

Gambar 2.10. Karakteristik motor induksi serempak

2.2.7. Proses peralihan pada motor induksi

Pada waktu motor dihubungkan ke jala-jala arus dan torsi yang dibangkitkan akan mengalami peralihan sebelum mencapai *steady statenya* (kondisi mantap). Demikian juga dengan energi magnetik yang dibangkitkan, energi kinetik yang berupa putaran motor, kerugian-kerugian yang ada didalam mesin dan energi yang diberikan ke beban juga akan berubah sebelum mencapai *steady statenya*. Kecepatan proses perubahan energi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor misalnya kecepatan inti menjadi jenuh, efek kulit dari konduktor, perubahan mekanis dari motor seperti poros, bearing dan konstruksi mesin serta cepatnya perubahan torsi yang dihasilkan oleh mesin yang diberikan beban.

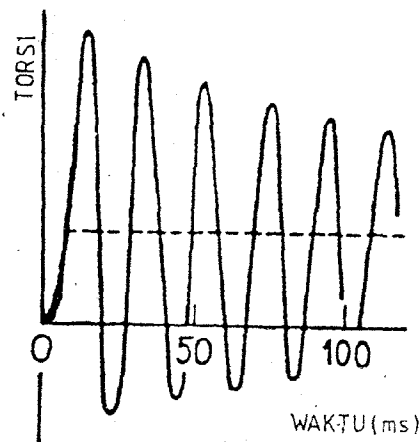
Interval perbedaan antara kondisi awal sampai *steady state* dari putaran yang dihasilkan dan yang diberikan beban, dihubungkan oleh peralihan arus dan fluksi dimana keduanya berlangsung seketika dan kemudian berkurang secara eksponensial menuju kondisi normalnya. Waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi normal ditentukan oleh parameter yang terdiri atas konstanta waktu dari rangkaian listriknya dan kecepatan putaran mesin pada saat itu. Proses-proses perubahan perubahan energi diatas disebut *switching*.

Proses peralihan juga terjadi ketika motor yang berputar dalam *steady statenya* mengalami perubahan secara tiba-tiba yang disebut *reswitching*. Sebagai contoh ketika motor sedang berputar tiba-tiba beban berubah atau tegangan diputus dan beberapa saat kemudian disambung lagi dalam periode yang cepat, kejadian ini akan menimbulkan proses peralihan arus yang mengalir dan torsi yang dibangkitkan. Proses peralihan juga karena hal-hal yang sederhana misalnya pada saat pengereman, pemutusan tegangan tetapi pada terminal motor terdapat kapasitor, perubahan hubungan lilitan stator pada waktu motor di *start* dengan saklar bintang segitiga dan lain-lain. Untuk motor induksi dengan daya yang besar ketika *switching*, *reswitching* atau tegangan pensuplai berubah, proses-proses peralihannya akan mempengaruhi tegangan dan kestabilan sistem secara keseluruhan.

2.2.8. Peralihan pada proses *switching*

Pada proses *switching*, peralihan dimulai ketika fase pertama tersambung ke motor yang diikuti oleh tertundanya penutupan fase berikutnya. Permulaan dari torsi puncak diawali oleh fluksi yang ada didalam motor, apabila sebelumnya motor telah berputar. Dengan menganggap mesin dalam keadaan diam, proses ini akan memberikan suatu pola yang khas dari kurva torsi yang merupakan fungsi waktu pada suatu proses *switching*.

Kurva torsi pada waktu start yang terendam dalam arah bolak-balik diperlihatkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11. Kurva peralihan torsi fungsi waktu pada saat start

Suatu pendekatan untuk menentukan harga puncak torsi pada saat berlangsungnya starting adalah :

$$M_p = 1 + \sqrt{K(1 + \omega^2 \tau^2)} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana :

M_p = Torsi puncak yang dihasilkan

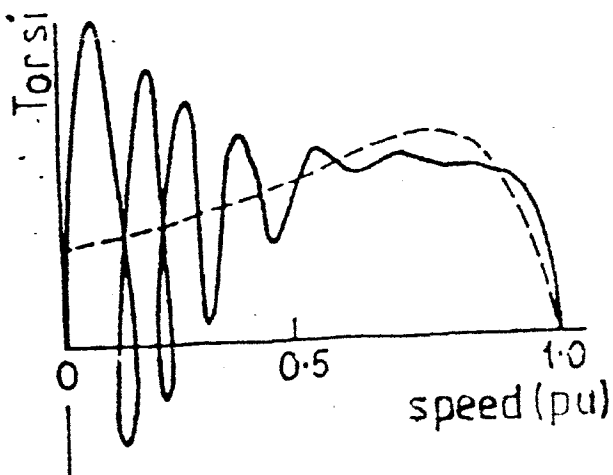
K = Suatu faktor penundaan yang digunakan antara penutupan fase pertama dengan fase berikutnya pada tegangan line tersebut.

$$\tau = \frac{(L_1 + L_2)}{(R_1 + R_2)} \dots\dots\dots (2.20)$$

= Konstanta waktu yang didapat dari harga reaktansi (L) dan resistansi (R) belitan stator maupun rotor.

ω = Kecepatan sudut yang besarnya sama dengan $2 \pi f$

Peralihan pada torsi yang dihasilkan untuk beberapa periode akan berlangsung mengikuti frekuensi dari tegangan sumber. Pada motor yang distart dengan pengasutan (motor dengan putaran rendah) atau motor dengan moment inertia beban yang besar, pengaruh peralihan torsi dapat diabaikan ketika kecepatan motor berubah sampai mencapai *steady statenya*. Untuk motor yang berputar dengan kecepatan tinggi, efek peralihan akan menghasilkan torsi kejut yang kuat sehingga efeknya tidak dapat diabaikan lagi. Kurva karakteristik peralihan torsi yang merupakan fungsi dari kecepatan motor diperlihatkan oleh gambar 2.12.



Gambar 2.12. Kurva peralihan torsi fungsi putaran waktu start

Kedua gambar kurva karakteristik tersebut adalah untuk motor yang mendapat sumber tegangan sinusoida. Bila motor mendapat sumber tegangan dari *thyristor* maka efeknya akan lebih kompleks.

