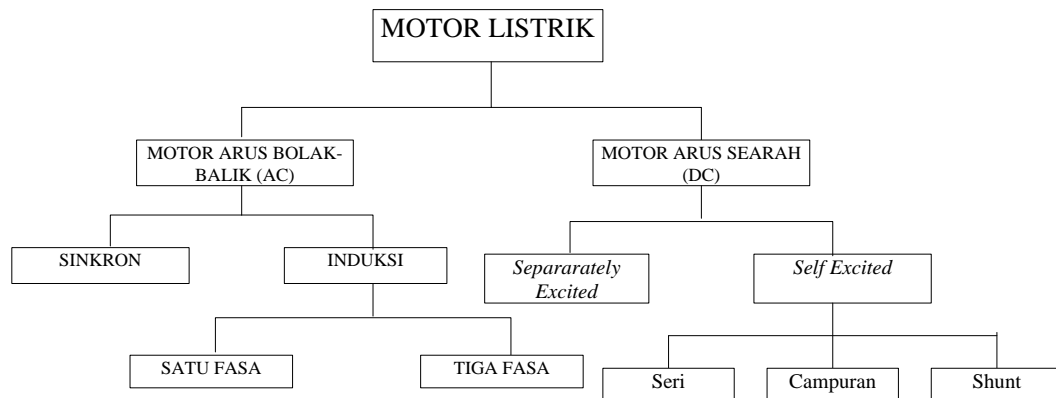


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor induksi tiga fasa¹

Motor induksi merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Dari berbagai motor listrik yang ada, motor induksi merupakan jenis motor arus bolak-balik yang paling banyak digunakan. Hal ini disebabkan motor induksi memiliki konstruksi yang kuat dan karakteristik kerja yang baik.



Gambar 2.1 Klasifikasi motor listrik

Beberapa kelebihan dari motor induksi adalah :

1. Bentuknya sederhana, dengan konstruksi yang cukup kuat.
2. Biayanya murah dan dapat diandalkan.
3. Efisiensinya tinggi dan pada keadaan normal tidak memerlukan sikat, sehingga rugi-rugi gesekan (losis) dapat dikurangi.
4. Perawatan yang minimum.

¹ Sumardjati, Prih. 2008. Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3. Hal : 408



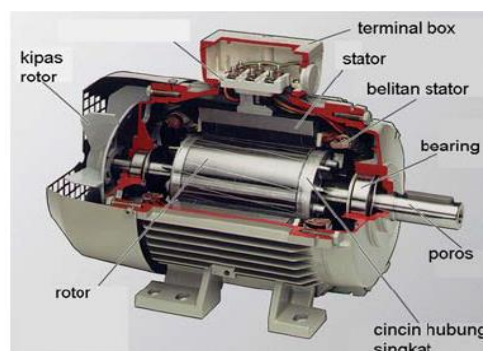
Namun disamping itu, motor ini tetap memiliki kelemahan, di antaranya adalah :

1. Pengaturan kecepatannya berpengaruh pada efisiensinya.
2. Kecepatan akan berkurang jika bebannya bertambah.
3. Kopel mulanya lebih rendah daripada mesin arus searah paralel.

Disebut motor induksi, karena motor ini bekerja dengan adanya arus yang terinduksi sebagai akibat dari adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan magnet berputar yang dihasilkan oleh arus stator. Motor induksi ini terdiri dari dua jenis, yaitu motor induksi dengan rotor belitan dan motor induksi rotor sangkar.

Motor induksi bekerja sebagai berikut : listrik dipasok ke stator yang akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet ini bergerak dengan kecepatan sinkron disekitar rotor. Arus rotor menghasilkan medan magnet kedua, yang berusaha untuk melawan medan magnet stator, yang menyebabkan rotor berputar. Walaupun begitu, didalam prakteknya motor tidak pernah bekerja pada kecepatan sinkron namun pada kecepatan dasar yang lebih rendah. Terjadinya perbedaan antara dua kecepatan tersebut disebabkan adanya slip/geseran yang meningkat dengan meningkatnya beban. Slip hanya terjadi pada motor induksi. Untuk menghindari slip dapat dipasang sebuah cincin geser/ slip ring, dan motor tersebut dinamakan motor cincin geser/slip ring motor.

2.2 Konstruksi Motor Induksi



Gambar 2.2 Klasifikasi motor Induksi



Konstruksi motor induksi secara detail terdiri atas dua bagian, yaitu: bagian stator dan bagian rotor gambar-2.2 Stator adalah bagian motor yang diam terdiri : badan motor, inti stator, belitan stator, bearing dan terminal box. Bagian rotor adalah bagian motor yang berputar, terdiri atas rotor sangkar, poros rotor. Konstruksi motor induksi tidak ada bagian rotor yang bersentuhan dengan bagian stator, karena dalam motor induksi tidak ada komutator dan sikat arang.

Konstruksi motor induksi lebih sederhana dibandingkan dengan motor DC, dikarenakan tidak ada komutator dan tidak ada sikat arang. Sehingga pemeliharaan motor induksi hanya bagian mekanik saja, dan konstruksinya yang sederhana motor induksi sangat handal dan jarang sekali rusak secara elektrik. Bagian motor induksi yang perlu dipelihara rutin adalah pelumasan bearing, dan pemeriksaan kekencangan baut-baut kabel pada terminal box karena kendur atau bahkan lepas akibat pengaruh getaran secara terus menerus.

Rumus menghitung daya input motor induksi :

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

P_1 : Daya input (Watt)

U : Tegangan (Volt)

I : Arus (Amper)

\cos : Faktor kerja

2.3 Jenis Motor Induksi 3 Fasa

Ada dua jenis motor induksi motor induksi tiga fasa berdasarkan rotornya yaitu:

1. Motor induksi 3 fasa sangkar tupai (squirrel-cage motor).
2. Motor induksi tiga fasa rotor belitan (wound-rotor motor).

Kedua motor ini bekerja pada prinsip yang sama dan mempunyai konstruksi stator yang sama tetapi berbeda dalam konstruksi rotor.



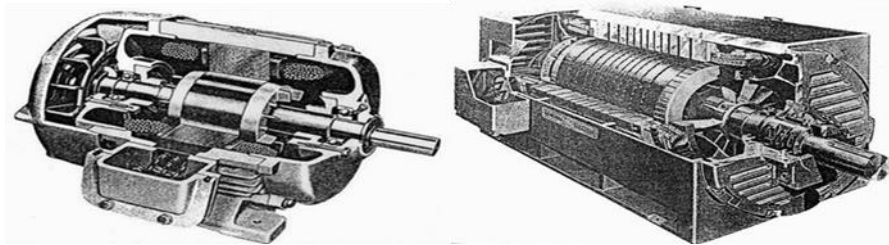
2.3.1 Motor Induksi Tiga Fasa Sangkar Tupai (Squirrelcage Motor)

Penampang motor sangkar tupai memiliki konstruksi yang sederhana. Inti stator pada motor sangkar tupai tiga fasa terbuat dari lapisan-lapisan plat baja beralur yang didukung dalam rangka stator yang terbuat dari besi tuang atau plat baja yang dipabrikasi. Lilitan-lilitan kumparan stator diletakkan dalam alur stator yang terpisah 120 derajat listrik. Lilitan fasa ini dapat tersambung dalam hubungan delta (Δ) ataupun bintang (Y). Rotor jenis rotor sangkar ditunjukkan pada gambar 3.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Rotor sangkar

