



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi Tiga Fasa¹

Motor listrik berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa tenaga putar. Motor listrik terdiri dari dua bagian yang sangat penting yaitu stator atau bagian yang diam rotor atau bagian berputar. Pada motor AC, kumparan rotor tidak menerima energi listrik secara langsung, tetapi secara induksi seperti yang terjadi pada energi kumparan transformator. Oleh karena itu motor AC dikenal dengan motor induksi. Dilihat dari kesederhanaannya, konstruksinya yang kuat dan kokoh serta mempunyai karakteristik kerja yang baik, motor induksi tiga fasa yang cocok dan paling banyak digunakan dalam bidang industri.

Penggunaan motor induksi yang banyak dipakai di kalangan industri mempunyai keuntungan sebagai berikut :

1. Bentuknya yang sederhana dan memiliki konstruksi yang kuat dan hampir tidak pernah mengalami kerusakan yang berarti .
2. Harga relatif murah dan dapat diandalkan .
3. Efisiensi tinggi pada keadaan berputar normal, tidak memerlukan sikat sehingga rugi-rugi daya diakibatkannya dari gesekan dapat dikurangi.
4. Perawatan waktu mulai beroperasi tidak memerlukan starting tambahan khusus dan tidak harus sinkron.

Namun disamping hal tersebut diatas, terdapat pula faktor-faktor kerugian yang tidak menguntungkan dari motor induksi yaitu sebagai berikut:

1. Pengaturan kecepatan dari motor induksi sangat mempengaruhi efisiensinya.
2. Kecepatan motor induksi akan menurun seiring dengan bertambahnya beban, tidak seperti motor DC atau motor shunt.
3. Kopel awal mutunya rendah dibandingkan dengan motor DC shunt.



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 di sekitar 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 Klasifikasi Motor Induksi¹

Motor listrik AC memiliki beberapa jenis, yang jenis ini membedakan beberapa faktor utama yang antara lain berdasarkan prinsip kerja, berdasarkan macam arus dan berdasarkan kecepatan.

2.2.1 Prinsip Kerja

Berdasarkan prinsip kerja motor sebagai berikut :

1. Motor Sinkron.
 - Biasa (tanpa slip ring)
 - Super (dengan slip ring)
2. Motor Asinkron.
 - Motor Induksi (*Squirrel Cage Rotor & Winding Rotor*)¹

¹ Septianto, Fajar; Widodo, Achmad; Sinaga, Nazaruddin. Analisa Penurunan Efisiensi Motor Induksi Akibat Cacat Pada Cage Ball Bantalan. Jurnal teknik Mesin, 2015, 3.4: 397-407.

2.2.2 Macam Arus

Berdasarkan jenis macam arus sebagai berikut:

1. Satu phasa

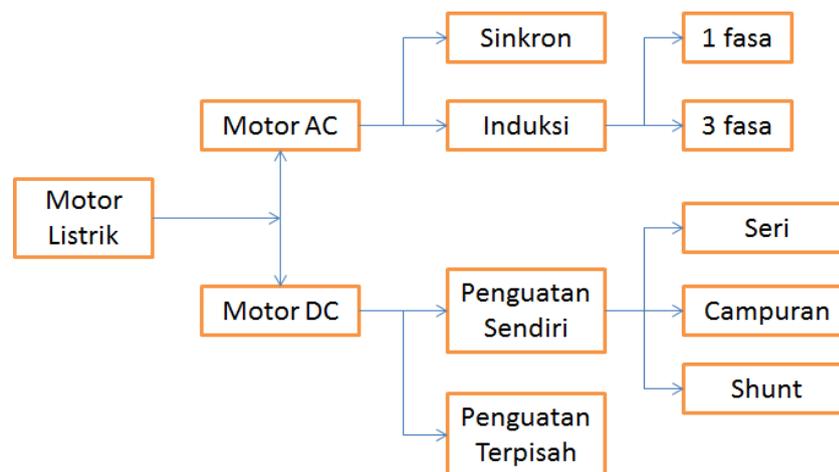
Motor ini hanya memiliki satu gulungan *stator*, beroperasi dengan pasokan daya satu phasa, memiliki sebuah rotor kandang tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya. Sejauh ini motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti kipas angin mesin cuci dan pengering pakaian, dan untuk penggunaan hingga 3 sampai 4 HP.

2. Tiga Phasa

Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga phasa yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, dapat memiliki kandang tupai atau gulungan rotor (walaupun 90% memiliki rotor kandang tupai) dan penyalaan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor di industri menggunakan jenis ini.