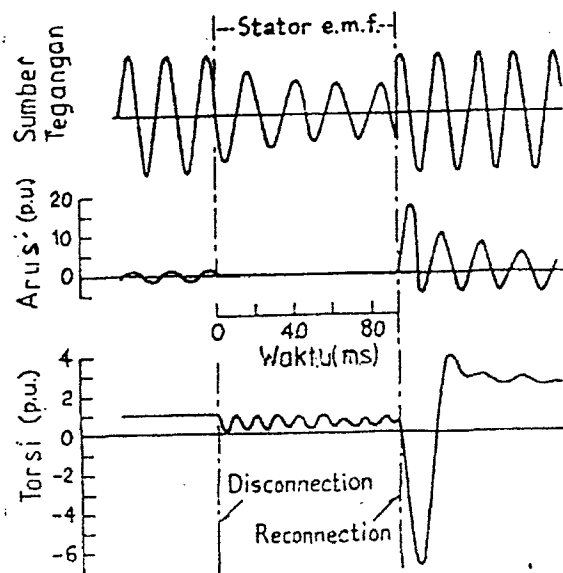
2.2.9. Peralihan pada proses *reswitching*

Pada waktu motor dalam keadaan berputar kemudian sumber tegangan diputuskan dan kemudian dihubungkan kembali dalam periode yang cepat, hal ini disebut dengan proses *reswitching*.

Proses peralihan ini diakibatkan oleh *elektomotive force* induksi (EMF induksi) atau gaya listrik lawan kebelitan stator oleh fluksi rotor yang kemudian memperlemah arus rotor. Suatu hal yang sangat penting untuk diperhatikan dalam kasus ini adalah besarnya sudut fase dari e.m.f induksi berkenaan dengan sumber tegangan yang mensuplai motor dan besarnya amplitudo serta torsi puncak. Hal-hal tersebut tergantung kepada kecepatan putaran rotor dan lamanya waktu

pemutusan. Didalam kasus ini, hal yang merugikan adalah torsi puncak bisa mencapai 15 p.u torsi beban penuh, sedang arus puncaknya biasa mencapai 5-7 p.u arus beban penuh.

Pengereman secara dinamik, *plugging* atau pemindahan *busbar* adalah contoh-contoh *reswitching* yang cepat. Penghubungan kembali yang cepat ini dapat menghasilkan e.m.f induksi yang cukup besar pada lilitan stator. Penggunaan kapasitor bank untuk memperbaiki faktor daya beban juga dapat memungkinkan terjadinya efek peralihan, excitasi sendiri pada generator induksi dan pengereman yang menggunakan kapasitor. Sebagai contoh misalnya ketika sumber tegangan pada suatu motor diputuskan sedangkan kapasitor masih tersambung pada terminal motor, maka kapasitor akan menjaga fluksi sementara dan stator dapat membangkitkan tegangan lebih walaupun putaran motor sudah mulai berkurang (turun).



Gambar 2.13. Kurva peralihan *reswitching*

Hal yang merugikan dari peristiwa *reswitching* pada kondisi e.m.f dan sumber tegangan yang berubah adalah akan menghasilkan peralihan arus dan torsi yang kuat. Bila hal ini terjadi pada mesin-mesin yang mempunyai daya besar akan mempengaruhi putaran *prime mover* (penggerak) dari generator. Pada gambar 2.13 terlihat kurva peralihan *reswitching* pada motor dengan beban penuh yang diputuskan dari sumber tegangannya dan kemudian dihubungkan kembali secara cepat.

2.2.10. Peralihan elektromekanikal

Selama motor distart dengan tegangan penuh (langsung terhubung ke jala-jala) tanpa beban, pengukuran karakteristik terhadap kecepatan lebih ditekankan pada torsi puncak dan selanjutnya diamati untuk menentukan kecepatan supersinkron (*overshoot*) sebelum torsi turun mencapai magnet rangkaian rotor yang terhubung singkat, yang arahnya berlawanan dengan medan magnet putar stator. Ketika putaran rotor mendekati kecepatan sinkron, penurunan arus yang kecil mungkin akan memberikan efek sementara pada kutub kemagnitan, hal ini sebagai akibat dari torsi sinkron yang dihasilkan. Kejadian ini merupakan suatu hal yang tidak disukai pada penggunaan motor sinkron dengan sudut beban tertinggal. Karena itu kecepatan sinkronnya diupayakan dicapai kira-kira pada satu atau dua osilasi sebelum torsi berubah ke *steady state*.

Peralihan torsi sinkron dan turunnya slip walaupun secara perlahan-lahan juga akan terjadi ketika motor yang sedang berputar tiba-tiba beban mengalami perubahan. Pada beban yang besar selama putaran motor turun, kombinasi antara

fluksi rotor dengan medan magnet putar akan menghasilkan torsi sinkron yang arahnya berlawanan dengan putaran motor sehingga menyebabkan fluktuasi pada torsi sinkron yang dihasilkan, selanjutnya arus yang mengalir berangsur-angsur akan turun.

Sebagai contoh compressor, proses peralihan slip, putaran dan ayunan torsi yang dibangkitkan rotor akan tergantung kepada frekuensi ayunan beban dan konstanta waktu rangkaian listriknya. Kompensator akan menghasilkan torsi sinkron ketika beban mengalami perubahan yang merupakan kombinasi antara torsi yang dihasilkan dengan momen puntirnya. Torsi ini akan menimbulkan slip-swing yang beresonansi dengan ayunan torsi yang dihasilkan mesin. Hal ini akan menyebabkan fluktuasi arus line yang kuat.

2.2.11. Peralihan akibat gangguan sistem

Penurunan tegangan pada terminal motor berbeban akan menyebabkan turunnya putaran. Kasus gangguan tegangan pada motor yang berdaya besar, ketika motor kembali berputar akan menghasilkan daya reaktif yang besar sehingga menurunkan tegangan sistem dan menghambat percepatan putarannya. Jika torsi beban berbanding langsung dengan kecepatan, maka motor akan beroperasi normal mungkin diperoleh secara cepat.

Bila terjadi hubung singkat pada atau dekat terminal motor, maka mesin akan memberikan kontribusi pada arus hubung singkat nilainya selalu besar bahkan lebih besar dari arus start tegangan penuh (kira-kira 10-20 arus nominalnya) baik untuk sistem tegangan satu fase maupun tiga fase. Harga

puncak arus hubung singkat sangat penting karena digunakan untuk menentukan kapasitas pengaman dari motor.

2.2.12. Lama waktu start

Salah satu cara untuk menentukan jenis pengaman beban lebih adalah menentukan lama waktu yang diperlukan oleh motor mulai dari start sampai mencapai putaran nominalnya. Karena lama waktu start berpengaruh terhadap gelombang arus yang mengalir pada pengaman tersebut. Untuk menentukan lama waktu yang diperlukan oleh motor selama starting perlu diketahui torsi yang dihasilkan oleh motor dan torsi beban itu sendiri.