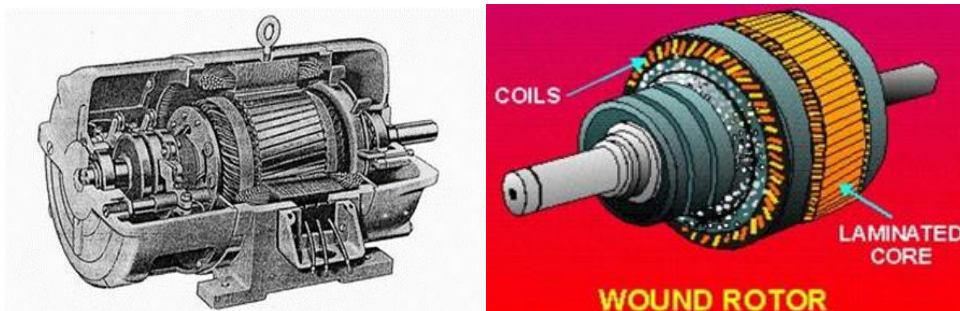
Batang rotor dan cincin ujung motor sangkar tupai yang lebih kecil adalah coran tembaga atau aluminium dalam satu lempeng pada inti rotor. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan ke dalam alur rotor dan kemudian dilas dengan kuat ke cincin ujung. Batang rotor motor sangkar tupai tidak selalu ditempatkan paralel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini akan menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetik sewaktu motor sedang berputar. Pada ujung cincin penutup dilekatkan sirip yang berfungsi sebagai pendingin. Rotor jenis rotor sangkar standar tidak terisolasi, karena batangan membawa arus yang besar pada tegangan rendah. Motor induksi dengan rotor sangkar ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.4 Konstruksi motor induksi rotor sangkar

2.3.2 Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Belitan (Wound-Rotor Motor)

Motor rotor belitan (motor cincin slip) 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. Konstruksi motor tiga fasa rotor belitan ditunjukkan pada gambar di bawah ini



Gambar 2.5 (a) Rotor belitan (b) Konstruksi motor induksi tiga fasa dengan rotor belitan



2.4 Putaran Motor Induksi



Gambar. 2.6 Putaran Motor Induksi

Motor induksi memiliki dua arah putaran motor, yaitu putaran searah jarum jam (kanan) gambar 2.6, dan putaran berlawanan jarum jam (kekiri) dilihat dari poros motor. Putaran motor induksi tergantung jumlah kutubnya, motor induksi berkutub dua memiliki putaran poros sekitar 2.950 Rpm, yang berkutub empat memiliki putaran poros mendekati 1450 Rpm. Putaran arah jarum jam (kanan) didapat dengan cara menghubungkan L1- terminal U, L2-terminal V dan L3 – terminal W. Putaran arah berlawanan jarum jam (kiri) didapat dengan menukarkan salah satu dari kedua kabel fasa, misalkan L1-terminal U, L2-terminal W dan L3-terminal V. Dengan memasang dua buah kontaktor, sebuah motor induksi dapat dikontrol untuk putaran kanan, dan putaran kekiri. Aplikasi praktis untuk membuka dan menutup pintu garasi dengan motor induksi dapat memanfaatkan kaidah putaran kanan dan kiri ini, dengan melengkapi dengan sensor cahaya atau saklar manual motor dapat dihidupkan untuk membuka dan menutup pintu garasi.



2.5 Prinsip Kerja Motor Induksi²

Pada dasarnya ada beberapa prinsip penting pada motor-motor induksi yaitu :

- a. Apabila sumber tegangan tiga fasa di pasang pada kumparan stator timbulah medan putar dengan kecepatan.
- b. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor
- c. Akibatnya pada kumparan rotor timbul (ggl) sebesar :

$$E_2 = 4,44.f_2.N_2.m \dots \dots \dots (2.2)$$

- d. Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
- e. Adanya arus didalam medan magnet menimbulkan gaya pada motor.
- f. Bila kopel mula dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator
- g. Tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan berputar rotor (n_r).
- h. Perbedaan kecepatan antara n_r dan n_s disebut slip (s) dinyatakan dengan :

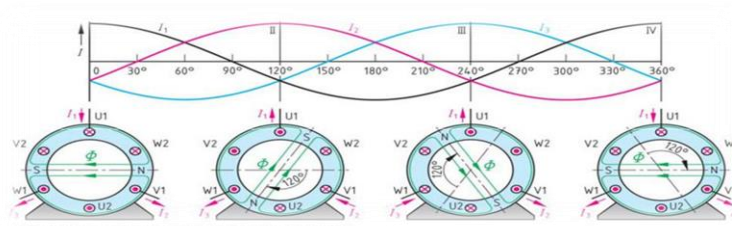
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

- i. Bila $n_r = n_s$, tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar (rotor), dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila n_r lebih kecil dari n_s .
- j. Dilihat dari cara kerjanya maka motor tak serempak disebut juga motor induksi atau motor asinkron.

² Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 68



Prinsip kerja motor induksi ini juga dapat dijelaskan dengan gelombang sinusoidal seperti pada gambar 2.7, terbentuknya medan putar pada stator motor induksi. Tampak stator dengan dua kutub, dapat diterangkan dengan empat kondisi



Gambar 2.7 Bentuk gelombang dan timbulnya medan putar pada Stator motor induksi³

1. Saat sudut 0° . Arus I_1 bernilai positif sedangkan arus I_2 dan arus I_3 bernilai negatif dalam hal ini belitan V_2 , U_1 dan W_2 bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan belitan V_1 , U_2 dan W_1 bertanda titik (arus listrik menuju pembaca). terbentuk fluk magnet pada garis horizontal sudut 0° kutub S (south=selatan) dan kutub N (north=utara).
2. Saat sudut 120° . Arus I_2 bernilai positif sedangkan arus I_1 dan arus I_3 bernilai negatif, dalam hal ini belitan W_2 , V_1 dan U_2 bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan kawat W_1 , V_2 dan U_1 bertanda titik (arus menuju pembaca). Garis fluk magnet kutub S dan N bergeser 120° dari posisi awal.
3. Saat sudut 240° . Arus I_3 bernilai positif dan I_1 dan I_2 bernilai negatif, belitan U_2 , W_1 , dan V_2 bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan kawat U_1 , W_2 dan V_1 bertanda titik (arus menuju pembaca). Garis fluk magnet kutub S dan N bergeser 120° dari posisi kedua.

³ Siswoyo.2008.Teknik Listrik Industri Jilid 2.Direktorat Jendral Manajemen Pembinaan SMK. Hal:5-5



4. Saat sudut 360^0 . Posisi ini sama dengan saat sudut 0^0 . Dimana kutub S dan N kembali keposisi awal sekali. Dari keempat kondisi diatas saat sudut 0^0 ; 120^0 ; 240^0 ; 360^0 , dapat dijelaskan terbentuknya medan putar pada stator, medan magnet putar stator akan memotong belitan rotor. Kecepatan medan putar stator ini sering disebut kecepatan sinkron, tidak dapat diamati dengan alat ukur tetapi dapat dihitung secara teoritis yaitu dengan menggunakan rumus :

$$N_s = \frac{f \times 120}{P} = \text{RPM} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

N_s = Kecepatan putaran medan stator (Rpm)

f = Frekuensi jala-jala (Hz)

P = Jumlah kutub pada motor (pole)

2.6 Slip⁴

Perbedaan kecepatan antara medan putar stator dengan rotor tergantung pada besarnya beban dari motor tersebut. Perbedaan putaran ini disebut dengan slip (S) yang dinyatakan dalam (%). Harga slip selalu berubah-ubah tergantung beban yang di pukul yaitu dari 100% saat start sampai dengan 0% saat diam ($N_s = N_r$).

$$S = \left(\frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

Dalam hal ini kecepatan relatif rotor terhadap kecepatan medan putar stator adalah n_{rel} , dimana $n_{rel} = n_s - n_r$. Frekuensi yang dibangkitkan pada belitan rotor

⁴ Sumanto, Drs. 1993. Motor Listrik Arus Bolak-Balik. Yogyakarta. Hal :43



2.7 Torsi

Torsi adalah kekuatan yang menghasilkan rotasi. Hal ini menyebabkan objek untuk berputar. Torsi terdiri dari gaya yang bekerja pada jarak. Torsi, seperti bekerja, diukur adalah pound-feet (lb-ft). Untuk menghitung torsi, kita dapat menerapkan rumus :

$$T = F \times D \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

T = torsi (lb-ft)

F = gaya (lb)

D = jarak (kaki)

Apabila satuan T diubah menjadi satuan lb ft maka :

$$1 \text{ lb} = 4,447 \text{ N} \qquad 1 \text{ lb ft} = 1,356 \text{ Nm}$$

$$1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m} \qquad 1 \text{ Nm} = 0,737 \text{ lb ft}$$

Dan untuk menghitung torsi motor pada saat beban penuh, kita dapat menerapkan rumus:

$$T = \frac{HP \times 5252}{n} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$T = \frac{P_{out}}{\omega} = \frac{V \cdot I}{w} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60 \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

T = Torsi

HP = Daya kuda

n = Kecepatan Motor Induksi

Pout = Daya keluaran (output) motor induksi

ω = Kecepatan sudut putar



2.8 Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa

Perhitungan efisiensi motor induksi melibatkan rugi-rugi yang terjadi pada stator dan rotor. Rugi-rugi stator terdiri atas rugi-rugi hysteresis, rugi-rugi eddy current, rugi-rugi inti dan rugi-rugi tembaga pada kumparan stator.

