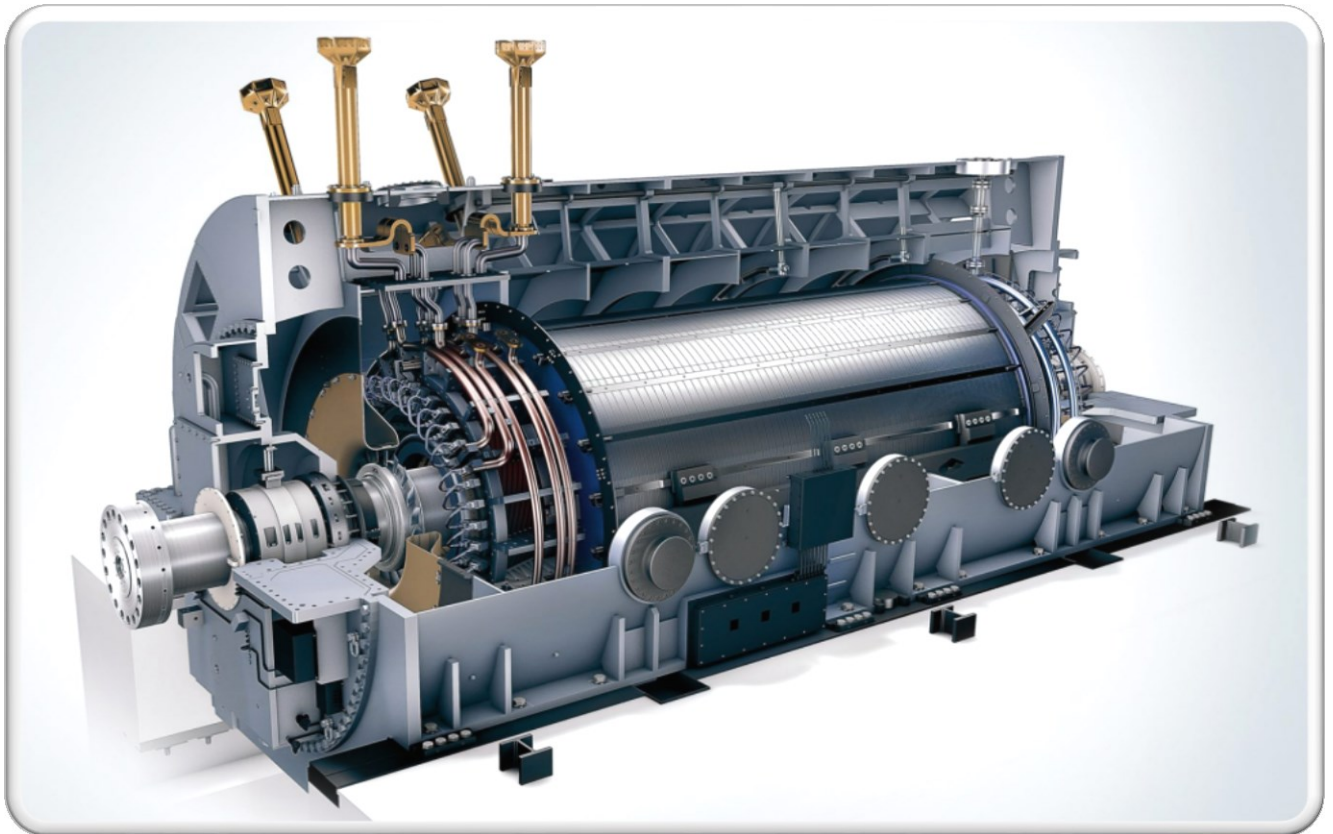




2019



# **MODUL PRAKTIKUM TEKNIK TENAGA LISTRIK**

Laboratorium Konversi Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro, UI

---

# **MODUL PRAKTIKUM TEKNIK TENAGA LISTRIK**

**Untuk Program Studi Teknik Elektro**

---

Penanggung Jawab :

**Ir. Chairul Hudaya, ST, M.Eng., Ph.D, IPM**

*Kepala Laboratorium Konversi Energi Listrik DTE FTUI*



Dipublikasikan oleh :

Laboratorium Konversi Energi Listrik

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Indonesia

2019

Penyusun :

Tim Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik DTE FTUI



## SAFETY INDUCTION



UTAMAKAN KESELAMATAN  
DAN KEBERATAN KERJA

**SETIAP PENGOPERASIAN PERALATAN PRAKTIKUM WAJIB DIDAMPINGI ASISTEN LABORATORIUM. BACALAH BAIK-BAIK PETUNJUK KESELAMATAN UMUM INI DAN PETUNJUK KESELAMATAN PADA SETIAP MODUL SERTA BERDOA SEBELUM MELAKUKAN PRAKTIKUM.**



Praktikan wajib mengenakan sepatu yang memadai (menutupi kaki) agar terhindar dari bahaya tersengat listrik dan tertimpa benda-benda dalam praktikum. Praktikan yang tidak bersepatu dilarang mengikuti praktikum, kecuali sakit yang tidak memungkinkan mengenakan sepatu dan atas izin asisten.



Dilarang bercanda dan berkelahi di Laboratorium Konversi Energi Listrik selama kegiatan berlangsung. Perhatikan langkah dan gerak ketika sedang bergerak agar tidak menyanggol peralatan.



Praktikan wajib membaca buku panduan praktikum dan memperhatikan petunjuk keamanan pada setiap modul sebelum melakukan praktikum. Kerusakan peralatan akibat kecerobohan praktikan harus dipertanggungjawabkan.



Harap menyimpan telepon selular atau perangkat elektronik komunikasi lainnya agar dapat fokus berpraktikum. Dilarang bermain telepon selular atau perangkat elektronik komunikasi



Selalu berhati-hati pada saat menggunakan perangkat listrik. Matikan peralatan terlebih dahulu sebelum mencabut kabel atau mengubah konfigurasi peralatan praktikum. Hati-hati bahaya listrik statis.



Dilarang merokok di setiap tempat pada lingkungan Departemen Teknik Elektro.



Jika terjadi kebakaran, tabung pemadam api terletak di sebelah kiri pintu masuk. Jika terjadi hal-hal yang tidak diharapkan, lakukan prosedur darurat



Dilarang makan dan minum selama mengoperasikan

**ASISTEN LABORATORIUM BERHAK MENEGUR ATAU MENINDAK PRAKTIKAN YANG DIANGGAP MEMBAHAYAKAN ATAU MELAKUKAN HAL-HAL YANG TIDAK SEPATUTNYA SELAMA PRAKTIKUM.**



## PROFIL ASISTEN



Firdaus  
Rahmad Efendi



Muhammad  
Aziz



Rizqi  
Koestendyah



Fahmi Firdaus  
Angkasa



Syauqi I



Fabian Aji  
Wibowo



Nadhif Ahmad  
Dhialdien



Andri P Purba



Muhammad  
Aqil Fikry B







---

## TATA TERTIB PELAKSANAAN PRAKTIKUM

1. **Praktikan harus berhati-hati dan dianggap telah mengetahui bahaya listrik.**
2. Praktikan harus berpakaian rapi, memakai sepatu tertutup, kemeja atau kaos berkerah (tidak diperkenankan memakai kaos tanpa kerah maupun kaos yang dilapisi jaket).
3. Praktikan diminta hadir 10 menit sebelum praktikum dimulai.
4. Praktikan yang datang terlambat lebih dari 15 menit dianggap tidak mengikuti praktikum modul tersebut dan nilai pada modul tersebut dianggap 0 (nol).
5. Praktikan wajib membawa kartu praktikum dan mengumpulkan tugas pendahuluan sebelum praktikum dimulai. Apabila praktikan tidak membawa kartu praktikum atau tidak mengumpulkan tugas pendahuluan, maka praktikan tidak diizinkan mengikuti praktikum.
6. Tugas pendahuluan akan diupload maksimum pukul 18.00 satu hari sebelum praktikum dimulai.
7. Praktikan wajib mengikuti semua proses pelaksanaan praktikum.
8. Praktikan harus ikut menjaga kebersihan laboratorium dan dilarang membawa makanan/minuman ke dalam ruangan praktikum.
9. Izin praktikum selain karena sakit atau kecelakaan MAKSIMUM 24 jam sebelum praktikum, izin karena sakit atau kecelakaan WAJIB menyerahkan bukti (contoh: surat dari dokter) yang diserahkan saat praktikum selanjutnya.
10. Praktikan diizinkan memasuki ruangan praktikum setelah dipersilakan masuk oleh asisten laboratorium.
11. Praktikan harus mengisi daftar hadir praktikum dan daftar hadir pengumpulan laporan.
12. Praktikan hanya boleh meninggalkan ruangan praktikum setelah mendapat izin dari asisten laboratorium.
13. Asisten berhak mengganti jadwal praktikum jika praktikan dinilai tidak siap mengikuti praktikum.
14. Laporan praktikum ditulis dengan tulisan tangan pada kertas A4. Praktikan boleh menitipkan laporannya pada temannya untuk dikumpulkan dengan



menyertakan kartu praktikum. Waktu pengumpulan laporan paling lambat 2x24 jam setelah praktikum. Pengecualian untuk:

Praktikum hari Kamis shift 3 dan 4 = laporan dikumpulkan Sabtu MAX 12.00 WIB.

Praktikum hari Jumat all shift = laporan dikumpulkan Senin MAX 08.00 WIB.

15. Setelah selesai praktikum, praktikan diminta untuk merapikan kembali alat-alat yang dipakai praktikum ke tempatnya semula.
16. Praktikan tidak boleh mengambil barang maupun peralatan yang ada di laboratorium.
17. Pergantian jadwal max 1x24 jam sebelum praktikum dimulai dengan alasan yang DAPAT DITERIMA. Lewat dari 1 x 24 jam dianggap jadwal TIDAK BERUBAH.
18. Presentase penilaian praktikum Teknik Tenaga Listrik 2019
  - Modul 1 : 8 %
  - Modul 2-9 : 10 %
  - Modul 10 : 12 %
19. Bobot penilaian masing-masing modul adalah sebagai berikut :
  - a). Praktikum : 50%
    - Tugas pendahuluan : 25 %
    - Tanya Jawab & Diskusi : 55 %
    - Kedisiplinan : 20%
  - b). Laporan : 50%
    - Dasar Teori : 25%
    - Analisis : 35%
    - Pengolahan Data dan Grafik : 15%
    - Kesimpulan : 10%
    - Tugas Tambahan : 15%
20. Segala tindakan **PLAGIARISME** oleh praktikan akan berbuah sanksi berupa nilai dari laporan praktikan yang bersangkutan akan dibagi sesuai dengan jumlah orang.



## DAFTAR ISI

<b>SAFETY INDUCTION</b> .....	<b>ii</b>
<b>PROFIL ASISTEN</b> .....	<b>iii</b>
<b>TATA TERTIB PELAKSANAAN PRAKTIKUM</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vi</b>
<b>MODUL I</b> .....	<b>1</b>
<b>DASAR TEORI</b> .....	<b>1</b>
1.1    Mesin Listrik .....	1
1.2    Gerakan Rotasional, Hukum Newton, dan Hubungan Daya.....	1
1.2.1    Posisi Sudut ( <i>Angular Position</i> ) $\theta$ .....	1
1.2.2    Kecepatan Sudut ( <i>Angular Velocity</i> ) $\omega$ .....	2
1.2.3    Akselerasi Sudut ( <i>Angular Acceleration</i> ) $\alpha$ .....	2
1.2.4    Torsi ( <i>Torque</i> ) $\tau$ .....	3
1.2.5    Hukum Rotasi Newton (Newton's Law of Rotation) .....	3
1.2.6    Usaha ( <i>Work</i> ) $W$ .....	4
1.2.7    Daya ( <i>Power</i> ) $P$ .....	4
1.3    Medan Magnet.....	5
1.3.1    Rangkaian Magnetik .....	6
1.3.2    Rugi Hysteresis pada Core.....	7
1.4    Hukum Faraday – Tegangan Terinduksi dari Perubahan Medan Magnet Terhadap Waktu.....	8
1.5    Produksi Gaya Induksi Pada Kawat .....	8
1.6    Tegangan yang Terinduksi Pada Konduktor yang Bergerak Didalam Medan Magnet .....	9
1.7    Daya Aktif, Reaktif, dan Semu .....	10



---

1.7.1	Segitiga Daya .....	12
<b>MODUL II .....</b>		<b>13</b>
<b>MOTOR DC (ARUS SEARAH) .....</b>		<b>13</b>
2.1	PENDAHULUAN .....	13
2.1.1	Motor Arus Searah .....	13
2.1.2	Jenis – Jenis Motor Arus Searah .....	14
2.1.3	Power Flow Motor DC .....	17
2.2	ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN .....	18
2.3	RANGKAIAN PERCOBAAN.....	18
2.4	TAHAP MENJALANKAN DAN PEMBEBANAN MOTOR.....	18
2.4.1	Start Motor .....	18
2.4.2	Mengatur Putaran Motor .....	19
2.4.3	Pembebanan Motor .....	19
2.4.4	Mematikan Motor.....	19
2.5	PERCOBAAN-PERCOBAAN MOTOR ARUS SEARAH .....	19
2.5.1	Karakteristik Beban Nol.....	19
2.5.2	Karakteristik Pengaturan Putaran.....	20
<b>MODUL III.....</b>		<b>21</b>
<b>GENERATOR DC (ARUS SEARAH).....</b>		<b>21</b>
3.1	PENDAHULUAN.....	21
3.1.1	Generator Arus Searah .....	21
3.2	ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN .....	22
3.3	RANGKAIAN PERCOBAAN.....	23
3.4	TAHAP MENJALANKAN GENERATOR .....	23
3.4.1	Start Generator .....	23
3.4.2	Pembebanan Generator .....	23





3.4.3	Mematikan Generator.....	23
3.5	PERCOBAAN-PERCOBAAN GENERATOR ARUS SEARAH .....	24
3.5.1	Percobaan Beban Nol.....	24
3.5.2	Percobaan Berbeban.....	25
<b>MODUL IV</b>	<b>.....</b>	<b>26</b>
<b>GENERATOR SINKRON</b>	<b>.....</b>	<b>26</b>
4.1	PENDAHULUAN.....	26
4.1.1	Generator Sinkron .....	26
4.1.2	Sistem Eksitasi .....	27
4.1.3	Rangkaian Ekuivalen .....	28
4.1.4	Rugi-rugi Generator Induksi .....	29
4.2	ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN .....	29
4.3	LANGKAH-LANGKAH PERCOBAAN:.....	31
4.3.1	Percobaan Beban Nol.....	31
4.3.2	Percobaan Berbeban.....	32
<b>MODUL V</b>	<b>.....</b>	<b>33</b>
<b>PARALEL GENERATOR SINKRON</b>	<b>.....</b>	<b>33</b>
5.1	PENDAHULUAN.....	33
5.2	LANGKAH-LANGKAH PERCOBAAN:.....	34
<b>MODUL VI</b>	<b>.....</b>	<b>36</b>
<b>KARAKTERISTIK MOTOR INDUKSI TIGA FASA</b>	<b>.....</b>	<b>36</b>
6.1	PENDAHULUAN.....	36
6.1.1	Pengertian Umum.....	36
6.1.2	Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa.....	36
6.1.3	Prinsip Kerja .....	38
6.1.4	Medan Putar .....	39



---

6.1.5	Rangkaian Ekuivalen .....	40
6.1.6	Daya Motor Induksi .....	43
6.1.7	Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor Induksi .....	44
6.2	RANGKAIAN PERCOBAAN.....	45
6.3	LANGKAH – LANGKAH PERCOBAAN .....	46
6.3.1	Start Mesin .....	46
6.3.2	Pengambilan Data .....	46
6.3.3	Mematikan Mesin.....	47
<b>MODUL VII .....</b>		<b>37</b>
<b>STARTING MOTOR INDUKSI .....</b>		<b>37</b>
7.1	PENDAHULUAN.....	37
7.1.1	Direct On Line starter.....	38
7.1.2	Star Delta starter.....	38
7.1.3	Autotransformator Starter .....	39
7.1.4	Soft starter .....	40
7.2	ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN .....	42
7.3	PERCOBAAN.....	42
7.3.1	Start Motor Tak Serempak Dengan Menggunakan Saklar Y- $\Delta$ .....	42
<b>MODUL VIII.....</b>		<b>45</b>
<b>TRANSFORMATOR SATU FASA .....</b>		<b>45</b>
8.1	PENDAHULUAN.....	45
8.1.1	Pengertian Umum.....	45
8.1.2	Transformator Ideal.....	46
8.1.3	Keadaan Transformator Tanpa Beban .....	47
8.1.4	Arus Penguat .....	48
8.1.5	Keadaan Transformator Berbeban .....	50



---

8.1.6	Rangkaian Pengganti.....	50
8.1.7	Pengaturan Tegangan dan Efisiensi .....	53
8.2	ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN .....	54
8.3	PERCOBAAN-PERCOBAAN .....	55
8.3.1	Percobaan Beban Nol.....	55
8.3.2	Percobaan Hubung Singkat.....	55
8.3.3	Percobaan Berbeban.....	56
<b>MODUL IX.....</b>		<b>57</b>
<b>TRANSFORMATOR TIGA FASA.....</b>		<b>57</b>
9.1	PENDAHULUAN.....	57
9.1.1	Hubungan Wye-wye (Y-Y).....	58
9.1.2	Hubungan Wye-delta (Y- $\Delta$ ).....	59
9.1.3	Hubungan Delta-wye ( $\Delta$ -Y).....	59
9.1.4	Hubungan Delta – delta ( $\Delta$ - $\Delta$ ) .....	60
9.2	ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN .....	61
9.3	PERCOBAAN.....	61
9.3.1	Percobaan Hubung Wye-Delta.....	61
9.3.2	Percobaan Hubung Wye-Wye.....	62
<b>MODUL X .....</b>		<b>63</b>
<b>POST TEST .....</b>		<b>63</b>



## MODUL I DASAR TEORI

Briefing praktikum Teknik Tenaga Listrik dilaksanakan pada hari Kamis, 12 September 2019 bertempat di Ruang K.106 dan K.107. Pada saat briefing juga dilaksanakan PRETEST sebagai penilaian Modul 1.

### 1.1 Mesin Listrik

Mesin listrik adalah alat yang dapat mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik (generator) atau sebaliknya (motor) dan energi listrik menjadi bentuk energi listrik (transformator) lainnya menggunakan prinsip induksi elektromagnetik.

Transformator adalah perangkat listrik yang erat kaitannya dengan mesin listrik. Transformator dapat mengkonversi energi listrik AC pada suatu level tegangan menjadi energi listrik AC pada level tegangan lain dengan frekuensi yang tetap. Karena transformator beroperasi pada prinsip yang sama dengan generator dan motor, tergantung pada aksi medan magnet untuk mencapai perubahan level tegangan, transformator biasanya dipelajari bersama dengan generator dan motor.

Ketiga jenis mesin listrik ini ada di kehidupan sehari-hari modern. Motor listrik di rumah menjalankan lemari es, freezer, penyedot debu, blender, AC, kipas angin, dan banyak peralatan serupa.

### 1.2 Gerakan Rotasional, Hukum Newton, dan Hubungan Daya

Hampir semua mesin listrik berputar pada poros, yang disebut *shaft*. Karena sifat rotasi mesin, penting untuk memiliki pemahaman dasar tentang gerak rotasi. Bagian ini berisi ulasan singkat tentang konsep jarak, kecepatan, akselerasi, hukum Newton, dan daya yang berlaku untuk mesin berputar.

#### 1.2.1 Posisi Sudut (*Angular Position*) $\theta$

Posisi sudut  $\theta$  dari suatu objek adalah sudut di mana ia berorientasi, diukur dari beberapa titik referensi acak. Posisi sudut biasanya diukur dalam radian atau derajat.



### 1.2.2 Kecepatan Sudut (*Angular Velocity*) $\omega$

Kecepatan sudut  $\omega$  adalah tingkat perubahan posisi sudut sehubungan dengan waktu. Diasumsikan positif jika rotasi berada dalam arah berlawanan arah jarum jam. Kecepatan sudut didefinisikan sebagai laju perubahan perpindahan sudut  $\theta$  sehubungan dengan waktu.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Jika satuan posisi sudut adalah radian, maka kecepatan sudut diukur dalam radian per detik. Simbol berikut digunakan dalam buku ini untuk menggambarkan kecepatan sudut:

$\omega_m$  Kecepatan sudut dinyatakan dalam radian per detik

$f_m$  Kecepatan sudut dinyatakan dalam putaran per detik

$n_m$  Kecepatan sudut dinyatakan dalam putaran per menit

Subskrip  $_m$  pada simbol-simbol ini menunjukkan kuantitas mekanis. Ukuran kecepatan *shaft* ini terkait satu sama lain dengan persamaan berikut:

$$n_m = 60f_m$$

$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi}$$

### 1.2.3 Akselerasi Sudut (*Angular Acceleration*) $\alpha$

Akselerasi sudut adalah tingkat perubahan kecepatan sudut sehubungan dengan waktu. Diasumsikan positif jika kecepatan sudut meningkat dalam arti aljabar.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

Jika satuan kecepatan sudut adalah radian per detik, maka percepatan sudut diukur dalam radian per detik kuadrat.



#### 1.2.4 Torsi (*Torque*) $\tau$

Torsi pada suatu objek didefinisikan sebagai produk gaya yang diterapkan pada objek dan jarak terkecil antara garis aksi gaya dan sumbu rotasi objek. Jika  $\mathbf{r}$  adalah vektor yang menunjuk dari sumbu rotasi ke titik penerapan gaya, dan jika  $\mathbf{F}$  adalah gaya yang diberikan, maka torsi dapat digambarkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\tau &= (\text{force applied})(\text{perpendicular distance}) \\ &= (F)(r \sin \theta) \\ &= rF \sin \theta\end{aligned}$$

dimana  $\theta$  adalah sudut antara vektor  $\mathbf{r}$  dan vektor  $\mathbf{F}$ . Arah torsi adalah searah jarum jam jika akan cenderung menyebabkan rotasi searah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam jika akan cenderung menyebabkan rotasi berlawanan arah jarum jam. Satuan torsi adalah newton-meter dalam satuan SI dan pound-feet dalam sistem Inggris.

