

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Ada beberapa landasan pustaka yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini. Pertama, Penelitian tentang losses IGBT pada *inverter* yang telah dilakukan oleh Kaixin, dkk. Penelitian tersebut berjudul “ *The IGBT Losses and Calculation of Inverter for Two-seat Electric Aircraft Application*”. Pada penelitian tersebut membahas tentang rugi-rugi pada *inverter* IGBT, rugi-rugi pada konduksi dioda, rugi-rugi pensaklaran, rugi-rugi total dan efisiensi. Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan bahwa efisiensi 95,13 % diperoleh saat arus 68,31% dan 93,42% diperoleh saat arus 97,41 A.

Kedua, penelitian tentang motor induksi tiga fasa yang telah dilakukan oleh Isdiyanto. Penelitian tersebut berjudul “ Dampak perubahan Putaran Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Jenis Rotor Sangkar”. Pada penelitian tersebut membahas tentang efisiensi motor induksi tiga fasa yang mana dipengaruhi oleh tegangan sumber, kecepatan putaran dan frekuensi sumber. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa kerja motor paling optimal diperoleh saat tegangan sumber 350 volt dan frekuensi sumber 50 Hz.

Terakhir, penelitian tentang motor induksi yang telah dilakukan oleh Suyamto. Penelitian tersebut berjudul “Analisis Daya dan Torsi pada Motor Induksi”. Pada penelitian tersebut dibahas mengenai rugi-rugi, besaran daya dan torsi pada motor induksi. Pada percobaan tersebut dilakukan tiga macam percobaan yaitu test tanpa beban, berbeban dan rotor ditahan. Dari seluruh data yang diperoleh dari percobaan dapat dihitung seluruh daya yang terdapat pada motor dan torsi pada poros.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Kereta Kereta Rel Diesel Elektrik

2.2.1.1 Umum

Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) merupakan kereta rel yang bergerak dengan memanfaatkan listrik sebagai sumber utama. Pada kereta rel diesel elektrik, mesin diesel digunakan sebagai pembangkit tenaga listrik. Komponen utama yang digunakan dalam sistem propulsi berupa motor traksi yang akan menggerakkan roda kereta. Jumlah motor yang ada pada satu set KRDE sangat bergantung dari besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh generator.

Generator yang dipakai oleh lokomotif diesel awalnya adalah generator DC dan motor traksi DC yang mana membutuhkan tempat yang besar dan bertenaga kecil. Pada tahun 1960 lokomotif baru sudah menggunakan alternator dengan motor DC, sehingga dilengkapi dengan jembatan dioda atau penyearah. Kemudian, pada tahun 1980, *inverter* pada motor traksi diperkenalkan yang mana lebih efisien dan tidak membutuhkan sikat karbon. Namun, motor AC membutuhkan arus listrik yang besar, sehingga membutuhkan sumber berdaya besar pula.

2.2.1.2 Sejarah Kereta Rel Diesel Elektrik

Sejarah Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) dimulai ketika adanya kereta komuter yang melayani rute Yogyakarta-Surakarta yang diberi nama Kuda Putih. Kereta ini telah beroperasi sejak tahun 1960-an hingga akhir 1970-an. Setelah itu, pada tahun 1980-an Kuda Putih tidak aktif dan tidak ada lagi kereta komuter yang menghubungkan kedua kota tersebut. Kemudian pada tanggal 20 Mei 1994, kereta api Prambanan Ekspres (PRAMEKS) dengan rute Solo – Yogyakarta pertama kali diluncurkan. Kereta PRAMEKS pada saat itu hanya menggunakan empat rangkaian kereta yang ditarik oleh lokomotif diesel. Dimana rangkaian ini memakai kereta milik KA senja Utama Solo yang beroperasi pada malam hari. Dalam kurun pengoperasiannya, KA Prameks telah mengalami beberapa kali

perubahan jadwal pemberangkatan maupun sarana yang dipergunakan sesuai dengan keinginan pelanggan.

Pada tahun 1998 ketika masa angkutan lebaran, manajemen PT KA (Persero) mengganti rangkaian kereta yang ditarik oleh lokomotif menjadi rangkaian Kereta Rel Diesel (KRD) yang mana merupakan buatan tahun 80-an. Namun, KRD ini sering mengalami kerusakan sehingga mengakibatkan keterlambatan. Akhirnya, satu set armada PRAMEKS berupa Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) ditambahkan oleh Ditjen KA Dephub bersama manajemen PT KA yang mana kereta tersebut hasil modifikasi pertama dari PT. INKA Madiun pada tanggal 1 Maret 2006.

KRDE buatan inka merupakan modifikasi dari KRL buatan BN-Holec Belgien-Nederlands-Bombardier dengan mengganti mesin listrik menjadi mesin diesel. Pada tanggal 16 Februari 2008, pola operasi KA Prameks Solo-Yogyakarta mengalami peningkatan dari tujuh kali menjadi sepuluh kali PP sedangkan Solo-Yogyakarta – Kutoarjo menjadi empat kali PP. Stasiun Muguwo (Bandara Adisucipto) juga merupakan tempat pemberhentian KRDE ini, sebagai fungsi dari sistem terpadu transportasi Yogyakarta yang menghubungkan sarana transportasi umum darat (bus Trans Jogja dan Taksi), kereta api, dan pesawat terbang.



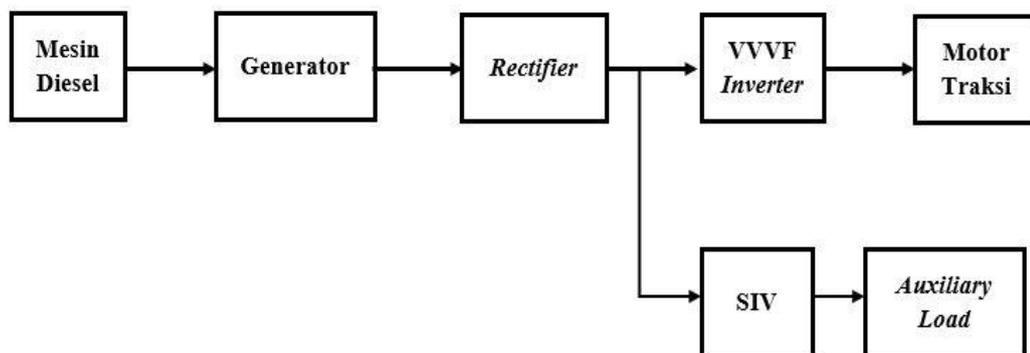
Gambar 2.1 Kereta Rel Diesel Elektrik (KDRE)

Pada tanggal 22 April 2009 KRDE Baraya Geulis dan Rencang Geulis diresmikan pertama yang melayani lintasan pandalarang-cicalengka, sehingga

diharapkan dapat diandalkan sebagai Kereta api Lokal Bandung Raya. Selanjutnya, pada tanggal 29 Agustus 2009 KRDE Arek Surokerto mulai dioperasikan untuk melayani lintasan Surabaya-Mojokerto dimana terdiri dari dua set atau sepuluh unit kereta modifikasi dari KRL ABB-Hyundai. Terakhir, pada tanggal 5 November 2012 KRDE Sriwedari mulai dioperasikan untuk membantu tugas dari Prameks.

2.2.1.3 Prinsip Kerja Kereta Rel Diesel Elektrik

Pada dasarnya, prinsip kerja dari Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) dimulai dari mesin diesel. Mesin diesel pada KRDE digunakan sebagai penggerak utama. Mesin diesel ini kemudian dihubungkan dengan generator sehingga terkopel dengan poros generator. Berikut merupakan skema sederhana dari sistem propulsi dan *auxiliary* dari pada KRDE:



Gambar 2.2 Skema prinsip kerja KRDE

Mesin diesel berfungsi sebagai alat/komponen yang dapat merubah energi kimia menjadi energi mekanis. Energi kima yang digunakan pada mesin diesel sendiri berfungsi sebagai bahan bakar, biasanya berupa solar. Mesin diesel pada KRDE berfungsi sebagai tenaga penggerak mula. Pada saat start, generator menggunakan sumber tegangan dari baterai. Kemudian setelah itu, mesin diesel akan bekerja dan memutar rotor pada generator, sehingga arus dari baterai terputus melalui saklar utama. Karena *exciter* dipasang seporos dengan generator, maka

akan ikut berputar sehingga menghasilkan tegangan yang mana digunakan untuk menyuplai arus listrik pada generator. Dengan adanya arus listrik yang mengalir pada penguat magnet generator, maka akan dihasilkan tegangan listrik. Hasil keluaran dari alternator sendiri berupa tegangan bolak-balik (AC) tiga fasa karena menggunakan jenis generator sinkron. Besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator sebanding dengan kecepatan rotor. Tegangan AC tersebut diteruskan ke *rectifier* atau penyearah yang mana berfungsi sebagai konverter AC ke DC.

Hasil keluaran *rectifier* diteruskan ke *inverter* yang berfungsi sebagai konverter dari DC menjadi AC. Pada sistem kelistrikan KRDE, terdapat dua jenis *inverter* yaitu VVVF (*Variable Voltage Variable frequency*) *inverter* dan SIV (*Static Inverter*). Kedua jenis *inverter* tersebut mempunyai prinsip kerja yang sama, namun memiliki sifat dan nilai keluaran yang berbeda. Pada KRDE, VVVF (*Variable Voltage Variable Frequency*) *Inverter* berfungsi sebagai rangkaian elektronika daya yang akan menghasilkan nilai frekuensi dan tegangan yang bersifat variabel dan sesuai dengan kebutuhan beban. Hasil keluaran dari VVVF *inverter* berupa listrik tiga fasa digunakan untuk mengendalikan beban propulsi yang berupa motor traksi.

Jenis motor traksi yang dapat digunakan pada sistem propulsi ada dua macam yaitu motor AC, Motor DC dan motor linier yang digunakan pada kereta Maglev. Sedangkan, untuk KRDE sendiri biasanya menggunakan motor AC atau Motor DC. Motor DC tipe seri secara umum paling cocok digunakan untuk dipergunakan sebagai motor traksi karena mempunyai karakteristik torsi start yang tinggi. Namun karena diperlukan perawatan yang intensif, maka motor traksi DC digantikan menggunakan motor AC yang mana mudah dalam perawatannya dan mudah dalam pengendaliannya.

