

15 DEC 1990

## KONTRIBUSI ANALISA PENGATURAN PUTARAN MOTOR SINKRON DENGAN INVERTER SUMBER ARUS KOMUTASI BEBAN

Oleh : *Yanuarsyah Haroen\**, *T.M. Soelaiman\*\**



### ABSTRACT

This paper is a contribution on the synchronous motor speed control by rectifier-inverter three-phase alternating current supply.

The synchronous motor speed control method is described as a direct current motor speed control method. Based on the analysis of the rectifier output voltage the equations of the synchronous motor speed control are derived.

Emphasis should be taken on the occurrence of the limitation of the forced commutation and natural commutation of the inverter since these limitations have implications on the dimensions and the weight of the equipment. Through the analysis of the relative positions of the line-to-neutral voltages and the inverter input currents, the limits of the forced commutation and natural commutation can be determined.

### SARI

Tulisan ini merupakan suatu kontribusi mengenai pengaturan putaran motor sinkron dengan sumber listrik arus bolak-balik 3 fasa, penyearah dan inverter.

Dalam pembahasan ditunjukkan bahwa konsep proses pengaturan motor sinkron adalah sama dengan proses pengaturan motor arus searah. Dari analisa tegangan keluar penyearah, dapat diturunkan persamaan yang berlaku untuk mengatur putaran motor sinkron.

Yang perlu diperhatikan adalah batasan terjadinya komutasi paksa dan komutasi natural inverter, karena hal ini mempunyai implikasi terhadap dimensi dan berat peralatan. Dengan menganalisa posisi relatif tegangan fasa-netral dan arus masuk inverter, dapat ditentukan batas komutasi paksa dan komutasi natural inverter.

\* Staf. L.P. Konversi Energi Elektrik – ITB

\*\* Ketua L.P. Konversi Energi Elektrik – ITB

## Pendahuluan

Penerapan motor arus bolak-balik sinkron atau asinkron sebagai sumber penggerak putaran variabel mulai dapat dilaksanakan secara ekonomis dengan ditemukannya komponen elektronik yang mempunyai kemampuan arus dan tegangan tinggi<sup>(3)</sup>.

Seperti diketahui motor sinkron (serempak) ataupun motor asinkron dapat digunakan untuk menghasilkan putaran variabel dengan menggunakan sistem kendali elektronika daya.

Analisa dalam tulisan ini dibuat berdasarkan jenis motor sinkron 3 fasa penguatan terpisah. Sumber listrik berasal dari sistem 3 fasa arus bolak-balik dan sistem elektronika daya yang diterapkan, yaitu penyearah dan inverter. Dengan menggunakan inverter motor, proses komutasi paksa hanya terjadi pada putaran yang sangat rendah, karena daya reaktif yang dibangkitkan motor belum cukup tinggi (5–10% putaran nominal)<sup>(2)</sup>. Selanjutnya, karena ggl motor sudah cukup besar, proses komutasi natural dapat dilaksanakan. Dengan komutasi paksa yang hanya terjadi pada putaran rendah, diperlihatkan bahwa sistem kendali elektronika daya menjadi lebih sederhana.

Tegangan keluar penyearah diratakan oleh suatu induktor (L). Adanya induktor perata ini mengakibatkan penyearah induktor dipertimbangkan sebagai sumber arus konstan yang konstanta waktunya relatif besar terhadap waktu komutasi antara *thyristor*.

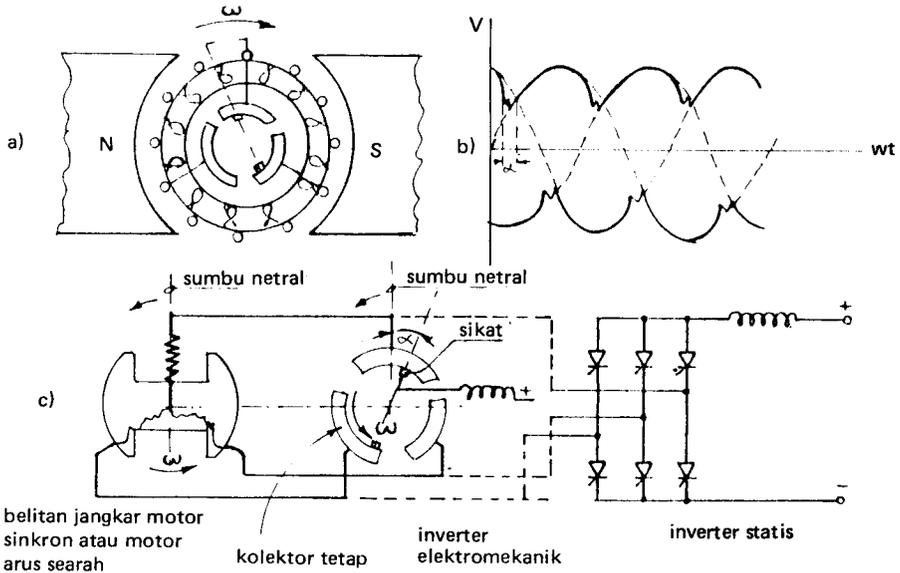
Karena itu inverter yang digunakan dapat disebut sebagai inverter sumber arus dengan komutasi beban. Dalam analisa selanjutnya pembahasan lebih ditekankan pada inverter, karena sistem penyearah sudah lama dikenal.

## Analogi motor sinkron dengan motor arus searah<sup>(5)</sup>

Suatu motor sinkron yang dicatu oleh inverter dapat dianalogikan sebagai motor arus searah dengan cara berikut:

Analisa dilakukan pada suatu motor sinkron 3 fasa yang dicatu oleh inverter. Belitan jangkar terdapat di stator dan belitan penguat di rotor. Andaikanlah motor arus searah mempunyai dua pasang sikat dan 3 lamel komutator (jangkar di rotor dan penguat di stator).

Inverter pada motor sinkron berfungsi mengubah energi arus searah menjadi arus bolak-balik ke dalam belitan jangkar stator, sedangkan pada motor arus searah, kolektor dan sikat mempunyai fungsi sama, dan dapat disebut sebagai inverter-elektromekanik.



**Gambar 1** Analogi motor sinkron dan motor arus searah.

Dengan analogi secara kualitatif ini, konsep pengaturan motor sinkron dapat dianggap sama dengan pengaturan putaran motor arus searah, yaitu:

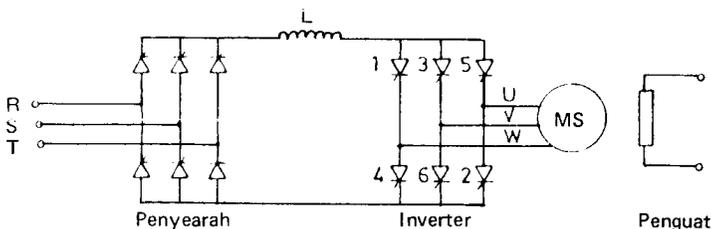
- putaran sebanding dengan tegangan dan arus jangkar;
- putaran berbanding dengan fluksi penguatan.

**Prinsip kerja pengaturan putaran motor sinkron**

Untuk menghasilkan gaya elektro magnetik, motor listrik membutuhkan fluksi dan arus jangkar.