#### 1.2.5 Hukum Rotasi Newton (Newton's Law of Rotation)

Hukum Newton untuk objek yang bergerak sepanjang garis lurus menggambarkan hubungan antara gaya yang diterapkan pada objek dan akselerasi yang dihasilkannya. Hubungan ini diberikan oleh persamaan:

$$F = ma$$

dimana:

$F$  = gaya total yang diterapkan pada suatu objek

$m$  = massa benda

$a$  = akselerasi

Dalam satuan SI, gaya diukur dalam newton, massa dalam kilogram, dan akselerasi dalam meter per detik kuadrat. Dalam sistem Inggris, gaya diukur dalam pound, massa dalam *slugs*, dan akselerasi dalam kaki per detik kuadrat.

Persamaan yang sama menggambarkan hubungan antara torsi yang diterapkan pada objek dan akselerasi sudutnya. Hubungan ini, disebut hukum rotasi Newton, diberikan oleh persamaan:

$$\tau = I\alpha$$





dimana  $\tau$  adalah torsi yang diterapkan bersih dalam newton-meter atau pound-kaki dan  $\alpha$  adalah percepatan sudut yang dihasilkan dalam radian per detik kuadrat. Istilah  $J$  memiliki tujuan yang sama dengan massa benda dalam gerakan linear. Ini disebut momen inersia objek dan diukur dalam kilogram-meter kuadrat atau slug-feet.

### 1.2.6 Usaha (*Work*) $W$

Untuk gerak linier, kerja didefinisikan sebagai penerapan gaya melalui jarak. Dalam bentuk persamaan,

$$W = \int F dr$$

dimana diasumsikan bahwa gaya adalah collinear dengan arah gerak. Untuk kasus khusus gaya konstan yang diterapkan secara linier dengan arah gerak, persamaan ini menjadi hanya:

$$W = Fr$$

Unit kerjanya adalah joule dalam SI dan foot-pound dalam sistem bahasa Inggris. Untuk gerakan rotasi, kerja adalah aplikasi torsi melalui sudut. Di sini persamaan untuk usaha adalah:

$$W = \int \tau d\theta$$

dan jika torsi konstan, maka

$$W = \tau\theta$$

### 1.2.7 Daya (*Power*) $P$

Daya adalah tingkat melakukan pekerjaan, atau peningkatan pekerjaan per satuan waktu. Persamaan untuk daya adalah

$$P = \frac{dW}{dt}$$



Biasanya diukur dalam joule per detik (watt), tetapi juga dapat diukur dalam pound-kaki per detik atau dalam horsepower. Dengan definisi ini, dan dengan asumsi bahwa gaya konstan dan collinear dengan arah gerak, Daya dapat menjadi,

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} (Fr) = F \left( \frac{dr}{dt} \right) = Fv$$

Demikian pula, dengan asumsi torsi konstan, daya dalam gerakan rotasi menjadi,

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} (\tau\theta) = \tau \left( \frac{d\theta}{dt} \right) = \tau\omega$$
$$P = \tau\omega$$

### 1.3 Medan Magnet

Medan magnet merupakan mekanisme mendasar dari konversi energi dari suatu energi ke energi lainnya pada motor generator dan transformator. Berikut empat prinsip dasar yang menjelaskan bagaimana medan magnet digunakan pada alat tersebut:

1. Pada kawat berarus akan tercipta medan magnet disekitarnya.
2. Medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu menginduksi tegangan dalam suatu kumparan apa bila melewati kumparan tersebut.
3. Pada kabel pembawa arus dihadapan medan magnet memiliki gaya yang diinduksi diatasnya.
4. Pada kawat yang bergerak terhadap medan magnet memiliki tegangan yang diinduksi di dalamnya.

Hukum dasar yang berkaitan dengan penghasilan medan magnet adalah Hukum Ampere:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{net}$$

dimana H merupakan intensitas magnet yang diciptakan karena  $I_{net}$  dan  $d\mathbf{l}$  merupakan diferensiasi dari panjang sepanjang jalur integrasi. Intensitas medan magnet (H) adalah besarnya usaha yang dilakukan arus untuk pembentukan medan magnet.

HUBungan antara intensitas medan magnet dan kerapatan fluks magnetic yang dihasilkan dalam suatu material adalah:

$$B = \mu H$$

**H** = magnetic field intensity

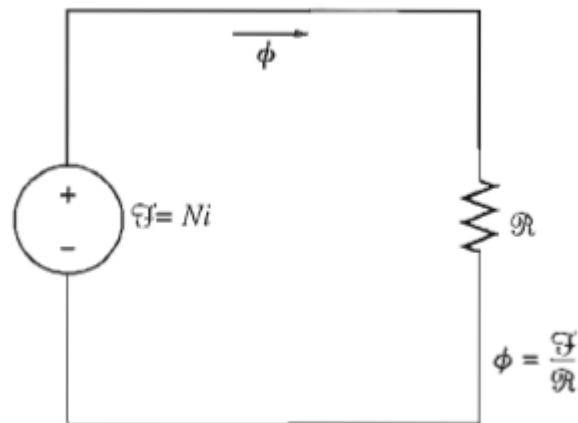
$\mu$  = magnetic *permeability* of material

**B** = resulting magnetic flux density produced

Banyaknya medan magnet yang melewati suatu permukaan akan menghasilkan flux magnet dimana rumus dari flux adalah:

$$\phi = BA$$

### 1.3.1 Rangkaian Magnetik



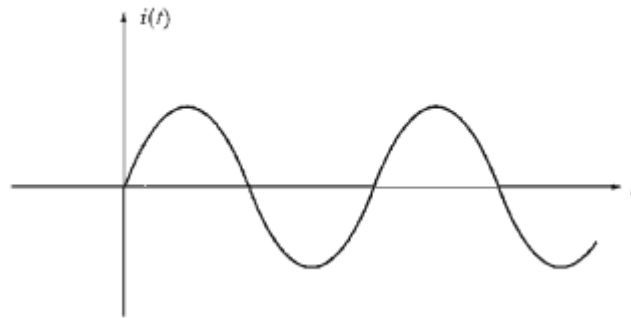
**Gambar 1.1** Rangkaian magnetik analog dengan inti transformator.

$\mathcal{F}$  = magnetomotive force of circuit

$\phi$  = flux of circuit

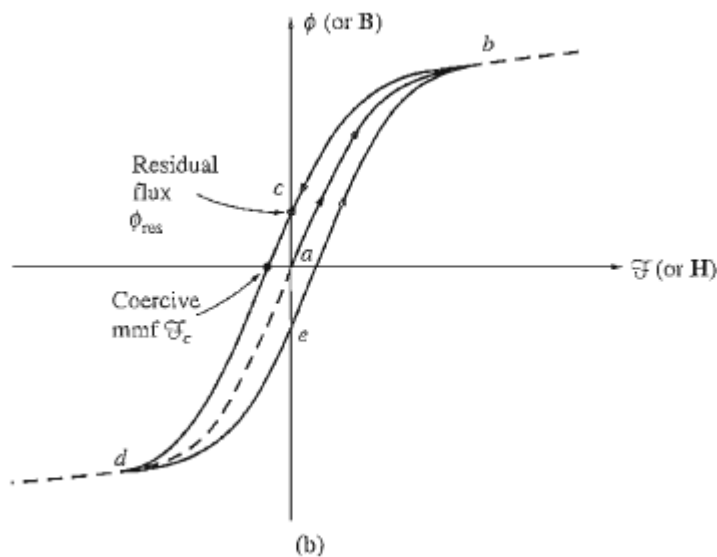
$\mathcal{R}$  = *reluctance* of circuit

$\mathcal{F} = \phi \mathcal{R}$
----------------------------------



### 1.3.2 Rugi Hysteresis pada Core

Pada core terdapat rugi-rugi yang terjadi salah satunya rugi hysteresis, dimana rugi hysteresis terjadi karena usaha dari core untuk mengembalikan domain kemagnetannya keseperti semula.



**Gambar 1.2** Loop hysteresis ditinjau oleh fluks dalam sebuah inti saat dialiri arus.

Pada awalnya flux diasumsikan nol. Saat arusnya meningkat terjadi kenaikan flux sampai dengan posisi hampir saturasi yang ditunjukkan pada (a) – (b), saat hampir mencapai titik saturasi arus turun sama dengan saat naik namun ada posisi sebaliknya dan akan terjadi terus seperti itu, dan dinamakan hysteresis loop.

#### 1.4 Hukum Faraday – Tegangan Terinduksi dari Perubahan Medan Magnet Terhadap Waktu

Hukum Faraday menyatakan jika fluks magnet melewati kumparan kawat, tegangan akan terinduksi pada kumparan kawat yang berbanding lurus dengan laju perubahan terhadap waktu.

$$e_{ind} = - \frac{d\phi}{dt}$$

dimana  $e_{ind}$  merupakan tegangan yang terinduksi dan  $\Phi$  adalah fluks yang melewati permukaan kumparan. Jika kumparan memiliki  $N$  lilitan dan memiliki flux yang sama yang melewatinya maka didapatkan:

$$e_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$e_{ind}$  = voltage induced in the coil

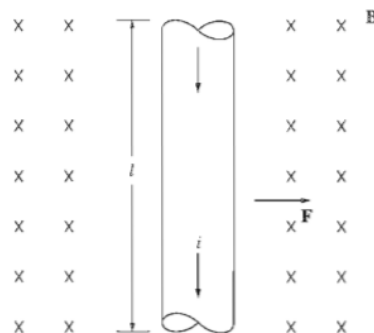
$N$  = number of turns of wire in coil

$\phi$  = flux passing through coil

dimana tanda negatif merupakan ekspresi dari hukum Lenz yang menyatakan bahwa arah penumpukan tegangan pada kumparan adalah sedemikian rupa sehingga jika kumparan berakhir hubung singkat, maka akan menghasilkan arus yang akan menyebabkan fluks yang menentang perubahan fluks yang asli.

#### 1.5 Produksi Gaya Induksi Pada Kawat

Efek besar lain yang ditimbulkan medan magnet terhadap lingkungan sekitarnya adalah medan magnet menginduksikan gaya pada kawat yang dialiri arus pada medannya.



**Gambar 1.3** Kawat yang dialiri arus pada medan magnet.

Gambar di atas menunjukkan konduktor pada medan magnet dengan densitas fluks  $\mathbf{B}$  mengarah keluar. Panjang dari konduktor adalah  $l$  meter dan arus yang mengalir sebesar  $i$  ampere. Gaya yang terinduksi pada konduktor adalah:

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

Arah dari gaya yang terinduksi mengikuti aturan tangan kanan:

1. Telunjuk menunjukkan arah vektor  $i$ .
2. Jari tengah menunjukkan arah vektor densitas fluks  $\mathbf{B}$ .
3. Ibu jari menunjukkan arah dari resultan gaya  $\mathbf{F}$ .

Besaran dari gaya yang terinduksi memiliki persamaan:

$$F = i l B \sin \theta$$

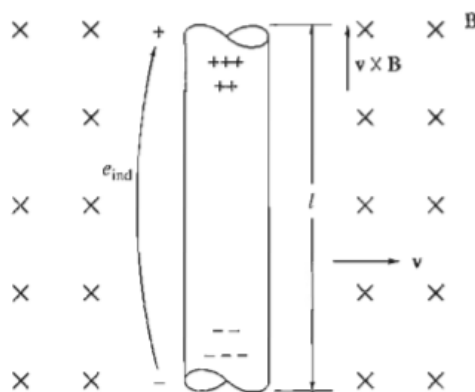
dimana  $\theta$  adalah sudut antara kawat dan vektor dari densitas fluks  $\mathbf{B}$ .

### 1.6 Tegangan yang Terinduksi Pada Konduktor yang Bergerak Didalam Medan Magnet

Saat kawat bergerak dengan arah yang sesuai pada medan magnet, tegangan akan terinduksikan didalamnya. Hal ini dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$$

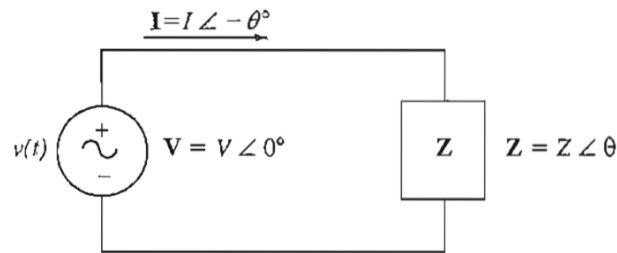
Kecepatan kawat pada medan magnet dilambangkan dengan  $\mathbf{v}$ , Besar densitas fluks medan magnet  $\mathbf{B}$ , dan  $\mathbf{l}$  panjang dari konduktor. Vektor  $\mathbf{l}$  dengan arah yang sama dengan pergerakan kawat memiliki sudut terkecil terhadap  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Tegangan pada kawat akan terbentuk agarujung positif sesuai dengan arah vektor  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ .



**Gambar 1.4** Konduktor bergerak didalam medan magnet.



### 1.7 Daya Aktif, Reaktif, dan Semu



**Gambar 1.5** Sumber tegangan AC mensuplai beban dengan impedansi beban  $Z$ .

Gambar 1.5 menunjukkan sumber tegangan satu fasa yang mensuplai daya ke beban satu fasa dengan impedansi  $Z$ . Jika diasumsikan bahwa beban bersifat induktif, maka sudut fasa  $Z$  akan positif dan arus akan *lagging* terhadap tegangan sebesar  $\theta$  derajat.

Tegangan yang terukur pada beban adalah:

$$v(t) = \sqrt{2}V \cos \omega t$$

dimana  $V$  adalah nilai rms dari tegangan yang diterapkan pada beban, dan aliran arus yang dihasilkan adalah sebesar:

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \theta)$$

dimana  $I$  adalah nilai rms dari arus yang mengalir melalui beban.

Daya sesaat yang disuplai ke beban pada waktu  $t$  adalah

$$p(t) = VI \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) + VI \sin \theta \sin 2\omega t$$

Sudut  $\theta$  dalam persamaan ini adalah sudut impedansi beban. Bagian pertama dari persamaan tersebut mewakili daya yang disuplai ke beban oleh komponen arus yang berada dalam *fasa yang sama* dengan tegangan, sedangkan bagian kedua mewakili daya yang disuplai ke beban oleh komponen arus yang berbeda fasa  $90^\circ$  dengan tegangan.



Perhatikan bahwa bagian pertama dari persamaan daya sesaat selalu positif, namun menghasilkan pulsa daya yang bernilai tidak konstan. Nilai rata-rata dari bagian ini adalah:

$$P = VI \cos \theta$$

yang merupakan *daya rata-rata* atau *daya real* ( $P$ ) yang disuplai ke beban. Satuan dari daya real adalah watts (W), dimana  $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ A}$ .

Bagian kedua dari persamaan daya sesaat mewakili daya yang pertama kali ditransfer dari sumber ke beban, dan kemudian dikembalikan dari beban ke sumber. Daya yang terus bolak-balik antara sumber dan beban dikenal sebagai *daya reaktif* ( $Q$ ). Daya reaktif mewakili energi yang pertama kali disimpan dan kemudian dilepaskan di medan magnet induktor, atau di medan listrik kapasitor.

Daya reaktif pada beban dinyatakan sebagai:

$$Q = VI \sin \theta$$

dimana  $\theta$  adalah sudut impedansi beban. Satuan dari daya reaktif adalah *volt-ampere reaktif* (VAR), dimana  $1 \text{ VAR} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ A}$ .

*Daya semu* ( $S$ ) yang disuplai ke beban didefinisikan sebagai hasil perkalian antara tegangan yang melintasi beban dan arus yang melalui beban. Daya inilah yang akan disuplai ke beban jika beda fase antara tegangan dan arus diabaikan. Daya semu pada beban dinyatakan sebagai:

$$S = VI$$

satuan dari daya semu adalah *volt-ampere* (VA), dimana  $1 \text{ VA} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ A}$ .

Untuk menyederhanakan perhitungan, daya real dan daya reaktif biasanya direpresentasikan bersama sebagai *daya kompleks* ( $S$ ), di mana

$$S = P + jQ$$

Daya kompleks ( $S$ ) yang disuplai ke beban dapat dihitung dengan persamaan:

$$S = \mathbf{VI}^*$$

dimana tanda bintang (\*) mewakili operator konjugat kompleks.

Untuk lebih memahami persamaan tersebut, misalkan tegangan disuplai pada beban sebesar  $\mathbf{V} = V \angle \alpha$  dan arus yang mengalir ke beban adalah  $\mathbf{I} = I \angle \beta$ . Maka daya kompleks yang disuplai pada beban adalah

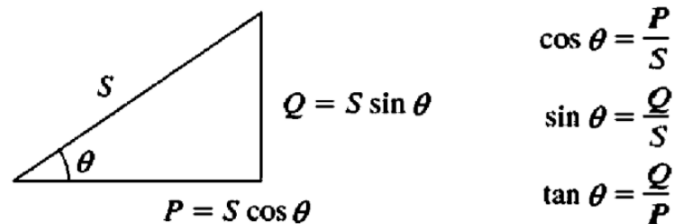
$$\begin{aligned}\mathbf{S} &= \mathbf{VI}^* = (V \angle \alpha)(I \angle -\beta) = VI \angle (\alpha - \beta) \\ &= VI \cos(\alpha - \beta) + jVI \sin(\alpha - \beta)\end{aligned}$$

sudut impedansi  $\theta$  adalah perbedaan antara sudut tegangan dan arus ( $\theta = \alpha - \beta$ ), sehingga persamaannya dapat disederhanakan menjadi

$$\begin{aligned}\mathbf{S} &= VI \cos \theta + jVI \sin \theta \\ &= P + jQ\end{aligned}$$

### 1.7.1 Segitiga Daya

Daya real, reaktif, dan semu yang disuplai ke beban dapat dihubungkan dengan *segitiga daya*. Segitiga daya digambarkan sebagai berikut.



**Gambar 1.6** Segitiga daya.

dimana P adalah daya real, Q adalah daya reaktif, dan S adalah daya semu. Nilai  $\cos \theta$  pada gambar disebut dengan *faktor daya* beban. Faktor daya didefinisikan sebagai fraksi dari daya semu (S) yang sebenarnya menyuplai daya real ke beban. Dengan demikian, persamaan menjadi

$$\text{PF} = \cos \theta$$

dimana  $\theta$  adalah sudut impedansi beban.

## MODUL II

### MOTOR DC (ARUS SEARAH)

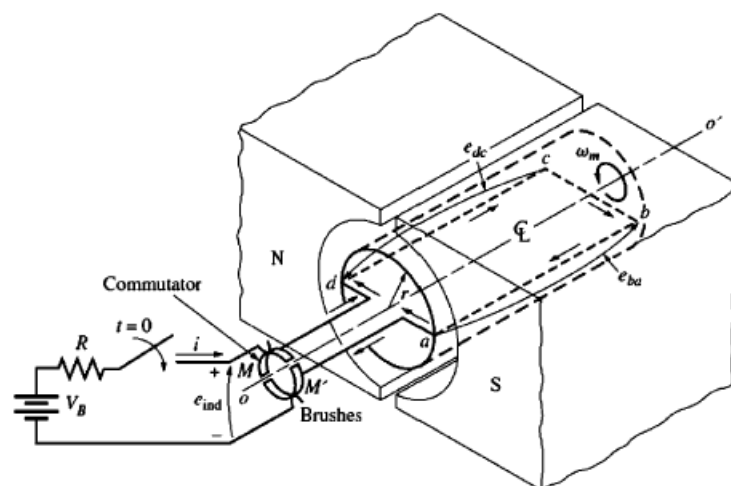
#### Tujuan :

1. Memahami konstruksi dari motor arus searah.
2. Memahami cara kerja motor arus searah serta hukum-hukum yang berlaku.
3. Menganalisa rangkaian ekivalen pada motor arus searah.

#### 2.1 PENDAHULUAN

##### 2.1.1 Motor Arus Searah

Motor arus searah adalah mesin yang merubah energi listrik arus searah (DC) menjadi energi mekanik dengan prinsip induksi elektromagnetik. Pada konstruksi motor arus searah, terdapat dua komponen utama yaitu stator dan rotor. Stator merupakan komponen pada mesin listrik yang tidak bergerak dan pada motor arus searah berfungsi sebagai penghasil medan magnet utama. Sedangkan rotor merupakan komponen mesin yang bergerak atau berputar. Gambar 2.1 merupakan konstruksi sederhana motor arus searah.



