

BAB II

SISTEM KERJA MOTOR INDUKSI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada buku yang berjudul *Alternating Current Fundamentals* menyatakan “nilai slip presentase yang lebih kecil berarti motor memiliki pengaturan kecepatan yang lebih baik. Saat diukur pada beban terukur, slip persentase dari sebagian besar motor induksi sangkar tupai berkisar antara 2% - 5%. Jenis motor ini dianggap sebagai motor berkecepatan konstan karena hanya terdapat penurunan kecepatan yang kecil antara kondisi tanpa beban dan beban penuh”. Artinya nilai slip optimal tergantung dari desain motor induksi, perbedaan desain juga membuat nilai slip optimal berbeda-beda tergantung pada desain. (Herman, 2011)

Selain itu pada buku tersebut juga menyatakan “Saat motor pertama kali dinyalakan, rotor belum berputar, sehingga slip-nya 100%. Frekuensi rotor saat itu sama dengan frekuensi stator. Reaktansi induktif rotor sangat besar dibandingkan dengan komponen resistansi efektifnya. Selain itu, rotor memiliki faktor daya induktif (lagging) yang sangat rendah. Ini berarti fluks (medan magnet) rotor tertinggal jauh (berfase mundur) dibandingkan fluks stator. Akibatnya, interaksi antara kedua medan ini kecil, sehingga torsi awal juga rendah. Saat kecepatan motor meningkat, nilai slip dan frekuensi rotor menurun. Penurunan frekuensi rotor menyebabkan reaktansi induktif dan impedansi rotor juga menurun. Hal ini menyebabkan sudut fasa antara fluks stator dan rotor mengecil. Akibatnya, torsi meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada slip sekitar 20%. Saat rotor terus mempercepat, torsi menurun sampai mencapai nilai torsi yang dibutuhkan untuk memutar beban mekanis yang terpasang di poros motor. Pada titik ini, slip berada antara 2% hingga 5%”. (Herman, 2011)

Pada rentang slip 2% hingga 5% nilai slip ini merupakan nilai yang ideal pada saat motor dalam tanpa beban dan beban penuh, rentan nilai slip ini juga menghasilkan torsi yang cukup untuk menggerakkan beban (Herman, 2011).

Pada buku *Electric Machinery Fundamentals 4th Edition* menyatakan NEMA (National Electrical Manufacturers Associations) dan IEC (International Electrothechnical Commissions) telah menentukan standar desain untuk kondisi operasional yang ideal. Pada penelitiannya rotor dengan desain *Deep-Bar* memiliki torsi awal yang normal (200-300%), arus awal yang lebih rendah dan slip rendah (kurang dari 5%) pada saat beban penuh. Rotor dengan desain *Double-Cage* memiliki torsi awal yang tinggi dengan arus awal yang rendah dan slip yang rendah (kurang dari 5%) pada saat beban penuh, torsi awal mencapai 250% dari torsi beban penuh. Motor dengan desain rotor seperti ini digunakan untuk beban torsi awal yang tinggi seperti mesin pompa, kompresor, dan konveyor. (Chapman, 2005)

Artinya desain rotor *Deep-Bar* dan *Double-Cage* memiliki rentan nilai slip kurang dari 5%, dalam rentan nilai tersebut mampu menghasilkan torsi yang cukup untuk menggerakkan mekanik yang cukup untuk aplikasi di industri (Chapman, 2005).

2.2 Motor Induksi 3 phasa

Menurut buku Dasar Konversi Energi Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak-balik yang paling banyak dan luas penggunaannya. Motor induksi bekerja berdasarkan induksi medan magnet ke statornya, dimana arus rotor bukan di peroleh dari sumber tertentu, melainkan arus yang terinduksi akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator (Tanjung, 2019).