Hasil keluaran *rectifier* atau penyearah juga disalurkan ke SIV (*Static Inverter*) yang akan menghasilkan keluaran stabil atau *static*. SIV pada KRDE digunakan sebagai penyuplai *Auxiliary Load* yang mana memiliki frekuensi yang stabil. Beban *Auxiliary* yang ada pada kereta yaitu lampu, AC, *power socket*, dan beban lainnya yang mendukung berjalannya sistem.

2.2.2 Generator Sinkron

2.2.2.1 Umum

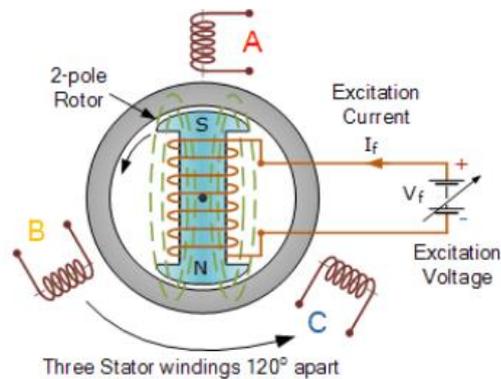
Secara umum, Generator sinkron atau Alternator merupakan salah satu jenis mesin listrik yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Tegangan keluaran dari generator sinkron berupa tegangan bolak-balik, oleh karena itu disebut juga dengan generator AC. Energi mekanik generator diperoleh dari putaran rotor yang digerakan oleh penggerak mula, sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotor.

Pada prinsipnya, generator sinkron merupakan kebalikan dari generator DC. Untuk generator DC, kumparan jangkar terdapat pada bagian rotor dan terletak di antara kutub-kutub magnet yang tetap ditempat yang kemudian diputar oleh tenaga mekanik. Sebaliknya, pada generator sinkron, kumparan jangkar disebut kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama dengan kumparan magnet diputar oleh tenaga mekanik. Pada generator sinkron, frekuensi listrik yang dihasilkan serempak atau sinkron dengan putaran mekanik generator tersebut. Selain itu, pada bagian rotor terdiri dari belitan medan dengan suplai arus DC yang akan menghasilkan medan magnet yang mana kecepatan putar sama dengan kecepatan putar medan magnet pada stator.

2.2.2.2 Konstruksi Generator Sinkron

Generator sinkron juga merupakan salah satu jenis mesin sinkron yang mana secara umum mempunyai konstruksi yang sama. Konstruksi dari mesin sinkron sendiri terdiri atas stator sebagai bagian yang diam, rotor sebagai bagian yang bergerak dan celah udara. Celah udara pada generator sinkron berfungsi sebagai tempat berputarnya rotor dan tempat induksi energi listrik dari rotor ke stator terjadi atau fluksi. Generator sinkron yang terdapat pada sistem kelistrikan

Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) berupa generator tiga fasa, dimana terdapat tiga kelompok kumparan stator atau tiga fasa.



Gambar 2.3 Konstruksi generator sinkron

a. Stator

Stator atau armatur merupakan bagian dari generator sinkron yang berfungsi sebagai penerima induksi magnet dari rotor. Stator juga merupakan bagian yang diam yang berbentuk rangka silinder dengan gulungan kawat konduktor yang disusun tertentu dan ditempatkan pada bagian alur-alur inti besi, disebut belitan jangkar. Pada gambar berikut memperlihatkan konstruksi dari stator tempat kumparan jangkar.



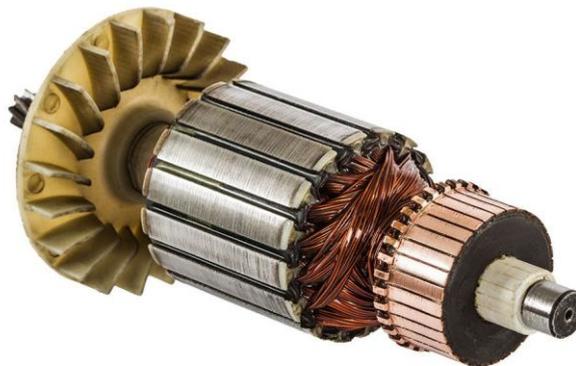
Gambar 2.4 konstruksi stator

Stator terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu:

- 1) Rangka stator berfungsi sebagai kerangka penyangga inti jangkar generator.
- 2) Inti Stator merupakan bagian yang dibuat dari campuran laminasi baja atau besi magnetik.
- 3) Alur (slot) dan Gigi berfungsi sebagai tempat untuk meletakkan kumparan stator.

b. Rotor

Rotor merupakan bagian yang bergerak/berputar dan berfungsi untuk membangkitkan medan magnet sebagai pembangkit tegangan yang akan di induksikan ke stator. Rotor juga berfungsi sebagai tempat belitan medan eksitasi. Kumparan medan magnet tersusun pada alur-alur besi rotor dan kutub-kutub magnet dengan lilitannya digunakan untuk mengaliri arus searah. Dengan kata lain, bahwa ketika pada kumparan medan dialiri arus searah atau DC maka akan terbentuk kutub magnet Utara dan Selatan pada inti rotor.



Gambar 2.5 konstruksi rotor

Pada rotor generator, terdapat tiga komponen utama antara lain:

1) Slip Ring

Slip ring ini berbentuk cincin logam yang melingkar pada poros rotor dan dipisahkan oleh isolasi tertentu. Pada slip ring dipasang terminal kumparan rotor untuk dihubungkan ke sumber arus DC melalui sikat yang menempel pada slip ring.

2) Kumparan Rotor atau kumparan medan.

Kumparan rotor merupakan bagian utama dalam rotor yang mana dapat menghasilkan magnet dan mendapatkan arus DC dari sumber eksitasi.

3) Poros Rotor

Poros rotor digunakan sebagai tempat penempatan kumparan medan yang berbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

2.2.2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja dari generator sinkron dimulai ketika kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang disuplai oleh arus searah (DC). Arus searah yang mengalir pada kumparan medan akan menghasilkan medan magnet atau fluk pada kumparan rotor. Kemudian rotor akan diputar oleh penggerak mula (*Prime mover*) yang telah terhubung dengan rotor sehingga berputar pada kecepatan tertentu. Medan magnet bergerak pada arah putaran rotor. Dengan perkataan lain, bahwa pada rotor mempunyai kecepatan putar yang sama dengan medan magnet. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet dengan frekuensi elektrik pada stator dapat dilihat pada persamaan frekuensi dibawah ini. Pada persamaan tersebut juga menunjukkan adanya hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi yang dihasilkan.

$$f = \frac{n_r \cdot p}{120}$$

Keterangan:

f = Frekuensi listrik (Hz)

n_r = Kecepatan putar rotor/medan (rpm)

p = Jumlah kutub magnet

Ketika rotor berputar maka pada saat itu pula medan magnet berputar dan bersifat bolak-balik atau fluk putar. Fluk putar ini selanjutnya akan memotong-motong kumparan stator, sehingga mengakibatkan ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik (GGL) karena adanya pengaruh induksi dari fluk putar tersebut. Selain itu, Gaya gerak listrik yang terdapat pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik, atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putaran rotor. Sedangkan, besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan (I_f) yang diberikan pada rotor.

Adapun besarnya GGL induksi kumparan stator atau armatur per phase sebagai berikut:

$$E_a / \text{ph} = 4,44.f.M.\phi.kd$$

Keterangan:

E_a = Gaya gerak listrik armatur per phase (Volt)

F = Frekuensi keluaran generator (Hz)

M = Jumlah kumparan per phase yang mana sama dengan $Z/2$

Z = Jumlah konduktor seluruh slot per phase

Kd = Faktor distribusi. Kd diperlukan karena kumparan armatur atau alternator tidak terletak dalam satu slot, tetapi terdistribusikan dalam beberapa slot per phase.

ϕ = Fluk magnet per kutub per phasa.

Sehingga dari persamaan GGL tersebut dapat ditulis:

$$E_a / \text{ph} = 4,44.f.\frac{Z}{2}.\phi.kd$$

Keterangan:

I_f = Arus kumparan medan atau arus penguat (A)

R_f = Hambatan kumparan medan (Ohm)

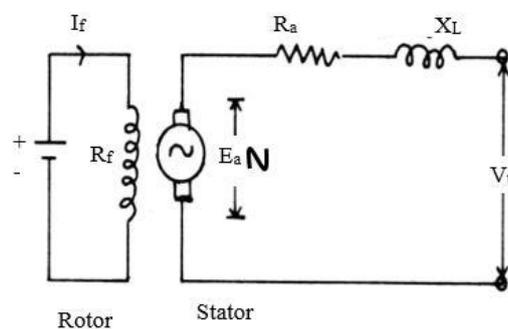
R_a = Hambatan armatur (Ohm)

X_L = Reaktansi bocor (Ohm)

V_t = Tegangan keluaran (Volt)

$$E_a = GGL \text{ armatur (Volt)}$$

Fluk magnet yang dihasilkan oleh kumparan rotor tidak seluruhnya tercangkup oleh kumparan stator. Dengan perkataan lain, bahwa terdapat fluk bocor pada stator yang dinyatakan dengan hambatan armatur (R_a) dan reaktansi bocor (X_L). Bagan rangkaian dari generator sinkron dalam keadaan tanpa beban, sebagai berikut:



Gambar 2.6 Rangkaian Generator sinkron tanpa beban

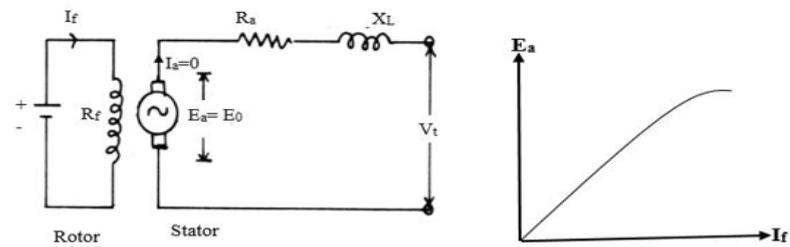
Saat generator sinkron dalam keadaan tanpa beban, arus armatur (I_a) = 0. Dengan demikian besarnya tegangan terminal sebagai berikut:

$$V_t = E_a = E_0$$

Oleh karena besarnya GGL pada armatur merupakan fungsi dari flux magnet, maka dapat ditulis sebagai berikut:

$$E_a = f(\phi)$$

Berdasarkan persamaan E_a diatas, menjelaskan bahwa besarnya arus penguat medan berbanding lurus dengan fluk dan GGL armatur. Pengaturan arus penguat medan pada nilai tertentu, akan didapat nilai ggl armatur tanpa beban dalam keadaan saturasi. Secara grafik hubungan antara arus penguat medan I_f dan E_a dijelaskan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.7 Rangkaian dan grafik saat generator sinkron tidak berbeban

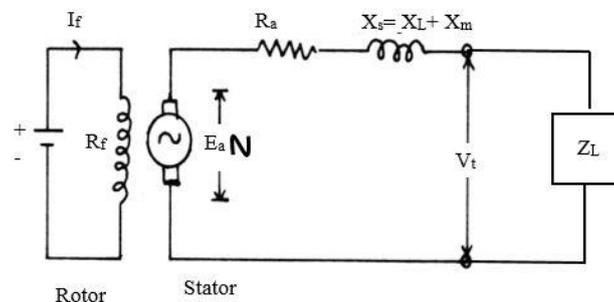
2.2.2.4 Generator Sinkron Berbeban

Dengan adanya beban yang terhubung dengan keluaran generator sinkron, maka akan mengakibatkan arus armatur (I_a) mengalir. Hal ini akan menyebabkan kumparan armatur atau jangkar timbul fluk putar jangkar. Fluk mempunyai sifat mengurangi atau menambah flux putar yang dihasilkan oleh kumparan. Fluk putar armatur ini ditimbulkan karena adanya arus armatur atau arus jangkar yang akan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar ini bersifat reaktif dan disebut juga sebagai reaktansi pemagnet/armatur (X_m). Reaktansi pemagnet ini bersama-sama dengan reaktansi fluk bocor (X_L) dan reaktansi sinkron (X_s), secara matematis ditulis sebagai berikut:

$$X_s = X_L + X_m$$

$$E_a = V_t + I_a(R_a + jX_s)$$

Dengan demikian, bagan rangkain listrik dari generator sinkron berbeban sebagai berikut:



Gambar 2.8 Rangkaian generator sinkron berbeban

2.2.2.4 Daya Keluaran Generator Sinkron

Apabila dari ketiga kumparan armatur saling terpisah atau tidak terhubung maka setiap fasa membutuhkan dua konduktor sehingga jumlah konduktor ada enam atau setiap kabel transmisi terdapat enam konduktor. Namun, sistem tersebut sangatlah rumit dan tidak ekonomis. Oleh karena itu, terdapat dua metode untuk menghubungkan kumparan, yang mana sebagai berikut:

a. Hubungan Bintang (Y)

Hubungan bintang dapat dilakukan dengan cara menghubungkan ujung coil bersama ke titik netral. Tegangan yang diinduksikan dari tiap belitan disebut tegangan fasa dan arus fasa. Sedangkan antara dua terminal disebut dengan tegangan line (V_L) dan arus line (I_L).

$$\text{Total daya } P_t = 3 \times V_{ph} \times I_L \cos \phi$$

$$\text{Daya/fasa } P_{ph} = V_{ph} \times I_L \cos \phi$$

Dimana:

$$V_{ph} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

Maka daya total menjadi:

$$P_t = 3 \cdot \frac{V_L}{\sqrt{3}} \times I_L \times \cos \phi$$

$$P_t = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \phi$$

b. Hubungan delta (Δ)

Hubungan delta dapat dilakukan dengan cara menghubungkan ketiga coil satu sama lain sehingga membentuk segitiga. Pada hubungan delta tidak terdapat titik netral dan arus yang mengalir ke beban langsung disalurkan ke *ground*.

$$\text{Daya total } P_t = 3 \times V_L \times I_{ph} \cos \phi$$

$$\text{Daya perfasa } P_{ph} = V_L \times I_{ph} \cos \phi$$

Dimana:

$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

$$P_t = 3 \times V_L \times \frac{I_L}{\sqrt{3}} \times \cos \phi$$

$$P_t = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \phi$$

2.2.2.5 Rugi-rugi Generator Sinkron

Secara teori, generator sinkron merupakan jenis mesin sinkron yang dapat mengkonversikan daya mekanis yang berasal dari penggerak mula menjadi daya listrik tiga fasa. Adanya daya mekanis dan daya listrik pada generator sinkron akan menyebabkan perbedaan antara daya keluaran dengan daya masukan atau disebut dengan rugi-rugi. Pada dasarnya, rugi-rugi sangat tidak diharapkan karena dapat menurunkan efisiensi kinerja dari generator. Rugi-rugi yang terjadi pada generator sinkron dibagi menjadi beberapa bagian, diantaranya:

a. Rugi-rugi tembaga

Rugi-rugi tembaga pada generator sinkron terdiri dari rugi stator dan rugi rotor. Rugi-rugi ini terjadi di dalam kumparan medan dan kumparan jangkar generator saat dibebani. Penyebab adanya rugi-rugi ini karena pada kedua kumparan tersebut memiliki nilai resistansi R_f dan R_a sehingga mengalir arus DC sebesar I_f dan I_a yang akan menimbulkan kerugian berupa panas, dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_f = I_f^2 \times R_f$$

$$I_f^2 = \frac{P_f}{R_f}$$

$$I_f = \sqrt{\frac{P_f}{R_f}}$$

$$P_a = 3 \times I_a^2 \times R_a$$

$$I_a^2 = \frac{P_a}{3 \times R_a}$$

$$I_a = \sqrt{\frac{P_a}{3 \times R_a}}$$

Keterangan:

P_a = Rugi tembaga kumparan jangkar (Watt)

P_f = Rugi tembaga kumparan medan (Watt)

I_a = Arus jangkar (A)

I_f = Arus medan (A)

R_a = Resistansi pada jangkar (Ohm)

R_f = Resistansi pada medan (Ohm)

b. Rugi-rugi inti besi

Rugi-rugi inti besi pada generator sinkron terjadi karena adanya fluksi utama mesin dan terjadi pada jangkar. Rugi-rugi ini terdiri atas rugi-rugi histeris dan rugi-rugi arus pusar atau arus *eddy* yang disebabkan oleh adanya arus yang mengalir pada inti sehingga terjadi pemanasan dan menaikkan temperatur pada generator.

c. Rugi-rugi mekanik

Rugi-rugi mekanik merupakan kerugian yang ditimbulkan dari adanya efek-efek mekanik. Rugi ini terdiri atas dua macam kerugian yaitu rugi gesekan dan rugi angin. Rugi gesekan sendiri disebabkan oleh pergesekan antara bagian yang berputar dengan bagian yang diam. Sedangkan rugi angin disebabkan oleh pergesekan antara bagian-bagian generator yang berputar dengan udara di dalam *casing* generator. Rugi gesek dan angin pada generator dapat dihitung dengan pengurangan rugi hubung singkat (P_{hs}) dengan rugi tembaga pada rotor.

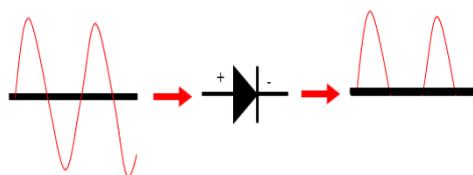
$$P_{fw} = P_{hs} - P_f$$

2.2.3 Penyearah Tiga Fasa

2.2.3.1 Umum

Penyearah atau *Rectifier* merupakan suatu alat elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah sinyal AC (*Alternating Current*) menjadi sinyal DC (*Direct Current*). Penyearah tiga fasa adalah penyearah yang mempunyai masukan berupa tegangan AC tiga fasa pada rangkaianannya. Rangkaian penyearah pada

umumnya menggunakan komponen utama berupa semikonduktor, seperti dioda dan thyristor. Dioda dapat digunakan pada penyearah karena memiliki karakteristik yang dapat melewati arus listrik ke satu arah dan menghambat ke arah sebaliknya. Hal tersebut terjadi karena dioda memiliki polaritas positif (Anoda) dan Negatif (Katoda) sehingga arus yang mengalir pada dioda hanya bersifat satu arah yaitu *forward bias* yang mana terjadi ketika pada Anoda diberikan bias positif dan Katoda bias negatif. Sedangkan, kondisi *reverse bias* terjadi ketika pada Anoda diberikan tegangan negatif dan Katoda positif maka arus tidak akan mengalir atau diblok oleh dioda. Oleh karena itu, ketika dioda dialiri dengan arus bolak-balik (AC), maka hanya akan melewatkan setengah gelombang, sedangkan setengah gelombang lagi diblokir. Berikut merupakan ilustrasi prinsip kerja dari dioda:



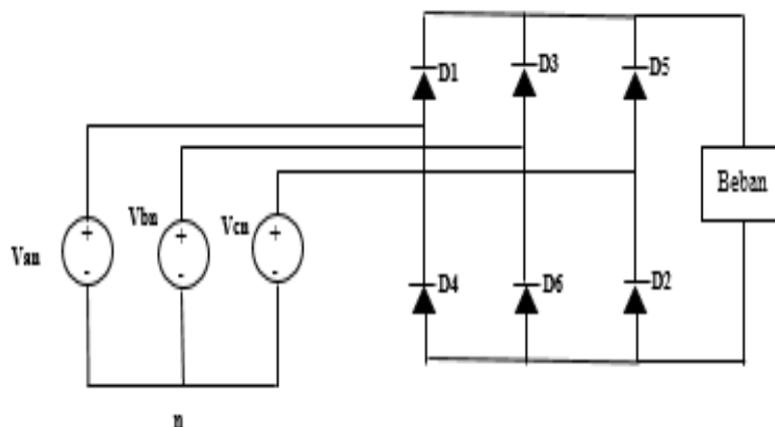
Gambar 2.9 Prinsip dasar dioda

Hasil keluaran dari penyearah tiga fasa mempunyai nilai daya yang besar sehingga penyearah tiga fasa biasanya diaplikasikan dalam dunia industri yang mana membutuhkan tegangan DC dan arus beban yang besar.