Misalnya torsi yang dihasilkan oleh motor (T_m) dan torsi dari beban (T_b) maka selisih torsi dari keduanya (ΔT) adalah kelebihan torsi yang memberi percepatan kepada putaran motor. Sehingga dapat dituliskan:

$$\Delta T = T_m - T_b = j \frac{d\omega}{dt} \dots\dots\dots(2.21)$$

$$\begin{aligned} \text{dimana : } j &= m \bar{R}^2 = m \bar{D}^2 / 4 \\ &= \text{momen lemban poler} \\ &= \int r^2 dm \end{aligned}$$

Secara grafis dapat ditentukan keseimbangan antara kopel yang dihasilkan oleh motor dan kopel beban. Gambar berikut memperlihatkan T_m , T_b dan ΔT sampai motor mencapai titik P dengan putaran n , dimana keseimbangan tersebut dicapai.

Selanjutnya dapat dituliskan :

$$\Delta T = m \bar{R}^2 \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} \dots\dots\dots(2.22)$$

Atau dapat dituliskan:

$$dt = \frac{\pi}{120} m \bar{D}^2 \frac{dn}{\Delta T} \dots\dots\dots(2.23)$$

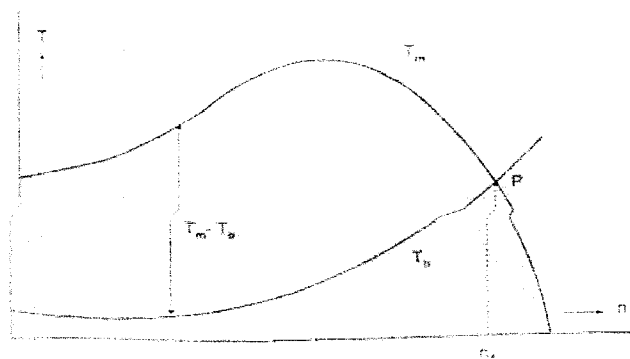
Bila motor memerlukan waktu selama t_1 untuk mencapai putaran nominal n_1 maka persamaan tersebut dapat dituliskan:

$$\int_0^{t_1} dt = \frac{\pi}{120} m \bar{D}^2 \int_0^{n_1} \frac{1}{\Delta T} \dots\dots\dots(2.24)$$

Dengan menginteggralkan kedua ruas akan didapatkan:

$$t_1 = \frac{\pi}{120} m \bar{D}^2 n_1 \dots\dots\dots(2.25)$$

Dari kurva perkembangan torsi yang dihasilkan motor dan torsi beban terlihat bahwa kurva masing-masing torsi tidak lancar. Sehingga menyebabkan harga ΔT akan didapat dalam waktu tak terhingga. Bila hal ini terjadi maka waktu yang diperlukan untuk start juga akan tak terhingga.



Gambar 2.14. Grafik perkembangan torsi motor dan torsi beban

Untuk menyederhanakan perhitungan maka ΔT dihitung rata-rata sehingga waktu yang diperlukan untuk start menjadi :

$$\bar{t}_1 = \frac{\pi}{120} \frac{m\bar{D}^2}{\Delta Tr} n_1 \dots\dots\dots(2.26)$$

dimana:

- t_1 = Waktu yang diperlukan oleh motor untuk mencapai putaran nominal dalam waktu detik (dt)
- m = Massa dari beban dalam kilogram (kg)
- \bar{D} = Diameter rata-rata benda dalam meter (m)
- n_1 = Putaran nominal motor dalam rpm
- ΔTr = Selisih torsi rata-rata dari torsi motor dan torsi benda dalam N-m

2.2.13. Efek *start* motor induksi

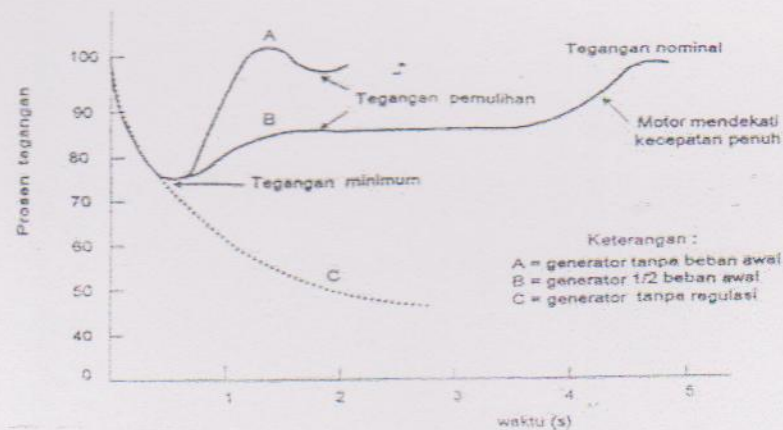
Untuk motor-motor dengan daya yang rendah pada saat *start* tidak banyak menimbulkan masalah, lain halnya yang terjadi didalam industri yang menggunakan motor-motor dengan daya besar. Yang terjadi perhatian utama pada saat motor *start* adalah tegangan jatuh yang terjadi selama proses *starting*.

Untuk menentukan tegangan jatuh selama *starting* memang agak sulit dibandingkan dengan motor beroperasi dalam keadaan normal. Sebagai contoh adalah ketika sebuah generator sinkron digunakan untuk mensuplai tegangan motor. Pada saat motor di *start*, tegangan yang dihasilkan generator akan mengalami fluktuasi dimana variasi tegangan tersebut tergantung kepada jenis motor yang disuplai, jenis regulatornya dan beban generator yang lain.

Dari gambar dibawah ini terlihat bahwa waktu pemulihan tegangan hingga mencapai kondisi normal tergantung jenis beban, respon penguat generator dan jenis regulator tegangan yang digunakan.

Perhitungan besarnya tegangan pemulihan menjadi penting untuk motor yang memerlukan waktu *start* lambat seperti motor *fan* atau untuk menentukan torsi yang dihasilkan untuk diambil beban ketika motor sinkron digunakan untuk melayani beban. Selain itu besarnya tegangan minimum yang terjadi mempengaruhi peralatan yang bekerja berdasarkan *undervoltage*, magnetik kontraktor dan lain-lain.

Gambar 2.15 dibawah ini memperlihatkan bentuk tegangan selama *starting* untuk beberapa kondisi beban.

