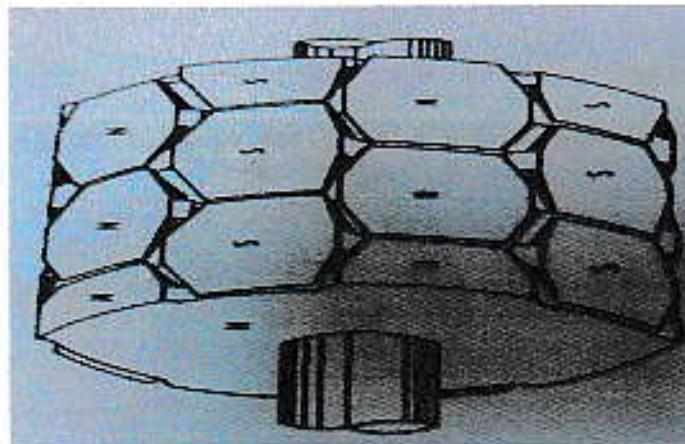




# **DIKTAT KULIAH MERANCANG MESIN LISTRIK**



**Ir. Dedeng Herlan, Msi**

**Dr. Budiyanto, ST. MT**

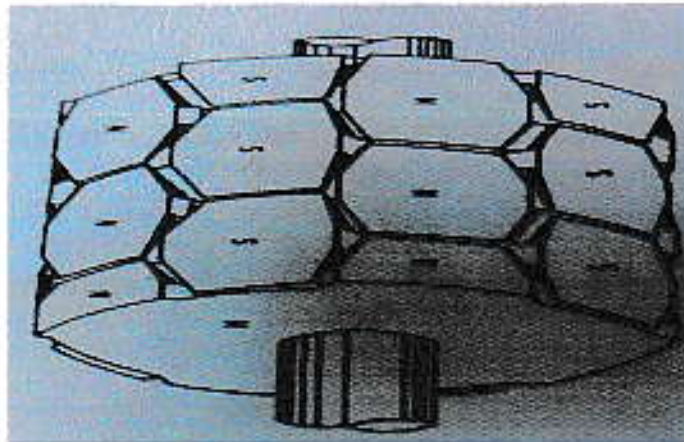
**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH JAKARTA**

**2017**



# **DIKTAT KULIAH MERANCANG MESIN LISTRIK**



**Ir. Dedeng Herlan, Msi**

**Dr. Budiyanto, ST. MT**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH JAKARTA**

**2017**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, tidak lupa shalawat dan salam selalu tercurahkan kepada Rasulullah SAW. Berkat limpahan dan rahmat-Nya penulis mampu menyelesaikan diktat pembelajaran dengan judul “Merancang Mesin Listrik”. Diktat ini dibuat sebagai bahan ajar mata kuliah Instalasi Residensial bagi mahasiswa Universitas Muhammadiyah Jakarta program studi teknik elektro.

Dalam penulisan diktat pembelajaran ini, penulis menyadari masih terdapat kekurangan. Untuk itu kritik, saran dan masukan sangat penulis harapkan guna untuk penyempurnaan diktat ini di masa mendatang. Penulis berharap semoga diktat ini dapat bermanfaat dan menambah wawasan bagi para pembaca khususnya tentang instalasi listrik.

Jakarta, Juli 2017,

Penulis

## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	i
DAFTAR ISI.....	ii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. UMUM.....	1
1.2. FAKTOR-FAKTOR PERENCANAAN .....	1
1.3. STRUKTUR BAHAN-BAHAN MEKANIS .....	2
1.4. SKEMA PERENCANAAN.....	4
BAB II MESIN ARUS SEARAH	
2.1. PERENCANAAN UMUM.....	7
2.2. PERSAMAAN OUTPUT .....	8
2.3. DIMENSI UTAMA .....	14
2.4. BELITAN JANGKAR.....	22
LAMPIRAN JURNAL ELECTRIC GENERATORS and MOTORS: an OVERVIEW	

BAB II  
P E N D A H U L U A N

1 -1. U M U M .

Mesin-mesin listrik menurut para ahli teknik listrik, di definisikan sebagai *suatu peralatan yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, dan atau sebaliknya.*

Jika suatu mesin tertentu bekerja dan berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, maka mesin tersebut dikatakan sebagai "GENERATOR".

Akan tetapi jika mesin itu bekerja dan berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, maka mesin tersebut dikatakan sebagai "MOTOR".

Selain dari itu ada pula mesin lain yang bekerja statis dan berfungsi memindahkan energi listrik dari satu karakteristik menjadi karakteristik lainnya., dan mesin itu dikatakan sebagai "TRANSFORMATOR".

1 - 2. FAKTOR-FAKTOR PERENCANAAN.

Bidang teknik atau teknologi pada umumnya merupakan prinsip pengetahuan hakiki yang berlandaskan kepada ekonomi-terapan dalam kerangka mewujudkan masalah-masalah perencanaan praktis. Oleh karena itu apabila ekonomi-terapan di atas diabaikan dari

masalah perencanaan praktis, maka akibatnya nilai-nilai atau norma-norma keteknikan beserta segala masalahnya akan menjadi sia-sia.

Dalam perencanaan mesin-mesin listrik, harus dipandang bahwa persoalan ekonomi-terapan tersebut telah melandasinya sehingga dengan demikian arti dan hakekat perencanaan tersebut telah memenuhi persyaratan sosio-tekno-ekonomis.

### 1 - 3. STRUKTUR BAHAN-BAHAN.

Dalam perencanaan mesin-mesin listrik, struktur bahan-bahan yang dipergunakan dapat dibagi menjadi beberapa bagian sebagai berikut :

#### 1 - 3. a. BAHAN BAHAN MEKANIS.

Sesuai dengan fungsi utamanya, bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan mesin-mesin listrik harus mampu mentransmisikan dan mengabsorpsi beban-beban mekanis dan stress.

Sifat-sifat mekanis yang harus dimiliki oleh bahan-bahan itu di antaranya; ULTIMATE STRENGTH, ELASTIC LIMIT, YIELD POINT, PERCENTAGE ELONGATION DAN MODULUS OF RESILIENCE.

Adapun contoh umum dari bahan-bahan yang memenuhi syarat seperti di atas adalah ; GRAY-IRON CASTING, CARBON STEEL, dan NON-FERROS METAL.

### 1 - 3. b. BAHAN-BAHAN AKTIF.

Yang dimaksud dengan bahan-bahan aktif disini antara lain sebagai bahan penghantar listrik dan bahan magnetik.

Bahan penghantar yang sering digunakan yakni tembaga dan aluminium, karena kedua jenis bahan ini mempunyai daya hantar arus listrik yang baik sekali.

Sedangkan untuk bahan magnetik selalu dipilih sesuai dengan kebutuhan dan di dasarkan kepada hubungan antara rapat fluksi magnetik dengan intensitas medan magnetik  $B = \mu H$ , dan juga dipilih berdasarkan rugi rugi dengan frekwensi  $p = f(B, f)$ .

Umumnya bahan-bahan magnetik ini dibuat dengan cara lempengan (sheet) yang mempunyai komposisi silicon sebesar 0,8 s/d 4,5 % dengan massa jenis kira-kira sebesar 7,35 s/d 7,8 gr/cm<sup>3</sup>.

### 1 - 3. c. BAHAN-BAHAN ISOLASI.

Ada terdapat beberapa jenis bahan-bahan isolasi yang dipergunakan dalam pembuatan mesin-mesin listrik.

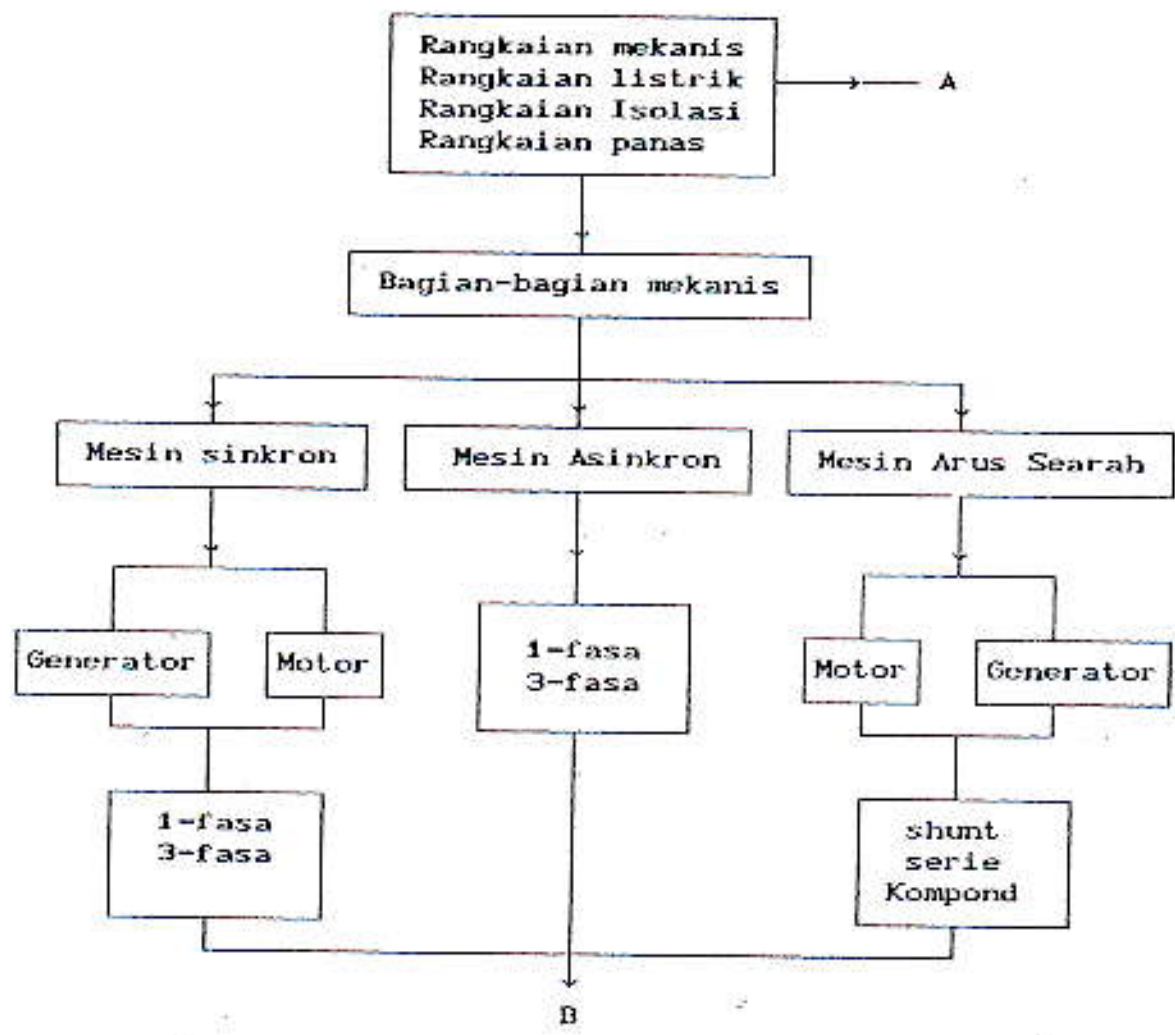
Meskipun beberapa jenis bahan isolasi dapat dipakai, akan tetapi dalam prakteknya selalu dipilih sesuai dengan syarat-syarat umum seperti ; Dielektrik Strength yang tinggi, tahan panas, tahan air, tahan korosi kimiawi dan secara mekanis harus cukup tahan lama.

Persyaratan ini harus di miliki oleh bahan isolasi karena bahan bahan tersebut akan berhubungan langsung dengan

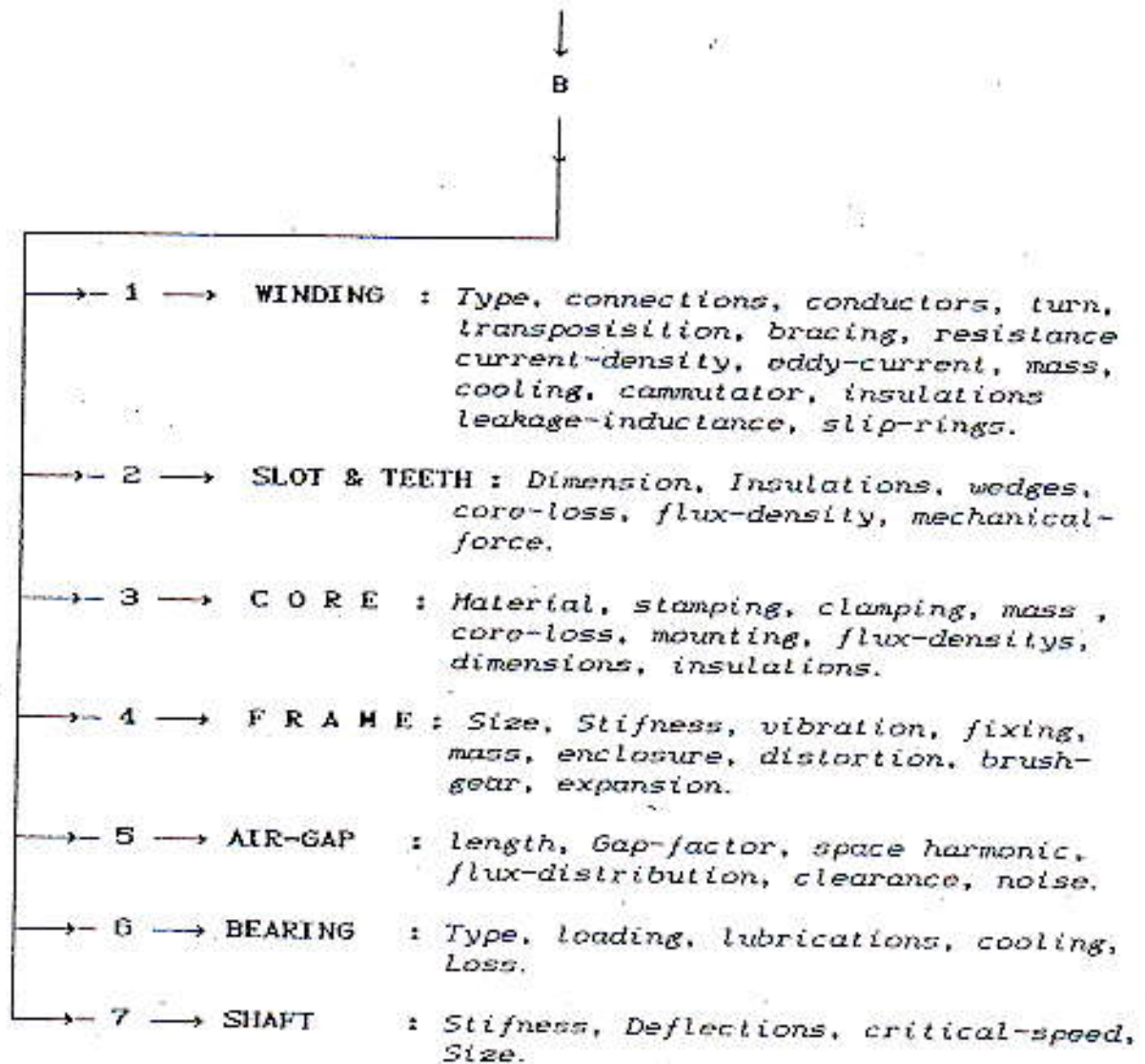
bagian-bagian panas yang disebabkan oleh pengaruh tegangan, kelembaban atmosfer dan lain-lain.

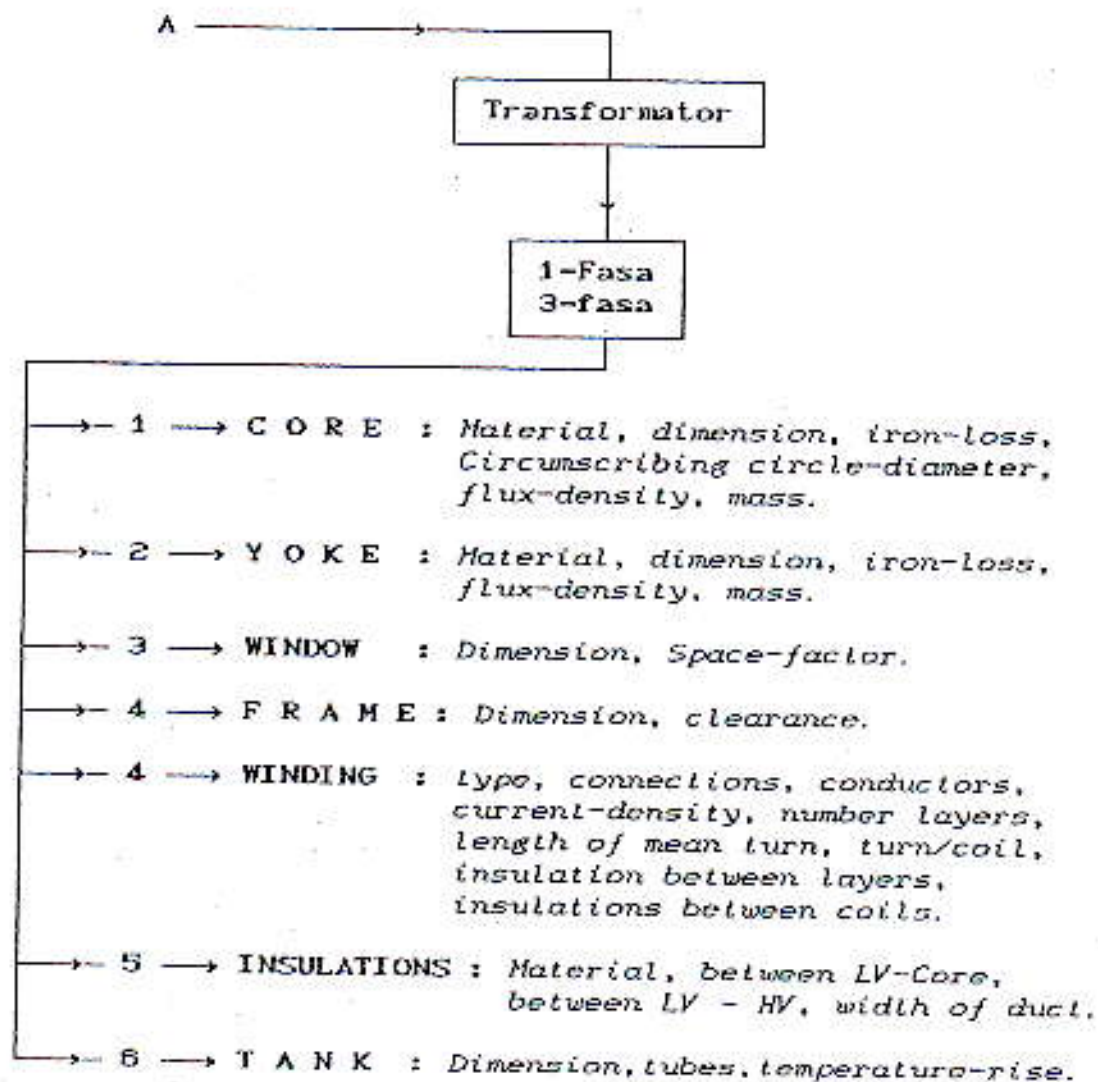
1 - 4. SKEMA PERENCANAAN.

Sesuai dengan pokok-pokok perencanaan yang telah diketahui maka skema perencanaan mesin-mesin listrik ini dapat di susun sebagai berikut :









## BAB II

### MESIN ARUS SEARAH

#### 2. PENDAHULUAN.

Perencanaan dan konstruksi dari semua type motor motor atau generator didasarkan atas fakta-fakta sebagai berikut :

- *Bahwa gaya gerak listrik (ggl) yang ditimbulkan pada penghantar atau sekelompok penghantar di sebabkan oleh adanya interaksi dengan medan magnet.*

*Timbulnya gaya gerak listrik ini bisa dilakukan dengan dua macam cara yakni, penghantarmemotong garis fluksi magnetik atau sebaliknya, tetapi yang jelas bahwa diantara kedua macam aksi tersebut terdapat adanya gerakan relatif satu sama lain.*

- *Bahwa penghantar atau sekelompok penghantar yang berada dalam medan magnetik akan menimbulkan gaya mekanik bila arus listrik dari sumber luar di lewatkan melalui penghantar tersebut.*
- *Bahwa jangkar dari mesin listrik adalah merupakan bagian yang memuat sejumlah penghantar yang akan menimbulkan gaya gerak listrik induksi.*

Dari uraian di atas, cukup jelas bahwa persoalan perencanaan dan konstruksi mesin-mesin listrik pada umumnya ditentukan oleh 2 (dua) HUKUM DASAR yaitu : HUKUM FARADAY dan HUKUM BIOT-SAVART.

Selain dari itu dapat dijelaskan bahwa gaya gerak listrik yang dibangkitkan pada mesin-mesin listrik pada mulanya berupa arus bolak-balik, sehingga dengan demikian pengertian mesin arus searah dibedakan dengan mesin arus bolak-balik adalah terletak pada alat tambahan yang berfungsi untuk mengubah besaran listrik arus bolak-balik tersebut dan alat itu di katakan sebagai : CAMMUTATOR.

## 2 - 1. PERENCANAAN UMUM.

Untuk perencanaan mesin-mesin arus searah, baik generator ataupun motor, detail perencanaan tersebut terbagi menjadi beberapa bagian pokok sebagai berikut :

- *Dimensi Utama*
- *Belitan jangkar*
- *Belitan medan*
- *Kamutator*
- *Rugi-rugi*

## 2 - 2. PERSAMAAN OUTPUT.

Keluaran daya dari mesin arus searah dapat di ekspresikan secara terintegral dalam besaran-besaran seperti : *DIMENSI UTAMA*, *BEBAN SPESIFIK MAGNETIK*, *BEBAN SPESIFIK LISTRIK* dan *KECEPATAN PUTAR*.

Pada mesin arus searah, daya keluaran yang dihasilkan dalam satuan KILO WATT (KW) dinyatakan menurut persamaan sebagai

berikut :

$$\begin{aligned}
 P &= C_o \cdot D^2 L \cdot n \\
 &= (B_{av} \cdot \pi^2 \cdot ac \times 10^{-3}) \cdot D^2 L \cdot n \quad \text{KW}
 \end{aligned}$$

..... (2-1)

dengan :

- $P$  = daya keluaran. (KW)  
 $D$  = diameter jangkar. (Cm)  
 $L$  = panjang jangkar. (Cm)  
 $n$  = kecepatan putar (rps)  
 $ac$  = beban spesifik magnetik. (Amp-cond./meter)  
 $B_{av}$  = beban spesifik listrik. (Weber/m<sup>2</sup>)  
 $C_o$  = koefisien output.

Apabila mesin arus searah ini, bekerja sebagai generator, maka penggerak utama (prime-mover) harus mencatu daya tambahan untuk mengkompensasi rugi-rugi gesekan, rugi-rugi angin, rugi-rugi besi. Sementara itu, jangkar yang menghasilkan daya listrik harus pula mencatu daya tambahan untuk mengkompensasi rugi rugi tembaga jangkar, rugi-rugi tembaga medan sehingga dengan demikian daya yang dihasilkan jangkar untuk generator menjadi :

$$\begin{aligned}
 P_{(a)} &= \text{Daya keluaran} + (\text{rugi-rugi tembaga jangkar} \\
 &\quad + \text{rugi-rugi tembaga medan}) \\
 &= P + (I_a^2 \cdot R_a + I_a^2 \cdot R_m) \\
 P_a &= \text{Daya masukan} - (\text{rugi-rugi gesekan} + \text{rugi-rugi} \\
 &\quad \text{angin} + \text{rugi-rugi besi}) \\
 &= \frac{P}{\eta} - (\text{rugi-rugi gesekan} + \text{rugi rugi angin} \\
 &\quad + \text{rugi-rugi besi})
 \end{aligned}$$

Perbedaan antara daya jangkar dengan daya keluaran nominal (rated power) tidak begitu besar untuk mesin berkapasitas besar, sehingga rugi-rugi gesekan, rugi-rugi angin dan rugi-rugi besi dapat di abaikan.

