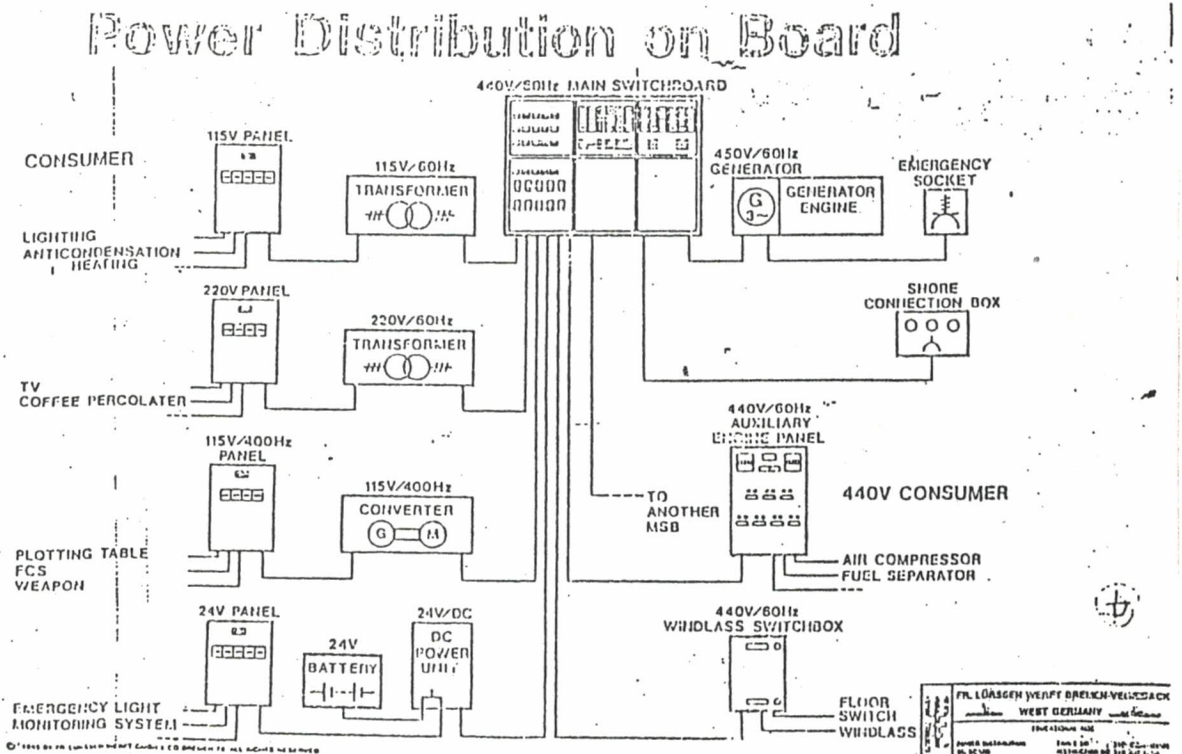


SISTIM DISTRIBUSI.

III.1. SISTIM DISTRIBUSI DI KAPAL

Sistim distribusi tenaga listrik pada kapal laut dapat dijelaskan sebagai berikut : Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pusat pembangkit (Generator) sebelum kepusat beban atau pemakai terlebih dahulu disalurkan kepanel utama (Main switch board) kemudian disalurkan kepusat pembagian, dapat dilihat pada gambar (5).



GAMBAR (5)
SKEMA SISTIM DISTRIBUSI

III.2. PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK DI KAPAL.

Kapal laut memiliki bermacam - macam jenis pembangkit yang gunanya untuk melayani beban keseluruhan yang ada pada kapal tersebut. Ditinjau dari sudut pemakaiannya, pembangkit tenaga listrik dikapal laut dapat dibagi menjadi :

1. Pembangkit utama, yang terdiri dari generator utama.
2. Pembangkit cadangan (darurat), yang terdiri dari accu.
3. Suplai darat (Shoor Conection).

III.2.1. PEMBANGKIT UTAMA.

Pada kapal laut di haruskan memiliki paling sedikit dua pembangkit listrik atau lebih, hal ini dimaksudkan untuk menghindari kemungkinan terjadinya pembebanan yang maksimum dan juga untuk persiapan apa bila salah satu generator atau pembangkit mengalami kerusakan satunya dapat dioperasikan dan juga untuk mengatasi beban puncak, dengan cara memparalelkan dua atau tiga Generator.

Kapasitas dari generator ditentukan sesuai dengan kebutuhan daya maksimum diantaranya macam - macam operasi kapal. Adapun macamnya antarlain ialah :

- a. Kapal dalam keadaan berlayar (normal running)
- b. Kapal dalam keadaan manuver, baik pada saat memasuki pelabuhan maupun pada saat meninggalkan pelabuhan (leaving port)
- c. Kapal dalam keadaan melakukan perlawanan (peranga)
- d. Kapal dalam keadaan sandar (in port).

III.2.2. PEMBANGKIT CADANGAN

Adanya pembangkit cadangan pada kapal laut bertujuan untuk melayani suplai daya pada waktu pembangkit utama mengalami gangguan (Black Out), untuk pembangkit cadangan pada umumnya dikapal laut menggunakan accu, hal ini didasarkan pada konvensi internasional "SOLAS" 1974, dimana diterangkan bahwa pada setiap kapal laut harus diperlengkapi accu sebagai suplai cadangan dan harus mampu memberikan suplai selama kurang lebih tiga jam.

