

## BAB II

### DASAR TEORI

Sebagai salah satu rangkaian proses konversi energi, peranan generator listrik sangat besar di segala bidang kehidupan. Melalui bentuk energi listrik, energi dapat dikirimkan ke alat-alat pengguna dengan aman, mudah dan ekonomis. Faktor tersebut mendorong penggunaan energi listrik pada bidang permesinan kapal sangat dominan.

#### II.1. Konversi Energi Elektromekanis

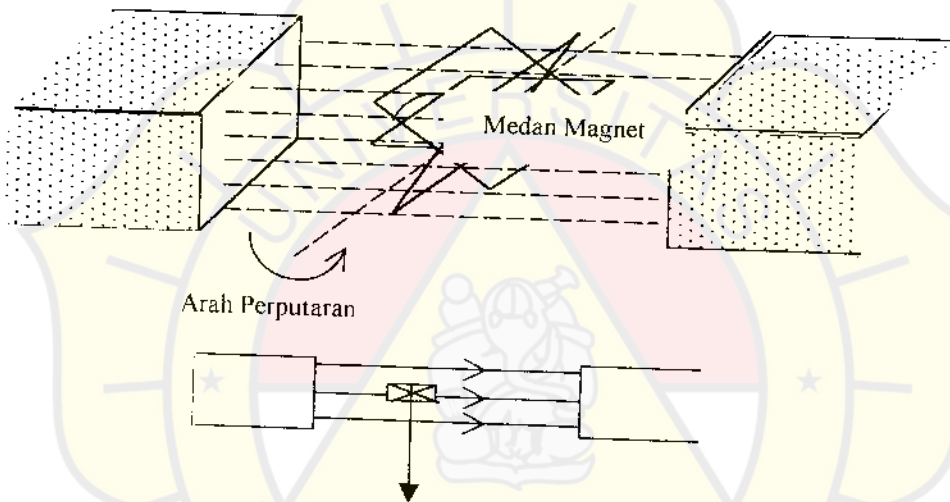
Konversi energi baik dari energi listrik menjadi energi mekanik (*motor*) maupun sebaliknya dari energi mekanik ke energi listrik (*generator*), berlangsung melalui medan magnet. Dengan demikian medan magnet berfungsi sebagai tempat penyimpanan energi sekaligus sebagai medium untuk mengkoppel proses perubahan energi.

Efek konversi energi elektromekanis pada generator dirumuskan oleh hukum Faraday, dimana bila sebuah konduktor digerakkan tegak lurus sejauh  $ds$  memotong suatu medan magnet dengan kecepatan fluks  $B$  maka perubahan fluks pada konduktor dengan panjang adalah (Ref. No. 14 Hal 67)

$$d\phi = B \cdot l \cdot ds$$

diketahui  $e = d\phi/dt$  dan  $v = ds/dt$ , maka :

$e = B \cdot l \cdot v$ , dimana  $e$  = gaya gerak listrik dan  $v$  = kecepatan menurut aturan tangan kanan dengan jempol, telunjuk dan jari tengah saling tegak lurus menunjukkan arah  $v$ ,  $B$  dan  $I$ . Bila konduktor dihubungkan dengan beban (tahanan) maka pada konduktor akan mengalir arus menjauhi kita.



Gambar. Pembangkitan energi listrik ( Ref.No.14 Hal 68 )

Perubahan fluks karena gerakan mekanis menyebabkan perubahan energi elektromekanis dimana arus listrik mengalir konduktor. Jadi tegangan dibangkitkan pada konduktor lilitan atau sekelompok kumparan dengan memutar lilitan-lilitan tersebut secara mekanis melalui suatu medan magnetik, dengan memutar secara mekanis suatu medan magnetik melalui lilitan atau dengan merancang suatu rangkaian magnetik sedemikian sehingga harga

relukstan berubah-ubah sesuai putaran rotor. Dengan salah satu cara tersebut fluks yang bersangkutan dengan kumparan tertentu akan berubah secara berulang, sehingga timbul tegangan berubah waktu, kumparan ini disebut kumparan jangkar (*armatur*).

Pada umumnya kumparan jangkar dililitkan pada inti besi guna memaksimalkan gandengan dan memperbesar kerapatan tenaga magnetik yang bersangkutan dengan interaksi elektromekanis. Perubahan fluks magnetik akan menimbulkan arus induksi (arus Eddy), arus feryteristis untuk memperkecil rugi-rugi arus Eddy itu, maka kumparan jangkar dibuat dari lapisan-lapisan tipis besi ferromagnetik.

Aliran magnetik disalurkan melalui besi ferromagnetik pada bagian mesin yang lain yang disebut kumparan medan. Agar menghasilkan medan magnet, kumparan medan dialiri arus searah (*DC*). Arus searah ini dikenal sebagai arus excitasi (arus penguatan/pembangkitan).

Tegangan arus bolak balik yang terbangkit pada kumparan jangkar memiliki frekuensi gelombang ( Ref. No. 14 Hal 72 )

$$f = p \cdot n/60 \text{ (Hz)}$$

dimana  $p$  = jumlah pasangan kutub medan (2, 4, 6,...)

$n$  = putaran rotor (rpm)

Sehingga putaran sinkron yang dibutuhkan dari prime mover:  $n_s = 120 \cdot f/p$  (rpm). ( Ref. No.14 Hal 72 )

Frekuensi adalah jumlah getaran listrik setiap detik yang dinyatakan dalam satuan Hertz atau Cycle/detik disingkat Hz. Apabila dikatakan frekuensi  $f = 1$  Hz, hal ini berarti bahwa rotor bergerak mengitari dua buah kutub, yaitu rotor berputar dengan jarak 360 derajat listrik. Oleh karena itu frekuensi tergantung pada putaran dan jumlah kutub. Rating kecepatan putaran tergantung pada tipe prime movernya. Apabila prime mover dari suatu alternator mempunyai kecepatan rendah maka alternator tersebut membutuhkan banyak kutub sehingga tercapai besar frekuensi yang telah ditentukan. Alternator yang tipe prime movernya mempunyai kecepatan tinggi maka biasanya generator tersebut mempunyai jumlah kutub 2, 4 atau 6 dan seterusnya. Frekuensi yang biasa digunakan adalah 50 Hz dan 60 Hz, dimana sekali putaran mekanik induksi yang dibangkitkan sudah menyelesaikan 2 siklus penuh.

Jadi untuk menghasilkan frekuensi tegangan arus bolak balik yang konstan harus diperoleh putaran poros rotor dari prime mover yang konstan pula, karena itu generator disebut mesin sinkron atau mesin serempak. Keadaan sinkron ini sangat dipengaruhi oleh beban yang dipikul dan akan terpengaruh oleh suatu beban kejut.