Efisiensi motor adalah perbandingan antara daya keluaran motor induksi dengan daya masukan motor induksi, yaitu dilihat pada persamaan (2.10) sebagai berikut:

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

P_{out} = Daya output motor induksi

P_{in} = Daya input motor induksi

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi-rugi} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$P_{rugi-rugi} = P_{in} - P_{out} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots (2.13)$$

$$P_{out} = \frac{T.n}{9,55} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

V = Tegangan

I = Arus

cos ϕ = Faktor Daya.

P_{out} = Daya keluaran motor induksi

$P_{rugi-rugi}$ = Rugi-rugi daya pada motor induksi

T = Torsi Motor

n = Kecepatan Motor induksi

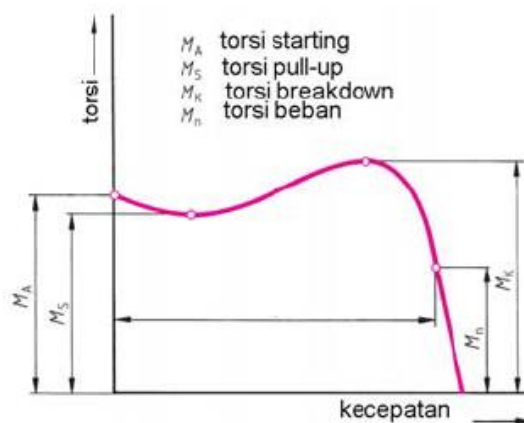


2.9 Karakteristik Motor Induksi

Karakteristik torsi motor induksi gambar-2.8, disebut torsi fungsi dari slip $T=f(\text{slip})$. Garis vertikal merupakan parameter torsi (0–100%) dan garis horizontal parameter slip (1,0–0,0).

Dikenal ada empat jenis torsi, yaitu :

1. M_A , momen torsi awal,
2. M_S , momen torsi pull-up,
3. M_K , momen torsi maksimum
4. M_B , momen torsi kerja.



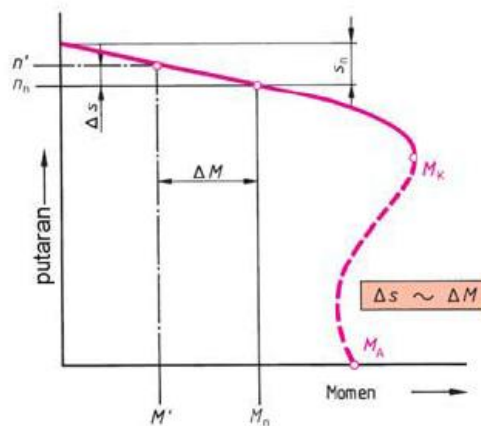
Gambar.2.8 Karakteristik Torsi Motor Induksi

Torsi awal terjadi saat motor pertama dijalankan (slip 1,0), torsi pull-up terjadi saat slip 0,7, torsi maksimum terjadi slip 0,2 dan torsi kerja berada ketika slip 0,05. Torsi beban harus lebih kecil dari torsi motor. Bila torsi beban lebih besar dari torsi motor, akibatnya motor dalam kondisi kelebihan beban dan berakibat belitan stator terbakar. Untuk mengatasi kondisi beban lebih dalam rangkaian kontrol dilengkapi dengan pengaman beban lebih disebut thermal overload, yang dipasang dengan kontaktor.

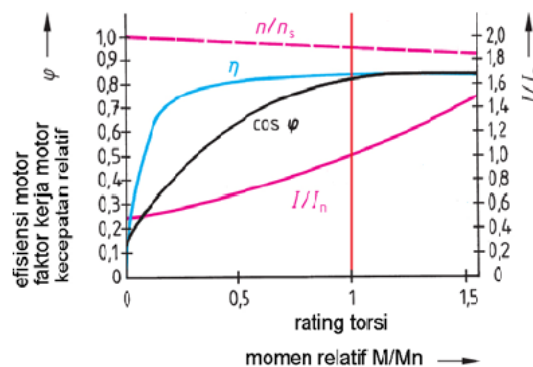


Karakteristik torsi juga bisa disajikan dalam bentuk lain, kita kenal karakteristik putaran = fungsi torsi, $n = f(\text{torsi})$ lihat gambar.2.9. Garis vertikal menunjukkan parameter putaran, garis horizontal menunjukkan parameter torsi. Ketika motor berputar pada garis n' didapatkan torsi di titik M' .

Ketika putaran berada di n_n didapatkan torsi motor di M_n . Daerah kerja putaran motor induksi berada pada area n' dan n_n sehingga torsi kerja motor induksi juga berada pada area M' dan M_n . Berdasarkan grafik $n = f(\text{torsi})$ dapat juga disimpulkan ketika putaran rotor turun dari n' ke n_n pada torsi justru terjadi peningkatan dari M' ke M_n .



Gambar.2.9. Karakteristik Putaran Fungsi Torsi Beban.



Gambar.2.10. Karakteristik Parameter Efisiensi, Putaran, Faktor Kerja dan Arus Beban



Karakteristik motor induksi lainnya lihat gambar-2.10. mencakup parameter efisiensi, faktor kerja, ratio arus dan ratio putaran. Dengan membaca karakteristik motor induksi dapat diketahui setiap parameter yang dibutuhkan. Saat torsi mencapai 100% dapat dibaca ratio arus $I/I_o = 1$; faktor kerja $\cos \phi:0,8$, efisiensi motor 0,85 dan ratio putaran $n/n_s : 0,92$.

2.10 Pengasutan Motor Induksi

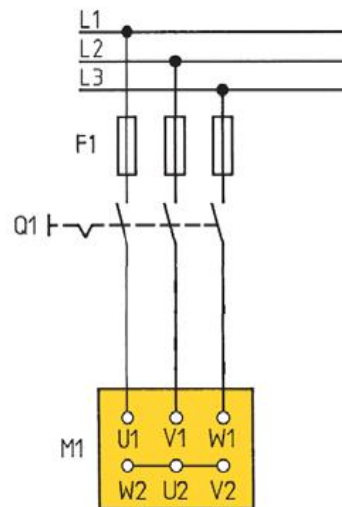
Saat motor induksi di starting secara langsung, arus awal motor besarnya antara 500% sd 700% dari arus nominal. Ini akan menyebabkan drop tegangan yang besar pada pasokan tegangan PLN. Untuk motor daya kecil sampai 5 KW, arus starting tidak berpengaruh besar terhadap drop tegangan. Pada motor dengan daya diatas 30 KW sampai dengan 100 KW akan menyebabkan drop tegangan yang besar dan menurunkan kualitas listrik dan pengaruhnya pada penerangan yang berkedip.