Putaran motor sinkron ditentukan oleh frekuensi sumber listrik di stator. Bila frekuensi konstan, putaran yang dihasilkan akan konstan (kecepatan sinkron). Untuk mendapatkan putaran variabel, stator harus dicatu oleh sumber listrik dengan frekuensi berubah.

Pada sumber listrik 3 fasa bolak-balik, persoalan ini dapat diselesaikan dengan menggunakan penyearah terkendali dan inverter.



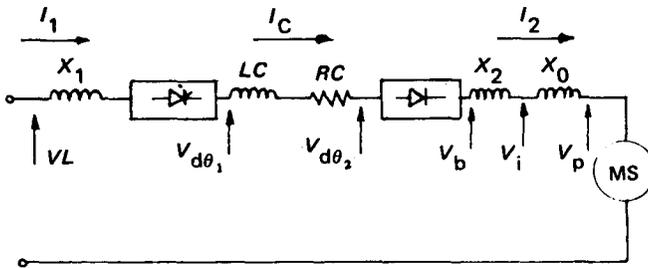
**Gambar 2** Skema prinsip penyearah inverter.

Jika motor sinkron bekerja sebagai generator, maka penyearah akan berfungsi sebagai inverter sedangkan inverter berfungsi sebagai *rectifier*. Inverter mengkomutasikan arus searah secara periodik pada tiap fasa motor sehingga dihasilkan arus listrik tiga fasa frekuensi berubah dengan perbedaan sudut  $120^\circ$ .

Untuk mempermudah analisa diambil hipotesa:

- hambatan (resistans) motor sinkron diabaikan;
- resistans sumber listrik diabaikan;
- induktor perata infinit dan mempunyai resistans  $R_c$ .

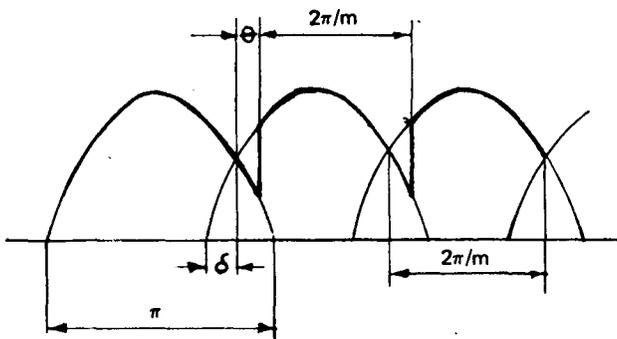
Jadi, rangkaian ekuivalen sistem kendali dan motor sinkron dapat dilukiskan sebagai berikut :



**Gambar 3** Rangkaian ekuivalen penyearah motor sinkron.

### Tegangan keluar rata-rata penyearah ( $V_{d\theta_1}$ )

Untuk menghitung tegangan keluar penyearah, ditinjau hasil penyearah  $m$  fasa  $\frac{1}{2}$  gelombang.



**Gambar 4** Tegangan keluar penyearah  $\frac{1}{2}$  gelombang  $m$  fasa

Dari gambar 4 diperoleh  $Vd\theta_1 = \frac{1}{T} \int_0^T V dt$

atau

$$Vd\theta_1 = \frac{m}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_1 + \frac{2\pi}{m}} V_m \sin \omega t d(\omega t)$$

karena  $\delta = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$

Jadi batas integrasi menjadi :

batas bawah =  $\theta_1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$

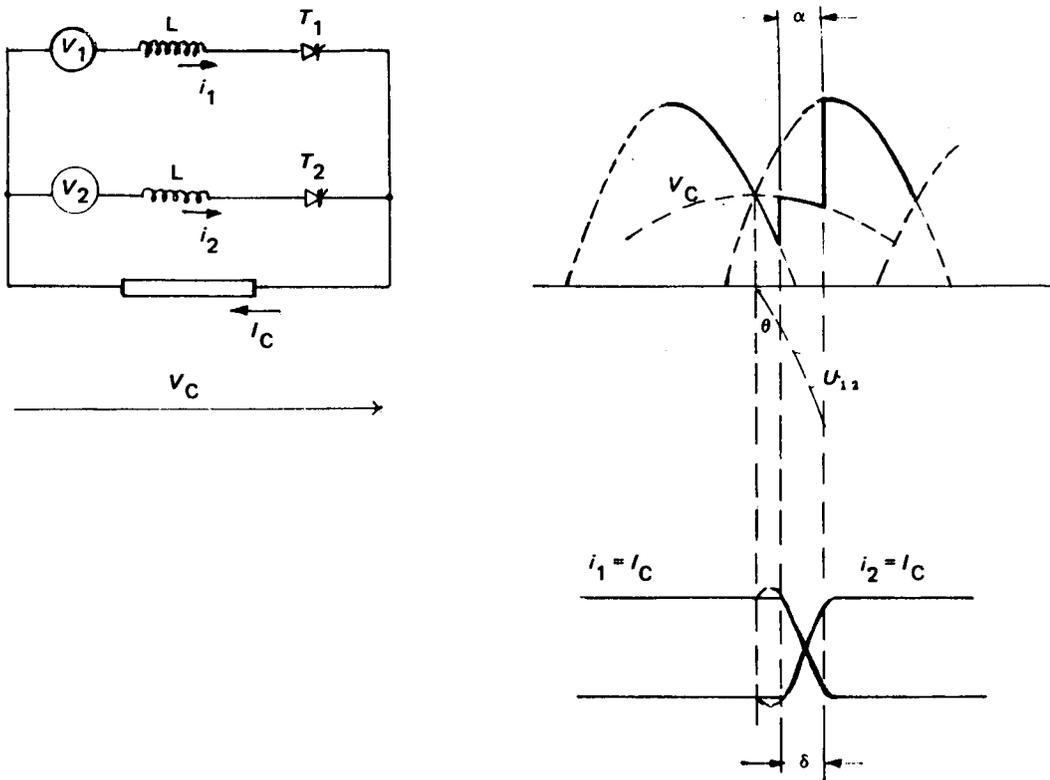
atas =  $\theta_1 + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}$

$$Vd\theta_1 = \frac{m}{2\pi} \int_{\theta_1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}}^{\theta_1 + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}} V_m \sin \omega t d(\omega t)$$

$$\begin{aligned} Vd\theta_1 &= \frac{m}{2\pi} \left[ -V_m \cos \omega t \right]_{\theta_1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}}^{\theta_1 + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}} \\ &= \frac{m}{2\pi} V_m \left( -\cos \left( \theta_1 + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} \right) + \cos \left( \theta_1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \right) \right) \\ &= \frac{m}{2\pi} V_m \left\{ -\left( \cos \theta_1 \cos \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} \right) - \sin \theta_1 \sin \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} \right) \right) \right. \\ &\quad \left. + \left( \cos \theta_1 \cos \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \right) - \sin \theta_1 \sin \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \right) \right) \right\} \\ &= \frac{m}{2\pi} V_m \left\{ -\left( -\cos \theta_1 \sin \frac{\pi}{m} - \sin \theta_1 \cos \frac{\pi}{m} \right) + \right. \\ &\quad \left. \left( \cos \theta_1 \sin \frac{\pi}{m} - \sin \theta_1 \cos \frac{\pi}{m} \right) \right\} \end{aligned}$$

$V$  rata-rata penyearah  $m$  fasa gelombang penuh :

$$V_{\text{rata-rata}} = 2 V_m \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \theta_1$$

Tegangan jatuh rata-rata komutasi antar thyristor <sup>(5)</sup>

Gambar 5 Komutasi penyearah.