III.2.3. SUPLAI DARAT (SHOR CONECTION)

Dalam hal ini suplai darat dipergunakan apabila kapal dalam keadaan sandar, biasanya pelabuhan sudah menyediakan suplai tersebut untuk dermaga kapal perang biasanya menyediakan suplay tenaga listrik dari 60 HZ dan 400 HZ karena pada kapal perang membutuhkan daya tersebut yaitu untuk peralatan Satelit navigasi dan sistim persenjataan. Pada supali darat ini prinsipnya

sama dengan suplai utama jadi pada kapal menyediakan connection box, dari connection box ini langsung masuk ke panel utama (Main switch board).

III.3. SIFAT DAN JENIS KABEL.

Kabel merupakan bagian terpenting dari instalasi listrik di kapal laut, yang mana fungsinya sebagai penyalur tenaga listrik dari sumber pembangkit ke pusat beban yang membutuhkan daya listrik. Untuk kapal laut kabel harus memiliki sifat - sifat antaralain tahan terhadap panas dan api, tahan terhadap air, ringan dan fleksibel. sifat - sifat tersebut dimaksudkan untuk menghindari kerusakan kabel pada situasi dan kondisi pelayaran dan cuaca lautan yang buruk, dan diharapkan dapat memberikan kemudahan pada pelaksanaan pemasangannya.

Sebagai mana layaknya suatu konduktor yang menghantarkan arus listrik, untuk menghindari bahaya hubung singkat dan bahaya sentuhan maka kabel harus ber-isolasi, disamping juga dilengkapi dengan perlindungan terhadap kenaikan temperatur, gangguan mekanis dan lain sebagainya.

Hal - hal yang perlu diperhatikan pada kabel adalah tegangan drop, rating arus, dan batas temperatur yang diijinkan, dimana hal tersebut diatas dimaksudkan

untuk dapat memberikan jaminan kelangsungan operasi pemakaian kabel tersebut. Berikut ini akan diperlihatkan beberapa jenis isolasi kabel serta batas - batas temperatur kerjanya, seperti yang ditunjukkan pada tabel II.

III.3.1. RATING ARUS

Rating arus adalah merupakan kemampuan dari kabel untuk mengalirkan arus beban, dimana dengan mengetahui rating arus dari beban kabel tersebut diharapkan tidak terjadi kemungkinan over current pada pengoperasian nantinya sehingga pelayanan tidak terganggu. Pada tabel berikut ini tabel III diperlihatkan rating arus dari kabel, dengan berbagai jenis isolasi yang diambil dari General Standarts And Instructions Duch Marine Cables of Hollandse.

TABEL (III).

TEMPERATUR KERJA UNTUK BEBERAPA JANIS ISOLASI

Material isolasi	Temp. Kerja maksimum	Temp. Ambient Maksimum
Polyvinyl Chloride Compound	60	50
Polyvinyl Chloride Compound (tahan panas)	75	65
Vulcanished Rubber (tujuan umum)	60	50
Butyl rubber	80	70
Ethylene Propylene Rubber	80	70
Silicon Rubber	150	140
Varnished Glass Fibre	180	170
Mineral Dg dilapisi Polyvinyl Chloride	70	60
Mineral	95 (unlimited)	-

15)
TABEL (IV)

RATING ARUS 50/60 HZ

PADA KONDUKTOR DENGAN PERMIABILITAS

MAX TEMPERATUR 85 °C TEMPERATUR RUANG 45 °C

K A B E L			
Luas Penampang 2 (mm)	Singel Core (A)	Double Core (A)	Tiga/Empat Core (A)
1	16	14	11
1,5	20	17	14
2,5	28	24	20
4	38	32	27
6	48	41	34
10	67	57	47
16	90	76	63
25	120	102	84
35	145	123	101
50	180	153	126
70	225	191	157
95	275	234	193
120	320	272	224
150	365	310	255
185	415	352	290
240	490	416	343
300	560	476	392

Factor correction rating arus untuk beberapa temperatur
ambient

oC								
ambient temperatur								
35	40	45	50	55	60	65	70	75

Correction factor

1,12	1,06	1,40	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61	0,50
------	------	------	------	------	------	------	------	------

15) General standrart of Hollandse Signalporaten.bu

16)
TABEL (V)

RATING ARUS 400 HZ

PADA KONDUKTOR PERMIABILITAS

MAX TEMPERATUR 85 °C TEMPERATUR RUANG 45 °C

Luas Penampang 2 (mm ²)	K A B E L		
	Singel	Double	Tiga/Empat
	Core (A)	Core (A)	Core (A)
1	16	14	11
1,5	19	19	16
2,5	29	26	22
4	35	33	29
6	48	45	39
10	65	61	52
16	87	78	68
25	117	-	85
35	141	-	104
50	166	-	126
70	199	-	148
95	223	-	172
120	255	-	189
150	278	-	204
185	295	-	216
240	334	-	226
300	380	-	-

Factor correction rating arus untuk beberapa temperatur ambient

Ambient temperatur	°C								
	35	40	45	50	55	60	65	70	75
Correction factor	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61	0,50

16) General standrart of Hollandse Signalporaten.bu

17)
TABEL (VI)