Berdasarkan Kecepatan:

- Kecepatan Konstan
- Kecepatan Berubah
- Kecepatan diatur



Gambar 2.1 Struktur Klasifikasi Motor Listrik



2.3 Jenis-Jenis Motor induksi Tiga Fasa

Karakteristik motor induksi Tiga fasa berdasarkan kelasnya sebagai berikut:

2.3.1 Kelas A

Motor induksi 3 fasa Kelas A memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Torsi awal normal (150-170%) dari nilai ratingnya dan torsi breakdownnya tinggi
- Arus awal relative tinggi dan slip rendah ($0.0015 < \text{slip} < 0.005$)
- Tahanan rotor kecil sehingga efisiensi tinggi
- Baik digunakan untuk torsi beban kecil saat start dan cepat mencapai putaran penuhnya

Contoh : Pompa dan Fan

2.3.2 Kelas B

Motor Induksi 3 Fasa Kelas B memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Torsi awal normal hampir sama seperti kelas A
- Arus awal rendah (lebih rendah 75% dari kelas A) dan Slip rendah ($\text{slip} < 0.005$)
- Arus awal dapat diturunkan karena rotor mempunyai reaktansi tinggi
- Rotor terbuat dari plat atau saklar ganda
- Efisiensi dan faktor dayanya pada saat berbeban penuh tinggi

Contoh : *Fan, Blower*, dan Motor Generator set

2.3.3 Kelas C

Motor Induksi 3 Fasa Kelas C memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Torsi awal lebih tinggi (200 % dari nilai ratingnya)
- Arus awal rendah dan Slip rendah ($\text{slip} < 0.005$)
- Reaktansi rotor lebih tinggi dari kelas B
- Rotor menggunakan sankar rendah

Contoh : *Copressor, Konveyor, Crushrs, dan Fort*

2.3.4 Kelas D

- Torsi awal yang paling tinggi dari kelas lainnya
- Arus awal rendah dan slip tinggi

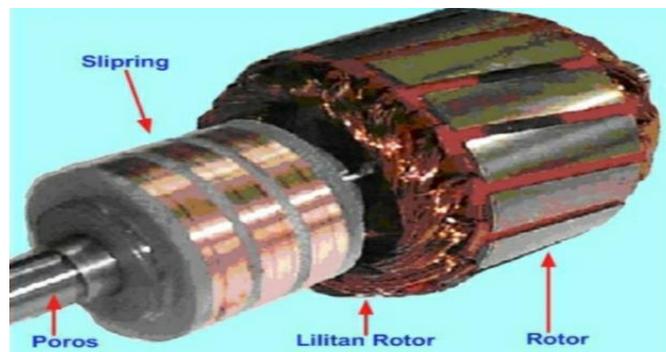
- c. Motor ini cocok untuk aplikasi dengan perubahan beban dan perubahan kecepatan secara mendadak pada motor
- d. Ketika torsi maksimum slip mencapai harga 0.5 atau lebih, sedangkan ketika beban penuh slip antara 8% hingga 15% sehingga efisiensinya rendah

Contoh : *Elevator, Crane, dan Ekstraktor.*

2.4 Jenis-jenis Motor Induksi Tiga Fasa Berdasarkan bentuk Rotornya²

2.4.1 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 2.2 Motor Rotor Lilit

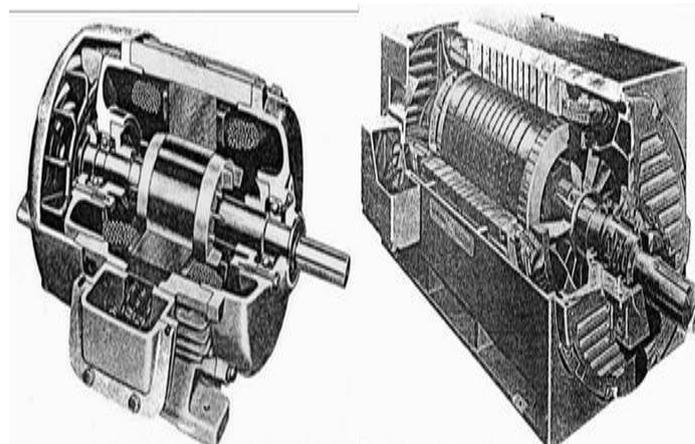
2.4.2 Motor Induksi Tiga Fasa Sangkar tupai (*Squirrelcage Motor*)

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 yang dipabrikasi. Lilitan kumparan stator diletakan 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 2.3 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 dengau 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.² Motor induksi dengan rotor sangkar ditunjukkan pada gambar 2.4 di bawah ini :

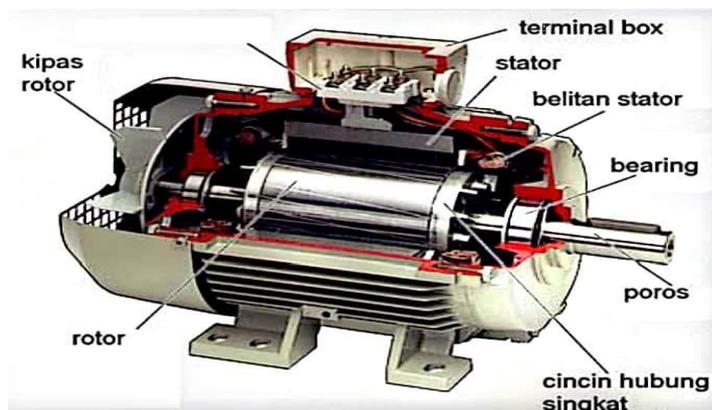


Gambar 2.4 Konstruksi Motor Induksi Rotor Sangkar

² Susila, Anton; Windarto, Joko, Karnoto. Perancangan Motor Induksi Satu Fasa Jenis Rotor sangkar (Squirrel Cage). 2011. PhD Thesis. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik.