2.2.3.2 Prinsip Kerja Penyearah Tiga Fasa

Pada prinsipnya, Penyearah tiga fasa merupakan penyearah yang mempunyai masukan berupa sumber tiga fasa yang mana disuplai oleh v_1 , v_2 , dan v_3 . Pada penyearah tiga fasa dengan menggunakan sistem jembatan menggunakan komponen dioda sebanyak enam dioda. Untuk memudahkan dalam penjelasan maka keenam dioda tersebut diberi nama D1 sampai dengan D6. Untuk fasa v_1

terdiri dari dioda D1 dan D4, fasa v2 untuk D3 dan D6, dan fasa v3 untuk D5 dan D2. Keenam dioda tersebut dibuat kelompok genap (bawah) dan kelompok ganjil (atas). Untuk kelompok ganjil terdiri atas D1, D3 dan D5 yang mana katodanya disatukan sebagai terminal positif. Sedangkan untuk kelompok genap D2, D4, dan D6 anodanya disatukan sebagai terminal negatif. Berikut merupakan rangkaian penyearah tiga fasa dengan menggunakan jembatan dioda:



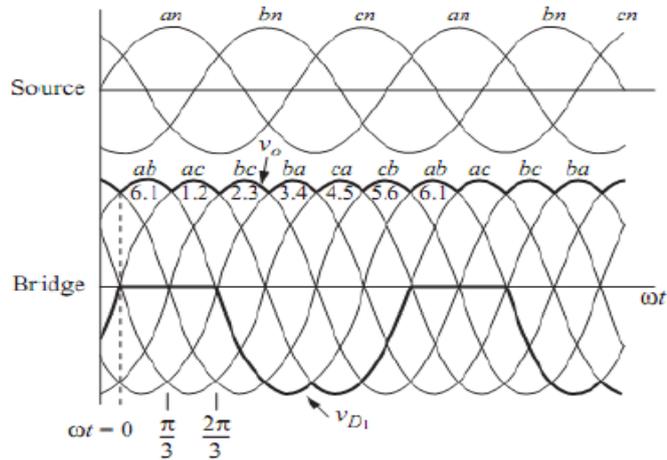
Gambar 2.10 Penyearah tiga fasa

Dioda yang pertama melakukan konduksi adalah pada grup dioda ganjil (D1, D2, D3), dan terhubung ke tegangan fasa positif. Sedangkan untuk dioda yang kedua akan konduksi adalah dari grup dioda genap (D2, D4, dan D6) dan terhubung dengan tegangan negatif. Dengan perkataan lain bahwa arus dioda akan mengalir melalui salah satu dioda pada kelompok ganjil dan genap. Pada kelompok ganjil, dioda yang mempunyai tegangan paling tinggi akan konduksi sedangkan dua dioda akan berada pada bias mundur. Untuk kelompok genap, dioda yang mempunyai tegangan paling rendah akan konduksi sedangkan dua dioda lainnya akan berada pada bias mundur.

Urutan konduksi dari keenam diode dapat dilihat dari siklus gelombang sinusoidal yang konduksi secara bergantian. Konduksi dimulai dari diode D1 + D6 sepanjang sudut komutasi 60° . Secara berulang-ulang dilanjutkan diode D1 + D2, D3 + D2, D3 + D4, D5 + D4 dan terakhir D5 + D6. Oleh karena itu, dalam satu

siklus gelombang tiga fasa terdapat enam kali komutasi dari keenam diode secara bergantian.

Ada enam kombinasi line to line tegangan setiap 60°



Gambar 2.11 Gelombang penyearah tiga fasa

Sehingga, didapatkan tegangan keluaran dari penyearah tiga fasa, sebagai berikut:

$$V_{dc} = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} V_m \sin(\theta) d\theta = \frac{3}{\pi} V_m \left[-\cos(\theta) \right]_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}}$$

$$= \frac{3}{\pi} V_m = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{rms} = 1.35 V_{rms}$$

Untuk mencari V_{peak} dari tegangan penyearah adalah dari $1/0,707 \times V_{rms} = 1.414 \times V_{rms}$, sehingga jika dilihat dari posisi gelombangnya. Untuk semua bentuk gelombang arus dari dioda mempunyai nilai rata-rata yang sama, sebagai berikut:

$$I_D = \frac{1}{3} I_{out}$$

Selain itu, pada dioda yang mempunyai sumber fasa yang sama tidak dapat dilewati arus dalam waktu yang sama, yaitu antara D1 dan D4, D3 dan D6, serta D5 dan D2. Hal ini akan menghasilkan arus masukan sama dengan nol pada interval waktu ketika tegangan fasa bukan positif ataupun negatif. Berikut merupakan tabel keadaan dari dioda :

Tabel 1. Keadaan dioda

Device Mode	V _{D1}	V _{D2}	V _{D3}	V _{D4}	V _{D5}	V _{D6}	V _o
D ₁ ·D ₂	0	0	V _{ba}	V _{ca}	V _{ca}	V _{cb}	V _{ac}
D ₂ ·D ₃	V _{ab}	0	0	V _{ca}	V _{cb}	V _{cb}	V _{bc}
D ₃ ·D ₄	V _{ab}	V _{ac}	0	0	V _{cb}	V _{ab}	V _{ba}
D ₄ ·D ₅	V _{ac}	V _{ac}	V _{bc}	0	0	V _{ab}	V _{ca}
D ₅ ·D ₆	V _{ac}	V _{bc}	V _{bc}	V _{ba}	0	0	V _{cb}
D ₆ ·D ₁	0	V _{bc}	V _{ba}	V _{ba}	V _{ca}	0	V _{ab}

2.2.3.3 Rugi-rugi Penyearah Tiga Fasa

Pada komponen dioda terdapat dua kondisi, yaitu *forward bias* dan *reverse bias*. Pada keadaan *forward bias* dioda seperti saklar yang tertutup yang akan mengalirkan arus dari anoda ke katoda. Sedangkan ketika *reverse bias* dioda seperti saklar terbuka yang akan memblokir arus dari katoda ke anoda. Oleh karena itu, untuk mengetahui besarnya rugi-rugi yang terjadi pada dioda apada penyearah tiga fasa, sebagai berikut:

$$P_{\text{dioda}} = V_f \times I_f$$

Keterangan:

P_{dioda} = Rugi-rugi pada dioda (Watt)

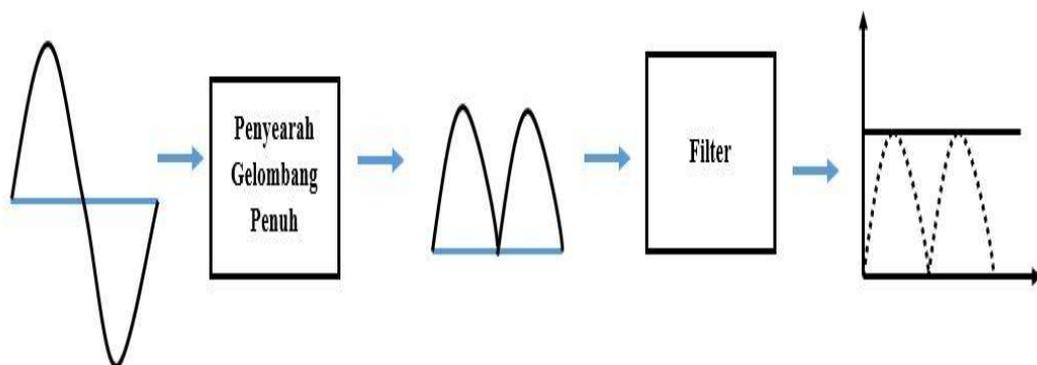
V_f = Tegangan jatuh saat *forward bias* (Volt)

I_f = Arus yang mengalir saat *forward bias* (A)

2.2.3.4. Filter Kapasitor

Pada umumnya, bentuk gelombang tegangan DC murni adalah rata dan tanpa *ripple*. Pada Penyearah, tegangan DC yang dihasilkan oleh dioda masih terdapat *ripple* karena masih mengandung tegangan bolak-balik. Tegangan yang dihasilkan oleh penyearah tiga fasa belum sepenuhnya rata seperti tegangan DC pada umumnya. Untuk memperkecil *ripple* perlu menggunakan filter yang berfungsi untuk menyaring komponen searah dan mengurangi tegangan bolak-balik.

Dengan menambahkan kapasitor yang dipararelkan dengan beban pada rangkaian penyearah, maka *ripple* tegangan akan sangat ditekan. Sebagaimana diketahui, bahwa kapasitor berfungsi untuk menyimpan energi. Ketika dioda konduksi atau tegangan sumber naik, kapasitor akan terisi hingga mencapai tegangan maksimum. Setelah mencapai harga maksimum, dioda akan berhenti konduksi. Hal ini terjadi karena kapasitor mempunyai tegangan maksimum sehingga tidak ada beda potensial dan mengakibatkan dioda seperti saklar terbuka. Selain itu, ketika dioda tidak konduksi, tegangan pada kapasitor tidak mengalami proses penurunan tegangan. Dalam keadaan ideal ini, tegangan keluaran dari penyearah akan sama dengan tegangan puncak masukan dan akan ditahan untuk seterusnya.