RESISTANSI DAN REAKTANSI
PADA 50 HZ/60HZ DAN 400 HZ TEMPERATUR 45 °C

LUAS PENAMPANG NOMINAL (mm)	50/60 HZ		400 HZ	
	R(Ohm/Km)	X(Ohm/Km)	R(Ohm/Km)	X(Ohm/Km)
1,5	14,9	-	14,9	1,6
2,5	8,1	-	8,1	1,6
4	5,0	-	5,0	1,6
6	2,4	-	3,9	1,5
10	2,0	-	2,0	1,4
16	1,25	-	1,3	1,2
25	0,80	-	0,82	1,1
35	0,57	-	0,60	1,0
50	0,42	-	0,47	1,9
75	0,29	-	0,36	1,6
95	0,21	-	0,29	1,6
120	0,16	-	0,25	1,6
150	0,13	-	0,22	1,5
185	0,11	-	0,20	0,8
240	0,08	-	0,17	0,8
300	0,07	-	0,15	0,75

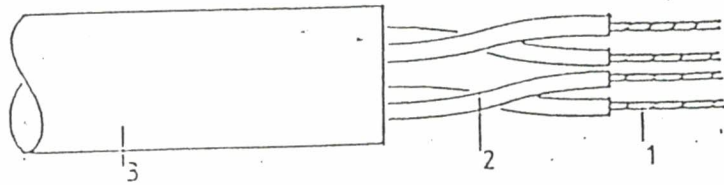
Rating arus untuk multi core

- Luas penampang melintang Nominal 0,4 mm 4A pada 45 °C
- Luas penampang melintang Nominal 1,0 mm 8A pada 45 °C

17) General standrart of Hollandse Signalporaten.bu

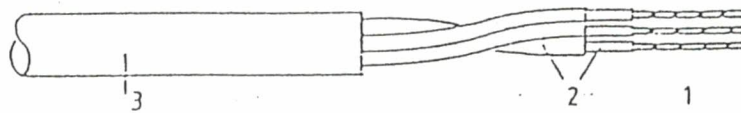
III.3.2. TIPE DAN JENIS KABEL

Macam - macam jenis kabel yang digunakan pada kapal FPB 57 NAV antara lain type XNM, VXNM, XNM (C), VXXM (B), 2XXM (G-B) dan 3XXM (G-B) yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



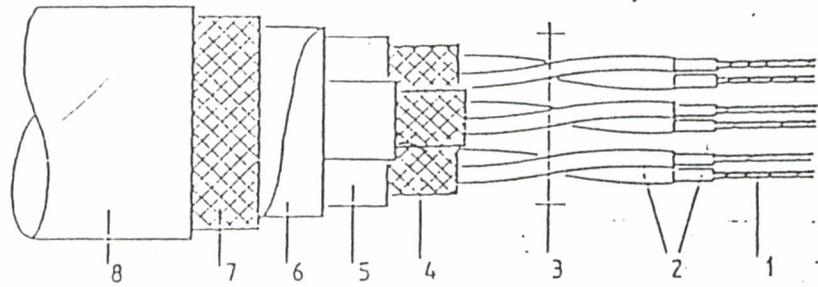
1. Tinned copper conductor
2. XLPE insulation
3. CSP sheath

GAMBAR (6)
KABEL TYPE XNM



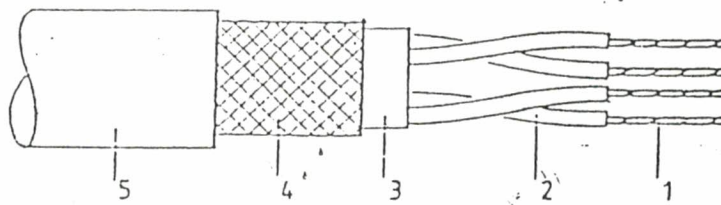
1. Tinned copper conductor
2. XLPE insulation
3. CSP sheath

GAMBAR (7)
KABEL TYPE VXNM



1. Tinned copper conductor
2. XLPE insulation
3. Cores twisted to pairs
4. Tinned copper wire screen
5. XLPE screen insulation
6. Polyester wrap
7. Tinned copper wire screen
8. CSP sheath

GAMBAR (8)
KABEL TYPE 2XXM (G-B)



1. Tinned copper conductor
2. XLPE insulation
3. Inner sheath
4. Copper wire braid
5. CSP sheath

GAMBAR (9)
KABEL TYPE XNM (C)

III.3.3. KARAKTERISTIK KONDUKTOR DAN KABEL

Tahanan konduktor dipengaruhi oleh temperatur, frekwensi dan kerapatan arus, dengan kenaikan temperatur dan frekwensi dapat memperbesar harga tahanan

III.3.3.1. Efek temperatur pada resistansi konduktor.

Tahanan dari tembaga dan aluminium bervariasi secara langsung dengan perubahan temperatur. Besar tahanan untuk dc (R_{dc}) dari konduktor :

$$R_{dc} = R_0 \left[1 + \alpha_{20} (\theta - 20) \right] \dots (26)$$

dimana : R = Tahanan pada temperatur kerja (Ohm)

R_0 = Tahanan pada 20^o C (Ohm)

α_{20} = koefisien temperatur (Tabel III)

θ = temperatur kerja (C)

Pada Tabel III, harga resistivity koefisien temperatur yang distandarkan oleh International Electrotechnical Commission.

18) B.M. Weedy, Undergraound Transmition of Electric Power, A-Wiley-Interscience Publication, London, 1979 hal 16.