2.5 Konstruksi Motor Tiga Fasa

Pada dasarnya motor induksi tiga terdiri dari suatu bagian yang tidak berputar. (Stator) dan bagian yang berputar (rotor) seperti gambar 2.5. Secara ringkas stator terdiri dari blek-blek dinamao yang berisolasi pada satu sisinya dan mempunyai ketebalan 0,35-0,5 mm, disusun menjadi sebuah paket blek yang berbentuk gelang. Disisi dalamnya dilengkapi dengan alur-alur. Didalam alur ini terdapat perbedaan antara motor asinkron dengan lilitan sarang (rotor sarang atau rotor hubung pendek) dan gelang seret dengan lilitan tiga fasa. Atau dari sisi lainnya bahwa inti besi stator dan rotor terbuat dari lapisan baja silikon tebalnya 0,35- 0,5 mm, tersusun rapi, masing-masing terisolasi secara elektrik dan diikat pada ujung-ujungnya.



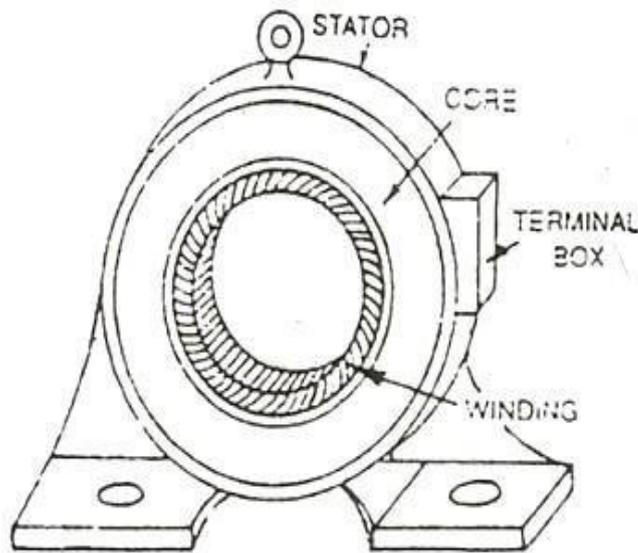
Gambar 2.5 Konstruksi Motor Tiga Fasa

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 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 kerana kendor atau bahkan lepas akibat pengaruh getaran secara terus menerus.

Pada dasarnya inti besi stator dan belitan rotor motor tak serempak ini sama dengan stator dan belitan stator serempak. Kesamaan ini dapat ditunjukkan bahwa pada motor mesin tak serempak yang dipasang / sesuai dengan stator mesin tak serempak akan dapat bekerja dengan baik.

2.5.1 Stator

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan yang masing-masing berbeda fasa dan menerima arus dari setiap fasa tersebut yang disebut kumparan stator. Stator terdiri dari plat-plat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam memiliki banyak alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi. Jika kumparan stator mendapat suplai arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan timbul flux magnet putar. Karenan adanya flux magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator.³



Gambar 2.6 Konsstruksi Stator

³ Siswoyo, Teknik Listrik Industri (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008). Hal. 5-7.



1. Konstruksi stator motor induksi pada dasarnya terdiri dari bagian sebagai berikut.
 - a. Rumah stator (rangka stator) dari besi tuang.
 - b. Inti stator dari besi lunak atau baja silikon.
 - c. Alur, bahannya sama dengan inti, dimana alur ini merupakan tempat meletakkan belitan (kumparan stator).
 - d. Belitan (kumparan) stator dari tembaga.
2. Rangka stator motor induksi ini di desain dengan baik dengan empat tujuan yaitu :
 - a. Menutupi inti dan kumparannya.
 - b. Melindungi bagian-bagian mesin yang bergerak dari kontak langsung dengan manusia dan dari goresan yang disebabkan oleh gangguan udara terbuka (cuaca luar).
 - c. Menyalurkan torsi ke bagian peralatan pendukung mesin dan oleh karena itu stator di desain untuk tahan terhadap gaya putar dan guncangan.
 - d. Berguna sebagai sarana rumah ventilasi udara sehingga pendinginan lebih efektif.