**Gambar 2.1** Konstruksi motor arus searah.

Untuk membuat motor arus searah bekerja, rotor dialiri arus melalui *Brush* dan cincin komutator. Arus listrik pada rotor melewati medan magnet pada stator

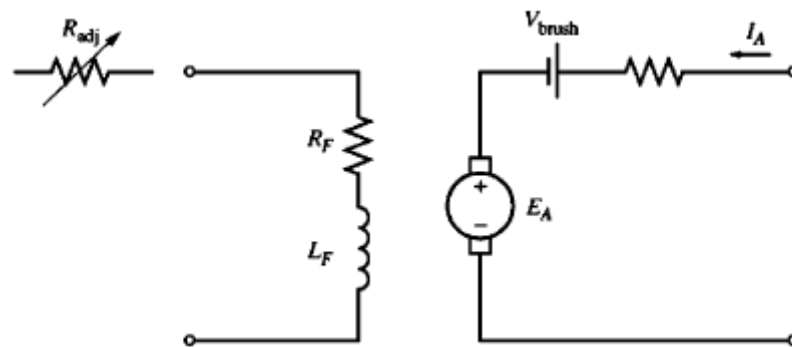
timbul gaya *Lorentz*. Gaya tersebut yang membuat motor arus searah berputar. Gaya *Lorentz* dapat direpresentasikan dengan persamaan berikut:

$$F = i l \times B$$

### 2.1.2 Jenis – Jenis Motor Arus Searah

Dalam menganalisa motor arus searah, dapat dianalisa dengan rangkaian ekuivalen. Berdasarkan sistem eksitasinya (penguat), rangkaian Motor Arus Searah dibedakan menjadi dua, yaitu:

1. Motor Arus Searah Berpenguat Terpisah (*Separatey Excited*):



**Gambar 2.2** Rangkaian Motor DC Berpenguat Terpisah

Pada motor arus searah berpenguat terpisah, berlaku persamaan-persamaan berikut ini :

$$E = V - I_a \cdot R_a$$

$$E = k \cdot n \cdot \Phi$$

$$n = \frac{V - I_a \cdot R_a}{k \cdot \Phi}$$

$$T = k \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$P_{in} = V_f \cdot I_p + V \cdot I_a$$

$$P_{out} = \frac{1000}{975} \times n \times T$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

dimana :  $V_f$  = tegangan eksitasi (Volt)  
 $I_p$  = arus penguat (Ampere)  
 $I_a$  = arus jangkar (Ampere)  
 $n$  = kecepatan rotor (rpm)  
 $T$  = torsi (Nm)  
 $P_{in}$  = daya input (Watt)  
 $P_{out}$  = daya output (Watt)

Dari persamaan-persamaan di atas tampak bahwa :

- $n$  berbanding terbalik dengan  $I_p$
- $T$  berbanding lurus dengan  $I_a$

Dengan persamaan-persamaan tersebut di atas, dapat dilakukan beberapa percobaan motor berpenguat terpisah, sehingga diperoleh karakteristik motor berpenguat terpisah yaitu :

A. Karakteristik Beban Nol

$$n = n(I_p), V = C, T = 0$$

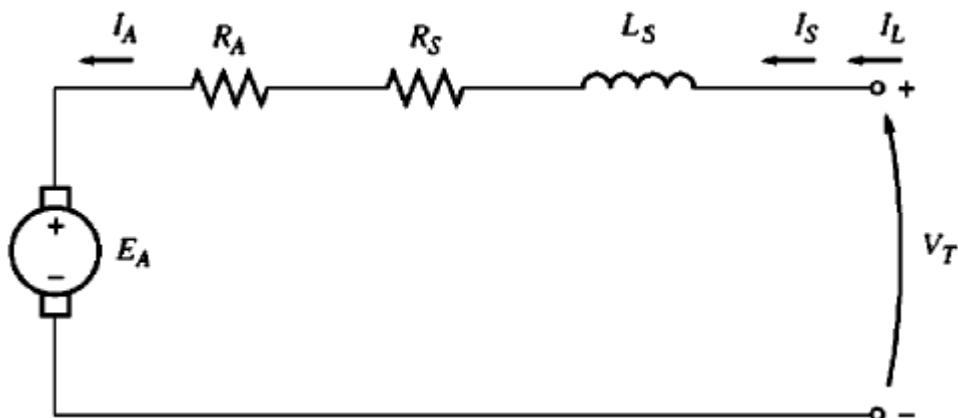
$$n = n(V), I_p = C, T = 0$$

B. Karakteristik Pengaturan Putaran

$$n = n(I_p), V = C, T = C$$

$$n = n(V), I_p = C, T = C$$

2. Motor Arus Searah Berpenguat Sendiri (*Self Excited*)



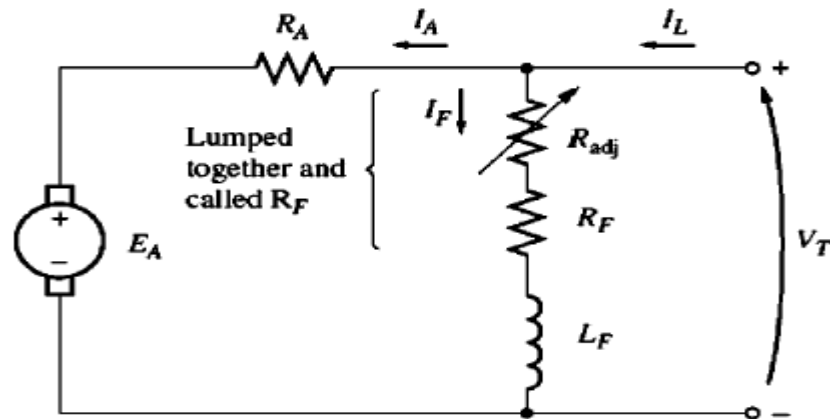
Gambar 2.3 Series DC Motor



Pada *Series DC Motor*, berlaku persamaan-persamaan berikut ini :

$$I_A = I_S = I_L$$

$$V_T = E_A + I_A (R_A + R_S)$$



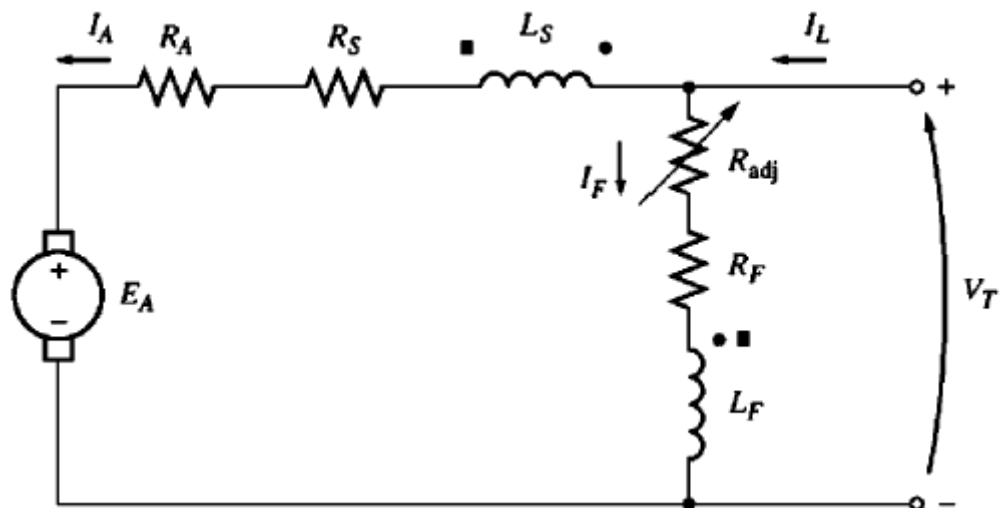
Gambar 2.4 *Shunt DC Motor*

Pada *Shunt DC Motor*, berlaku persamaan-persamaan berikut ini :

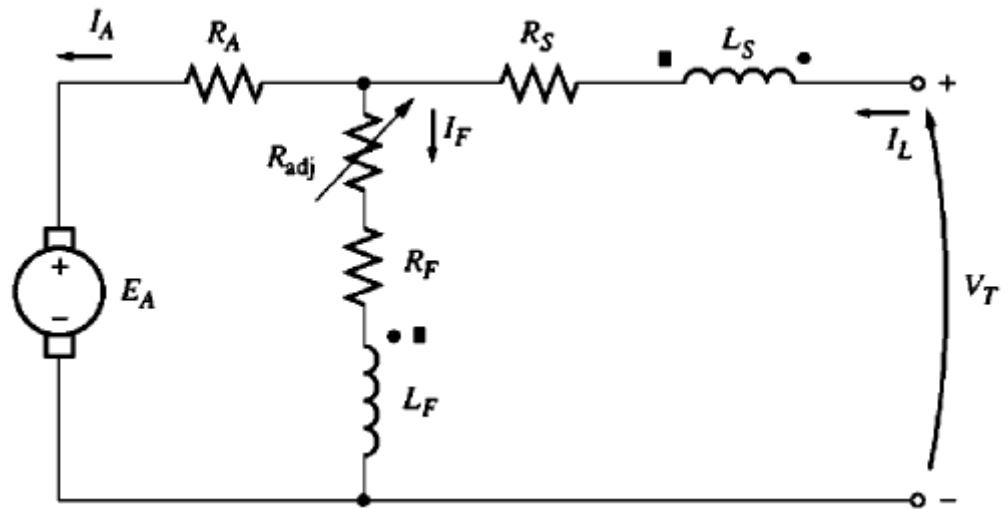
$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

$$I_L = I_A + I_F$$



Gambar 2.5 *Long Compound DC Motor*



**Gambar 2.6** Short Compound DC Motor

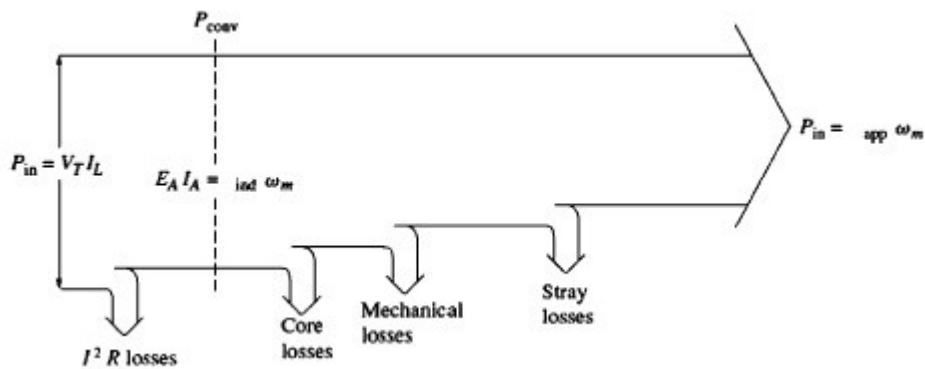
Pada *Compound DC Motor*, berlaku persamaan-persamaan berikut ini :

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S)$$

$$I_A = I_L - I_F$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

### 2.1.3 Power Flow Motor DC

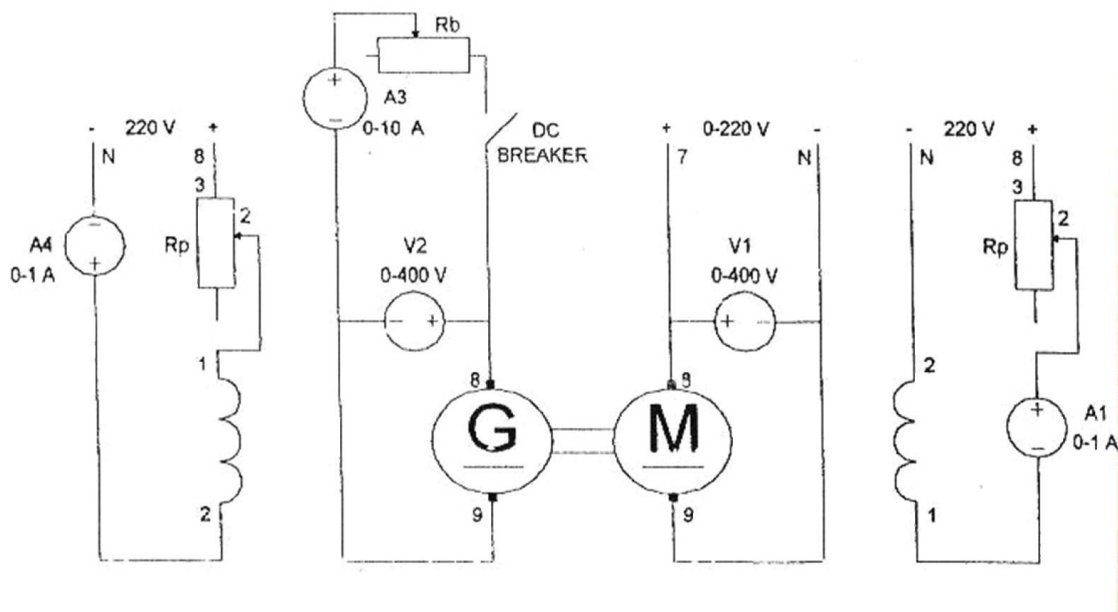


**Gambar 2.7** Diagram aliran daya dari sebuah motor arus searah.

## 2.2 ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN

- 1 Motor Arus Searah
- 1 Generator Arus Searah
- 1 Modul Power Supply
- Modul DC Motor/Generator 1,5 KW, 1500 rpm, 220 V, 0,8 A
- Modul Field Rheostat 600  $\Omega$ , 225 W
- 2 Modul DC Voltmeter/Amperemeter
- 1 Modul DC Breaker 220 Vdc, 30 A

## 2.3 RANGKAIAN PERCOBAAN



**Gambar 2.8** Rangkaian percobaan motor arus searah.

## 2.4 TAHAP MENJALANKAN DAN PEMBEBANAN MOTOR

### 2.4.1 Start Motor

- Perhatikan rating motor yang diuji (tegangan masuk, arus jangkar, arus penguat dan tegangan penguat).
- Perhatikan rating generator yang merupakan beban motor (tegangan, arus jangkar, arus penguat, tegangan penguat, dan kopel).



- Naikkan saklar ke posisi ON pada modul power supply.
- Atur field rheostat sampai diperoleh A1 ( $I_p$ ) maksimum.
- Putar pengatur tegangan modul power supply secara perlahan sampai tegangan tertentu dimana V1 (V) dibawah nilai 220 V.
- Turunkan nilai A1 sampai nilai tertentu dibawah nilai 0,47 A.
- Motor berputar dalam keadaan beban nol.

#### 2.4.2 Mengatur Putaran Motor

- Perhatikan putaran motor.
- Dengan mengatur V1 dari modul power supply dan A1 dapat ditentukan putaran motor yang diinginkan.

#### 2.4.3 Pembebanan Motor

- Beban motor adalah generator arus searah.
- Tahanan beban Rb pada posisi maksimum.
- Atur field rheostat generator sampai Vout generator bernilai 220 V.
- Naikkan tuas DC breaker ke posisi 1.
- Dengan mengatur Rb mulai posisi maksimum, maka motor dibebani dari keadaan beban nol sampai beban nominal.

#### 2.4.4 Mematikan Motor

- Turunkan tuas DC breaker ke posisi 0.
- Atur field rheostat sehingga A1 menunjukkan nilai maksimum.
- Atur pengatur tegangan modul power supply sehingga V1 menunjukkan nilai 0.

### 2.5 PERCOBAAN-PERCOBAAN MOTOR ARUS SEARAH

#### 2.5.1 Karakteristik Beban Nol

##### Langkah-langkah Percobaan :

- a. Menentukan  $n = n(I_p)$ ,  $V = C$ ,  $T = 0$ .
  - Start motor.



- Atur pengatur tegangan modul power supply sampai nilai V1 tertentu dan selama percobaan dijaga tetap.
  - Atur field rheostat dan catat nilai A1 dan n untuk setiap perubahan A1.
- b. Menentukan  $n = n(V)$ ,  $I_p = C$ ,  $T = 0$
- Atur field rheostat untuk A1 tertentu dan selama percobaan dijaga tetap.
  - Atur pengatur tegangan modul power supply dan catat nilai V1 dan n untuk setiap perubahan V1.

### 2.5.2 Karakteristik Pengaturan Putaran

#### Langkah-langkah Percobaan :

- a. Menentukan  $n = n(I_p)$ ,  $V = C$ ,  $T = C$ .
- Start motor.
  - Bebani motor dengan kopel tertentu sesuai dengan (III.2 dan III.3) dan nilai kopel ini selama percobaan dijaga konstan.
  - Atur pengatur tegangan modul power supply sampai nilai V1 tertentu dan selama percobaan dijaga tetap.
  - Untuk nilai kopel tertentu atur field rheostat dan catat nilai A1 dan n untuk setiap perubahan A1.
- b. Menentukan  $n = n(V)$ ,  $I_p = C$ ,  $T = C$ .
- Atur field rheostat sampai nilai A1 tertentu dan selama percobaan dijaga tetap.
  - Untuk nilai kopel tertentu, atur pengatur tegangan modul power supply, catat nilai V1 dan n untuk setiap perubahan V1.

Catatan: Untuk menjaga kopel konstan dapat dilakukan dengan mengatur field rheostat generator dan Rb.

## MODUL III GENERATOR DC (ARUS SEARAH)

### Tujuan:

1. Memahami perbedaan konstruksi dari motor dan generator arus searah.
2. Memahami cara kerja pada generator arus searah serta hukum-hukum yang berlaku.
3. Menganalisa rangkaian ekivalen pada generator arus searah.
4. Menghitung efisiensi dari generator arus searah.

### 3.1 PENDAHULUAN

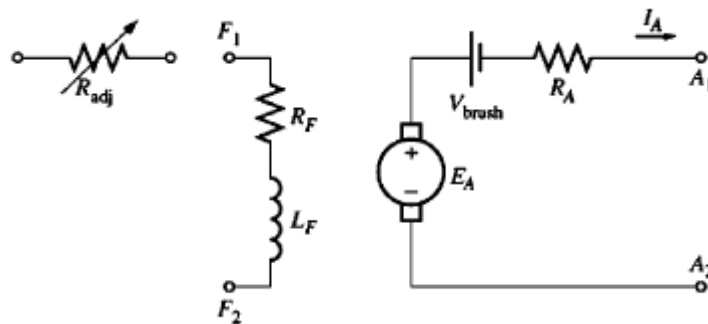
#### 3.1.1 Generator Arus Searah

Generator arus searah adalah mesin yang merubah energi mekanik menjadi energi listrik arus searah (DC) dengan prinsip induksi elektromagnetik. Pada konstruksi generator arus searah tidak jauh berbeda dengan motor arus searah.

Pada prinsip kerjanya, generator arus searah menggunakan hukum *Faraday* untuk menghasilkan energi listrik. Hukum Faraday dapat direpresentasikan dalam persamaan:

$$\varepsilon = Blv \sin \theta$$

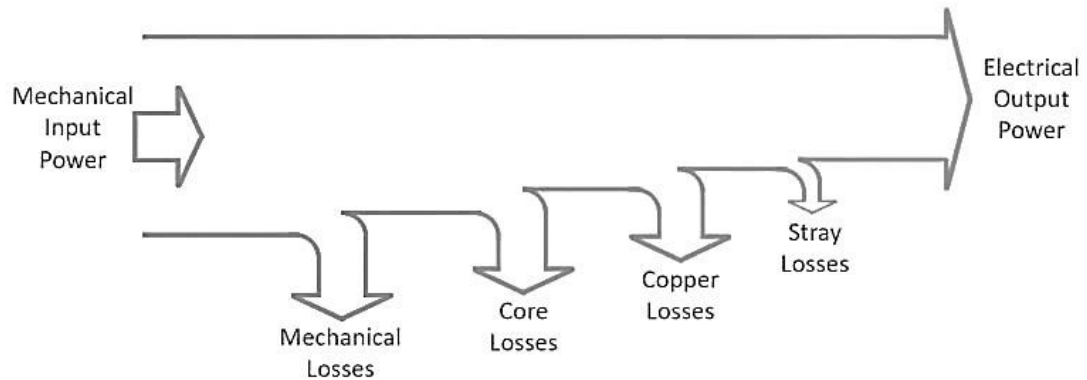
Pada dasarnya mesin arus searah tidak berbeda dengan mesin arus bolak-balik. Hanya pada mesin arus searah terdapat komutator yang berfungsi sebagai penyearah. Gambar 3.1 merupakan rangkaian ekivalen generator arus searah berpenguat terpisah.



**Gambar 3.1** Rangkaian generator arus searah.



Daya yang dikonversikan pada generator arus searah tidak seluruhnya terkonversi menjadi energi listrik. Terdapat rugi daya yang dielakkan dalam diagram *power flow* berikut:

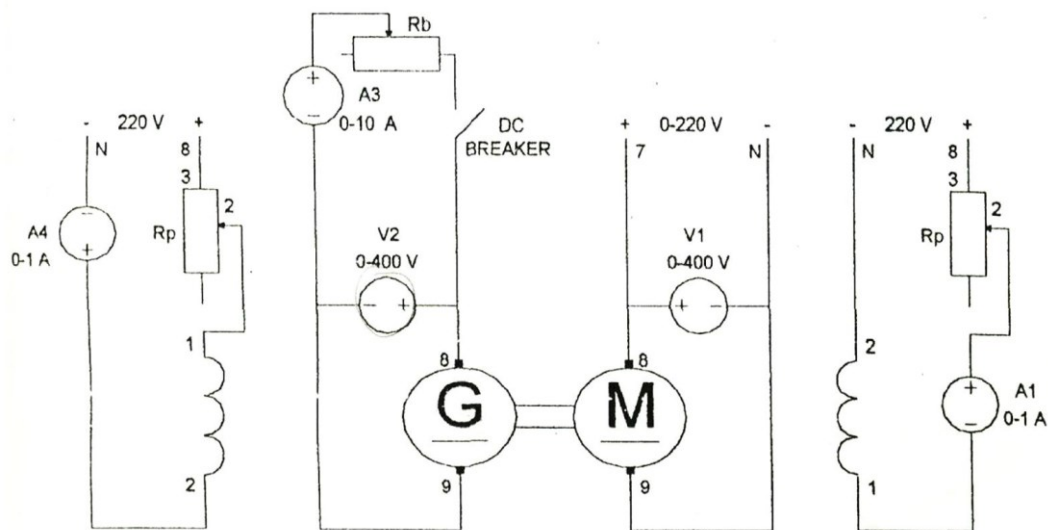


**Gambar 3.2** Diagram aliran daya dari sebuah generator arus searah.

### 3.2 ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN

- 1 Motor Arus Searah
- 1 Generator Arus Searah
- 1 Modul Power Supply
- Modul DC Motor/Generator 1,5 KW, 1500 rpm, 220 V, 0,8 A
- Modul Field Rheostat 600  $\Omega$ , 225 W
- 2 Modul DC Voltmeter/Amperemeter
- 1 Modul DC Breaker 220 Vdc, 30 A

### 3.3 RANGKAIAN PERCOBAAN



Gambar 3.3 Rangkaian percobaan generator arus searah.

### 3.4 TAHAP MENJALANKAN GENERATOR

#### 3.4.1 Start Generator

- DC breaker pada posisi 0 kumparan jangkar generator tidak terhubung dengan beban.
- Atur field rheostat generator (A4) sampai  $V_{out}$  generator (V2) bernilai 220 V.
- Dengan mengatur A4 (arus penguat/ $I_p$ ) mulai harga minimum sampai maksimum, maka generator dalam keadaan beban nol.

#### 3.4.2 Pembebanan Generator

- Tahanan beban  $R_b$  pada posisi maksimum.
- Naikkan tuas dc breaker pada posisi 1.
- Dengan mengatur  $R_b$  maka generator dalam keadaan berbeban.