Pembangkitan tegangan 3 fasa diperoleh dengan menyusun kumparan jangkar dari 3 kumparan yang saling beda sudut  $120^\circ$  berputar pada medan magnet homogen. Tegangan boleh balik yang dibangkitkan berselisih waktu sepertiga pada tiap periode gelombang sinus. Sifat ketiganya : tegangan tiap fasa sama, nilai puncak sama (beda fasa  $120^\circ$ ) dan jumlah nilai sesaat sama dengan nol. Tegangan terbangkit tersebut ditransmisikan dalam 4 kawat dimana 3 kumparan jangkar disusun dalam bentuk Y-connection dengan 3 kawat saluran (R, S, T) dan satu kawat netral, sehingga bila diperoleh tegangan 1 fasa (biasanya 220 volt) dan tegangan antar fasa  $\sqrt{3}$  kali tegangan fasa (380 volt).

## II.2. Konstruksi Generator AC

Alternator digunakan untuk membangkitkan tegangan bolak-balik, maka alternator tidak membutuhkan komutator sehingga hal ini memungkinkan dibuatnya kumparan pembangkit (jangkar) pada bagian yang tidak bergerak, yaitu stator. Hal ini mempunyai keuntungan yakni :

1. Memungkinkan untuk membuat isolasi kawat jangkar yang lebih kuat. Karena kumparan dan isolasi tidak dipikul oleh rotor sehingga dapat mengurangi getaran mekanis.

2. Tegangan tinggi yang dibangkitkan dalam kawat jangkar tidak lagi memerlukan slip ring untuk mensuplainya ke rangkaian luar (jala-jala) tetapi dapat langsung menghubungkannya dengan terminal stator.

Secara umum konstruksi generator AC sinkron (*Alternator*) serupa dengan mesin listrik lainnya seperti motor dan mesin asinkron. Berdasarkan letak kumparan medan dan jangkar, dikenal mesin kutub dalam dan mesin kutub luar. Mesin kutub dalam berarti kumparan medan (penghasil medan kutub magnet) terletak pada poros berputar (*rotor*) sedangkan kumparan jangkar sebagai stator. Demikian pula sebaliknya dengan mesin kutub luar. Perbedaan prinsip keduanya adalah dengan konstruksi kutub dalam tegangan dan arus langsung diambil dari kumparan jangkar pada stator. Keuntungannya cincin geser dan sikat tidak diperlukan sehingga mengurangi rugi-rugi panas gesekan dan lebih memudahkan menyusun kumparan 3 fasa serta isolasinya.

Ditinjau dari bentuk rotornya untuk generator putaran prime mover tinggi biasanya digunakan bentuk silindris sehingga keseimbangan dinamis mudah dicapai. Pada rotor dengan kutub sepatu (*kutub menonjol/salient pole*) keseimbangan dinamis sulit dicapai pada kecepatan putaran tinggi, maka rotor dilengkapi dengan kumparan peredam (*dampner winding*) dekat ujung sepatu kutub yang berfungsi mengamankan generator dari guncangan (*isolasi*) sewaktu terjadi perubahan kecepatan yang mendadak. Damper

winding terdiri dari kumparan tembaga bulat yang dihubungkan pada semua ujungnya dengan cincin tembaga.

Sebagai medium yang menyalurkan tegangan induksi dari kumparan medan ke kumparan jangkar dan clearance untuk putaran rotor dibuat celah udara antara rotor dan stator. Celah udara dibuat tidak terlalu lebar maupun sempit karena faktor kehilangan akibat gesekan yang timbul antara rotor dan stator.

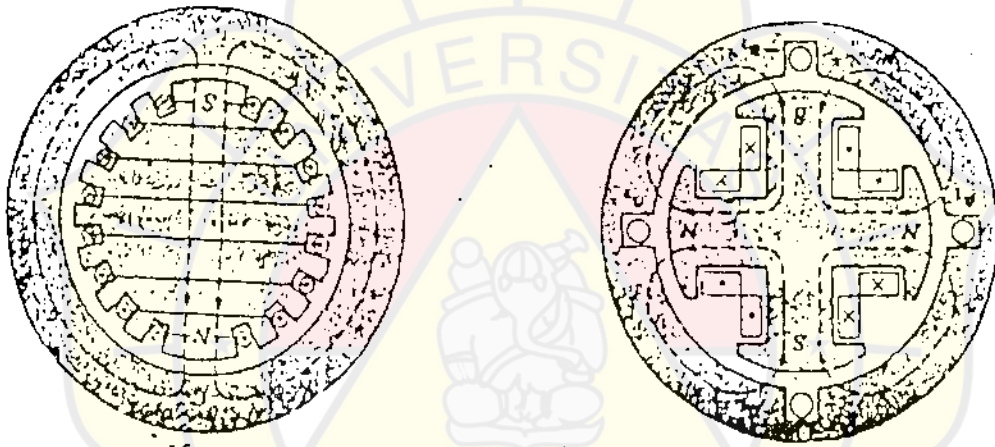
Pada mulanya lamel rotor dan stator dibuat dari satu bahan, lengkap dengan bentuk kutub rotor dan lubang poros serta alur pasaknya. Poros terbuat dari besi tempa (*forged steel*) yang dirancang pada kecepatan kritis dari putaran prime movernya. Hal ini berhubungan dengan getaran yang timbul dari transmisi daya yang tidak seimbang. Torsi yang timbul pada poros generator merupakan hasil gaya luar seperti perubahan tiba-tiba pada beban, hubung singkat ataupun gangguan lain dari torsi akibat variasi putaran poros prime mover seperti pada internal combustion engine (*start up – start down*).

Pendinginan pada alternator dengan rotor kutub salient tidak perlu dilakukan (ditambah), karena udara yang ada dalam celah-celah antar kutub cukup untuk keperluan pendinginan. Pada alternator dengan jenis rotor silinder, pada dasarnya sistem pendinginan dilakukan dalam dua macam, yakni :

1. Pendinginan radial : dilakukan dengan memasukkan udara atau gas melalui saluran (celah udara) yang ada dalam inti stator (jangkar) dan

keluar melalui celah udara yang ada di sekitar poros. Dengan demikian udara atau gas tersebut bergerak secara radial sehingga panas yang timbul dapat dikurangi.

2. Pendinginan aksial : udara atau gas mengalir dari satu ujung mesin ke ujung lainnya melalui celah udara dalam jangkar.