Motor induksi umumnya digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun rumah tangga. Motor induksi yang banyak di gunakan adalah motor induksi 3 phasa dan motor induksi 1 phasa. Motor induksi 3 phasa menggunakan sistem tenaga 3 phasa untuk dapat mengoperasikanya dan banyak di gunakan di berbagai bidang industri dengan kapasitas yang lebih besar. Motor induksi 1 phasa menggunakan sistem tenaga 1 phasa untuk dapat mengoperasikanya dan banyak di gunakan untuk peralatan rumah tangga seperti kipas angin, mesin cuci, pompa air dan lain sebagainya (Tanjung, 2019).



Gambar 2. 1 Motor Induksi

Menurut Stephen J. (Chapman, 2005) Ada 2 tipe motor induksi 3 phasa yang sering di gunakan yaitu tipe sinkron dan asinkron. Motor sinkron adalah motor yang beroperasi pada kecepatan sinkron, yaitu kecepatan rotor sama dengan kecepatan stator motor. Ini mengikuti hubungan $N = N_s = 120f/P$ dimana N adalah kecepatan rotor dan N_s adalah kecepatan sinkron. Sedangkan motor asinkron merupakan motor induksi AC yang kecepatannya dapat diubah-ubah. Rotor motor asinkron berputar dengan kecepatan lebih kecil dari kecepatan sinkron yaitu $N < N_s$.

Menurut (Wildi, 2002) Skala daya pada motor induksi merupakan klasifikasi berdasarkan besarnya daya nominal output (rated power) motor, yang umumnya diukur dalam kilowatt (kW) atau horse power (HP). Tujuan klasifikasi ini adalah untuk:

- Menyesuaikan ukuran fisik dan konstruksi motor
- Menentukan kebutuhan proteksi, kontrol, dan perawatan
- Memudahkan pemilihan motor sesuai beban kerja

Klasifikasi skala motor induksi berdayasarkan daya output dapat dituangkan pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. 1 Klasifikasi Motor Induksi

Skala Daya	Rentang Daya	Contoh Aplikasi
Skala Kecil	<1.5 kW	Pompa kecil, alat rumah tangga, mesin UKM
Skala Sedang	1.5 - 22 kW	Mesin produksi ringan hingga menengah, kompresor, lift
Skala Besar	22 - 375 kW	Industri besar, Konveyor Pabrik, Mesin Berat
Skala Sangat Besar	>375 kW	Pembangkit Listrik, Industri tambang, turbin

International Electro Technical Commission (IEC) (ABB, 2014) memberikan pedoman klasifikasi berdasarkan beberapa aspek penting, seperti jenis konstruksi, kelas isolasi, derajat perlindungan, duty cycle serta efisiensi dan performa. Hal ini bertujuan untuk menjamin keseragaman performa, spesifikasi dan keamanan motor induksi. Menurut dokumen IEC 60034-30-1 standar motor induksi dengan kapasitas daya 0.75 kW dan 4 kutub dikelompokkan berdasarkan level efisiensinya:

- a) IE1 – Standard Efficiency (72.1%)
- b) IE2 – High Efficiency (79.6%)
- c) IE3 - Premium Efficiency (82.5%)
- d) IE4 - Super Premium Efficiency (85.7%)
- e) IE5 – Ultra Premium Efficiency

2.2.1 Prinsip kerja Motor Induksi

Motor induksi adalah peralatan listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Dalam motor induksi, tidak ada hubungan listrik ke rotor, arus rotor merupakan arus induksi. Arus ini berada dalam medan magnetik sehingga akan terjadi gaya pada rotor yang akan menggerakkan rotor dalam arah tegak lurus medan (Chapman, 2005).

Apabila terminal stator motor induksi 3 fasa di hubungkan dengan sumber tegangan 3 fasa, maka pada kumparan stator mengalir arus tiga fasa. Arus pada tiap fasa menghasilkan fluksi bolak-balik yang berubah-ubah. Amplitudo fluksi

yang arahnya dihasilkan berubah secara sinusoidal dan arahnya tegak lurus terhadap belitan fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron (Chapman, 2005). yang besarnya dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \dots\dots\dots(2.1)$$

Di mana:

N_s = kecepatan sinkron (rpm)

f = frekuensi stator pada motor induksi (Hz)

p = kutub motor

2.2.2 Konstruksi Motor Induksi

Motor induksi terdiri atas 2 bagian utama yaitu stator dan rotor. Ada 2 jenis rotor yaitu rotor sangkar dan rotor belitan.