Pengasutan motor induksi adalah cara menjalankan pertama kali motor, tujuannya agar arus starting kecil dan drop tegangan masih dalam batas toleransi. Ada beberapa cara teknik pengasutan, diantaranya :

1. Hubungan langsung (Direct On Line = DOL)
2. Tahanan depan Stator (Primary Resistor)
3. Segitiga-Bintang (Start-Delta)
4. Pengasutan Soft starting
5. Tahanan Rotor lilit
6. Motor Dua Kecepatan Dahlander

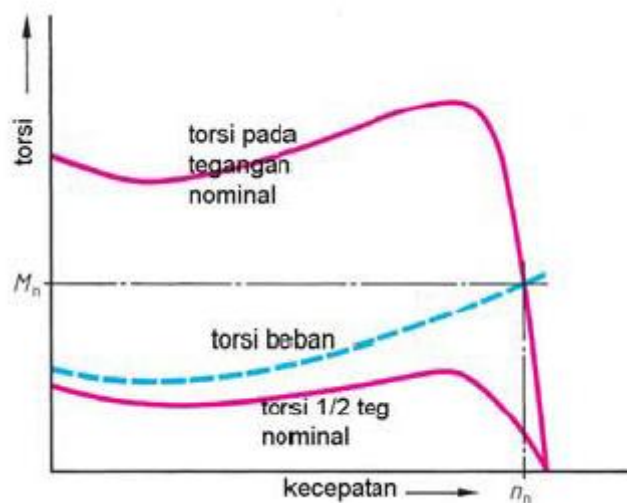
2.10.1 Pengasutan Hubungan Langsung (DOL)

Pengasutan hubungan langsung atau dikenal dengan istilah Direct On Line (DOL) gambar-2.11. Jala-jala tegangan rendah 380 V melalui pemutus rangkaian atau kontaktor Q1 langsung terhubung dengan motor induksi. Sekering berfungsi sebagai pengaman hubung singkat, jika terjadi beban lebih diamankan oleh relay pengaman beban lebih (overload relay).



Gambar.2.11. Pengawatan Motor Induksi Pengasutan Langsung (DOL)

Saat pemutus rangkaian/ kontaktor di ON kan motor induksi akan menarik arus starting antara 5 sampai 6 kali arus nominal motor. Untuk motor induksi dengan daya kecil 5 KW, hubungan langsung bisa dipakai. Arus starting yang besar akan menyebabkan drop tegangan disisi suply. Rangkaian jenis ini banyak dipakai untuk motor penggerak mekanik seperti mesin bubut, mesin bor, mesin freis.



Gambar.2.12. Karakteristik Torsi, Pengasutan DOL



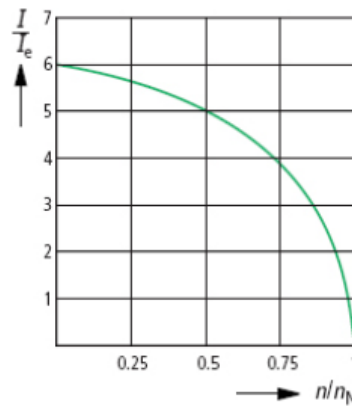
$$\text{Torsi} = \frac{(I_2)^2}{s} \dots\dots\dots(2.15)$$

Motor di starting pada tegangan nominal, akan mengalir arus mendekati arus hubung singkat = 7 In. jika slip = 4% = 0,04.

$$\left(\frac{T_{ST}}{T}\right) = \left(\frac{I_{ST}}{I}\right)^2 \times s = (7^2) \times 0,04 = 1,96$$

Besarnya torsi starting = 1,96 kali torsi nominalnya. Kesimpulannya, saat arus starting 5 s/d 6 kali arus nominal hanya menghasilkan 1,96 x Torsi nominalnya. Gambar 2.12.

Karakteristik pengasutan langsung hanya sesuai untuk motor induksi berdaya kecil, karena untuk motor daya besar akan menyebabkan pengaruh drop tegangan yang besar. Ketika starting dimulai motor induksi akan menarik arus yang besarnya sampai 6 kali arus nominalnya, Secara berangsur-angsur ketika kecepatan motor mendekati nominalnya maka arus motor akan berada pada kondisi nominalnya gambar 2.13.



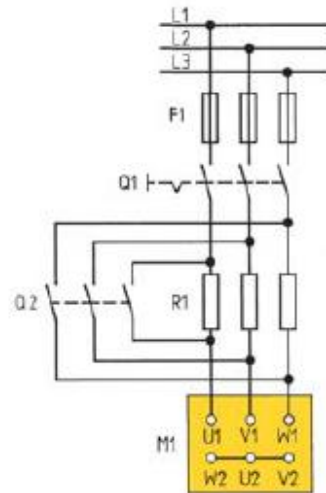
Gambar.2.13. Karakteristik Arus Fungsi Putaran,Pengasutan DOL.

2.10.2 Pengasutan Resistor Stator

Pengasutan dengan memasang resistor pada rangkaian stator gambar-2.14. Pertama kali kondisi starting kontaktor Q1 ON, maka tegangan jala-jala PLN ke rangkaian stator dengan melewati resistor R1. Fungsi resistor untuk menurunkan tegangan ke stator. Jika tegangan ke stator berkurang 50%, maka arus starting

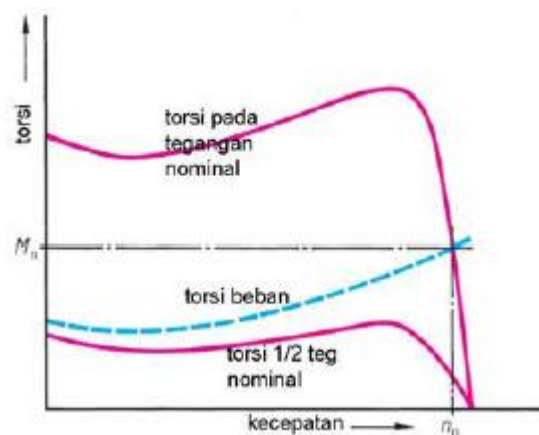


ditekan menjadi 50% yang akan menyebabkan torsi menjadi 25% dari torsi nominalnya gambar-2.15.



Gambar.2.14. Pengawatan Pengasutan Resistor Stator.

Setelah proses starting selesai, kontaktor Q2 di ON kan sehingga stator mendapat tegangan nominal dan motor akan menarik arus nominal dan hasilnya adalah torsi nominal. Belitan stator motor induksi dalam hubungan bintang, dimana terminal W2, U2 dan V2 dihubung-singkatkan.



Gambar.2.15. Karakteristik Torsi Pengasutan Resistor Stator.

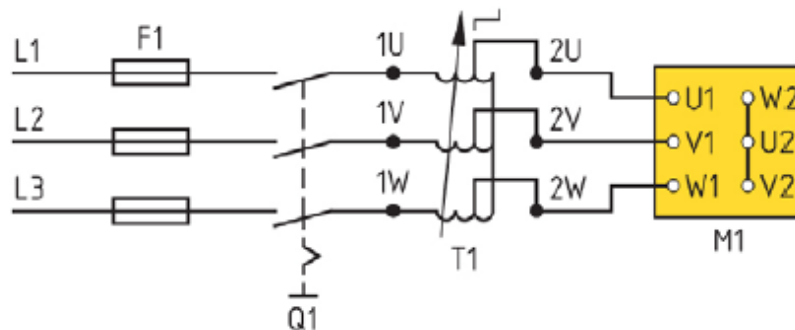


Jika x adalah faktor pengurangan tegangan, maka :

$$I_{\text{starting}} = x \cdot I_{\text{hs}} \text{ dan } T_{\text{starting}} = x^2 \cdot T_{\text{hs}}$$

$$T_{\text{orsi}} = I^2 R / s$$

Motor di starting pada tegangan nominal, akan mengalir arus mendekati arus hubung singkat = $7 I_{\text{hs}}$. jika slip = 4% = 0,04; $x = 0,5$ Pengasutan resistor dapat digantikan dengan autotransformator tiga fasa, yang dihubungkan seri dengan belitan stator gambar-2.16. Tegangan ke stator dapat diatur sesuai kebutuhan, misalkan $k = 80\%$, 70% atau 50% .