Gambar Rotor (a) a. Bentuk Salient Pole ( Ref. No 12 Hal 7 ) (b)  
b. Bentuk Cylindrical Pole

### II.3. Pengaturan Tegangan

Pengaturan tegangan didefinisikan sebagai perubahan tegangan dari saat beban nol ( $E_0$ ) ke kondisi beban penuh ( $E$ ) dengan arus excitasi dan putaran poros konstan. Dirumuskan ( Ref. No.14 Hal 134 )

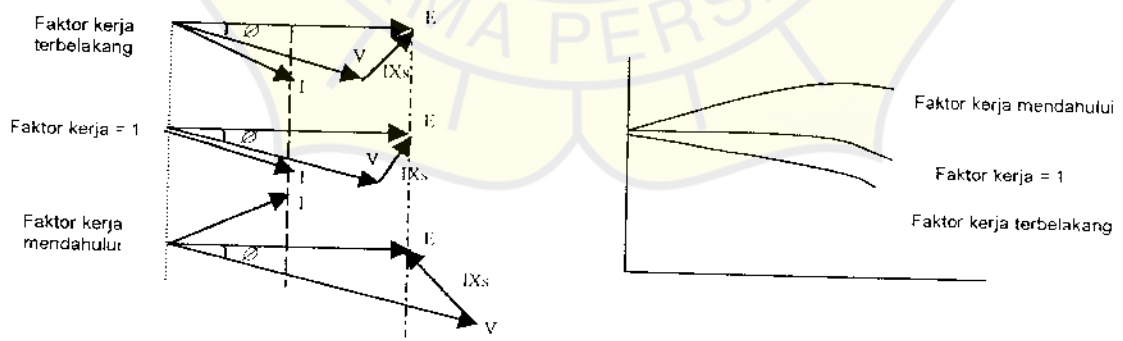
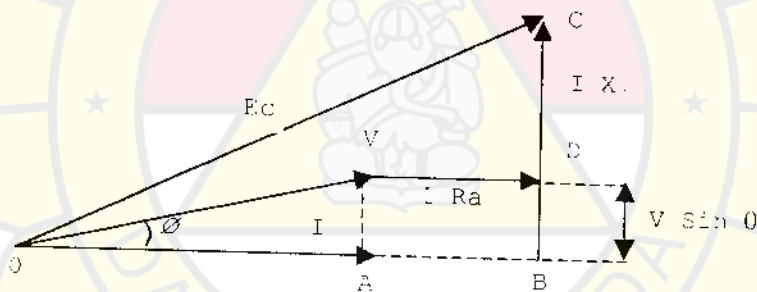
$$\text{Pengaturan tegangan (\%)} = (E_0 - E)/E \times 100\%$$



Perbedaan antara  $E_o$  dan  $E$  selain dipengaruhi faktor kerja juga dipengaruhi oleh arus jangkar ( $I$ ). Saat berbeban arus jangkar akan mengalir menimbulkan reaksi jangkar yang reaktif sehingga disebut reaktansi jangkar ( $X_m$ ), selain tahanan jangkar sendiri ( $R_a$ ). Reaktansi jangkar bersama reaktansi fluks bocor stator ( $X_a$ ) dikenal sebagai reaktansi sinkron ( $X_s$ ) yang diperhitungkan saat generator akan beroperasi paralel.

Apabila beban dilepas, kecepatan dan arus medan tidak berubah maka terjadi tegangan beban nol. Untuk alternator berlaku hubungan :

$$E_o = (V \cos \phi + I.R_a) + j (V \sin \phi + I.X_s)$$



Gambar Faktor Kerja Generator ( Ref. No 14 Hal 134 )

Beban listrik yang mempengaruhi pengaturan tegangan ada tiga macam, yaitu :

a. Beban dengan faktor kerja leading :

Gelombang sinus arus ( $I$ ) mendahului  $\varphi^\circ$  dari tegangan ( $E$ ), beban bersifat resesif-kapasitif.

b. Beban dengan faktor kerja unity :

Gelombang sinus arus ( $I$ ) mendahului sefasa dengan tegangan ( $E$ ), beban bersifat resesif murni.

c. Beban dengan faktor kerja lagging :

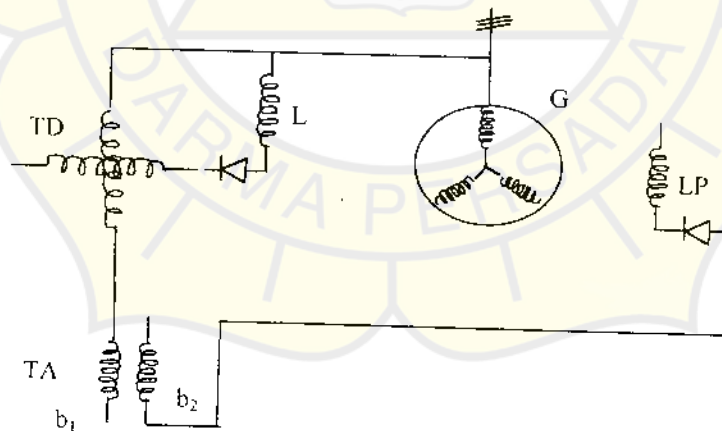
Gelombang sinus arus ( $I$ ) tertinggal  $\varphi^\circ$  dari tegangan ( $E$ ), beban bersifat resesif-induktif.

Pengaturan tegangan pada Brushless Generator diperoleh lewat sistem automatic voltage regulator (*AVR*). Tegangan AC yang diperoleh dari terminal generator melalui transformator dan dioda rectifier dibandingkan dengan tegangan stabil reference yang dihasilkan dalam regulator. Setiap beda tegangan (*error voltage*), diperkuat dan dipergunakan untuk mengontrol penyalan thyristor circuit yang mensuplai excitasi pada kumparan medan generator utama atau lewat generator exciternya. Sehingga arus excitasi akan bertambah atau berkurang untuk mengembalikan tegangan generator pada tingkat dengan *error voltage* mendekati nol.

Komponen utama yang bertindak sebagai kunci pengaturan tegangan, yaitu dioda zener, berbeda dari dioda yang biasanya bekerja sebagai penyearah. Dioda-dioda penyearah tak pernah dengan sengaja dioperasikan pada daerah dadalnya karena akan merusak dioda tersebut. Tetapi dioda zener justru bekerja paling baik pada daerah dadalnya dimana tegangan keluar dioda zener cenderung tetap. Dengan mengubah derajat ketidakmurnian (*doping*) dioda silikon dapat dihasilkan dioda zener dengan tegangan dadalnya dari 2 s/d 200 volt. Dioda zener mempertahankan tegangan keluaran yang tetap meskipun tegangan masukan dan arus yang melaluinya berubah, hal ini disebabkan resistansi dioda zener yang kecil. Kadang rangkaian dioda zener diseri dengan tahanan untuk membatasi pembuangan daya.

Thyristor dikenal juga sebagai "*reverse blocking trioda thyristor*" dimana dapat menahan aliran arus dari kedua arah sampai suatu arus kontrol diterapkan pada kaki gate. Pulsa yang dibangkitkan antara gate dan katoda menyebabkan thyristor bersifat konduktor dengan harga tahanan rendah (dari anoda ke katoda), yang berlangsung sampai arus maju menjadi nol dan proses blocking berlangsung lagi. Proses blocking berlangsung alami pada pemakaian arus AC karena adanya perubahan polaritas pada anoda, sedangkan pada arus DC blocking terjadi bila terdapat negatif voltage pada anoda.