Oleh karena itu daya jangkar :

$$P_a = \frac{P}{\eta} \quad (\text{KW}) \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

Dalam bentuk daya keluaran, dapat ditulis persamaan sebagai berikut :

$$P = (B_{av} \cdot \pi^2 \cdot ac \times 10^{-3}) \cdot \eta \cdot D^2 L n \quad (\text{KW}) \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

Pers.(2-3) dapat pula disusun dalam bentuk lain dengan melibatkan besaran-besaran fluksi, tegangan, jumlah penghantar jangkar dan arus jangkar.

$$\begin{aligned} P_a &= \eta \cdot E \cdot I_a \times 10^{-3} \\ &= \eta \cdot \emptyset \cdot Z \cdot n \cdot \frac{P}{a} \cdot I_a \times 10^{-3} \quad \text{KW} \quad \dots\dots (2-4) \end{aligned}$$

dengan :  $\emptyset$  = fluksi persatuan kutub (Weber)  
 $Z$  = banyaknya penghantar dalam jangkar  
 $a$  = jumlah lintasan paralel

Bukti bahwa Pers.(2-3) sama dengan Pers.(2-4) dapat diturunkan sebagai berikut :

- Total beban magnetik (TBM) adalah total fluksi yang mengelilingi jangkar pada celah udara, atau dengan kata lain sebagai banyaknya fluksi persatuan kutub dikalikan

dengan banyaknya kutub.

$$TBM = p \cdot \theta \quad \text{weber} \quad \dots \dots \dots (2-5)$$

- Sedangkan beban spesifik magnetik (BSM) adalah TBM per satuan luas lintasan fluksi pada celah udara.

$$BSM = \frac{TBM}{\pi \cdot D \cdot L} = \frac{p \cdot \theta}{\pi \cdot D \cdot L}$$

atau

$$B_{av} = \frac{p \cdot \theta}{\pi \cdot D \cdot L}$$

karena langkah kutub  $\tau = (\pi \cdot D/p)$ , maka :

$$B_{av} = \frac{\theta}{\tau \cdot L} \quad \text{Weber/m}^2 \quad \dots \dots \dots (2-5a)$$

dengan :  $\tau$  = pole pitch = langkah kutub.

- Total beban listrik (TBL) adalah total jumlah ampere-cond. yang mengelilingi jangkar pada celah udara atau dengan kata lain sebagai arus yang mengalir lewat tiap-tiap penghantar pada penghantar dikalikan dengan banyaknya penghantar pada jangkar tersebut.

$$TBL = I_z \cdot Z \quad (\text{Amp-cond.})$$

- Sedangkan beban spesifik listrik (BSL) adalah sama dengan TBL persatuan keliling jangkar pada celah udara.

$$BSL = \frac{TBL}{\pi \cdot D} = \frac{I_z \cdot Z}{\pi \cdot D}$$

ini berarti bahwa  $TBL = ac$ , dengan demikian :

$$ac = \frac{I_z \cdot Z}{\pi \cdot D} \quad (\text{Amp-cond./meter}) \quad \dots \dots (2-5b)$$

Dari Pers.(2-4) terlihat dengan jelas bahwa daya jangkar ( $P_a$ ) merupakan produk dari total beban magnetik (TBM), total beban listrik (TBL), kecepatan putar dan efisiensinya.

Karena :  $I_a$  = total arus nominal yang dikeluarkan oleh jangkar.  
 $a$  = jumlah lintasan paralel.

maka :

$$I_z = \frac{I_a}{a}$$

dengan demikian Pers-4, dapat dituliskan kembali menjadi :

$$P_a = (p \cdot \Phi \cdot (I_z \cdot Z) \cdot \eta \cdot n \times 10^{-3}) \dots \dots \dots (2-5c)$$

Pers.(2-5) memberikan indikasi bahwa daya output dapat di susun dalam bentuk besaran spesifik sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P_a &= (B_{av} \cdot \pi \cdot D \cdot L) (\pi \cdot D \cdot ac) \cdot n \cdot \eta \times 10^{-3} \\ &= B_{av} \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot L \cdot ac \cdot n \cdot \eta \times 10^{-3} \\ &= (B_{av} \cdot \pi^2 \cdot ac \times 10^{-3}) \cdot n \cdot \eta \cdot D^2 L \quad \text{KW} \\ &\dots \dots \dots (2-5d) \end{aligned}$$

ternyata bahwa Pers.(2-5d) sama dengan Pers.(2-3), ini berarti hasil analisa yang telah diuraikan di atas terbukti.

Dalam kebanyakan hal terutama untuk keperluan studi, yang paling sering di pakai adalah Pers.(2-4), akan tetapi tidak demikian halnya dalam perencanaan praktis.



Hal ini tentunya mudah sekali dipahami karena dalam perencanaan praktis tolok ukur yang di pakai adalah standarisasi seperti ; tegangan nominal, daya nominal, putaran nominal dan data-data spesifikasi lainnya.

Oleh karena itu akan lebih disukai dan lebih banyak di pakai bentuk Pers-(2-3). Dalam perencanaan praktis biasanya besaran-besaran seperti ;  $P$ ,  $E$ ,  $n$  dan  $n$  telah ditentukan terlebih dahulu, sementara variabel-variabel lain yang saling terkait harus di selidiki sampai perencanaan tersebut memberikan hasil yang diharapkan. Variabel yang dimaksud yang harus di selidiki antara lain :  $B_{av}$ ,  $ac$ ,  $p$ ,  $Z$  dan  $a$  sehingga dengan variabel variabel ini, Dimensi Utama  $D^2L$  dan cara pemisahannya menjadi  $D$  dan  $L$  bisa dipastikan dengan baik sekali. Namun demikian perlu juga diketahui bahwa selain variabel variabel yang harus di selidiki, juga batasan batasan variabel lain juga turut menentukan. Variabel-variabel yang di maksud disini adalah besaran variabel berdasarkan percobaan atau pengalaman para ahli seperti; perbandingan lengkung kutub dengan langkah kutub, rapat fluksi maksimum yang di izinkan pada gigi. Untuk menentukan besaran Dimensi Utama berikut pemisahannya menjadi  $D$  dan  $L$  ini bisa dilakukan dengan cara berulang sesuai dengan batasan-batasan variabel yang telah ditentukan sampai besaran dimensi utama tersebut memenuhi persyaratan.

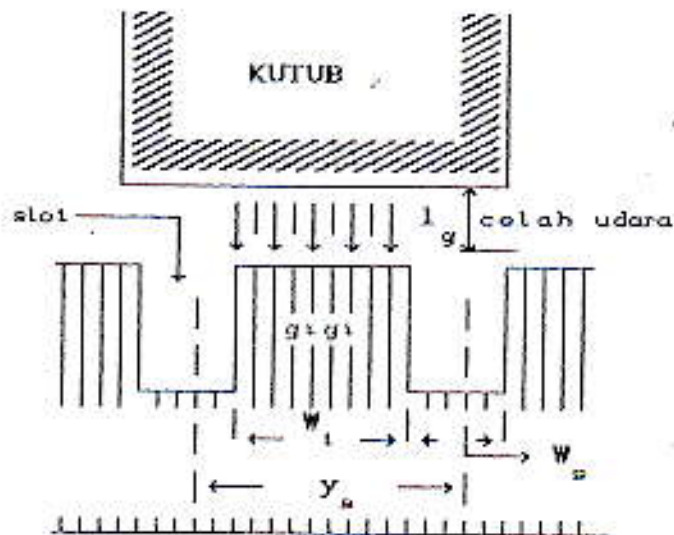
## 2 - 3. DIMENSI UTAMA.

Untuk menentukan dimensi utama  $D^2L$  berikut pemisahannya menjadi  $D$  dan  $L$ , perlu diperhatikan syarat-syarat dan batasan batasan variabel sebagai berikut :

### 2 - 3.a. PEMILIHAN BEBAN SPECIFIK MAGNETIK

Faktor-faktor yang mempengaruhi harga beban spesifik magnetik ini ( $B_{av}$ ) antara lain : rugi-rugi besi, rapat fluksi maksimum pada gigi  $B_t$  dan arus magnetisasi.

Hubungan antara rapat fluksi maksimum pada gigi dengan beban spesifik magnetik yang diperlukan pada celah udara dapat di analisis sebagai berikut ; pandanglah sebuah mesin arus searah yang mempunyai sejumlah slot jangkar sebanyak  $S$  (Gambar-1).



Gambar-1.

Fluksi di atas satu langkah kutub (Slot-pitch) adalah :

$$\frac{p \cdot \theta}{S} = \frac{p}{S} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot B_{av}}{p} = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot B_{av}}{S} \\ = y_s \cdot L \cdot B_{av} \dots\dots (2-6)$$

dengan :  $y_s = \frac{\pi \cdot D}{S}$  = langkah slot (Slot-pitch)

sedangkan luas gigi =  $w_t \cdot L$  , jadi rapat fluksi pada gigi :

$$B_t = \frac{\text{fluksi pada tiap-tiap gigi}}{\text{luas tiap-tiap gigi}} \\ = \frac{y_s \cdot L \cdot B_{av}}{w_t \cdot L} = \frac{y_s}{w_t} \cdot B_{av} \dots\dots\dots (2-6.a)$$

akan tetapi dari bentuk medan magnetik yang melintas pada celah seperti terlihat pada Gambar-2, diketahui bahwa :

$$B_{av} = k_f \cdot B_g \quad \text{atau} \quad B_g = \frac{B_{av}}{k_f}$$

dengan :  $B_g$  = rapat fluksi maksimum pada celah

$k_f$  = faktor bentuk medan magnetik yang dalam praktek nyamendekati sama dengan perbandingan antara lengkung-kutub dan langkah kutub.

Jadi harga  $B_{av}$  dapat dituliskan menjadi :

$$B_{av} = \psi \cdot B_g \dots\dots\dots (2-6.b)$$

persamaan (2-6.a) berubah menjadi :

$$B_t = \frac{y_s}{w_t} \cdot \psi \cdot B_g \quad \text{atau} \quad \frac{B_t}{B_g} = \frac{y_s \cdot \psi}{w_t} \dots\dots (2-6.c)$$

Persamaan (2-6.c) memberikan petunjuk bahwa perbandingan harga  $B_t$  terhadap  $B_g$  bisa dianggap tetap meskipun harga  $\psi$  bergantung sepenuhnya pada panjang jangkar dan langkah kutub.

## 2 - 3.b. BENTUK KUTUB.

Untuk memperoleh keserasian antara bentuk kutub dan panjang jangkar, biasanya lebar badan kutub  $b_p$  di ambil sebesar kira kira  $0,45 + 0,55$  langkah-kutub, sehingga perbandingan panjang jangkar dengan langkah-kutub diperkirakan sebesar :

$$\frac{L}{\tau} = 0,45 + 1,10 \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

Dalam praktek, biasanya dipilih harga :

$$\frac{L}{\tau} = 0,70 + 0,90 \quad \dots\dots\dots (2-7a)$$

Akan tetapi kadang-kadang pula bentuk kutub yang dirancang lebih disukai yang mempunyai bentuk bujur-sangkar (Square pole face), dimana lengkung-kutub sama dengan panjang jangkar, sehingga dengan demikian harga perbandingan lengkung-kutub dan langkah-kutub berkisar antara :

$$\psi = 0,64 + 0,72 \quad \dots\dots\dots (2-7b)$$

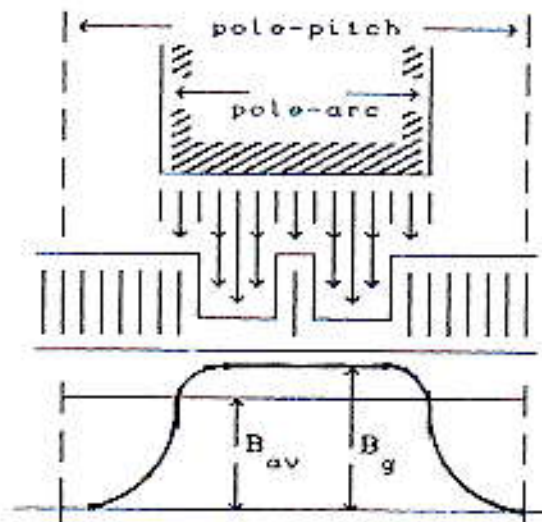
## 2 - 3.c. FREKWENSI.

Frekwensi fluk reversal pada mesin arus searah, dinyatakan sebagai berikut :  $f = \frac{P \cdot n}{2} \quad \dots\dots\dots (2-8)$

Untuk menghindarkan rugi-rugi jangkar dan rugi-rugi gigi yang terlalu tinggi, maka frekwensi fluk reversal ini biasanya di batasi kira-kira :  $f = 25 + 50$  Hz.

## 2 - 3.d. SALURAN VENTILASI.

Untuk melepaskan panas akibat rugi-rugi besi, rugi-rugi tembaga jangkar ke permukaan udara bebas, maka jangkar perlu



Gambar-2.

Dalam prakteknya, harga  $B_t$  untuk mesin-mesin arus searah di batasi kira-kira sampai  $2,2 \text{ Weber/m}^2$ .

Berdasarkan hasil-hasil percobaan, harga beban spesifik magnet dapat ditentukan dengan melihat pada hubungan fluksi maksimum pada celah dengan daya output seperti tertera pada Tabel-1.

Tabel-1.

Output (KW)	$B_g$ (Weber/m <sup>2</sup> )
5	0,575
10	0,650
20	0,700
50	0,775
100	0,820
200	0,870
500	0,915
750	0,945
1 000	0,960
2 000	0,975
3 000	0,995
4 000	1,010
5 000	1,020
10 000	1,050

diberi ventilasi yang cukup sehingga mesin dapat dioperasikan secara terus menerus.

Lebar ventilasi ini biasanya berkisar antara  $W_d = 0,8 + 1,0$  Cm dan langkahnya kira-kira tiap-tiap 7 Cm tumpukan bahan core jangkar, sehingga dengan demikian panjang bersih jangkar bisa ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$L_i = k_i (L - n_d \cdot W_d) \dots\dots\dots (2 - 9)$$

dengan :  $L_i$  = panjang bersih jangkar (Cm)

$W_d$  = Lebar ventilasi (Cm)

$n_d$  = jumlah ventilasi jangkar.

Dengan pertimbangan saluran ventilasi di atas, besaran besaran lain yang saling terkait dapat diperiksa berdasarkan perbandingan antara  $L_i$  dan D seperti pada Tabel-2.

Tabel-2.

D	$L_i / D$	P	$B_{av}$	ac
0,10 0,50	0,78	2	0,30 0,36	6 000 10 000
0,20 0,30 0,40	0,47	4	0,43 0,50 0,56	13 000 17,500 21 000
0,50 0,75	0,32	6	0,59 0,64	25 000 31 000
1,00 1,50	0,24	8	0,66 0,70	35 000 37 000
2,00	0,19	10	0,72	38 000
2,50	0,16	12	0,74	39 000
3,00	0,12	16	0,75	40 000

### 2 - 3.e. KECEPATAN JANGKAR.

Untuk mesin-mesin arus searah berukuran besar, kecepatan putar yang tinggi akan lebih disukai, akan tetapi mengingat bagian-bagian mekanis akan menerima gaya dan stress, maka dalam hubungan ini kecepatan putar dibatasi sebesar :

$$V_d \leq 50 \text{ meter/detik}$$

### 2 - 3.f. PEMILIHAN BEBAN SPECIFIK LISTRIK.

Faktor-faktor yang mempengaruhi beban spesifik listrik antara lain : *Kenaikan suhu, kecepatan putar, tegangan kerja, ukuran dimensi mesin, reaksi jangkar dan kamutasi.*

Dalam hubungan ini, harga ac dapat dipilih berdasarkan daya output seperti tersusun pada Tabel-3.

Tabel-3.

Output (KWD)	ac (Amp-Cond)
5	15 000
10	17 500
20	19 500
50	25 000
100	27 500
200	31 000
500	35 000
750	37 500
1 000	40 000
2 000	43 000
3 000	47 000
4 000	48 000
5 000	49 500
10 000	51 000

2 - 3.g. PEMILIHAN JUMLAH KUTUB.

Pedoman untuk pemilihan jumlah kutub yang sesuai dengan kebutuhan, dapat ditentukan dengan batasan-batasan variabel sebagai berikut :

- a. Frekwensi fluk reversal :  $f = 25 + 50$  Hz.
- b. Arus jangkar persatuan lintasan paralel dibatasi tidak lebih dari :  $\frac{I^a}{a} \leq 200$  Ampere.  
 atau arus jangkar persatuan lengan sikat dibatasi tidak lebih dari :  $\frac{2.I^a}{a} \leq 400$  Ampere.

Pedoman lain yang juga dapat digunakan untuk pemilihan jumlah kutub adalah seperti tertera pada tabel-4.

Tabel-4.

Kecepatan putar sedang dan tinggi		
Output (KW)	Putaran (rpm)	Jumlah Kutub
s/d 2	di atas 1 250	2
2 s/d 100	s/d 1 250	4
50 s/d 300	s/d 1 000	4 s/d 6
200 s/d 500	s/d 600	8 s/d 10
500 s/d 1 000	s/d 500	di atas 10
Kecepatan putar rendah		
Output (KW)	Putaran (Rpm)	Jumlah Kutub
30 s/d 150	200 s/d 300	6
200 s/d 250	125 s/d 250	8
250 s/d 500	100 s/d 150	10



2 - 3.h. PENENTUAN LANGKAH-KUTUB.

Langkah kutub yang sesuai, dapat diperoleh setelah diameter jangkar D dipilih yang cocok, dan penentuan langkah kutub ini berfungsi untuk memeriksa kebenaran jumlah kutub yang dipilih. Tabel-5 memberikan pedoman harga-harga pendekatan langkah kutub yang sudah biasa dipergunakan.

Tabel-5.

Jumlah Kutub	Langkah kutub (Cm)
2	s/d 24
4	24 dan 35 s/d 40
6	35 s/d 45
di atas 8	45 s/d 55

2 - 3.i. DIAMETER JANGKAR MAKSIMUM.

Diameter jangkar D dapat ditentukan berdasarkan daya jangkar yang direncanakan. Akan tetapi menentukan harga D dengan cara ini hanya sebagai tolok ukur dasar yang hasilnya belum tentu sesuai dengan apa yang diharapkan.

Daya jangkar :  $P_a = E \cdot I_a \times 10^{-3}$

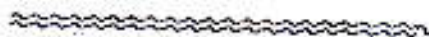
dengan : E = ggl persatuan penghantar dikali jumlah penghantar

persatuan lintasan paralel =  $e_z \cdot \frac{Z}{a}$

$$\begin{aligned}
 P_a &= e_z \cdot \frac{Z}{a} \cdot I_a \times 10^{-3} \\
 &= e_z \cdot I_z \cdot Z \times 10^{-3} \\
 &= e_z \cdot (n \cdot D \cdot ac) \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

atau

$$D = \frac{P \times 10^{-3}}{e_z \cdot n \cdot ac} \quad (\text{Cm}) \dots\dots\dots (2-10)$$



## 2 - 4. BELITAN JANGKAR.

### 2 - 4.1. KOIL DAN SISI KOIL.

Mengingat keberadaan kamutator dengan segala fungsinya, maka belitan jangkar untuk mesin arus searah selalu berbentuk tertutup. Sesuai dengan bentuk tertutup tersebut, belitan jangkar akan mempunyai paling sedikit 2(dua) lapisan yakni masing-masing terdiri dari sisi-koil yang ditempatkan pada bagian atas dari salah satu slot dan sisi-koil yang ditempatkan pada bagian bawah slot lainnya.

Adapun penempatan diantara keduanya kira-kira sejauh 1(satu) langkah-kutub (pole-pitch). Koil pada jangkar bisa terdiri dari beberapa lilitan, bila suatu koil mempunyai hanya satu lilitan maka koil ini disebut sebagai "*Single-turn Coil*". Dan apabila koil mempunyai lebih dari satu lilitan maka koil tersebut disebut sebagai "*Multi-turn Coil*".

Dalam perencanaan mesin arus searah, banyaknya slot-slot yang dibutuhkan adalah sama dengan banyaknya koil-koil, jika slot tersebut berisikan 2(dua) sisi-koil yang masing-masingnya satu-lapis.

Akan tetapi pada mesin-mesin yang mempunyai kecepatan putar rendah dan tegangan kerja yang tinggi maka jumlah koil-koil akan lebih banyak dan oleh sebab itu setiap slot bisa berisikan 4, 6, 8 atau lebih sisi-koil.

## 2 - 4.2. PENOMORAN SISI-KOIL.

Agar diperoleh susunan yang baik dan mudah dipahami maka dalam perencanaan belitan jangkar di adakan skema penomoran sebagai berikut :

*"Semua sisi-koil atas pada tiap-tiap slot diberi nomor ganjil, dan sisi-koil bawah diberi nomor genap".*

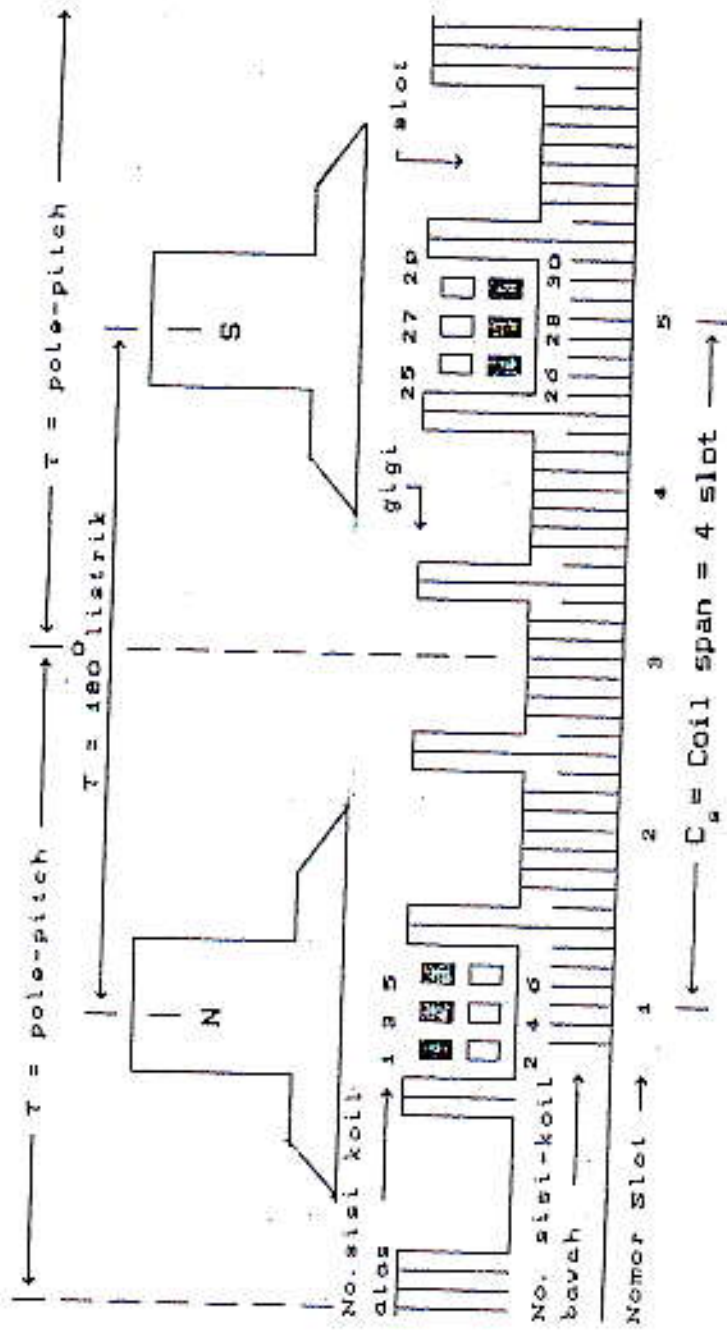
Sebagai contohnya ; bila dalam perencanaan belitan jangkar diketahui sebanyak 8 sisi-koil per slot, ini berarti bahwa slot permulaan yang diisi oleh sisi-koil diberi nomor 1, sedang kan sisi-koilnya masing-masing mempunyai nomor 1, 3, 5, 7 untuk bagian atas dan nomor 2, 4, 6, 8 untuk sisi-koil bagian bawah.