Analisa dilakukan dengan menganggap induktansi bersama diabaikan.

Jumlah arus selama komutasi :  $i_1 + i_2 = I_C$ .

$$\begin{cases}
 V_1 = L \frac{di_1}{dt} + V_c \\
 V_2 = L \frac{di_2}{dt} + V_c
 \end{cases}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 V_c = \frac{V_1 + V_2}{2} - \frac{L}{2} \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right), \text{ dengan pendekatan;} \\
 V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}
 \end{array}
 \right.$$

$$L \frac{di_1}{dt} = V_1 - V_c = V_1 - \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{V_1 - V_2}{2}$$

$$\text{Jadi, } \left[ L \frac{di_1}{dt} = \frac{V_{12}}{2} \right], \left[ L \frac{di_2}{dt} = \frac{V_{21}}{2} \right] = \frac{V_{12}}{2}$$

$$V_{rata-rata} = \frac{m}{2\pi} \int_{\theta}^{\theta+\alpha} \left( V_2 - \frac{V_1 + V_2}{2} \right) d(\omega t) = \frac{m}{2} \int_{\theta}^{\theta+\alpha} L \frac{di_2}{d\omega t} d(\omega t)$$

$$V_{rata-rata} = \frac{mL}{2\pi} \int_{\theta}^{\theta+\alpha} di_2 = \frac{m L I_c}{2\pi} = \frac{m X_1 I_c}{2\pi}$$

Jadi, tegangan keluar penyearah/inverter dapat dinyatakan oleh persamaan:

$$V_{d\theta_1} = 2 V_m \frac{m}{\pi} \sin \frac{m}{\pi} \cdot \cos \theta_{1(2)} \mp \frac{m}{\pi} L I_c \tag{1}$$

dengan

$V_m$  = tegangan maksimum fasa netral sumber listrik

$V_L$  = tegangan efektif fasa netral sumber listrik

$\theta$  = sudut kelambatan penyalan *thyristor* penyearah

$V_{d\theta_1}$  = tegangan keluar penyearah

$m$  = indeks pulsasi = 3

$\frac{m}{\pi} X_1 I_c$  = tegangan jatuh akibat komutasi antar *thyristor* penyearah

+ = inverter

- = *rectifier* (penyearah)

Dengan  $m = 3$ , maka tegangan keluar penyearah:

$$V_{d\theta_1} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V \cos \theta_1 - \frac{3}{\pi} X_1 I_c \tag{2}$$

Motor sinkron dilalui arus  $I_2$  dengan arus fundamental efektif ( $I_{2ef}$ ) mendahului terhadap ggl lawan motor. Arus yang mendahului tegangan dijaga konstan agar proses komutasi natural dapat berlangsung. Hal ini dilaksanakan dengan kendali inverter (dijelaskan pada proses pembangkitan kopel motor).

Tegangan masuk motor adalah

$$V_i = V_p - j\omega X_0 I_{2eff} \tag{3}$$

dengan

$V_p$  = ggl lawan motor

$X_0$  = reaktansi jangkar total

Sudut fasa antara  $V_2$  dan  $I_{2\text{ef}}$  adalah:

$$\psi = -\left(\theta_2 + \frac{\alpha}{2}\right). \quad (4)$$

dengan  $\theta_2$  = sudut kelambatan penyalaan *thyristor* inverter

$\alpha$  = sudut komutasi

Jadi, tegangan masuk inverter:

$$Vd\theta_2 = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_i \cos \theta_2 + \frac{3}{\pi} X_2 I_c. \quad (5)$$

dengan  $X_2$ : adalah reaktansi subtransient motor sinkron.

$$\text{Dalam keadaan tunak (stabil), } Vd\theta_1 = Vd\theta_2 + R_c I_c. \quad (6)$$

$$Vd\theta_1 - Vd\theta_2 = R_c I_c. \quad (7)$$

Dengan mengatur sudut penyalaan  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  maka besar arus  $I_c$  dapat berubah.

Persamaan kopel motor sinkron dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$T = k \cdot \phi_r I_a. \quad (8)$$

dengan

$T$  = kopel motor

$k$  = konstanta motor

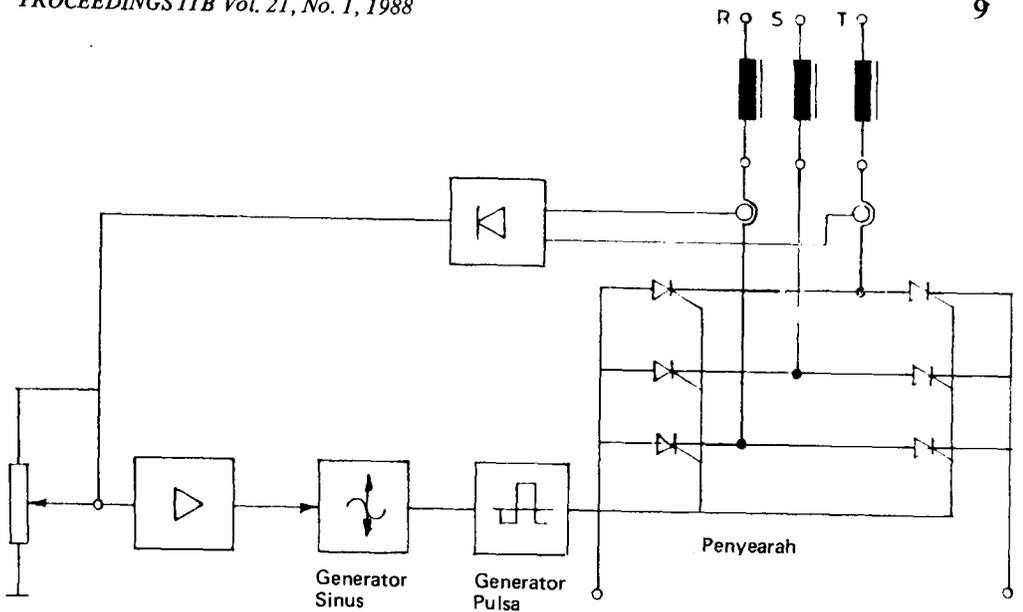
$I_a$  = arus jangkar motor

$\phi_r$  = fluksi rotor

Dengan mengubah  $\theta$  (sudut kelambatan penyalaan) maka secara implisit arus jangkar berubah, yang berarti putaran dapat berubah. Aspek perubahan putaran akan menjadi lebih luas jika  $\phi_r$  (fluksi) juga diatur.