TABEL (VII)
RESISTIVITY DAN KOEFISIEN TEMPERATUR

Bahan	Resistivity pada 20° C (Ohm/m)	Koefisien tem pertaaur pada 20° C (tiap ° C)
Tembaga	1,7211 10 ⁻⁸	3,93 10 ⁻³
Aluminium	2,8261 10 ⁻⁸	4,03 10 ⁻³
Steel	13,8 10 ⁻⁸	4,5 10 ⁻³
Stainlee steel	70,0 10 ⁻⁸	diabaikan

III.3.3.2 Efek mengulit (Skin Effect)

Bila arus bolak - balik mengalir pada konduktor, maka distribusi arusnya tidak merata pada permukaan konduktor, arus yang mengalir hanya pada permukaan konduktor. Filamen terluar akan mengalirkan arus lebih banyak dibandingkan sebelah dalam, yang mengakibatkan tahanan menjadi lebih besar. Efek mengulit ini dipengaruhi oleh frekwensi, makin tinggi frekwensi maka pengaruh efek mengulit makin besar. Untuk memperkecil pengaruh efek mengulit, frekwensi kerja direndahkan, diameter penghantar diperkecil dan bahan konduktor

19) H.N. Muller, Jr, Electrical Characteristics of Cable, Electrical Transmission and Distribution Book, Westinghouse, hal 68,

dipilih yang mempunyai permeabilitas kecil serta digunakan konduktor yang terdiri dari serabut - serabut.
 20) Faktor efek mengulit :

$$Y_s = \frac{I}{192 + 0,8 X_s} \dots\dots\dots(27)$$

$$X_s = \sqrt{\frac{8\pi f \cdot 10^{-9} K_s}{R_{dc}}} \dots\dots\dots(28)$$

- dimana : Y_s = faktor efek mengulit.
 X_s = komponen efek mengulit.
 f = frekwensi (Hz)
 R_{dc} = tahanan dc (Ohm)
 K_s = konstanta efek mengulit (tabel VII)

III.3.3.3. Efek proximity

Fungsi bolak - balik dalam sebuah konduktor disebabkan oleh arus yang mengalir dalam sebuah konduktor disebelahnya, aliran arus ini akan menyebabkan sirkulasi arus. Akibatnya tahanan konduktor akan naik. Dan untuk konduktor besar maka pertambahan tahanan
 21) diabaikan.

 20) B.M. Weddy, Opcit, hal 17.
 21) H.N. Muller, Jr, Loc cit.

Faktor efek proximity :

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0,8 X_p^4} \left[\frac{D_s}{s} \right]^2 \left[0,312 \left[\frac{D_s}{s} \right]^2 + \frac{1,18}{X_p^2 / (192 + 0,8 X_p^4) + 0,27} \right] \dots\dots\dots(29)$$

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} \times 10^{-9} k_p \dots\dots\dots(30)$$

dimana :

- s = jarak antara 2 konduktor (cm)
- Ds = diameter konduktor (cm)
- Yp = faktor efek proximity
- Xp = komponen efek proximity
- Kp = konstanta efek proximity (tabel XII)

III.3.3.4. Perbandingan tahanan Ac dan Dc pada konduktor

Harga efektif tahanan Ac (Rdc) dari konduktor adalah ²²⁾:

$$R_{ac} = R_{dc} (1 + Y_s + Y_p) \dots\dots\dots(31)$$

dimana : Rac adalah tahanan arus bolak-balik (Ohm)

Yp adalah faktor efek proximity

Ys adalah faktor skin effec

²²⁾ B. M Weddy, Loc Cit.

TABEL (VII)
HARGA Ks DAN Kp MENURUT STANDART IEC

TYPE KONDUKTOR	Ks	Kp
Round Stranded	1	0.8
Round Compact	1	0.8
Round Segmental	0.345	0.37
Hollow	0	0.8
Sector Shape	1	0.8

3.3.5. Rugi Rugi Selubung Pada Kabel.

Pada kabel phase tunggal yang digunakan pada system tiga phase akan terjadi rugi rugi pada selubung, rugi rugi ini terjadi karena timbulnya fluxi antara dua konduktor yang berdekatan jika dialiri arus. Rugi rugi selubung ini diistimasikan oleh Arnold sebagai berikut :²⁴⁾.

$$p = I^2 \left[\frac{78^2 2\pi f}{R_s} \frac{R_m}{D} 10^{-9} \right] \dots\dots\dots(32)$$

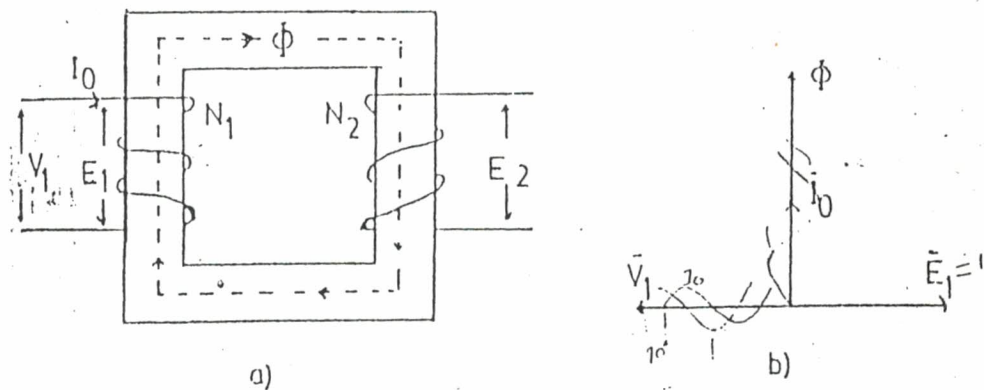
²⁴⁾ T. S. Madhava Rao, 'Electric Power Transfer System', Khanna Publisher New Delhi 1980.