#### 3.4.3 Mematikan Generator

- Turunkan tuas dc breaker ke posisi 0
- Atur field rheostat sehingga A1 menunjukkan nilai maksimum



- Atur pengatur tegangan modul power supply sehingga V1 menunjukkan 0

### 3.5 PERCOBAAN-PERCOBAAN GENERATOR ARUS SEARAH

#### 3.5.1 Percobaan Beban Nol

Pada percobaan beban nol ini, rangkaian jangkarnya terbuka sehingga tidak ada arus mengalir. Tegangan terminal sama dengan GGL yang dibangkitkan.

$$V = E - I_a.R_a$$

$$E_o = k.n.\Phi$$

$$E_o = E_o(I_p)$$

dimana :  $E$  = GGL yang dibangkitkan

$V$  = Tegangan terminal

$I_p$  = Arus penguat

$I_a$  = Arus jangkar

Jadi terdapat hubungan :

$$E_o = E(I_p), n = C, I_a = 0$$

$$E_o = E(n), I_p = C, I_a = 0$$

#### Langkah-langkah Percobaan :

- a. Menentukan  $V = V(I_p), n = C, I_a = 0$ 
  - Pasang rangkaian sesuai dengan gambar 3.3
  - Start motor.
  - Putaran motor dijaga tetap dan catat nilainya.
  - Ubah nilai A4 dengan mengatur Rp kumparan medan generator sampai nilai tertentu kemudian catat untuk perubahan nilai A4 dan V2.
- b. Menentukan  $V = V(n), I_p = C, I_a = 0$ 
  - Pasang rangkaian sesuai dengan gambar 3.3.
  - Start motor.
  - A4 dijaga tetap dan catat nilainya.
  - Ubah nilai n dengan mengatur V1 atau A1 motor sampai nilai tertentu kemudian catat untuk perubahan nilai n dan V2.



### 3.5.2 Percobaan Berbeban

#### Langkah-langkah Percobaan :

- a. Pasang rangkaian sesuai dengan gambar 3.3.
- b. Start motor.
- c. Putaran motor dijaga tetap dan catat nilainya.
- d. Arus penguat generator ( $A_4$ ) dijaga tetap dan catat nilainya.
- e. Tahanan beban  $R_b$  pada posisi maksimum.
- f. Naikkan tuas dc breaker pada posisi 1.
- g. Atur  $R_b$  dan catat nilai  $A_3$  dan  $V_2$  untuk seluruh perubahan  $R_b$ .

## MODUL IV GENERATOR SINKRON

### Tujuan:

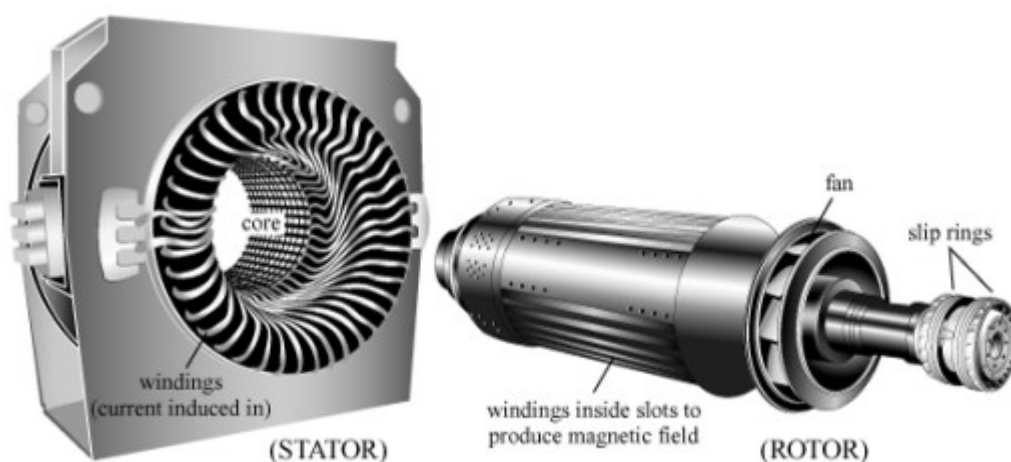
1. Memahami konstruksi dari Generator Sinkron
2. Memahami Cara Kerja Generator Sinkron serta hukum-hukum yang berlaku
3. Mengetahui Karakteristik Pembebanan Generator Sinkron

### 4.1 PENDAHULUAN

#### 4.1.1 Generator Sinkron

Generator Sinkron (Synchronous Generator) adalah salah satu Generator AC yang mengonversikan energi mekanik menjadi energi listrik dimana frekuensi elektrisnya sinkron dengan putaran rotornya. Pada prinsipnya, generator sinkron memiliki 2 bagian penting yaitu *stator* (bagian yang diam/statis) dan *rotor* (bagian yang berputar/dinamis). Keduanya merupakan suatu rangkaian magnetis yang artinya terkopel secara magnetis dan antara kedua komponen tersebut memiliki celah sebagai tempat terjadinya induksi elektromagnetis yang disebut *air gap*.

### Konstruksi:



**Gambar 4.1** Konstruksi Generator Sinkron

Rotor merupakan suatu komponen penting dalam generator sinkron yang berputar. Dalam konstruksinya, rotor generator sinkron meliputi :



- a. Inti
- b. Kumbaran
- c. Slipring
- d. Brush
- e. Shaft
- f. Bearing

Stator merupakan suatu komponen yang statis atau diam pada generator sinkron.

Dalam konstruksinya, stator meliputi :

- a. Rangka stator
- b. Inti
- c. Kumbaran

Dengan memutar rotor dari alternator yang diberi arus medan ( $I_f$ ), gaya gerak listrik akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Bila kumparan berputar dengan kecepatan sudut tetap, maka fluks yang dilingkupi berubah-ubah, dan sebanding dengan sinus kecepatan sudut  $\omega$  dan jumlah putaran setiap detik. GGL fasa yang dibangkitkan pada setiap kumparan besarnya sama, juga dengan beda fasa masing-masing radial ( $120^\circ$ ). Antara tegangan ( $E_o$ ) yang terinduksi pada kumparan jangkar stator dengan putaran sinkron dari rotor yang diberi arus medan ( $I_f$ ) dihubungkan dengan rumus:

$$E_o = cn\phi$$

Dengan :

$c$  = konstanta mesin

$n$  = putaran sinkron

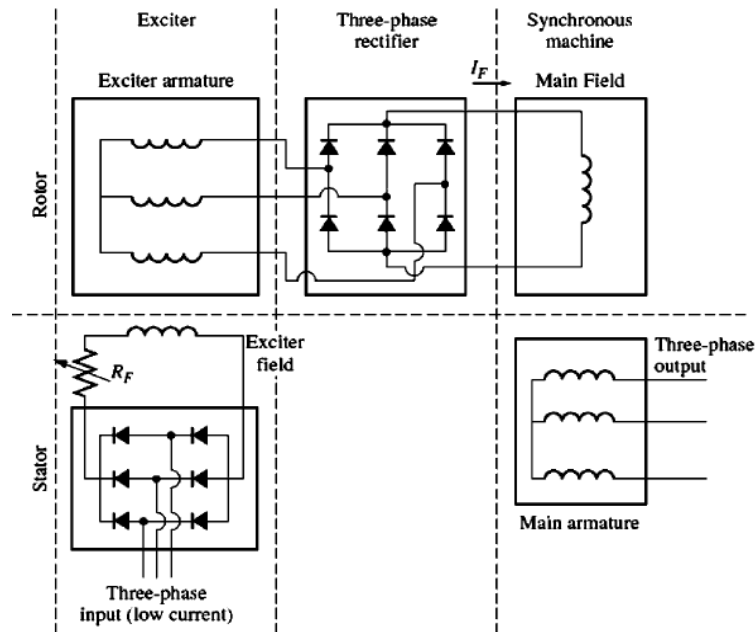
$\phi$  = fluks yang dihasilkan oleh  $I_f$

#### 4.1.2 Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi pada generator sinkron merupakan suatu sistem dengan memberikan arus searah (DC) pada rotor generator. Dalam prinsipnya, sistem eksitasi generator sinkron terbagi menjadi :

- a. Sistem eksitasi menggunakan sikat (brush)

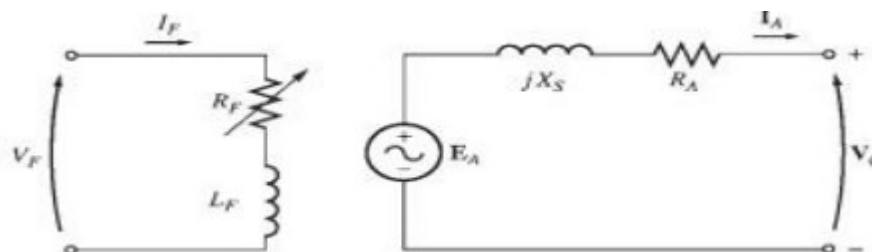
b. Sistem eksitasi tanpa sikat (brushless)



**Gambar 4.2** Skema Brushless Excitation

Fungsi dari sistem eksitasi adalah untuk mengendalikan tegangan keluaran dari generator agar tetap stabil pada beban yang bervariasi. Biasanya, sebuah generator memiliki kumparan jangkar yang terletak pada stator dengan hubung wye. Sedangkan kumparan medan terletak pada rotor generator.

4.1.3 Rangkaian Ekuivalen



**Gambar 4.3** Rangkaian Ekuivalen per-fasa Generator Sinkron

Keterangan :

$V_f$  : Tegangan Medan



$R_f$  : Hambatan (variabel) Kumparan Medan

$I_f$  : Arus Medan

$L_f$  : Induktansi diri kumparan medan

$E_a$  : Tegangan internal generator sinkron

$R_a$  : Hambatan Armatur

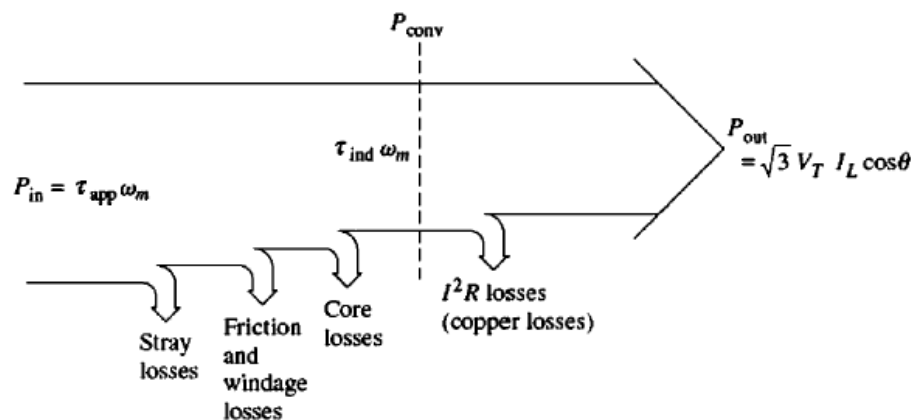
$I_a$  : Arus Armatur

$X_s$  : Reaktansi Sinkron

$V_\phi$  : Tegangan Terminal Generator

#### 4.1.4 Rugi-rugi Generator Induksi

Pada kenyataannya, tidak semua daya mekanik yang diberikan pada generator sinkron berubah menjadi daya listrik pada keluaran generator sinkron. Hal tersebut terjadi karena selama proses pembentukan GGL Induksi di generator terdapat beberapa faktor pengurang daya yang membuat daya input tidak bernilai sama dengan daya output. Aliran daya generator sinkron dapat dibentuk sebagai diagram alir seperti berikut:



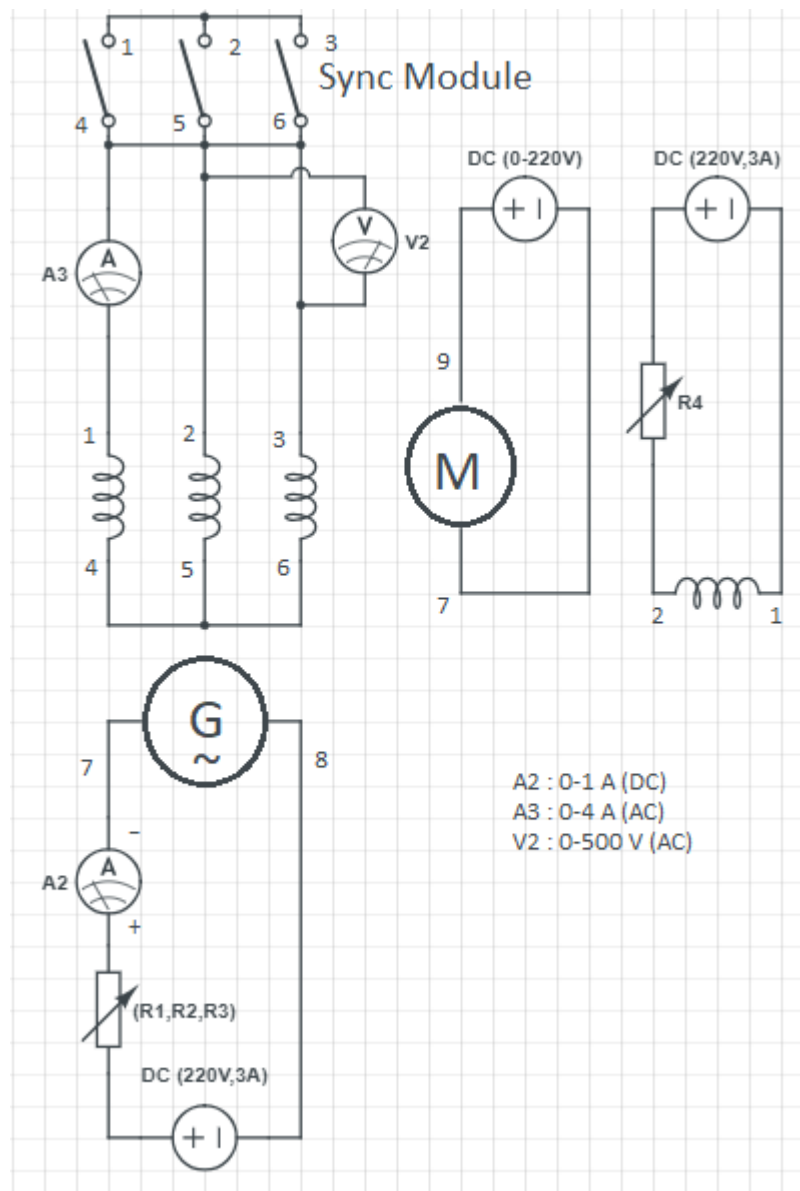
Gambar 4.4 Diagram alir daya Generator Sinkron

## 4.2 ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN

1. 1 power supply
2. 1 modul DC voltmeter/ammeter
3. 1 modul AC voltmeter



4. 1 modul AC ammeter
5. 4 field rheostat
6. 1 modul synchronous motor/generator
7. 1 modul DC motor/generator
8. 1 synchronous machine
9. 1 DC machine
10. 1 synchronizing module
11. 3 Modul resistansi
12. 3 Modul induktansi
13. 1 frekuensi meter
14. 1 Lampu Stroboscope



Gambar 4.5 Rangkaian percobaan beban nol

### 4.3 LANGKAH-LANGKAH PERCOBAAN:

#### 4.3.1 Percobaan Beban Nol

1. Menyusun rangkaian seperti pada gambar
2. Mengatur Rheostat agar mencapai nilai maksimum.
3. Mengatur posisi saklar synchronizing module dalam posisi off.
4. Menghidupkan suplai utama.



5. Menaikkan nilai tegangan AC secara bertahap dan pelan sekali agar tidak terjadi lonjakan arus yang besar pada stator. Perhatikan ammeter DC!  
ARUS TIDAK BOLEH MELEBIHI 3 A. Jika arus sudah mencapai 3 A, tegangan tidak boleh dinaikkan lagi
6. Mengatur tegangan AC sehingga mencapai nilai arus (A2) yang diinginkan. Catat nilai V2 dan A3
7. Melakukan langkah 6 dengan nilai arus (A2) yang berbeda.
8. Mematikan sumber supply setelah seluruh data telah selesai diambil.

#### 4.3.2 Percobaan Berbeban

1. Menyusun rangkaian percobaan berbeban dengan memodifikasi rangkaian sebelumnya.
  - a. Melepas kabel yang terhubung 1 node di nomor 1,2,3 Sync Module.
  - b. Menghubungkan kembali kabel ke nomor 2,3 Sync Module.
  - c. Menghubungkan kabel nomor 2,3 Sync Module ke nomor 1,2 Frequency Meter.
  - d. Menghubungkan nomor 1,2,3 pada Sync Module ke Nomor 4,5,6 PF Meter dengan kabel → (1-4,2-5,3-6)
  - e. Menghubungkan nomor 1,2,3 Pada PF Meter ke (-) Variabel Inductance yang berbeda.
  - f. Menghubungkan (-) Variabel Inductance ke (+) Variabel Inductance.
  - g. Menghubungkan (+) Variabel Inductance ke (-) Variabel Resistance.
  - h. Menghubungkan (-) Variabel Resistance ke (+) Variabel Resistance.
  - i. Menghubungkan antar (+) Variabel resistance sehingga menjadi 1 Node
  - j. Menyalakan sumber supply, mengatur kecepatan hingga yang diinginkan, mencatat nilai A3,V2,PF Meter dan Frequency Meter
  - k. Mengatur nilai hambatan untuk variasi data yang lainnya (\*Dahulukan menyalakan hambatan yang diinginkan lalu mematikan hambatan sebelumnya, **TIDAK BOLEH mematikan beban sebelumnya lalu menyalakan beban yang ingin dipakai**)
  - l. Mematikan sumber supply setelah selesai mengambil data.



## MODUL V

### PARALEL GENERATOR SINKRON

#### Tujuan:

1. Mengetahui dan memahami bagaimana memparalelkan generator sinkron

#### 5.1 PENDAHULUAN

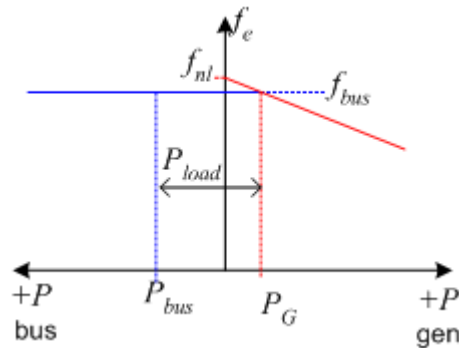
Dalam memenuhi kebutuhan listrik dari masyarakat yang akan selalu meningkat, maka dengan sendirinya pasokan listrik juga akan selalu bertambah sedangkan kemampuan dari penyuplaian daya oleh suatu generator tidak dapat ditambah lagi. Oleh sebab itu dirancanglah sebuah sistem yang biasa disebut dengan interkoneksi dimana di dalam sistem ini, beberapa generator akan dihubungkan satu sama lain secara paralel hingga beban yang dapat disuplai juga akan bertambah. Hal ini diharapkan akan dapat memenuhi kebutuhan manusia akan listrik. Berikut adalah keuntungan paralel generator serempak:

1. Meningkatkan daya yang dihasilkan
2. *Reliable*
3. Perawatan lebih mudah
4. Lebih efisien

Dalam memparalelkan beberapa generator serempak, terdapat syarat-syarat yang harus dipenuhi. Dan dalam memparalelkannya pun harus dengan suatu prosedur-prosedur tertentu sehingga proses memparalelkan beberapa generator ini akan berjalan lancar dan tanpa hambatan. Syarat dalam memparalelkan generator serempak diantaranya:

1. Besar tegangan antara generator yang akan diparalelkan harus sama
2. Frekuensi dari generator yang akan diparalelkan harus sedikit lebih tinggi
3. Urutan fasa generator yang akan diparalelkan harus sama
4. Beda fasa generator yang akan diparalelkan harus sama

Untuk menghitung banyak daya yang disuplai generator dan bus ke beban, maka digunakan house diagram. House diagram memplot frekuensi dan daya generator dan bus



**Gambar 5.1** House Diagram.

## 5.2 LANGKAH-LANGKAH PERCOBAAN:

1. Menyusun rangkaian sesuai dengan langkah pertama pada percobaan berbeban modul IV.
2. Melepas Amepere meter (A3) dari rangkaian.
3. Menghubungkan nomor 1,2,3 pada Sync Motor ke nomor 4,5,6 di Sync Module.
4. Menghubungkan nomor 4,5,6 pada Sync Module ke Huruf 2,1,3 di Power Supply AC (220/380 V – 10 A) yang dalam hal ini adalah listrik PLN yang akan di paralelkan dengan Generator Sinkron.
5. Menghubungkan nomor 4,6 pada Sync Module ke nomor 1,2 di Frequency Meter untuk mengukur frekuensi Generator Sinkron.
6. Menghubungkan Nomor 1,3 pada Sync Module ke nomor 3,4 di Frequency Meter untuk mengukur frekuensi Listrik PLN.
7. Menghubungkan nomor 1,3 pada Sync Module ke +,- pada Voltmeter (V3) untuk mengukur tegangan PLN.
8. Mengubungkan nomor 6,4 di Sync Module ke +,- Voltmeter (V2) untuk mengukur tegangan Generator Sinkron.



9. Menyamakan nilai tegangan generator sinkron agar bernilai 380 V (sama dengan  $V_{\text{phase}}$  listrik PLN).
10. Mengukur nilai frekuensi listrik PLN.
11. Menyesuaikan nilai frekuensi listrik generator sinkron agar sedikit lebih tinggi dari frekuensi listrik PLN.
12. Menyalakan Sync Module ketika ketiga syarat (Urutan fasa, Nilai tegangan dan Frekuensi) sudah terpenuhi.
13. Mengamati kedipan lampu pada Sync Module untuk melihat apakah sudut fasa sudah sesuai atau belum.
14. Mematikan Sync Module lalu dilanjutkan mematikan sumber listrik jika sudah selesai melakukan percobaan.
15. Merapihkan seluruh kabel seperti keadaan semula.



## MODUL VI

### KARAKTERISTIK MOTOR INDUKSI TIGA FASA

#### **Tujuan:**

1. Memahami konstruksi motor induksi.
2. Mengetahui karakteristik kerja motor tak serempak, seperti: daya keluar optimal motor, efisiensi, faktor daya, kecepatan motor serta persentase slip.