1. Stator

Stator merupakan bagian diam dari motor induksi 3 phasa, pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan tiga phasa yang di sebut kumparan stator, yang masing-masing kumparan mendapatkan suplai arus 3 phasa, maka pada kumparan tersebut segera timbul medan putar (Herman, 2011).

Dengan adanya medan magnet putar pada kumparan stator akan mengakibatkan rotor berputar, hal ini terjadi karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dan kecepatan putar stator (Herman, 2011). Konstruksi stator motor induksi pada dasarnya terdiri dari bagian-bagian sebagai berikut:

- a. Rumah Stator (rangka stator) dari besi tuang.
- b. Inti stator dari besi lunak atau baja silikon.
- c. Alur, bahanya sama dengan inti dimana alur ini merupakan tempat meletakkan belitan (kumparan stator)

- d. Belitan (kumparan) stator dari tembaga.



Gambar 2. 2 Stator

Rangka stator motor induksi di desain dengan baik dengan 4 tujuan yaitu:

- a. Menutupi inti dan kumparanya.
- b. Melindungi bagian-bagian mesin yang bergerak dari kontak langsung dengan manusia dan dari goresan yang di sebabkan oleh gangguan objek atau 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. Rotor

Rotor merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor (Herman, 2011). Rotor dari motor induksi dapat di bedakan menjadi 2 yaitu:

- a. Rotor Sangkar (*squire cage rotor*)

Kebanyakan dari motor induksi menggunakan rotor dengan jenis ini. Rotor jenis sangkar banyak digunakan pada motor induksi 3 phasa yang berdaya relatif lebih kecil, karena motor induksi dengan jenis rotor sangkar merupakan rotor yang paling sederhana dan kuat. Rotor jenis ini terbuat dari baja silicon dan berbentuk

silinder yang sejajar dengan alur atau slot dan berisi tembaga atau aluminium berbentuk batang (Herman, 2011).



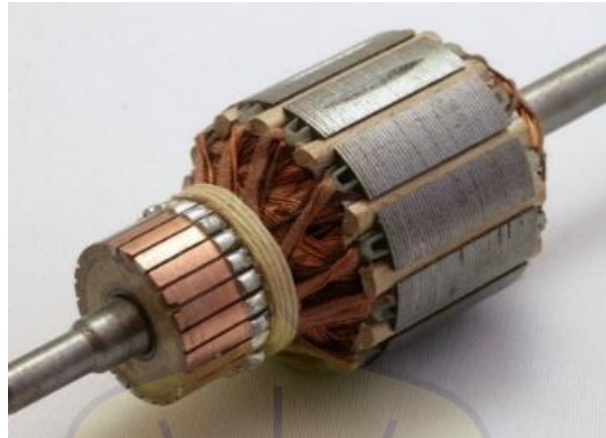
Gambar 2. 3 Rotor sangkar

b. Rotor Belit

Rotor ini memiliki belitan–belitan kawat jadi jika di distribusikan maka motor jenis ini juga dapat kita fungsikan sebagai alternator (generator) dengan demikian pada rotor ini akan memiliki kutub–kutub pada stator belitan internal rotor dari motor ini dihubungkan secara bintang (tiga phasa) kemudian terminal belitan tersebut dikeluarkan dan disambungkan ke tiga buah slip ring terisolasi yang diletakkan pada poros motor dengan sikat di atasnya. Ketiga sikat ini secara eksternal dihubungkan ke suatu reostat yang membentuk bintang (Herman, 2011).