2.5.2 Rotor

Rotor adalah bagian motor yang bergerak atau berputar. Antara rotor dan stator dipisahkan oleh celah udara (*air gap*). Rotor berfungsi untuk membangkitkan medan magnet yang kemudian tegangan di hasilkan dan akan diiduksikan ke stator. Pada bagian inti kutub terdapat poros dan inti rotor yang memiliki fungsi sebagai jalur untuk arus pemacuan dan bagian yang diisolasi.⁴

Konstruksi rotor motor induksi terdiri dari bagian-bagian sebagai berikut.

- a. Inti rotor, bahannya dari besi lunak atau baja silikon sama dengan inti stator.

⁴ Naesa, Adna Bagus. Analisa Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa GB 304 45 Kw Pada Blower Cooling Tower Di PT. Pupuk Sriwidjaja. 2017. PhD Thesis. Politeknik Negeri Sriwijaya.

- b. Alur, bahannya dari besi lunak atau baja silikon sama dengan inti, alur merupakan tempat meletakkan belitan (kumparan) rotor.
- c. Belitan rotor, bahannya dari tembaga.
- d. Poros atau AS



Gambar 2.7 Rotor

2.6 Prinsip Kerja Motor Induksi⁵

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi 3-fasa dihubungkan dengan suatu sumber tegangan 3-fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul emf (ggl) atau tegangan induksi. Karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian yang tertutup maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator.

⁵ Nantony, Zuriman. Pengaruh Perubahan Frekuensi Dalam Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3-Fasa Terhadap Efisiensi Dan Arus Kumparan Motor. Jurnal Teknik Elektro, 2013, 1.1



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

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

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \phi_m \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

E_2 = Tegangan Induksi

f_2 = Frekuensi jala-jala

N_2 = Banyaknya lilitan

ϕ_m = Fluks magnet

- d. Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, (ggl) (E) akan menghasilkan arus (I).
- e. Adanya arus di dalam 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 magnet putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi dan 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 :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \chi 100 \dots \dots \dots (2.2)$$

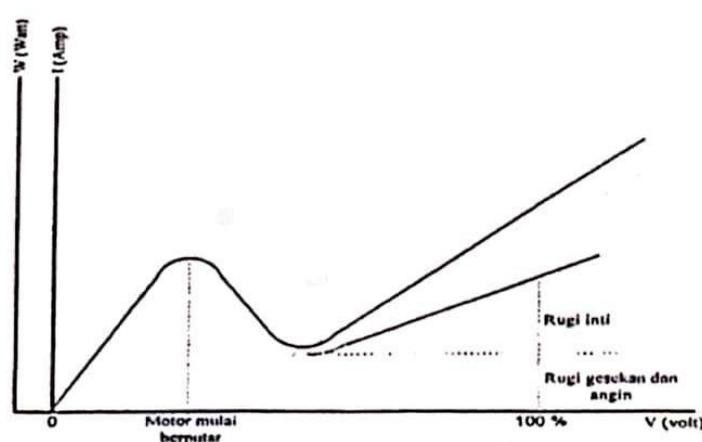
- i. Bila $n_r = n_s$ tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar (rotor), dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila n_r lebih kecil dari n_s
- j. Dilihat dari kerjanya maka motor tak serempak disebut juga motor induksi atau motor asinkron.

2.7 Karakteristik motor induksi

Secara umum motor induksi yang baik mempunyai standar bentuk karakteristik tertentu. Tiap-tiap motor mempunyai karakteristik sendiri-sendiri. Dibawah ini disebutkan beberapa karakteristik yang menggambarkan hubungan antara suatu parameter dan mesin yang lain, yaitu:

1. Karakteristik Beban Nol

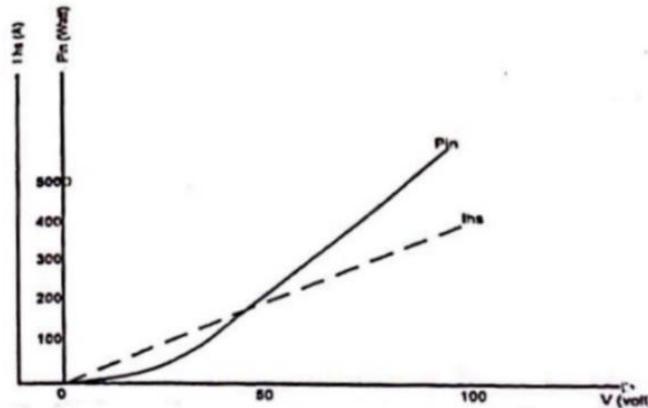
Karakteristik beban nol adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan ke motor dengan arus daya $\cos \phi$ motor pada keadaan tanpa beban, seperti yang ditunjukkan pada gambar , jadi putaran mendekati sinkron atau sama.



Gambar 2.8 Karakteristik Beban Nol

2. Karakteristik Rotor yang diblok

Karakteristik motor yang diblok adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan masuk dan arus yang masuk, $\cos \phi$, dan daya masuk. Seperti yang ditunjukkan pada (gambar) Berikut ini.