#### **6.1 PENDAHULUAN**

##### **6.1.1 Pengertian Umum**

Motor listrik adalah mesin yang digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Prinsip induksi elektromagnetik merupakan suatu bentuk transfer energi yang tidak terhubung secara elektris, melainkan secara magnetis. Salah satu motor listrik yang umum digunakan dalam banyak aplikasi adalah motor induksi. Motor induksi merupakan salah satu mesin asinkron karena mesin ini beroperasi pada kecepatan di bawah kecepatan sinkron. Berdasarkan suplai input yang digunakan terdapat 2 jenis motor induksi, yaitu motor induksi 1 fasa dan motor induksi 3 fasa.

Motor induksi merupakan motor salah satu jenis motor AC yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Karena memiliki struktur yang simple, kuat, dan mudah untuk perawatannya.

##### **6.1.2 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa**

Secara umum, motor induksi terdiri dari rotor dan stator. Stator adalah bagian yang diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar. Diantara keduanya, terdapat celah kecil udara yang jaraknya sangat kecil dan celah ini nantinya sangat berpengaruh terhadap proses induksi.

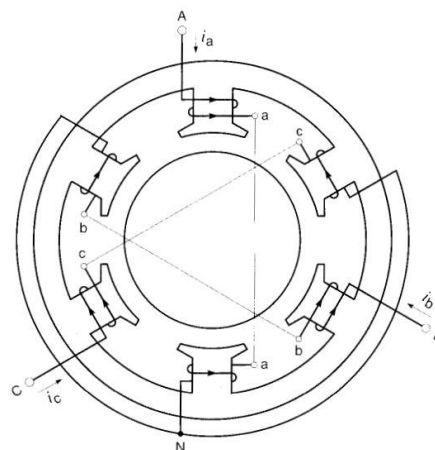


### a. Stator



**Gambar 6.1** Stator pada motor induksi.

Komponen stator adalah bagian terluar dari motor yang merupakan bagian yang diam dan mengalirkan arus fasa. Rangka luarnya terbuat dari baja maupun aluminium, sedangkan intinya berupa lapisan-lapisan yang terbuat dari baja. Pada intinya terdapat rongga (*slot*) yang berisolasi. Belitannya digulung untuk jumlah kutub tertentu, yang diperlukan dalam menentukan kecepatan. Berikut ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, dan belitan stator yang telah diletakkan pada cangkang luar untuk motor induksi tiga fasa dapat dilihat gambar berikut.

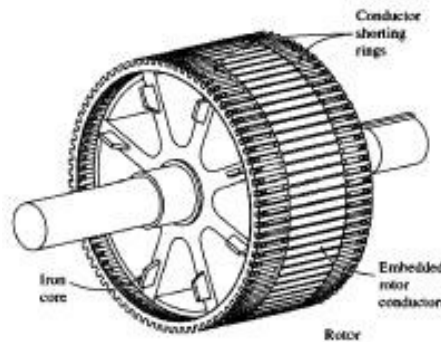


**Gambar 6.2** Komponen stator motor induksi dengan tumpukan isolasi kertas pada alurnya.

### b. Rotor

Rotor motor induksi tiga fasa dibedakan menjadi dua, yaitu rotor sangkar (*squirrel cage rotor*) dan rotor belitan (*wound rotor*).

Rotor sangkar (*squirrel cage rotor*) terdiri dari inti silinder yang berlapis-lapis dengan slot (alur) yang paralel sebagai tempat untuk membawa konduktor rotor. Konduktor rotor berbentuk batang (*bar*) yang terbuat dari tembaga, aluminium atau logam campuran. Masing-masing batang (*bar*) diletakkan pada slotnya masing-masing.



**Gambar 6.3** Struktur rotor sangkar tupai.

Motor rotor belitan (*wound rotor*) berbeda dengan motor sangkar tupai dalam hal konstruksi rotornya. Seperti namanya, rotor dililit dengan lilitan terisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fasa rotor dihubungkan secara Y dan masing – masing fasa ujung terbuka yang dikeluarkan ke cincin slip yang terpasang pada poros rotor.



**Gambar 6.4** Struktur Rotor Belitan

### 6.1.3 Prinsip Kerja

Motor Induksi 3 Fasa memiliki sumber AC 3 fasa yang terhubung dengan stator pada motor. Ketika stator terhubung dengan sumber AC, maka arus akan mengalir ke stator melalui kumparan pada stator. Dalam proses ini, inti besi di

stator menjadi magnet, yang kemudian akan menginduksi bagian rotornya. Ketika kumparan rotor terinduksi tegangan maka akan mengalir arus (hal ini dikarenakan kumparan rotor merupakan loop tertutup). Arus yang mengalir pada kumparan rotor akan berinteraksi dengan medan magnet di stator, sehingga akan menimbulkan gaya putar pada rotor. Arus yang mengalir pada penghantar rotor ini berada dalam medan magnet berputar dari stator, sehingga pada penghantar rotor akan timbul gaya yang berpasangan dan berlawanan arah. Gaya tersebut menimbulkan torsi yang cenderung memutar rotornya.

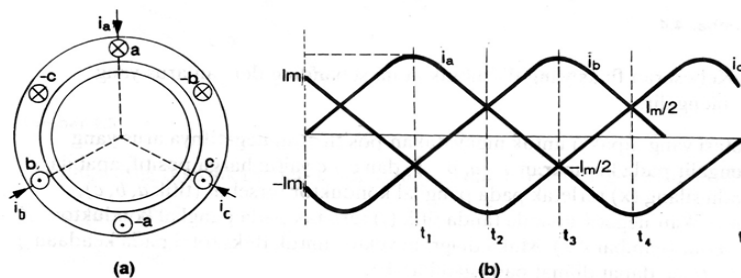
Perputaran rotor akan semakin meningkat hingga mendekati kecepatan sinkron. Perbedaan kecepatan medan stator ( $N_s$ ) dan kecepatan rotor ( $N_r$ ) disebut slip ( $s$ ) yang dinyatakan dengan:

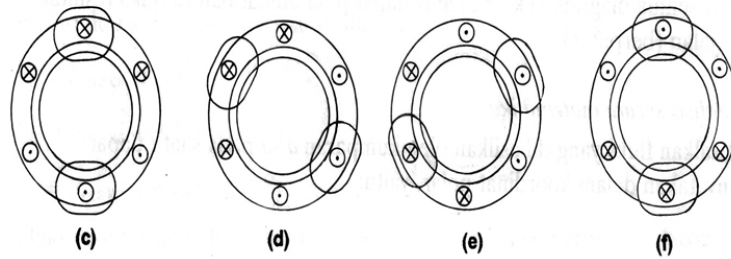
$$\text{Slip } (S) = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

Setiap fasa dalam kumparan stator akan mengalami hal yang sama karena setiap fasa dialiri arus, namun besarnya fluks yang dihasilkan tidak sama di setiap waktu. Hal ini disebabkan besarnya arus yang berbeda-beda pada tiap fasa di tiap waktunya.

#### 6.1.4 Medan Putar

Pada mesin arus bolak-balik, perputaran motor ditimbulkan oleh adanya medan putar (fluks yang berputar) yang dihasilkan dalam kumparan statornya. Medan putar ini terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dalam fasa banyak, umumnya menggunakan tiga fasa. Proses terjadinya medan putar dijelaskan pada gambar berikut.





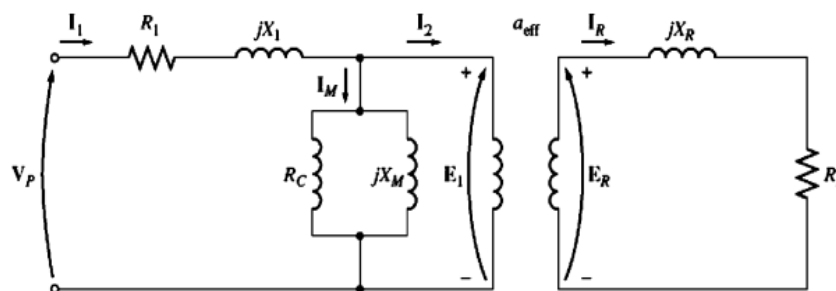
Gambar 6.5 Medan Putar

Pada Gambar 6.5(a), kumparan a-a',b-b',c-c' dihubungkan secara 3 fasa dengan perbedaan fasa  $120^0$  serta dialiri arus sinusoidal. Pada Gambar 6.5(b), distribusi arus pada tiap fasanya ( $i_a, i_b, i_c$ ) yang merupakan fungsi waktu. Pada keadaan  $t_1, t_2, t_3$  dan  $t_4$ , fluks resultan yang ditimbulkan oleh kumparan tersebut, masing-masing ditunjukkan pada Gambar 6.5(c),(d),(e) dan (f).

### 6.1.5 Rangkaian Ekuivalen

Kerja motor induksi seperti juga kerja transformator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Kerja motor induksi tergantung pada tegangan dan arus induksi pada rangkaian rotor dari rangkaian stator. Rangkaian ekuivalen motor induksi mirip dengan rangkaian ekuivalen trafo. Rangkaian tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

Rangkaian Ekuivalen Model Trafo:



Gambar 6.6 Rangkaian ekuivalen motor induksi model trafo

Keterangan Gambar :

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| $I_1$ : Arus stator (A)             | $X_M$ : Reaktansi fluks utama ( $\Omega$ ) |
| $R_1$ : Tahanan stator ( $\Omega$ ) | $I_R$ : Arus rotor (A)                     |
|                                     | $R_R$ : Tahanan rotor ( $\Omega$ )         |



$X_1$  : Reaktansi induksi stator ( $\Omega$ )  
 $X_R$  : Reaktansi induksi rotor ( $\Omega$ )  
 $E_R$  : Tegangan induksi rotor (V)  
 $I_M$  : Arus magnetisasi (A)  
 $R_C$  : Tahanan magnetisasi ( $\Omega$ )

Sama seperti halnya dengan trafo, maka arus stator ( $I_1$ ) terdiri dari dua buah komponen. Kedua buah komponen tersebut adalah arus magnetisasi (eksitasi) dan arus komponen beban.

Rangkaian Ekuivalen Rotor:

Pada saat motor start dan rotor belum berputar, maka stator dan rotor memiliki frekuensi yang sama. Namun, pada saat rotor sudah berputar, maka besarnya frekuensi dan tegangan induksi pada rotor sudah dipengaruhi oleh slip. Sehingga, persamaanya menjadi:

$$E_R = sE_{R0}$$

$$F_{re} = sF_{se}$$

$E_R$  = tegangan induksi sudah berputar

$E_{R0}$  = tegangan induksi saat diam

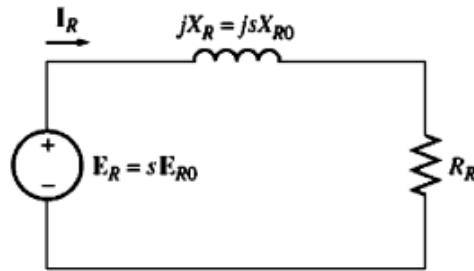
Tegangan induksi pada saat motor berputar akan mempengaruhi tahanan dan reaktansi pada rotor. Tahanan pada rotor adalah konstan dan tidak dipengaruhi oleh slip. Reaktansi dari motor induksi bergantung terhadap induktansi rotor dan frekuensi dari tegangan dan arus pada rotor. Sehingga persamaanya menjadi:

$$X_R = sX_{R0}$$

$X_R$  = reaktansi rotor

$X_{R0}$  = reaktansi rotor-blocked rotor

Sehingga, rangkaian ekuivalen rotor ditunjukkan seperti berikut ini:



Gambar 6.7 (a) Rangkaian Ekivalen Model Rotor

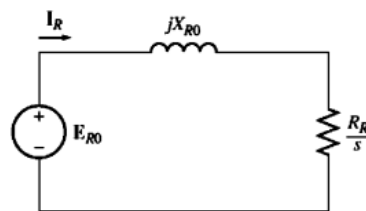
Didapatkan persamaan:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}}$$

Saat dipengaruhi oleh slip:

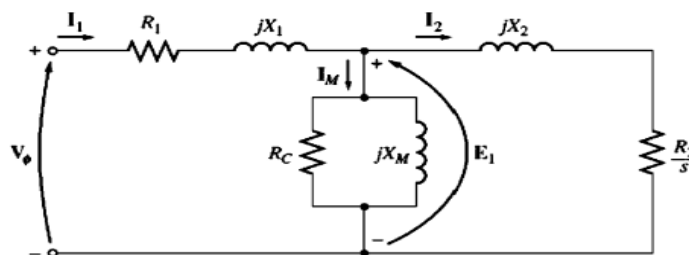
$$I_R = \frac{E_R}{R_R/s + jX_{R0}}$$

Rangkaian ekivalen rotor yang dipengaruhi slip pada motor induksi:



Gambar 6.7 (b) Rangkaian Ekivalen Model Rotor dipengaruhi slip

Rangkaian Ekivalen Final:



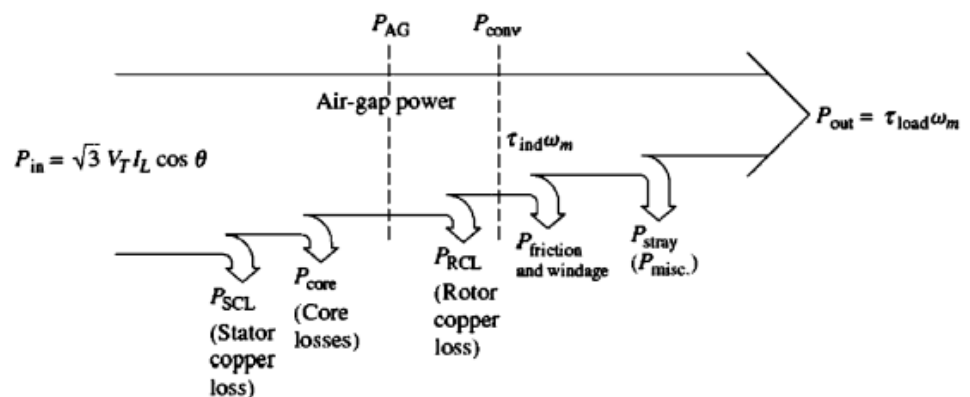
**Gambar 6.8** Rangkaian Ekivalen Final

Keterangan Gambar :

- $I_2$  : Arus rotor akibat ggl pada stator (A)
- $E_1$  : Tegangan induksi pada kumparan stator dalam (V)
- $X_2$  : Reaktansi kumparan rotor ( $\Omega$ )

### 6.1.6 Daya Motor Induksi

Diagram aliran daya ditunjukkan pada Gambar 6.9 untuk tipe motor induksi dan sebagai gambaran dengan jelas bagaimana daya listrik yang disuplai ke lilitan stator dirubah hingga menjadi daya mekanik pada rotor.

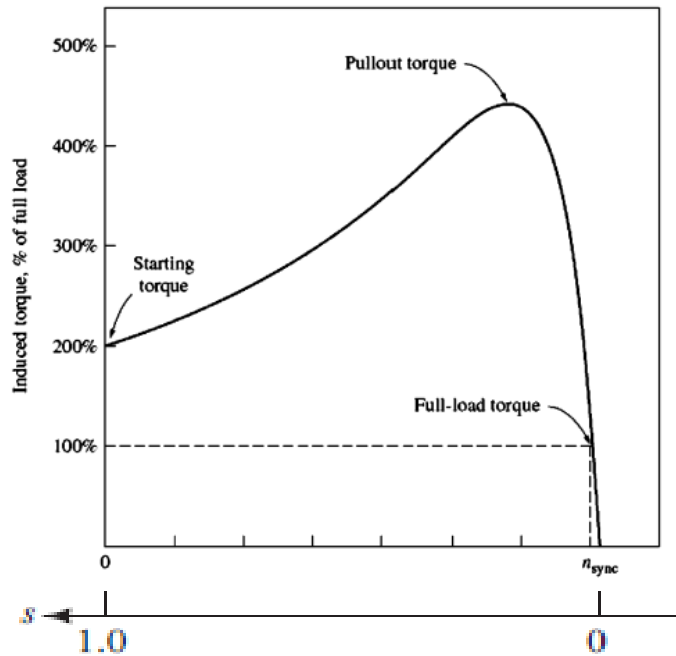


**Gambar 6.9** Diagram aliran daya motor induksi

Keterangan:

- $P_{SCL}$  = rugi - rugi tembaga pada belitan stator (Watt)
- $P_{core}$  = rugi - rugi inti pada stator (Watt)
- $P_{AG}$  = daya yang ditransfer melalui celah udara (Watt)
- $P_{RCL}$  = rugi - rugi tembaga pada belitan rotor (Watt)
- $P_{friction\ and\ windage}$  = rugi - rugi gesek + angin (Watt)
- $P_{stray}$  = stray losses (Watt)
- $P_{conv}$  = daya mekanis keluaran (Watt)

### 6.1.7 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor Induksi



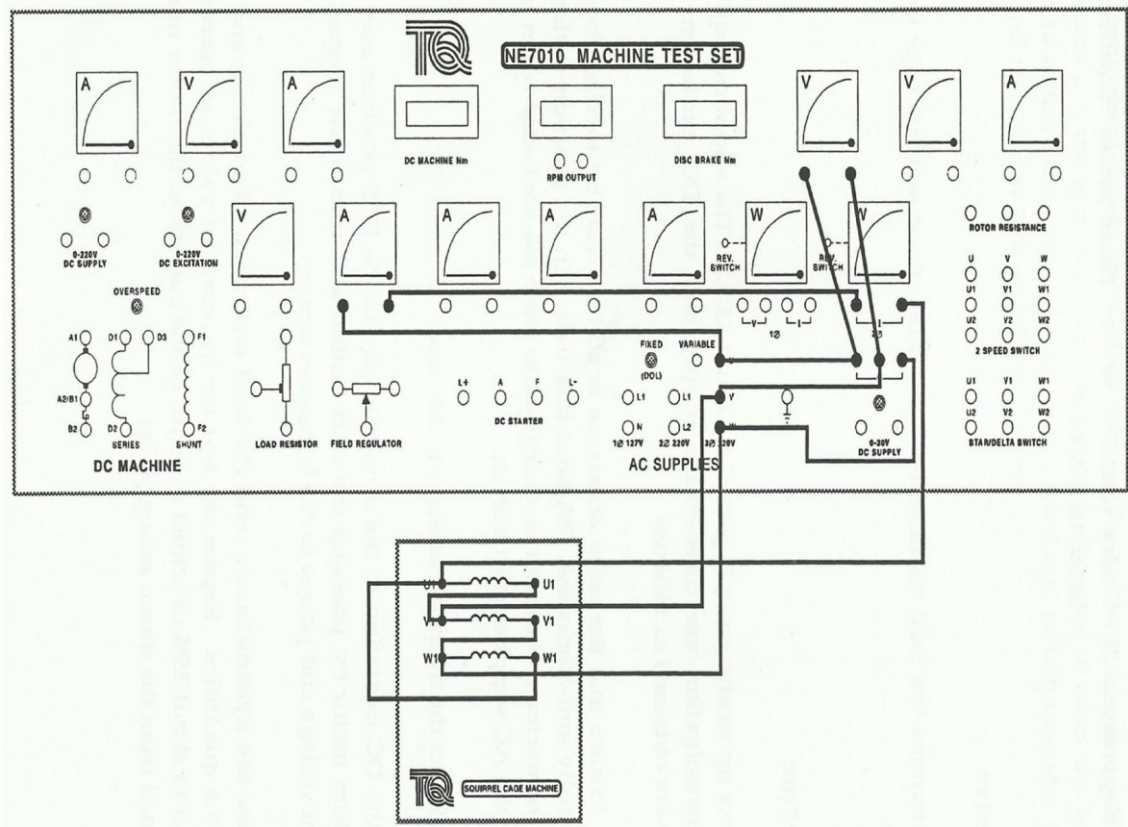
**Gambar 6.9** Kurva karakteristik torsi-kecepatan motor induksi

Pada saat menyala, terdapat arus awal yang tinggi dan torsi yang rendah. Saat mencapai 80% kecepatan penuh, torsi berada pada tingkat tertinggi (*pullout torque*) dan arus mulai turun. Pada kecepatan sinkron maka arus torsi dan stator akan turun ke nol.

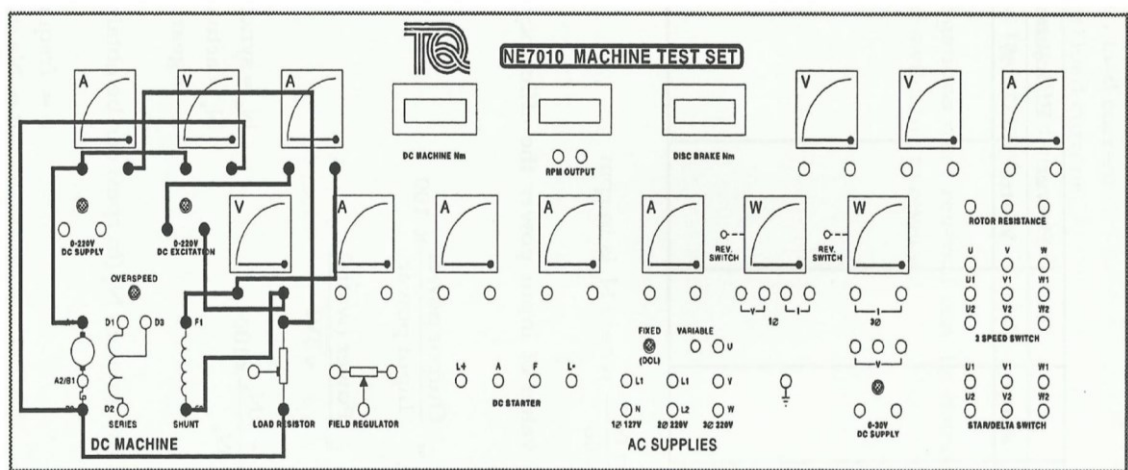


## 6.2 RANGKAIAN PERCOBAAN

### Start Motor Tak Serempak Dengan Menggunakan Saklar Y- $\Delta$



Gambar 6.10 Rangkaian motor tak serempak.