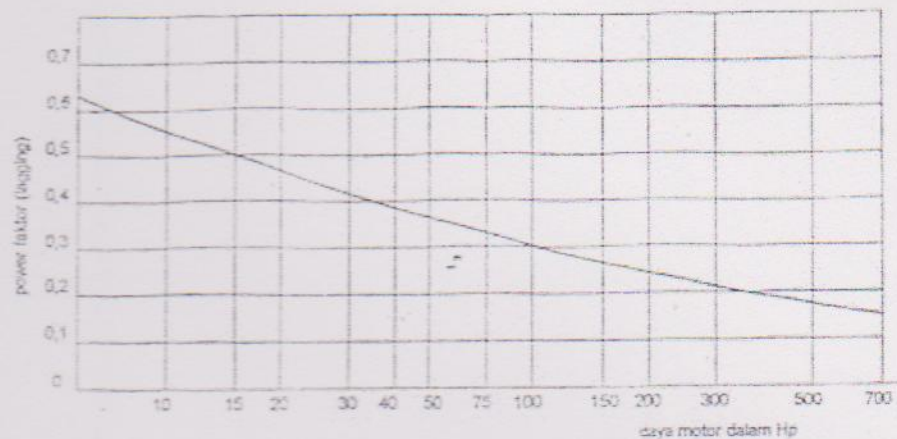


Gambar 2.15. Kurva efek starting pada tegangan generator

Akibat lain dari arus starting yang tinggi adalah menurunnya *power* faktor motor selama *start*, juga mempengaruhi tegangan jaringan secara keseluruhan. Pada umumnya peralatan kontrol seperti relay, magnetik kontraktor dan peralatan sensor lainnya yang digunakan untuk mengendalikan mesin masih bekerja dengan

baik bila tegangan yang mensuplai diatas 80% dari tegangan nominalnya. Hal inilah yang perlu dijaga agar pada saat *starting* jatuh tegangan yang terjadi tidak melebihi 20% dari tegangan kerja.

Gambar dibawah ini memperlihatkan *power faktor* sebagai fungsi daya motor pada saat *start*.



Gambar 2.16. Harga power faktor pendekatan motor induksi pada saat *start*

Harga *power faktor* (pf) yang rendah selama *start* juga menjadi salah satu permasalahan yang mendapat perhatian untuk menentukan jenis *starting* yang digunakan. Umumnya motor induksi rotor sangkar pada saat *start* mempunyai *power faktor* tidak lebih dari 0,6 lagging dan motor yang berdaya besar akan lebih kecil lagi dari harga tersebut sedangkan untuk motor induksi rotor belitan mempunyai *power faktor* 0,8 dan turun sampai 0,7 dari harga tersebut.

Untuk memperhitungkan tegangan jatuh yang terjadi umumnya digunakan analisa perhitungan per fase untuk semua parameter yang digunakan seperti arus mengalir, hambatan dan reaktansi dari mesin dan jaringan yang digunakan.

Suatu persamaan pendekatan yang secara umum digunakan untuk menghitung besarnya tegangan jatuh adalah sebagai berikut:

$$E = I (R \cos \theta + X \sin \theta) \dots\dots\dots(2.27)$$

Bila tegangan pada motor (E_r) diketahui maka:

$$E = \sqrt{(E_r \cos \theta + IR)^2 + (E_r \sin \theta + IX)^2} - E_r \dots\dots\dots(2.28)$$

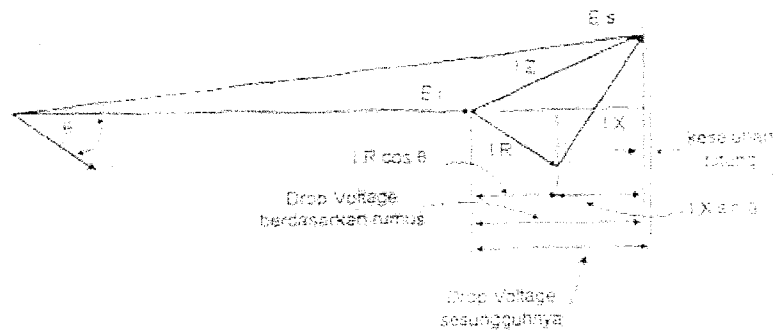
Bila tegangan pada sumber (E_s) diketahui maka:

$$E = E_s + IR \cos \theta + IX \sin \theta - \sqrt{E_s^2 - (IX \cos \theta - IR \sin \theta)^2} \dots\dots(2.29)$$

Dimana:

- E_s = Tegangan pada sumber
- E_r = Tegangan pada beban
- I = Arus yang mengalir
- R = Harga tahanan dari rangkaian
- X = Harga reaktansi dari rangkaian
- θ = Sudut tegangan dan arus (sudut beban)

Dari gambar dibawah ini dapat dilihat masing-masing tegangan



Gambar 2.17. Phasor diagram tegangan pada sistem

2.3. Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka maupun landasan teori, maka penulis dapat mengambil kesimpulan sementara bahwa dengan cara pemberian tegangan pada motor induksi dibagian rotor belitan secara kaskade, maka arus pengasutan yang terjadi dapat teredam secara signifikan yang bergantung pada besarnya sudut tak hantar *thyristor*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Pustaka

Peredaman arus pengasutan dapat dilakukan dengan berbagai cara. Salah satu cara yang akan dilakukan yakni dengan cara pemberian tegangan pada motor induksi secara kaskade. Secara kaskade yang dimaksud yaitu dengan pengaturan tegangan masuk motor melalui *thyristor*. Analisis terhadap motor induksi tiga- phase yang dikendalikan dengan *thyristor* terpicu telah dilakukan oleh Lipo (1971), Hamed dan Chalmers (1990). Kedua peneliti tersebut menghasilkan kesimpulan yang sama yakni bentuk gelombang arus dan tegangan hasil analisis teoritik sama dengan bentuk aktualnya.