Gambar.2.16. Pengawatan Pengasutan Tegangan dengan Autotransformator

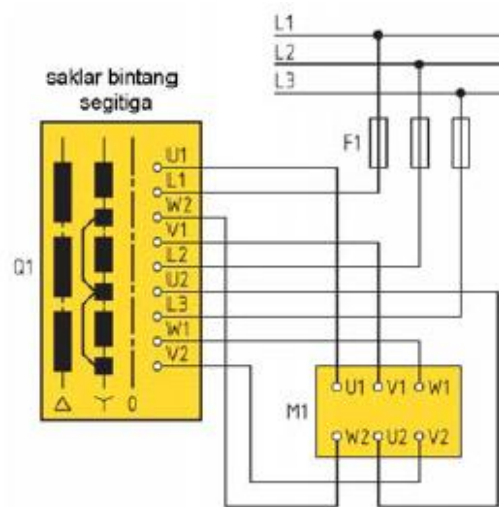
$$T_{\text{starting}} = k^2 \cdot T_{\text{hs}}$$

$$\text{Misalkan } k = 50\%. T_{\text{hs}} = 1,96$$

$$T_{\text{starting}} = (0,5)^2 \cdot 1,96 = 0,5$$

2.10.3 Pengasutan Saklar Bintang-Segitiga.

Motor induksi dengan pengasutan segitiga bintang dengan saklar manual gambar-2.17. Rangkaian bintang segitiga juga dapat dilaksanakan dengan menggunakan kontaktor secara elektromagnetik. Motor induksi dirangkai dengan saklar manual bintangsegitiga.



Gambar.2.17. Pengawatan Pengasutan Bintang-Segitiga.

Saat saklar posisi tuas 0, semua rangkaian terbuka, sehingga motor dalam kondisi tidak bertegangan. Saat saklar posisi bintang (tanda Y), L1-U1; L2-V1 dan L3-W1, sementara W2-U2-V2 dihubungkan singkatkan.

Tegangan ke stator :

$$V_{\text{stator}} = V_{\text{phasa}} = \frac{V_{\text{line}}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{\text{stator}} = I_{\text{phasa}} = \frac{I_{\text{line}}}{\sqrt{3}}$$

$$T_{\text{starting}} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 \times T_{\text{hs}}$$

Jika diketahui $T_{\text{hs}} = 1,96$ T nominal

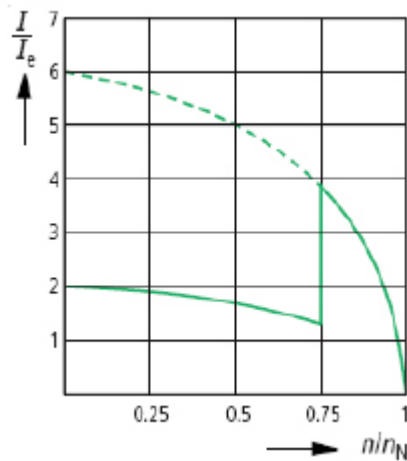
$$T_{\text{starting}} = \frac{1}{3} \times 1,96 = 0,65$$

Ketika saklar posisi segitiga (tanda Δ), motor induksi bekerja pada tegangan normal, arus nominal dan torsi nominal. Belitan stator mendapatkan tegangan sebesar tegangan phasa ke phasa. Harus diperhatikan nameplate motor untuk hubungan segitiga bintang harus disesuaikan dengan tegangan kerja yang digunakan, jika salah menggunakan belitan akan terbakar.

Karakteristik arus fungsi putaran $I = f(n)$ pengasutan bintang-segitiga gambar-2.18. Ketika motor terhubung bintang, arus starting dua kali arus nominalnya sampai 75% dari putaran nominal. Ketika motor terhubung segitiga

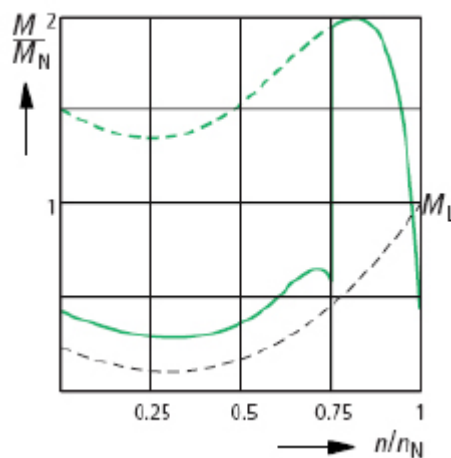


arus motor meningkat empat kali arus nominalnya. Secara berangsur-angsur arus motor menuju nominal saat putaran motor nominal.



Gambar.2.18. Karakteristik Arus Pengasutan Bintang-Segitiga.

Karakteristik torsi fungsi putaran $T = f(n)$ pengasutan bintang-segitiga gambar-2.19. Memperlihatkan ketika motor terhubung bintang, torsi starting sebesar setengah dari torsi nominalnya sampai 75% dari putaran nominal. Ketika motor terhubung segitiga torsi motor meningkat menjadi dua kali lipat torsi nominalnya. Secara berangsur-angsur torsi motor mendekati nominal saat putaran motor nominal.

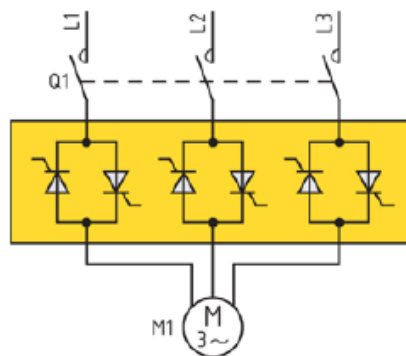


Gambar.2.19. Karakteristik Torsi Pengasutan Bintang-Segitiga



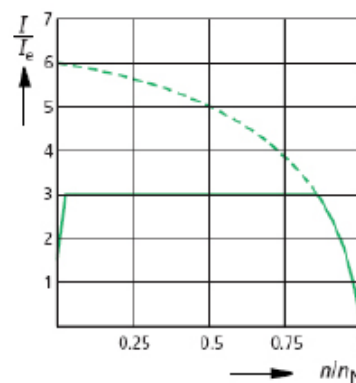
2.10.4 Pengasutan Soft Starting

Pengasutan Soft starting menggunakan komponen solid-state, yaitu enam buah Thyristor yang terhubung antiparalel gambar-2.20. Saat saklar Q1 di ON kan tegangan akan dipotong gelombang sinusoidanya oleh enam buah Thyristor yang dikendalikan oleh rangkaian triger. Dengan mengatur sudut penyalan triger Thyristor, sama mengatur tegangan ke belitan stator motor. Dengan k sebagai ratio tegangan asut dengan tegangan nominal besarnya torsi motor starting.



Gambar.2.20. Pengawatan Pengasutan Soft Starting.

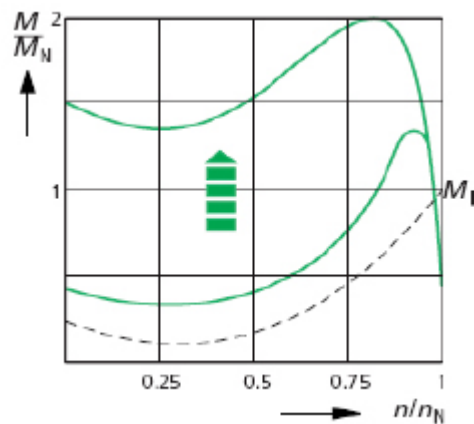
$T_{starting} = k^2$. The Karakteristik arus fungsi putaran pada pengasutan soft starting, memperlihatkan grafik arus starting besarnya tiga kali arusnya nominalnya sampai motor mencapai putaran mendekati 85% gambar-2.21. Arus motor berangsur angsur menuju arus nominalnya ketika putaran motor mendekati nominalnya. Pengasutan solid state makin diminati karena harganya ekonomis dan handal.



Gambar.2.21. Karakteristik Arus Pengasutan Soft Starting.