### Pengendalian penyearah <sup>(1)</sup>

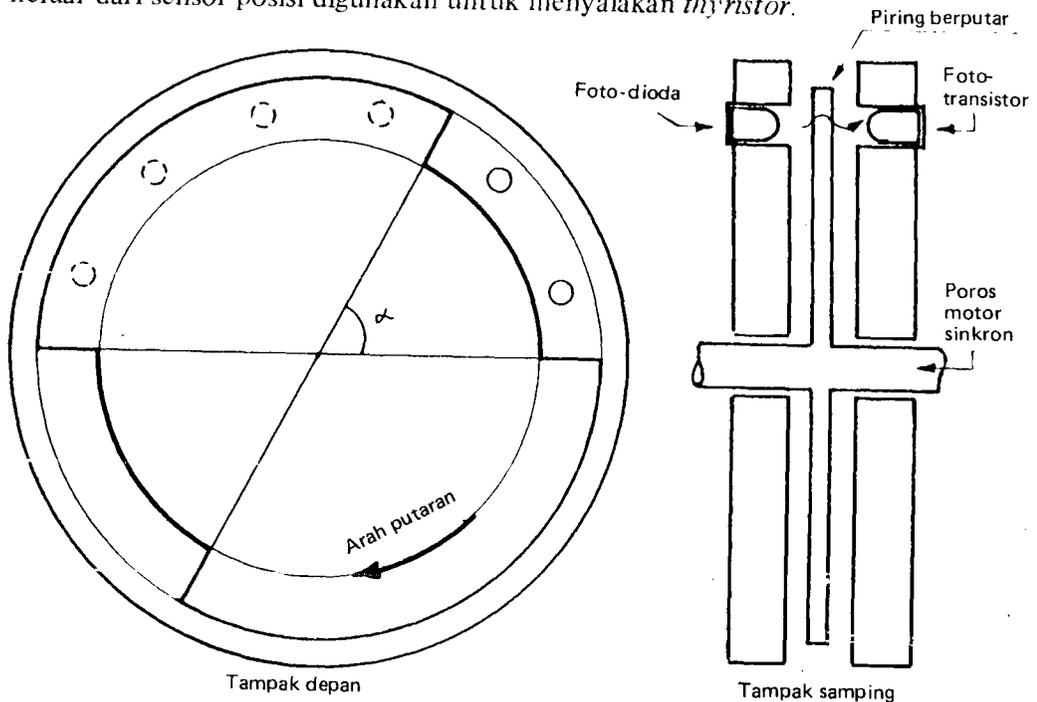
Pengendalian penyearah dilaksanakan oleh sistem generator pulsa yang blok diagramnya ditunjukkan pada gambar 6.



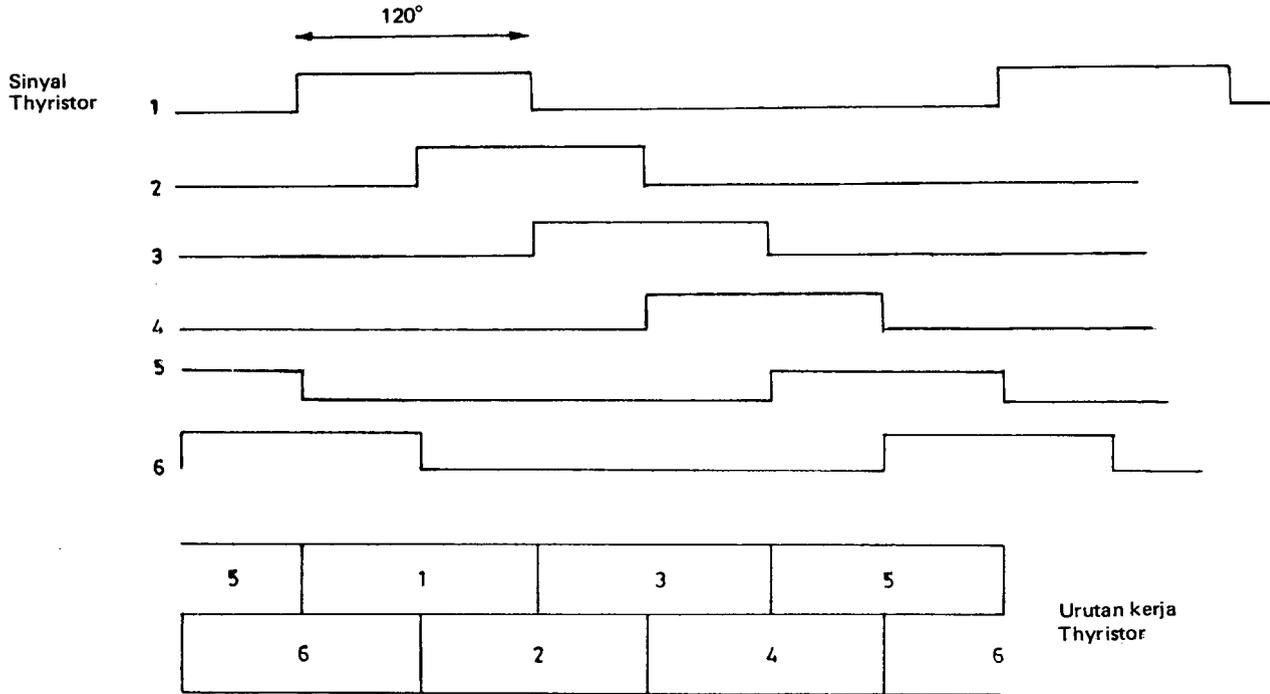
Gambar 6 Blok diagram pengendalian *thyristor* penyearah.

**Pengendalian inverter**

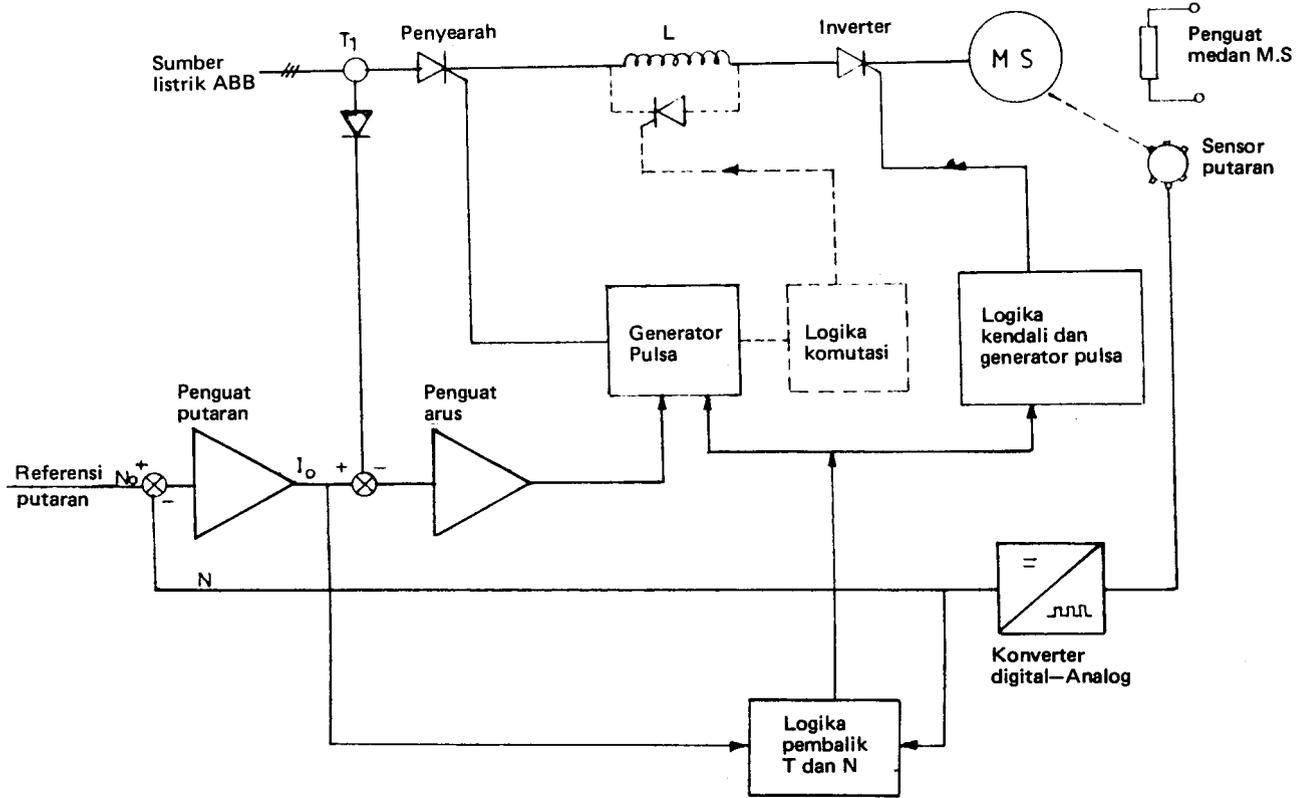
Pengendalian inverter dilaksanakan dengan suatu sistem di mana sinyal yang keluar dari sensor posisi digunakan untuk menyalakan *thyristor*.