dimana : P = Besar rugi-rugi selubung per fasa (Watt)
 I = Arus per konduktor (Amp)
 R_s = Tahanan selubung (Ohm)
 R_m = Radius rata-rata selubung (m).
 D = Jarak antara 2 konduktor (m)

III.3.4. TRANSFORMATOR

III.3.4.1. TRANSFORMATOR 1 PHASA

Bila suatu transformator dalam keadaan tak berbeban, gambar (10a) dihubungkan dengan V_1 yang sinusoidal akan mengalir arus primer I_0 yang sinusoidal. Jika belitan kumparan primer (N_1) dianggap reaktif murni maka I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 seperti pada gambar (10b)



GAMBAR (10)

- a). RANGKAIAN TRANSFORMATOR SEDERHANA
- b). DIAGRAM ARUS DAN TEGANGAN.

Tegangan yang diinduksikan :

$$e_1 = N_1 \omega \phi_{\text{maks}} \cos \omega t \dots\dots\dots(34)$$

dimana : e_1 = Tegangan transformator primer (Volt)

ω = Kecepatan sudut (radial/detik)

f = Frekwensi (Hz)

t = waktu (detik)

ϕ_{maks} = fluksi maksimum (weber)

N_1 = Jumlah lilitan kumparan primer.

Harga efektifnya :

$$E_1 = 1,11 N_1 f \phi_{\text{maks}} \dots\dots\dots(35)$$

Jika $\phi_{\text{maks}} = A \frac{B_{\text{maks}}}{\text{maks}}$ maka :

$$E_1 = 4,44 N_1 f A B_{\text{maks}} \dots\dots\dots(36)$$

dimana : A = Luas permukaan besi (m²)

B_{maks} = kerapatan fluksi maksimum (weber/m²)

Pada rangakaian sekunder akan timbul tegangan :

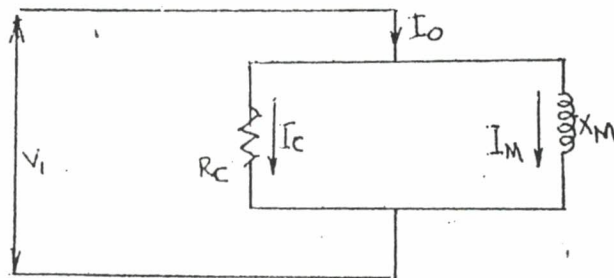
24) Fitzgerald, Kingsley, Kusko, op cit, hal 36.

$$E_2 = 4,44 f N_2 \oint \text{ maks} \dots \dots \dots (37)$$

dimana E_2 = Tegangan sisi sekunder (volt)

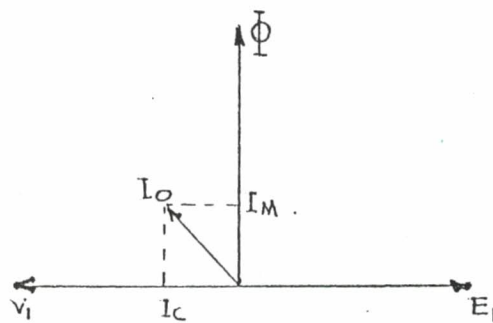
N_2 = Jumlah lilitan sekunder.

Arus primer I_0 yang mengalir di primer pada saat kumparan sekunder tidak dibebani disebut arus penguat seperti pada gambar (11).



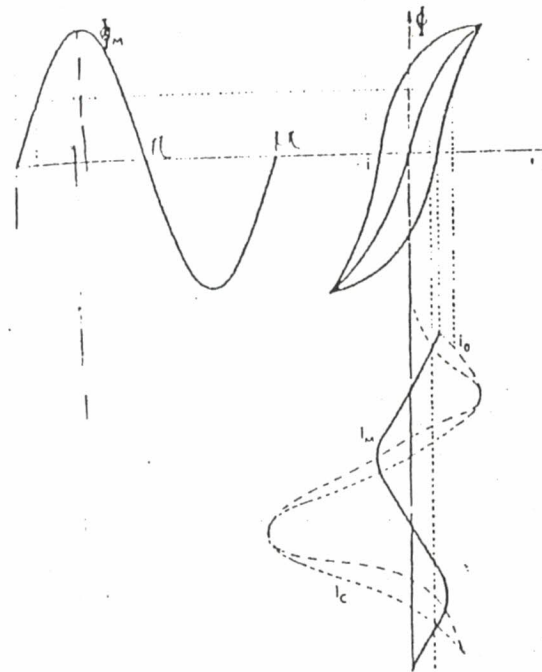
(Gambar 11)
RANGKAIAN MAGNETISASI

Pada kenyataannya arus primer I_0 bukan merupakan arus induktif murni, sehingga terdiri dari dua komponen arus seperti pada gambar (12)