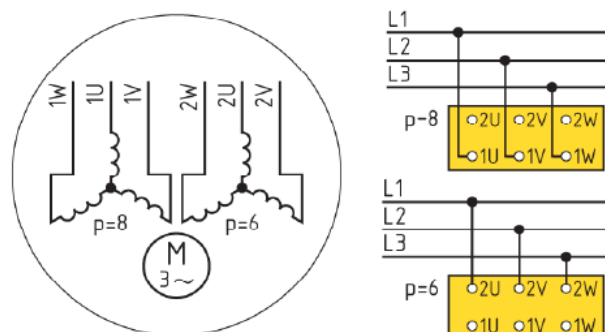
Karakteristik torsi fungsi putaran $T = f(n)$ pengasutan soft starting, memperlihatkan torsi starting sebesar setengah dari torsi nominalnya, berangsur-angsur torsi meningkat mendekati 140% torsi saat putaran mendekati 90% nominalnya gambar-2.22. Secara berangsur-angsur torsi motor mendekati nominal saat putaran motor nominal.



Gambar.2.22. Karakteristik Torsi Pengasutan Soft Starting

2.10.5 Motor Dua Kecepatan (Dahlander)

Motor dua kecepatan (Dahlander) dirancang khusus memiliki dua kelompok belitan yang berbeda. Belitan pertama memiliki delapan pasang kutub ($p=8$, kecepatan 370 Rpm) dengan ujung terminal 1U, 1V dan 1W yang dihubungkan dengan sumber listrik tiga fasa L1, L2 dan L3. Belitan kedua memiliki enam pasang kutub ($p=6$, kecepatan 425 Rpm) dengan ujung belitan 2U, 2V dan 2W Gambar-2.23.

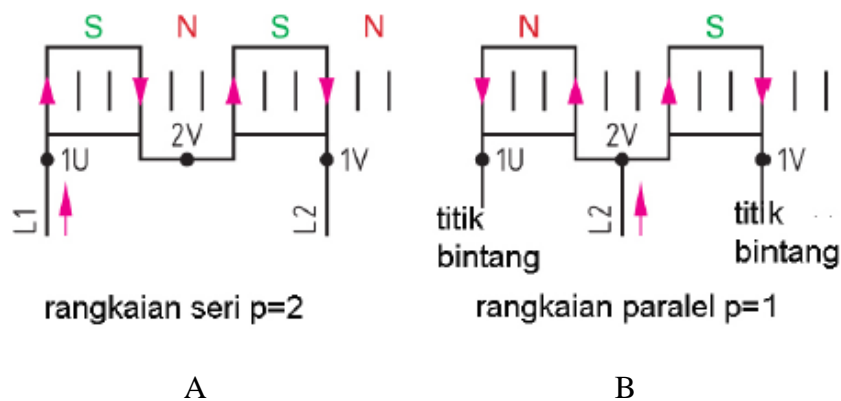


Gambar-2.23. Rangkaian Belitan Motor Dua Kecepatan (Dahlander)



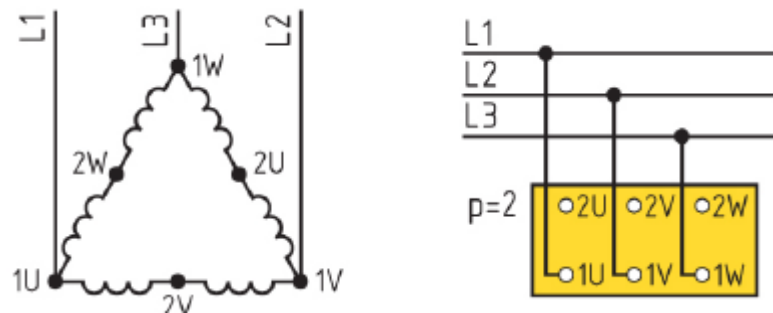
Penjelasan cara kerja motor dua kecepatan terletak pada cara pemasangan belitan statornya. Perhatikan belitan stator yang memiliki empat kutub atau 2 pasang kutub utara-selatan ($p=2$, kecepatan 1450 Rpm), belitan stator dihubungkan secara seri. Aliran arus listrik dari L1 menuju terminal 1U memberikan arus pada koil pertama, secara seri masuk ke koil kedua menghasilkan dua pasang kutub, terminal 1V terhubung dengan L2. Gambar-2.24.a.

Sedangkan pada pada stator dengan dua kutub atau satu pasang kutub ($p=1$, kecepatan 2950 Rpm), belitan stator disambungkan secara paralel. Aliran arus listrik dari L2 menuju terminal 2V memberikan arus pada koil pertama, dan koil kedua secara paralel menghasilkan satu pasang kutub saja dan terminal 1U dan 1V terhubung dengan L1. Gambar-2.24.b.



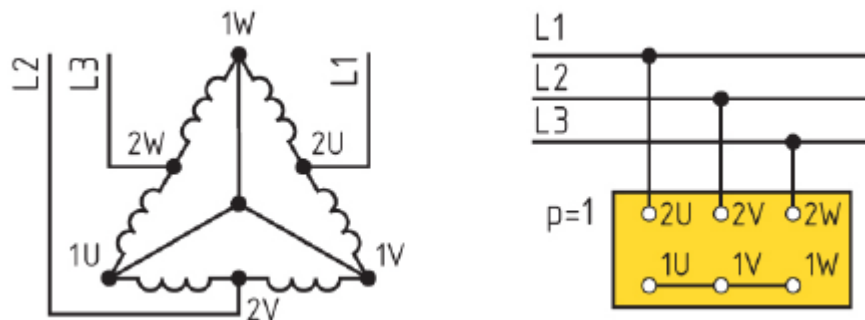
Gambar-2.24. Hubungan Belitan Motor Dahlander

Penjelasan saat ($p=2$, kecepatan 1450 Rpm) bagian belitan motor terhubung segitiga dimana sumber daya L1 ke terminal 1U, L2 menuju terminal 1V dan L3 terhubung ke terminal 1W. Sementara ujung terminal 2U, 2V dan 2W tidak dibiarkan terbuka. Gambar-2.25. Perhatikan tiap fasa terdapat dua belitan yang terhubung secara seri yang akan menghasilkan dua pasang kutub.



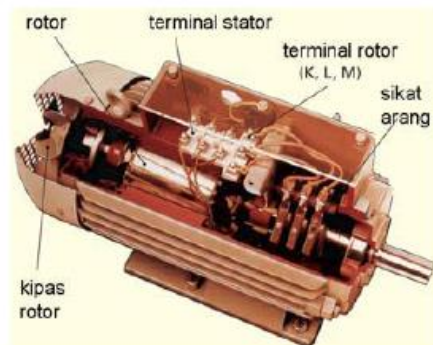
Gambar-2.25. Hubungan Belitan Segitiga Dahlander Berkutub Empat

Pada saat ($p=1$, kecepatan 2950 Rpm) bagian belitan motor terhubung secara paralel bintang dimana sumber daya L1 ke terminal 2U, L2 menuju terminal 2V dan L3 terhubung ke terminal 2W. Sementara ujung terminal 1U, 1V dan 1W dihubungkan singkatkan. Gambar-2.26. Perhatikan tiap fasa terdapat dua belitan yang terhubung bintang paralel yang akan menghasilkan satu pasang kutub saja.

Gambar-2.26. Hubungan Belitan Bintang Ganda, Berkutub dua ($p=1$)

2.10.6 Pengasutan Motor Slip Ring

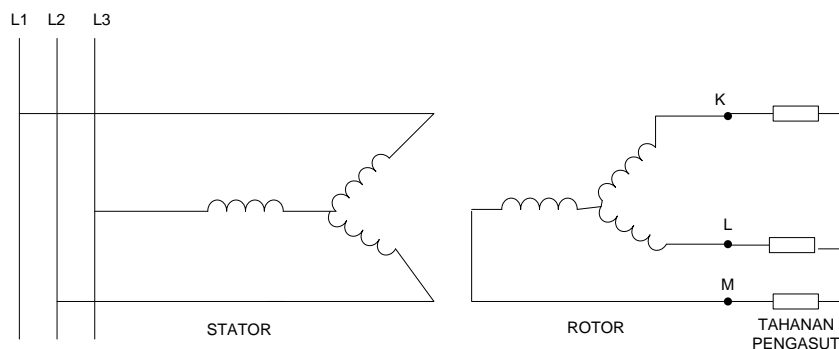
Motor slipring gambar-2.27 atau sering disebut motor rotor lilit termasuk motor induksi 3 fasa dengan rotor belitan dan dilengkapi dengan slipring yang dihubungkan dengan sikat arang ke terminal. Motor slipring dirancang untuk daya besar.