Gambar 7 Sensor posisi untuk menyalakan *thyristor*.



Gambar 8 Sinyal keluaran sensor putaran



Gambar 9 Blok diagram kendali motor sinkron.

Bila piringan sensor berputar sesuai dengan arah yang ditunjukkan pada gambar, akan dikeluarkan urutan sinyal kendali *thyristor* inverter seperti ditunjukkan pada gambar 8.

Jika untuk menyalakan *thyristor* yang akan dikendalikan, dibutuhkan arus yang lebih besar dari arus fototransistor, maka arus dari fototransistor harus diperkuat dahulu dengan menggunakan transistor atau penguat operasional.

Sinoptik blok diagram pengendalian lengkap dapat dilukiskan sebagai mana tampak pada gambar 9.

### Pembangkitan kopel motor sinkron <sup>(4)</sup>

#### Hipotesa :

##### *Stator :*

Untuk mempermudah analisa diambil motor sinkron yang statornya terdiri dari 3 belitan tunggal, masing-masing berbeda  $120^\circ$ . Stator ini dicatu oleh sumber arus searah.

##### *Rotor :*

Bentuk rotor adalah kutub nonsalient (celah udara tidak sama rata) dan dicatu oleh sumber arus searah melalui sikat dan cincin.

### Analisa pembangkitan kopel

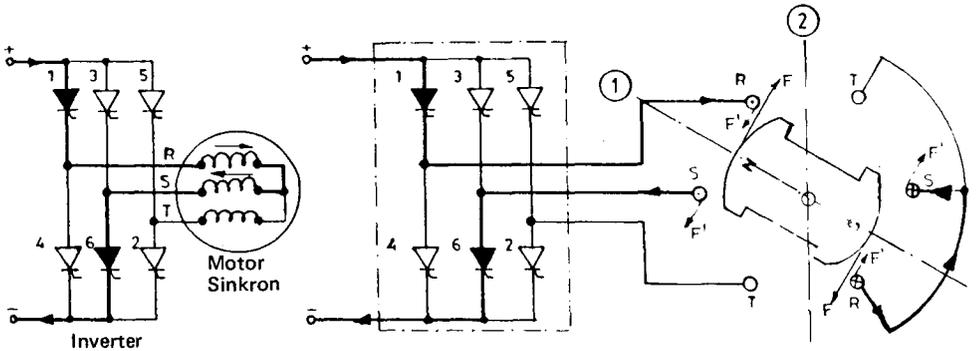
Untuk membangkitkan kopel motor sinkron diperlukan penyalan *thyristor inverter* dengan urutan 1-3-5-4-6-2 (masing-masing berbeda  $120^\circ$ ). Pembangkitan kopel dilakukan dalam enam tahap.

- ⊙ arah arus keluar yang disebabkan ggl lawan motor sinkron.
- ⊗ arah arus masuk yang disebabkan ggl lawan motor sinkron.

#### *Tahap 1*

Misalkan *thyristor* 1 dan 6 dinyalakan, motor belum berputar dan rotor berada pada posisi 1. Arus 1 akan lewat Th 1-fasa R-fasa 5 dan Th 6, sedangkan fasa T tidak dilalui arus. Sesuai dengan hukum tangan kiri Fleming, rotor akan mendapat gaya F dan stator gaya F' dengan arah berlawanan terhadap F.

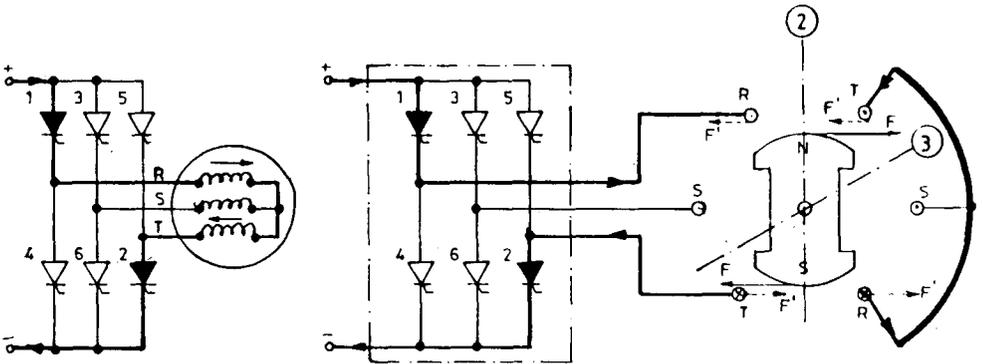
Batang konduktor di stator tidak dapat bergerak, sedangkan rotor cenderung berputar sehingga menghasilkan kopel motor. Dengan mengatur sudut kelambatan penyalan  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  maka kopel motor dapat melampaui kopel beban sehingga rotor berputar untuk menduduki posisi 2.



Gambar 10 Pembangkitan kopel pada tahap 1

Tahap 2

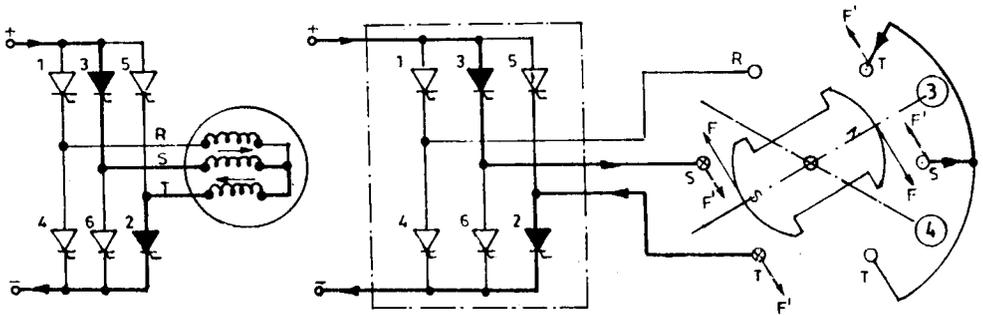
Ketika rotor sedang berputar, Th 2 dinyalakan dan Th 6 dimatikan (komutasi natural Th 6 ke Th 2 karena tegangan pada Th 2 lebih positif terhadap Th 6). Fasa R dan T dialiri arus seperti ditunjukkan pada gambar 11. Rotor kontinu berputar untuk menduduki posisi 3.