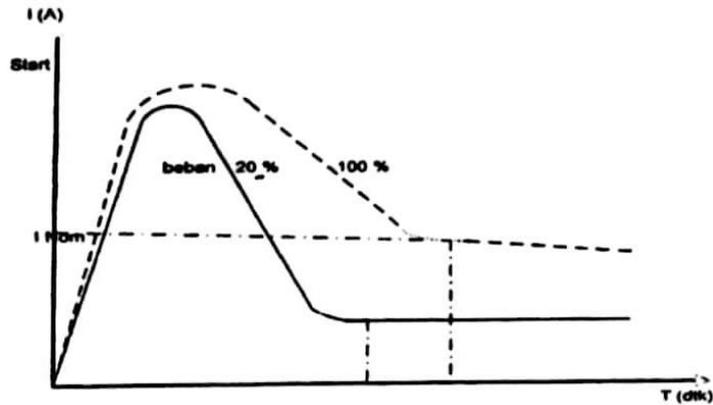


Gambar 2.9 Karakteristik Rotor yang diblok

3. Karakteristik Start

Karakteristik start ini dipakai untuk menggambarkan hubungan antara waktu dan arus. Putaran untuk macam-macam beban pada tegangan masuk konstan. Dari (gambar 2.6.) dibawah berikut dapat dijelaskan bahwa:

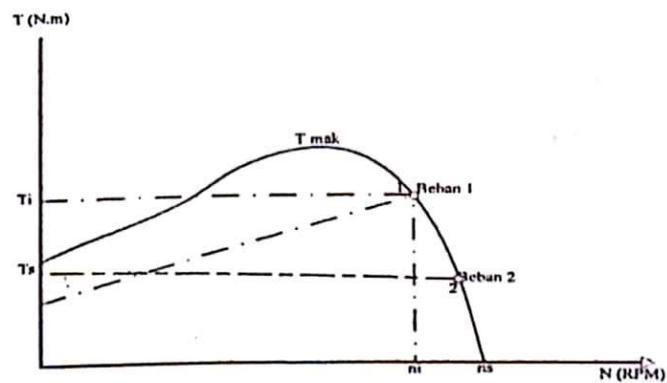
- Jika waktu start dari motor induksi makin lama, maka pemanas pada belitan akan lebih besar pula pada elemen pengaman. Hal ini akan berpengaruh terhadap lifetime dari motor.
- Arus akhir ke motor lebih tinggi.
- Putaran akhir motor akan lebih rendah.



Gambar 2.10 Karakteristik start

4. Karakteristik Kopel dan Putaran

Daerah kerja motor terletak pada daerah perputaran mendekati n_s . Kopel lawan beban 1 dan 2 pada waktu start $< T_s$ maka motor dapat distart, masing-masing dengan titik kerja 1 (kopel kerja = T_1 dan putaran kerja n_1) dan titik kerja 2. Bila kopel lawan beban pada saat start $> T_s$ maka motor tidak dapat distart. Selama motor belum berputar, arus motor tinggi. Seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.11 Karakteristik kopel dan putaran

2.8 Pengaman Motor Induksi

Seperti halnya dengan mesin listrik yang lain, motor induksi tidak lepas dari gangguan-gangguan yang dapat merusaknya. Gangguan-gangguan itu dapat datang dari luar motor ataupun dari kondisi buruk motor itu sendiri. Pengaman pada motor induksi bertugas mencegah kerusakan motor bila terjadi gangguan yang sering terjadi pada motor induksi yaitu:

1. Gangguan arus lebih yang terdiri dari arus lebih hubung singkat dan arus beban lebih. Gangguan ini disebabkan oleh overload atau beban lebih.
2. Gangguan tegangan kurang atau salah satu fasa hilang, gangguan ini sangat berbahaya sekali karena arus akan naik dengan cepat yang pada.
3. akhirnya belitan motor akan terbakar bila tidak segera diatasi.

Gangguan dari komponen mekanis motor. Gangguan ini lebih bersifat pada gangguan bearingnya, fan pendingin dan lain-lain, jika dibiarkan dalam waktu yang lama akan sangat berbahaya bagi motor tersebut.

2.9 Menentukan Rugi-Rugi Pada Motor

Rugi-Rugi motor listrik sebagian dapat ditemukan dengan cara konvensional yaitu dengan percobaan beban nol dan percobaan block rotor (hanya untuk motor arus bolak-balik). Percobaan beban nol dapat menentukan rugi-rugi rotasi motor. Pada keadaan beban nol, seluruh daya listrik input motor digunakan untuk mengatasi rugi-rugi inti dan rugi-rugi mekanik.

