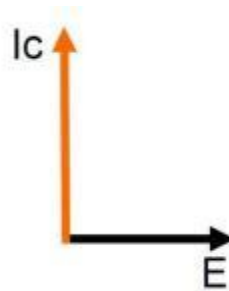
Setiap peralatan berisolasi yang dialiri tegangan & arus yang terus menerus akan mengalami pemburukan nilai isolasi. Terlebih lagi peralatan yang beroperasi pada tegangan tinggi. Untuk mengetahui nilai isolasi maka secara periodik akan dilakukan pengujian – pengujian di antaranya Pengukuran Tahanan Isolasi (std $1M\Omega/kV$) Pengukuran Tangen Delta.

Asas Pengukuran TANGEN DELTA (AC) Electrical Char(AC)teristic pada isolasi:

- 1.Capasitansi
- 2.Resistansi

3. Total arus
4. Rugi daya
5. Power faktor

1. **Capasitansi**



Gambar 2.16 kurva Kapasitansi

Setiap material / media isolasi yang terpakai pada peralatan listrik memiliki nilai kapasitansi (menyimpan muatan). Jika peralatan tersebut bertegangan maka akan timbul I Capasitif (I_c) yang bersifat mendahului tegangan sebesar 90° .

$$I_c = E \omega C$$

$$I_c = 2 \pi f C$$

$$I_t = I_c$$

dengan :

I_t = arus total

2. **Resistansi**



Gambar 2.17 Kurva Resistansi

Selama peralatan beroperasi maka berbagai faktor akan mempengaruhi nilai isolasi :

Electrical

Thermal (suhu)

Mechanical (mekanis)

Chemical (kimia)

Ageing (umur)

Beberapa faktor di atas akan menyebabkan isolasi mengalami Deteriorasi dan Kontaminasi. Deteriorasi adalah pemburukan nilai isolasi karena corona dan karbon Kontaminasi adalah bercampurnya zat lain ke dalam media isolasi (kotoran dan air) kedua hal tersebut menyebabkan timbulnya R pada isolasi (isolasi memiliki nilai Resistansi) Nilai R yang terdapat pada media isolasi menyebabkan timbulnya Arus Resistif (I_r) yang bersifat sejajar dengan tegangan.

$$I_r = E/R$$

$$I_t = I_r$$

dengan

$I_r = I$ resistif

$E =$ Tegangan

$R =$ Nilai Resistansi

I_r yang timbul akan menyebabkan adanya Losses daya (*Watt Loss*). Jadi semakin besar nilai R dalam media isolasi = semakin besar *Losses* daya = semakin turun nilai isolasi.

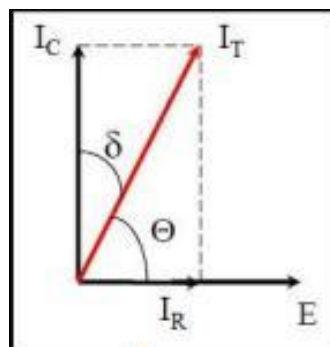
$P = E \cdot I_r$

dengan :

$P =$ Watt Loss

$I_r = I$ resistif

Dengan adanya nilai kapasitansi dan resistansi maka :



Gambar 2.18 kurva nilai $\cos \theta$

$$I_t = I_c + I_r$$

$$\text{Power faktor} = \cos \theta$$

$$\text{Dissipasi faktor} = \tan \delta$$

Isolasi yang baik adalah yang murni kapasitansi atau dengan besar $\theta = 90^\circ$ atau $\cos \theta = \cos 90^\circ = 0$ atau $\tan \delta = 0$

Jika $\theta = 90^\circ$, maka $I_r = 0$ $I_t = I_c$

Watt Loss $P = E \cdot I_r = E \cdot 0 = 0$ watt

$\tan \delta = I_r / I_c = 0 / I_c = 0$

Rumusan perhitungan $\tan \delta$:

$$DF = \omega R_s C_s$$

Dimana nilai R_s dapat dicari dengan rumus :

$$R_s = \frac{P}{I^2}$$

2.2.27 mode pada pengujian tangen delta

Pada pengujian tangen delta beberapa mode yang sering digunakan antara lain :

- a. Mode GST (*Grounded Speciment Test*), yakni mode pengujian tangen delta yang mana kapasitansi uji yang digunakan sebagai referensi pengukuran adalah kapasitansi obyek yang diuji terhadap ground.
- b. Mode GSTG (*Grounded Speciment Test Guard*), yakni mode pengujian tangen delta yang mana kapasitansi uji yang digunakan sebagai referensi pengukuran adalah kapasitansi

obyek yang diuji terhadap ground dan memblok/membatasi kapasitansi obyek lain (*guard*) yang mempengaruhi kapasitansi obyek uji.

- c. Mode UST (*Ungrounded Speciment Test*), yakni mode pengujian tangen delta yang mana kapasitansi uji yang digunakan sebagai referensi pengukuran adalah kapasitansi antara dua obyek yang sama sekali tidak terhubung dengan ground.
- d. *Hot Collar*, Mode pengukuran ini sangat efektif untuk mengetahui lokasi keretakan pada porcelain, pemburukan atau kontaminasi pada permukaan bushing seperti lapisan tipis compound, cairan atau sisa compound yang menempel pada bushin.