## 2 - 4.3. JARAK ANTARA KOIL.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa koil-koil disusun sedemikian rupa sehingga berbentuk tertutup dan jarak antara sisi-koilnya mendekati kira-kira satu langkah kutub.

Oleh karena itu Jarak antara koil (Coil-span) didefinisikan sebagai banyaknya slot yang dirangkum oleh 2(dua) sisi-koil dari sebuah koil dan dinotasikan dengan  $C_s$ .

Untuk contohnya : misalkan diketahui sebuah mesin arus searah mempunyai kutub 6 buah dan jumlah slot adalah 24, maka untuk memperoleh 1(satu) langkah-kutub banyaknya slot yang dirangkum adalah  $= 24/6 = 4$  slot atau dengan kata lain coil-span  $C_s = 4$ .



Gambar-3.

Sedangkan susunan koil tersebut antara lain sebagai berikut :  
 Jika sisi-koil atas untuk pertama kalinya ditempatkan pada slot No-1 maka sisi-koil bawah harus ditempat pada no.  $(1 + 4)$  = No.5 (Lihat gambar-3).

#### 2 - 4.4. TIPE BELITAN.

Pada mesin-mesin arus searah, ada terdapat 2(dua) tipe belitan yang telah umum dipakai yakni :

- 1 Tipe Lap Winding ; Simplex Lap, Duplex Lap.
- 2 Tipe Wave Winding ; Simplex Wave, Duplex Wave.

Perbedaan fisik diantara kedua tipe belitan tersebut adalah terletak pada :

- a. Banyaknya rangkaian antara sikat-sikat positif & negatif.
- b. Cara hubungan ujung-ujung koil dengan segmen kamutator.

dalam perencanaan belitan jangkar ini baik tipe Lap-Winding maupun tipe Wave-Winding akan dikenal beberapa istilah sebagai

- berikut :
- |                  |                      |
|------------------|----------------------|
| 1. Back Pitch    | 2. Front Pitch       |
| 3. Winding Pitch | 4. Cammutator pitch. |

##### 1. BACK PITCH.

Back pitch didefinisikan sebagai "jarak antara sisi-koil atas dan sisi-koil bawah dari sebuah koil yang diukur mengelilingi permukaan jangkar dan dinotasikan  $y_b$ ".

Karena back pitch ini merupakan selisih antara bilangan genap (sisi-koil bawah) dan bilangan ganjil (sisi-koil atas), ini berarti bahwa back pitch ditentukan oleh ukuran koil dan kira-kira mendekati sama dengan sisi-koil per kutub.

## 2. FRONT PITCH.

Front-pitch didefinisikan sebagai jarak antara 2 (dua) sisi koil yang dihubungkan dengan segmen komutator yang sama dan dinotasikan  $y_f$ .

Bilangan  $y_f$  ini baik untuk tipe lap-winding maupun tipe wave winding mempunyai bilangan ganjil. Akan tetapi bilangan ini tidak ditentukan oleh ukuran koilnya melainkan semata-mata ditentukan oleh tipe belitannya.

## 3. COMMUTATOR PITCH

Komutator pitch didefinisikan sebagai jarak antara 2 (dua) segmen komutator, dimana terdapat 2 (dua) ujung-ujung koil dihubungkan pada segmen komutator tersebut, dan dinotasikan  $y_c$ . Pada simplex lap winding, segmen-segmen dimana ujung-ujung koil dihubungkan satu sama lain tercapai setelah berjalan satu koil. Sedangkan pada simplex wave winding, segmen-segmen dimana ujung-ujung koil dihubungkan satu sama lain tercapai setelah  $p/2$  koil, atau berjalan setelah tercapai setengah jumlah kutub.

Ilustrasi gambar-4a, memperlihatkan bahwa : Untuk simplex lap

winding berlaku :  $y_b = 12 - 1 = 11$

$$y_f = 12 - 3 = 9$$

$$y_c = 2 - 1 = 1$$

$$Y = 11 - 9 = 2$$

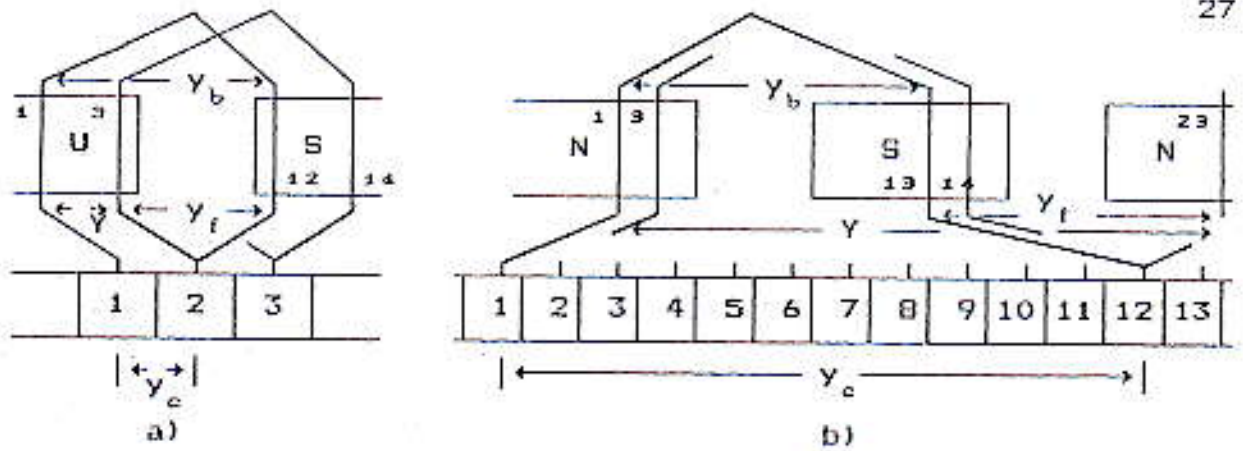
Ilustrasi Gambar-4b, memperlihatkan bahwa : Untuk Simplex Wave

winding berlaku :  $y_b = 12 - 1 = 11$

$$y_f = 23 - 12 = 11$$

$$y_c = 12 - 1 = 11$$

$$Y = 11 + 11 = 22$$



Gambar-4.

4. WINDING PITCH.

Winding pitch didefinisikan sebagai jarak antara permulaan 2(dua) koil yang berturutan, yang di ukur dari sisi-koil yang bersangkutan dan dinotasikan Y.

Untuk tipe lap winding, berlaku :  $Y = y_b - y_f$

Untuk tipe wave winding,beralku :  $Y = y_b + y_f$

2 - 4.5. SIMPLEX LAP WINDING.

Sesuai dengan keadaan back pitch ( $y_b$ ),yakni merupakan bilangan ganjil dan kira-kira mendekati sama dengan sisi-koil per kutub.

Oleh karena itu dalam simplex lap winding akan berlaku :

$$y_b = \frac{2.C}{p} \pm K \dots\dots\dots (2-11)$$

dengan : C = banyaknya koil pada jangkar

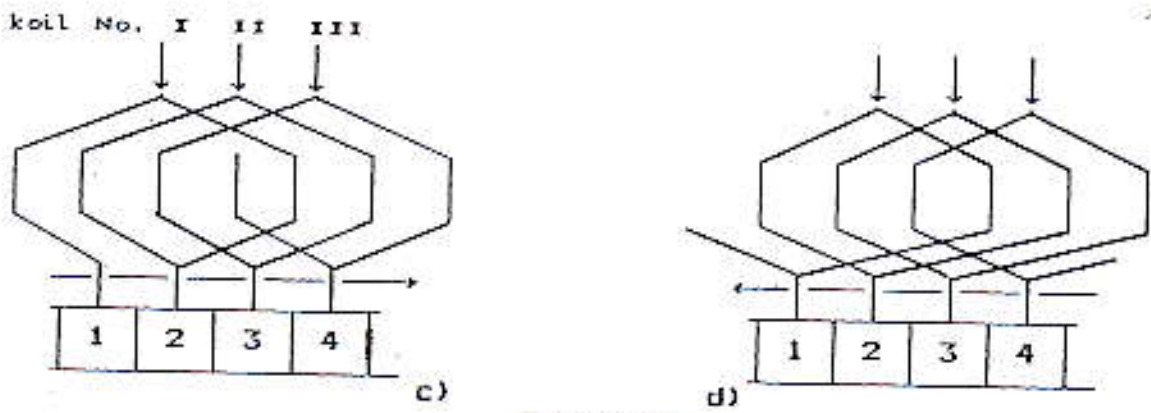
p = jumlah kutub

K = bilangan dengan harga terendah = 1

fanda  $\pm$  pada pers.(2-11), menyatakan terdapat 2(dua) cara

hubungan antara sisi-koil jangkar dan kamutator. Cara tersebut antara lain ; 1. Progressive Winding  
2. Retrogressive Winding.

Pada progressive winding, sambungan dengan kamutator di sekeliling kamutator mempunyai arah yang sama seperti langkah koil mengelilingi jangkar.



Gambar-4

Dari gambar-4c. terlihat bahwa akhir koil I dihubungkan dengan permulaan koil II yang arahnya menuju kekanan. Dengan demikian maka :

winding pitch  $Y = y_b - y_f = 12$   
 Kamutator pitch  $y_c = +1$

Sedangkan pada retrogressive winding, sambungan dengan kamutator disekeliling kamutator berlawanan arah dengan koil yang mengelilingi jangkar. Dengan demikian maka :

Winding pitch  $Y = y_b - y_f = 12$   
 Kamutator pitch  $y_c = -1$

Atau secara umum, winding pitch dan kamutator pitch untuk tipe simplex Lap winding :

$$\left. \begin{matrix} Y = \pm 2 \\ y_c = \pm 1 \end{matrix} \right\} \dots\dots\dots (2-12)$$



#### 2 - 4.6. SIMPLEX WAVE WINDING.

Pada belitan ini, di mulai dari satu segmen kamutator dan penjejakan belitannya dari koil ke koil. Setelah satu langkah mengelilingi jangkar, maka penjejakan belitan tersebut akan tiba kembali pada segmen kamutator akhir dari mana penjejakan mula dilakukan. Seperti halnya pada simplex lap winding, maka akan berlaku pula persamaan (2-11).

Untuk progressive winding :

$$\text{Winding pitch } Y = \frac{2C + 2}{p/2} \dots\dots\dots (2-12a)$$

$$\text{Kamutator pitch } y_c = \frac{C + 1}{p/2} \dots\dots\dots (2-12b)$$

Untuk retrogressive winding :

$$\text{Winding pitch } Y = \frac{2C - 2}{p/2} \dots\dots\dots (2-12c)$$

$$\text{Kamutator pitch } y_c = \frac{C - 1}{p/2} \dots\dots\dots (2-12d)$$

Jadi secara umum, winding pitch dan kamutator pitch untuk tipe simplex wave winding :

$$Y = \frac{2C \pm 2}{p/2} \dots\dots\dots (2-12e)$$

$$y_c = \frac{C \pm 1}{p/2} \dots\dots\dots (2-12f)$$

**Contoh soal :** Berikanlah lay-out dalam bentuk "winding table, squence diagram dan penomoran sisi-koil dalam slot" untuk tipe simplex-lap winding.

Bila diketahui jumlah kutub 6, 30 buah slot, 30 buah segmen kamutator dan susunan belitan adalah progressive.

Penyelesaian :

Jumlah koil = jumlah segmen kamutator = 30

Jumlah slot per kutub =  $30/6 = 5$

Jumlah sisi-koil =  $2C = 2 \times 30 = 60$

Jadi jumlah sisi-koil per slot =  $60/30 = 2$

Dari pers. (2-11) :  $y_b = \frac{2.C}{p} \pm K = \frac{2.30}{6} \pm 1 = 9$  atau 11

Jika dipilih  $y_b = 9$  :

Dalam hal ini, sisi-koil No.1 yakni pada bagian atas slot No.1 akan dihubungkan dengan sisi-koil No.(1 + 9) = No.10 yang di tempatkan pada dasar slot No.5, ini berarti coil-span  $C_c = 4$  slot atau dengan kata lain coil-span tersebut tidak mencapai satu langkah kutub.

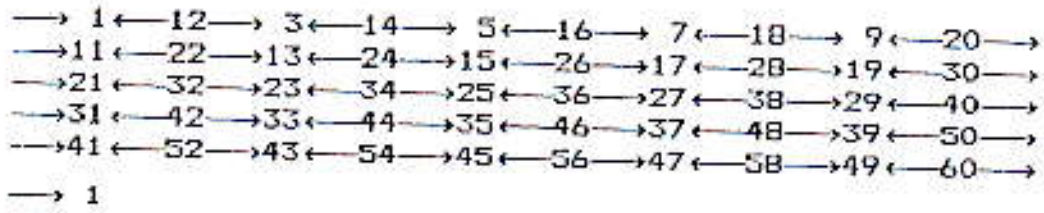
Jika dipilih  $y_b = 11$  :

Dalam hal ini, sisi-koil No.1 yakni pada bagian atas slot No.1 akan dihubungkan dengan sisi-koil No.(1 + 11) = No.12 yang di tempatkan pada dasar slot No.6, ini berarti coil-span = 5 slot atau dengan kata lain coil-span tersebut mencapai satu langkah kutub.

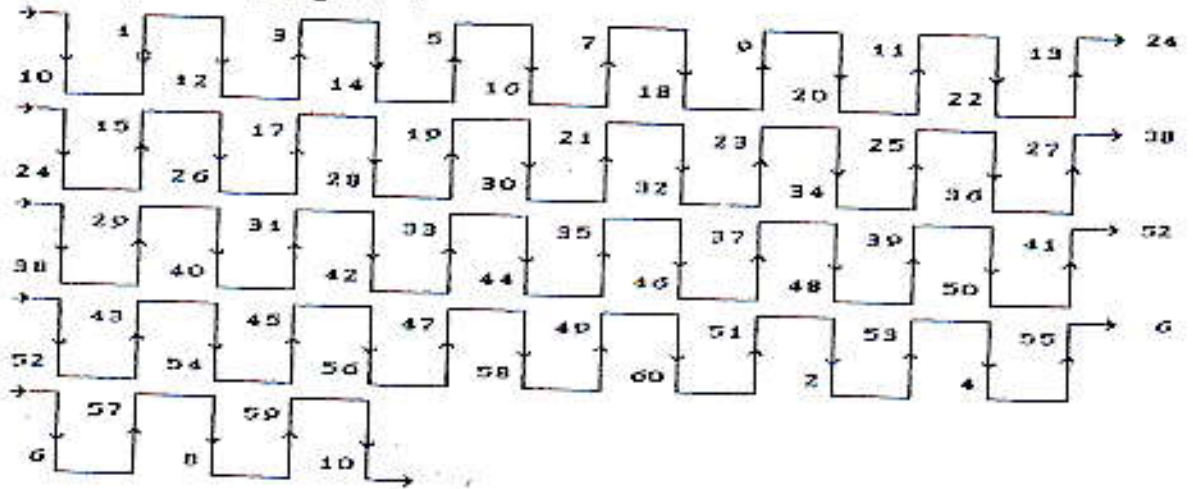
Ingat !!! Jumlah slot per kutub  $30/6 = 5$  slot, oleh karena itu dalam perhitungan ini dipilih  $y_b = 11$  sehingga dengan demikian untuk progressive winding diperoleh :

$$y_b = 11 \quad ; \quad y_l = 9 \quad ; \quad Y = +2 \quad ; \quad y_c = +1$$

a). Winding table :



b). Sequence diagram :



Contoh Soal : Gambarkan lay-out dalam bentuk "winding table, sequence diagram dan penomoran sisi-koil" untuk simplex wave winding.  
Bila diketahui jumlah kutub 4, 25 slot, 30 buah segmen komutator dan susunan belitan progressive

Penyelesaian :

$$\text{Jumlah slot per kutub} = 25/4 = 6,25$$

$$\text{Jumlah sisi-koil} = 2.C = 2.25 = 50$$

$$\text{Jumlah sisi-koil per slot} = 50/25 = 2$$

$$\text{Winding pitch} : Y = \frac{2.C \pm 2}{p/2} = \frac{(2.25) \pm 2}{4/2} = 24 \text{ atau } 26$$

Karena susunan belitan adalah progressive winding, maka winding pitch dipilih  $Y = 26$

Dalam hal ini back pitch dan front pitch mempunyai bilangan ganjil dan berharga sama, ini berarti :

$$Y = Y_b + Y_f \text{ atau}$$

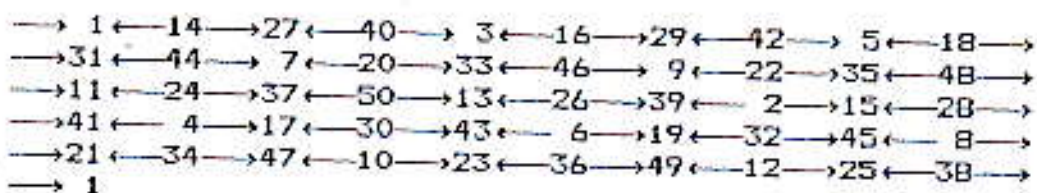
$$Y_c = Y_f = 26/2 = 13$$

Dengan memilih  $Y_b = 13$ , terlihat bahwa coil-span = 6 slot dan ini berarti sama dengan banyaknya slot per kutub yang dihitung

Dengan demikian komutator pitch :  $Y_c = \frac{25 \pm 1}{2} = 13$  segmen

Dalam penyusunan winding table, kiranya cukup berpatokan pada harga komutator pitchnya saja.

a) Winding table :



Untuk sequence diagram dan penomoran sisi-koil...silahkan coba sendiri...!!!

- Catatan :
- Dalam hal wave winding, banyaknya slot per kutub boleh pecahan atau bilangan bulat.
  - Karena back pitch dan front pitch selalu bilangan ganjil-bulat, maka winding pitch bilangan genap bulat.
  - Dengan winding pitch bilangan genap bulat, maka akan diperoleh harga komutator pitch bilangan bulat baik genap maupun ganjil.

## 2 - 4.7. JANGKAR DENGAN LEBIH DARI 2 SISI-KOIL PER SLOT.

Dalam perencanaan belitan jangkar seringkali di jumpai 4 atau lebih sisi-koil per slot. Untuk kasus semacam ini, harga back pitch harus dipilih sedemikian rupa sehingga semua koil mempunyai sisi-koil atas pada satu lapis dan sisi-koil bawah pada lapis lainnya.

Apabila harga back pitch tidak demikian maka akibatnya winding akan terpecah dalam arti tidak berada dalam satu slot, oleh karena itu untuk menghindarkan jangan sampai terjadi sisi-koil terpecah di syaratkan bahwa harga back pitch harus bilangan bulat dan mendekati sama dengan banyaknya slot per kutub.

Secara matematis di tuliskan :

$$\frac{y_b - 1}{u/S} = \text{bilangan bulat} \dots\dots\dots (2-13)$$

Sebagai contohnya : Sebuah mesin arus searah mempunyai data data sebagai berikut :  $C = 120$ ,  $S = 40$  dan  $p = 4$

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{jumlah sisi-koil } u &= 2.C = 2.120 = 240 \\ \text{jumlah sisi-koil per slot } u/S &= 240/40 = 6 \\ \text{Coil-span } C_a &= S/p = 40/4 = 10 \text{ slot} \end{aligned}$$

Untuk simplex lap winding , berlaku :

$$y_b = \frac{2.C}{p} \pm K = \frac{240}{4} \pm 1 = 59 \text{ atau } 61.$$

Jika dipilih  $y_b = 59$  ; hubungan sisi-koil sebagai berikut :

Sisi-koil No.1 dihubungkan dengan sisi-koil No.(1+59) = No.60

Sisi-koil No.3 dihubungkan dengan sisi-koil No.(3+59) = No.62

Sisi-koil No.5 dihubungkan dengan sisi-koil No.(5+59) = No.64

Dari susunan di atas terlihat bahwa sisi-koil No.60 berada pada lapisan bawah slot No.10, sedangkan sisi-koil No.62 pada lapisan bawah slot No.11.

Kesimpulannya adalah sisi-koil atas yang dibentuk oleh koil I, II dan III berada dalam satu slot, sedangkan sisi-koil bawahnya berada pada slot yang berbeda.

Ingat !!! Coil Span  $S/p = 40/4 = 10$  slot.

Jika dipilih  $y_b = 61$  ; hubungan sisi-koil sebagai berikut :

Sisi-koil No.1 dihubungkan dengan sisi-koil No.(1+61) = No.62

Sisi-koil No.3 dihubungkan dengan sisi-koil No.(3+61) = No.64

Sisi-koil No.5 dihubungkan dengan sisi-koil No.(5+61) = No.66

Ternyata bahwa semua sisi-koil atas maupun sisi-koil bawah yang dibentuk oleh koil I, II dan III berada dalam slot-slot sesuai dengan coil spannya.

Sebagai koreksi terhadap uraian ini, dapat dibuktikan dengan pers.(2-13) sebagai berikut :

$$\frac{61 - 1}{240/40} = 10 \text{ (bilangan bulat).}$$

## 2 - 4.B. DUMMY COIL.

Didalam analisis tipe wave winding terdapat syarat-syarat yang mutlak harus dipenuhi yakni : *Back pitch* dan *front pitch* harus berharga sama dan mempunyai bilangan ganjil. Demikian juga *winding pitch* diharuskan mempunyai bilangan genap-bulat. Berdasarkan analisis ini, kadang-kadang dalam prakteknya di temui masalah yang dengan sejumlah koil tertentu, tidak mungkin

memenuhi dimana kamutator pitch akan mempunyai harga bilangan bulat. Untuk mengatasi masalah ini, didalam prakteknya sering digunakan "Koil tambahan" yang tidak dihubungkan dengan segmen kamutator, tetapi koil tersebut tetap terpasang pada jangkar. Hal ini dimaksudkan semata-mata agar jangkar yang berputar memperoleh keseimbangan mekanis "Mechanical Balance".

Koil tambahan yang terpasang pada jangkar dengan formasi floating ini disebut sebagai "Dummy-coil or inactive-coil".

Contoh soal : Nyatakan detail winding untuk simplex wave winding dengan  $p = 4$ ,  $S = 21$ , dan 4 sisi-koil per slot.

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{jumlah sisi-koil} \quad u &= 4 \cdot 21 = 84 \\ \text{jumlah total koil} \quad C &= 84/2 = 42 \end{aligned}$$

$$\text{Kamutator pitch} \quad y_c = \frac{C \pm 1}{p/2} = \frac{42 \pm 1}{4/2} = 20,5 \text{ atau } 21,5$$

Ternyata kamutator pitch berharga pecahan, karena kamutator pitch ini diharuskan bilangan bulat, maka jika semua koil digunakan untuk susunan simplex wave winding adalah tidak mungkin bisa dilaksanakan.

Untuk mengatasi hal ini, anggaplah koil aktif yang akan di pasang sebanyak :  $42 - 1 = 41$  koil.

Dengan  $C = 41$ , maka :

$$y_c = \frac{41 \pm 1}{2} = 20 \text{ atau } 21$$

dengan  $C = 21$ , maka :  $y_b - y_f = Y/2 = 21$

Dari sini terlihat bahwa sisi-koil tidak terpecah atau dengan kata lain masing-masing sisi-koil berada pada slot-slot sesuai dengan coil spannya.

Bukti hal tersebut di atas, dapat dikoreksi berdasarkan persamaan. (2-13).

## 2 - 4.9. LINTASAN PARALEL.

Sesuai dengan pokok-pokok perencanaan dan segala aspek keperluannya, maka banyaknya rangkaian antara sikat-sikat kamutator berikut lintasan paralelnya akan menentukan dimensi dimensi seperti : tipe winding, umlah penghantar jangkar dan juga banyaknya slot yang direncanakan.

Berdasarkan hasil-hasil percobaan memperlihatkan bahwa arus listrik yang diijinkan persatuan lintasan paralel pada belitan jangkar di sarankan tidak melebihi 200 Ampere.

atau

$$\frac{I}{a} \leq 200 \text{ Ampere.}$$

Lintasan paralel ini *dualitas* dengan rangkaian arus dan dapat didefinisikan sebagai " jumlah gaya gerak listrik atau e.m.f polygon yang sama dengan jumlah kutubnya".