Reostat pada motor ini berfungsi untuk meningkatkan torsi asut motor pada saat periode pengusutan. Apabila motor ini bekerja pada kondisi normal, maka slip ring secara otomatis terhubung pendek. Sehingga ring diatas tangkai terhubung bersama oleh suatu logam yang tertekan selanjutnya secara otomatis sikat tersebut terangkat dari slip ring yang berfungsi untuk mengurangi rugi–rugi gesekan. Selain dua bagian utama tersebut motor induksi juga mempunyai konsturksi tambahan antara lain rumah stator, tutup stator, kipas dan terminal hubung. Selama pengasutan, penambahan tahanan eksternal pada rangkaian rotor belitan

menghasilkan torsi pengasutan yang lebih besar dengan arus pengasutan yang lebih kecil dibanding dengan rotor sangkar (Herman, 2011).



Gambar 2. 4 Rotor Belit

c. Celah Udara

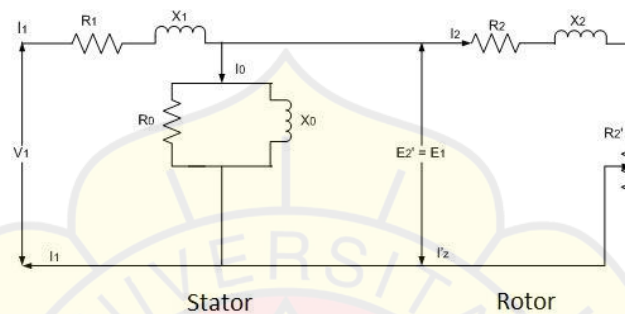
Di antara stator dan rotor terdapat celah udara yang merupakan ruangan antara stator dan rotor. Pada selah udara ini lewat fluks induksi stator yang memotong kumparan rotor sehingga menyebabkan rotor berputar. Selah udara yang terdapat antara stator dan rotor di atur sedemikian rupa sehingga di dapatkan hasil kerja motor yang optimum. Bila celah udara antara stator dan rotor terlalu besar akan mengakibatkan efisiensi motor induksi rendah, sebaliknya bila jarak antara celah terlalu kecil atau sempit akan menimbulkan kesukaran mekanis pada mesin. Celah udara tidak bisa dipisahkan dengan belitan, sedangkan belitan (kumparan) yang terbuat dari tembaga yang sudah disusun sedemikian rupa dengan hitungan tertentu. Celah udara itulah terletak diantara rotor dan stator diatas belitan (kumparan) tersebut (Herman, 2011).



Gambar 2. 5 Celah Udara

2.2.3 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Prinsip kerja motor induksi sama halnya dengan prinsip kerja transformator, yaitu berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Oleh karena itu motor induksi sama halnya sebagai transformator dengan kumparan sekunder yang berputar (Wildi, 2002). Jika tahanan rangkaian sekunder dibagi dengan slip dan dinyatakan dalam rangkaian primer, maka rangkaian ganti dari motor seperti gambar:



Gambar 2. 6 Rangkaian ekuivalen motor induksi

2.3 Slip Motor

Pada buku *Alternating Current Fundamentals*, (Herman, 2011). Slip pada motor induksi adalah perbedaan antara kecepatan sinkron stator (medan magnet berputar) dan kecepatan rotor (kecepatan putaran fisik rotor). Dengan kata lain, rotor motor induksi selalu berputar sedikit lebih lambat daripada medan magnet yang dihasilkan oleh stator. Slip ini penting karena menghasilkan arus induksi pada rotor yang menghasilkan torsi.