Rugi-rugi listrik motor dapat ditentukan yaitu pada tahanan DC, tahanan belitan dapat langsung diukur pada terminal belitan jangkar dan belitan penguat secara pengukuran DC, yaitu dengan mengukur tegangan dan arus dengan sumber DC pada belitan tersebut, atau dengan menggunakan ohm meter (jembatan *wheatstone*)

Pada motor AC, tahanan ekuivalen motor dapat ditentukan dengan percobaan block rotor (hubung singkat) dari suatu transformator. Jadi daya pada keadaan ini merupakan Rugi-rugi tahanan atau belitan pada keadaan ini rugi-rugi inti dapat diabaikan karena tegangan nominalnya.



Rugi-rugi stray load adalah rugi-rugi yang paling sulit diukur dan berubah terhadap beban motor. Rugi-rugi ini ditentukan sebagai rugi-rugi sisa (rugi-rugi pengujian dikurangi rugi-rugi konvensional). Rugi-rugi pengujian adalah daya *input* dikurangi daya *output*. Rugi-rugi konvensional adalah jumlah dari rugi-rugi inti, rugi-rugi rugi-rugi mekanik, rugi-rugi belitan.

2.10 Rugi-Rugi pada Motor Induksi⁶

Seperti kita ketahui bahwa motor – motor listrik adalah suatu alat untuk mengkonversikan energi listrik menjadi energi mekanis. Keadaan ideal dalam sistem konversi energi, yaitu mempunyai daya *output* tepat sama dengan daya *input* yang dapat dikatakan efisiensi 100%. Tetapi pada keadaan yang sebenarnya, tentu ada kerugian energi yang menyebabkan efisiensi dibawah 100%. Dalam sistem konversi energi elektro mekanik yakni dalam operasi motor-motor listrik terutama pada motor induksi, total daya yang diterima sama dengan daya yang diberikan, ditambah dengan kerugian daya yang terjadi, atau :

$$p_{in} = p_{out} + p_{rugi-rugi} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

p_{in} : Total daya yang diterima motor

p_{out} : Daya yang diterima motor untuk melakukan kerja

$p_{rugi-rugi}$: Total kerugian daya dihasilkan oleh motor

Motor listrik tidak pernah mengkonversikan semua daya diterima menjadi daya mekanik, tetapi selalu timbul kerugian daya yang semuanya berubah menjadi energi panas yang terbuang.

Efisiensi motor listrik dapat didefinisikan dari bentuk diatas, sebagai perbandingan dimana :

$$\text{Efisiensi} = \frac{p_{out}}{p_{in}} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.4)$$

Dari persamaan diatas, perlu dipelajari faktor – faktor yang menyebabkan efisiensi selalu dibawah 100% : untuk itu perlu diketahui kerugian daya apa saja yang timbul selama motor beroperasi.

⁶ Sandhi, Novrian Eka, et al. Metode Penentuan rugi-rugi Pada Pengaturan Motor Induksi Berbasis Vector Control. Jurnal Integrasi, 2020, 12.1: 13-20..



1. Belitan dalam motor yang dinamakan Rugi-rugi listrik (rugi-rugi belitan).
2. Kerugian daya yang timbul langsung karena putaran motor, yang dinamakan rugi-rugi rotasi.

Rugi rotasi ini terbagi menjadi dua jenis yaitu :

1. Rugi-rugi mekanis akibat putaran.
2. Rugi-rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan fluks medan.

2.10.1 Rugi-Rugi Inti

Rugi – rugi inti diperoleh pada besi magnetis didalam stator dan rotor akibat timbulnya efek histeris dan arus pusar (eddy current). Timbulnya rugi – rugi inti, ketika besi jangkar atau struktur rotor mengalami perubahan fluks terhadap waktu. Rugi – Rugi ini tidak tergantung pada beban, tetapi merupakan fungsi dari pada fluks dan kecepatan motor. Pada umumnya rugi – rugi inti berkisar antara 20 – 25% dari total kerugian daya motor pada keadaan nominal.⁷

2.10.2 Rugi-rugi Mekanik

Rugi – rugi gesekan dan angin adalah energi mekanik yang dipakai dalam motor listrik untuk menanggulangi gesekan batalan poros, gesekan sikat melawan komutator atau slip ring, gesekan dari bagain yang berputar terhadap angin, terutama pada daun kipas pendingin. Kerugian energi ini selalu berubah menjadi panas berubah menjadi panas seperti pada semua rugi – rugi lainnya.