Gambar 11 Pembangkitan kopel pada tahap 2.

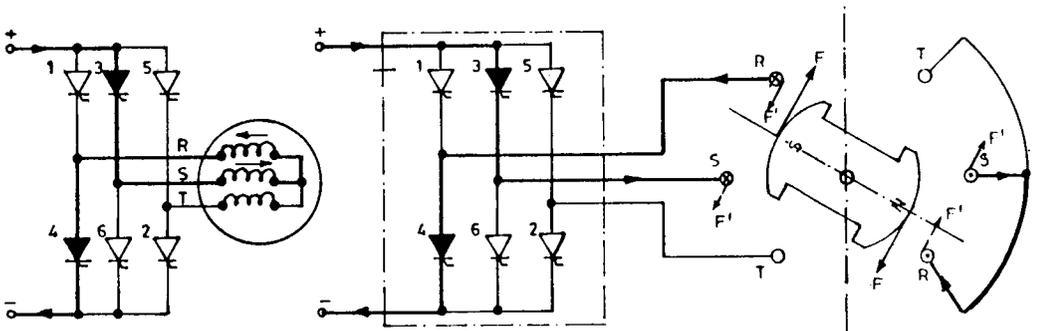
Tahap 3

Pada tahap ini Th 1 dimatikan dan Th 3 dinyalakan. Fasa T dan S dialiri arus, dan rotor bergerak untuk menempati posisi 4.

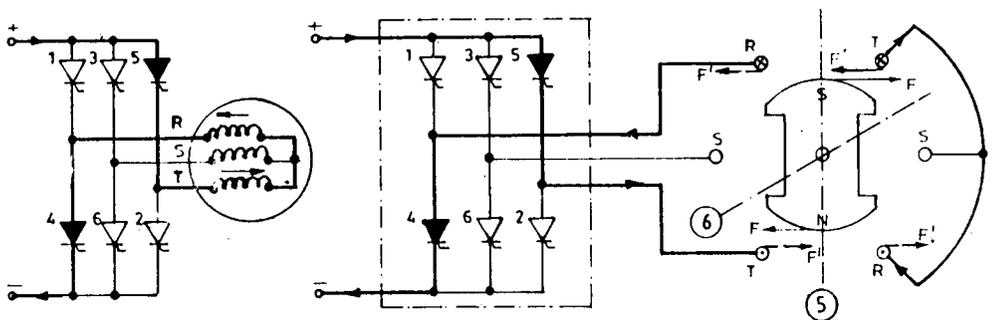


Gambar 12 Pembangkitan kopel tahap 3.

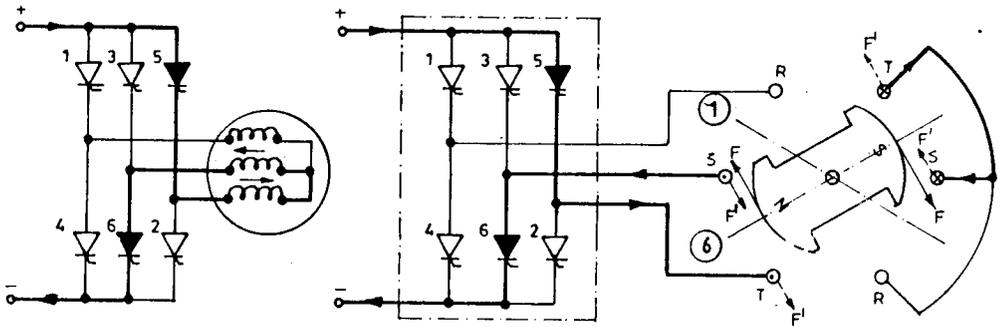
Gambar 13,14, dan 16 menunjukkan distribusi arus fasa di stator pada tahap 4, 5, dan 6 sehingga rotor membuat satu putaran lengkap.



Gambar 13 Pembangkitan kopel tahap 4.

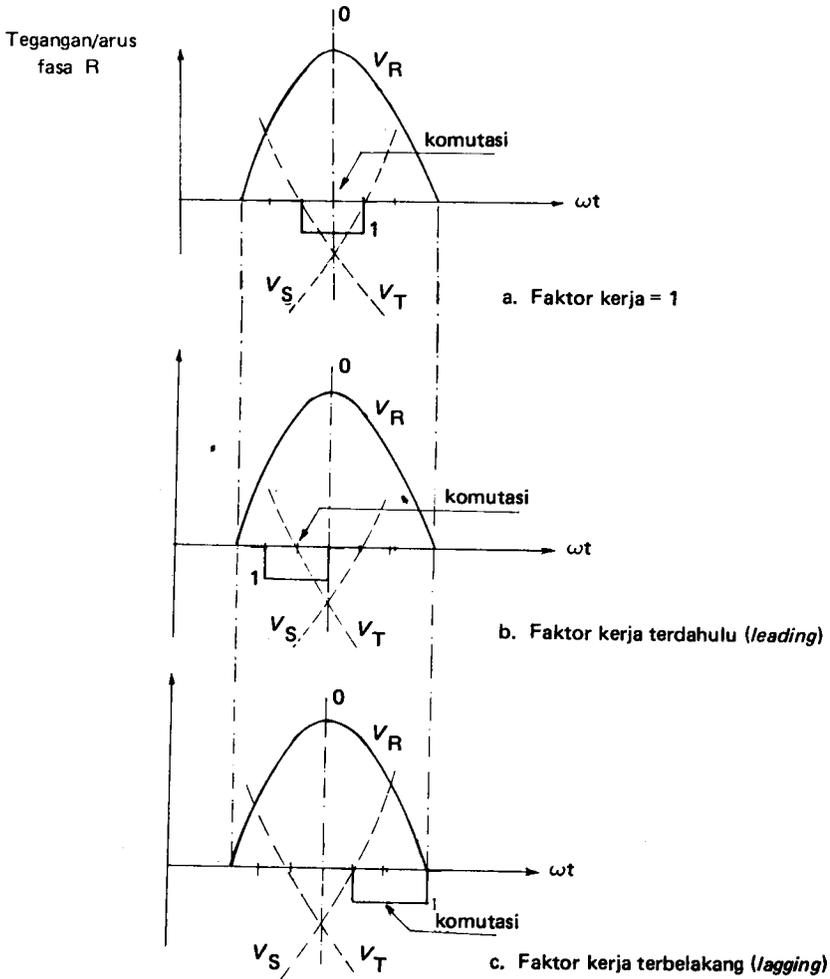


Gambar 14 Pembangkitan kopel tahap 5.