Pada mesin-mesin dengan tipe lap winding, akan diperoleh lebih dari 2(dua) lintasan paralel atau dengan kata lain banyaknya lintasan paralel sama dengan banyak jumlah kutub.

$$a = p \quad \text{atau} \quad 2a = 2p$$

Sedangkan pada tipewave winding banyaknya lintasan paralel akan selalu berjumlah 2(dua) buah.

Gambar.5a. memperlihatkan sebguah mesin dengan tipe simplex lap winding yang mempunyai :  $p = 4$ ,  $C = 16$  dan  $S = 16$ .

Sedangkan gambar.5b. menunjukkan lintasan paralel yang dualitas dengan wiring diagram pada gambar.5a.



## 2 - 4.9. LINTASAN PARALEL.

Sesuai dengan pokok-pokok perencanaan dan segala aspek keperluannya, maka banyaknya rangkaian antara sikat-sikat komutator berikut lintasan paralelnya akan menentukan dimensi dimensi seperti : tipe winding, umlah penghantar jangkar dan juga banyaknya slot yang direncanakan.

Berdasarkan hasil-hasil percobaan memperlihatkan bahwa arus listrik yang diijinkan persatuan lintasan paralel pada belitan jangkar di sarankan tidak melebihi 200 Ampere.

atau

$$\frac{I}{a} \leq 200 \text{ Ampere.}$$

Lintasan paralel ini *dualitas* dengan rangkaian arus dan dapat didefinisikan sebagai " jumlah gaya gerak listrik atau e.m.f polygon yang sama dengan jumlah kutubnya".

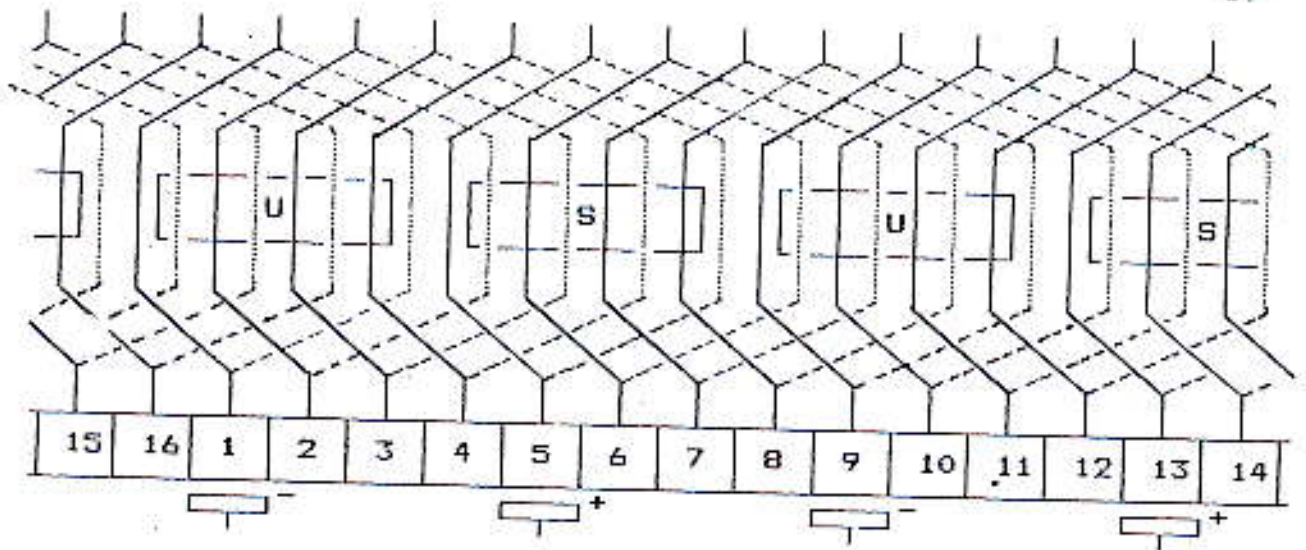
Pada mesin-mesin dengan tipe lap winding, akan diperoleh lebih dari 2(dua) lintasan paralel atau dengan kata lain banyaknya lintasan paralel sama dengan banyak jumlah kutub.

$$a = p \quad \text{atau} \quad 2a = 2p$$

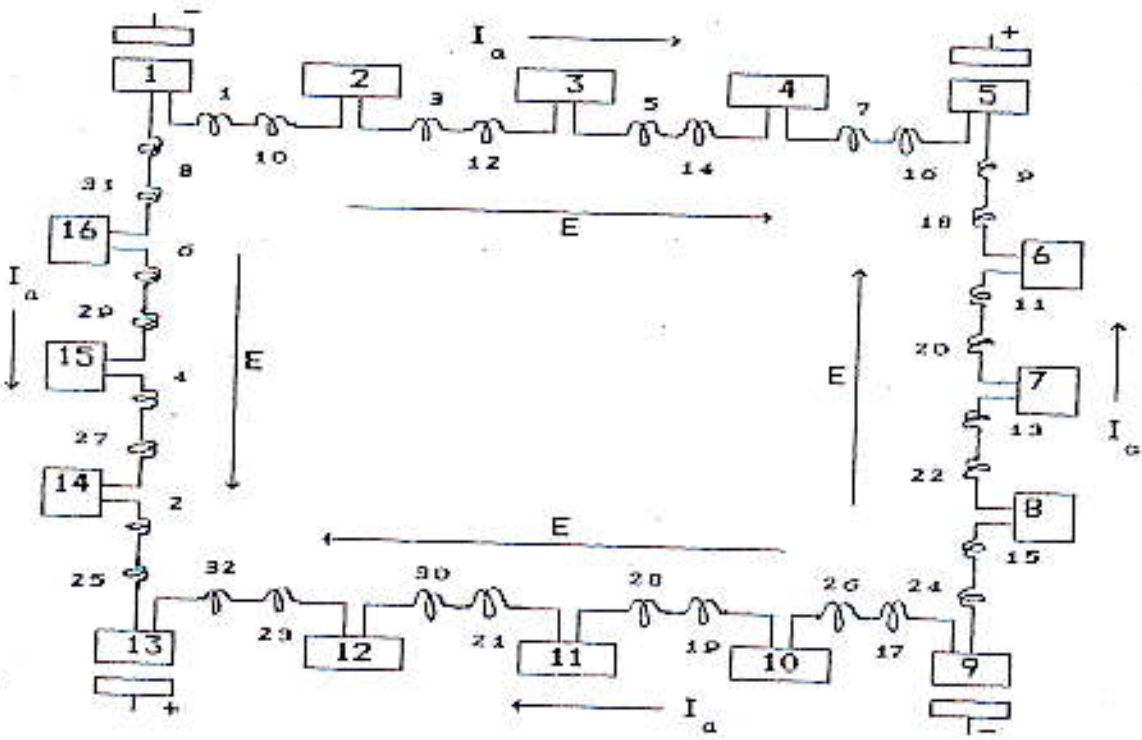
Sedangkan pada tipewave winding banyaknya lintasan paralel akan selalu berjumlah 2(dua) buah.

Gambar.5a. memperlihatkan sebguah mesin dengan tipe simplex lap winding yang mempunyai :  $p = 4$ ,  $C = 16$  dan  $S = 16$ .

Sedangkan gambar.5b. menunjukkan lintasan paralel yang dualitas dengan wiring diagram pada gambar.5a.



Gambar .5a.



Gambar .5b.

## 2 - 4.10. EQUALIZER.

Pada susunan simplex lap winding, telah diketahui bahwa banyaknya lintasan paralel adalah sesuai dengan banyaknya kutub dan masing-masing lintasan paralel dibentuk oleh sisi koil yang berada di bawah 2(dua) kutub yang berdampingan. Kalau kepadatan fluksi di bawah kutub sama, maka besarnya emf yang diinduksikan pada semua lintasan paralel akan sama pula. Tetapi pada kenyataannya boleh jadi emf yang diinduksikan pada masing-masing lintasan paralel tidak sama yang disebabkan oleh ketidaksamaan :

- Reluctansi pada rangkaian magnet.
- Celah udara antara jangkar dan kutub.
- Kutub-kutub memberikan intensitas magnet yang tidak seragam dikarenakan kesalahan perencanaan belitan medan.

Untuk mengatasi masalah ini, biasanya dipasang "Equalizer" yang penempatannya sedemikian rupa sehingga emf pada lintasan paralel mempunyai potensial yang sama besar.

Pemasangan equalizer biasanya kira-kira antara 10 ÷ 20 ring, dan masing-masing ring dihubungkan dengan beberapa koil sesuai dengan jumlah kutubnya.

Jarak antara koil-koil dengan potensial sama didefinisikan sebagai "Equipotential pitch" dan dinotasikan  $Y_{eq}$ .

$$Y_{eq} = \frac{\text{Total jumlah koil}}{\text{pasang kutub}} = \frac{C}{p/2} = \frac{2.C}{p} \text{ koil}$$

..... (2-14)

Sedangkan jumlah total tap-tap yang dihubungkan adalah sama dengan Jumlah ring x pasang kutub.

$$\text{total tap-tap } T = m \times \frac{p}{2} = \frac{m \cdot p}{2} \dots\dots\dots (2-15)$$

dengan : m = jumlah ring

Jarak antara tap-tap yang berdampingan didefinisikan sebagai "phase pitch" dan dinotasikan  $Y_{ph}$ .

$$Y_{ph} = \frac{\text{Total jumlah koil}}{\text{Total jumlah tap}} = \frac{C}{mp/2} = \frac{2C}{mp} \text{ koil} \dots\dots\dots (2-16)$$

Contoh soal : Sebuah mesin arus searah 4 kutub simplex lap winding, 16 koil dan 4 buah ring.

Penyelesaian : Equipotential pitch  $Y_{eq} = 2C/p = 2 \cdot 16/4 = 8$

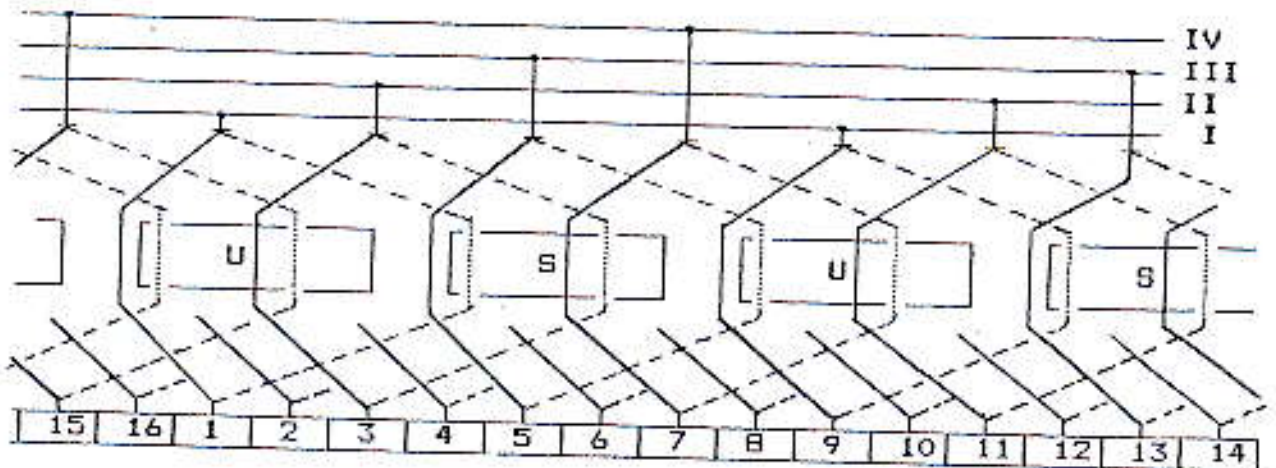
Jumlah Tap  $T = mp/2 = 4 \cdot 4/2 = 8$  tap

Phase pitch  $Y_{ph} = 2C/mp = 2 \cdot 16/4 \cdot 4 = 2$  koil

Lay-out Tapping :

No. ring $Y_{ph} \rightarrow$	I	II	III	IV
No. koil $Y_{ph} \downarrow$	1 9	3 11	5 13	7 15

Gambar lay-out tapping :



#### 2 - 4.11. JUMLAH PENGHANTAR JANGKAR.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa gaya gerak listrik (emf) yang dibangkitkan pada jangkar :

$$E = \phi \cdot Z \cdot n \cdot \frac{P}{a}$$

karena :  $p \cdot \phi = B_{av} \cdot \pi \cdot D \cdot L$ , maka emf yang dibangkitkan adalah :

$$E = B_{av} \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot Z \cdot n \cdot \frac{1}{a}$$

dengan demikian jumlah penghantar jangkar adalah sebanyak :

$$Z = \frac{E \cdot a}{B_{av} \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot n} \quad \dots\dots\dots (2-16)$$

akan tetapi mengingat penghantar jangkar mempunyai tahanan, ini berarti pada jangkar akan timbul jatuh tegangan. Demikian juga pada setiap mesin yang membangkitkan tenaga listrik perlu adanya medan magnetik, ini berarti pula pada setiap mesin arus searah diperlukan adanya arus jangkar tambahan untuk mencatu kebutuhan belitan medan yang menerbitkan medan magnetik.

Dalam prakteknya besar emf jangkar diperhitungan sedemikian dengan mengambil hubungan antara Z-drop = f(P x rpm), seperti tertera pada Tabel-6.

#### 2 - 4.12. JUMLAH KOIL JANGKAR.

Jumlah lilitan persatuan koil atau jumlah koil jangkar biasanya dipilih dengan memperhatikan adanya tegangan kerja pada segmen kamutator yang berdekatan dimana tegangan kerja ini dibatasi sedemikian rupa sehingga tidak menyebabkan timbulnya flash-over.

Tabel-6.

Kw x rpm	%-drop	%-Arus medan
1 x 10 <sup>4</sup>	6,50	2,40
2	6,00	2,00
3	5,50	1,90
4	5,30	1,70
5	5,10	1,60
6	5,00	1,50
7	4,90	1,40
8	4,80	1,30
9	4,60	1,20
1 x 10 <sup>5</sup>	4,50	1,10
2	4,00	0,80
3	3,80	0,62
4	3,60	0,51
5	3,40	0,45
6	3,20	0,40
7	3,00	0,37
8	2,90	0,35
9	2,80	0,31
1 x 10 <sup>6</sup>	2,70	0,28

Pada umumnya tegangan kerja maksimum antara segmen-segmen kamutator yang berdekatan dalam keadaan tanpa beban di batasi sebesar :

$$E_{cm} \leq 30 \text{ Volt} \quad \dots\dots\dots (2-16a)$$

Dengan batasan harga tersebut di atas diperoleh hubungan eksak dimana jumlah koil jangkar minimum yang diperlukan :

$$C = \frac{E.p}{15} \quad \dots\dots\dots (2-16b)$$

Dari uraian diatas tampak dengan jelas sekali bahwa untuk menentukan jumlah koil jangkar tidak bisa ditentukan dengan tanpa melibatkan perencanaan mekanis kamutator atau dengan kata lain sebelum menentukan jumlah koil jangkar perlu diketahui terlebih dahulu perencanaan langkah segmen kamutator (*Pitch of segment commutator*).

Untuk menyederhanakan perhitungan maka pitch of segment commutator dihitung berdasarkan rumus empiris.

$$\beta_c = \frac{\pi \cdot D_c}{C} \geq 4 \text{ mm} \dots\dots\dots (2-16c)$$

dengan :  $D_c$  = diameter kamutator  
 = 0,65 x diameter jangkar  
 = 0,65D.

Hubungan tegangan antara segmen-segmen kamutator yang berdekatan dalam keadaan tanpa beban dengan jumlah koil jangkar dapat diturunkan sebagai berikut :

- Tegangan rata-rata setiap penghantar dalam keadaan tanpa beban adalah :  $E_2 = B_{av} \cdot L \cdot V_a$  Volt

- Tegangan rata-rata antara segmen-segmen yang berdekatan dalam keadaan tanpa beban adalah :

$$E_c = 2 \cdot T_c \cdot N_c \cdot B_{av} \cdot L \cdot V_a \text{ Volt.}$$

Dengan :  $T_c$  = Jumlah lilitan persatuan koil.  
 $N_c$  = Koil-koil yang dihubungkan antara segmen-segmen yang berdekatan.  
 = p/2  $\longrightarrow$  Simplex lap winding.  
 = 1  $\longrightarrow$  Simplex wave winding.

Apabila rapat fluksi maksimum dalam keadaan berbeban dinyatakan dengan  $B_{gm}$  yang biasanya berkisar  $1,3 \cdot B_g$ .

Dengan demikian tegangan kerja maksimum antara segmen-segmen yang berdekatan dalam keadaan berbeban :

$$E_{cm} = 2 \cdot T_c \cdot N_c \cdot B_{gm} \cdot L \cdot V_a$$

$$= 2 \cdot T_c \cdot N_c \cdot (1,3B_g) \cdot L \cdot V_a$$

Karena :  $B_{av} = \frac{B_g}{\psi}$ , dan apabila harga  $\psi = 0,66$ , maka :

$$E_{cm} = 2 \cdot T_c \cdot N_c \cdot (1,3 \cdot \frac{B_{av}}{0,66}) \cdot L \cdot V_a$$

$$E_{cm} = 4 \cdot T_c \cdot N_c \cdot \frac{E}{2}$$

atau

$$e_z = \frac{E_{cm}}{4 \cdot T_c \cdot N_c}$$

Berhubung harga  $E_{cm}$  telah di batasi paling besar 30 Volt, maka harga tegangan rata-rata setiap penghantar dalam keadaan tanpa beban dibatasi menjadi :

$$e_z \leq \frac{7,5}{T_c \cdot N_c} \text{ Volt} \quad \dots\dots\dots (2-16d)$$

Seperti telah diketahui bahwa jumlah koil jangkar sama dengan jumlah segmen kamutator, sehingga total penghantar jangkar yang diperlukan dituliskan :  $Z = 2 \cdot C \cdot T_c$

atau jumlah lilitan per koil :  $T_c = \frac{Z}{2 \cdot C}$

Dari harga  $E_{cm}$  telah diketahui bahwa :

$$E_{cm} = 4 \cdot (\frac{Z}{2 \cdot C}) \cdot N_c \cdot e_z = 2 \cdot Z \cdot \frac{N_c}{C} \cdot e_z$$

dengan demikian diperoleh :

$$\begin{aligned} C &= \frac{2 \cdot Z \cdot N_c \cdot e_z}{E_{cm}} = \frac{2 \cdot Z \cdot N_c \cdot e_z}{30} \\ &= \frac{Z \cdot N_c \cdot e_z}{15} = \frac{Z \cdot N_c}{15} \cdot (B_{av} \cdot L \cdot r \cdot D \cdot n) \\ &= (\emptyset \cdot Z \cdot p \cdot n) \cdot \frac{N_c}{15} = \frac{E \cdot N_c}{15} \end{aligned}$$

Untuk simplex lap winding berlaku :  $a = 2$  dan  $N_c = p/2$

untuk simplex wave winding berlaku :  $a = p$  dan  $N_c = 1$

Dengan demikian jumlah koil jangkar minimum yang diperlukan adalah :

$$= \frac{E \cdot p}{15}$$



### 2 - 4.13. JUMLAH SLOT JANGKAR.

Faktor-faktor yang harus diperhatikan dalam pemilihan jumlah slot jangkar, terutama adalah pulsasi fluksi yang akan menimbulkan rugi-rugi eddy pada permukaan kutub dan akan menimbulkan noise-magnetic.

Dengan jumlah slot yang diperbanyak atau banyaknya slot yang dicakup oleh kutub jumlah sedikit maka pulsasi fluksi tersebut akan berkurang.

Dengan alasan-alasan di atas tadi, maka pemilihan jumlah slot dapat ditentukan sebagai berikut :

1. Jumlah slot jangkar per lengkung kutub harus sama dengan bilangan bulat di tambah 0,5.
2. Jumlah slot persatuan kutub harus sama dengan bilangan bulat ditambah 0,5.
3. Harga slot pitch dibatasi antara : 2,5 ÷ 3,5 Cm.
4. Pembebanan slot yakni jumlah ampere-conductor pada tiap slot dibatasi tidak melebihi 1,500 Ampere-conductor.
5. Kamutasi ; untuk mencegah terjadinya loncatan api (spark), maka jumlah slot per kutub di ambil sekitar 9 ÷ 16 buah.

### 2 - 4.14. PENAMPANG PENGHANTAR JANGKAR.

Arus pada setiap penghantar jangkar atau pada sisi-koil adalah sama dengan "arus jangkar persatuan lintasan paralel".

$$I_z = \frac{I_a}{a} \text{ ampere ; apabila } \delta_a \text{ menyatakan}$$
 rapat arus ( $\text{Amp}/\text{mm}^2$ ), maka penampang penghantar jangkar yang

diperlukan :

$$a_z = \frac{I_a}{a \cdot \delta_a} \text{ mm}^2$$

Dalam hal pemilihan penampang penghantar ini, yang harus di perhatikan antara lain : Efisiensi dan Kenaikan suhu yang di ijinakan. Meskipun pemilihan rapat arus yang besar sangat menguntungkan, yakni akan diperoleh ukuran penampang penghantar yang kecil dan juga luas slot yang diperlukan akan kecil. Akan tetapi pemilihan dengan cara ini, tentunya mengundang resiko yang antara lain : Efisiensi turun dan kenaikan suhu cukup tinggi. Untuk itu rapat arus pada penghantar jangkar akan bergantung pada cara pendinginannya, tetapi pada umumnya rapat arus ini dibatasi berkisar antara 3 s/d 7 Amp/mm<sup>2</sup>.

$$\delta_a = 3 \div 7 \text{ Amp/mm}^2$$

#### 2 - 4.15. DIMENSI PENGHANTAR JANGKAR.

Sesuai dengan standar isolasi yang dipakai, biasanya untuk luas penampang yang kecil dibawah 10 mm<sup>2</sup> digunakan kawat bulat yang di isolasi dengan Double Cotton Covering (dcc).

Sedangkan untuk luas penampang diatas 10 mm<sup>2</sup>, banyak digunakan penampang penghantar bujur sangkar atau persegi.

Seperti tertera pada Tabel-7, kedalaman maksimum penghantar yang boleh digunakan pada jangkar mesin arus searah adalah bergantung pada frekwensi yang dipakainya.

$$\phi \leq 19 \text{ mm} \longrightarrow f = 25 \text{ Hz}$$

$$\phi \leq 15 \text{ mm} \longrightarrow 25 \leq f \leq 50 \text{ Hz}$$

Tabel-7.