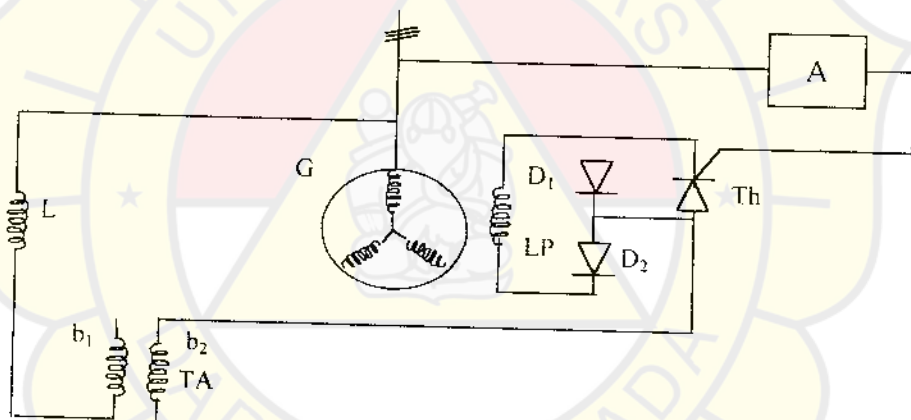
Pada generator lama pengendalian tegangan dilakukan secara magnetik dengan menggunakan transduser. Kumparan L terpasang pada tegangan generator G dengan lengkung magnetasi berbentuk tajam antara bagian yang jenuh dan tak jenuh. Pada bagian yang jenuh suatu kenaikan tegangan akan mengakibatkan mengalirnya tambahan arus yang tidak seberapa besar. Tapi pada bagian yang tak jenuh kenaikan tegangan yang kecil saja akan mengakibatkan kenaikan arus kumparan yang besar. Bilamana tegangan naik di atas suatu batas yang ditentukan, arus kumparan L akan mengakibatkan dalam transduser TD mengalir arus yang terus menuju sisi  $b_1$  transformator arus TA. Arus yang mengalir pada sisi  $b_2$  akan mempengaruhi arus medan yang mengalir pada belitan penguat LP sehingga arus excitasi akan turun demikian pula tegangan output generatornya.



Gambar Bagan Pengendali Tegangan secara magnetik

( Ref No 6 Hal 127 )

Selain sistem magnetis diatas, pengendalian juga dapat dilakukan dengan sistem elektronik lewat alat pengatur dengan menyundut thyristor pada suatu jembatan dioda, sehingga diperoleh reaksi yang lebih cepat. Sistem ini dapat bekerja kontinyu dan dapat dirancang untuk bereaksi terhadap banyak signal kontrol disamping keluaran tegangan. Sumber tenaga untuk rangkaian pengendali diperoleh dari keluaran tegangan generator utama atau lewat pilot exciter.



**Gambar Bagan Pengendali Tegangan secara elektronik**  
( Ref. No 6 Hal 128 )

#### II.4. Sistem Excitasi

Arus excitasi merupakan arus searah yang dialirkan ke kumparan medan supaya kumparan medan tersebut bersifat magnetik dan menghasilkan medan magnetik konstan. Seperti telah dikemukakan di atas pada generator besar maka kumparan kutublah yang berputar dan kumparan jangkar tetap (*stator*). Dengan demikian arus dan tegangan bisa diperoleh dari bagian generator yang tetap, sedangkan arus excitasi harus melalui sikat dan cincin geser. Sikat dan cincin geser menghubungkan kumparan medan dengan sumber tegangan dari luar. Hal ini merupakan titik lemah sebab untuk satuan daya besar kerugian panas pun menjadi besar pula. Untuk menghindari kerugian tersebut dipasang generator penguat (*Exciter*) berupa DC Exciter atau AC Exciter yang dipasang terpisah atau seporos dengan generator utama. Sistem terakhir yang banyak digunakan saat ini dimana AC Exciter merupakan mesin kutub luar sehingga arus excitasi diperoleh langsung dari rotor melalui penyearah 3 fasa ke kumparan medan generator utama. Generator dengan sistem ini dikenal sebagai Brushless Generator.

Arus excitasi sangat berpengaruh pada penampilan karakteristik generator. Lewat pengaturan arus excitasi dapat dicapai kestabilan operasi generator sesuai beban terhubung dengan tegangan dan arus yang dibutuhkan.

Sistem excitasi dapat dibagi dalam dua kelompok, yaitu sistem excitasi terpisah (*Separated Excitation System*) dimana sumber arus excitasi

diperoleh dari sumber tegangan terpisah dari generator utama seperti battery, accu dan generator lain lewat cincin gesek dan sikat, sedangkan sistem excitasi sendiri (*Self Excitation System*) sumber arus excitasi diperoleh dari keluaran generator utama atau lewat AC Exciter yang terpasang satu poros dengan generator utama. Type terakhir lebih berkembang dengan beberapa variasi dimana sistem automatic voltage regulator (AVR) harus dipakai.

Excitasi diberikan oleh hasil tegangan keluaran generator utama yang dilewatkan oleh regulator untuk penyesuaian tegangan pada kumparan medan. Tegangan medan sangat dipengaruhi karakteristik tegangan beban.

a. Direct-Self Excitation :

Generator dengan sistem ini menguntungkan untuk kebutuhan dimana luas ruangan terbatas tapi kapasitas keluaran juga terbatas dibawah 100 KVA dengan respon pada perubahan voltage 50% berlangsung dalam 0,2 detik.

b. Indirect-Self Excitation :