Perbedaan antara kecepatan medan putar stator dengan kecepatan putar ini dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$S = \frac{ns - nr}{ns} \times 100\% \dots \dots \dots (2.2)$$

di mana:

S = Slip (%)

Ns = Kecepatan Sinkron (Rpm)

Nr = Kecepatan Rotor (rad/s)

Slip rotor merujuk pada kondisi dimana rotor motor induksi memiliki slip yang lebih besar dibandingkan dengan motor konvensional. Dalam hal ini rotor tidak berputar pada kecepatan mendekati kecepatan sinkron, sehingga dapat menyebabkan motor beroperasi pada kecepatan yang rendah (Herman, 2011). Besaran nilai slip rotor dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$N_{\text{slip}} = \frac{n_s - n_m}{n_s} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana:

N_{slip} = kecepatan slip mesin

N_s = kecepatan medan magnet

N_m = kecepatan poros mekanis motor

Istilah lain untuk menggambarkan gerakan relatif adalah slip, yang merupakan kecepatan relatif yang dinyatakan dalam persentase (%). Besaran nilai slip dipengaruhi beberapa faktor dibawah frekuensi ini:

- a. Beban mekanik: semakin bebsar beban mekanik, semakin besar slip.
- b. Tegangan: penurunan tegangan akan meningkatkan slip.
- c. Frekuensi: penurunan akan meningkatkan slip.

Selain itu, slip juga sangat berpengaruh terhadap kinerja motor induksi yang mempengaruhi nilai efisiensi dan kecepatan. Dimana slip yang besar akan menghasilkan nilai efisiensi dan kecepatan yang rendah. Slip yang optimal umumnya berkisar antara 2% - 5%, tergantung pada konstruksi dan aplikasi motor (Herman, 2011).

Pada rentang slip ini, motor beroperasi dengan efisiensi yang lebih tinggi, meminimalkan kerugian daya, dan mengurangi konsumsi energi listrik. Slip dalam rentan 2% - 5% memungkinkan motor untuk menghasilkan torsi maksimum tanpa kondisi jenuh (Herman, 2011).

Dalam buku yang berjudul *Electric Machinery Fundamentals*, NEMA (National Electrical Manufactures Associations) dan IEC (International Electrothechnical Commisions) telah menentukan standar desain untuk kondisi

operasional yang ideal. dalam buku ini menyatakan bahwa kondisi motor dengan torsi awal yang normal, arus awal yang rendah dan slip kurang dari 5% pada beban penuh. Merupakan kondisi slip yang optimal, pada kondisi slip ini motor dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. Jika nilai slip melebihi 5% akan mengakibatkan panas pada rotor, rugi-rugi meningkat, efisiensi menurun dan dapat mengurangi performa motor (Chapman, 2005).

2.3.1 Torsi terhadap slip

Menurut (Chapman, 2005) torsi merupakan salah satu tenaga atau kekuatan yang bisa menimbulkan memutar Hal ini dapat menyebabkan motor induksi berputar. Gaya putar yang dihasilkan oleh motor induksi dikenal sebagai torsi. Torsi ini muncul dari interaksi antara medan magnet yang diciptakan oleh stator dan arus listrik yang mengalir melalui rotor. Saat motor induksi diaktifkan, medan magnet yang berputar terbentuk di stator, yang pada gilirannya menginduksi arus pada rotor. Hubungan antara medan magnet dan arus tersebut menciptakan torsi yang menyebabkan rotor berputar, menggerakkan beban yang dihubungkan padanya. Torsi mempunyai gaya dan jarak (lb-ft) dan bisa Dapat dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

T = torsi

P_{out} = daya keluaran

ω = kecepatan sudut putar

Slip sangat penting karena torsi motor induksi bergantung langsung pada slip. Bila slip = 0 (rotor berputar sama cepat dengan medan magnet), tidak ada tegangan induksi di rotor, sehingga tidak ada arus rotor dan tidak ada torsi. Jika rotor berputar pada kecepatan sinkron, maka batang rotor akan diam relatif terhadap medan magnet dan tidak akan ada tegangan induksi, sehingga tidak ada arus rotor dan medan magnet rotor. Dengan demikian, torsi yang diinduksi akan nol (Chapman, 2005).