Gambar 2.12 Filter kapasitor pada penyearah gelombang penuh

2.2.4 VVVF (*Variable Voltage Variable Frequency*) *Inverter*

2.2.4.1 Umum

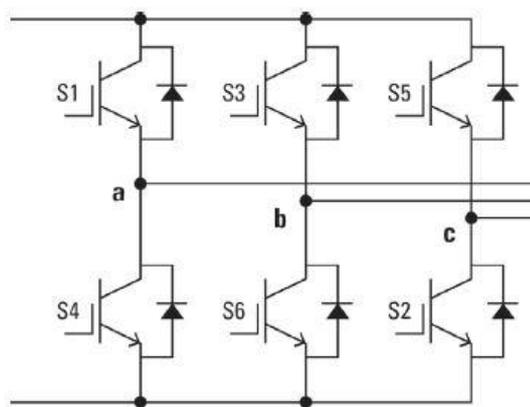
Secara umum, *Inverter* merupakan perangkat elektronika daya yang dapat mengkonversi tegangan searah (DC/*Direct Current*) menjadi tegangan bolak-balik (AC/*Alternating Current*). *Inverter* juga dapat digunakan sebagai pengubah arus listrik DC menjadi arus AC dan mengatur atau menstabilkan tegangan. Pada *Inverter* umumnya menggunakan komponen utama berupa semikonduktor seperti GTO (*Gate Turn Off Thyristor*), MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor FET*) atau IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) yang mana berfungsi sebagai *switch*. Teknik kontrol yang biasanya digunakan untuk mengendalikan *switch* adalah PWM (*Pulse Width Modulation*).

Berdasarkan jenis gelombang keluarannya *inverter* dibagi menjadi dua, yaitu *Inverter Sumber Arus* atau *Current Source Inverter (CSI)* dan *Inverter Sumber Tegangan* atau *Voltage Source Inverter (VSI)*. Pada *inverter* jenis CSI menghasilkan gelombang keluaran berupa arus AC hasil dari perubahan arus masukan sumber DC. Untuk *inverter* jenis VSI akan menghasilkan gelombang keluaran berupa tegangan AC hasil dari perubahan tegangan masukan dari sumber DC. Sedangkan, untuk VVVF *inverter* termasuk dalam jenis VSI karena mempunyai keluaran berupa tegangan dan frekuensi bersifat variabel untuk mengendalikan motor induksi. VVVF ini biasanya diaplikasikan dalam bidang perkereta api bertransmisi elektrik untuk mengendalikan motor listrik (Heri:2016).

2.2.4.2 Prinsip Kerja VVVF *Inverter*

VVVF *inverter* merupakan jenis *inverter* tiga fasa dan mempunyai keluaran berupa tegangan bolak-balik (AC) dan frekuensi yang variabel. Rangkaian VVVF *inverter* IGBT ini terdiri dari enam buah *switch* yang berupa komponen semikonduktor dengan menggunakan IGBT (*Insulated Gate Bipolar*

Transistor). Untuk menghasilkan keluaran AC sinusoidal, *inverter* bekerja dengan mengatur penyaklaran sumber masukan dari sumber DC. *Inverter* tiga fasa dapat digunakan sebagai alat pengatur kecepatan motor induksi tiga fasa. Dengan menggunakan prinsip pensaklaran para *inverter* tiga fasa, frekuensi motor induksi tiga fasa dapat diubah-ubah untuk menghasilkan kecepatan sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 2.13 Konfigurasi *inverter* tiga fasa

Untuk memudahkan penjelasan, maka setiap *switch* diberi nama S1 sampai dengan S6. Untuk *switch* ganjil berada pada sisi positif (S1, S3, dan S5) sedangkan untuk *switch* genap berada pada sisi negatif (S2, S4, dan S6). Kedua pasangan sisi *switch*, yaitu S1 dan S4, S3 dan S6, dan S5 dan S2, tidak diperbolehkan untuk berkerja secara bersamaan atau serempak, karena dalam hal ini akan terjadi hubung singkat dalam rangkaian. Demikian pula, kedua pasangan sisi *switch* tidak dapat dimatikan secara bersamaan karena akan menghasilkan tegangan keluaran AC yang tidak definisi dan akan menghasilkan tegangan berdasarkan polaritas arus masing-masing fasa.

Pada tabel 2 terdapat delapan keadaan *switch*, terdapat dua keadaan yaitu 7 dan 8 yang menghasilkan tegangan keluaran 0. Hal ini karena arus AC secara bebas melewati komponen bagian atas ataupun bawah. sedangkan keadaan lainnya, yaitu 1 sampai dengan 6 menghasilkan tegangan keluaran selain nol. Untuk menghasilkan bentuk gelombang tegangan, *inverter* harus bergerak dari

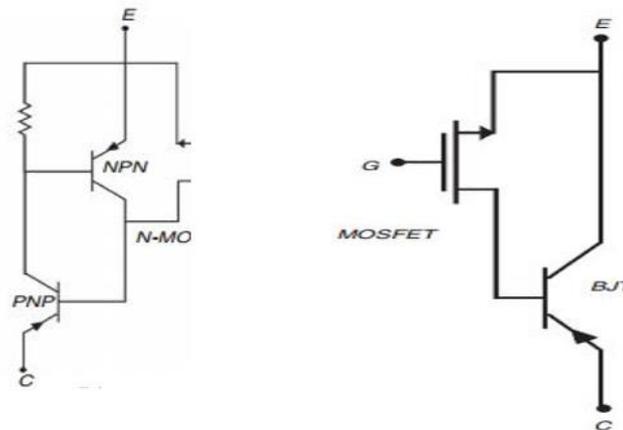
satu keadaan ke keadaan yang lainnya. Dengan demikian akan menghasilkan tegangan keluaran AC yang mengandung nilai diskrit dari tegangan yaitu V_i , 0, dan $-v_i$. Untuk pemilihan kondisi *On* dan *off* pada kedua sisi saklar akan dikendalikan dengan teknik PWM (*Pulse Width Modulation*). Dengan menggunakan teknik PWM akan didapatkan amplitudo dan frekuensi keluaran yang diinginkan. Selain itu, PWM juga menghasilkan harmonisa yang jauh lebih kecil dari pada teknik yang lain serta menghasilkan gelombang sinusoidal. Berikut merupakan keadaan pasti pada *switching inverter* tiga fasa:

Tabel 2. Keadaan *switch* pada *inverter* tiga fasa

Kondisi Ke-	Kondisi	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	Vector
1	S_1 - S_2 - S_6 On & S_4 - S_5 - S_3 Off	V_i	0	V_i	$v_1 = 1 + j0,577$
2	S_2 - S_3 - S_1 On & S_5 - S_6 - S_4 Off	0	V_i	$-V_i$	$v_2 = j1,155$
3	S_3 - S_4 - S_2 On & S_6 - S_1 - S_5 Off	$-V_i$	V_i	0	$v_3 = -1 + j0,577$
4	S_4 - S_5 - S_3 On & S_1 - S_2 - S_6 Off	$-V_i$	0	V_i	$v_4 = -1 - j0,577$
5	S_5 - S_6 - S_4 On & S_2 - S_3 - S_1 Off	0	$-V_i$	V_i	$v_5 = -j1,155$
6	S_6 - S_1 - S_5 On & S_3 - S_4 - S_2 Off	V_i	$-V_i$	0	$v_6 = 1 - j0,577$
7	S_1 - S_3 - S_5 On & S_4 - S_6 - S_2 Off	0	0	0	$v_7 = 0$
8	S_4 - S_6 - S_2 On & S_1 - S_3 - S_5 Off	0	0	0	$v_8 = 0$

2.2.4.3 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) merupakan jenis komponen transistor yang dapat bekerja sebagai *switch* pada aplikasi daya. IGBT juga merupakan piranti semikonduktor gabungan antara transistor bipolar (BJT) dan transistor efek medan (MOSFET) dan mempunyai tiga kaki yang sama dengan jenis transistor lainnya. Kaki-kaki dari transistor terdiri dari *gate* atau basis, *drain* atau *collector*, dan *source* atau *emitor*.



Gambar 2.14 Konfigurasi IGBT

Komponen IGBT merupakan gabungan struktur dan sifat-sifat dari kedua jenis transistor yaitu BJT dan MOSFET. Dengan perkataan lain, bahwa pada IGBT mempunyai sifat kerja yang menggabungkan keunggulan sifat BJT dan MOSFET. IGBT merupakan perangkat yang mempunyai karakteristik MOSFET pada sisi masukan dan karakteristik bipolar pada sisi keluaran. pada *gate* IGBT digunakan sebagai saluran kendali yang juga mempunyai struktur bahan penyekat atau *insulator* yang ada pada MOSFET, sedangkan terminal *source* dari MOSFET terhubung dengan terminal basis dari BJT. Oleh karena itu, arus *drain* yang keluar dari MOSFET akan menjadi arus basis dari BJT. Besarnya resistansi masukan dari MOSFET, maka terminal masukan IGBT hanya akan menarik arus yang kecil dari sumber masukan.

Disisi lain, arus drain berfungsi sebagai arus keluaran dari MOSFET akan cukup besar untuk membuat BJT mencapai keadaan jenuh. Dengan menggunakan gabungan dari sifat kedua unsur tersebut, IGBT mempunyai perilaku yang cukup ideal sebagai *switch*. Namun, IGBT juga tidak terlalu membebani rangkaian dan mampu menghasilkan arus yang besar bagi beban listrik yang dikendalikan.

Pada sisi masukan, IGBT memiliki impedansi yang sangat tinggi sehingga tidak membebani rangkaian pengendalinya yang mana pada umumnya terdiri dari rangkaian *logic*. Dengan adanya impedansi yang tinggi akan mampu

menyederhanakan rangkaian pengendali dan penggerak IGBT. Disamping itu, kecepatan *switching* saat memutus dan penyambung jauh lebih baik dibandingkan dengan BJT tetapi lebih rendah jika dibandingkan dengan MOSFET.