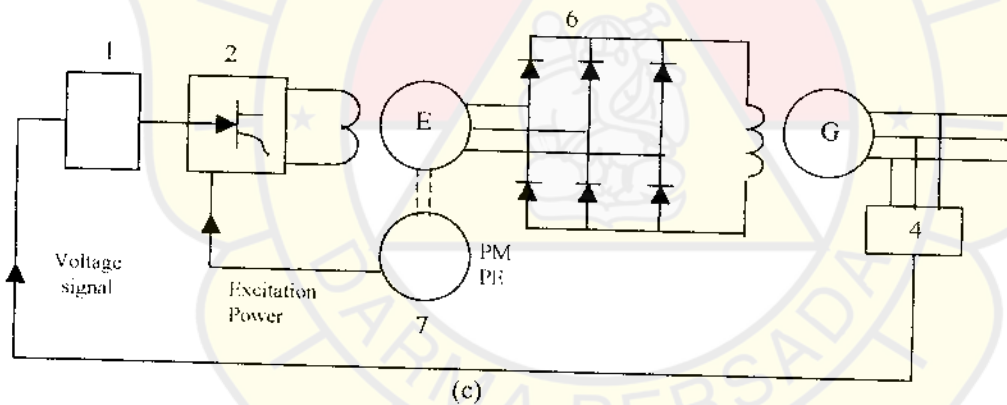
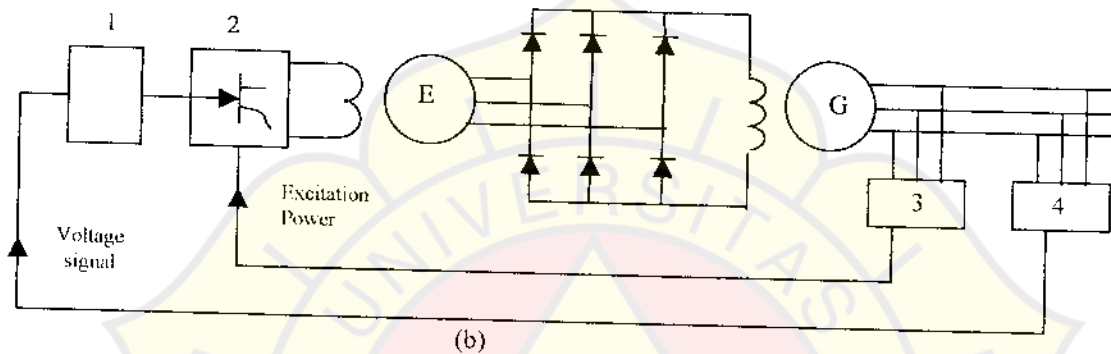
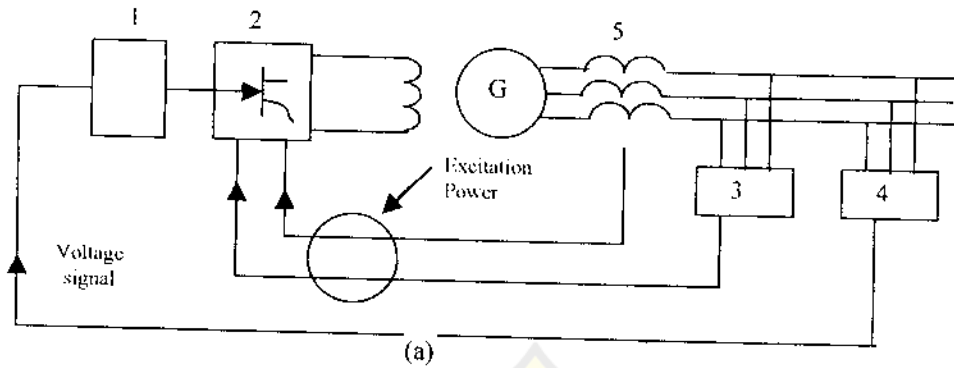
Excitasi diperoleh tidak langsung dengan melalui AC Exciter yaitu generator kutub luar dengan arus excitasi dilewatkan suatu penyearah berputar (*rotating rectifier*). Baik rotating AC Exciter maupun rotating rectifier terpasang satu poros dengan generator utama. Medan pada AC Exciter dikontrol oleh suatu regulator elektrik dengan sumber daya diperoleh dari keluaran generator utama. Generator ini tidak memerlukan

sikat dan cincin gesek (*Brushless generator*) dengan kapasitas bisa di atas 100 KVA tapi respon pada perubahan voltage berlangsung lebih lama yaitu 0,5 detik.

c. **Separated Excitation :**

Sistem excitasi ini mirip dengan point (b) dengan sumber excitasi untuk rotating AC Exciter diperoleh dari suatu Pilot Exciter dengan tegangan konstan. Kapasitas out put dari jenis ini bisa di atas 10 MVA sampai batas maksimum. Pada sistem ini dipakai Permanent Magnet Pilot Exciter yang terpasang seporos dengan AC Exciter dan generator utamanya. Keuntungannya pada awal pembangkitan tegangan tidak perlu ada magnet residu pada AC Exciter untuk starting karena telah disuplai langsung oleh Permanent Magnet Generator yang bertindak sebagai Pilot Exciter. Kerugian biasanya pada penambahan panjang total generator yang bersangkutan.





- a. Direct self-excitation, b. Indirect self-excitation,  
 c. Separated excitation. 1). Control unit, 2). Power output stage (AVR), 3). Excitation power transformer, 4). Voltage transformer, 5). Current transformer for excitation power, 6). Dioda rectifier (*static or rotating*),  
 7). Permanent magnet pilot exciter.

**Gambar Sistem Excitasi ( Ref. No 9 Hal 11-8 )**

## II.5. Karakteristik Generator AC (Alternator)

Karakteristik generator bisa diperoleh lewat percobaan. Dari hasil percobaan tersebut dibuat lengkung kurva penampilan generator yang bersangkutan.

Karakteristik yang diamati meliputi ( Ref. No 6 Hal 91 )

### a. Karakteristik beban kosong

Lewat percobaan dengan memutar alternator pada kecepatan konstan  $n_s$  dan kumparan medan (pada rotor) menerima arus penguatan (excitasi)  $I_m$ . Diperoleh hubungan :

$$E = E(I_m) \quad n = n_s, \quad I = 0$$

Tegangan antar fasa  $E$  terinduksi pada kumparan stator tapi arus jangkar tidak mengalir pada stator (beban nol,  $I=0$ ). Tetapi tegangan  $E$  merupakan fungsi arus excitasi  $I_m$ . Bila arus  $I_m$  diubah-ubah akan diperoleh kurva  $E - I_m$ .

### b. Karakteristik hubung singkat

Lewat percobaan hubung singkat yang merupakan pengukuran arus hubung singkat sebagai fungsi excitasi dengan tegangan apit nol pada putaran rotor konstan. Diperoleh hubungan :

$$I_k = I_k(I_m) \quad n = n_s, \quad u = 0$$

Jika nilai arus hubung singkat sangat tinggi akan timbul pemanasan pada sistem. Dengan demikian peranan alat pengatur excitasi harus bereaksi cepat agar saat terjadi hubung singkat pada saluran generator utama, arus excitasi dapat diturunkan.

c. Karakteristik beban penuh

Lewat percobaan alternator berbeban penuh dengan menghubungkan output pada sistem jala-jala, tegangan apit diukur sebagai fungsi arus medan. Putaran rotor arus beban dan faktor kerja dijaga konstan. Faktor kerja yang diamati meliputi leading (mendahului), unity (sefasa) dan lagging (tertinggal) walaupun dalam prakteknya sering diambil faktor kerja 0,8 lagging.

d. Karakteristik pengaturan

Karakteristik ini memberi jawaban bagaimana arus medan (arus excitasi) harus diatur agar tegangan apit konstan bila beban berubah-ubah.  $I_m$  sebagai fungsi arus jangkar (pada stator)  $I$  serta  $\phi$  sudut antara  $E$  dan  $I$ . Diperoleh hubungan :

$$I_m = I_m(I) \quad n, u, \phi$$

e. Karakteristik lengkung V

Merupakan kebalikan karakteristik pengaturan.

Diperoleh hubungan :

$$I = I(I_m) \quad n, u, P_p$$

Daya poros  $P_p$  dipertahankan konstan.

f. Karakteristik luar

Merupakan penggambaran dari hubungan antara tegangan jepit ( $V$ ) sebagai fungsi arus beban ( $I$ ) dimana arus penguat magnet ( $I_m$ ) tetap, putaran tetap dan  $\cos \phi$  yang tetap.

## II.6. Kebutuhan Tenaga Listrik di Kapal

Sistem tenaga listrik di kapal terdiri dari alat pembangkit tenaga (*generator*), sistem distribusi daya (*MSB, kabel*) dan peralatan pengguna. Tenaga listrik dipakai, sebagai penggerak mesin bantu, permesinan geladak, penerangan, pemanasan, ventilasi dan pengkondisian udara. Suplai tenaga listrik yang kontinyu sangat penting untuk keselamatan kapal beserta operasi permesinan sehingga perlu ada suatu sistem suplai darurat berupa emergency generator atau battery yang bekerja secara otomatis serta sistem pengaman yang memadai.