Hubungan slip dengan karakteristik torsi

- **Low-slip (normal operation)** : torsi sebanding dengan slip. Di wilayah ini slip meningkat secara linear dengan beban. Torsi meningkat hampir proporsional terhadap slip, dan motor bekerja dalam kondisi stabil.
- **Moderate-slip**: arus rotor bertambah, tetapi faktor daya menurun. Di sini frekuensi rotor dan reaktansi meningkat, dan faktor daya mulai menurun. Torsi mendekati maksimum (pull-out torque) dan sensitivitas terhadap gangguan meningkat.
- **High-slip**: torsi menurun karena faktor daya turun drastis. Torsi mulai menurun karena meskipun arus rotor naik, faktor daya rotor menurun tajam. Operasi dalam wilayah ini tidak stabil karena motor dapat kehilangan torsi jika beban meningkat.

Pada wilayah low-slip, arus rotor meningkat secara linier terhadap slip, sehingga torsi meningkat linier juga. Pada wilayah moderate-slip dan high-slip, faktor daya mulai menurun dan mengimbangi peningkatan arus, sehingga torsi tidak meningkat lagi dan bahkan menurun. Slip sangat menentukan torsi motor induksi. Dalam operasi normal (low-slip), torsi meningkat seiring meningkatnya slip. Namun, setelah mencapai torsi maksimum (pullout torque), peningkatan slip justru menyebabkan torsi menurun (Chapman, 2005).

2.3.2 Slip sebagai pengendali panas

Dalam buku *Electric Machinery Fundamentals*, slip pada motor induksi sangat memengaruhi pengendalian panas karena berhubungan langsung dengan rugi-rugi tembaga rotor (rotor copper losses) yang menjadi salah satu sumber utama panas dalam motor. Semakin besar slip, semakin besar beda kecepatan anatar medan magnet stator dan rotor, sehingga semakin besar tegangan arus yang diinduksikan pada rotor (Chapman, 2005). Hal ini meningkatkan rugi-rugi tembaga rotor, yang dihitung dengan rumus:

$$P_{RCL} = s \times P_{AG} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

P_{RCL} : rugi-rugi tembaga rotor

P_{AG} : daya yang masuk ke rotor dari stator melalui celah udara

Dengan kata lain, slip yang tinggi menyebabkan rugi-rugi tembaga rotor menjadi besar karena semua daya dari stator akan diserap oleh tahanan rotor. Ini terjadi semua saat motor dalam kondisi starting (slip=1), menyebabkan pemanasan yang signifikan. Sebaliknya, pada slip rendah (mendekati nol), sebagian besar daya dari stator dikonversi menjadi daya mekanik dan hanya sebagian kecil yang menjadi rugi-rugi panas. Pengaruh slip terhadap pengendalian panas menjadi sangat penting untuk efisiensi motor. Motor dengan efisiensi tinggi biasanya beroperasi pada slip yang rendah untuk meminimalkan rugi-rugi panas dan menjaga suhu kerja tetap aman.

Slip adalah parameter penting dalam operasi motor induksi. Dalam batas tertentu, peningkatan slip membantu menyesuaikan beban, tetapi slip yang terjadi terlalu tinggi menandakan ketidakstabilan operasi. Oleh karena itu, pengendalian slip penting untuk memastikan motor beroperasi secara efisien dan stabil (Chapman, 2005).

2.4 Inverter / Variable Frequency Drive

Menurut buku *Modern Power Electronics and AC Drives*, inverter adalah suatu rangkaian yang mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC berupa sinyal sinusoidal setelah melalui pembentukan gelombang dan rangkaian filter, tegangan output yang dihasilkan harus stabil baik amplitudo tegangan maupun frekuensi tegangan yang dihasilkan, distorsi yang rendah, tidak terdapat tegangan transient dan tidak diinterupsi oleh suatu keadaan, nilai tegangan dan frekuensi dapat diatur (Wildi, 2002).