GAMBAR 12
ARUS I_0 TIDAK INDUKTIF MURNI

Komponen arus permagnitan yang menghasilkan fluksi (Φ) tidak berbentuk sinusoidal, karena adanya sifat besi yang non linier (pada kurva B-H). pada gambar (13)

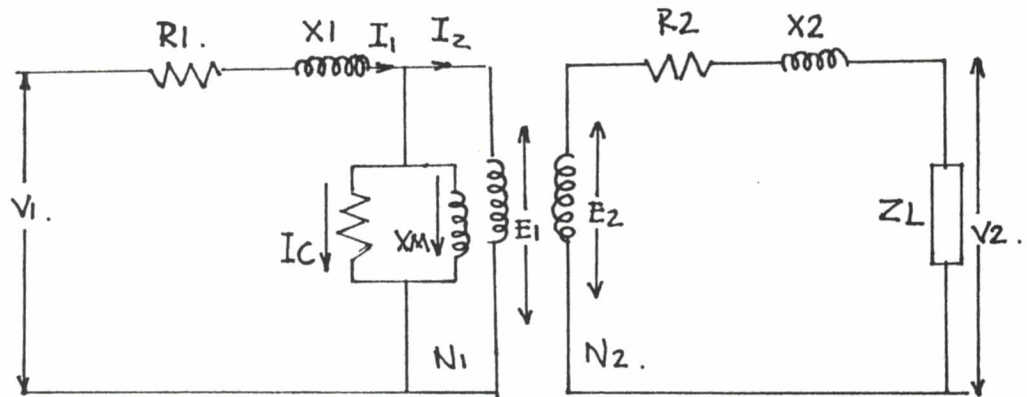


GAMBAR 13
BENTUK FLUKSI TIDAK SINUSOIDAL

Komponen arus tembaga i_c , menyatakan daya yang hilang akibat adanya " rugi histerisis " dan " rugi arus eddy " i_c sefasa dengan V_1 maka hasil perkalian ($i_c \times V_1$) merupakan daya watt yang hilang.

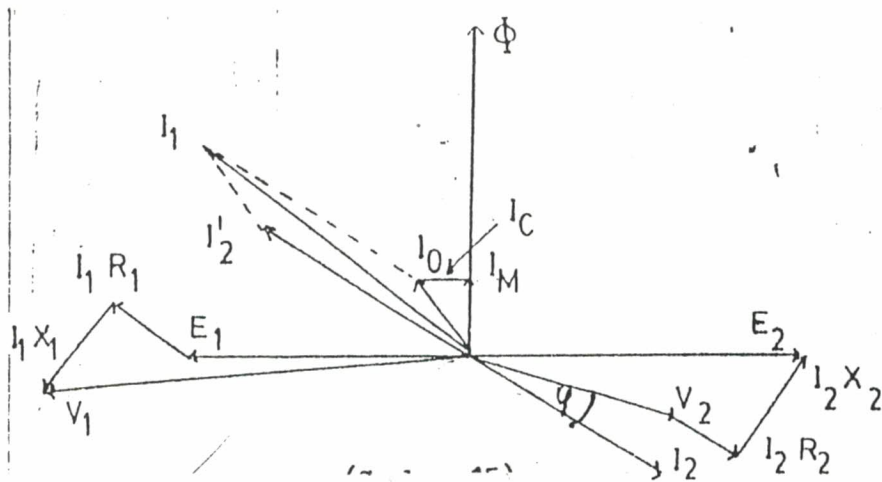
Pada keadaan berbeban dibuat suatu rangkaian ekivalen seperti pada gambar (14). Dalam keadaan berbeban tidak seluruh fluksi yang dihasilkan I_m merupakan fluksi bersama m , tetapi hanya sebagian yang mencakup kumparan primer atau kumparan sekunder. Adanya fluksi bocor Q_1 dan Q_2 ditunjukkan dengan reaktansi X_1 dan X_2 , untuk rugi tahanan tembaga ditunjukkan

dengan R_1 dan R_2 . Maka model rangkaiannya pada gambar (14).



GAMBAR 14
RANGKAIAN EKIVALEN TRANSFORMATOR

Pada gambar (15) merupakan diagram arus dan tegangan untuk rangkaian ekuivalen transformator. Arus I_1 merupakan arus masuk pada transformator, tegangan V_1 merupakan tegangan pada terminalnya, E_1 tegangan pada belitan primer, E_2 tegangan pada belitan sekunder, V_2 tegangan pada terminal sekunder dan arus I_2 fasa dengan tegangan V_2 dengan sudut ϕ .



GAMBAR 15

DIAGRAM ARUS DAN TEGANGAN

Dari rangkaian ekivalen dapat diperoleh :

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \dots\dots\dots(38)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2 \dots\dots\dots(39)$$

Untuk keadaan ideal :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots(40)$$

dimana :

a = angka transformator.