Rugi – rugi mekanik dianggap konstan dari beban nol hingga beban penuh dan ini adalah masuk akal tetapi tidak sepenuhnya tepat seperti halnya pada rugi – rugi inti. Macam – macam ketidak tepatan ini dapat dihitung dalam rugi – rugi stray load. Rugi – rugi mekanik biasanya berkisar antara 10 – 15% dari total rugi – rugi daya motor pada keadaan beban nominal.

$$p_{in} = p_{rugi-rugi} \cdot 0,15 \dots \dots \dots (2.5)$$

⁷ Prasetijo, H. (2013). Analisis Pengaruh Perubahan Unbalance Under Voltage Terhadap Kinerja Motor Induksi Tiga Fasa. Techno (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto), 14(2), 01-13



2.10.3 Rugi-rugi Stray load

Sebagai tambahan, kita tidak dapat menghitung berapa besar kerugian ini seperti yang diakibatkan oleh perubahan fluks terhadap beban, geometri konduktor sehingga arus terbagi sedikit tidak merata dalam konduktor bertambah, mengakibatkan pertambahan tahanan konduktor dan karena itu rugi – rugi konduktor harus bertambah. Dari semua kerugian yang relative kecil ini, baik dari sumber yang di ketahui maupun yang tidak diketahui, disatukan menjadi rugi – rugi stray load yang cenderung bertambah besar apabila beban meningkat (berbanding kuadrat dengan arus beban). Pada umumnya kerugian ini berkisar 1-5% dari total kerugian daya motor pada keadaan beban nominal.⁸

2.10.4 Rugi-Rugi Belitan

Rugi-rugi belitan sering disebut rugi-rugi tembaga tetapi pada saat sekarang sudah tidak begitu banyak motor listrik, terutama motor ukuran sangat kecil diatas 750 W, mempunyai belitan stator dari kawat alumunium yang lebih tepat disebut rugi-rugi $I^2 R$ yang menunjukkan besarnya daya yang berubah menjadi panas oleh tahanan dari konduktor tembaga atau alumunium. Total kerugian $I^2 R$ adalah jumlah dari rugi-rugi $I^2 R$ primer (stator) dan rugi - rugi $I^2 R$ sekunder (rotor). rugi-rugi $I^2 R$ dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan dibawah kondisi operasi. Sedang tahanan efektif dari belitan selalu berubah dengan perubahan temperatur, *skin effect* dan sebagainya. Sangat sulit untuk menentukan nilai yang sebenarnya dari tahanan belitan dapat dimasukkan kedalam kerugian *stray load*. Pada umumnya rugi - rugi belitan ini berkisar antara 55-60% dari total kerugian motor pada keadaan beban nominal.

$$P_{\text{rugi-rugi}} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan :

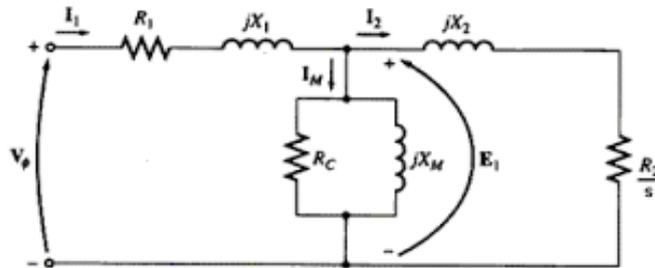
I = Arus listrik (Ampere)

R= Tahanan Arus Listrik (Ω)

⁸ Rihsyah, P. A. (2016). Analisa Daya Motor Induksi Tiga Fasa Penggerak Belt Conveyor Pada Stacker Reclaimer Di PT. Bukit Asam (PERSERO), Tbk Tanjung Enim (Doctoral dissertation, Politeknik Negeri Sriwijaya)

2.11 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Motor Induksi 3-fasa ini dapat dianalisa berdasarkan rangkaian ekuivalen tanpa harus mengoperasikan motor. Dari rangkaian ekuivalen (Gambar 2.8) dibawah ini I_1 merupakan arus yang mengalir pada kumparan stator yang terbagi arus I_m dan I_2 , dimana untuk mencari besarnya arus yang mengalir pada saat pembebanan.



Gambar 2.12 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

V_ϕ = Tegangan sumber perfasa pada kumparan stator

R_1 = Resistansi kumparan stator

jX_1 = Reaktansi Induktif kumparan stator

R_c = Tahanan Inti Besi

R_2 = Resistansi kumparan rotor dilihat dari sisi stator

jX_2 = Reaktansi Induktir rotor dilihat dari sisi stator

jX_m = Reaktansi magnet pada Motor

I_1 = Arus kumparan stator

I_2 = Arus pada kumparan rotor dilihat dari sisi stator saat motor distart.

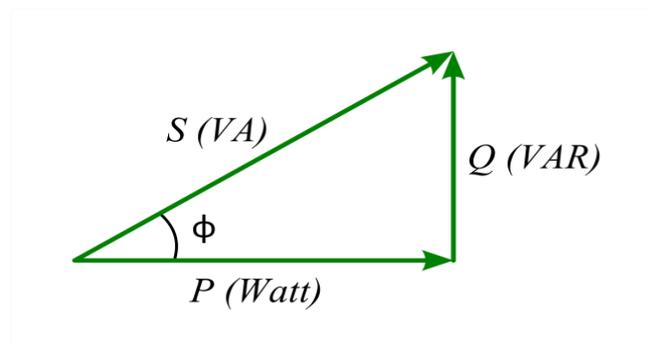
2.12 Pengertian Daya

Daya dalam tegangan AC pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga arus dan tegangan pada saat itu. Jika arus dan tegangan bolak-balik satu fasa, maka daya dalam satu periode sama dengan perkalian dari arus dan tegangan efektif. Tetapi jika ada reaktansi dalam rangkaian arus dan tegangan tidak satu fasa sehingga selama siklusnya biasa terjadi arus negatif dan tegangan positif.