Analisis transien terhadap motor induksi tiga-fase yang tercatu menggunakan *thyristor* telah dilakukan oleh Chattopadyay dan Rao (1980). Melalui penelitian tersebut dapat diperoleh persamaan umum model motor induksi dengan menggunakan variable logika yang mempresentasikan kerja *thyristor*. Walaupun telah tersedia model untuk keperluan analisis transien, namun penelitian tersebut hanya memberikan penyelesaian keadaan tunak saja., sehingga tidak dapat memberikan gambaran unjuk kerja pada saat pengasutan.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Motor induksi tiga-fase

Motor induksi tiga-fase dicatu dengan tegangan stator yang berubah dan frekuensi konstan, maka hubungan antara torsi internal dan kecepatan motor dari rangkaian ekivalen pendekatan terlihat dalam Gambar 2.1 dapat diperoleh,

$$P_{ma} = \frac{R_r'}{s} (I_a')^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\vec{I}_a' = \frac{\vec{V}_a}{R_s + \left(\frac{R_r'}{s}\right) + j\omega_s L_L} \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan:

P_{ma} = Daya internal motor yang bergantung pada besarnya slip

R_s = Hambatan stator

persamaan tersebut menunjukkan bahwa untuk perbedaan tegangan terminal konstan pada slip yang kecil berlaku, $\frac{R_r'}{s} \gg R_s$ atau $\frac{R_r'}{s} \gg j\omega_s L_L$ sehingga I_a' berbanding lurus dengan slip. Oleh karena daya mekanik tiga-fase adalah

$$P_{mec} = 3(P_{ma} - P_m A) = 3(1-s)P_{ma} = 3 \frac{p}{2} \frac{\omega_m}{\omega_s} P_{ma} \dots\dots\dots (2.3)$$

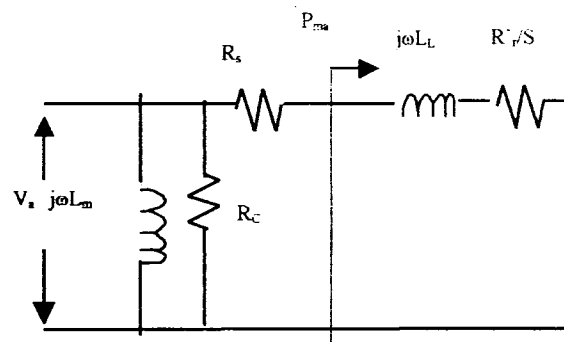
maka dari persamaan (2.3) , (2.1) dan (2.2) diperoleh persamaan torsi motor dalam newton-meter sebagai berikut

$$T = \frac{3}{\omega_s} \frac{p}{2} \frac{R_r'}{s} \frac{V_a'^2}{\left(R_s + R_r'/s\right)^2 + (\omega_s L_L)^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

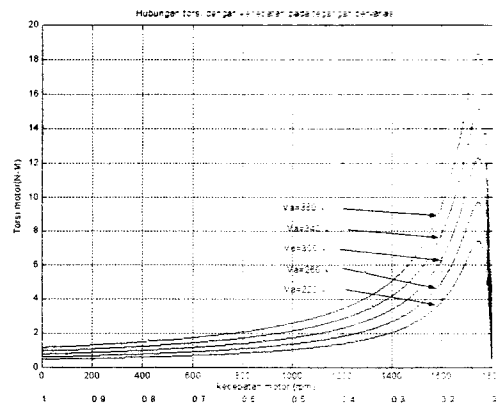
dengan:

T = Torqu / Torka

pada persamaan (2.4) terlihat bahwa untuk kondisi slip yang kecil, torsi internal berbanding lurus terhadap slip. Persamaan (2.4) juga merepresentasikan suatu watak torsi-slip motor induksi tiga-fase. Jika torsi internal T merupakan variabel tergantung, maka hanya terdapat satu variabel bebas yakni s pada ruas kanan dari persamaan (2.4). Dari persamaan (2.4) juga dapat dilihat watak torsi-slip motor induksi untuk berbagai tegangan motor yang terlihat dalam Gambar 2.2



Gambar 2.1. Rangkaian ekivalen pendekatan



Gambar 2.2 Watak torsi-slip motor induksi untuk berbagai tegangan masukan

2.2.1.1. Prinsip Kerja Motor Induksi

Prinsip kerja motor induksi tiga fase berdasarkan induksi elektromagnetis, yakni bila belitan / kumparan stator diberi sumber tegangan bolak-balik tiga fase maka arus akan mengalir pada kumparan tersebut, menimbulkan medan putar (garis-garis gaya fluks) yang berputar dengan kecepatan sinkron dan akan mengikuti persamaan

$$N_s = \frac{120.f}{p} \text{ rpm}$$

dengan :

N_s = Kecepatan putar dari medan putar stator dalam rpm

f = Frekuensi arus dan tegangan stator

p = Banyaknya kutub

Garis-garis gaya fluks dari stator tersebut yang berputar akan memotong penghantar-penghantar rotor sehingga pada penghantar-penghantar tersebut timbul EMF (elektro motoris force) atau GGL (gaya gerak listrik) atau tegangan induksi.

Berhubung kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup maka pada kumparan tersebut mengalir arus. Arus yang mengalir pada penghantar rotor yang berada dalam medan magnet berputar dari stator, maka pada penghantar rotor tersebut timbul gaya-gaya yang berpasangan dan berlawanan arah, gaya tersebut menimbulkan torsi yang cenderung memutar rotornya, rotor akan berputar dengan kecepatan putar (N_r) mengikuti putaran medan putar stator (N_s).

Slip (S)

Slip timbul karena perbedaan perputaran medan putar stator dan perputaran rotor.

Ada tiga macam slip :

- 1) Slip mutlak, dinyatakan oleh persamaan :

$$S = N_s - N_r$$

- 2) Slip pecahan, dinyatakan oleh persamaan :

$$S = \frac{N_s - N_n}{N_r}$$

- 3) Slip persen (%), dinyatakan oleh persamaan :

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100$$

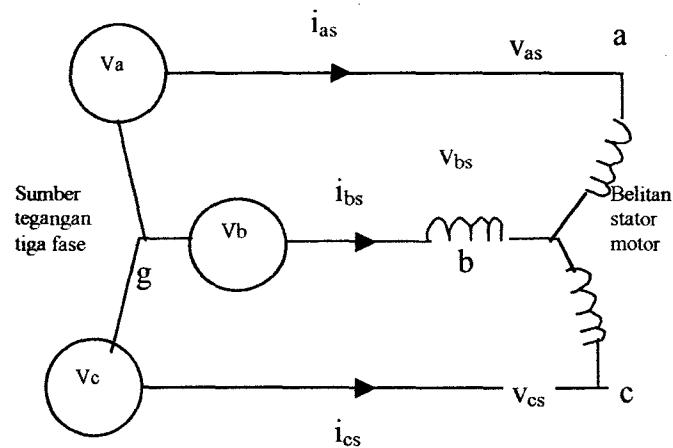
2.2.1.2. Prinsip Kerja Motor Serempak

Prinsip kerja motor serempak karena interaksi dua medan menyebabkan torsi yang memutar rotor. Apabila kumparan jangkar yang ada di stator diberi sumber tegangan tiga fase dari jala-jala maka pada kumparan tersebut timbul medan putar seperti pada rotor induksi. Kumparan medan yang ada di rotor diberi arus searah, maka pada permukaan kutub timbul medan magnet yang arahnya dari kutub utara ke kutub selatan.