Gambar. 2.27. Bentuk Fisik Motor Induksi Rotor Slip Ring.

Motor slipring pada terminal box memiliki sembilan terminal, enam terminal terhubung dengan tiga belitan stator masing-masing ujungnya (U1-U2, V1-V2 dan W1-W2), tiga terminal (K-L-M) terhubung ke belitan rotor melalui slipring. Ada tiga cincin yang disebut slipring yang terhubung dengan sikat arang. Sikat arang ini secara berkala harus diganti karena akan memendek karena aus.

Pengasutan rotor lilit gambar-2.28 belitan rotor yang ujungnya terminal K-L-M dihubungkan dengan resistor luar yang besarnya bisa diatur. Dengan mengatur resistor luar berarti mengatur besarnya resistor total yang merupakan jumlah resistansi rotor dan resistansi luar ($R_{\text{rotor}} + R_{\text{luar}}$), sehingga arus rotor I_2 dapat diatur.



Gambar. 2.28 Belitan Stator dan Rotor Motor Slipring Berikut Resistor pada Rangkaian Rotor .



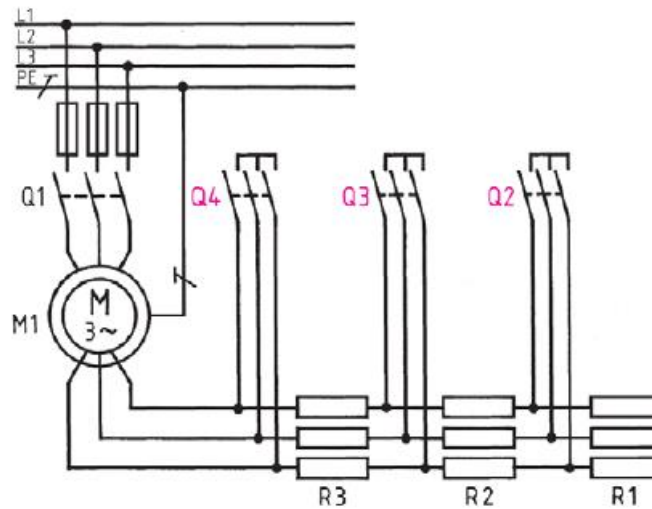
Ketika resistor berharga maksimum, arus rotor yang mengalir minimum, sekaligus memperbaiki faktor kerja motor. Kelebihan pengasutan rotor lilit yaitu diperoleh torsi starting yang tinggi, dengan arus starting yang tetap terkendali.

Resistansi rotor luar dibuat bertahap gambar-2.29 dengan tujuh tahapan. Saat tahap-1 nilai resistor maksimum kurva torsi terhadap slip, berikutnya tahap 2, 3, 4, 5, 6 dan tahap 7. Antara tahap-1 sampai tahap- 7 selisih slip sebesar Δs . Dengan demikian pengaturan resistor rotor juga berfungsi mengatur putaran rotor dari putaran rendah saat tahap-1 menuju putaran nominal pada tahap-7.



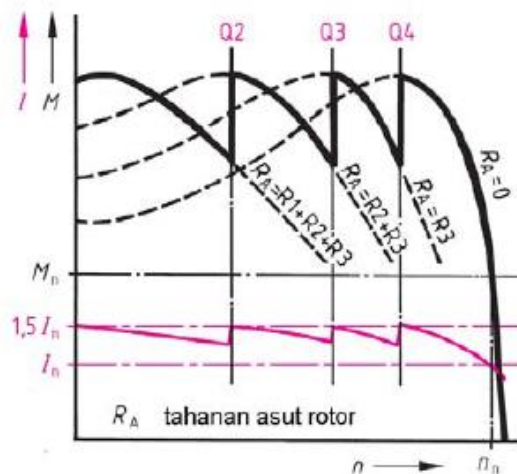
Gambar 2.29 Karakteristik Torsi Motor Slip Ring.

Pengaturan resistor rotor dapat menggunakan kontaktor electromagnet Gambar-2.30. Dengan menggunakan 3 tahap. Kontaktor Q1 menghubungkan stator dengan sumber daya listrik.



Gambar.2.30. Pengawatan Motor Slip Ring dengan Tiga Tahapan Resistor

1. Ketika Q2, Q3, Q4 OFF resistansi rotor maksimum ($R_A = R_1 + R_2 + R_3$).
2. Saat Q2 ON resistansi luar $R_A = R_2 + R_3$.
3. Ketika Q3 ON resistansi $R_A = R_3$ saja.
4. Ketika Q4 ON rotor kondisi terhubung singkat $R_A = 0$, motor bekerja nominal.



Gambar-2.31. Karakteristik Torsi dengan 3 Tahap



Grafik momen motor rotor lilit Gambar-2.31 dengan empat tahapan. Tahap pertama yang saat Q1 kondisi ON dan Q2+Q3+Q4 posisi OFF. maka rangkaian tahanan rotor besarnya maksimum, besarnya arus starting 1,5 In sampai beberapa saat ke tahap kedua. Tahap kedua Q2 kondisi ON dan Q3+Q4 posisi OFF, arus starting 1,5 In menuju In sampai tahap ketiga. Tahap ketiga Q3 kondisi ON dan Q4 posisi OFF, arus starting kembali ke posisi 1,5 In dan terakhir posisi tahap keempat saat Q4 ON semua resistor dihubungsingkatkan, dan motor slipring bekerja kondisi nominal.

2.11 Karakteristik Motor Slipring

Kumparan stator diletakkan pada jaringan tiga fasa sehingga terbangkit medan putar. Medan putar ini memotong kawat stator dan menginduksikan tegangan mula primer. Dari keadaan diam (slip $s = 100\%$) tercapai putaran tinggi dalam keadaan motor berbeban (slip sekitar 3 sampai 6 %). Dengan adanya slip, maka kecepatan potong medan putar akan diperkecil. Dengan demikian, terjadilah suatu pengurangan tegangan rotor, frekuensi rotor dan tahanan induktif rotor. Tegangan rotor dan frekuensi rotor berubah secara linier bersamaan dengan slip (berbanding lurus). Pada saat beroperasi, dikarenakan tahanan induktifnya kecil, maka tahanan ohm pada jaringan rotor menjadi dominan sehingga tegangan rotor dan arusnya terletak se-fasa.

Dengan naiknya jumlah putaran rotor dari motor slipring, maka frekuensi dan besarnya tegangan rotor yang diinduksikan akan berkurang. Suatu motor induksi slipring dengan kumparan rotor dihubung singkat mempunyai arus penyalaan yang besar, sebab tegangan diam dari rotor mengakibatkan arus rotor besar. Oleh karena itu, tahanan dalam jaringan arus rotor diperbesar melalui starter. Setelah itu arus penyalaan akan mengecil dan motor berputar lambat. Dengan pembangkitan jumlah putaran tahanan asut akan diperkecil, dimana hal ini akan memperkecil tegangan induksi. Moment puntir dari suatu motor asinkron tergantung dari fluksi magnet medann puntir stator dan dari medan puntir rotor, hal ini dapat dianggap sebagai dari pengambilan arus rotornya.



Dengan penambahan jumlah putaran di dalam rotor dimana tegangan induksi arus rotornya dan moment puntirnya akan kembali mengecil. Jika pengecilan pergeseran fasa berlebihan, maka moment puntirnya naik. Jika pengecilan tegangan induksinya berlebihan, maka momen puntirnya akan turun (jatuh).

Perbandingan moment puntir berdasarkan VDE 0530 diberi nama :

- a) Momen Mula (M_A), diakibatkan momen puntir dalam keadaan diam. Pada motor induksi slipring, momen ini relatif tinggi dan motor akan bekerja dengan baik.
- b) Momen pelana (M_A), adalah momen terkecil pada poros suatu motor diantara moment mula dan momen tarik dan pada motor induksi slipring moment ini diabaikan.
- c) Momen tarik (M_K), adalah momen yang terbesar, dimana motor yang terletak diantara momen pelana dan momen nominal dapat dijalankan. Momen ini besarnya 1,6 kali sampai 2,5 kali lebih besar dari momen nominal.