Sehingga didapatkan :

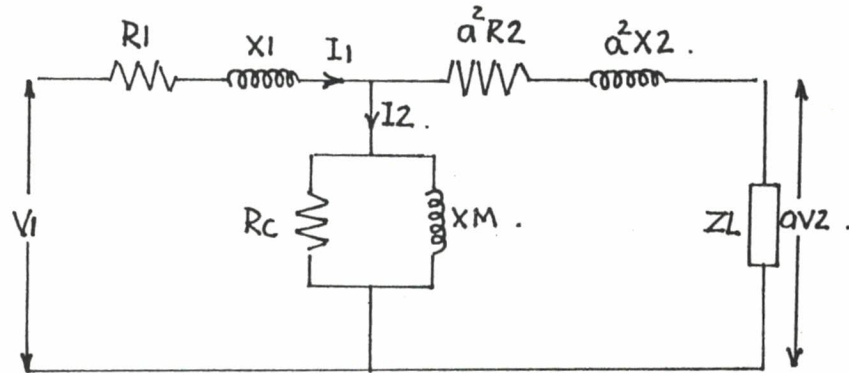
$$E_1 = a (I_2 Z_1 + I_2 R_2 + I_2 X_2) \dots\dots(41)$$

Untuk harga : $I_2 = a I_1$

Jadi tegangan terminal sisi primer :

$$V_1 = a^2 I_2' Z_L + a^2 I_2' R_2 + a^2 I_2' X_2 + I_1 X_1 \dots\dots\dots(42)$$

Dari persamaan (42) maka rangkaiannya dapat dirubah seperti gambar (16).



GAMBAR (16)
RANGKAIAN PENGGANTI TRANSFORMATOR

III.3.4.2. TRANSFORMATOR 3 PHASA.

Transformator 3 phasa dapat terdiri dari 3 x 1 phasa atau 1 x 3 phasa, transformator 3 x 1 phasa mempunyai kuntungan dibandingkan 3 x 1 phasa yaitu :

1. Efisiensinya lebih tinggi.
2. Dimensinya lebih kecil.
3. Harganya lebih murah.

Jika tegangan emf e_A, e_B, e_C , dalam kumparan phasa A,B,C,

tidak gelombang sinus maka tegangan phasa A,B,dan C : 25)

25) M. Kostenko, L. Piotrovsky, Electrical Machines, Volume I, Mir Publisher, Moscow 1969, Third Edition, Hal 439.

$$e_a = E_{m1} \sin \omega t + E_{m3} \sin \omega t + E_{m5} \sin \omega t + \dots \dots \dots (43)$$

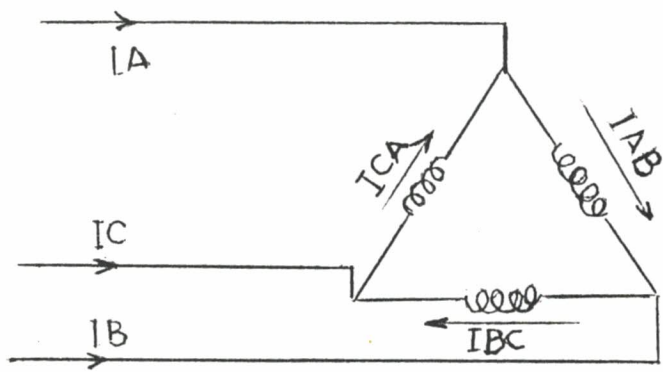
$$e_b = E_{m1} \sin (\omega t - 2n\frac{1}{9}) + E_{m3} \sin 3\omega t + E_{m5} \sin (5\omega t - 4n\frac{1}{9}) + \dots \dots \dots (44)$$

$$e_c = E_{m1} \sin (\omega t - 4n\frac{1}{9}) + E_{m3} \sin 3\omega t + E_{m5} \sin (5\omega t - 2n\frac{1}{9}) + \dots \dots \dots (45)$$

Transformator tiga phase mempunyai hubungan

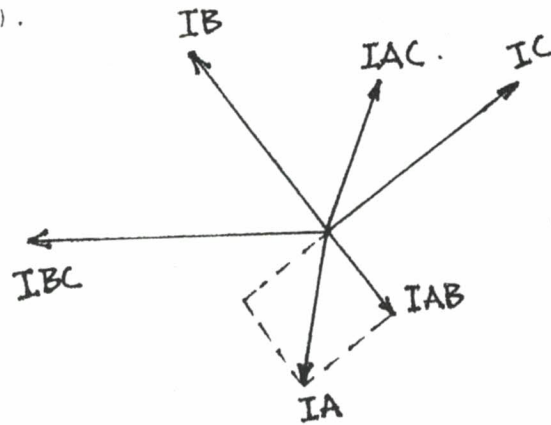
a. Hubungan Delta (Δ).

Transformator tiga phase dengan kumparan yang dihubungkan delta, maka tegangannya V_{ab} , V_{bc} dan V_{ca} . Masing masing berbeda sudut 120° seperti pada gambar 17.



Gambar 17.
Rangkaian Hubung Delta (Δ).

Dari hubungan delta dapat dibuat vektor diagram pada gambar (18).



GAMBAR 18
DIAGRAM VEKTOR HUBUNGAN DELTA

Dari diagram vektor maka diperoleh harga arus I_A, I_B, I_C untuk beban seimbang, maka $V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0$.