TEBAL mm ↓	LUAS PENAMPANG (mm <sup>2</sup> )									
	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70
1,10	0,90	1,17	1,20	1,40	--	--	--	--	--	--
1,20	1,14	1,30	1,40	1,62	1,70	1,87	--	--	--	--
1,30	1,30	1,48	1,60	1,84	2,02	2,13	2,31	2,40	--	--
1,40	1,40	1,60	1,80	2,00	2,10	2,30	2,50	2,70	2,80	3,10
1,50	1,50	1,84	2,00	2,21	2,40	2,60	2,87	3,00	3,31	3,50
1,60	1,60	2,11	2,30	2,54	2,70	3,04	3,20	3,54	3,70	4,04
1,70	1,70	2,38	2,60	2,87	3,10	3,43	3,71	3,90	4,17	4,40
1,80	1,80	2,50	2,80	3,00	3,30	3,60	3,90	4,10	4,40	4,70
1,90	1,90	2,74	3,00	3,31	3,60	3,90	4,27	4,40	4,81	5,10
2,00	2,00	3,01	3,30	3,64	3,90	4,34	4,60	4,94	5,20	5,64
2,10	2,10	3,28	3,60	3,97	4,30	4,73	5,11	5,30	5,77	6,10
2,20	2,20	3,40	3,80	4,10	4,40	4,90	5,30	5,60	6,00	6,40
2,30	2,30	3,64	4,00	4,34	4,74	5,19	5,64	6,00	6,44	6,80
2,40	2,40	4,30	4,80	5,20	5,70	6,20	6,70	7,10	7,60	8,10
2,50	2,50	4,81	5,40	5,84	6,40	6,94	7,40	7,94	8,40	8,94
2,60	2,60	5,20	5,80	6,30	6,90	7,50	8,10	8,60	9,20	9,80
2,70	2,70	5,60	6,30	6,80	7,40	8,10	8,80	9,50	10,2	10,9
2,80	2,80	6,01	7,0	7,4	8,0	8,7	9,4	10,1	10,8	11,5
2,90	2,90	6,44	7,60	8,10	8,70	9,40	10,1	10,8	11,5	12,2
3,00	3,00	6,90	8,00	8,60	9,30	10,0	10,7	11,4	12,1	12,8
3,10	3,10	7,38	8,40	9,00	9,70	10,4	11,1	11,8	12,5	13,2
3,20	3,20	7,84	8,80	9,60	10,4	11,2	12,0	12,7	13,4	14,1
3,30	3,30	8,30	9,30	10,2	11,0	11,8	12,6	13,3	14,0	14,7
3,40	3,40	8,78	9,80	10,8	11,6	12,4	13,2	13,9	14,6	15,3
3,50	3,50	9,28	10,4	11,4	12,2	13,0	13,8	14,5	15,2	15,9
3,60	3,60	9,80	11,0	12,0	12,8	13,6	14,4	15,1	15,8	16,5
3,70	3,70	10,34	11,6	12,6	13,4	14,2	15,0	15,7	16,4	17,1
3,80	3,80	10,90	12,2	13,2	14,0	14,8	15,6	16,3	17,0	17,7
3,90	3,90	11,48	12,8	13,8	14,6	15,4	16,2	16,9	17,6	18,3
4,00	4,00	12,08	13,4	14,4	15,2	16,0	16,8	17,5	18,2	18,9
4,10	4,10	12,70	14,0	15,0	15,8	16,6	17,4	18,1	18,8	19,5
4,20	4,20	13,34	14,6	15,6	16,4	17,2	18,0	18,7	19,4	20,1
4,30	4,30	14,00	15,2	16,2	17,0	17,8	18,6	19,3	20,0	20,7
4,40	4,40	14,68	15,8	16,8	17,6	18,4	19,2	19,9	20,6	21,3
4,50	4,50	15,38	16,4	17,4	18,2	19,0	19,8	20,5	21,2	21,9
4,60	4,60	16,10	17,0	18,0	18,8	19,6	20,4	21,1	21,8	22,5
4,70	4,70	16,84	17,6	18,6	19,4	20,2	21,0	21,7	22,4	23,1
4,80	4,80	17,60	18,2	19,2	20,0	20,8	21,6	22,3	23,0	23,7
4,90	4,90	18,38	18,8	19,8	20,6	21,4	22,2	22,9	23,6	24,3
5,00	5,00	19,18	19,4	20,4	21,2	22,0	22,8	23,5	24,2	24,9
5,10	5,10	19,90	20,0	21,0	21,8	22,6	23,4	24,1	24,8	25,5
5,20	5,20	20,64	20,6	21,6	22,4	23,2	24,0	24,7	25,4	26,1
5,30	5,30	21,40	21,2	22,2	23,0	23,8	24,6	25,3	26,0	26,7
5,40	5,40	22,18	21,8	22,8	23,6	24,4	25,2	25,9	26,6	27,3
5,50	5,50	22,98	22,4	23,4	24,2	25,0	25,8	26,5	27,2	27,9
5,60	5,60	23,80	23,0	24,0	24,8	25,6	26,4	27,1	27,8	28,5
5,70	5,70	24,64	23,6	24,6	25,4	26,2	27,0	27,7	28,4	29,1
5,80	5,80	25,50	24,2	25,2	26,0	26,8	27,6	28,3	29,0	29,7
5,90	5,90	26,38	24,8	25,8	26,6	27,4	28,2	28,9	29,6	30,3
6,00	6,00	27,28	25,4	26,4	27,2	28,0	28,8	29,5	30,2	30,9
6,10	6,10	28,20	26,0	27,0	27,8	28,6	29,4	30,1	30,8	31,5
6,20	6,20	29,14	26,6	27,6	28,4	29,2	30,0	30,7	31,4	32,1
6,30	6,30	30,10	27,2	28,2	29,0	29,8	30,6	31,3	32,0	32,7
6,40	6,40	31,08	27,8	28,8	29,6	30,4	31,2	31,9	32,6	33,3
6,50	6,50	32,08	28,4	29,4	30,2	31,0	31,8	32,5	33,2	33,9
6,60	6,60	33,10	29,0	29,8	30,6	31,4	32,2	32,9	33,6	34,3
6,70	6,70	34,14	29,6	30,4	31,2	32,0	32,8	33,5	34,2	34,9
6,80	6,80	35,20	30,2	31,0	31,8	32,6	33,4	34,1	34,8	35,5
6,90	6,90	36,28	30,8	31,6	32,4	33,2	34,0	34,7	35,4	36,1
7,00	7,00	37,38	31,4	32,2	33,0	33,8	34,6	35,3	36,0	36,7
7,10	7,10	38,50	32,0	32,8	33,6	34,4	35,2	35,9	36,6	37,3
7,20	7,20	39,64	32,6	33,4	34,2	35,0	35,8	36,5	37,2	37,9
7,30	7,30	40,80	33,2	34,0	34,8	35,6	36,4	37,1	37,8	38,5
7,40	7,40	41,98	33,8	34,6	35,4	36,2	37,0	37,7	38,4	39,1
7,50	7,50	43,18	34,4	35,2	36,0	36,8	37,6	38,3	39,0	39,7
7,60	7,60	44,40	35,0	35,8	36,6	37,4	38,2	38,9	39,6	40,3
7,70	7,70	45,64	35,6	36,4	37,2	38,0	38,8	39,5	40,2	40,9
7,80	7,80	46,90	36,2	37,0	37,8	38,6	39,4	40,1	40,8	41,5
7,90	7,90	48,18	36,8	37,6	38,4	39,2	40,0	40,7	41,4	42,1
8,00	8,00	49,48	37,4	38,2	39,0	39,8	40,6	41,3	42,0	42,7
8,10	8,10	50,80	38,0	38,8	39,6	40,4	41,2	41,9	42,6	43,3
8,20	8,20	52,14	38,6	39,4	40,2	41,0	41,8	42,5	43,2	43,9
8,30	8,30	53,50	39,2	40,0	40,8	41,6	42,4	43,1	43,8	44,5
8,40	8,40	54,88	39,8	40,6	41,4	42,2	43,0	43,7	44,4	45,1
8,50	8,50	56,28	40,4	41,2	42,0	42,8	43,6	44,3	45,0	45,7
8,60	8,60	57,70	41,0	41,8	42,6	43,4	44,2	44,9	45,6	46,3
8,70	8,70	59,14	41,6	42,4	43,2	44,0	44,8	45,5	46,2	46,9
8,80	8,80	60,60	42,2	43,0	43,8	44,6	45,4	46,1	46,8	47,5
8,90	8,90	62,08	42,8	43,6	44,4	45,2	46,0	46,7	47,4	48,1
9,00	9,00	63,58	43,4	44,2	45,0	45,8	46,6	47,3	48,0	48,7
9,10	9,10	65,10	44,0	44,8	45,6	46,4	47,2	47,9	48,6	49,3
9,20	9,20	66,64	44,6	45,4	46,2	47,0	47,8	48,5	49,2	49,9
9,30	9,30	68,20	45,2	46,0	46,8	47,6	48,4	49,1	49,8	50,5
9,40	9,40	69,78	45,8	46,6	47,4	48,2	49,0	49,7	50,4	51,1
9,50	9,50	71,38	46,4	47,2	48,0	48,8	49,6	50,3	51,0	51,7
9,60	9,60	73,00	47,0	47,8	48,6	49,4	50,2	50,9	51,6	52,3
9,70	9,70	74,64	47,6	48,4	49,2	50,0	50,8	51,5	52,2	52,9
9,80	9,80	76,30	48,2	49,0	49,8	50,6	51,4	52,1	52,8	53,5
9,90	9,90	77,98	48,8	49,6	50,4	51,2	52,0	52,7	53,4	54,1
10,00	10,00	79,68	49,4	50,2	51,0	51,8	52,6	53,3	54,0	54,7
10,10	10,10	81,40	50,0	50,8	51,6	52,4	53,2	53,9	54,6	55,3
10,20	10,20	83,14	50,6	51,4	52,2	53,0	53,8	54,5	55,2	55,9
10,30	10,30	84,90	51,2	52,0	52,8	53,6	54,4	55,1	55,8	56,5
10,40	10,40	86,68	51,8	52,6	53,4	54,2	55,0	55,7	56,4	57,1
10,50	10,50	88,48	52,4	53,2	54,0	54,8	55,6	56,3	57,0	57,7
10,60	10,60	90,30	53,0	53,8	54,6	55,4	56,2	56,9	57,6	58,3
10,70	10,70	92,14	53,6	54,4	55,2	56,0	56,8	57,5	58,2	58,9
10,80	10,80	94,00	54,2	55,0	55,8	56,6	57,4	58,1	58,8	59,5
10,90	10,90	95,88	54,8	55,6	56,4	57,2	58,0	58,7	59,4	60,1
11,00	11,00	97,78	55,4	56,2	57,0	57,8	58,6	59,3	60,0	60,7
11,10	11,10	99,70	56,0	56,8	57,6	58,4	59,2	59,9	60,6	61,3
11,20	11,20	101,64	56,6	57,4	58,2	59,0	59,8	60,5	61,2	61,9
11,30	11,30	103,60	57,2	58,0	58,8	59,6	60,4	61,1	61,8	62,5
11,40	11,40	105,58	57,8	58,6	59,4	60,2	61,0	61,7	62,4	63,1
11,50	11,50	107,58	58,4	59,2	60,0	60,8	61,6	62,3	63,0	63,7
11,60	11,60	109,60	59,0	59,8	60,6	61,4	62,2	62,9	63,6	64,3
11,70	11,70	111,64	59,6	60,4	61,2	62,0	62,8	63,5	64,2	64,9
11,80	11,80	113,70	60,2	61,0	61,8	62,6	63,4	64,1	64,8	65,5
11,90	11,90	115,78	60,8	61,6	62,4	63,2	64,0	64,7	65,4	66,1
12,00	12,00	117,88	61,4	62,2	63,0	63,8	64,6	65,3	66,0	66,7
12,10	12,10	119,90	62,0	62,8	63,6	64,4	65,2	65,9	66,6	67,3
12,20	12,20	121,94	62,6	63,4	64,2	65,0	65,8	66,5	67,2	67,9
12,30	12,30	124,00	63,2	64,0	64,8	65,6	66,4	67,1	67,8	68,5
12,40	12,40	126,08	63,8	64,6	65,4	66,2	67,0	67,7	68,4	69,1
12,50	12,50	128,18	64,4	65,2	66,0	66,8	67,6	68,3	69,0	69,7
12,60	12,60	130,30	65,0	65,8						

TEBAL mm	LEBAR cm									
	1,00	1,50	2,00	2,20	2,50	2,80	3,00	3,20	3,50	4,00
	LUAS PENAMPANG (cm <sup>2</sup> )									
1,40	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1,60	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1,80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,20	3,00	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,50	4,10	4,44	4,80	--	--	--	--	--	--	--
2,80	4,70	5,04	5,40	5,00	--	--	--	--	--	--
3,00	5,00	5,30	5,60	6,20	7,10	--	--	--	--	--
3,20	5,40	5,77	6,00	6,70	7,60	8,40	--	--	--	--
3,50	5,80	6,24	6,60	7,30	8,20	9,20	9,90	--	--	--
3,80	6,20	6,61	7,20	8,00	8,90	10,1	10,9	11,6	--	--
4,00	6,60	7,20	7,60	8,40	9,40	10,7	11,5	12,3	13,0	13,9
4,50	7,20	8,24	8,40	9,30	10,7	12,1	13,0	13,9	15,2	17,1
5,00	8,00	9,10	9,40	10,5	12,0	13,5	14,5	15,5	16,6	18,1
5,50	8,80	10,1	10,5	11,6	13,2	14,8	16,0	16,7	18,4	21,1
6,00	10,0	11,1	11,5	12,7	14,5	16,3	17,5	18,3	20,1	23,1
6,50	11,4	12,6	13,0	14,3	16,2	17,7	19,0	19,9	21,9	25,1
7,00	12,4	13,6	14,0	15,3	17,0	18,1	20,0	21,5	23,6	27,1
7,50	13,2	14,5	14,9	16,2	18,2	20,0	22,0	23,1	25,4	29,1
8,00	14,1	15,4	15,8	17,1	19,0	21,0	23,0	24,7	27,1	31,1
9,00	15,0	16,4	16,8	18,0	20,0	22,0	24,0	25,9	28,0	33,1
10,0	17,7	19,2	19,6	21,0	24,0	27,0	29,0	31,1	34,1	39,1
11,0	19,0	20,6	21,0	22,5	26,0	30,0	32,0	34,0	37,0	43,1
12,0	21,0	22,6	23,0	24,5	28,0	32,1	35,0	37,0	41,1	47,1
13,0	23,1	24,4	24,8	26,1	30,0	35,0	38,0	40,0	44,0	51,1
14,0	24,0	26,0	26,4	28,0	32,0	37,0	41,0	43,0	46,0	53,1
15,0	26,7	28,2	28,6	30,0	34,0	39,0	44,0	47,0	51,0	59,1
16,0	28,0	30,1	30,5	32,0	36,0	41,0	47,0	50,0	55,0	63,1
18,0	32,1	34,0	34,4	36,0	41,0	46,0	53,0	56,0	62,0	71,1
20,0	35,7	37,7	38,1	40,0	46,0	53,0	60,0	63,0	69,0	79,1
22,0	39,3	41,3	41,7	44,0	51,0	58,0	66,0	69,0	76,0	87,1
25,0	44,7	47,2	47,6	50,0	58,0	66,0	74,0	77,0	84,0	96,1

TEBAL mm	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	9,00	10,0
LEBAR mm	LUAS PENAMPANG (mm <sup>2</sup> )									
1,40	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1,60	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1,80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,20	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,50	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3,00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3,20	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3,50	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3,80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4,00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4,50	10,4	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5,00	21,0	24,1	--	--	--	--	--	--	--	--
5,50	23,0	26,0	29,4	--	--	--	--	--	--	--
6,00	26,1	29,1	32,1	35,1	--	--	--	--	--	--
6,50	29,4	31,0	33,0	35,1	41,4	--	--	--	--	--
7,00	30,0	34,1	37,0	41,1	44,0	48,1	--	--	--	--
7,50	32,0	36,0	40,4	44,1	47,0	51,0	55,4	--	--	--
8,00	35,1	40,1	43,1	47,1	51,1	55,1	60,1	61,1	--	--
9,00	50,0	44,1	48,0	50,1	57,0	52,1	60,0	71,1	80,1	--
10,0	44,1	49,1	54,1	59,1	64,1	67,1	74,1	70,1	80,1	90,1
11,0	48,1	54,1	59,0	65,1	70,0	70,1	81,0	87,1	98,1	100
12,0	53,1	59,1	65,1	71,1	77,1	83,1	89,1	95,1	107	110
13,0	57,0	61,0	70,0	77,1	83,0	90,1	96,0	100	110	120
14,0	62,1	65,1	70,1	80,1	88,1	97,1	104	111	120	130
15,0	65,0	74,1	81,0	89,1	98,0	104	112	116	124	130
16,0	71,1	79,1	87,1	95,1	103	111	119	127	140	130
18,0	80,1	89,1	98,1	107	116	125	134	140	151	170
20,0	87,1	96,1	105	115	125	135	145	155	175	180
22,0	98,1	109	120	131	142	153	164	175	197	210
25,0	112	124	137	149	162	174	187	199	234	240

TEBAL mm	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	9,00	10,0
LEBAR mm	LUAS PENAMPANG (mm <sup>2</sup> )									
1,40	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1,60	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1,80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,20	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,50	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3,00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3,20	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3,50	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3,80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4,00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4,50	10,4	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5,00	21,0	24,1	--	--	--	--	--	--	--	--
5,50	23,0	26,0	29,4	--	--	--	--	--	--	--
6,00	26,1	29,1	32,1	35,1	--	--	--	--	--	--
6,50	29,4	31,0	33,0	35,1	41,4	--	--	--	--	--
7,00	30,0	34,1	37,0	41,1	44,0	48,1	--	--	--	--
7,50	32,0	36,0	40,4	44,1	47,0	51,0	55,4	--	--	--
8,00	35,1	40,1	43,1	47,1	51,1	55,1	60,1	64,1	--	--
9,00	50,0	44,1	48,0	50,1	57,0	52,1	60,0	71,1	80,1	--
10,0	44,1	49,1	54,1	59,1	64,1	67,1	74,1	79,1	89,1	99,1
11,0	48,1	54,1	59,0	65,1	70,0	76,1	81,0	87,1	98,1	109
12,0	53,1	59,1	65,1	71,1	77,1	83,1	89,1	95,1	107	119
13,0	57,0	61,0	70,0	77,1	83,0	90,1	96,0	108	119	129
14,0	62,1	69,1	76,1	83,1	90,1	97,1	104	111	125	136
15,0	69,0	74,1	81,0	89,1	96,0	104	112	120	134	145
16,0	71,1	79,1	87,1	95,1	103	111	119	127	142	153
18,0	80,1	89,1	98,1	107	116	125	134	143	161	170
20,0	87,1	98,1	109	119	129	139	149	159	179	189
22,0	98,1	109	120	131	142	153	164	175	197	210
25,0	112	124	137	149	162	174	187	199	234	248

## 2 - 4.16. ISOLASI BELITAN JANGKAR.

Isolasi pada jangkar terdiri dari : *Isolasi Penghantar, Isolasi koil dan Isolasi slot.*

Dengan adanya pengisolasian belitan jangkar tersebut, maka tebal isolasi ini akan menentukan besarnya dimensi slot yang diperlukan.

### a. ISOLASI PENGHANTAR.

Isolasi penghantar yang dimaksud adalah double cotton covering (dcc), dimana ketebalannya bergantung pada ukuran penghantar yang dipakai sebagaimana tertera pada Tabel-8.

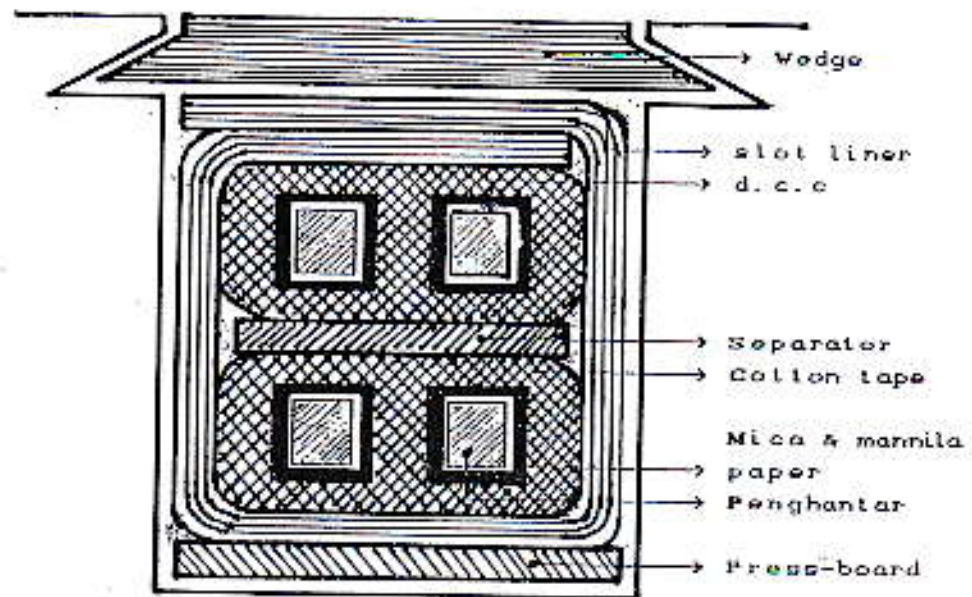
Tabel-8.

<i>Lebar Penghantar</i>	<i>d.c.c</i>
s/d 1 mm	0,15 mm
s/d 4 mm	0,20 mm
di atas 4 mm	0,30 mm

### b. ISOLASI KOIL & SLOT.

Untuk pengisolasian yang lengkap dalam slot seperti terlihat pada Gambar.6, maka tebal masing-masing isolasi :

- Cotton tape ..... = 0,20 mm
- Mica & Manila paper ..... = 0,20 mm
- Slot liner ..... = 0,50 mm
- Separator ..... = 0,50 mm
- Pres-board ..... = 0,50 mm
- Wedge ..... = 0,50 mm
- Clearance ..... = 0,5 ÷ 1,5 mm



Gambar-6.

#### 2 - 4.17. DIMENSI SLOT.

Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan dimensi slot antara lain :

##### a. Pulsasi Fluksi :

*Dengan adanya pulsasi fluksi pada slot, akan timbul rugi rugi besi tambahan, dan oleh karena itu perlu di usahakan agar dimensi slot tidak terlalu besar.*

##### b. Rugi-rugi Eddy pada penghantar:

*Dengan menggunakan penghantar yang kedalamannya terlalu besar, rugi-rugi eddy dalam penghantar akan naik. Oleh karena itu pemilihan dimensi penghantar harus disesuaikan dengan frekwensi fluk reversal.*



Jadi rapat fluksi pada 1/3-tinggi dari dasar gigi :

$$B_{(1/3)} = \frac{\Phi}{\psi \cdot \frac{S}{p} \cdot L_i \cdot W_{(1/3)}} \quad \text{Weber/m}^2 \quad \dots\dots (2-17b)$$

dengan : D = Diameter jangkar (Cm)

$d_s$  = kedalaman slot (Cm)

$W_s$  = Lebar slot (Cm)

#### 2 - 4.18. TEGANGAN JATUH PADA JANGKAR.

Panjang rata-rata belitan jangkar dapat diestimasi dengan persamaan empiris sebagai berikut :

$$L_{mt} = 2 \cdot L + 2,3r + 5d_s \quad (\text{cm}) \quad \dots\dots (2-18)$$

Tahanan masing-masing penghantar :

$$r_z = \frac{\rho \cdot L_{mt}}{2 \cdot a_z} \quad \dots\dots (2-18a)$$

Sedangkan tahanan masing-masing lintasan paralel :

$$r_p = \frac{Z}{a} \cdot r_z \quad \dots\dots (2-18b)$$

Dengan demikian tahanan jangkar total adalah :

$$R_a = \frac{1}{a} \cdot r_p = \frac{Z \cdot \rho \cdot L_{mt}}{2 \cdot a^2 \cdot a_z} \quad \dots\dots (2-18c)$$

Jadi tegangan jatuh pada jangkar :

$$V_d = I_a \cdot R_a = \frac{I_a \cdot Z \cdot \rho \cdot L_{mt}}{2 \cdot a^2 \cdot a_z} \quad \text{Volt} \quad \dots\dots (2-18d)$$

Catatan : - Tahanan jenis penghantar tembaga pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  :

$$\rho = 1,7 \times 10^{-8} \quad \Omega\text{-m}$$

- Tahanan jenis penghantar pada  $75^{\circ}\text{C}$ , kira-kira sebesar 1,2 kali tahanan jenisnya pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$ .

#### 2 - 4.19. KEDALAMAN CORE JANGKAR.

Fluksi dalam core jangkar adalah setengah fluksi/kutub atau dituliskan :

$$\theta_c = \frac{\theta}{2} \quad \dots\dots\dots (2-19)$$

Rapat fluksi pada core biasanya di ambil kira-kira  $1,25 \text{ Wb/m}^2$ .