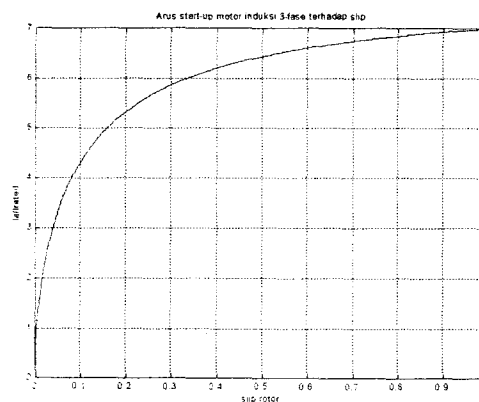
Interaksi antara medan putar pada kumparan jangkar yang ada di stator serta medan magnet antara kutub utara dan kutub selatan yang ada di rotor, menyebabkan gaya yang berpasangan dan akan membangkitkan torsi, torsi tersebut akan memutar dengan kecepatan yang sama / sinkron dengan perputaran medan putar stator.

2.2.2. *Start-up* motor induksi tercatu langsung

Motor induksi yang dicatu secara langsung akan menimbulkan arus pengasutan yang tinggi antara enam sampai delapan kali arus nominal, mengacu persamaan (2.2) dengan parameter tertentu menghasilkan arus pengasutan sebesar tujuh kali arus nominal terlihat dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Motor induksi tiga fase dicatu secara langsung



Gambar 2.4. Simulasi arus starting dengan parameter tertentu

Berdasarkan Gambar 2.2 terlihat bahwa pada slip yang tinggi ternyata kecepatan rendah dan torsi semakin besar, begitu juga arus pengasutan motor yang terserap pada stator juga tinggi enam hingga delapan kali arus nominalnya, sedangkan untuk slip yang semakin rendah nilai arus stator semakin turun dan pada slip yang sangat rendah yakni pada kecepatan sinkron, nilai arus stator sama dengan nilai nominalnya. Gejala munculnya arus pengasutan dapat terjadi karena pada saat motor belum berputar, hambatan rotor seolah-olah terhubung seri dengan hambatan stator. Oleh karena hambatan rotor berbanding terbalik dengan slip, maka pada slip yang tinggi, nilai hambatan rotor sangat rendah. Dengan tegangan stator yang konstan, keadaan tersebut menyebabkan nilai arus menjadi tinggi.

Watak transien motor induksi tiga-fase yang dicatu secara langsung dapat dianalisis menggunakan model sumbu d-q [4], yang dapat dideskripsikan menggunakan persamaan diferensial dalam satuan per unit (pu) dalam bentuk matriks vektor seperti persamaan berikut,

$$\frac{p}{\omega_b} \bar{i} = \bar{X}^{-1} \bar{v} - \bar{X}^{-1} \bar{R} \bar{i} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan p adalah operator diferensial (d/dt), ω_b adalah kecepatan angular basis yang digunakan untuk menentukan parameter-parameter motor, sedangkan matriks dan vektor yang diberikan oleh persamaan-persamaan berikut,

$$\bar{i} = [i_{qs} \quad i_{ds} \quad i_{qr} \quad i_{dr}]^T \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\bar{X}^{-1} = \frac{1}{X_{ls} X_{lr} - X_{ms}^2} \begin{bmatrix} X_{lr} & 0 & -X_{ms} & 0 \\ 0 & X_{lr} & 0 & -X_{ms} \\ -X_{ms} & 0 & X_{ls} & 0 \\ 0 & -X_{ms} & 0 & X_{ls} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_{ms} & R_r & -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_{lr} \\ \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{ms} & 0 & \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{lr} & R_r \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.8)$$

Besaran-besaran model sumbu d-q yang berhubungan dengan variabel-variabel stator motor terlihat dalam persamaan berikut,

$$v_{qs} = \frac{2}{3} \left(v_{as} - \frac{1}{2} v_{bs} - \frac{1}{2} v_{cs} \right) = v_{as} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$v_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(-v_{bs} + v_{cs} \right) \dots\dots\dots (2.10)$$

$$i_{qs} = i_{as} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(-i_{bs} + i_{cs} \right) \dots\dots\dots (2.12)$$

sedangkan arus rotor yang merujuk pada stator dihubungkan dengan arus fase rotor diperoleh persamaan,

$$i'_{qr} = \frac{N_r}{N} \left[i_{ar} \cos \omega_r t + \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{cr} - i_{br}) \sin \omega_r t \right] \dots\dots\dots (2.13)$$

dan

$$i'_{dr} = \frac{N_r}{N} \left[-i_{ar} \sin \omega_r t + \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{cr} - i_{br}) \cos \omega_r t \right] \dots\dots\dots (2.14)$$

Dalam sistem tiga-fase, tegangan sumber diberikan oleh persamaan,

$$\begin{aligned} v_a &= V_m \sin \omega t \\ v_b &= V_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \dots\dots\dots (2.15) \\ v_c &= V_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

sedangkan tegangan fase ke netral pada setiap terminal fase motor diberikan oleh,

$$\begin{aligned}
 v_{a_s} &= v_a - v_{sg} \\
 v_{b_s} &= v_b - v_{sg} \\
 v_{c_s} &= v_c - v_{sg}
 \end{aligned} \dots\dots\dots (2.16)$$

Oleh karena jumlah tegangan-tegangan terminal stator ke netral dan jumlah dari tegangan-tegangan sumber adalah nol, maka $v_{sg}=0$, sehingga vektor \bar{v} didapatkan,