Gambar 6.11 Rangkaian generator arus searah.



### 6.3 LANGKAH – LANGKAH PERCOBAAN

#### 6.3.1 Start Mesin

Start Motor Tak Serempak

- Pastikan bahwa semua peralatan telah siap dan aman untuk dilakukan percobaan
- Pastikan bahwa tahanan rotor terpasang dalam sirkuit dengan cara memutar berlawanan arah jarum jam
- Pilih “overload selector” ke 3 □ Low
- Pilih “supplies selector” ke posisi “variable”
- Start motor dengan cara menaikkan pemutus rangkaian catu daya (MCB) ke posisi “ON”
- Tekan tombol “Supply Reset”
- Tekan tombol “Start Button” untuk memulai menajalankan motor
- Naikan tegangan perlahan-lahan sampai ke posisi 100 %.

Start Generator DC :

- Tekan tombol “DC Supply Excitation CBE” ke posisi 1 (posisi “ON”) yang menghubungkan catu daya ke stator
- Atur besarnya Excitation Supply sesuai petunjuk (Jangan Melebihi Batas Rating yang diijinkan).

#### 6.3.2 Pengambilan Data

Parameter V1 Konstan

- Catat data pertama pada kondisi yang ditentukan
- Naikan torsi beban dengan mengubah arus penguat atau arus eksitasi sesuai petunjuk
- Catatlah semua data yang diperlukan
- Torsi yang diberikan tidak melebihi nominal beban penuh (arus eksitasi diusahakan tidak melebihi rating yang diberikan)
- Ulangi dengan kondisi torsi beban diturunkan



#### Parameter Torsi Konstan

- Berilah motor harga beban tertentu
- Catatlah data pertama pada kondisi V1 nominal (maksimum)
- Turunkan V1 dengan menurunkan volume tegangan
- Bila terjadi pergeseran harga beban, dikoreksi terlebih dahulu harga beban sebelum data diambil
- Catatlah semua data yang diperlukan
- Ulangi dengan kondisi V1 dinaikkan

#### 6.3.3 Mematikan Mesin

##### Mematikan generator

- Turunkan arus eksitasi sampai harga minimum dengan memutar
- Matikan suplai sumber DC dengan menekan tombol “DC supply Excitation CBE” ke posisi 1 (posisi “OFF”)

##### Mematikan Motor

- Turunkan Harga tegangan terminal sampai harga minimum dan motor akan berhenti
- Tekan saklar stop
- Turunkan saklar pemutus catu daya (MCB) ke posisi “OFF”
- Percobaan selesai dan rapikan semua kabel yang terpakai

## MODUL VII

## STARTING MOTOR INDUKSI

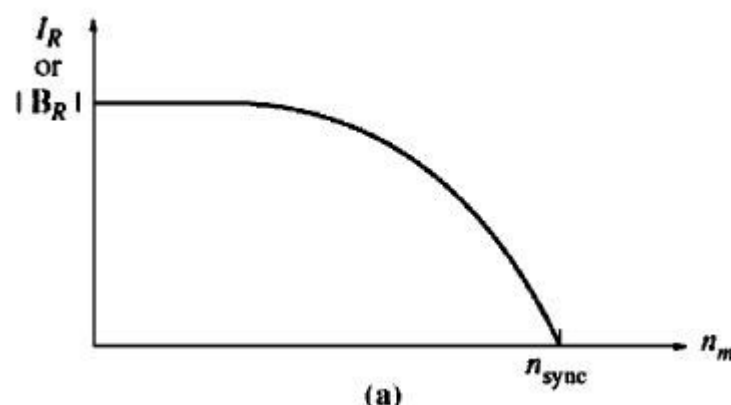
**Tujuan:**

1. Mempelajari karakteristik arus rotor pada saat start.
2. Mempelajari cara-cara start motor induksi.

**7.1 PENDAHULUAN**

Untuk memperoleh torsi mula yang cukup besar kedua jenis motor listrik baik rotor sangkar maupun rotor lilitan membutuhkan arus *start* yang cukup besar mulai dari lima sampai dengan sepuluh kali lipat arus nominal.

Bila suplai motor berasal dari penyulang utama biasanya tidak akan ada masalah dengan awal *start* motor listriknya. Namun akan menjadi masalah bila motor listrik berkapasitas besar di letakkan di daerah yang jauh dari penyulang utama. Namun demikian ada beberapa kasus dimana kapasitas motor terlalu besar di bandingkan kapasitas suplai, khususnya bila motor listrik berkapasitas besar bergabung dengan motor-motor pembantu berkapasitas kecil, dalam suatu proses produksi yang di jalankan bersamaan. Perhitungan besarnya arus *starting* motor listrik perlu dilakukan untuk mengetahui efeknya terhadap proses produksi maupun sistem yang sedang dijalankan.



**Gambar 7.1** Grafik arus rotor terhadap kecepatan motor.



Arus start mempunyai sifat reaktif, yang nilainya biasanya di asumsikan oleh karena itu *power factor* saat start biasanya lagging sebesar 15% sampai 30% dari *power factor* nominal. Untuk menjaga motor tetap bekerja dan kontaktor tidak beroperasi tegangan tidak boleh jatuh lebih dari 70% dari tegangan nominal. Namun demikian jika faktor keamanan dan kontinuitas sangat penting maka jatuh tegangan di batasi harus lebih kecil dari 10% tegangan nominal. Untuk mengurangi arus starting yang sangat besar dapat digunakan *statcom* (*static compensator*).

Selama periode waktu starting, motor pada sistem akan dianggap sebagai sebuah impedansi kecil yang terhubung dengan sebuah *bus*. Motor akan mengambil arus yang besar dari sistem, sekitar enam kali arus *rating* nya, dan bisa menyebabkan *voltage drop* pada sistem serta menyebabkan gangguan pada operasi beban yang lain. Sehingga dibutuhkan metode *starting* lain untuk mengurangi *voltage drop* tersebut.

#### 7.1.1 Direct On Line starter

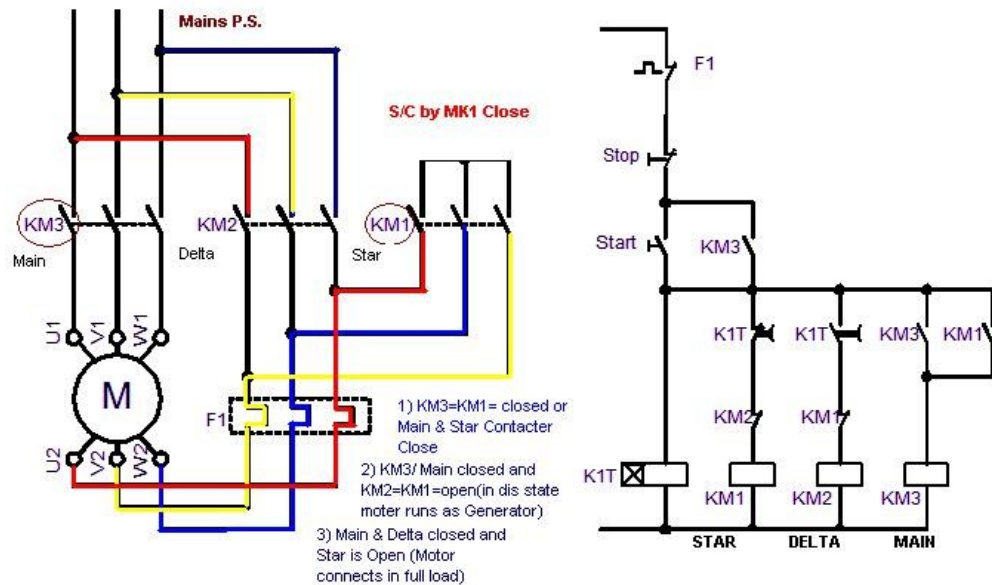
*Direct On Line starter* merupakan starting langsung. Penggunaan metode ini sering dilakukan untuk motor-motor *ac* yang mempunyai kapasitas daya yang kecil. Pengertian penyambungan langsung disini, motor yang akan dijalankan langsung di *switch on* ke sumber tegangan jala-jala sesuai dengan besar tegangan nominal motor artinya tidak perlu mengatur atau menurunkan tegangan pada saat starting .

Besar arus *startnya* dari 4 sampai 7 dari arus beban penuhnya. Perlu diperhitungkan juga arus saat start motor, demikian juga ukuran *range overload*. Salah satu keuntungan metode *DOL* adalah *capital cost* yang rendah. *Capital cost* adalah biaya modal tetap, biaya satu kali yang terjadi pada pembelian peralatan.

#### 7.1.2 Star Delta starter

*Starter* ini mengurangi lonjakan arus dan torsi pada saat start. Tersusun atas 3 buah contactor yaitu *Main Contactor*, *Star Contactor* dan *Delta Contactor*, *Timer* untuk pengalihan dari *Star* ke *Delta* serta sebuah *overload relay*. Pada saat *start*, *starter* terhubung secara *Star*. Gulungan stator hanya menerima tegangan sekitar 0,578 (satu per akar tiga) dari tegangan line. Jadi arus dan torsi yang dihasilkan akan lebih kecil dari pada *DOL Starter*. Setelah mendekati kecepatan normal starter

akan berpindah menjadi terkoneksi secara Delta. *Starter* ini akan bekerja dengan baik jika saat start motor tidak terbebani dengan berat.



Gambar 7.2 Diagram star delta starter.

### 7.1.3 Autotransformator Starter

*Autotransformator* dimasukkan ke tegangan *line* motor mengurangi tegangan ke terminal motor tergantung pada *tap* yang dipilih. Setelah *start* motor, transformator dilepas.

*Starting* dengan cara ini adalah dengan menghubungkan motor pada *tap* tegangan sekunder *autotransformator* terendah. Setelah beberapa saat motor dipercepat *tap autotransformator* diputuskan dari rangkaian dan motor terhubung langsung pada tegangan penuh.

Pada autotransformator starter, arus yang mengalir adalah

$$I = \left[ \frac{V_m}{V_1} \right]^2 \times I_{DOL}$$

Dimana :

$V_m$  = Tegangan sekunder dari *AutoTransformator*

$V_1$  = Tegangan suplai

$I_{DOL}$  = Arus *start* langsung

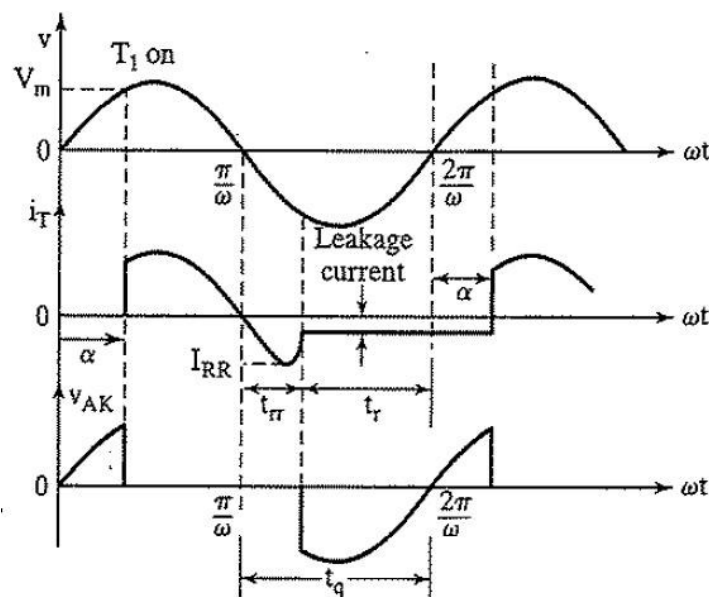
Karakteristik starting *autotransformator* adalah sebagai berikut:

- Tegangan terminal motor kurang dari tegangan *line* (oleh rasio transformator).
- Arus motor saat ini melebihi *rsting* saat ini (dengan kebalikan dari rasio transformator).
- Torsi awal dikurangi dengan kuadrat dari tegangan terminal.

#### 7.1.4 Soft starter

*Soft Starter* dipergunakan untuk mengatur/memperhalus *start* dari elektrik motor. Prinsip kerjanya adalah dengan mengatur tegangan yang masuk ke motor. Pertama-tama motor hanya diberikan tegangan yang rendah sehingga arus dan torsi pun juga rendah. Pada level ini motor hanya sekedar bergerak perlahan dan tidak menimbulkan kejutan. Selanjutnya tegangan akan dinaikan secara bertahap sampai ke nominal tegangannya dan motor akan berputar dengan dengan kondisi RPM yang nominal.

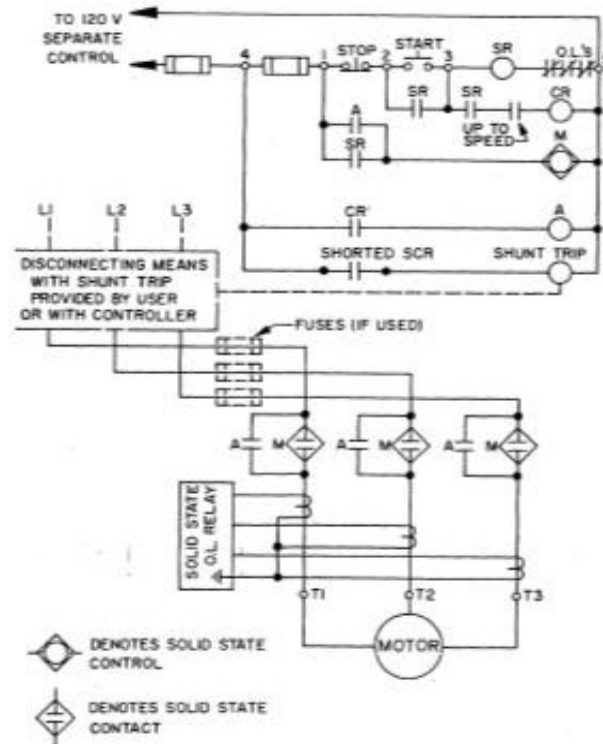
Komponen utama *softstarter* adalah *thyristor* dan rangkaian yang mengatur *trigger thyristor*. Seperti diketahui, *output thyristor* dapat di atur via *pin gate* nya. Rangkaian tersebut akan mengkontrol level tegangan yang akan dikeluarkan oleh *thyristor*.



Gambar 7.3 Pengaturan firing angle thyrsthor.



Selain untuk starting motor, *Softstarter* juga dilengkapi fitur *soft stop*. Jadi saat *stop*, tegangan juga dikurangi secara perlahan atau tidak dilepaskan begitu saja seperti pada *starter* yang menggunakan *contactor*.



**Gambar 7.4** Diagram soft starter.

### e. Frequency Drive

*Frequency Drive* sering disebut juga dengan *VSD (Variable Speed Drive)*, *VFD (Variable frequency Drive)* atau *Inverter*. *VSD* terdiri dari 2 bagian utama yaitu penyearah tegangan *AC* (50 atau 60 HZ) ke *DC* dan bagian kedua adalah membalikan dari *DC* ke tegangan *AC* dengan frequency yang diinginkan. *VSD* memanfaatkan sifat motor sesuai dengan rumus sbb :

$$RPM = \frac{120 \times f}{p} \times x$$

Di mana :

RPM = kecepatan merupakan putaran dalam motor





f = frekuensi

p = jumlah kutub motor

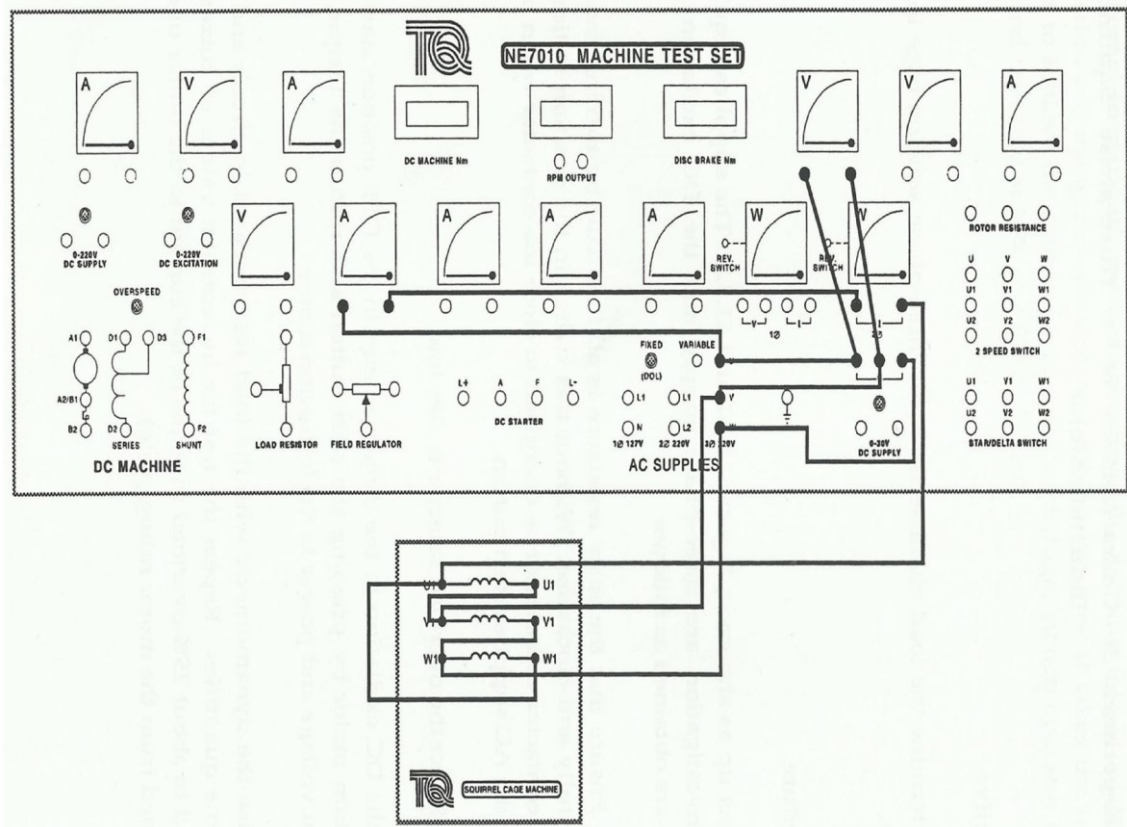
Dengan demikian jika frekuensi motor ditingkatkan maka akan meningkatkan kecepatan motor, sebaliknya dengan memperkecil frekuensi akan memperlambat kecepatan motor.

## 7.2 ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN

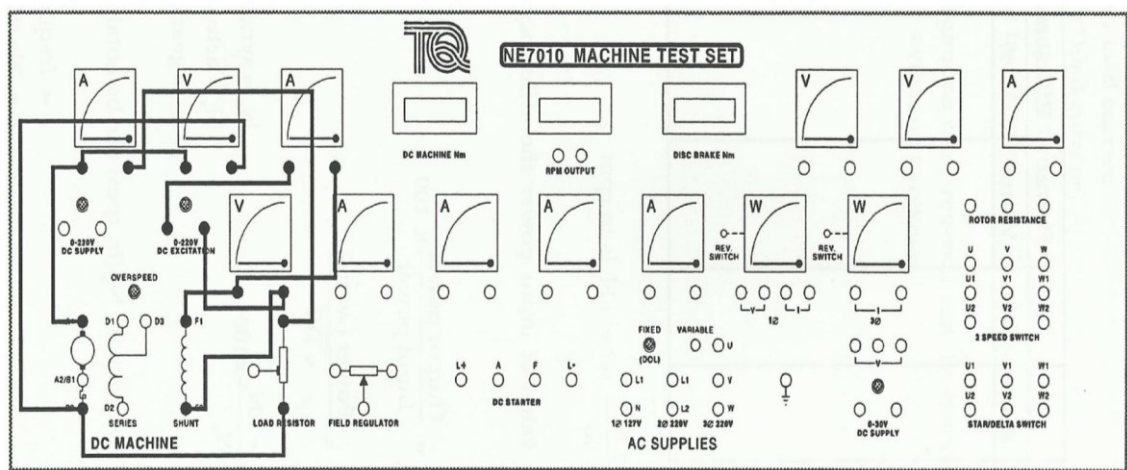
- 1 set *NE7010 MACHINE TEST SET*
- 1 motor tak serempak 3 fasa jenis sangkar tupai (*Three-phase Squirrel Cage Induction Motor*)
- 1 mesin arus searah

## 7.3 PERCOBAAN

### 7.3.1 Start Motor Tak Serempak Dengan Menggunakan Saklar Y- $\Delta$ Rangkaian Percobaan



Gambar 7.5 Rangkaian motor tak serempak.



Gambar 7.6 Rangkaian generator arus searah.

**Langkah-langkah Percobaan :**

- a. Pastikan bahwa semua peralatan telah siap dan aman untuk dilakukan percobaan
- b. Pastikan bahwa tahanan rotor terpasang dalam sirkuit dengan cara memutar berlawanan arah jarum jam



- c. Pilih “overload selector” ke posisi “3 □ Low”
- d. Pilih “supplies selector” ke posisi “fixed (DOL)”
- e. Hidupkan catu daya dengan cara menaikkan pemutus rangkaian catu daya (MCB) ke posisi “ON”
- f. Pilih “star delta switch” ke posisi delta
- g. Tekan tombol “Supply Reset”
- h. Tekan tombol “Start Button” untuk memulai menajalankan motor
- i. Amati dan catatlah besar arus puncak stator ( $A_1$ ), arus stator kondisi stabil ( $A_1$ ), kecepatan putar motor ( $n$ ), dan lama waktu yang diperlukan arus untuk mencapai kondisi stabil.
- j. Matikan mesin dengan menekan tombol “Stop Button” untuk pengambilan data berikutnya.
- k. Pilih “star delta switch” ke posisi star
- l. Ulangi langkah g, h, dan i
- m. Pilih “star delta switch” ke posisi delta kembali
- n. Amati dan catatlah perubahannya.
- o. Bila pengamatan telah selesai, matikan motor dengan menekan tombol “Stop Button” dan matikan catu daya dengan menurunkan rangkaian catu daya (MCB) ke posisi “OFF”



---

## MODUL VIII

### TRANSFORMATOR SATU FASA

#### Tujuan:

1. Memahami konstruksi Transformator dan bagian-bagiannya.
2. Mendapatkan rangkaian magnetisasi Transformator.
3. Mendapatkan impedansi ekivalen Transformator.
4. Mengetahui pengaruh pembebanan pada Transformator.