Fungsi inverter adalah untuk mengubah kecepatan motor AC dengan cara merubah frekuensi inputnya. Dimana:

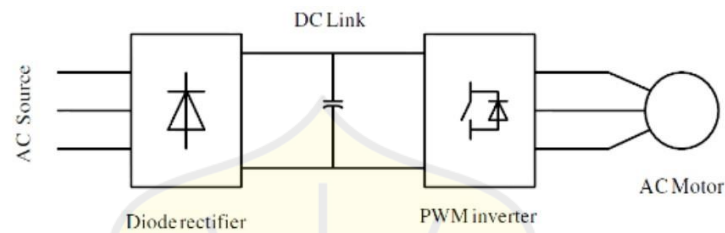
$$N = \frac{120 \cdot f}{p} \dots\dots\dots(2.6)$$

n = Putaran per menit

f = Frekuensi (hertz)

p = Jumlah kutub

Perubahan frekuensi juga akan berpengaruh pada kecepatan putar kecepatan putar motor induksi. Hal yang harus diperhatikan, bahwa dengan pengubah frekuensi adalah kerapatan fluks yang ada harus diusahakan tetap, agar kopel yang dihasilkan pun tidak berubah, untuk itu tegangan jaringan pun harus diubah seiring dengan perubahan frekuensi (Wildi, 2002).



Gambar 2. 7 Rangkaian pengendali kecepatan motor ac

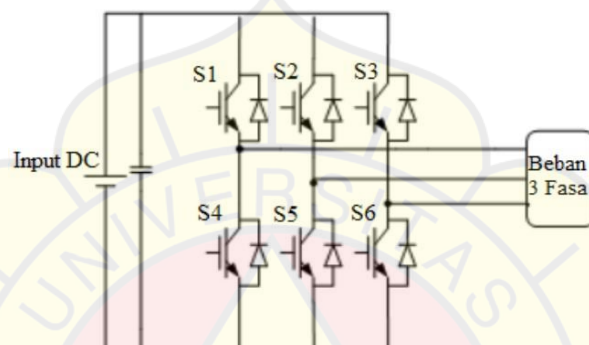
Inverter 3 fasa banyak digunakan untuk perangkat yang dioperasikan dengan daya tinggi. Rangkaian inverter 3 fasa terdiri dari 6 sakelar, karakteristik komponen elektronika yang sesuai sebagai sakelar harus memiliki rating daya yang tinggi dan dapat digunakan untuk switching pada frekuensi tinggi.

Inverter 3 fasa digunakan untuk mengubah sumber listrik DC menjadi listrik AC 3 fasa. Komponen yang digunakan pada rangkaian inverter 3 fasa pada umumnya adalah SCR atau IGBT yang disusun dengan konfigurasi jembatan. Untuk menghasilkan gelombang output listrik 3 fasa diperlukan pengaturan sakelar elektronis dalam hal ini IGBT atau SCR dengan perbedaan masing-masing fasa 120 derajat (Wildi, 2002). Urutan penyalaan sakelar elektronis dapat mengikuti aturan sebagai berikut:

1. Saklar S1, S5 dan S6 ON sedangkan S2, S3 dan S4 OFF
2. Saklar S6, S2 dan S1 ON sedangkan S3, S4 dan S5 OFF
3. Saklar S2, S4 dan S6 ON sedangkan S1, S3 dan S5 OFF
4. Saklar S4, S2 dan S3 ON sedangkan S1, S5 dan S6 OFF
5. Saklar S5, S4 dan S3 ON sedangkan S1, S2 dan S6 OFF
6. Saklar S1, S3 dan S5 ON sedangkan S2, S3 dan S6 OFF
7. Saklar S4, S5 dan S6 ON sedangkan S1, S2 dan S3 OFF
8. Saklar S1, S2 dan S3 ON sedangkan S4, S5 dan S6 OFF

2.4.1 Prinsip Kerja Inverter

Inverter mengontrol frekuensi yang diberikan ke motor. pada saat starting, frekuensi awal biasanya rendah, yang menghasilkan kecepatan motor yang rendah. Frekuensi kemudian ditingkatkan secara bertahap untuk meningkatkan kecepatan motor hingga mencapai kecepatan kerja normal. Karena tegangan dan frekuensi ditingkatkan secara bertahap, arus starting (arus yang ditarik pada saat mulai) jauh lebih rendah dibandingkan dengan metode starting konvensional. Arus yang rendah ini mengurangi stress pada motor dan sistem kelistrikan (Wildi, 2002).