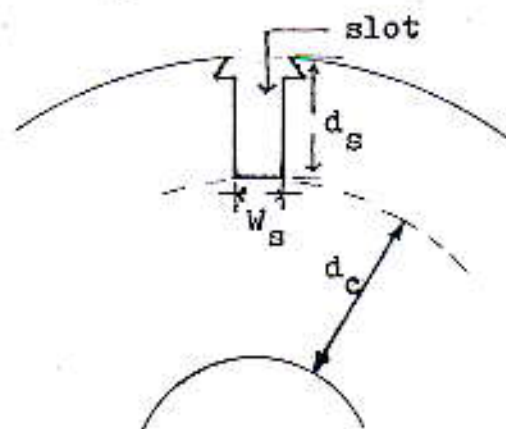
Jadi luas core jangkar :

$$A_c = \frac{\theta_c}{B_c} = \frac{\theta}{2 \cdot B_c} = L_i \cdot d_c \quad \dots\dots\dots (2-19a)$$

Oleh karena itu kedalaman core jangkar :

$$d_c = \frac{\theta}{2 \cdot L_i \cdot B_c} \quad \dots\dots\dots (2-19b)$$

Core jangkar yang dimaksud adalah berada diantara slot dan poros jangkar, seperti terlihat pada Gambar-7.



Gambar-7

## 2 - 4.20. PENDINGINAN JANGKAR.

Besarnya kenaikan suhu pada jangkar ditentukan oleh sistem pendinginan, jumlah saluran ventilasi dan besarnya rugi-rugi pada jangkar.

### A. Rugi-rugi jangkar.

Rugi-rugi yang terdapat pada jangkar mesin arus searah,

- terdiri dari :
1. Rugi-rugi tembaga jangkar.
  2. Rugi-rugi gesekan dan angin
  3. Rugi-rugi tak terduga (Stray-load loss)
  4. Rugi-rugi besi.
  5. Rugi-rugi pulsasi fluksi.

#### A.1. Rugi-rugi tembaga jangkar.

Besarnya rugi-rugi tembaga jangkar ditentukan berdasarkan hubungan :

$$P_{cu} = I_a^2 \cdot R_a \quad \dots\dots\dots (2-20)$$

Karena penghantar jangkar ini terdiri dari 2(dua) bagian yakni bagian yang pertama adalah dalam core dan bagian kedua adalah berada diluar core, oleh sebab itu rugi-rugi tembaga yang sebenarnya adalah rugi-rugi tembaga yang tertanam dalam core.

$$P_{cc} = \frac{2 \cdot L}{L_{mt}} \cdot P_{cu} \quad \dots\dots\dots (2-20a)$$

### A.2. Rugi-rugi gesekan dan angin.

Rugi-rugi gesekan yang dimaksud dalam hal ini adalah rugi rugi pada bearing. Besarnya rugi-rugi gesekan biasanya tergantung atas : Tekanan pada bearing, kecepatan keliling poros pada bearing dan koefisien gesekan antara poros dan bearingnya.

Sedangkan rugi-rugi angin, ditimbulkan oleh putaran yang bergantung atas : kecepatan keliling jangkar, diameter jangkar dan panjang core.

Untuk menentukan rugi-rugi gesekan dan angin, dapat ditentukan berdasarkan Tabel-9.

Tabel-9.

$V_a$ (m/det)	$P_f = \% \text{ output}$
10	0,2
20	0,4
30	0,6
40	0,9
50	1,2

### A.3. Rugi-rugi tak terduga.

Pada umumnya stray-load loss tidak dapat ditentukan dengan mudah, oleh karena itu dalam prakteknya stray-load loss di anggap sebesar :

$$P_{sl} = 1\% \times \text{Output} \quad \dots\dots\dots (2-20b)$$

#### A.4. Rugi-rugi Besi.

Yang dimaksud dengan rugi-rugi besi dalam hal ini, antara lain meliputi :

1. Rugi-rugi Gigi.
2. Rugi-rugi Core.

##### A.4.1. RUGI-RUGI PADA GIGI.

Massa gigi yang terdapat pada jangkar, diperhitungkan sebagai berikut :

- Lebar rata-rata gigi.

$$W_{lr} = \frac{\pi \cdot (D - d_c)}{S} \cdot W_s \quad \text{Cm} \quad \dots\dots\dots (2-20c)$$

Jadi total massa gigi :

$$M_l = S \cdot L_i \cdot W_{lr} \cdot d_c \cdot c \quad \text{(Kg)} \quad \dots\dots\dots (2-20d)$$

Sedangkan rugi-rugi gigi ditentukan dengan rumus empiris sebagai berikut :

$$P_l = 0,06 \cdot B_m^2 \cdot f + 0,008 \cdot B_m^2 \cdot f \cdot t \quad \text{Watt/Kg} \quad \dots\dots\dots (2-20e)$$

Dengan demikian total rugi-rugi gigi adalah :

$$P_{il} = M_l \cdot P_l \quad \text{Watt} \quad \dots\dots\dots (2-20f)$$

Dengan :  $c =$  massa jenis besi  $= 7,8 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$

$t =$  Tebal lempengan Core  $= 0,5 \text{ mm}$

$B_m =$  fluksi maksimum gigi  $= 2,1 \text{ Weber/m}^2$

#### A.4.2. Rugi-rugi pada Core.

Massa core yang terdapat pada jangkar, diperhitungkan sebagai berikut :

$$M_c = \pi \cdot (D_c - d_c) \cdot L_c \cdot d_c \cdot c \quad \dots\dots\dots (2-20g)$$

Sedangkan rugi-rugi core ditentukan dengan rumus empiris sebagai berikut :

$$P_c = 0,06 \cdot B_m^2 \cdot f + 0,005 \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot t^2 \quad \text{Watt/Kg} \quad \dots\dots\dots (2-20h)$$

Total rugi-rugi core adalah :

$$P_{ic} = M_c \cdot P_c \quad \dots\dots\dots (2-20i)$$

Dengan demikian total rugi-rugi besi pada jangkar :

$$P_i = P_{it} + P_{ic} \quad \text{Watt} \quad \dots\dots\dots (2-20j)$$

#### A.5. Rugi-rugi Pulsasi Fluksi.

Rugi-rugi yang diakibatkan oleh adanya interaksi antara permukaan jangkar dengan permukaan kutub, dalam hal ini di perhitungkan besarnya kira-kira 30 % dari rugi-rugi besi.

Secara matematis dituliskan :

$$P_p = 30\% \times P_i \quad \text{Watt} \quad \dots\dots\dots (2-20k)$$

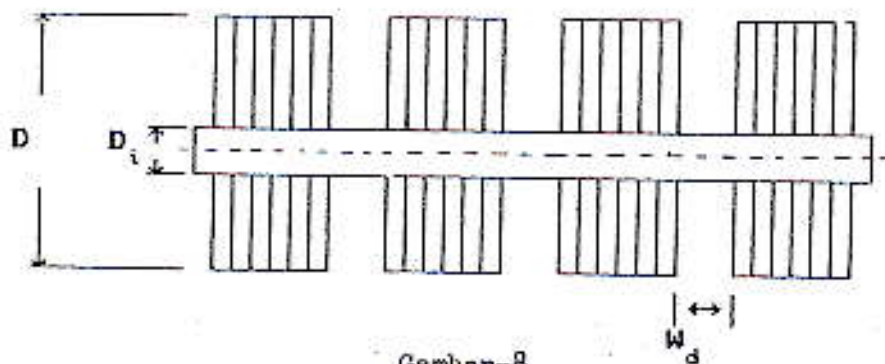
Setelah menentukan besarnya rugi-rugi jangkar sebagaimana telah diuraikan di atas, maka kenaikan suhu pada jangkar bisa ditentukan.

Untuk menghitung kenaikan suhu jangkar, perlu diketahui terlebih dahulu besarnya koefisien pendinginan yang dinyatakan secara empiris seperti tertera pada tabel-10.

Tabel-10.

Bagian	$c_o$	V
Permukaan luar jangkar	$\frac{0,015 + 0,035}{1 + 0,1V_a}$	Kecepatan keliling jangkar luar
Permukaan dalam jangkar	$\frac{0,015 + 0,035}{1 + 0,1V_a}$	Kecepatan keliling jangkar dalam
Ventilasi duct	$\frac{0,08 + 0,20}{0,1V_a}$	Kecepatan udara dalam duct sama dengan 10% $V_a$

Apabila harga-harga kecepatan V dan koefisien pendinginan  $c_o$  dari masing-masing bagian tersebut telah diketahui, maka perhitungan selanjutnya berpedoman pada penampang lintang jangkar seperti tertera pada Gambar-8.



Gambar-8

# Electric Generators and Motors: an overview

Ion Boldea, *Life Fellow, IEEE*

(Invited)

**Abstract**—Starting with Faraday's law of electromagnetic induction in 1831, electric (electromagnetic) machines have been developed ever since as "assemblies" of electric and magnetic coupled circuits that convert mechanical to electrical energy (in generators) and vice versa (in motors), via magnetic energy storage. Generators and motors are reversible.

The Maxwell four equations (laws) later in 19th Century have prompted the rapid development of all basic (DC, brush and travelling field AC machines by 1900. Then by 1930 AC (alternating current) power (energy) systems evolved by connecting in parallel electric synchronous generators (with voltage boost and buck electric transformers for efficient AC power transmission lines) of rather constant frequency and voltage, driven by turbines (prime movers) that harness fossil (coal, gas or nuclear fuels), thermal or hydro energy.

The last 50 years have witnessed a dramatic extension of generators power/unit, renewable energy generators and of variable speed AC motor drives in applications with variable output such as ventilators, pumps compressors, conveyors, arm-mills, electric transport (mobility), industrial automation, robotics, home appliances and info-gadgets.

This formidable development, required by the need of more but cleaner energy, was mainly driven by power electronics, better materials, better modeling, design methodologies and digital control. This humble inaugural overview attempts to combine a brief history of electrical generators and motors with recent progress and trends in their design and control, for representative applications.

**Index Terms**—Electric generator, linear electric machines, induction, synchronous machines.

## I. INTRODUCTION

MODERN electric (electromagnetic) generators and motors have started with the "Law of electromagnetic induction" attributed to Faraday (1831), but recently found by us formulated as an experimental fact in Lucretius book: "The Nature of Universe" 1st century B.C., in Rome, in terms of repelling and attraction electromagnetic forces of a moving magnet on a copper cap above it. After Faraday's homopolar and heteropolar DC brush machines, induction AC cage-rotor (brushless) machines have been introduced, with paramount contributions by Siemens brothers, Galileo Ferraris and Nikola Tesla.

The patents of first induction motors (Fig. 1a,b)[1] showed great promise – as travelling field brushless AC machines – but their topologies were rather primitive and thus efficiency was

low. Soon after that, before 1900, the windings have been put in slots (as of today) by Dolivo Dobrovolski and others, to produce practical performance.

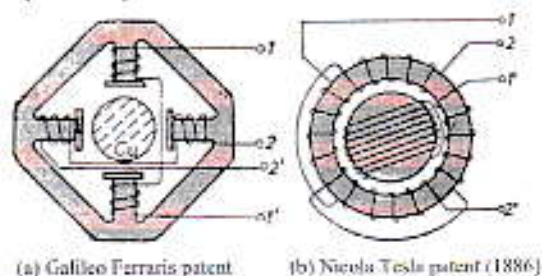


Fig. 1. Induction motors. (a) Galileo Ferraris patent, (b) Nicola Tesla patent (1886), (c) contemporary IM

Even before 1900 DC excited-rotor AC (synchronous) generators have been introduced, even with additional PMs on the rotor and with today's popular tooth-wound stator a.c. windings as in an AEG 1896 patent (with 36 slots and 42 rotor poles).

Based on these "building bricks", DC and then AC power grids have been developed, first local, then regional, national and continental from 1900 to 1960. Power grids rely on paralleling AC synchronous generators (whose power per unit increased to 1800 MW for turbo generators and 770 MW recently for hydrogenerators on Yantze River) controlled with a small droop in frequency (less than 0.5 Hz) and in voltage (a few %) control to allow input power sharing from different generators based on energy availability, demand, reliability and cost.

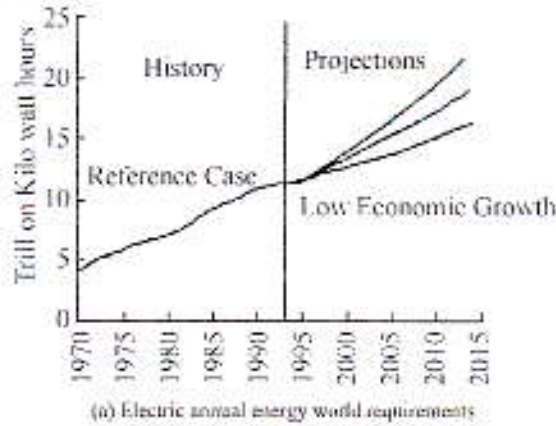
Electric installed power and electric energy grew steadily over the last century with a particular surge in the last 20 years due to the emergent economies in large population areas (in Asia, Africa, S. America). But so did the environmental concerns. This is how "renewable energy" emerged at the forefront (Fig. 2 a, b) [2].

Renewable energy sources (hydro, wind, waves, solar-thermal) do not bring more energy (heat) on earth, while fossil

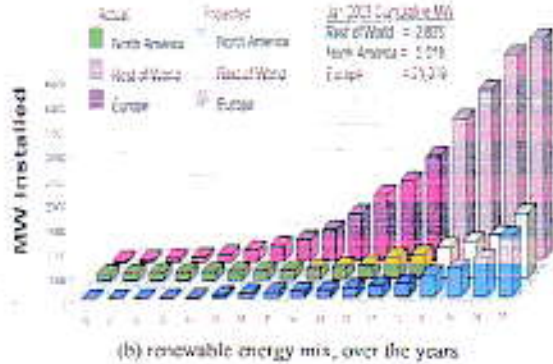
Ion Boldea is with the Department of Electrical Engineering, Romanian Academy and University Politehnica Timisoara, Romania (e-mail: ion.boldea@upt.ro).



fuel sources do; they also do less harm to the environment. But they are characterized by load power density (nuclear power turbine + generator weights 50 times less than a wind turbine – generator per kW). Consequently, the need for better harnessing renewable energy turbine-generator systems is imperative.



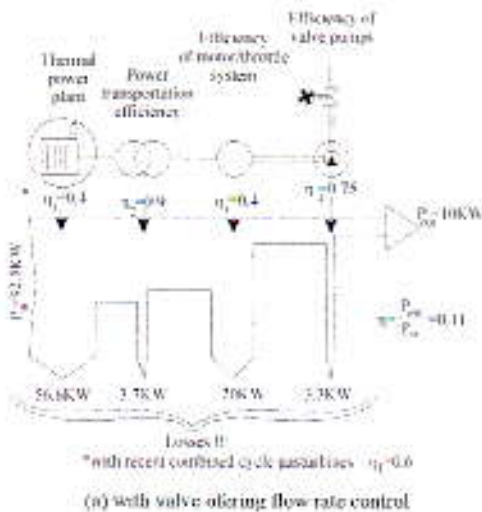
(a) Electric annual energy world requirements



(b) renewable energy mix, over the years

Fig. 2. (a) Electric annual energy world requirements; (b) renewable energy mix, over the years.

On the other end, saving electric energy by its more intelligent usage, to do “mechanical useful work by electric motors”, has led to variable speed motor drives (Fig. 3a,b) [3].



(a) with valve oring flow rate control

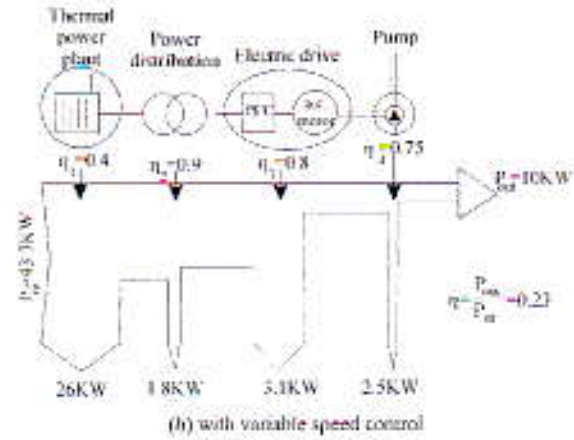


Fig. 3. Energy flow from fossil – fuel power plant to electric motor pump: (a) with valve oring flow rate control, (b) with variable speed control

The advantage of variable speed in electric generators has been capitalized mainly in the last 10 years in wind generator systems with AC–DC–AC power electronic interfaces. It was soon realized that, even for limited variable speed range (and power electronics fractional p.u. ratings), besides increased efficiency, the flexibility gains in electric power faster control are even more important. The first breakthrough was represented by 400 MVA pump–storage hydroplants with variable speed wound–rotor induction generators (DFIGs), introduced in Japan, in 1994 [4].

Recently 230 MVA such variable speed DFIG system was introduced to pump storage hydro-plants in Europe [5].

But the renewable distributed energy resources led to massive introduction of power electronics (and variable speed) in distributed (intelligent) power grids. In view of the wide spectrum of electric generator and motor systems and the rich heritage of books, articles and patents on them (see [6] for selected references) in what follows we will concentrate on recent progress and future trends in a few representative applications:

- Electric generators in high power systems, Section 2
- Renewable energy variable speed generators in distributed power systems, Section 3
- Autonomous electric generators in transport and industry, Section 4
- Industrial electric drives, Section 5
- Electric propulsion systems, Section 6
- Electric drives in residential applications, Section 7
- Electric actuators in info-gadgets, Section 8
- Line start higher efficiency motors, Section 9

Note. Another valid approach would have been, perhaps, to treat recent progress and future trends by looking into: principles, topologies for various speed and power ranges, multi-physics modeling and optimal design methodologies, control methods by power electronics, testing, commissioning, monitoring, maintenance, while mentioning, in passing, selected applications. As most potential readers are rather familiar academically with the subject, [6] we selected here the more practical criterion of applications which is not without shortcomings, either.

## II. ELECTRIC GENERATORS IN HIGH POWER SYSTEMS

High power electric systems are defined as rather constant frequency and voltage AC systems with synchronous 3 phase generators in parallel and voltage boost and buck power transformers to transport and distribute power at long distances (up to 1000 km or even more) and above 100 MVA (in general), to consumers at medium (6 – 12 kV) and low (690, 380, 220 V) line voltage.

Consumers "use" electric power (energy) for lighting, heating / cooling or in electric motor drives, for "mechanical useful work". To share input power from various generators the frequency of each generator is allowed to droop (less than 1%) so that, at a unique frequency, by the droop ramp, the individual contribution of active electric power is varied.

The voltage droop principle with reactive power increase is also used in controlling the voltage in such power systems (Fig.4).

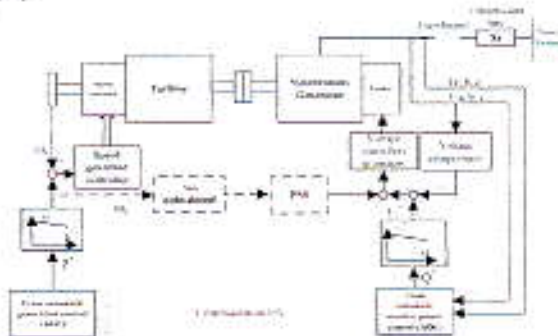


Fig. 4. Frequency and voltage droop control principles in power systems[3].

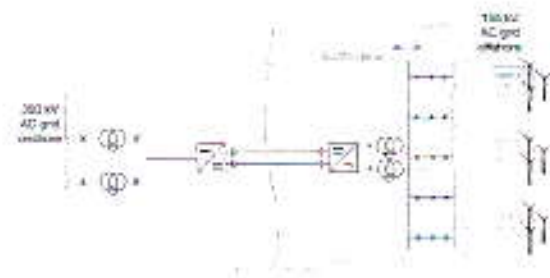
The same principle, but of smaller droop control, is used to connect in parallel large power electronics converters used in standard and distributed AC power systems.

The main asset of such a high power AC system is that its equivalent impedance is low and thus each individual consumer is small enough to be incapable to destabilize alone the system, in principle.

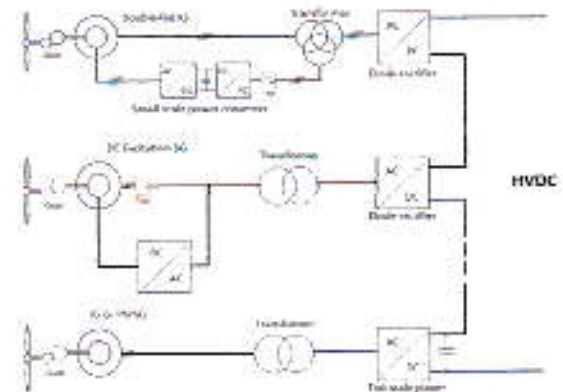
But as more and more power is transported through such rigid AC power transmission lines, fed from rigid (synchronous) generators, a large electric power load disturbances, which is quick (milliseconds), cannot be handled stably (easily) by electric generators with inertia in the range of (8–15) seconds in relative units.

This is how parallel and series power filters etc. have been added mainly for voltage fast control and recovery in what is called flexible AC power transmission systems (FACTS) [5].

But the main source of "rigidity", the synchronous generator, remains there because of other important assets. On the other end, high voltage direct current (HVDC) power transmission lines have been introduced for powers in the range of 1000 MVA (and more) and voltages up to 0.5 to 1 MV, for distances above a few hundred kms, to be economical. HVDC needs ultimately full power high voltage AC – DC – AC static power converters, but they are far more stable and allow more power transmission for given power lines (cable) outer diameter, with less voltage recovery needs along large distances at lower total transmission line losses (Fig. 5a,b).



(a) with fixed frequency generator systems



(b) DFIG DC excited SG with variable frequency, PMSG (IG) with variable frequency

Fig. 5. HVDC transmission lines: (a) with fixed frequency generator systems, (b) DFIG DC excited SG with variable frequency, PMSG (IG) with variable frequency.

The variable frequency generators and transformers (Fig. 5b) with a single step full power static power converter to HVDC might be a way of the future but the whole design of standard synchronous and other electric generators (Fig. 5b) and transformers of high power has to be revisited.

With such an arrangement the variable speed will allow the usage of kinetic energy of the turbine-generator system to "damp" large and quick electric power disturbances in the power system, making the generators much more flexible (Fig. 5 b).

But, in this eventuality, PM (or PM assisted) synchronous generators perhaps up to powers/units of 1500 MVA at 3 krpm (which correspond in size to a 5 MVA, 10 rpm directly-driven wind DC excited synchronous generators, already commercial) may be considered.

More than that, doubly fed (wound rotor) induction generators (DFIGs), already introduced for hydro-pump-storage power plants at 400 MVA could be considered, but now with variable stator frequency, for variable speed and thus allowing only 5% slip power static power converter ratings for a (1.3/0.7) speed regulation range by allowing 2/1 stator frequency change [8].

Today's commercial DFIG, which make 50% of wind generator power, are still designed at constant stator frequency.

As visible in Fig. 5b, the DC excited generator may be provided with an oversized excitation system (10% rating) to preserve constant voltage (with power increasing with speed)

for the entire speed range, while a full power modular diode rectifier would suffice to deliver power to the DC high voltage bus.

The simplicity of such a scheme (Fig. 5b) is "burdened" by unity power factor operation at all power levels and by the generator current harmonics.

The PMSG scheme (Fig. 5b) requires a full power forced commutation active rectifier with voltage boosting at lower generator speeds, to interface with the modular AC-DC HVDC converter.

Finally, the variable speed and stator frequency DFIG (Fig. 5b) requires basically a 5% AC-DC-AC power converter connected to the rotor winding and a diode rectifier with a strong DC link capacitor, to handle a 1.3/0.7 speed range with an (1.8-2)/1 stator frequency range. CRIG (Fig. 5b) is also suitable for the cause. None of the schemes in Fig. 5b has been tested in full power but they seem to deserve full attention, both for high power systems and also for large HVDC wind offshore parks (at even only 60 kV DC and 100 MVA, for 60-100 km distances to shore). The variable stator frequency allows also easy "synchronization" with the HVDC AC-DC converter. But more work is required in this area before industrialization.