Secara teoritis daya terdiri dari tiga yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya semu yang pengertiannya adalah sebagai berikut :

1. Daya aktif (P) adalah daya yang diubah menjadi energi, persatuan waktu atau dengan kata lain adalah daya yang benar-benar terpakai yang dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adalah Watt (W).
2. Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen reaktansi. Daya reaktif ditentukan dari reaktansi induktif (X_L) dan reaktansi kapasitif (X_C) satuannya adalah Volt Ampere Reaktif (VAR)
3. Daya semu (S) adalah jumlah secara vektoris daya aktif dan daya reaktif yang memiliki Volt Ampere (VA)

Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar sistem segitiga daya berikut ini.



Gambar 2.13 Segitiga Daya



$$P = V.I.\cos\phi \dots\dots\dots(2.7)$$

$$S = V.I \dots\dots\dots(2.8)$$

$$Q = V.I. \sin\phi \dots\dots\dots(2.9)$$

Untuk daya tiga phasa rumus daya aktif, daya reaktif, dan daya semu adalah seperti dibawah ini.

$$P = \sqrt{3}. V. I. \cos\phi \dots\dots\dots (2.10)$$

$$S = V. I. \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$Q = V. I. \sin\sqrt{3} \dots\dots\dots (2.12)$$

Daya memiliki hubungan dengan usaha yaitu daya merupakan usaha yang dilakukan dalam satuan waktu, atau dengan kata lain daya berbanding terbalik dengan waktu sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \frac{W}{t} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana p = Daya mekanik (W)

W = Usaha (joule)

t = Waktu (s)

2.13 Sifat – Sifat Beban Listrik

Dalam sistem arus bolak-balik arus dapat berbeda dengan tegangan yang disebabkan oleh jenis bebannya. Harga arus yang mengalir dalam rangkaian untuk suatu tegangan tertentu yang diberikan seluruhnya ditentukan oleh tahanan rangkaian. Harga arus bolak-balik yang mengalir dalam rangkaian tidak hanya bergantung pada rangkaian tetapi juga bergantung pada induktansi dan kapasitansi rangkaian. Tahanan memberikan jenis perlawanan yang sama terhadap aliran arus bolak-balik terhadap arus searah.



Pada motor induksi terjadi perubahan energy listrik menjadi energy mekanik dalam bentuk putaran rotor. Pada motor induksi daya mekanik yang dihasilkan digunakan untuk berbagai keperluan sesuai dengan yang diinginkan. Daya pada motor listrik dapat dihitung menggunakan perhitungan perfasa maupun perhitungan tiga fasa dan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{1\phi} = V_p \cdot I_p \cdot \cos \phi \dots\dots\dots (2.14)$$

Atau,

$$P_{3\phi} = 3 \cdot P_1 \dots\dots\dots (2.15)$$

$$P_{3\phi} = 3 \cdot V_p \cdot I_p \cdot \cos \phi \dots\dots\dots (2.16)$$

Harga tegangan per fasa (V_P) adalah:

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.11 ke persamaan 2.10 maka diperoleh rumus sebagai berikut :

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \phi \dots\dots\dots (2.18)$$

Keterangan :

$P_{1\phi}$ = daya pada 1 fasa (watt)

$P_{3\phi}$ = daya pada 3 fasa (watt)

V_P = tegangan per fasa (volt)

V_L = tegangan line to line (volt)

I = arus line (ampere)

\cos = faktor daya



2.14 Efisiensi

Di dalam setiap mesin daya keluaran yang tersedia adalah lebih rendah dari pada daya masukannya karena terjadinya rugi - rugi didalam mesin bersangkutan. Rugi - rugi ini dapat terjadi karena adanya gesekan pada bantalan, tahanan udara dari bagian - bagian mesin yang bergerak, panas ataupun getaran.

Motor listrik tidak pernah mengkonversikan semua daya yang diterima menjadi daya mekanik, tetapi selalu timbul kerugian daya yang semuanya berubah menjadi energi panas yang terbuang.

Perbandingan dari besarnya daya keluaran terhadap daya yang dikenal sebagai efisiensi mesin yang disimbolkan dengan huruf latin 'eta' atau jadi :

$$\text{Efisiensi (n)} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \dots\dots\dots(2.19)$$

Karena efisiensi biasanya dinyatakan dalam persen, maka rumusan umum yang digunakan ialah :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana

η = Efisiensi (%)

P_{out} = Daya Keluaran (watt)

P_{in} = Daya Masukan