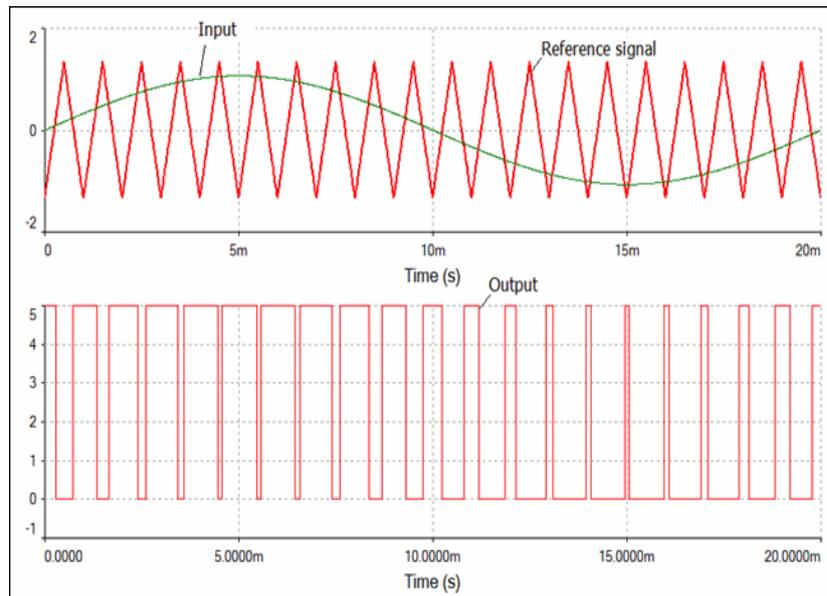
Pada sisi keluaran, IGBT memiliki kesamaan dari kolektor dan emitor pada BJT sehingga memiliki nilai resistansi (R_{off}) yang sangat besar ketika dalam tidak konduksi sehingga arus bocor yang terjadi bernilai sangat kecil. Pada saat IGBT konduksi, resistansi pensaklaran (R_{on}) sangat kecil sehingga hal tersebut akan mengakibatkan tegangan jatuh lebih kecil daripada transistor jenis lainnya. Dengan demikian jika tegangan turun maka kebutuhan daya saat konduksi juga kecil.

2.2.4.4 PWM (Pulse Width Modulation)

PWM atau *Pulse Width Modulation* merupakan suatu teknik yang digunakan untuk mengatur *switching* IGBT pada *inverter*. Dengan menggunakan teknik PWM maka keluaran *inverter* yang berupa tegangan dan frekuensi dapat dikendalikan sesuai dengan fungsi sinus. Pada dasarnya teknik ini dilakukan dengan membandingkan dua sinyal untuk mengatur pola penyaklaran. Sinyal pertama yaitu sinyal *carrier* yang biasanya sinyal segitiga A_c yang digunakan sebagai sinyal representatif. Sinyal kedua yaitu sinyal referensi yang mana berfungsi sebagai sinyal yang akan dimodulasi untuk mendapatkan bentuk keluaran yang diinginkan A_r .

Perbandingan antara amplitudo sinyal referensi A_r dan sinyal *carrier* A_c disebut dengan indeks modulasi (m) atau duty cycle (D) yang mana mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$D = \frac{A_r}{A_c} \times 100\%$$



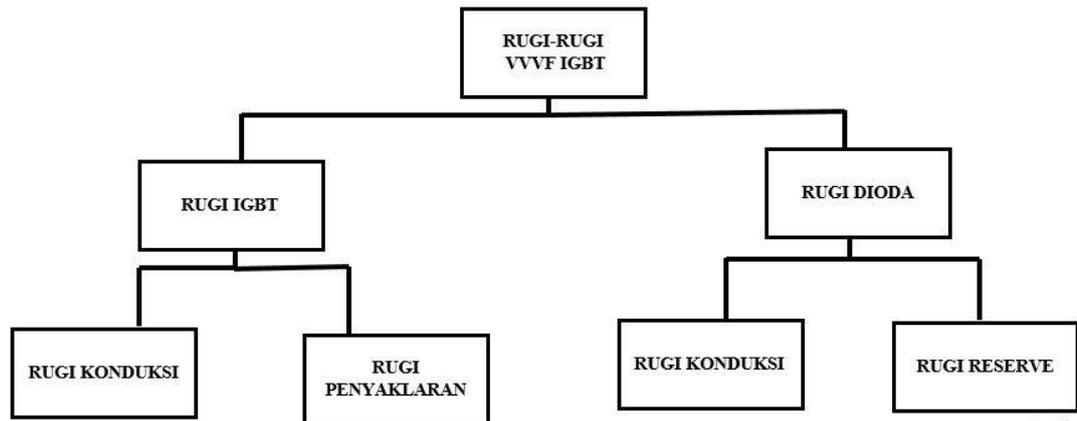
Gambar 2.15 Teknik PWM

Indeks modulasi akan maksimal jika amplitudo sinyal referensi A_r sama dengan sinyal carrier A_c . Besarnya indeks modulasi yaitu rentang dari 0 sampai dengan maksimum akan menentukan besarnya keluaran dari *inverter*. Hubungan antara indeks modulasi dengan keluaran *inverter* linear atau berbanding lurus. Kondisi *over modulation* terjadi ketika amplitudo sinyal referensi A_r lebih besar daripada amplitudo sinyal *carrier* sehingga hubungan antara *inverter* dengan indeks modulasi tidak lagi linear.

Ketika m besar maka sinyal referensi berpotongan dengan sinyal *carrier* pada titik zero *crossing* maka pola penyaklan menjadi penyaklan sinyal persegi. Kondisi ini disebut dengan daerah saturasi PWM karena indeks modulasi tidak lagi berpengaruh terhadap besarnya keluaran. Pada operasi penyaklan persegi untuk mengatur besarnya keluaran *inverter* dapat dilakukan dengan mengatur masukannya karena *inverter* tidak dapat mengatur besarnya keluaran.

2.2.4.5 Rugi-rugi VVVF Inverter IGBT

Pada VVVF *inverter* IGBT dengan menggunakan teknik PWM, terdapat dua rugi-rugi yang terjadi, yaitu rugi dioda dan rugi IGBT.



Gambar 2.16 Rugi-rugi VVVF IGBT

Untuk menghitung besarnya nilai rugi-rugi yang terdapat pada dioda sebagai berikut:

$$P_{\text{dioda}} = P_{\text{konduksi}} + P_{\text{reserve}}$$

Dimana :

$$P_{\text{konduksi}} = V_f \times I_f$$

$$P_{\text{reverse}} = \frac{E_{\text{rec}} \times I_{\text{pk}} \times f_{\text{sw}} \times V_{\text{dc}}}{\pi \times I_{\text{nom}} \times V_{\text{nom}}}$$

Sedangkan, untuk rugi IGBT dibagi menjadi dua, yaitu rugi-rugi konduksi dan rugi-rugi pensaklaran. Rugi konduksi dari *inverter* tidak tergantung pada frekuensi switching, melainkan dipengaruhi oleh *duty cycle*. Untuk rugi-rugi pensaklaran tergantung dari besarnya frekuensi pensaklaran dan bernilai berbanding lurus.

$$P_{\text{igbt}} = P_{\text{cond}} + P_{\text{swigbt}}$$

Rugi konduksi pada aplikasi PWM merupakan hasil perkalian antara *duty cycle* dengan daya disipasi. Sedangkan, untuk Rugi-rugi penyaklaran pada *inverter* ini terdapat dua jenis, yaitu rugi-rugi saat saklar *on* dan saat *off*. Pada rugi-rugi ini, frekuensi penyaklaran akan mempengaruhi nilai rugi-rugi yang dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{\text{cond}} = D \times (V_{\text{ce(sat)}} \times I_c)$$

$$P_{\text{sw}} = \frac{(E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) \times I_{\text{pk}} \times f_{\text{sw}} \times V_{\text{dc}}}{\pi \times I_{\text{nom}} \times V_{\text{nom}}}$$

Keterangan:

P_{cond} = Rugi-rugi konduksi pada IGBT (Watt)

$V_{\text{ce(sat)}}$ =Tegangan IGBT saat keasaan saturasi (Volt)

I_c = Arus kolektor saat IGBT saturasi (A)

P_{igbt} = Rugi-rugi pada IGBT(Watt)

P_{sw} =Rugi-rugi pensaklaran(Watt)

E_{rec} =Rugi-rugi saat *reverse* (Watt)

$E_{\text{on}} + E_{\text{off}}$ =rugi-rugi saat saklar *on* dan *off* (Watt)

I_{pk} =Besarnya arus pada saklar(A)

f_{sw} =Frekuensi pensaklaran (Hz)

V_{dc} =Tegangan masukan (Volt)

V_{nom} =Tegangan nominal (Volt)

I_{nom} =Arus nominal (A)

2.2.5 Motor Induksi Tiga Fasa

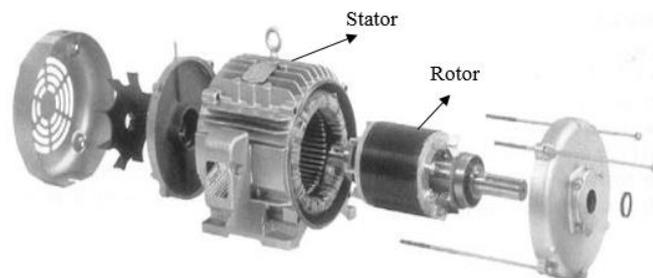
2.2.5.1 Umum

Motor induksi tiga fasa merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi mengubah sumber listrik AC (*Alternating Current*) menjadi energi mekanik dalam bentuk tenaga putar. Motor jenis ini berputar akibat adanya arus induksi yang disuplai ke bagian rotor. Adanya arus induksi ini berasal dari perbedaan relatif dari putaran rotor dengan putaran stator, disebut dengan slip. Akibat dari adanya perbedaan putaran ini maka motor induksi sering disebut dengan motor tidak serempak. Motor induksi juga dapat diidentikkan dengan transformator, kumparan primer yang diam sebagai kumparan stator atau armatur, sedangkan kumparan sekunder yang berputar sebagai kumparan rotor.

Kecepatan putaran motor induksi tiga fasa pada dasarnya konstan, dimulai saat berbeban maupun berbeban penuh. Kecepatan putar motor induksi dipengaruhi oleh frekuensi dan efisiensi. Dengan demikian untuk mengendalikan kecepatan motor induksi tiga fasa tidaklah mudah. Namun, motor ini memiliki konstruksi yang kuat, sederhana, handal, harga yang relatif murah, dan mudah dalam perawatan. Selain itu, efisiensi tinggi saat kondisi berputar normal sehingga tidak dibutuhkan sikat dan karenanya rugi daya yang diakibatkannya dapat dikurangi.