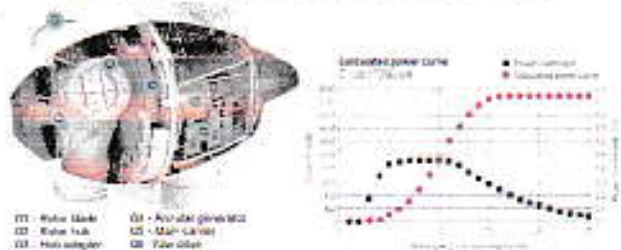
### III. VARIABLE SPEED GENERATORS FOR WIND ENERGY

Wind energy conversion has reached 400 GW installed power in 2016 and is expected to grow further in the next 20 years by at around 10% average/year.

Though small wind and micro - hydro generator systems can be built even for residential applications (for 3-10 kVA rated power), we will emphasize here the two largest so far commercial wind generators (Fig. 6a,b) [9].



(a) and 7.5 MVA, 7.5 MVA, 10 rpm d.c. excited wind S.G.



(b) <http://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/V16480MW/V16480MW/>; <http://www.enercon.de/en/products/ep-8/e-126/>

Fig. 6. Eight MVA, 480 rpm wind - PMSG, (a); and 7.5 MVA, 7.5 MVA, 10 rpm d.c. excited wind S.G., (b);

<http://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/V16480MW/V16480MW/>; <http://www.enercon.de/en/products/ep-8/e-126/>

The 8.0 MVA PMSG at about 480 rpm (with mechanical

transmission) reflects the trend of using less high energy PMs per kW as the availability of such magnets is limited and thus their price is still above/around 100 USD/kg. On the other end, the DC excited SG at 7.5 MVA for about 10 rpm (directly driven) reflects the trend of eliminating the mechanical transmission. The already high tower ( $\varnothing$  164/127 m diameter of turbine rotor at around 8 MVA) and the low turbine speed (10 rpm) implies high weight/kW wind turbine plus generator systems, which means heavy nacelle and thus heavy (costly) towers.

A novel wind harvesting method via a flexible smaller tower with a Venturi tube to accelerate the captured wind that allows to place the turbine-generator in the tube (close to ground level) to run at 5 times the usual speed (above/about 50 rpm for 10 MVA), has been proposed recently (Fig. 7a,b) by INVELOX [10].



(a) The invelox wind energy system; (b) p.u. captured energy for a given site. Fig. 7 (a) The invelox wind energy system; (b) p.u. captured energy for a given site.

If this solution that claims a 30% reduction of energy cost per kWh at 2-3 time more energy harvested per given site comes true, with today's technology wind generators at 50 MW and 50 rpm could be contemplated. At such speeds even the DFIG could be tried for the scope.

Cage rotor induction generators (CRIGs) and other PM (or PM less) counter-competitors have been recently proposed for high (MW range) power wind energy conversion, but the bettering of AC excited SGs, DFIG, PMSG systems will, in our view, constitute high weighting industrial trends in the field for the coming decade.

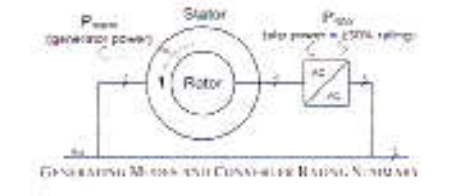
### IV. AUTONOMOUS ELECTRIC GENERATORS

With applications on Diesel - electric locomotives, aircraft marine vessels, hybrid electric automobiles, trucks, motor bikes or as auxiliary generators for cogeneration in industry, emergency generators in hospitals, banks Telecom power relays, or auxiliary generators on trucks etc., autonomous (or small group) electric generators represent a strong world-wide industry with powers per unit from a few kVA to tens of MVA. They may operate at rather constant speed regulated on the prime mover-marine vessels etc., or at variable speed (avionics etc.). So far two main variable speed generator schemes have been proposed in avionics and marine vessels to produce electric power on board in the range of a few MVA/unit:

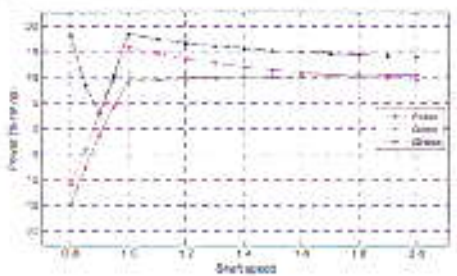
- With AC output at variable frequency and controlled voltage
- With DC output controlled voltage.

- Traditionally, a DC excited SG with controlled enhanced excitation (with a machine – exciter on the shaft) is used for the scope [11], but the slow power response, high volume topology and rather moderate efficiency limitations ask for better solutions.

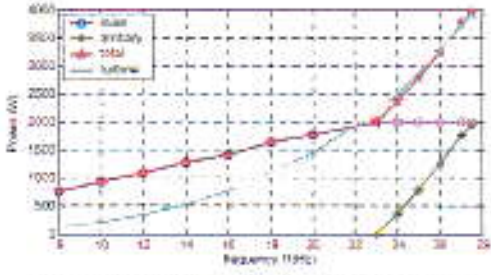
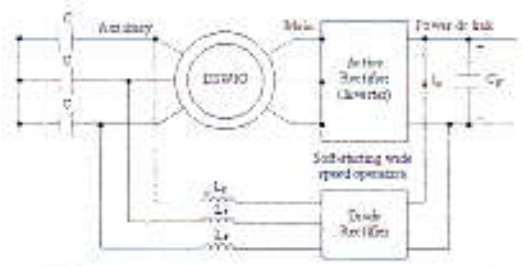
DFIG and dual stator winding CRIGs with partial rating static power converters and variable stator frequency or with DC output and controlled voltage have been recently proposed (Fig. 8)[12, 13].



Generating mode	Mechanical speed range	Electrical frequency range	Converter rating (% system rating)
Constant frequency	2:1 (1-115% $\omega$ )	1:1	70%
Constant frequency (asynchronous motor speed)	2:1 (-15% to -100% $\omega$ )	1:1	50%
Frequency-control	2.5:1	2:1	10%



(a) DFIG with variable stator frequency and constant voltage [12]



(b) dual stator winding CRIG with d.c. output [13]

Fig. 8. Avionics generator proposals: (a) DFIG with variable stator frequency and constant voltage [12]; (b) dual stator winding CRIG with d.c. output [13].

Multipurpose auxiliary PM generators use power electronics heavily (Fig. 9) [14] or use simplified 1 phase voltage AC output control for constant speed operation (Fig. 10) [15].

Efficiencies of 90 % for 3 kW at 3000 rpm, 50 Hz, and  $\pm 5\%$  voltage regulation with step capacitor control was reported for a 10 kg, 1 phase PMSG prototype [15].

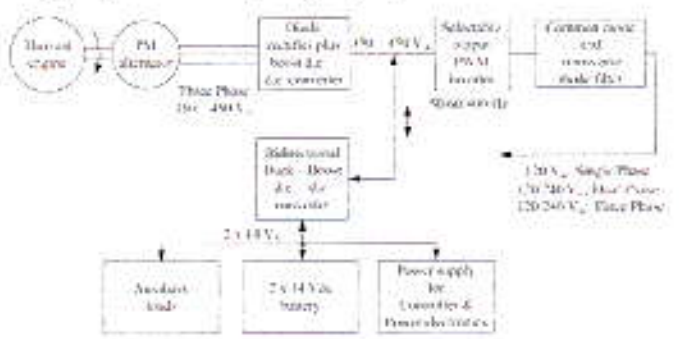


Fig. 9. Multipurpose PM generators [14].

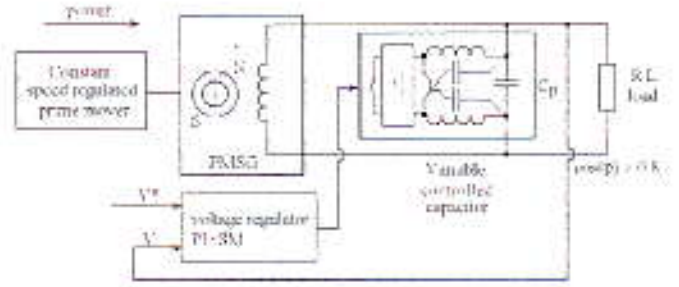


Fig. 10. Three kW, 3000 rpm, 50 Hz, 1 phase a.c. PM generator with step capacitor 45% voltage control down to 0.8 lagging power factor loads [15].

High speed high power PM generators with a.c.–d.c.–a.c. converter interface, driven by gas turbines up to 3 MVA at 15 krpm, have been successfully implemented also.

V. INDUSTRIAL VARIABLE SPEED ELECTRIC MOTOR DRIVES

From ort – mills at low speed high power (ex: 5 MW, 11 – 17 rpm) and hot (or cold) steel sheet – strip mills (ex: 1 MW,  $\pm 800$  rpm) and 50 MW, 60 kV (with power former) variable speed gas compressor drives, down to industrial conveyors (tens and hundreds of kW, below 500 rpm) and robotic actuators (Nm drives with positioning precision control etc.), motion (energy flow) control in industry is performed by variable speed electric motor drives.

They may be classified in high power medium voltage (a few kV) drives and medium and low power (low voltage – less than 690 V) drives.

The progress in this field of applications has been staggering in the last two decades and consisted mainly in:

- Dramatic extension of PM brushless DC and AC motor drives [15-18].
- Field oriented, direct (even dead-beat) torque and flux control of all AC (induction, PMSM, DC excited SMs, [19-38] PM tooth-wound coil with and without stator or rotor PM assistance [39-42]) motors.
- Advanced nonlinear analytical models of brushless motors, complimented by Magnetic equivalent circuit (MEC) models [43] and FEM models for preliminary and optimal design up to multi-objective FEM-only-based optimal design codes [33] to produce robust designs to fabrication and to materials properties tolerances.
- The robust torque, speed, position control by variable structure or predictive control strategies [44-52] with and without encoders.
- The recent launch of a series of reluctance synchronous motors variable speed drives with distributed windings and powers up to 500 kW (even to 1.5 MW) and multiple flux-barrier rotors, with 3%-1% efficiency gain over similar IMs but, at 7% - 8% less power factor, though at lower cost [53-54].
- The aggressive investigation of:
  - Vernier PM motor drives [55-58], (Fig. 11) switching-flux and flux-reversal [59-62] (Fig. 12).
  - Transverse flux PM machines [63] (Fig. 13).
  - Magnetic gear two rotor PM motor drives [64], (Fig.14) with 107 Nm/liter [64] for 250 Nm at 9 krpm and 95% efficiency. They all are proposed for higher torque density, high efficiency, moderate power factor and moderate cost low and medium speed direct drives, where the mechanical transmission elimination is mandatory.



(a) geometry [59]

COMPARISON OF SIMULATION AND MEASURED PERFORMANCE INDEXES

	Simulation value	Measured value
Torque	2000 Nm	1920 Nm
Speed	30RPM	30RPM
RMS line current	27.6A	27.6A
Power factor	0.85	0.81

(b) performance table [59]

Fig. 11. Vernier Ferrite-PM machine: (a) geometry [59]; (b) performance table [59]

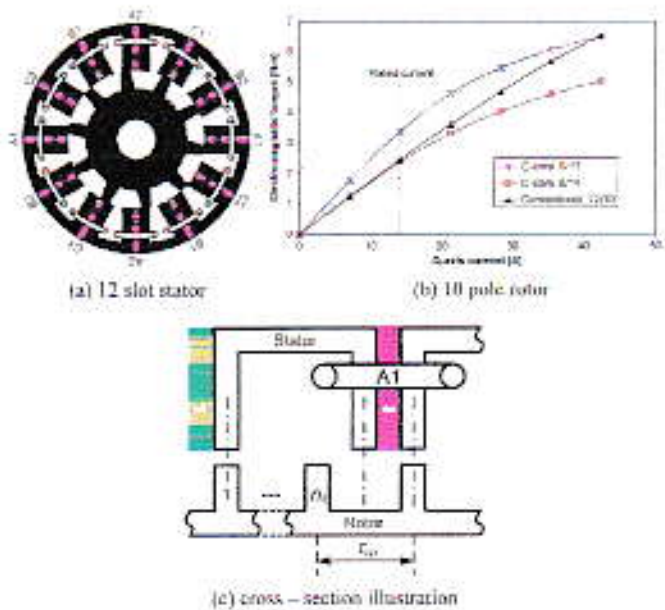


Fig. 12. Stator PM (switched flux) 12 slot/12 poles machine: (a) 12 slot stator, (b) 10 pole rotor, (c) cross-section illustration

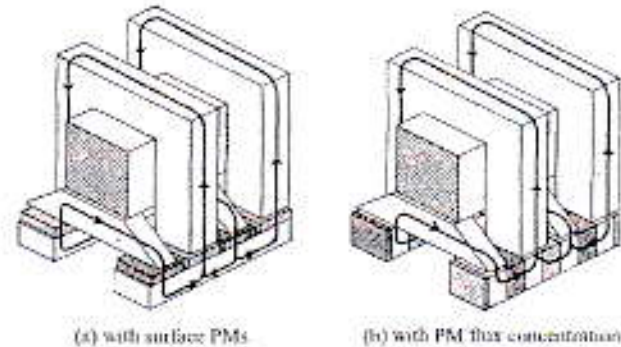


Fig. 13. Transverse-flux PM-rotor machines: (a) with surface PMs; (b) with PM flux concentration.

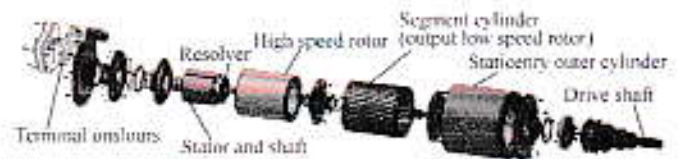
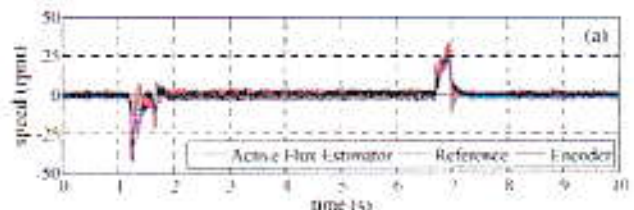


Fig. 14. Integrated PMSM and magnetic gear.

As an example, the case study of a small power reluctance synchronous motor encoder-less drive with field-oriented active-flux-based control is illustrated in Fig. 15 for zero speed operation (with signal injection) and  $\pm 1500$  rpm transients [65].



(a) zero speed operation with 1 Nm full torque

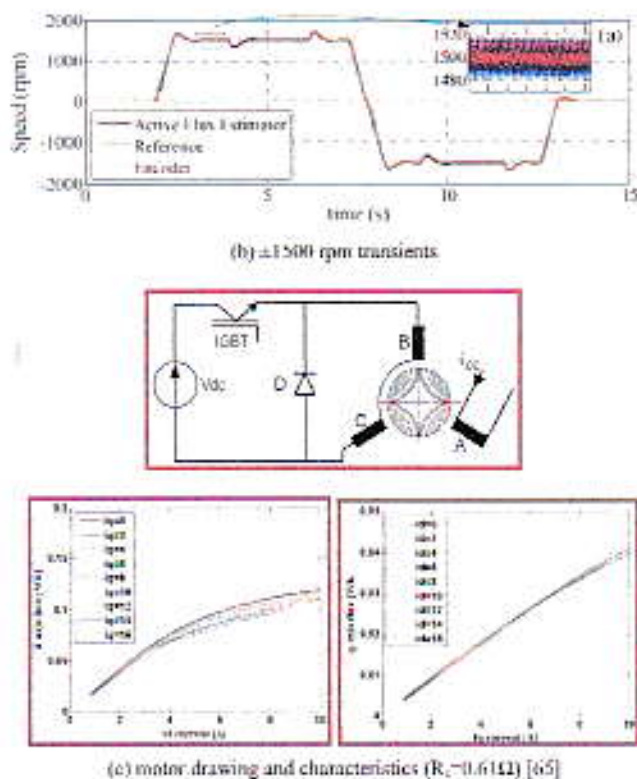


Fig. 15. RelSyn motor encoderless drive with active-flux-based flux oriented control from zero to 3000 rpm: (a) zero speed operation with 1 Nm full torque; (b)  $\pm 1500$  rpm transients; (c) motor drawing and characteristics ( $R_s = 0.61 \Omega$ ) [65].

## VI. ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

Electric propulsion here refers mainly to hybrid electric or electric vehicles (HEVs and EVs) but it could be extended to multi-motor electric propulsion for street-cars, subways, trains and marine vessel [66]. We will also refer briefly to linear electric motor propulsion in wheeled vehicles and in MAGLEVs [67].

There are already a few millions (from a total of a billion total) of HEVs on the roads. They combine thermal engine and electric propulsion with one (or two) electric machines and their power interfacing power electronics to a power battery of about 220 Vdc or so, to provide electric travel independence for 60–100 km or more (the latter with slow plug-in charging, one/two times a day for a few hours). The gas mileage is increased by as much as 40–50% in urban driving and 25–30% in highway driving.

The return time on the electric extra equipment investment is still corresponding to about 100,000 km driving, but the energy savings and local (in town) pollution reduction suffice to justify it [68]. EVs have reached 160 km independence but there are forecasts for 400 km and more, with more advanced batteries.

Both copper-cage-rotor induction motors and IPMSMs are applied; the IM has a better efficiency at high speeds (under flux weakening) while the IPMSM has better efficiency at peak (low speed) torque. The IM lacks the magnets (with their problems of demagnetization risks) while it claims 15–20% more volume under the hood.

In the mean time Ferrite-PM-assisted RelSyn [70–71] switched reluctance [72], DC excited SM (with contactless power transfer to the rotors [73]) have been tested up to 100 kW for HEVs and EVs with competitive performance per cost. Multiphase motor configurations of the above machines for higher fault tolerance or even PM-less BLDC multiphase reluctance machine [74], controlled like DC brush machines, stator PM tooth-wound coil PM machines, Vernier PM machines etc. have also been investigated lately for HEVs and EVs. The HEVs with extended electric independence (by better batteries) and by plug-in charging overnight may be the main e-vehicle as it depends less on the renewable proportion in the energy mix than otherwise needed for EVs.

As a warning call for enthusiasts, here we present sample results from [69] on energy consumption in two identical EVs: one with IPMSM and the other with copper-cage IM electric propulsion, in the same in-town driving cycle [Table I]. Yes, formula E in car racing will thrive, but mainly due to local pollution reduction nearby the track.

Utility and public transport vehicles for down town have the best chance and should become EVs.

Last but not least, let us mention here Linear induction motor (LIM) propulsion urban people movers [67] and suburban and high speed interurban MAGLEVs with integrated Linear Synchronous motor (integrated controlled propulsion and levitation) and active guideway (Fig. 16 a) or passive guideway (Fig. 16b) which reduce the energy/passenger/km by as much as 30% for same commercial speed, but require larger investments (in the active guideway track, especially).

Public electric transport of people and goods may have in MAGLEVs a technology of the future, as power electronics performance/cost improved dramatically in recent years, and so did MW range mechanical-contact-safe-power-transfer on board of vehicles at high speeds.



(a) with linear synchronous motor and active guideway; (b) with LIM propulsion and passive guideway;



(c) with linear homopolar synchronous motor propulsion and levitation and passive guideway (MAGNIBUS-0.1) [67].

Fig. 16 MAGLEVs with attraction force levitation and guidance: (a) with linear synchronous motor and active guideway; (b) with LIM propulsion and passive guideway; (c) with linear homopolar synchronous motor propulsion and levitation and passive guideway (MAGNIBUS-0.1) [67].

TABLE I  
EXPERIMENTAL AND SIMULATION RESULTS FOR ENERGY EFFICIENCIES UNDER RATED AND OPTIMAL FLUX IM AND IPMSM FOR THE VALIDATION DRIVE CYCLE

Machine	Experiment				Simulation			
	$E_{in}$ (Wh)	$E_{out}$ (Wh)	$E_{loss}$ (Wh)	$\alpha$ (%)	$E_{in}$ (Wh)	$E_{out}$ (Wh)	$E_{loss}$ (Wh)	$\alpha$ (%)
IM(rated)	44.16	28.42	15.74	64.3	39.57	26.96	12.61	68.1
IM(opt)	41.34	28.24	13.09	68.3	40.55	28.99	11.56	71.4
IPMSM	39.64	28.92	10.72	72.9	37.25	27.51	9.73	73.8

## VII. ELECTRIC MOTOR DRIVES IN HOME APPLIANCES

Small power electric motor drives are as present in our residences as they are for different auxiliary services on vehicles.

Intelligent cities will perhaps rely on intelligent transport and intelligent residences, besides limited size, to reduce energy pollution and waste per capita.

Supplied so far from the 1 phase a.c. local power grid (but in the future, perhaps, also, from a local (even in house) DC-voltage bus grid) at powers/unit in the tens of watts to 1(1.5) kW, small motors characterize most home appliances. With line start constant single (or dual) speed electric motors, higher efficiency is the main target such as (in refrigerator compressor motors of split-phase-capacitor type) with cage rotor, without and with multiple flux barriers and PMs in the rotor. From 85% efficiency at 100 W, 2900 rpm with IMs to 89 (90)% efficiency at almost same cost with line-start PM assisted IMs at 3000 rpm, the road was travelled in the last 5 years to improve performance/cost in residential refrigerators. Optimal design methodologies played here a key role. Also, variable speed compressors for refrigerators make use of PMSMs with higher efficiency, but exploit also the increased compressor performance at variable speed and thus cover for the added cost of the inverter interface and control.

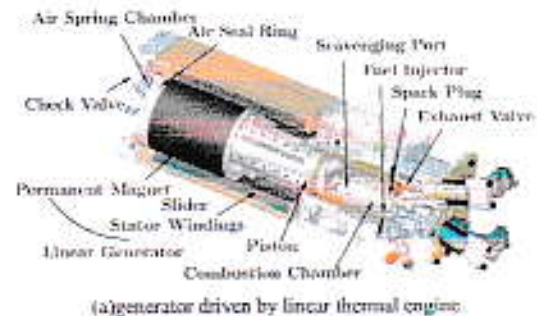
Ferrite-PMs are called for the replace sintered NdFeB magnets for lower initial costs but almost similar performance obtained by optimal design, outer rotor or other Ferrite-PM flux linkage increasing methods [75].

Yet another way to improve linear-motion piston small compressor refrigerator drive performance is to use short-stroke (less than  $\pm 15$  mm) 1 phase PM linear oscillatory resonant motors with either PM – mover or with stator PM and iron-mover [67]. A sample such linear PM generator driven by a linear thermal engine is shown in Fig.17a, while a potential topology capable of resonant operation, by using “cogging force” as a magnetic spring to replace the useful mechanical spring (made of beryllium-copper disks).

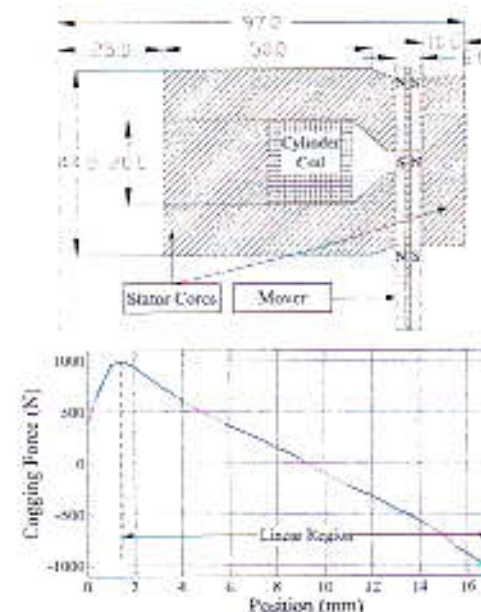
$f = (1/2\pi)\sqrt{k/m_{mover}} = f_m$  ( $f_m$ -mechanical eigen frequency,  $f_c$ -electrical frequency), is visible in Fig. 17b [67].

Resonant operation (with phase current in phase with emf, roughly) provides high electrical efficiency, while the rotary to linear motion transmission elimination cancels notable compressor mechanical losses. The linear PM motor compressor drive may work at variable load optionally by just reducing the voltage amplitude and keeping the frequency constant (for resonance, which is for minimum current follow

up).



(a) generator driven by linear thermal engine.