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

Untuk arus jala-jala :

$$I_A = \sqrt{3} \cdot I_{AB}$$

Tegangan jala-jala dalam hubungan delta sama dengan tegangan fasanya, maka dayanya :

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{V}{A} \cdot \frac{I}{A} \\
 &= 3 \frac{V}{L} \cdot \left(\frac{I}{3} \right) \\
 &= 3 \frac{V}{L} \cdot I
 \end{aligned}$$

Dengan faktor kerja $\cos \varphi$, maka :

$$P = 3 \frac{V}{L} \cdot I \cos \varphi \dots\dots\dots(46)$$

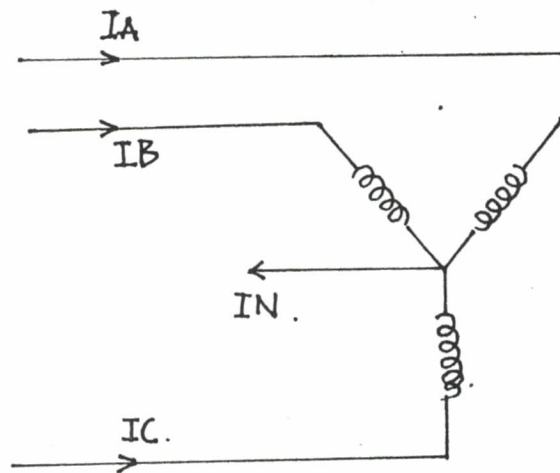
dimana : P = kapasitas daya (KVA)

V = Tegangan jala-jala (Volt)

I = Arus jala-jala (Amp).

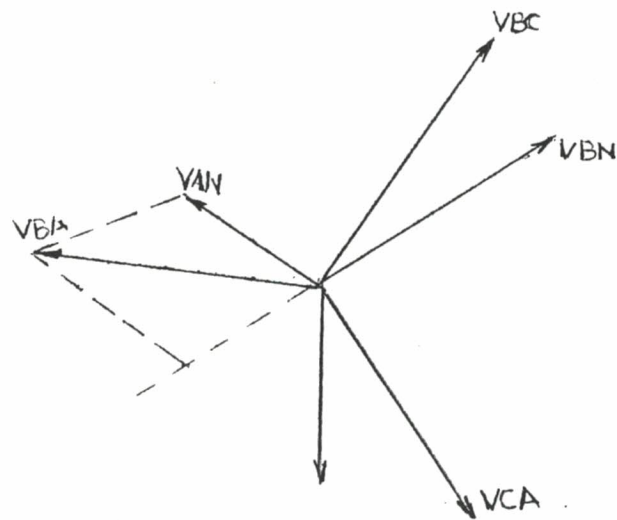
b. Hubungan bintang (Y).

Transformator 3 fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang yaitu arusnya I_A, I_B, I_C yang masing-masing berbeda fasa 120° , gambar (19).



GAMBAR 19
RANGKAIAN HUBUNGAN BINTANG

Dari rangkaian hubung bintang dapat dibuat diagram vektor tegangan pada gambar 20.



Gambar 20.
Diagram Vektor Hubung Bintang

Untuk beban seimbang :

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad \dots\dots\dots(47)$$

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an}$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn}$$

Untuk hubung bintang berlaku :

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_{an}$$

$$P = \sqrt{3} V_l \cdot I_l$$

Dengan faktor kerja cos

$$P = \sqrt{3} \frac{V_L}{L} \cdot I_L \cos \dots\dots\dots(49)$$

III.3.4.3. RUGI - RUGI TRANSFORMATOR

Pada saat tak berbeban transformator sudah mempunyai rugi-rugi besi yang terdiri dari rugi histerisis dan rugi arus eddy. Jika transformator dibebani, maka akan terjadi rugi-rugi tembaga.

1. Rugi - rugi histerisis ²⁶⁾ :

$$P_h = \eta \delta f B_{maks}^n \dots\dots\dots(50)$$

dimana P_h = Rugi-rugi histerisis (Watt)

δ = Volume besi (m³)

η = Koefisien karakteristik besi.

f = Frekwensi (Hz)

B_{maks} = Kerapatan fluksi maksimum (weber/m²)

n = 1,5 sampai 2,5.

Yang merupakan faktor histerisis.

$$P_h = k_h \cdot f B_{maks}^n \dots\dots\dots(51)$$

2. Rugi - rugi arus eddy ²⁷⁾ :

$$P_e = \frac{\pi \cdot f \cdot \tau \cdot B_{maks}^2}{\rho} \dots\dots\dots(52)$$

 26) Department of Electrical Engineering Masscusetts Institute of Technology, Magnetic Circuit and Transformer The M>I>T Press, Masscusetts, 1965, hal 129.
 27) Ibid, hal 136.

dimana :

P_e = Rugi arus eddy (Watt)

δ = Tebal lapisan (m)

ρ = Resistivity (Ohm/m)

Untuk $K_e = \frac{\pi^2 \tau^2 \delta}{\rho}$ faktor arus eddy maka rugi-ruginya :

$$P_e = K_e f^2 B_{maks}^2 \dots\dots\dots(53)$$

3. Rugi - rugi tembaga ²⁸⁾

$$P_{cu} = N^2 I^2 \frac{\rho l_m}{A_{cu}} \dots\dots\dots(54)$$

Dimana :

P_{cu} = Besar rugi-rugi tembaga (Watt)

N = Jumlah lilitan

I = Arus yang mengalir (Amp)

l_m = Panjang rata-rata tiap lilitan (m)

ρ = Resistivity (Ohm/m).

A_{cu} = Luas penampang tembaga (m²)

Jadi rugi-rugi transformator dalam keadaan berbeban menjadi :

$$\begin{aligned} P_{\text{rugi-rugi}} &= P_h + P_e + P_{cu} \dots\dots(55) \\ &= P_e + P_{cu} \end{aligned}$$

Untuk $P_e = P_h + P_e + P_{cu}$
adalah rugi-rugi besi.

28) Ibid, hal 227.