Pemilihan dan penggunaan semua sistem tenaga listrik di kapal harus mendapat persetujuan dari Biro Klasifikasi ( Ref. No 1 Vol. IV ) sehingga akan sangat berbeda dengan sistem di darat, termasuk juga hal pemilihan generator kapal.

Seperti dikemukakan di atas, penggunaan tenaga listrik di kapal mencakup sistem tenaga (*power system*), berupa motor-motor penggerak,

sistem pengendalian (*navigation system*), ventilasi dan sistem penerangan (*lighting system*). Dari sumber daya tenaga listrik dialirkan ke kotak pembagi (*junction box*) yang melayani sekelompok peralatan pengguna di tiap geladak. Junction power melayani pengguna berdaya besar dengan sistem 4 kabel (3 fasa) seperti motor induksi AC sedangkan junction lighting melayani peralatan pengguna dengan sistem 2 kabel (1 fasa) dengan navigasi, komunikasi dan manuvering biasanya tersedia junction tersendiri.

Pada dasarnya daya Generator AC diambil berdasarkan jumlah total kebutuhan beban daya pengguna seperti menentukan kapasitas battery emergency power (*DC power system*). Dengan semakin berkembangnya teknologi generator AC dan pengalaman dari penggunaan tenaga listrik pada kegiatan utama saat berlabuh, berlayar dan bongkar muat terdapat selisih pada kebutuhan listriknya. Selisih kebutuhan daya pada tiap kondisi tersebut cenderung konstan, karena memang pada tiap keadaan utama tersebut peralatan-peralatan yang digunakan tidak sama dan tidak setiap peralatan digunakan pada waktu yang sama. Perkembangan selanjutnya kapasitas generator ditentukan dengan memperhitungkan faktor beban (*load factor*) yaitu perbandingan beban pemakaian rata-rata suatu peralatan terhadap beban nominal peralatan yang bersangkutan.

Nilai load factor berkisar antara nol sampai satu, peralatan yang jarang digunakan pada tiap kegiatan diperoleh harga  $load$  utama kapal maka

nilai load factor akan mendekati satu. Setelah jumlah hasil perkalian load factor tiap peralatan dengan beban nominalnya pada tiap kegiatan diperoleh (tentunya lebih kecil dari beban nominal terpasang) dipilih generator dengan kapasitas mencukupi untuk tiap kondisi kegiatan utama sesuai klasifikasi. Besar load factor ditentukan dari pengalaman yang sangat dipengaruhi faktor jenis kapal, tonase kapal, jumlah peralatan pengguna serta route pelayaran. Sehingga tidak ada harga pasti untuk load factor ini (tergantung perancang).

Pada saat ini kapasitas generator ditentukan dengan memasukkan pula faktor kebersamaan (*diversity factor*) yaitu perbandingan jumlah peralatan tersedia dengan yang beroperasi pada saat suatu kegiatan berlangsung. Nilai diversity factor biasanya berkisar antara 90% - 95%.

Dari perhitungan terakhir ini diperoleh kebutuhan daya generator lebih kecil dari daya terpasang, namun diperkirakan akan mampu melayani kebutuhan daya pada tiap kondisi operasi. Keuntungan yang diperoleh dari perencanaan kapasitas generator seperti di atas jelas lebih ekonomis (menghemat biaya pembelian generator), kebutuhan ruang lebih kecil, sistem penunjang lebih sederhana serta biaya pemeliharaan lebih ringan. Langkah berikutnya adalah memilih type generator yang sesuai.

Secara umum guna memilih type ukuran generator yang sesuai, perlu diperhitungkan faktor-faktor sebagai berikut :

1. Aplikasi generator :

Menyangkut mode operasi yang diinginkan seperti standby atau continuous, single atau paralel operation dan load power factor.

2. Lokasi penempatan :

Meliputi altitude (ketinggian), temperatur udara sekitar (*ambient temperature*), kelembaban udara (*humidity*) serta kondisi ekstrim lingkungan sekitar.

3. Beban dinamis :

Ada tidaknya pembatasan beban motor atau sekelompok motor yang dapat di start bersamaan atau penggunaan lainnya dengan daya besar pada waktu yang sama.

Pada sub bab berikut peranan faktor-faktor pemilihan di atas untuk generator di kapal akan lebih diperjelas.

## II.7. Kondisi Lingkungan Kerja di Kapal

Persyaratan utama yang harus dipenuhi oleh generator di kapal adalah harus tetap mampu berfungsi dengan baik dalam kondisi pemakaian di kapal. Kedudukan kapal cenderung dinamis, antara lain akibat gerakan gelombang, arus maupun angin kapal mengalami olengan (*rolling*), heaving dan yawing. Kondisi tersebut akan mempengaruhi operasional generator kapal terutama

instalasi yang dikopel dengan main propulsion dimana keadaan sinkron sukar dipertahankan.

**Tabel Sudut inklinasi sebagai kondisi kerja permesinan**

( Ref. No 1 hal1-7 )

Equipment Components	Angle of inclination			
	Arthwarti ships		Longitudin	
	Static	Dyn	Static	Dyn
Main engines and auxiliary machinery	15	22,5	5	7,5
Safety equipment including emergency source of power, emergency fire pumps and their drivers Switchgear, electric and electronic equipment, remote control	22,2	22,5	10	10

Kondisi mekanis dari gerakan kapal yang mempengaruhi perancangan generator kapal berupa gerakan badan kapal dan getaran kapal. Gerakan kapal yaitu pada posisi kemiringan arah melintang dan arah memanjang baik pada keadaan statis dan dinamis.



**Tabel Kondisi Lingkungan Sekitar ( Ref. No. 1 Hal 1-7 )**

Equipment components	Location arrangement	Temperature Range (°C)
	In enclosed spaces	0 to + 45
Machinery and electrical installation	At machinery component, boilers in spaces subject to higher or lower temperature	According to specific local conditions
	On the open deck	- 25 to + 45
<p>1) Electrical appliances are to be designed and tested to ensure satisfactory cooperation even at constant air temperature + 55°C</p> <p>2) BKI may approve lower air temperatures for ships intended only for service in special geographical affairs</p>		

Location	Conditions
In all spaces	Ability to with stand oil vapour and saltladen air
	Satisfactory operationing the temperature ranges and with a relative atmosphere humidity of up to 100% at a reference temperature of 45°C
	Tolerance to condensation is assumed
In specially protected control rooms	With a relative atmosphere humidity or 80% at a reference temperature of 45°C
On the open deck	Ability to with stand to temporary flooding by seawater and salt spray

Kondisi temperatur udara sekitar (*ambient temperature*) untuk daerah tropis 45° - 50°C. Peralatan elektronis dirancang dengan pengetesan suhu udara tetap 55°C pada tekanan atmosfer 1000 mbar dan relative humidity 60%. Persyaratan suhu udara ini memperhitungkan pula lokasi penempatan peralatan yang bersangkutan.