(b) potential springless resonant device with PM mover and magnetic (cogging) “virtual spring” [67]

Fig. 17. One phase linear PM oscillatory resonant generator-motor: a) generator driven by linear thermal engine (a mechanical spring may be used for resonant operation in other applications); (b) potential springless resonant device with PM mover and magnetic (cogging) “virtual spring” [67].

Note. There are many other home appliances such as the hair dryers, vacuum cleaners, kitchen robots that work at high speed and still wait for even better power electronics control. Washing machines already, in some variable speed configurations, benefit of power electronics control for variable speed (through direct belt driven tooth – wound ferrite PM multipole rotor synchronous motor drives) though many still use dual speed (dual pole number) winding IMs (one for washing and one for rinsing), to reduce initial and maintenance

costs at the price of more energy for a given job done.

### VIII. ELECTRIC ACTUATORS FOR INFO GADGETS

We mean here by info gadgets devices like: cellular phones, computer panels, desktop computers, sound and image producers, timers that use very small power motors with power electronics control for variable or fix frequency (speed).

Microphones and loudspeakers [67, Chapter 17] are typically linear oscillatory PM motors (generators) with coil movers and their optimal design to save space (for the screen) and energy are crucial in cellular phones. And so is the ringer-motor-drive made from a rotary PM motor drive or of a linear PM oscillatory motor drive, to make it flatter and reduce power by increasing the resonance (ringing) frequency of the cellular phone frame.

Small (less than 15 mm diameter) high speed small power rotary PMSMs (25 W, 15 krpm) are used to drive the compressor that may be used for cooling the central unit of many desk computers [67]. Sub watt power energy harvesters (including those driven by the back – pack oscillation during the mountain hiking) or for contactless local power production via door handle opener rotation by the tourist to engage then the solenoids that unlocks the door in a hotel room etc.) have also been produced lately and expected to extend in wireless sensors or in medicine dispatchers to human body etc.

### IX. LINE START HIGHER EFFICIENCY AC MOTORS

We left at the end the line start AC motors though they use almost half of electric energy. For them low cost and constant mechanical work power in time are necessary (with a few stops and starts per day). Applications range from hot water 100 W range pump motors in residential gas-heaters to 8 MW cooling pumps in high power electric plants. Increasing efficiency even by 1 % in such devices makes a world of good in terms of energy bill reduction such that it can “buy” the motor within 1 year for powers above 1 kW/limit.

Classes of higher efficiency (up to 5) have been introduced as recent standards by IEC and NEMA. For classes 4 and 5 IM may hardly qualify even after exhaustive optimal design attempts and better materials usage, due to additional (stray) losses, cage losses and large magnetizing current (in low power motors, even with 4 poles). Not to mention that high class efficiency induction motors have in general larger starting current ratio:  $I_{start}/I_{rated} > 6.8-7$ , which implies larger local grid transformer and power switch ratings and costs.

So, line start copper cage IMs and PM assisted induction motors without and with PMs and multiple flux barriers rotors have been proposed to reach classes 4, 5 of efficiency with only moderate extra initial costs and reasonable starting current ( $I_{start}/I_{rated} < 6.3$ ) [76]. The PM braking torque, augmented by complex magnetic saturation anisotropy reluctance torque oscillations during heavy on-line starting [77], are still a high obstacle in extending the PM-assisted IMs use for high efficiency: 93% at 4 kW, 1500 rpm [78]. The use of higher anisotropy cage rotor in 2(4) pole IM-reluctance synchronous

motor with ferrite – PMs for higher power factor might be the practical way out of this difficulty in line start 3 or 4 phase source AC high efficiency motors. The way to this target means probably better core materials (with high permeability and low losses, such as metglass etc.), better designs with compressed windings made even of aluminum, shorter coil-ends in 2 pole axial-airgap motors by using Gramme-ring windings for dual (twin) rotors.

TABLE II  
EFFICIENCY CLASSES BY IEC [76]

Standard & Year Published	State
IEC 60034-1, Ed. 12, 2010, <i>Rating and performance Application: Rotating electrical machines</i>	Active
IEC 60034-2-1, Ed. 1, 2007, <i>Standard method for determining losses and efficiency from tests(excluding machines for traction vehicles.) Establishes methods of determining efficiencies from tests, and also specifies methods of obtaining specific losses. Application: DC machines and AC synchronous and induction machines of all sizes within the scope of IEC 60034-1.</i>	Active But under revision
IEC 60034-2-2, Ed.1, 2010, <i>Specific methods for determining separate losses of large machines from tests-supplement to IEC60034-2-1. Establishes additional methods of determining separate losses and to define an efficiency supplementing IEC 60034-2-1. These methods apply when full-load testing is not practical and result in a greater uncertainty Application: Special and large rotating electrical machines.</i>	Active
IEC 60034-2-3, Ed. 1, 2011, <i>Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motors. Application: Converter-fed AC motors.</i>	Not Active Draft
IEC 60034-30, Ed. 1, 2008, <i>Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage induction motors(IE code). Application: 0.75-375kW, 2,4 and 6poles, 50 and 60Hz.</i>	Active But under revision
IEC 60034-31, Ed. 1, 2010, <i>Selection of energy-efficient motors including variable speed applications- Application: guide. Provides a guideline of technical aspects for the application of energy-efficient, three-phase, electric motors. It not only applies to motor manufacturers, original equipment manufacturers, end users, regulators and legislators, but to all other interested parties. Application: Motors covered by IEC 60034-30 and variable frequency/speed drives.</i>	Active
IEC 60034-17, Ed. 4, 2006, <i>Cage induction motors when fed from converters-application guide. Deals with the steady-state operation of cage induction motors within the scope of IEC 60034-12, when fed from converters. Covers the operation over the whole speed setting range, but does not deal with starting or transient phenomena. Application: Cage induction motors fed from converters.</i>	Active

### X. CONCLUSION

- Electric (electromagnetic) machines (EMs) started with Faraday's law of "electromagnetic induction" (1831) found, spelled as an experiment with attraction and repulsive (induced currents) forces, in Lucretius "The nature of Universe", book, the year 60 B.C.
- EMs convert mechanical energy to electric energy (generator mode) or vice – versa (motor mode) via stored magnetic energy. Energy balance is crucial in analyzing EMs.
- EMs may develop (experience) rotary or linear or hybrid



motion.

- Standard EMs developed already by 1900 classify into DC (AC) brush (fixed field) machines and AC (traveling field) machines: asynchronous/induction and synchronous.
- Electric energy is obtained through electric generators (except for photovoltaic energy) with powers/unit up to 1800 MVA (turbogenerators driven by fossil or nuclear fuel turbines) and up to 770 MVA in hydrogenerators (recently on Iantze River)
- More than 60% of electric energy is producing "mechanical useful work" in electric motors, which may be line – started (fix speed) or fed from PWM static power converters (for variable speed).
- The last 50 years witnessed staggering progress in:
  - \* Lighter and more efficient large power generators
  - \* Optimal multi-physics design methodologies using magnetic equivalent circuit (MEC) and FEA
  - \* The extension of PM usage in variable speed synchronous machine drives (with PWM AC-DC-AC static converter interfaces); from subwatt to a few MW power (3 MVA, 15 rpm PMSGs for wind energy conversion).
  - \* As the offer of quality (high energy) magnets is limited, it is anticipated that PMs will be used only when the cost is not the first target, but weight and efficiency are (low PM weight/kW), when high speed applications are favored.
  - \* Combining lower cost magnets on rotor and on stator with single and (or) double magnetic saliency in "brushless" motors has led to an avalanche of "novel" topologies, augmented by tooth-wound stator windings in the last 20 years; some are close to worldwide market entrance.
- The present paper presents a summary of the recent progress in EMs, rotary and linear (MAGLEV's, included) following eight important application domains, with key literature citations, and infer some avenues for further developments.
- The paper is by no way complete or fully objective and inevitably reflects both the horizon and the limits of the author. Consequently, criticism is welcome.

## REFERENCES

- [1] I. Boldea, S. A. Nasar, "Induction machine design handbook," second edition, CRC Press Taylor and Francis, New York 2010, pp. 2.
- [2] C. Yang, X. Yang, Y. Chen "Integration of variable speed hydropower generation and VSC HVDC," [Online] Available: Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 2015 17th European Conference on, pp. 1-9.
- [3] I. Boldea, S.A.Nasar, "Electric drives," book, 3<sup>rd</sup> edition, CRC Press Florida, Taylor and Francis, New York 2010, pp. 5-6.
- [4] T. Kuwabara, A. Shibuya, H. Furuta, E. Kita, K. Mitsuhashi, "Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pump storage unit at Ohkawachi Power Station," *IEEE Trans.*, vol. EC-11, no. 2, pp. 376-384.
- [5] D. Schafer, J.J. Simond, "Adjustable speed asynchronous machine in hydro power plants and its advantages in the electric grid stability," *CIGRE*, 1998, pp. .
- [6] I. Boldea, L. Tutelea, "Electric machines: steady state, transient and design with Matlab," book, CRC Press Florida, Taylor and Francis, New York, 2010.
- [7] I. Boldea, "Synchronous generators," book, Chapter 5, 2<sup>nd</sup> edition, CRC Press Florida, Taylor and Francis, New York 2016.
- [8] E. Mujindi, M. Singh, V. Gevorgian, "Doubly fed induction generator for off-shore wind power plant operated at rated V/Hz," *IEEE Trans.*, vol. IA-49, no.5, pp.2197-2205, 2013.
- [9] <http://ozerts.spevents.de/Vestas/Communication/ProductbrochureV16-480MW> and <http://www.eneran.de/en/products/ep-8vs-126>.
- [10] McGraw – Hill, 2015, Yearbook of science and technology, pp. 203 – 207.
- [11] A.Griffo, R.Winkel, P.H. Mellor, J.M. Von "Design and characterization of a 3 phase brushless – exciter for aircraft starter generator", *IEEE Trans.*, vol. IA-49, no.5, pp.2106-2115, 2013.
- [12] T. Feehally, J. M. Apsley, "The doubly fed induction machine as an servo generator", *IEEE Trans.*, vol. IA – 51, no.4, pp. 3462 – 3471, 2015.
- [13] L. N. Tutelea; I. Boldea; N. Munteanu; S. I. Drăgănuș, "Modeling and performance of novel scheme dual winding cage rotor variable speed induction generator with DC link power delivery," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014, pp. 271–278.
- [14] L.M. Tolbert, W.A. Peterson, T. J. Thiriss, M. B. Scudiere, "Gen – sets," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol.9, no.2, pp. 48-54, 2003.
- [15] I. Boldea; L. N. Tutelea; N. Munteanu; A. Popa, "Controlled capacitor 1-phase a.c. PM generator TEM characterization and circuit model based performance," Record of ACEMP/OPTIM/ELECTROMOTION, 2015, Side, Turkey (IEEEExplore).
- [16] R. Krishnan, "Permanent magnet synchronous and brushless d.c. motor drives," book, CRC Press, Florida, Taylor and Francis New York, 2010
- [17] T. Kurojo, S. Nagatsuma, "Permanent magnet and brushless dc – motors," D.C.Hanselman, "Brushless permanent magnet motor design," book, McGrawHill, 1994.
- [18] J.F. Gerrens, M. Wang, "Permanent magnet motor technology," book, New York, 2002.
- [19] F. Blaschke, "The principle of field orientation as applied to the new transistor closed – loop control system for rotating field machines," *Siemens review*, vol. 34, pp. 217–220, 1972.
- [20] I. Takahashi, T. Noguchi, "A new quick response and high frequency strategy of an induction motor," Record of IEEE-IAS-1985, pp.496–502.
- [21] M. Depenbrock, "Direct self control (DSC) of inverter fed induction machine", *IEEE Trans.*, vol. PE-3, no.4, pp. 420 – 429, 1988.
- [22] I. Boldea, S. A. Nasar, "Torque vector control (TVC): a class of fast and robust torque, speed and position digital controllers for electric drives," *EMPS-vol. 15*, pp. 135-148, 1988.
- [23] R. De Donker, D. W. Novotny, "The universal field oriented controller" Record of IEEE-IAS – 1988, pp. 450-456.
- [24] I. Boldea, S.A. Nasar, "Vector control of a.c. drives", CRC Press, Florida, 1992.
- [25] J. Holtz, "Methods for sensorless control of a.c. drives", Record of IEEE-PCC-Yokohama, 1993, pp. 415-420.
- [26] C. Lascu, I. Boldea, F. Blaabjerg, "Variable – structure direct torque control – a class of fast and robust controllers for induction machine drives," *IEEE Trans.*, vol. IE-51, pp. 784 – 792, 2004.
- [27] D. Casadei, F. Profumo, G. "FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control," *IEEE Trans.*, vol. PE-17, pp. 779-787, 2002.
- [28] C. Lascu, I. Boldea, F. Blaabjerg, "DTC of sensorless IM drives – a sliding mode approach", *IEEE Trans.*, vol. IA – 40, 2004, pp. 582 – 590.
- [29] W. Xu, "Low sampling frequency stator flux linkage observer for IPMSMs," *IEEE Trans.*, vol. IA – 51, no. 5, pp. 3932 – 3942, 2015.
- [30] N. Burach, E. Fornasiero, W. Soong, "Selection of PM flux linkage for maximum low speed rating in PM assisted reluctance synchronous machine," *IEEE Trans.*, vol. IA-51, no. 5, pp. 3600 – 3608, 2015
- [31] T. Inoue, Y. Inoue, S. Morimoto, M. Sanada, "Mathematical model for MTPA control of PMSM in stator flux synchronous frame," *IEEE Trans.*, vol. IA-51, no. 5, pp. 3620 – 3628, 2015.
- [32] G. Sizou, P. Zhang, D. M. Ionescu, Nabeel A. O. Durrainish, M. Rosa, "Automated multiobjective design optimization of PM a.c. machine using

- computationally efficient FEA and differential evolution," *IEEE Trans.*, vol. IA-49, no. 5, pp. 2086–2096, 2013.
- [33] T.J.E. Miller, *Brushless permanent magnet and reluctance motor drives*, book OUP, 1989.
- [34] I. Boldea, *Reluctance synchronous machines and drives*, book, OUP, 1996.
- [35] C. Lascu, I. Boldea, F. Blaabjerg, "DTC via feedback linearization of PMSM drives", *Record of OPTIM – 2012*, pp.338–343 (IEEEExplore)
- [36] I. Boldea, M.C. Paicu, G.D. Andreescu, "A drive flux concept for motion – sensorless unified a.c. drives," *IEEE Trans.*, 8, PE-23, no.5, pp. 2612–2618, 2008.
- [37] I. Boldea, I. Moldovan, L. Tutela, "Scalar V/T and I –  $\Gamma$  control of a.c. motor drives: an overview", *Record of ACEMP-ELECTROMOTION 2015*, Side, Turkey.
- [38] E. Fornasiero, E. Fornasiero, L. Alberti, N. Bianchi, S. Bolognani, "Considerations on selecting fractional – slot windings," *IEEE Trans on*, vol. IA – 49, no. 3, May-June 2013.
- [39] A. El – Refaie, Z. Q. Zhu, T. M. Jahns, D. Howe, "Winding inductances of fractional slot surface – mounted PM brushless machines," *IEEE-IAS-Annual Meeting*, 2008, pp. 1–8.
- [40] M.M. Ewinschütz, "Decidably chanded or doubly shifted fractional – slot lap and wave windings," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, no.1, pp. 684–686, 1948.
- [41] M. Barzaro, N. Bianchi, F. Magnussen, "Six – phase supply feasibility using a PM fractional – slot dual winding machine," *Record of IEEE – ECCE*, 2010, pp. 1058–1065.
- [42] V. Ostovic, *Dynamics of saturated electric machines*, book, Wiley, 1989.
- [43] C. Lascu, I. Boldea, F. Blaabjerg, "Super twisting sliding mode control of torque and flux in PMSM drives", *Record of IEEE-IECON-2015 (IEEEExplore)*.
- [44] C. Lascu, F. Blaabjerg, "Super twisting sliding mode direct torque control of IM drives," *Record of IEEE-ECCE-2014*, pp. 5116-5122 (IEEEExplore).
- [45] A. Lander, R. Kanchan, R. Kennel, P. Stobbe, *Model predictive control of electric drives*, book, Cavallier Publishers, Göttingen, Germany, 2010.
- [46] T. Geyer, D. E. Quevedo, "Performance of multistep finite control set model predictive control for power electronics," *IEEE Trans*, vol. PE-30, no.3, pp. 1633 – 1644, 2015.
- [47] J. Holtz, "Advanced PWM and predictive control – an overview," *IEEE Trans*, vol. IE-63, no.6, pp. 3857-3844, 2016.
- [48] J. Rodriguez, P. Cortes, *Predictive control of power converters and electrical drives*, book, Wiley-IEEE Press, USA, 2012.
- [49] J. S. Lee, R.D. Lorenz, "Deadbeat direct torque and flux control of IPMSM drives using minimum time ramp trajectory method at voltage and current limits," *IEEE Trans*, vol. IA-50, no.6, 2014, pp. 3795-3804.
- [50] P. Cortes, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo, J. Rodriguez, "Predictive control in power electronics and drives," *IEEE Trans*, vol. IE-52, no. 12, 2008, pp. 4312-4324.
- [51] M. Premlj, "Robust control invariant sets and Lyapunov based MPC for IPM synchronous motor drives," *IEEE Trans*, vol. IE-63, no. 6, pp. 3925-3933, 2016.
- [52] Synchronous reluctance motor and drive packages, ABB Products Guide, motors and generators, 2012.
- [53] R.R. Moghaddam, F. Gyllenstein, "Novel high-performance SynRM design method: an easy approach for a complicated rotor topology," *IEEE Trans*, vol. IE-61, no. 9, pp. 5058–5065, 2014.
- [54] D. Li, R. Qu, W. Xu, J. Li, T. A. Lipo, "Design procedure of dual – stator spoke array Vernier PM machines," *IEEE Trans*, vol. IA-51, no. 4, pp. 2972–2985, 2015.
- [55] T. Zou, R. Qu, D. Li, D. Jiang, "Synthesis of fractional-slot vernier permanent magnet machines," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 911-917.
- [56] T. Zou, X. Han, D. Jiang, R. Qu, D. Li, "Modeling and sensorless control of an advanced concentrated winding vernier PM machine," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 1112-1118.
- [57] Z.S. Du, T. A. Lipo, "High torque density ferrite permanent magnet vernier motor analysis and design with demagnetization consideration," *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 6082–6089.
- [58] E. Rieder, "Magnetolectric rotary machine (in german)," B. Bosch Patent no. 741163, Class 2111, Group 10, sept 16, 1943.
- [59] S.F. Rauch, L. J. Johnson, "Design principles of switching-flux alternators," *IEEE Trans.*, vol. 74, no.3, pp.1261–1268, 1955.
- [60] H. Yang, H. Lin, Z. Q. Zhu, D. Wang, S. Fang, Y. Huang, "A variable-flux hybrid-PM switched-flux memory machine for EV/HEV applications," *IEEE Trans.*, vol. IA – 52, no.3, pp. 2203–2214, 2016.
- [61] J.T. Chen, Z. Q. Zhu ; S. Iwasaki ; Rajesh P. Deodhar, "Influence of slot opening on optimal stator and rotor pole combination and electromagnetic performance of switched – flux PM brushless machine," *IEEE Trans.*, vol. IA-47, no. 4, pp. 1681 – 1691, 2011.
- [62] I. Boldea, *Variable speed generators*, book, 2<sup>nd</sup> edition, CRC Press Florida, Taylor and Francis, New York, 2015.
- [63] T. V. Frandsen; P. O. Rasmussen; K. K. Jensen, "Improved motor integrated PM gear for traction applications," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 3332–3339.
- [64] S. Agarita, I. Boldea, F. Blaabjerg, "High-frequency-injection-assisted "active-flux"-based sensorless vector control of reluctance synchronous motors, with experiments from zero speed," *IEEE Trans.*, vol. IA – 48, no. 6, pp. 1931–1939, 2012.
- [65] M. Yamashita, T. Sueda, "Development of a new traction control method to suppress wheel-slip of electric locomotives", *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2012, pp.1-6.
- [66] I. Boldea, "Linear electric machines, drives and MAGLEVs Handbook," CRC Press, Florida, Taylor & Francis New York, 2013, Chapters 19-22.
- [67] I. Boldea, L. N. Tutela, I. Pasa, D. Dorrell, "Automotive electric propulsion with reduced or no PMs: an overview," *IEEE Trans.*, vol. IE – 61, no. 10, pp. 5696–5711, 2014.
- [68] V. T. Biryukdeymenov, Ali M. Bazzi, P. T. Krein, "Evaluation of induction and permanent-magnet synchronous machines using drive-cycle energy and loss minimization in traction applications," *IEEE Trans.*, vol. IA – 50, no. 1, pp. 395 – 403, 2014.
- [69] S. Ooi, S. Morimoto, M. Sanada, Y. Inoue, "Performance evaluation of a high power density PMSynRM with ferrite magnets," *IEEE Trans.*, vol. IA – 49, no. 3, pp. 1308–1315, 2013.
- [70] A. Vagati, B. Boazzo, P. Guglielmi, G. Pellegrino, "Ferrite assisted synchronous reluctance machines: a general approach", *2012 XXII International Conference on Electrical Machines*, 2012, pp. 1315–1321.
- [71] K. Kiyota, T. Kakishima "Comparison of test result and design stage prediction of switched reluctance motor competitive with 60-kW, rare-earth PM motor", *IEEE Trans.*, Vol. IE-61, No. 10, 2013, pp.1308–1315.
- [72] C. Stamen, T. Ward, K. Rahman, R. Dowsey, P. Savagian, "Separately excited synchronous motor with rotary transformer for hybrid vehicle application," *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014, pp. 5844–5851.
- [73] D. Ursu, V. Gradinaru, H. Fahimi, I. Boldea, "Six phase BLDC reluctance machines: FEM based characterization and four – quadrant control," *IEEE Trans*, vol. IA-51, no.3, pp. 2105–2115, 2015.
- [74] F.J.H. Kalbf, A. S. Irizngi, L. N. Tutela, A. Moldovan-Popa; I. Boldea "1-kW, 7000–4500 rpm ferrite PMSM drive: comprehensive characterization and two sensorless control options," *IEEE Trans*, vol. IA-52, no.5, pp. 3980–3989, 2016.
- [75] A. T. De Almeida, F. T. J. E. Ferreira, A. Q. Duarte, "Technical and economical considerations on superhigh efficiency three phase motors," *IEEE Trans*, vol. IA-50, no.2, pp. 1374–1385, 2014.
- [76] A. Takahashi, S. Kikuchi, K. Miyata, A. Binder, "Asynchronous torque of line-start Permanent-Magnet Synchronous Motors," *IEEE Trans*, vol. EC-30, no.3, pp. 498–506, 2015.
- [77] C. Delbruyne, P. Sergeant, S. Deraemelaere, J. J. M. Deraem, L. Vandeveldre, "Influence of supply voltage distortion on the energy efficiency of line-start Permanent-Magnet motors," *IEEE Trans*, vol. IA-50, no.2, pp. 1034–1043, 2014.
- [78] Y. Bendjedou, R. Abdessemed, L. Hentouhami, E. Merabet, "Fuzzy logic control of squirrel cage induction generator for wind energy conversion," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 16, no.3, (www.jee.ro).



**Ion Boldea** (M'77-SM'81-F'96) received the M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University Politehnica of Timisoara, Timisoara Romania in 1967 and 1973, respectively.

He is currently a Full Professor with the University Politehnica of Timisoara. He has worked and published extensively (more than 100 publications in the U.S. and U.K.) on linear vehicles, and their control via power electronics. He has also been consulting, lecturing, giving keynote addresses, and holding intensive courses in the U.S., Europe, and Asia for the last 15 years. He was the Founder and has been the Director since 2001 of the Internet- only international *Journal of Electrical Engineering* (<http://www.jee.ro>).

Dr. Boldea is a member of the Industrial Drives Committee and the Electric Machines Committee of the IEEE Industry Applications Society (IAS). He was a Cochairman of the International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (<http://www.optim.8m.com>) in 2006, technically sponsored by IEEE IAS. He is an Associate Editor of *Electric power components and systems*.