Gambar 15 Pembangkitan kopel tahap 6

Proses komutasi beban secara natural



Gambar 16 Posisi relatif arus pada fasa R

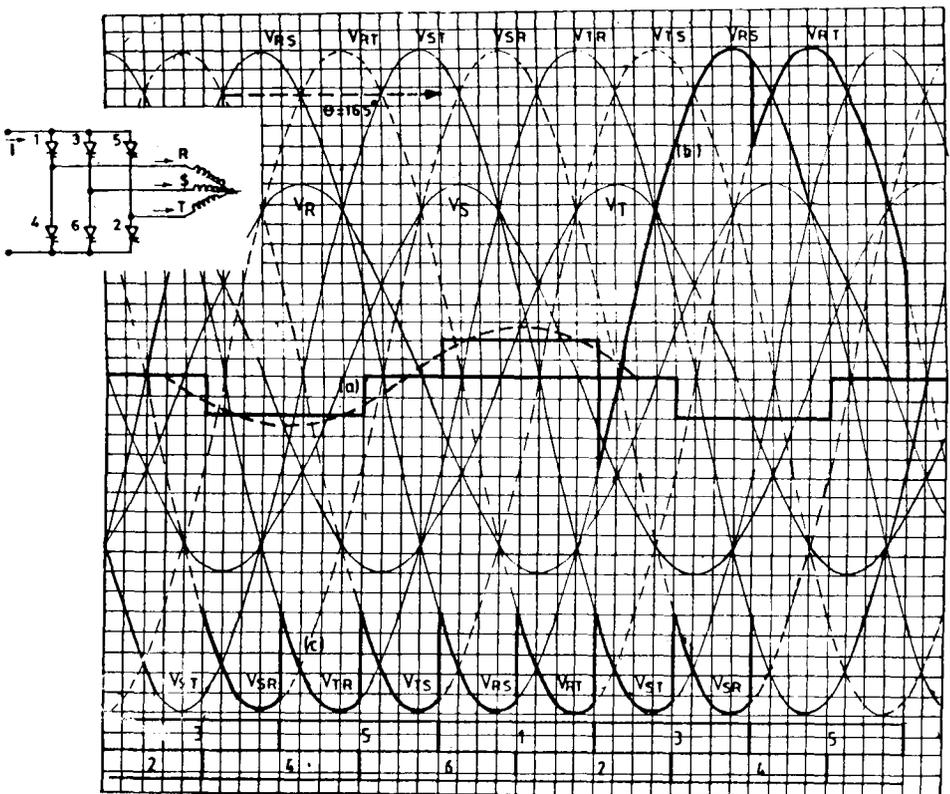
Gambar 16 (fasa R) menunjukkan 3 kemungkinan posisi relatif yang penting dari arus dan tegangan. Analisa komutasi dilakukan pada saat *thyristor* mulai dapat bekerja.

Pada gambar 16.a motor sinkron bekerja dengan faktor kerja = 1;  $V_s = V_T$ .

Kondisi awal, arus mengalir dari sumber arus searah Th 3—fasa S—Th 4 fasa R. Kemudian, Th 5 dinyatakan, maka arus mengalir dari sumber AS—Th 5 fasa T—Th 4—fasa R. Komutasi arus terjadi secara natural dari fasa S ke fasa T karena (lihat gambar 16.a)  $V_s = V_T$  dan merupakan batasan di mana komutasi natural dapat berlangsung.

Pada gambar 16.b arus mendahului tegangan, komutasi arus secara natural dapat berlangsung karena  $V_s$  relatif lebih positif terhadap  $V_T$ .

Pada gambar 16.c arus terbelakang terhadap tegangan, sedangkan tegangan fasa T lebih positif terhadap fasa R sehingga komutasi beban secara natural tidak dapat berlangsung.



**Gambar 17** a. Arus motor sinkron (fasa R) hubung bintang (Y)  
 b. Tegangan pada *thyristor* 1  
 c. Tegangan keluar inverter

Pada gambar 17 ditunjukkan secara lengkap arus, tegangan motor, dan tegangan pada Th 1 ketika terjadi proses komutasi di fasa R.

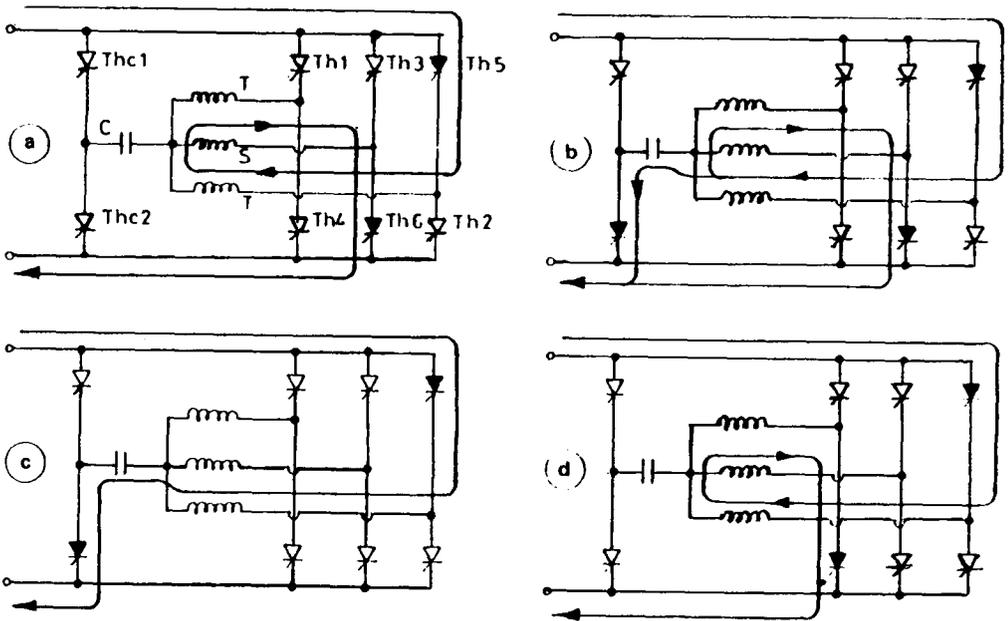
**Proses komutasi paksa**

Teknologi komutasi paksa adalah relevan jika digunakan *thyristor* sebagai komponen utama dalam teknik elektronika daya. Komutasi paksa pada inverter dengan motor sinkron terjadi pada putaran motor yang relatif rendah. Karena itu dimensi induktor kapasitor dan *thyristor* tidak terlalu besar (2,3).

Tiga macam metoda Teknik Komutasi yang dapat digunakan untuk tujuan ini adalah:

1. Komutasi paksa melalui netral mesin.

Pada gambar 18 ditunjukkan urutan proses komutasi paksa yang terjadi.