Gambar 2. 8 Rangkaian inverter tiga fasa

2.5 Rugi-Rugi Motor

Rugi – rugi pada motor induksi adalah energi yang hilang atau tidak berubah menjadi energi mekanik akibat berbagai fenomena fisik dalam motor. rugi-rugi ini menyebabkan motor tidak memiliki efisiensi 100% (Chapman, 2005). Rugi-rugi motor dibagi menjadi 4 meliputi :

2.5.1 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 (Chapman, 2005).

2.5.2 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 ketidaktepatan 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 (Chapman, 2005).

$$P_{CONV} = P_{AG} (1-s) \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

P_{conv} = Daya Mekanik (Watt)

P_{AG} = Daya Celah Udara (Watt)

S = Slip

2.5.3 Rugi-rugi belitan

Rugi-rugi belitan atau sering juga disebut rugi-rugi tembaga, tetapi pada saat sekarang tidak begitu, hanya motor listrik terutama motor dengan ukuran sangat kecil diatas 750 W, mempunyai belitan stator dari kawat kawat aluminium, yang lebih tepat disebut rugi-rugi ($I^2.R$) yang menunjukkan besarnya daya yang berubah menjadi panas oleh tahanan dari konduktor tembaga atau aluminium. Total kerugian ($I^2.R$) adalah jumlah dari rugi-rugi ($I^2.R$) primer (stator) dan rugi-rugi ($I^2.R$) sekunder (rotor), termasuk rugi-rugi kontak sikat pada motor. Rugi - rugi ($I^2.R$) dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan dibawah kondisi operasi. Sedangkan tahanan efektif dari belitan selalu berubah dengan perubahan temperature, skin effect dan sebagainya.

Sangat sulit untuk menentukan daya yang sebenarnya dari tahanan belitan dibawah kondisi operasi. Kesalahan pengukuran kerugian belitan dapat dimasukkan

ke dalam kerugian stray load. Pada umumnya rugi-rugi belitan ini berkisar antara 55 - 60% dari total kerugian motor pada keadaan beban normal (Chapman, 2005).

Rugi – rugi stator dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$P_{SCL} = 3 |I_1|^2 R_1 \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana :

P_{SCL} = Rugi daya tembaga stator (Watt)

I_1 = Arus stator (Ampere)

R_1 = Tahanan Stator (Ohm)

Rugi – rugi rotor dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$P_{RCL} = 3 |I_2|^2 R_2 \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana :

P_{RCL} = Rugi daya tembaga rotor

I_2 = Arus stator (Ampere)

R_2 = Tahanan Stator (Ohm)

2.5.4 Rugi-rugi stray load

Kerugian yang diakibatkan oleh perubahan fluks terhadap beban tidak dapat dihitung berapa besarnya, geometri konduktor sehingga arus terbagi sedikit tidak merata dalam konduktor bertambah, mengakibatkan penambahan tahanan konduktor dan karena itu rugi-rugi konduktor harus bertambah. Dari semua kerugian yang relatif 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 normal. (Wildi, 2002)

2.6 Daya Output Motor Induksi

Daya output motor induksi adalah daya mekanis yang dihasilkan oleh motor dan ditransmisikan melalui porosnya untuk melakukan kerja (seperti memutar

pompa, fan, conveyor, dll). Daya ini biasanya lebih kecil dari daya input karena adanya rugi-rugi pada motor seperti rugi tembaga, rugi inti, dan rugi mekanis. Singkatnya daya output motor induksi adalah daya yang dihasilkan motor untuk menggerakkan suatu beban. Daya output daya dinyatakan menggunakan persamaan berikut:

$$P_{out} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana:

P_{out} : Daya Output (Watt)

V : Tegangan (Volt)

I : Arus (Ampere)

$\cos\phi$: Faktor Daya