2.2.5.2 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

Pada dasarnya, motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor listrik lainnya. Konstruksi motor induksi tiga fasa terdiri atas dua bagian, yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian motor yang luar dan tidak berputar. Sedangkan rotor merupakan bagian yang terletak didalam dan berputar. Antara bagian stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara yang sempit, dengan jarak sekitar 0,4 mm sampai dengan 4 mm. Berikut merupakan konstruksi dari motor induksi tiga fasa:



Gambar 2.17 Konstruksi motor induksi tiga fasa

a. Stator

Pada stator terdapat beberapa slot yang digunakan sebagai tempat konduktor atau kawat dari kumparan tiga fasa yang mana disebut dengan kumparan stator. Slot-slot tersebut terbuat dari tumpukan laminasi inti yang dibentuk dari lempengan besi. Setiap lempengan besi tersebut akan memiliki beberapa alur atau slot dan beberapa lubang pengikat untuk menyatukan inti. Setiap kumparan tersebar dalam alur disebut dengan belitan fasa dimana untuk motor tiga fasa setiap belitan terpisah sebesar 120° . Alur yang terdapat pada tumpukan laminasi inti diisolasi dengan menggunakan kertas. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris.

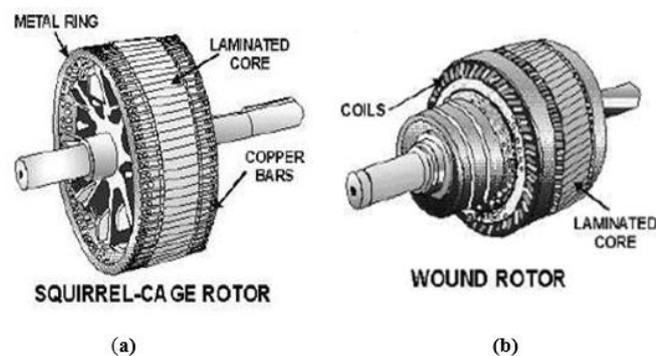


Gambar 2.18 konstruksi stator

b. Rotor

Rotor merupakan tempat untuk meletakkan kumparan rotor dan bagian yang berputar atau bergerak dalam motor induksi tiga fasa.

Terdapat dua jenis kumparan rotor yaitu *squirrel-cage* rotor/rotor sangkar tupai dan *phase-wound* rotor/rotor belitan. Kedua tipe rotor ini menggunakan laminasi yang melingkar yang terikat erat dengan poros. Pada rotor sangkar tupai memiliki konstruksi yang lebih sederhana dan tahan terhadap guncangan. Rotor sangkar tupai mempunyai kumparan yang terdiri atas beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai. Ciri khusus dari rotor jenis ini adalah ujung-ujung kumparan rotor akan terhubung singkat secara permanen. Sedangkan pada jenis rotor kumparan akan terhubung singkat jika kecepatan putar rotor telah mencapai kecepatan putar normalnya secara otomatis melalui slip ring yang terpasang pada bagian rotor.



Gambar 2.19 (a) Rotor sangkar tupai (b) Rotor lilitan

2.2.5.3 Prinsip Medan Putar

Ketika motor induksi tiga fasa mendapatkan suplai tegangan tiga fasa melalui belitan stator dengan perbedaan fasa 120° maka arus bolak-balik sinusoidal pada masing-masing fasa akan mengalir pada belitan stator. Adanya arus yang mengalir tersebut maka akan menyebabkan gaya gerak magnet (GGM) pada kumparan stator sehingga kumparan akan menghasilkan fluk magnetik yang berputar atau disebut dengan medan putar. Kecepatan putar dari medan magnet putar tersebut adalah :

$$N_s = 120.f / P$$

Keterangan:

N_s = Kecepatan putar stator (rpm)

f = Frekuensi jala-jala (Hz)

P = jumlah kutub

Kecepatan putaran medan putar stator disebut juga dengan kecepatan sinkron. Kemudian medan putar stator memotong konduktor pada batang rotor sehingga pada konduktor rotor timbul tegangan induksi yang mengakibatkan rotor berputar dan mengakibatkan timbul arus induksi pada motor. Arus induksi yang berinteraksi dengan fluks dari stator maka akan menghasilkan torsi. Arah putar rotor lebih rendah dari kecepatan sinkronnya sehingga terdapat perbedaan putar antara rotor dan stator atau disebut dengan Slip (s).

$$\text{Slip}(s) = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\%$$

Sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$N_r = N_s (1 - s)$$

$$N_r = \frac{120 \cdot f_s}{P} (1 - s)$$

$$N_r = \frac{120 \cdot f}{P} (1 - s)$$

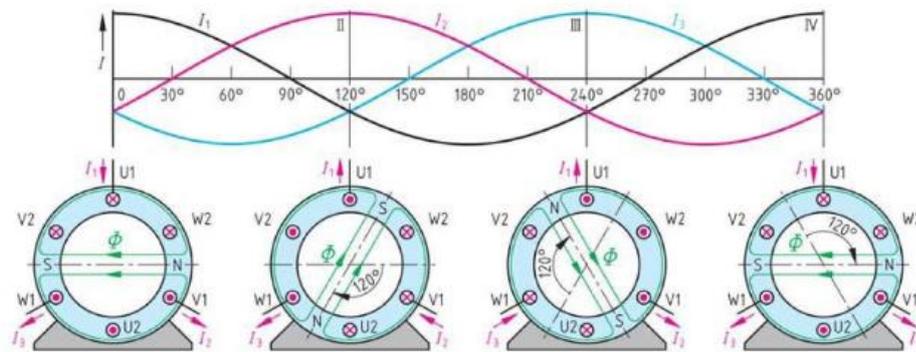
Kecepatan slip = $N_s - N_r$, dengan demikian dapat ditulis

$$(N_s - N_r) = s \cdot N_s$$

Keterangan:

N_s = Kecepatan putar stator

N_r = Kecepatan putar rotor



Gambar 2.20 Arah medan putar stator

2.2.5.4 Gaya Gerak Listrik Stator dan Rotor

Konstruksi dari motor induksi tiga fasa terdiri dari kumparan stator dan kumparan rotor. Kumparan stator berfungsi sebagai kumparan medan yang mana akan membangkitkan medan magnet putar. Sedangkan untuk kumparan rotor disebut dengan kumparan jangkar. Prinsip kerja dari motor induksi tiga fasa dimulai ketika terminal stator dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa sehingga pada kumparan stator akan mengalir arus tiga fasa. Arus yang mengalir pada masing-masing kumparan stator akan menghasilkan fluks bolak-balik yang berubah-ubah. Interaksi dari ketiga fluksi bolak-balik akan menghasilkan medan putar dengan kecepatan putar yang sinkron. Medan putar stator ini akan memotong batang-batang konduktor dari kumparan rotor sehingga mengakibatkan timbul tegangan induksi (GGL) pada rotor sebesar:

$$E_r = 4,44.f.N_r.f_m$$

Keterangan:

E_r = Tegangan induksi rotor saat dalam keadaan diam (Volt)

N_r = jumlah kumparan pada rotor (rpm)

f = frekuensi sumber (Hz)

ϕ_m = Fluks putar maksimum

Pada kumparan rotor memiliki rangkaian yang tertutup sehingga akibat dari ggl tersebut maka akan menghasilkan arus rotor I_r . Adanya arus rotor I_r yang terdapat pada medan magnet putar, maka akan menimbulkan gaya Lorentz (F) sebesar:

$$F = B.L.I$$

Keterangan:

F = Gaya Lorentz (Newton)

B = Kerapatan Fluk (Weber/m^2)

L = panjang Kumparan rotor

I = arus pada rotor (A)

Apabila jari-jari pada kumparan rotor sebesar r , maka mengakibatkan momen putar sebesar:

$$T_r = F.r(N.m)$$

Jika kopel rotor yang dihasilkan oleh F cukup besar untuk memikul beban, maka rotor akan berputar searah dengan medan putar stator. Pada saat rotor berputar, besarnya tegangan yang terinduksi pada kumparan rotor akan bervariasi yang mana dipengaruhi oleh besarnya slip (s). Sehingga besarnya ggl pada kumparan rotor saat berputar adalah

$$E_{rs} = 4,44.f_r.N_r.f_m.s$$

2.2.5.5 Frekuensi Rotor

Frekuensi rotor pada motor induksi tiga fasa tidak sama dengan frekuensi stator. Adanya perubahan pada kecepatan putar rotor akan menyebabkan perubahan nilai slip dari start (100%) hingga saat berputar pada kecepatan normal atau stasioner (0%), yaitu $N_s = N_r$. Ketika rotor dalam keadaan stasioner atau diam $N_r = 0$ rpm, maka frekuensi arus rotor sama dengan frekuensi arus pada sumber atau stator atau $f_s = f_r$. Apabila rotor mulai berputar (start) dengan kecepatan mendekati sinkron $N_r \approx N_s$, maka frekuensi rotor $f_r \approx 0$ akan dipengaruhi oleh slip atau kecepatan slip yang relatif ($N_s - N_r$) yang mana $s \approx 0$.