#### 8.1 PENDAHULUAN

##### 8.1.1 Pengertian Umum

Transformator adalah suatu alat elektromagnetis yang mengubah tegangan AC pada suatu level menjadi tegangan AC pada level tegangan lain yang bekerja prinsip induksi elektromagnetik tanpa mengubah frekuensi.

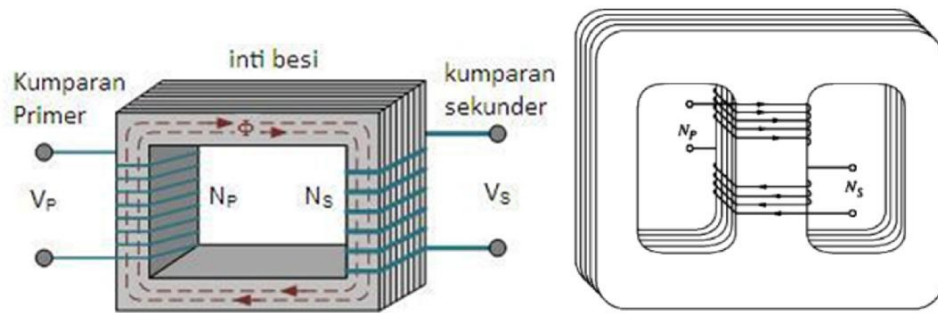
Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator daya.
2. Transformator distribusi.
3. Transformator pengukuran (transformator arus dan transformator tegangan).

Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnet, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama.

Konstruksi dasarnya terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang dililitkan pada inti besi yang satu sama lainnya terhubung secara elektromagnetis. Ada dua jenis bentuk inti besi, yakni tipe core dan tipe shell.

Prinsip kerja transformator adalah bila pada kumparan primer diberi tegangan AC, maka akan timbul fluks magnetik yang mengalir pada inti besi, kemudian akan menginduksikan tegangan di kumparan sekunder.



**Gambar 8.1** Transformator tipe core (kiri) dan tipe shell (kanan).

### 8.1.2 Transformator Ideal

Pada transformator ideal, tidak ada energi yang diubah menjadi bentuk energi lain di dalam transformator sehingga daya listrik pada kumparan skunder sama dengan daya listrik pada kumparan primer. Pada transformator Ideal perbandingan antara tegangan sebanding dengan perbandingan jumlah lilitannya. Dengan demikian dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$P_p = P_s \quad P_p = \text{daya primer (watt)}$$

$$V_p \times I_p = V_s \times I_s \quad P_s = \text{daya sekunder (watt)}$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad V_p = \text{tegangan primer (Volt)}$$

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \quad V_s = \text{tegangan sekunder (Volt)}$$

$$I_p = \text{kuat arus sekunder (ampere)}$$

$$I_s = \text{kuat arus primer (ampere)}$$

$$N_p = \text{jumlah lilitan primer}$$

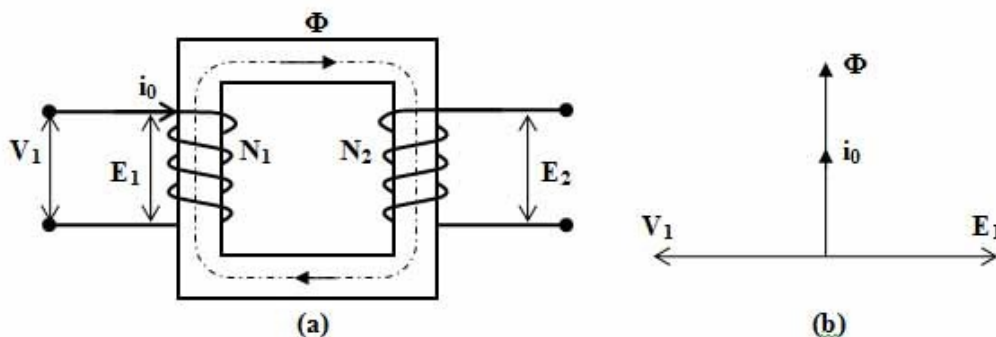
$$N_s = \text{jumlah lilitan sekunder}$$

Namun, pada kenyataannya tidak ada transformator yang ideal. Hal ini karena pada transformator selalu ada rugi-rugi yang antara lain sebagai berikut:

- Rugi-rugi tembaga; rugi-rugi yang disebabkan oleh pemanasan yang timbul akibat arus mengalir pada hambatan kawat penghantar yang terdapat pada kumparan primer dan sekunder dari transformator. Rugi-rugi tembaga sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir pada kumparan.

- Rugi-rugi arus eddy; rugi-rugi yang disebabkan oleh pemanasan akibat timbulnya arus eddy (pusar) yang terdapat pada inti besi transformator. Rugi-rugi ini terjadi karena inti besi terlalu tebal sehingga terjadi perbedaan tegangan antara sisinya maka mengalir arus yang berputar-putar di sisi tersebut. Rugi-rugi arus eddy sebanding dengan kuadrat tegangan yang disuplai ke transformator.
- Rugi-rugi hysteresis; rugi-rugi yang berkaitan dengan penyusunan kembali medan magnetik di dalam inti besi pada setiap setengah siklus, sehingga timbul fluks bolak-balik pada inti besi. Rugi-rugi ini tidak linear dan kompleks
- Fluks Bocor; kebocoran fluks terjadi karena ada beberapa fluks yang tidak menembus inti besi dan hanya melewati salah satu kumparan transformator saja. Fluks yang bocor ini akan menghasilkan induktansi diri pada lilitan primer dan sekunder sehingga akan berpengaruh terhadap nilai daya yang disuplai dari sisi primer ke sisi sekunder transformator.

### 8.1.3 Keadaan Transformator Tanpa Beban



**Gambar 8.2** Transformator tanpa beban.

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan  $V_1$  yang sinusoid, akan mengalirkan arus primer  $I_0$  yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan  $N_1$  reaktif murni,  $I_0$  akan tertinggal  $90^\circ$  dari  $V_1$  (gambar 7.2). Arus primer  $I_0$  menimbulkan fluks ( $\Phi$ ) yang sefasa juga berbentuk sinusoid.

$$\Phi = \Phi_{\text{maks}} \sin \omega t$$



Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi  $e_1$  (Hukum Faraday).

$$e_1 = -N_1 \cdot d\Phi/dt$$

$$e_1 = -N_1 \cdot d(\Phi_{\text{maks}} \sin \omega t)/dt = -N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{\text{maks}} \cdot \cos \omega t \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \Phi)$$

Harga efektifnya adalah:

$$E_1 = N_1 \cdot 2\pi f \Phi_{\text{maks}} / \sqrt{2} = 4.44 n_1 \cdot f \Phi_{\text{maks}}$$

Pada rangkaian sekunder, fluks ( $\Phi$ ) bersama tadi menimbulkan:

$$e_2 = -N_2 \cdot d\Phi/dt$$

$$e_2 = -N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_{\text{maks}} \cdot \cos \omega t$$

$$E_2 = 4.44 N_2 \cdot f \Phi_{\text{maks}}$$

$$E_1/E_2 = N_1/N_2$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor,

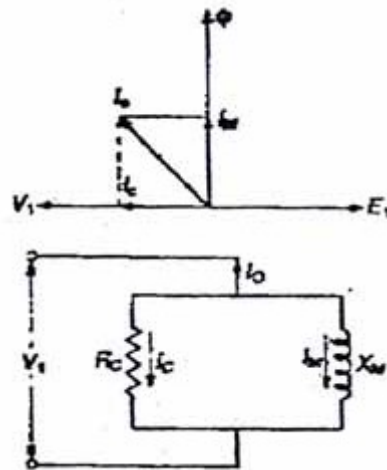
$$E_1 / E_2 = V_1 / V_2 = N_1 / N_2 = a.$$

$$a = \text{perbandingan transformasi}$$

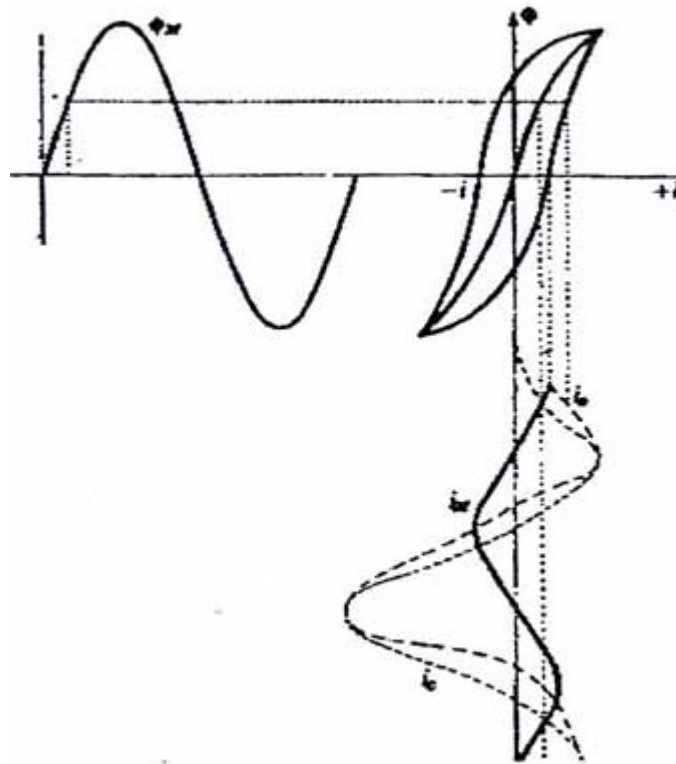
Dalam hal ini tegangan induksi  $E_2$  mempunyai besaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan tegangan sumber  $V_1$ .

#### 8.1.4 Arus Penguat

Arus primer  $I_0$  yang mengalir pada saat kumparan sekunder tidak dibebani disebut arus penguat. Dalam kenyataannya arus primer  $I_0$  bukanlah merupakan arus induktif murni, sehingga ia terdiri atas dua komponen (Gambar 8.3).



**Gambar 8.3** Arus penguat



**Gambar 8.4** Pemagnetan

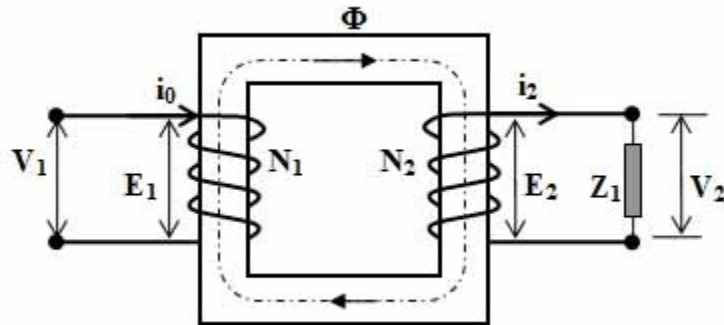
(1) Komponen arus pemagnetan  $I_M$ , yang menghasilkan fluks ( $\Phi$ ). Karena sifat besi yang non linear (ingat kurva B-H), maka arus pemagnetan  $I_M$  dan juga fluks ( $\Phi$ ) dalam kenyataannya tidak berbentuk sinusoid (Gambar 8.4).

(2) Komponen arus rugi tembaga  $I_c$ , menyatakan daya yang hilang akibat adanya rugi histerisis dan arus 'eddy'.  $I_c$  sefasa dengan  $V_1$ , dengan demikian hasil perkalian ( $I_c \times V_1$ ) merupakan daya (watt) yang hilang.



### 8.1.5 Keadaan Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban  $Z_1$ ,  $I_2$  mengalir pada kumparan sekunder dimana  $I_2 = V_2/Z_L$  dengan  $\theta_2 =$  faktor kerja beban.



**Gambar 8.5** Transformator dalam keadaan berbeban.

Arus beban  $I_2$  ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm)  $N_2 I_2$  yang cenderung menentang fluks ( $\Phi$ ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan  $I_M$ . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus  $I_2'$ , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban  $I_2$ , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I_2'$$

Bila rugi besi diabaikan ( $I_c$  diabaikan) maka  $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I_2'$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan  $I_M$  saja, berlaku hubungan :

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I_2') - N_2 I_2$$

$$N_1 I_2' = N_2 I_2$$

Karena nilai  $I_M$  dianggap kecil maka:

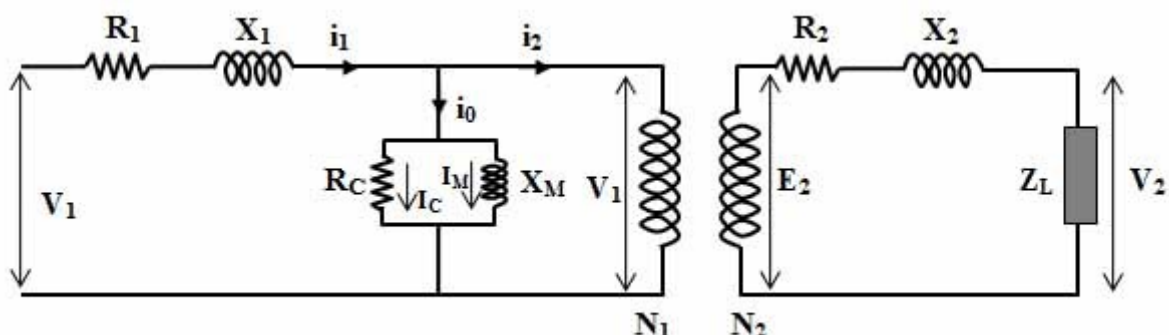
$$I_1 = I_2'$$

$$\text{Jadi} \rightarrow N_1/I_1 = N_2/I_2 \text{ atau } I_1/I_2 = N_2/N_1$$

### 8.1.6 Rangkaian Pengganti

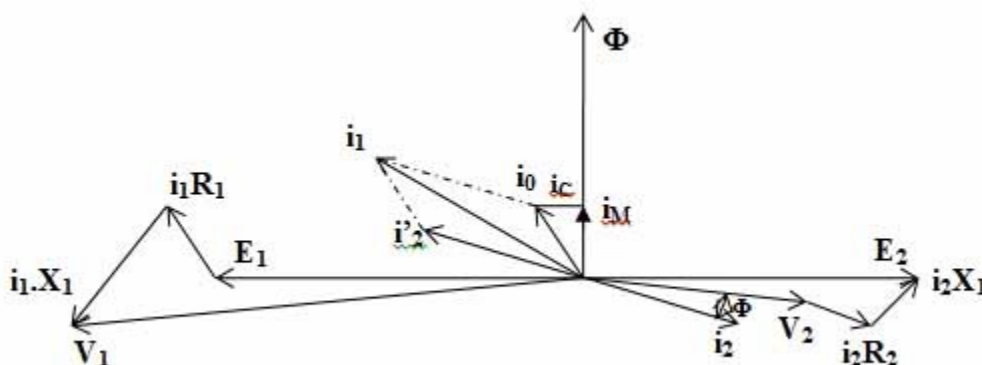
Dalam pembahasan terdahulu kita mengabaikan adanya tahanan dan fluks bocor, Analisa selanjutnya akan memperhitungkan kedua hal tersebut. Tidak

seluruh fluks ( $\Phi$ ) yang dihasilkan oleh arus permagnetan  $I_M$  merupakan Fluks bersama ( $\Phi_M$ ), sebagian darinya hanya mencakup kumparan primer ( $\Phi_1$ ) atau kumparan sekunder saja ( $\Phi_2$ ). Dalam model rangkaian (rangkaiannya ekuivalen) yang dipakai untuk menganalisis kerja suatu transformator, adanya fluks bocor  $\Phi_1$  dan  $\Phi_2$  ditunjukkan sebagai reaktansi  $X_1$  dan  $X_2$ . Sedangkan rugi tahanan ditunjukkan dengan  $R_1$  dan  $R_2$ . Dengan demikian 'model' rangkaian dapat dituliskan seperti pada gambar 8.6.



**Gambar 8.6** Rangkaian pengganti transformator.

Dalam rangkaian diatas dapat dibuat vektor diagramnya sebagai terlukis pada gambar 8.7.



**Gambar 8.7** Vektor diagram rangkaian pengganti.

Dari model rangkaian diatas dapat pula diketahui hubungan penjumlahan vektor:

$$V_1 = E_1 + I_1R_1 + I_1X_1$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2$$

$$E_1 / E_2 = N_1 / N_2 = a \text{ atau } E_1 = a E_2$$

$$E_1 = a ( I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2 )$$

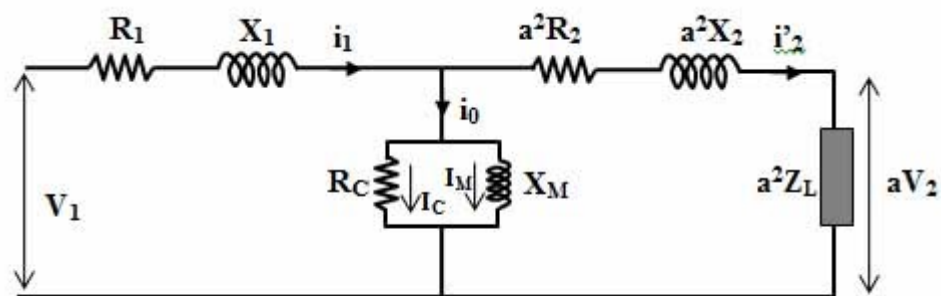
$$\text{Karena } I_1' / I_2 = N_2 / N_1 = a \text{ atau } I_1' = a I_2$$

$$\text{Maka, } E_1 = a^2 ( I_1'^2 Z_L + I_1'^2 R_2 + I_1'^2 X_2 )$$

$$\text{Dan, } V_1 = E_1 + a^2 ( I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2 ) + I_1 ( R_1 + X_1 )$$

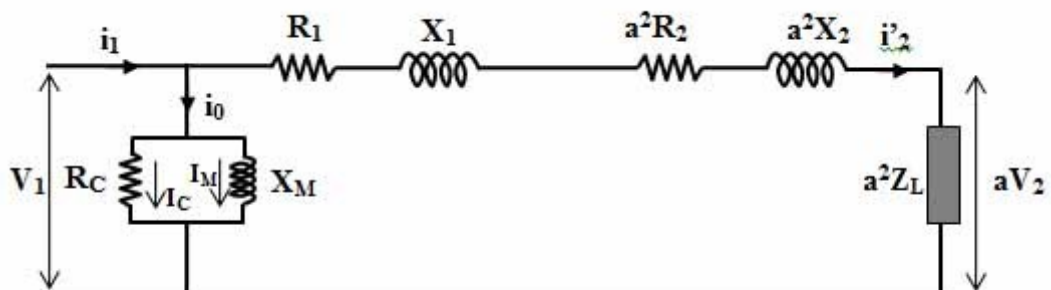
Persamaan terakhir mengandung pengertian bahwa apabila parameter rangkaian sekunder dinyatakan dalam harga primer, harganya perlu dikalikan dengan faktor  $a^2$ .

Sekarang model rangkaian menjadi sebagai terlihat pada gambar 8.8.



**Gambar 8.8** Rangkaian pengganti dilihat dari sisi primer.

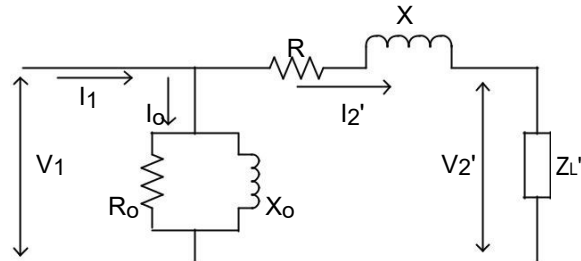
Untuk memudahkan analisis (perhitungan), model rangkaian tersebut dapat diubah menjadi seperti dapat dilihat pada gambar 8.9.



**Gambar 8.9** Rangkaian pengganti dilihat dari sisi primer.

### 8.1.7 Pengaturan Tegangan dan Efisiensi

Rangkaian ekivalen trafo pada keadaan berbeban yang ditransformasikan ke sisi primer dapat digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 8.10** Rangkaian pengganti dilihat dari sisi primer.

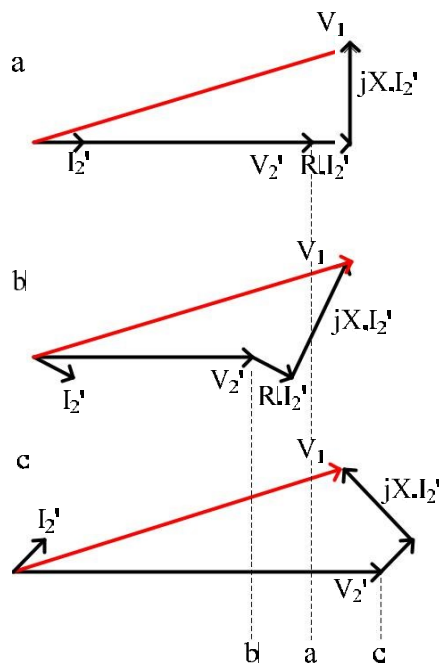
Jika tegangan  $V_1$  dibuat tetap, maka didapat persamaan sebagai berikut :

$$V_2' = V_1 - I_2' \angle \theta (R + jX)$$

$$V_2' = aV_2$$

$$I_2' = I_2 / a$$

Dari persamaan di atas, dapat digambarkan diagram fasor untuk ketiga kondisi beban sebagai berikut :





$$\%VR = \frac{V_{02} - V_2}{V_{02}} \times 100\% = \frac{V_1/a - V_2}{V_1/a} \times 100\%$$

$$Efisiensi(\eta) = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

Diagram fasor trafo dengan beban (a) resistif (b) induktif (c) kapasitif:

- $V_p/a > V_s$ , jadi VR pada transformator harus lebih besar dari 0. (Unity)
- $V_p/a > V_s$  untuk beban *lagging*, jadi VR pada transformator harus lebih besar dari 0.
- $V_s > V_p/a$ , jadi VR pada transformator harus kurang dari 0. (Leading)

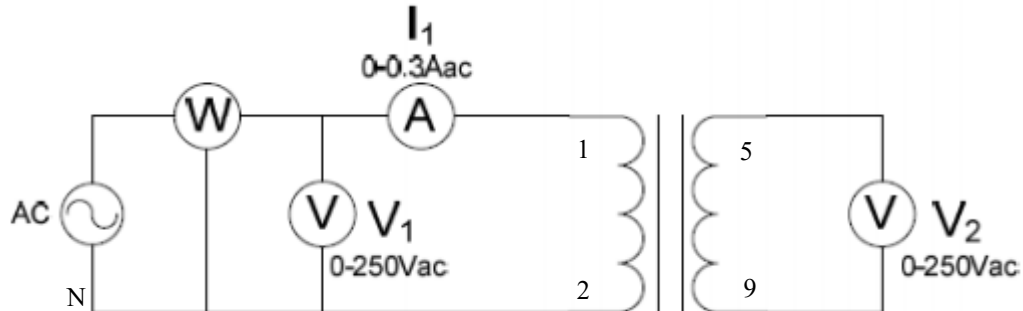
Pembebanan daya reaktif akan mempengaruhi besar tegangan sekunder trafo secara dominan. Beban induktif akan menyebabkan jatuh tegangan yang cukup signifikan pada sisi sekunder trafo ( $V_2$ ). Beban kapasitif akan menyebabkan tegangan sekunder ( $V_2$ ) menjadi lebih besar dari tegangan primernya ( $V_1$ ).