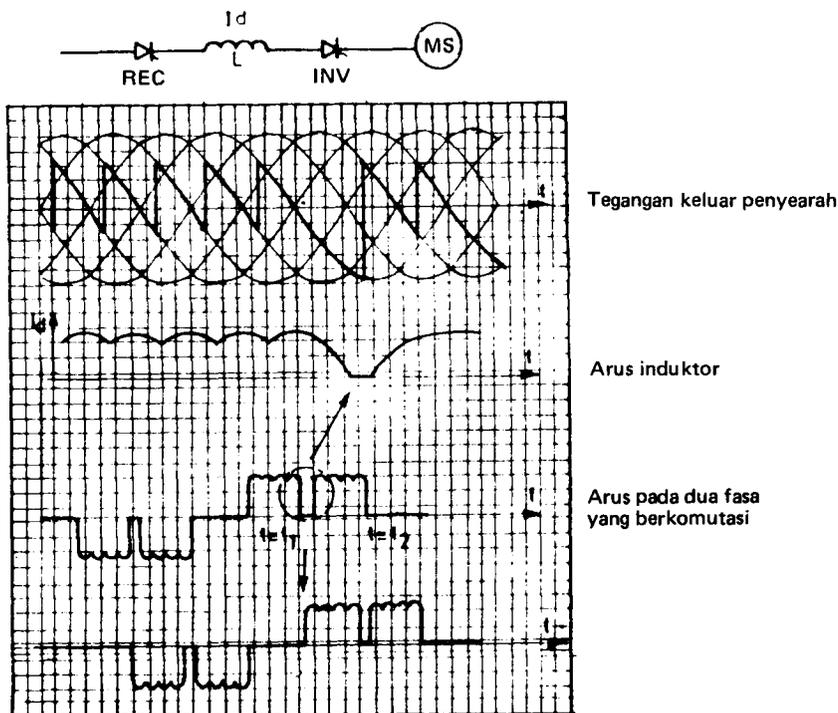
**Gambar 18** Komutasi paksa dengan *thyristor* pada netral motor.

Th  $C_1$ , Th  $C_2$  dan kondensator  $C$  dipasang pada netral motor sinkron.

Pada gambar 18.a ditunjukkan jalan arus sebelum proses komutasi. Kemudian Th  $C_2$  dinyalakan, terjadi perpindahan arus dari fasa R ke C dan Th  $C_2$  (gambar 18.b). Setelah kondensator  $C$  penuh, arus akan mengalir melalui fasa R dan Th  $C_2$  (gambar 18.c). Setelah  $C$  penuh, arus akan mengalir melalui fasa R dan S.

Untuk mendapatkan kembali proses yang sama, polaritas kondensator C harus dibalik dengan penyalan Th  $C_1$ .

2. Komutasi dengan mempergunakan penyearah yang bekerja sebagai inverter.

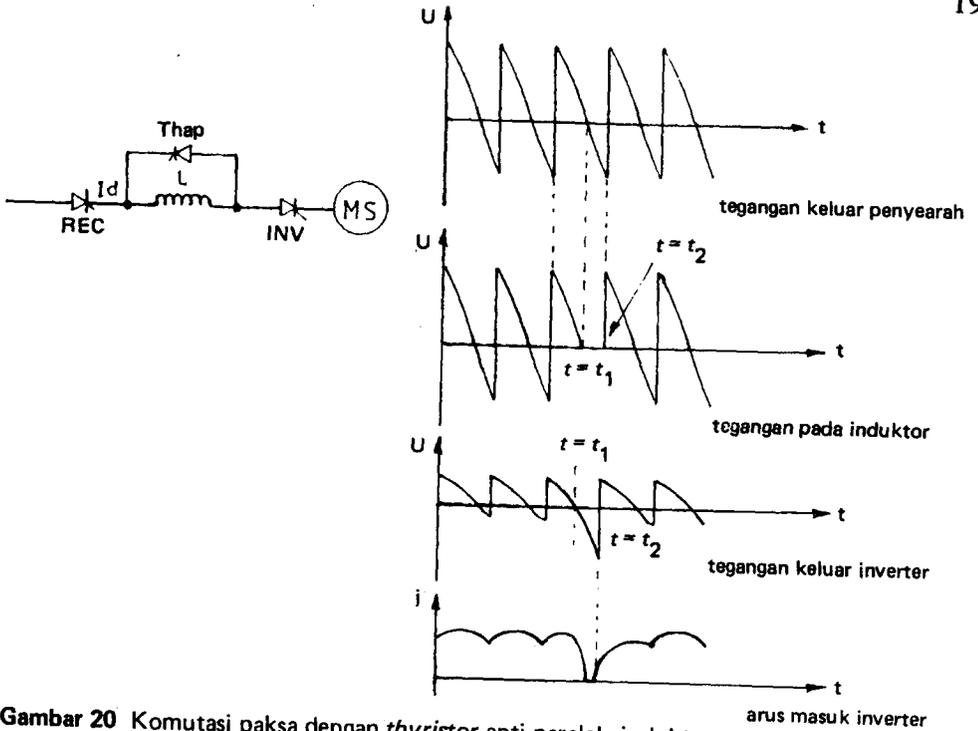


Gambar 19 Komutasi paksa dengan penyearah yang bekerja sebagai inverter

Pada saat  $t = t_1$ , yaitu ketika tegangan sesaat sumber sama dengan nol (yang merupakan batas kerja penyearah  $\theta = 90^\circ$ ), thyristor penyearah yang seharusnya dinyalakan belum dipekerjakan, sehingga penyearah akan bekerja sebagai inverter komutasi jala-jala. Setelah  $I_d$  menjadi nol (energi induktor telah habis), maka thyristor yang lain akan dinyalakan.

3. Thyristor anti paralel induktor perata.

Pada putaran rendah ketika  $t = t_1$ , Thap dinyalakan, dan terjadi sirkulasi arus induktor-Thap. Selama  $t_1 < t < t_2$  inverter akan mendapat tegangan negatif.



Gambar 20 Komutasi paksa dengan *thyristor* anti paralel-induktor.

**Kesimpulan**

Setelah ditunjukkan bahwa terdapat analogi antara inverter elektronis dan inverter elektromekanis, maka motor sinkron dapat diekuivalensikan sebagai suatu motor arus searah sehingga analisa pengaturan putarannya menjadi sederhana.

Dengan membuat analisa tegangan keluar suatu penyearah m fasa setengah gelombang, maka tegangan keluar inverter dapat dinyatakan.

Kendali putaran motor sinkron dilaksanakan dengan pengaturan sudut kelambatan  $\theta_1$  (penyearah) dan  $\theta_2$  (inverter).

Untuk menjaga kontinuitas kopel yang dibangkitkan, maka belitan stator dibuat berganda yang masing-masing dilayani oleh 2 unit inverter terpisah.

Ditunjukkan bahwa komutasi kritis terjadi pada faktor kerja = 1 dan analisa komutasi paksa menunjukkan bahwa proses berlangsung lebih mudah dengan komutasi paksa cara pertama. Penyederhanaan komutasi paksa cara pertama dapat dilakukan dengan mensubstitusi C dan Th  $C_2$  dengan GTO atau transistor daya serta menghilangkan Th  $C_1$ .

Thyristor standar digunakan untuk mengatur putaran motor-sinkron karena komponen ini mudah didapat dan relatif murah dibandingkan GTO *thyristor* atau transistor daya untuk kapasitas yang sama.

**DAFTAR PUSTAKA**

1. LUC, S. B. ESCAUT, H. FOCH, Travaux Pratiques 3<sup>em</sup>e Année Machines Électriques et d'électronique Industrielle ENSEEIHT INP toulouse. Edition, 1978.
2. CHAUPRADE, R. Commande Électronique des moteurs a Courant Alternatif Edition Eyrolles, 1980.
3. SNCF, Note d'information technique à l'usage des CTRA, Le moteur Synchrone Auto pilote SNCF, 7 Juillet 1983.
4. TRANNOY, B. Transitoire des machines électriques Note de Course DEA-ENSEEIHT-France, 1980.
5. METAUT, D Synchronous dual-current locomotives and their development-MIE Jeumont Schneider group France. American Rail Way Engineering, Association's Modern Rail Conference, October 1986.