Kondisi sekitar lainnya seperti kemampuan menahan pengaruh uap minyak, udara yang mengandung garam, kelembaban dan percikan air laut umumnya berhubungan dengan pemilihan selungkup pelindung sesuai standar IEC publications untuk instalasi listrik di kapal.

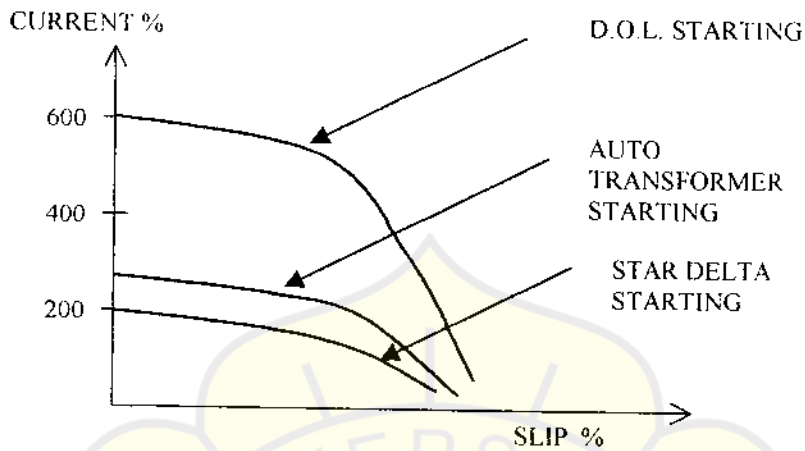
**Tabel Tingkat perlindungan partikel padat dan air**  
( Ref. No. 1 Hal 1-14)

Facility Location	Generators, motors, transfor- mators	Switchgear, electronic equipment & recording devices	Communications equip- ment,display & input units,signaling equip- ments,switches,power sockets junction boxes & control elements	Heating appliances heater & cooking equipment	Lighting fitting
Locked dry electrical spaces	IP 00	IP 00	IP 20	IP 20	IP 20
Dry spaces, dry control rooms, accommodation	IP 20	IP 20	IP 20	IP 20	IP 20
Whellhouse, radio room, control stations	IP 22	IP 22	IP 22	IP 22	IP 22

Wet spaces (e.g. machinery spaces), ventilation (internal), pantries, provision rooms, store rooms	IP 22	IP 22	IP 44	IP 22	IP 22
Machinery spaces below floor (bilge), separator and pump rooms, galleys, laundries, bathrooms & shower rooms	IP 44	IP 44	IP 55	IP 44	IP 34
Pipe tunnels, ventilation trunks (to open deck), cargo holds	IP 55	-	IP 55	IP 55	IP 55
Open deck	IP 56	IP 56	IP 56	IP 56	IP 55

## II.8. Kondisi Operasional Di Kapal

Operasional generator kapal sangat dipengaruhi oleh peralatan-peralatan pengguna yang disuplainya. Tenaga listrik digunakan untuk penerangan yang berdaya kecil sampai motor cargo winch yang mengkonsumsi daya besar.



**Gambar Diagram arus starting pada motor ( Ref No.13 Hal 186 )**

Gambar 2.7 memperlihatkan besarnya arus starting motor terutama pada metode start Direct On Line (DOL) yang bisa mencapai 6–7 kali arus beban nominal (*full load current/flc*) disamping pengaruh design dan jumlah kutub rotor.

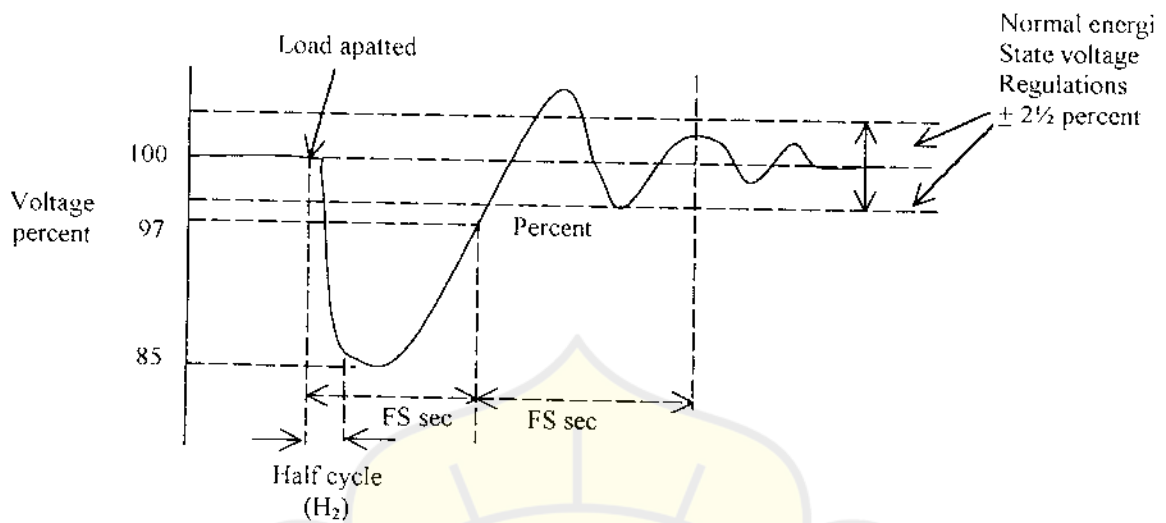
Puncak arus motor induksi pada saat start pada power factor (*pf*) rendah, biasanya antara 0,3 – 0,4 dengan kehilangan daya besar. Meskipun kumparan generator dan kabel hubung adalah subyek dari beban ini dimana beban mekanis pada prime mover tidak seketika naik karena governor dan flywheel akan menjaga kecepatan dalam batas-batas tertentu saat beban mekanis berubah tiba-tiba.

Akibat puncak arus pada *pf* rendah atau beban berdaya besar lainnya (beban kejut) yang terhubung pada instalasi berdaya kecil akan seketika itu

juga menurunkan tegangan generator (*voltage dip*). Biasanya harga *voltage dip* tergantung dari beban yang siap dilayani oleh generator, khususnya beban campuran seperti pemanasan dan penerangan dengan sebagian untuk power motor atau permesinan bantu. *Voltage dip* yang terlalu besar dan lama waktu pulihnya (*recovery time*) akan menyebabkan gangguan pada penerangan dan sebagian besar instrumen elektronis yang sangat peka seperti radar dan instrumen pengukuran.

Automatic *voltage regulator* dari mesin penguat statis tidak bisa mengatur besarnya *voltage dip*, tapi dapat mengatur dan mempengaruhi kecepatan pemulihan ke keadaan beban normal. Gambar 2.8 memperlihatkan karakteristik *voltage respon* penampilan generator pada kondisi peralihan (*transient*). Kondisi ini berlangsung saat start berdaya besar atau sekelompok motor yang bekerja bersamaan.