## 8.2 ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN

- 1 modul transformator
- 1 modul catu daya
- 2 modul AC ammeter (3/5 Aac)
- 2 modul AC voltmeter (0-250 Vac)
- 1 modul variable resistance
- 1 modul variable inductance
- 1 modul variable capacitance
- 1 watt meter
- 1 cos  $\phi$  meter
- Kabel penghubung

### 8.3 PERCOBAAN-PERCOBAAN

#### 8.3.1 Percobaan Beban Nol

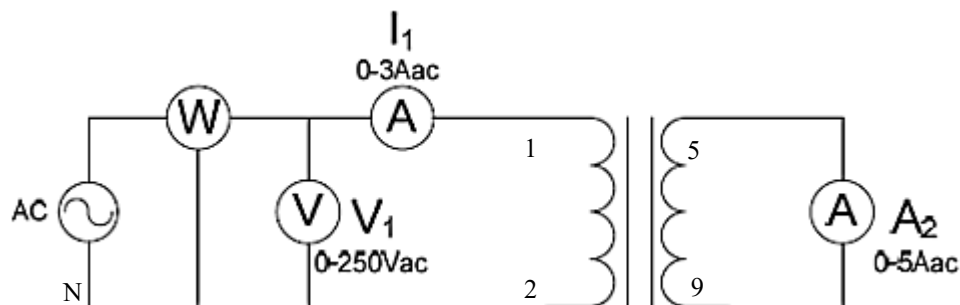


Gambar 8.11 Rangkaian Percobaan Beban Nol

#### Langkah-langkah percobaan :

- Susun rangkaian percobaan. Perhatikan rating trafo pada sisi primer dan sekunder.
- Hidupkan catu daya. Kemudian atur tegangan masukan nilai nol secara bertahap.
- Catat:  $I_0(A_1)$ ,  $V_2$ ,  $P_0$  untuk setiap kenaikan  $V_1$ .
- Setelah percobaan selesai, turunkan catu daya.

#### 8.3.2 Percobaan Hubung Singkat

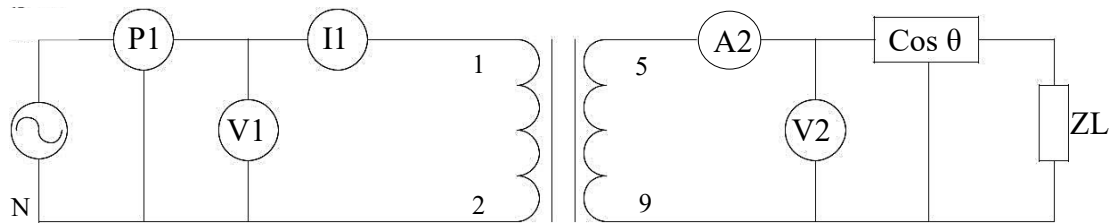


Gambar 8.12 Rangkaian Percobaan Hubung Singkat

#### Langkah-langkah Percobaan :

- Susun rangkaian percobaan.
- Periksa kembali rangkaian dan pastikan tidak ada kesalahan pada rangkaian. Hidupkan catu daya.
- Catat  $V_1$ ,  $I_2$ , dan  $P_{hs}$  untuk setiap kenaikan  $I_1$  dengan mengatur catu daya.
- Setelah percobaan selesai, matikan catu daya

### 8.3.3 Percobaan Berbeban



**Gambar 8.13** Rangkaian Percobaan Berbeban

#### Langkah-langkah Percobaan :

- Susun rangkaian percobaan.
- Hidupkan catu daya sampai nominalnya (terlihat pada  $V_1$ ) dan dijaga konstan.
- Hidupkan beban secara bertahap lalu catat hasil pengukuran yang diperlukan.
- Setelah percobaan selesai, padamkan catu daya dan rapikan alat-alat serta meja percobaan.

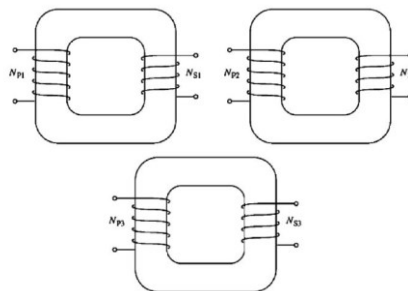
## MODUL IX TRANSFORMATOR TIGA FASA

### Tujuan:

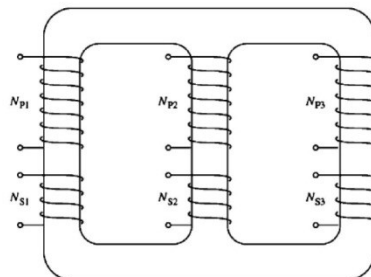
1. Mengetahui beberapa konfigurasi belitan Transformator.
2. Mengetahui perbandingan tegangan primer dan ssekunder pada beberapa konfigurasi belitan.

### 9.1 PENDAHULUAN

Hampir semua sistem pembangkitan dan distribusi daya listrik menggunakan sistem AC tiga fasa. Maka dari itu, harus diketahui bagaimana penggunaan transformator pada sistem AC tiga fasa. Ada dua tipe transformator tiga fasa, yaitu menggunakan 3 tranformator tipe core satu fasa. Tipe lain menggunakan transformator tipe shell dan terdiri dari 3 pasang kumparan primer-sekunder pada setiap kakinya.



**Gambar 9.1** 3 transformator satu fasa dikoneksikan AC 3 fasa.



**Gambar 9.2** Transformator 3 fasa dengan tipe shell.

Transformator 3 fasa ini dapat dikoneksikan secara:

1. Wye-Wye
2. Wye-Delta



3. Delta-Wye
4. Delta-Delta

### 9.1.1 Hubungan Wye-wye (Y-Y)

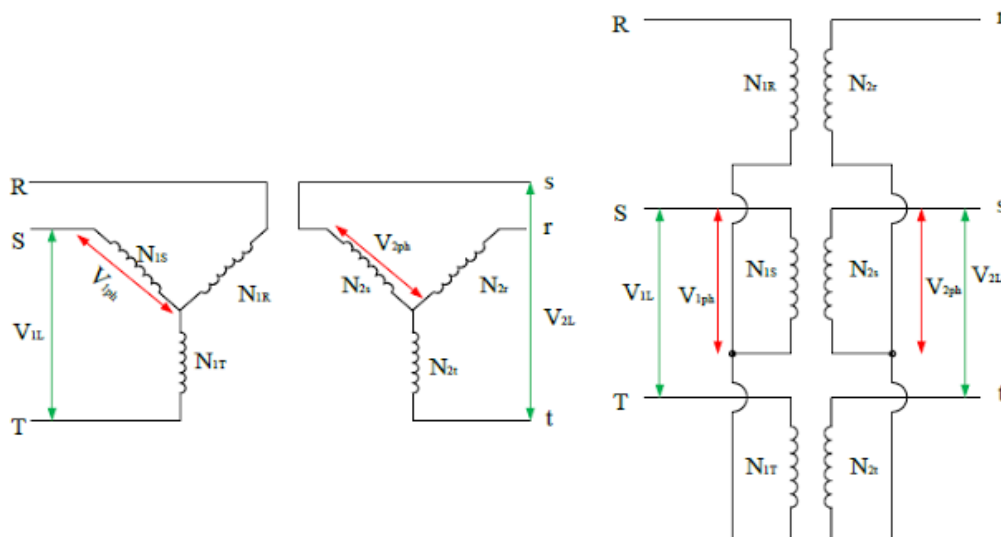
Pada hubungan bintang-bintang, rasio tegangan fasa-fasa (L-L) pada primer dan sekunder adalah sama dengan rasio setiap trafo. Sehingga, terjadi pergeseran fasa sebesar  $30^\circ$  antara tegangan fasa-netral (L-N) dan tegangan fasa-fasa (L-L) pada sisi primer dan sekundernya.

Hubungan bintang-bintang ini akan sangat baik hanya jika pada kondisi beban seimbang. Karena, pada kondisi beban seimbang menyebabkan arus netral ( $I_N$ ) akan sama dengan nol. Dan apabila terjadi kondisi tidak seimbang maka akan ada arus netral yang kemudian dapat menyebabkan timbulnya rugi-rugi.

$$V_{Pp} = \frac{V_{Lp}}{\sqrt{3}}$$

Tegangan fasa primer sebanding dengan tegangan fasa sekunder dan perbandingan belitan transformator maka, perbandingan antara tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan Y-Y adalah:

$$\frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{\sqrt{3}V_{Pp}}{\sqrt{3}V_{Ps}} = a$$

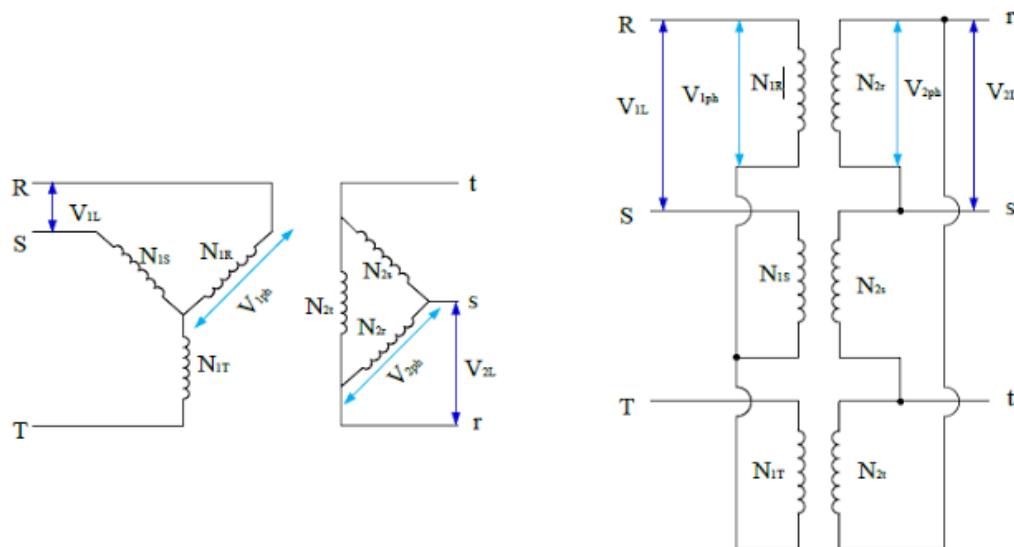


Gambar 9.3 Transformator 3 fasa hubungan Y-Y.

### 9.1.2 Hubungan Wye-delta (Y-Δ)

Transformator hubungan Y-Δ, digunakan pada saluran transmisi sebagai penaik tegangan. Rasio antara sekunder dan primer tegangan fasa-fasa adalah  $1/\sqrt{3}$  kali rasio setiap trafo. Terjadi sudut  $30^\circ$  antara tegangan fasa-fasa antara primer dan sekunder yang berarti bahwa trafo Y-Δ tidak bisa diparalelkan dengan trafo Y-Y atau trafo Δ-Δ. Pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat primer sebanding dengan tegangan fasa primer ( $V_{Lp} = \sqrt{3}V_{Pp}$ ), dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fasa ( $V_{Ls} = V_{Ps}$ ), sehingga diperoleh perbandingan tegangan pada hubungan Y-Δ adalah :

$$\frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{\sqrt{3}V_{Pp}}{V_{Ps}} = \sqrt{3}a$$

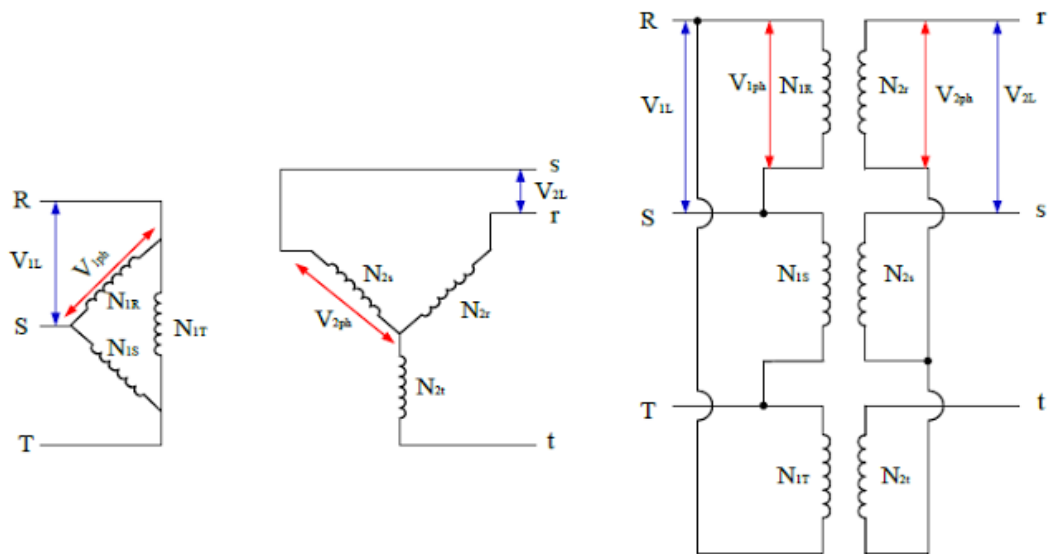


Gambar 9.4 Transformator 3 fasa hubungan Y-Δ.

### 9.1.3 Hubungan Delta-wye (Δ-Y)

Transformator hubungan Δ-Y, digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan transmisi ke tegangan rendah. Pada hubungan Δ-Y, tegangan kawat ke kawat primer sama dengan tegangan fasa primer ( $V_{Lp} = V_{Pp}$ ), dan tegangan sisi sekundernya ( $V_{Ls} = \sqrt{3}V_{Ps}$ ), maka perbandingan tegangan pada hubungan Δ-Y adalah:

$$\frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{V_{Pp}}{\sqrt{3}V_{Ps}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

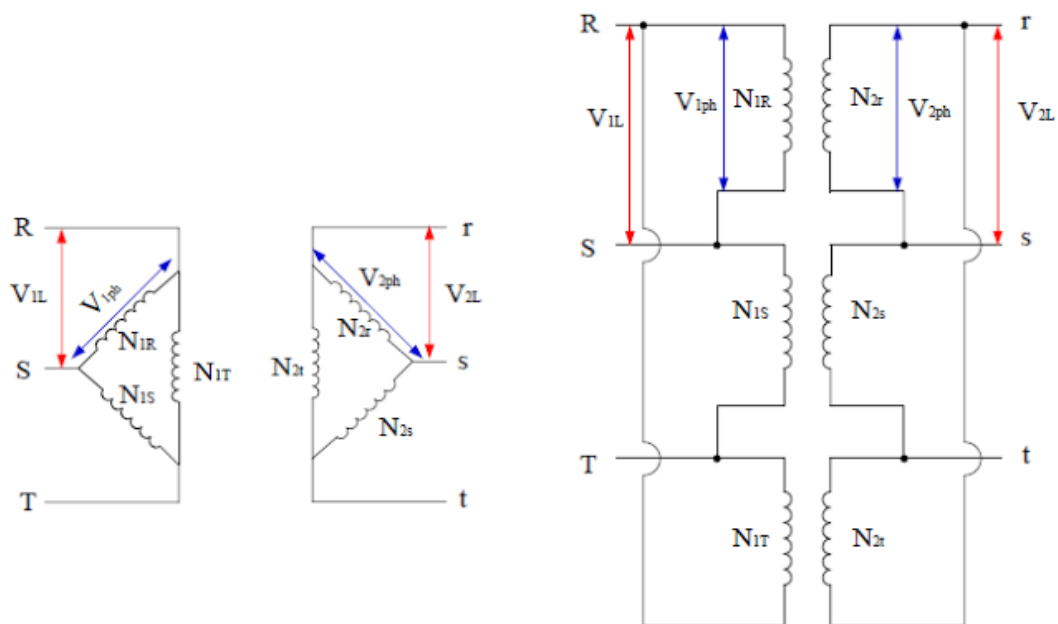


Gambar 9.5 Transformator 3 fase hubungan  $\Delta$ -Y.

#### 9.1.4 Hubungan Delta – delta ( $\Delta$ - $\Delta$ )

Pada transformator hubungan  $\Delta$ - $\Delta$ , tegangan kawat ke kawat dan tegangan phasa sama untuk sisi primer dan sekunder transformator ( $V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V_{LL}$ ), maka perbandingan tegangannya adalah:

$$\frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{V_{Pp}}{V_{Ps}} = a$$



Gambar 9.6 Transformator 3 fase hubungan  $\Delta$ -  $\Delta$ .

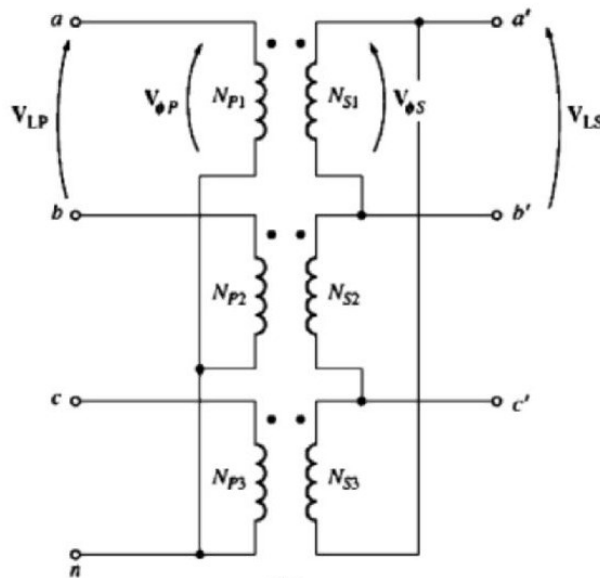
## 9.2 ALAT-ALAT YANG DIGUNAKAN

- 3 modul transformator
- 1 modul catu daya
- 3 modul AC ammeter (3/5 Aac)
- 3 modul AC voltmeter (0-250 Vac)
- 3 modul *variable resistance*
- Kabel penghubung

## 9.3 PERCOBAAN

### 9.3.1 Percobaan Hubung Wye-Delta

#### Rangkaian Percobaan



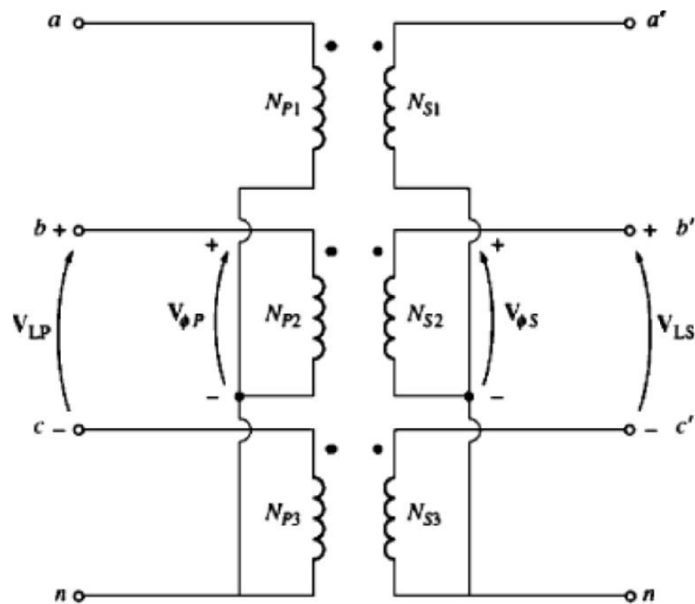
Gambar 9.7 Rangkaian transformator hubung Y-  $\Delta$ .

#### Langkah-Langkah Percobaan :

- Susun rangkaian sesuai rangkaian percobaan.
- Hidupkan catu daya.
- Catat tegangan pada kumparan primer yang terukur di voltmeter.
- Catat tegangan pada kumparan sekunder yang terukur di voltmeter.
- Matikan catu daya.

### 9.3.2 Percobaan Hubung Wye-Wye

#### Rangkaian Percobaan



Gambar 9.8 Rangkaian transformator hubung Y-Y.

#### Langkah-Langkah Percobaan :

- Susun rangkaian sesuai rangkaian percobaan.
- Pilih beban yang diinginkan dan catat nilai beban yang dipakai.
- Hidupkan catu daya.
- Ukur tegangan primer dan tegangan sekunder yang terbaca di voltmeter.
- Catat arus pada beban yang terukur di amperemeter, terdiri dari  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  dan  $I_n$ .



---

**MODUL X  
POST TEST**

Post test dan proyek praktikum Teknik Tenaga Listrik dilaksanakan pada tanggal 30 Oktober 2019. Detail dan ruangan akan diinfokan kemudian.