Berdasarkan persamaan $f_s = \frac{P \cdot N_s}{120}$, maka untuk mengetahui frekuensi rotor pada saat nilai slip yang relatif sebagai berikut:

$$f_s = \frac{P(N_s - N_r)}{120}$$

atau

$$f_r = \frac{P(N_s - N_r)}{120} \times \frac{N_s}{N_s}$$

$$f_r = \frac{PN_s}{120} \times \frac{(N_s - N_r)}{120}$$

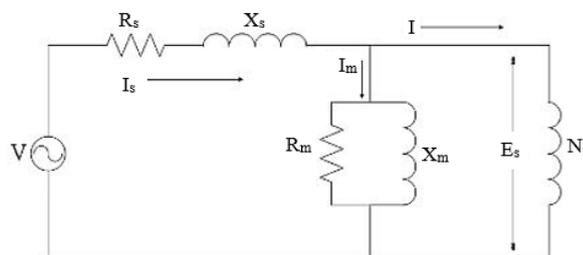
$$f_r = f_s \cdot s$$

Oleh karena frekuensi putar stator sama dengan frekuensi sumber listrik (f), maka persamaan frekuensi rotor dapat ditulis sebagai berikut:

$$f_r = f \cdot s$$

2.2.5.6 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa

Pada dasarnya, rangkaian ekuivalen motor induksi hampir sama dengan rangkaian ekuivalen transformator. Perbedaannya adalah pada kumparan rotor sebagai kumparan sekunder berputar dan berfungsi untuk menghasilkan tenaga mekanik. Berikut merupakan rangkaian ekuivalen pada motor induksi:



Gambar 2.21 Rangkaian ekuivalen pada stator

Nilai tegangan induksi stator yang dihasilkan berdasarkan gambar diatas, dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$E_s = V - I_s (R_s + jX_s)$$

Keterangan:

V = Tegangan sumber (Volt)

N_s = Kumparan stator

E_s = Tegangan induksi stator (Volt)

I_s = Arus stator (A)

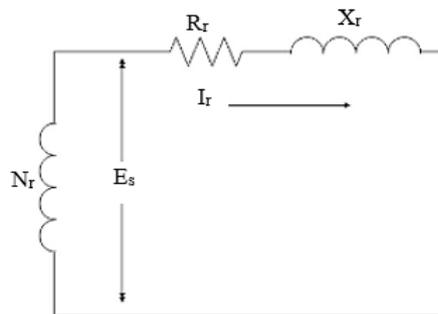
R_s = Tahanan stator (Ohm)

X_s = Reaktansi stator (Ohm)

I_m = Arus penguatan (A)

R_m = Tahanan inti (Ohm)

X_m = Reaktansi inti (Ohm)



Gambar 2.22 Rangkaian ekivalen rotor

Pada gambar 2.20 menunjukkan rangkaian ekivalen pada rotormotor induksi tiga fasa yang mana dalam kondisi rangkaian tertutup sehingga menimbulkan arus rotor. Persamaan dari arus yang mengalir pada rotor sebagai berikut:

$$I_r = \frac{E_r}{R_r + \left(\frac{1}{s} - 1\right) + jX_r}$$

Keterangan:

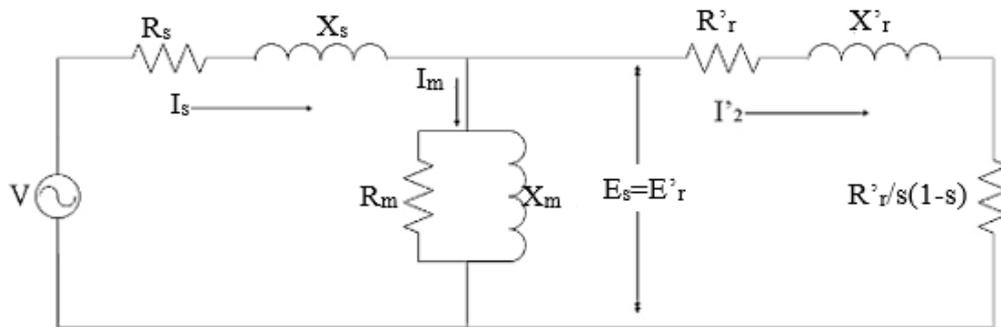
E_r = Tegangan induksi rotor (Volt)

I_r = Arus rotor (A)

R_r = Hambatan rotor (Ohm)

X_r = Reaktansi rotor (Ohm)

Kedua rangkaian ekuivalen dari stator dan rotor digabungkan maka akan menjadi rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa. Berikut merupakan rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa sebagai berikut:



Gambar 2.23 Rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa

2.2.5.7 Aliran Daya Motor Induksi

Pada motor induksi tiga fasa terjadi pengkonversian energi dari listrik menjadi mekanik pada rotor. Sumber listrik yang dihubungkan ke motor induksi tidak langsung terhubung ke rotor. Daya listrik akan dihubungkan ke stator terlebih dahulu dan akan terjadi rugi-rugi yang akan mengurangi besarnya daya yang akan dikonversikan menjadi mekanik. Daya total yang dimasukkan pada kumparan stator (P_{in}) mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta$$

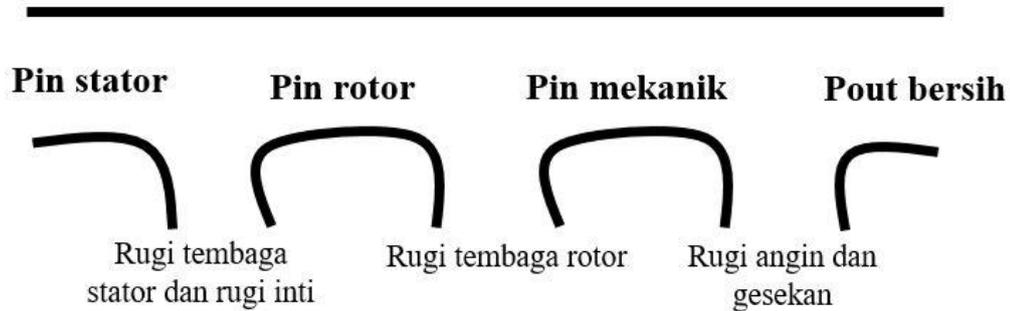
Keterangan:

V = Tegangan sumber per fasa (Volt)

I = Arus masukan per fasa (A)

$\cos \theta$ = faktor daya

Selanjutnya daya listrik yang diinapkan pada stator akan dikonversi menjadi energi mekanik pada rotor. Namun, terdapat rugi-rugi yang terjadi selama proses tersebut, yang mana skema rugi-rugi motor induksi ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.24 Skema aliran daya pada motor induksi tiga fasa

Daya masukan tiga fasa yang disuplai ke stator akan mengalami rugi-rugi tembaga stator dan rugi inti stator. Rugi-rugi-rugi tembaga stator disebabkan karena adanya panas pada belitan, sedangkan untuk rugi inti disebabkan oleh panas pada inti besi. Sehingga kedua rugi-rugitersebut akan mengakibatkan didisipasi daya, yang mana mempunyai persamaan sebagai berikut:

Rugi tembaga stator

$$P_{ts} = 3.I_s^2.R_s$$

Rugi inti stator

$$P_i = \frac{3.E_s^2}{R_c}$$

Daya aktif sisa stator selanjutnya akan teruskan ke rotor melalui celah udara dengan induksi elektromagnetik, yang mana mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$P_{cu} = P_{in} - P_{ts} - P_i$$

Sehingga besarnya rugi-rugi tembaga rotor, sebagai berikut:

$$P_{ur} = 3.I_r^2.R_r$$

Apabila dilihat pada rangkaian ekivalen rotor, resistor merupakan satu-satunya komponen yang mengkonsumsi daya pada celah udara R_2/s . Oleh karena itu daya pada celah udara dapat dibuat persamaan sebagai berikut:

$$P_{cu} = 3.I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s}$$

Dari persamaan diatas, maka hubungan rugi-rugi tembaga dengan daya pada celah udara adalah sebagai berikut:

$$P_{tr} = s.P_{cu}$$

Sehingga apabila daya masukan motor dikurangi rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi inti, maka akan menghasilkan besarnya daya mekanik. Untuk persamaan daya mekanik yang dibangkitkan motor adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{mek} &= P_{cu} - P_{tr} \\ P_{mek} &= 3.I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} - 3.I_r^2 \cdot R_r \\ P_{mek} &= 3.I_r^2 \cdot R_r \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right) \\ P_{mek} &= P_{tr} \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right) \end{aligned}$$

Oleh karena daya mekanik pada motor merupakan selisih dari celah udara dikurangi rugi-rugi tembaga rotor, maka persamaannya sebagai berikut:

$$P_{mek} = P_{cu} \cdot (1-s)$$

Berdasarkan pada gambar skema rugi-rugi diatas, bahwa daya keluaran dapat diperoleh dari daya mekanik dikurangi rugi-rugi gesek dan angin dan rugi lainnya atau stray, maka persamaannya sebagai berikut:

$$P_{out} = P_{mek} - P_{a\&g} - P_s$$

Dimana besarnya rugi-rugi *stray* menurut standar dari IEEE adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Prosentase rugi-rugi *Stray* menurut IEEE std 112

Rating Daya kelaran Mesin		Presentase Rugi Stray
1-125 HP	1-90 KW	1,80%
126-500 HP	91-375 KW	1,50%
501-2499 HP	376-1850 KW	1,20%
>2500 HP	> 851 KW	0,90%

Secara umum, perbandingan komponen daya pada motor induksi dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{cu} : P_{tr} : P_{mek} = 1 : s : 1 - s$$

Keterangan:

E_s =Tegangan induksi pada stator (Volt)

$I_1(R_1 + jX_1)$ =Hambatan pada stator (Ohm)

R_c =Hambatan pada inti besi (Ohm)

I_r =Arus pada rotor (A)

R_r =Hambatan pada rotor (Ohm)

P_b =Rugi-rugi lainnya (Watt)

P_{ts} =Rugi-rugi pada tembaga stator (Watt)

P_{tr} =Rugi-rugi pada tembaga rotor (Watt)

P_i =Rugi-rugi inti stator (Watt)

P_{ag} =Rugi-rugi angin dan gesekan (Watt)

2.2.5.8 Efisiensi

Efisiensi pada motor induksi merupakan parameter keefektifan motor induksi dalam mengubah energi listrik menjaid energi mekanik. Efisiensi dari

motor induksi dinyatakan sebagai perbandingan antara daya keluaran dan daya masukan, yang mana mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{in}} - P_{\text{losses}}}{P_{\text{in}}} = 1 - \frac{P_{\text{losses}}}{P_{\text{in}}}$$

Sehingga jika dinyatakan dalam persentase sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\%$$

Dari persamaan efisiensi terlihat besarnya nilai efisiensi dipengaruhi oleh rugi-rugi pada motor induksi tiga fasa, yang mana besarnya adalah sebagai berikut:

$$P_{\text{losses}} = P_{\text{ts}} + P_{\text{ts}} + P_{\text{i}} + P_{\text{ag}} + P_{\text{b}}$$