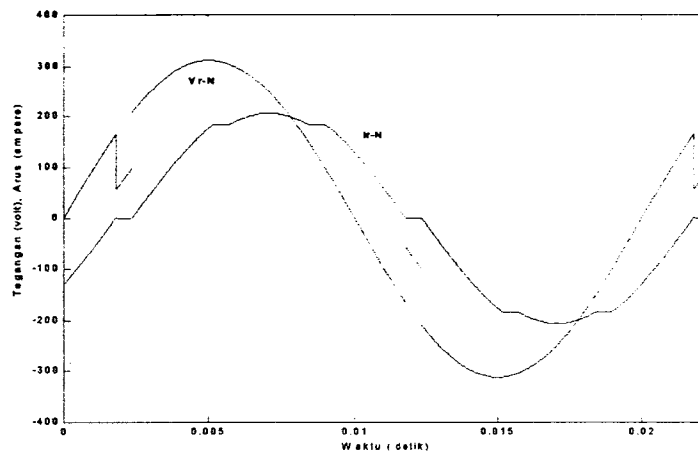
$$\bar{v} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \left(v_{as} - \frac{1}{2} v_{bs} - \frac{1}{2} v_{cs} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{3}} (-v_{bs} + v_{cs}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.17)$$

2.2.3. *Star-Up* motor induksi terkendali *thyristor*

Rangkaian sumber tegangan tiga fase yang dikendalikan oleh *thyristor* terpicu untuk keperluan pencatuan tegangan pada motor induksi tiga-fase direalisasikan dalam konfigurasi *star*. Bentuk gelombang tegangan terminal motor terhadap netral sumber yang disebut sebagai tegangan dan arus *steady-state* pada motor induksi terkendali *thyristor* ditunjukkan pada Gambar 2.5. Pada Gambar 2.5 tersebut, V_{T-N} merupakan tegangan terminal motor dengan netral sumber dan i_R adalah arus fase motor. Besaran α merupakan sudut pemicuan *thyristor* yang besarnya ditentukan oleh selisih antara waktu mulai mengalirnya arus fase terhadap waktu persilangan nol gelombang tegangan sumber, besaran β merupakan sudut pemadaman *thyristor* yang besarnya ditentukan oleh selisih antara waktu menghilangnya arus fase terhadap waktu persilangan nol gelombang tegangan sumber, sedangkan γ merupakan sudut tak hantar *thyristor* yang besarnya ditentukan oleh selisih antara sudut pemicuan terhadap sudut

pemadaman *thyristor*. Akibat pemicuan *thyristor*, bentuk gelombang dan arus motor menjadi tidak sinus murni,

Oleh karena arus pengasutan motor tercatu melalui sumber tegangan yang baru yakni sumber tegangan terkendali *thyristor*, maka arus pengasutan motor dapat tereduksi. Karena dengan *thyristor* sebagai pengendalian tegangan sumber motor, maka seolah-olah ada hambatan yang terpasang seri pada terminal motor, sehingga arus pengasutan yang terjadi tidak besar, namun bergantung besarnya perubahan hambatan *thyristor* yang juga tergantung dari besarnya sudut penyulutan. Deskripsi hambatan *thyristor* terlihat dalam gambar 2.6.

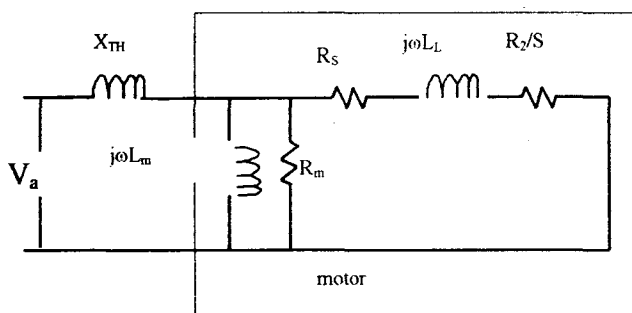


Gambar 2.5 Bentuk tegangan dan arus yang terkendali thyristor

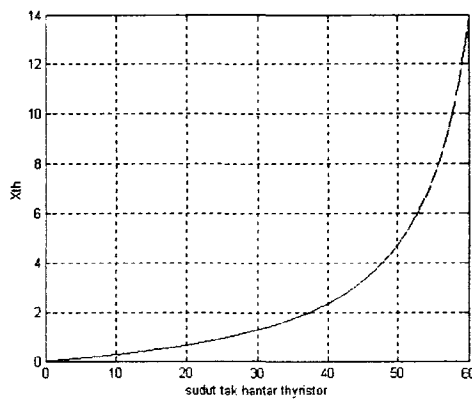
Gambar 2.6 menunjukkan bahwa perubahan sudut tak hantar *thyristor* mengakibatkan perubahan nilai hambatan yang terpasang seri dengan motor. Perubahan hambatan seri bergantung pada fungsi sudut tak hantar *thyristor* (γ) seperti terlihat dalam persamaan 2.18.

$$X_{TH} = j\omega s(L_1 + L_2)f(\gamma) \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan
$$f(\gamma) = \frac{\frac{3}{2\pi}(\gamma + \sin \lambda)}{1 - \frac{3}{2\pi}(\gamma + \sin \gamma)}$$



Gambar 2.6 Rangkaian pengganti hambatan *thyristor* terpasang seri dengan motor



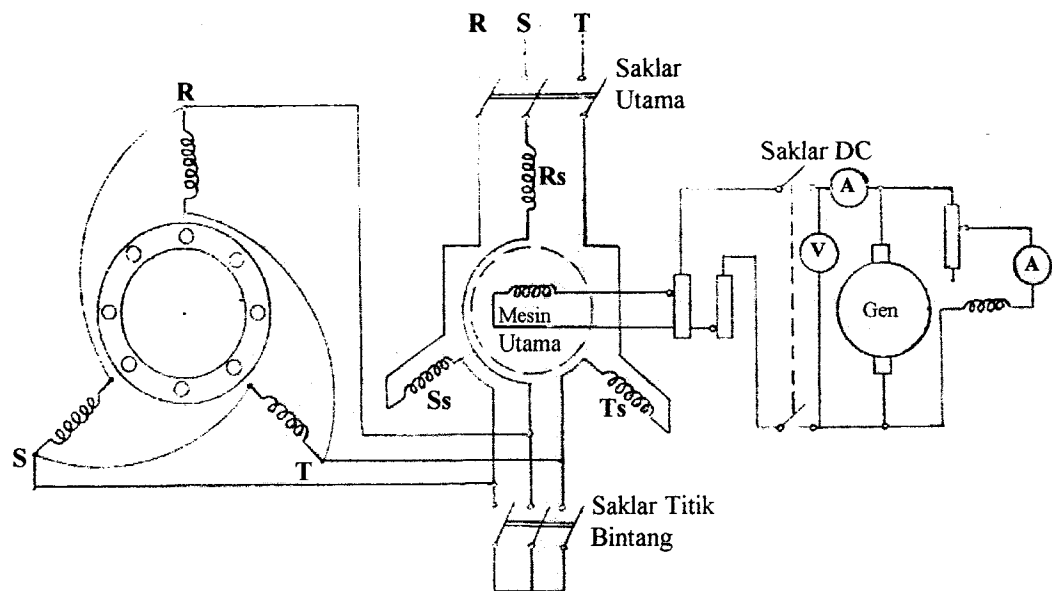
Gambar 2.7 Grafik hubungan antara sudut tak hantar thyristor terhadap reaktans yang didapatkan