2.12 Penggunaan Motor Slipring

Seperti halnya pertambangan pada umumnya, material-material di area pertambangan sangat beranekaragam, mulai dari yang lunak dan cair seperti lumpur sampai tanah bebatuan yang keras seperti batubara dan bebatuan lainnya. Karena hal inilah beban yang diangkat oleh bucket maupun beltconveyor menjadi tidak konstan sehingga motor yang cocok digunakan adalah motor slipring. Karena motor ini kecepatannya dapat di atur step by step, sehingga kecepatan putaran motor dapat di sesuaikan dengan kondisi beban yang diangkat.

2.13 Keuntungan dan Kerugian Motor Slipring

- 1) Keuntungan motor slipring :
 - a. Salah satu keuntungan motor slipring adalah resisten dapat disisipkan dalam rangkaian rotor untuk mendapatkan torsi asut yang tinggi (pada



asutan yang rendah) dan kemudian mematikan rangkaian asut (cut-out) untuk memperoleh keadaan putaran yang optimum.

- b. Bisa digunakan pada beban yang cenderung sangat besar sifat beban berubah-ubah.
- c. Arus motor slipring bisa ditekan, sedangkan motor induksi lain arus startingnya bisa ditekan.

2) Kerugian motor slipring :

- a. Komponen yang digunakan lebih banyak dari pada motor induksi 3 phasa lainnya
- b. Memerlukan kontrol external sehingga diperlukan biaya yang lebih besar untuk pengoperasian awalnya.
- c. Harga jual motor slipring lebih mahal dibanding dengan motor induksi lainnya.
- d. Komponen internal yang digunakan lebih banyak dari pada motor induksi lainnya.

2.14 Arus Start Pada Motor Induksi 3 Fasa.

Persamaan berikut dapat digunakan untuk menentukan besar daya yang diperlukan untuk start motor :

$$S_{start} = S_{rated} \times \text{Letter Code Factor} \dots\dots\dots(2.16)$$

Keterangan :

S_{start} = Daya yang diperlukan untuk start motor (KVA)

S_{rated} = Daya nominal motor (Hp)

Letter Code Factor = Faktor pengali (KVA/Hp)



Berdasarkan jenis motor induksi yang dapat dilihat dalam tabel berikut.

Berdasarkan NEMA Letter Code

Tabel 2.1 faktor pengali motor induksi

Huruf	Faktor Pengali (Kva/Hp)
A	0-3,15
B	3,15-3,55
C	3,55-4,00
D	4,00-4,50
E	4,50-5,00
F	5,00-5,60

$$I_{start} = \frac{S_{start}}{\sqrt{3} V_{nominal}} \dots \dots \dots (2.17)$$

Keterangan :

I_{start} = Arus starting motor (Ampere)

$V_{nominal}$ = Tegangan nominal motor (Volt)

Prosedur perhitungan jatuh tegangan pada motor saat starting motor adalah dengan menghitung impedansi antara motor sampai pada titik dimana tegangan dapat diasumsikan konstan. Impedansi suatu motor dapat ditentukan dari katalog pabrikasinya, yang biasanya memberikan data arus beban penuh dan arus block rotor.

Persamaan yang dapat dipakai untuk menentukan tegangan motor pada saat starting adalah :

Dimana :

$$V_s = \frac{Z_m \times V_t}{\sqrt{(R_m + R_s)^2 + \sqrt{(X_m + X_s)^2}} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana :

V_t = tegangan nominal motor



Z_m = impedansi motor

$$R_m = Z_m \cdot \cos \phi_m \dots \dots \dots (2.19)$$

$$X_m = Z_m \cdot \sin \phi_m \dots \dots \dots (2.20)$$

$\cos \phi_m$ = power faktor motor

R_s = Resistansi total antara motor sampai pada titik dimana tegangan dapat diasumsikan konstan

X_s = reaktansi total antara motor sampai pada titik dimana tegangan diasumsikan konstan

Semua impedansi dinyatakan dalam satuan ohm, persen atau satuan perunit dengan base yang telah ditentukan. Jika drop tegangan dihitung dengan mengabaikan resistansi rangkaian dan hanya memperhitungan reaktansi rangkaian, maka persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi :

$$V_s = \frac{Z_m}{Z_m + X_s} \times V_t \dots \dots \dots (2.21)$$

Impedansi motor dapat dihitung dengan persamaan :

$$Z_m = \frac{V_m}{\sqrt{3} \cdot I_s} \dots \dots \dots (2.22)$$

Dimana :

V_m = tegangan rating motor (Volt)

I_s = arus start pada tegangan rated motor (Ampere)

2.15 Definisi Tentang MATLAB (Matrix Laboratory)

MATLAB atau yang kita sebut dengan (Matrix Laboratory) yaitu sebuah program untuk menganalisis dan mengkomputasi data numerik, dan MATLAB juga merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan, yang dibentuk dengan dasar pemikiran yang menggunakan sifat dan bentuk matriks.

MATLAB yang merupakan singkatan dari Matrix Laboratory, merupakan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh The Mathwork Inc. yang hadir dengan fungsi dan karakteristik yang berbeda dengan bahasa pemrograman lain yang sudah ada lebih dahulu seperti Delphi, Basic maupun C++.



2.16 Pengenalan dan Program Aplikasi MATLAB

Pada awalnya program aplikasi MATLAB ini merupakan suatu interface untuk koleksi rutin-rutin numerik dari proyek LINPACK dan EISPACK, dan dikembangkan dengan menggunakan bahasa FORTRAN, namun sekarang ini MATLAB merupakan produk komersial dari perusahaan Mathworks, Inc. Yang dalam perkembangan selanjutnya dikembangkan dengan menggunakan bahasa C++ dan assembler, (utamanya untuk fungsi-fungsi dasar MATLAB).

MATLAB telah berkembang menjadi sebuah environment pemrograman yang canggih yang berisi fungsi-fungsi built-in untuk melakukan tugas pengolahan sinyal, aljabar linier, dan kalkulasi matematis lainnya. MATLAB juga menyediakan berbagai fungsi untuk menampilkan data, baik dalam bentuk dua dimensi maupun dalam bentuk tiga dimensi.

MATLAB juga bersifat extensible, dalam arti bahwa seorang pengguna dapat menulis fungsi baru untuk menambahkan pada library, ketika fungsi-fungsi built-in yang tersedia tidak dapat melakukan tugas tertentu. Kemampuan pemrograman yang dibutuhkan tidak terlalu sulit bila kita telah memiliki pengalaman dalam pemrograman bahasa lain seperti C, PASCAL, atau FORTRAN.

MATLAB (Matrix Laboratory) yang juga merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks, sering kita gunakan untuk teknik komputasi numerik, yang kita gunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matrik, optimasi, aproksimasi dll. Sehingga Matlab banyak digunakan pada :

- Matematika dan komputansi,
- Pengembangan dan algoritma,
- Pemrograman modeling, simulasi, dan pembuatan prototipe,
- Analisa data , eksplorasi dan visualisasi,
- Analisis numerik dan statistik,



- Pengembangan aplikasi teknik,

MATLAB juga merupakan bahasa pemrograman computer berbasis window dengan orientasi dasarnya adalah matrik, namun pada program ini tidak menutup kemungkinan untuk pengerjaan permasalahan non matrik. Selain itu matlab juga merupakan bahasa pemrograman yang berbasis pada obyek (OOP), namun disisi lain karena matlab bukanlah type compiler, maka program yang dihasilkan pada matlab tidak dapat berdiri sendiri.

Namun agar hasil program dapat berdiri sendiri maka harus dilakukan transfer pada bahasa pemrograman yang lain, misalnya C++. Pada matlab terdapat tiga windows yang digunakan dalam operasinya yaitu ;

- Command windows (layar perintah)
- Figure windows (layar gambar),
- Note Pad (sebagai editor program).