British Standart 2949 (*Referensi No. 15*) mensyaratkan starting simultan sekelompok motor tidak boleh lebih dari 60% dari kapasitas generator terpasang. Pada kondisi tersebut *voltage* tidak sampai jatuh di bawah 80% atau naik di atas 120% dari rating *voltage* generator dimana beban dengan 60% arus beban pada *pf* antara 0,3 – 0,4 dihubungkan pada generator tanpa beban. *Voltage* harus kembali ke  $\pm 3\%$  dari normal dalam waktu 1,5 detik dan arus sampai tiga kali normal selama 2 detik tidak mengurangi faktor keselamatan.



**Gambar Karakteristik type voltage respons ( Ref No. 13 Hal 42 )**

Waktu pulih menyangkut sistem excitasi generator. Penyediaan excitasi yang luas pada range lebar untuk mencukupi kebutuhan tidak hanya untuk beban normal dan perubahan pf saat starting sekelompok motor tapi juga perubahan akibat gaya luar (kondisi mekanis). Lebih cepat voltage berubah lebih cepat kondisi dipulihkan tanpa mengganggu stabilitas. Kecepatan respon pada rotating exciter sulit dicapai dibanding sistem static exciter. Adanya variasi tegangan dan frekuensi pada operasional generator kapal mensyaratkan semua peralatan listrik di kapal dirancang tetap dapat bekerja dalam keadaan variasi tegangan dan frekuensi yang terjadi.

Sesuai persyaratan klasifikasi sekurang-kurangnya harus tersedia dua generator di kapal. Generator tersebut umumnya diparalelkan untuk efisiensi kerja seperti memperbesar daya terpasang, memudahkan mengatur

kapasitas terpakai sesuai beban (beban kecil satu generator aktif, beban besar paralel aktif), menghemat biaya operasi dan menambah kontinuitas operasi (karena selalu tersedia cadangan siap pakai). Persyaratan paralel generator antara lain : frekuensi harus sama, rangkaian terhubung pada fasa yang sama, tegangan dan jumlah fasa yang sama, hal ini berhubungan dengan sifat generator sebagai mesin serempak.

Aspek operasional lain menyangkut generator berpengerak Main Engine yang banyak dipakai saat ini oleh kapal pelayaran route jarak jauh dengan konstan speed. Selain guna menghemat ruangan juga memanfaatkan putaran konstan low speed diesel engine lewat suatu sistem transmisi. Pengurangan biaya operasi bisa mencapai 50% menyangkut biaya pemeliharaan dan biaya bahan bakar generator set.

Hal yang harus diperhatikan menyangkut pemilihan sistem transmisi. Pilihan bisa dari: transmisi sabuk atau rantai, paralel pada poros propeller, transmisi gearbox dan transmisi diambil dari ujung lain poros Main Engine (*power take off/PTO*). Kesulitan yang dihadapi adalah mempertahankan putaran konstan (stabilitas operasi) pada kondisi pelayaran, saat manuver dan faktor arah putaran poros. Karenanya sistem ini hanya bisa dipakai oleh kapal dengan Controlable Pitch Propeller/CPP. Disamping itu harus tersedia satu Genset terpisah berpengerak sendiri yang bekerja saat kecepatan putaran poros propeller di bawah putaran yang disyaratkan.

## II.9. Rating dan Kontrol Pada Generator AC (Alternator)

Secara umum persyaratan generator kapal (*marine use*) disusun oleh klasifikasi guna mengantisipasi kondisi kerja dan operasional di kapal. Alternator-alternator 3 fasa harus dirancang daya nyatanya sehingga terhindar dari jatuh tegangan dalam jaringan listrik kapal itu sendiri seperti diuraikan pada sub bab terdahulu. Hal ini berlaku pula untuk generator yang bekerja paralel, bentuk gelombang tegangan jaringan tanpa beban harus berbentuk se-sinusoidal mungkin dengan deviasi kurang dari 50% nilai puncak. Tegangan fasa pada sistem 3 fasa tidak boleh berbeda melebihi 0,5% satu terhadap lainnya dibawah beban seimbang tiap fasa. Tegangan fasa biasanya didistribusikan merata pada beban peralatan satu fasa seperti penerangan pada masing-masing geladak.

Untuk alternator dan sistem exciternya diberi ukuran guna memperkenankan alternator bekerja selama dua menit pada 150% dari arus ratingnya dengan pf 0,5 lagging dimana tegangan rating dijaga. Alternator dan penguatnya tersebut harus tahan terhadap hubung singkat baik saat pengetesan maupun saat operasional selama sistem pemutus sirkuit (*circuit breaker*) belum bereaksi, sesuai perhitungan saat perancangan. Pada alternator dengan pengendali tegangan harus diamankan terhadap tegangan terminal tertinggi akibat kesalahan nilai daya masuk.



Kondisi pengendalian transient dimana suatu alternator sedang bekerja pada perputaran dan tegangan keluar normal, tegangannya tidak boleh jatuh sampai 80% atau melebihi 120% ketika suatu beban seimbang yang mempunyai arus nyata dan power factor dihubungkan tiba-tiba atau dipindahkan. Tegangan harus dapat dipulihkan pada harga nominal  $\pm 2,5\%$  dalam waktu kurang dari 1,5 detik. Untuk penggunaan yang belum ditentukan alternator diuji dengan penguatan sampai tegangan keluar nominal dengan tiba-tiba dibebani 60% arus kerjanya pada suatu faktor daya kurang dari 0,4 lagging (tertinggal) dan sesudah kondisi pengendalian mantap, beban sekonyong-konyong dilepaskan.

Selain persyaratan teknis di atas untuk generator yang diparalel dari alternator yang berdaya nominal sama beban aktif harus dibagi sama, daya reaktif masing-masing mesin tidak boleh berbeda melebihi 10% daya reaktif nominal dalam batas 20% sampai berdaya nominal berbeda deviasi yang diijinkan 10% daya reaktif nominal mesin terbesar atau 25% mesin terkecil dipilin nilai terendah.

Suatu perjanjian khusus antara owner dan pabrik diperlukan saat generator dirancang untuk mensuplai motor bonkar muat multi speed atau beban-beban dengan karakteristik pemakaian sama, sehingga generator dan beban bisa dirancang bersama untuk memperoleh pemakaian optimum.

Pengendalian operasional alternator dapat dilakukan dari engine room maupun anjuungan (*bridge*). Guna melindungi peralatan pengguna dan

generatornya dimana sistem pengendali intern (*AVR Excitasi, Governor, Prime Mover*) gagal beroperasi, dibutuhkan sistem pengaman pada sistem transmisi daya antara generator dengan sistem jala-jala (peralatan pengguna).

Bila beban yang ditanggung generator melampaui kapasitas generator, timbul arus berlebihan (*overcurrent*). Dalam hal ini overload protection berupa circuit breaker segera memutuskan beban (*trip*) pada saat beban misal sebesar 125% nominal (*rating 10%-50% over-current*) selama  $\pm 2$  menit. Pada kondisi arus sangat berlebihan (misal saat short circuit) dimana time delay circuit breaker pada overload protection belum tercapai.