2.2.4. Starting motor induksi serempak

Dalam starting motor induksi serempak dikenal dua macam cara yaitu :

a. Pony induction motor

Gambar 2.8 melukiskan skema rangkaian starting motor serempak dengan cara *Pony Induction Motor*



Gambar 2.8. Pony Induction Motor

Prinsip pengoperasiannya:

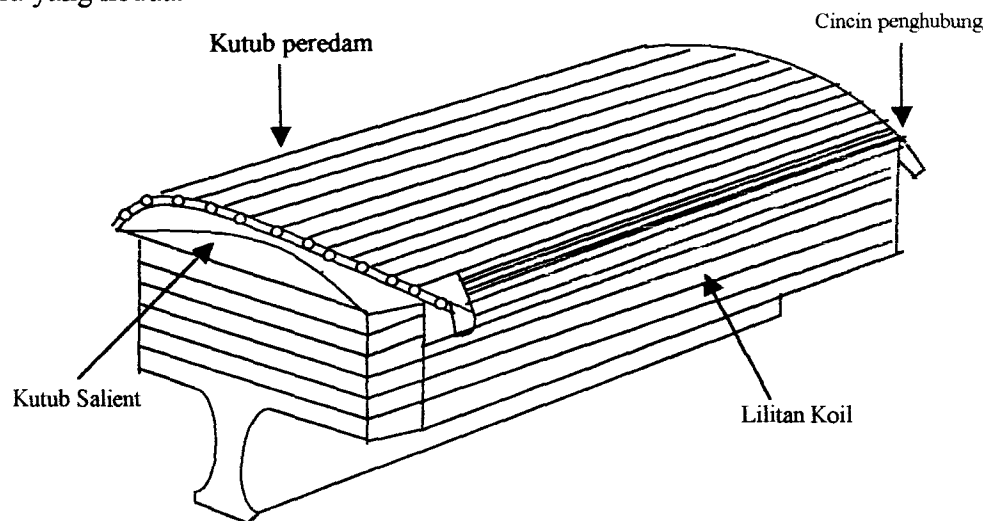
Mula-mula saklar bintang dibuka, jika saklar utama ditutup maka motor induksi tiga fase akan bekerja dan memutar motor rotor serempak. Dalam *start* yang pertama ini biasanya dapat dikerjakan dengan perantara.

1. Reaktor yang dihubungkan seri.
2. Menggunakan saklar bintang-segitiga.
3. Menggunakan auto transformator.

Setelah motor induksi bekerja kemudian saklar DC ditutup dan diatur hingga mencapai harga nominal. Agar motor serempak dapat beroperasi maka saklar bintang ditutup (dihubungkan). Dalam keadaan yang demikian ini motor serempak telah terhubung dengan sumber tiga-fase dalam sambungan bintang dan lilitan stator pada Pony motor terhubung singkat sehingga pada Pony motor tidak menyerap daya dan motor serempak telah bekerja dengan putaran nominal.

b. Starting kutub pada motor induksi

Gambar 2.9 melukiskan skema rangkaian starting motor serempak dengan cara yang kedua.



Gambar 2.9. Starting kutub pada motor induksi

Pada cara ini, pada dasarnya pada rotor terdapat penghantar-penghantar yang dihubungkan singkat satu sama lain seperti halnya motor induksi rotor sangkar. Penghantar-penghantar tersebut diletakkan dalam sepatu kutub yang mana hal ini biasanya disebut “*Damper Grids* “. Jika lilitan stator dihubungkan pada sumber tiga-fase maka pada lilitan stator akan terbentuk medan magnet putar

Penghantar yang terdapat pada sepatu kutub tersebut akan menghasilkan gaya (seperti halnya pada motor induksi rotor sangkar).

Setelah motor tersebut berputar yang mana motor tersebut mengawali putaran serempak maka pada akhirnya akibat adanya putaran awal tersebut, motor serempak dapat bekerja (berputar) dengan jumlah putaran nominal, sedangkan penghantar-penghantar yang dipasang pada sepatu-sepatu kutub tersebut sudah tidak berfungsi lagi.

2.2.5. Sifat dan penggunaan motor serempak

- a. Motor serempak dapat digunakan sebagai perbaikan faktor daya
- b. Digunakan untuk perbaikan regulasi tegangan pada jaringan transmisi panjang.
- c. Digunakan untuk melayani beban yang membutuhkan jumlah penggunaan tetap
- d. Dapat dibentuk dengan jumlah putaran yang relatif rendah. Jika dibandingkan dengan motor induksi tiga-fase tak serempak, motor serempak mempunyai beberapa sifat.
 1. Motor serempak dapat dioperasikan kedalam tiga macam sifat yaitu induktif, resistif, dan kapasitif, sedangkan motor induksi tak serempak hanya mempunyai sifat induktif saja.
 2. Motor serempak tidak dapat start sendiri sedangkan motor induksi tiga fase tak serempak dapat.

3. Motor serempak memerlukan arus penguat magnet, sedangkan motor induksi tiga-fase tak serempak tidak.
4. Motor serempak lebih mahal daripada motor induksi tiga-fase tak serempak

2.2.6. Karakteristik motor induksi serempak

Karakteristik pada motor induksi serempak merupakan gabungan antara motor induksi tak serempak dengan motor serempak. Adapun karakteristik $n: f(T)$ dari motor ini dapat dilukiskan seperti pada gambar 2.10.

Kebanyakan motor induksi serempak dibuat dengan daya dari 50 kw..... 2500 kw untuk jenis rotor berbentuk silinder dan diatas 5000kw untuk jenis solient pole. Motor ini dapat beroperasi dengan sumber diatas 11kv pada putaran rendah (120 putaran permenit) dan pada putaran tinggi (3600 putaran permenit)

Motor induksi serempak banyak digunakan untuk :

1. Menggerakkan pada peralatan yang kontinyu misal pada penggilingan semen.
2. Penggilingan karet.
3. Penggilingan bubur kayu.
4. Pompa-pompa sentrifugal