

SKRIPSI

**ANALISIS PWM PADA PENGONTROLAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA
FASA BERBASIS PLC SIEMENS S7-300**

Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan

Program Strata Satu Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

oleh:

MULYA AHMAD

D041 17 1528



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**ANALISIS PWM PADA PENGONTROLAN KECEPATAN MOTOR
INDUKSI TIGA FASA BERBASIS PLC SIEMENS S7-300**

Disusun dan diajukan oleh:

MULYA AHMAD

D041 17 1528

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 16 Februari 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

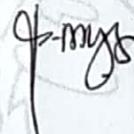
Menyetujui

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

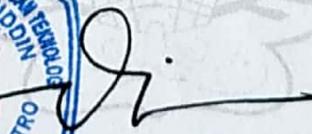


Prof. Dr. Ir. H. Ansar Suyuti, MT
NIP. 19671231 199202 1 001



Dr. Ir. Fitriyanti Mayasari, ST., MT
NIP. 19830714 200604 2 001

Ketua Program Studi



Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Mulya Ahmad
NIM : D041171528
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“Analisis PWM Pada Pengontrolan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis PLC
Siemens S7-300”

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa Sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 22 Februari 2022

Yang Menyatakan



(Mulya Ahmad)

ABSTRAK

Pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan analisis PWM dilakukan dengan menggunakan tiga komponen utama, yaitu PLC Siemens S7-300, *inverter drives* Lenze 8400 state line C dan motor induksi tiga fasa jenis *squirrel cage rotor* 4P dengan *rating* putaran maksimal 1500 Rpm. Metode yang digunakan untuk mengontrol kecepatan motor adalah dengan mengubah nilai masukan frekuensi dan tegangan pada motor induksi tiga fasa. Program dibuat pada *software* TIA Portal V14 menggunakan *ladder diagram* dengan mengatur nilai referensi kecepatan (0 – 10 V). *Inverter* akan mengolah data nilai inputan referensi sesuai dengan pengaturan variabel PWM dengan mengkomparasi nilai frekuensi kontrol 50 Hz dan frekuensi *carrier* 8 KHz kemudian menghasilkan sinyal pulsa modulasi atau nilai indeks modulasi pada gerbang *gate* IGBT sehingga menghasilkan gelombang keluaran tiga fasa dengan frekuensi dan tegangan bervariasi yang akan dihubungkan pada motor induksi tiga fasa. Hasil percobaan yang dilakukan yaitu semakin besar nilai referensi kecepatan maka frekuensi dan tegangan *output inverter* juga semakin besar dan kecepatan putaran motor semakin besar. Nilai frekuensi yang didapatkan mulai dari 10,12 – 50,24 Hz dengan kecepatan motor 303 – 1499 Rpm.

Kata Kunci: Motor Induksi Tiga Fasa, *Inverter Drives* Lenze 8400 State Line C, PLC Siemens S7-300, PWM, Frekuensi, Tegangan.

ABSTRACT

The speed regulation of a three-phase induction motor with PWM analysis is carried out using three main components, namely the Siemens S7-300 PLC, Lenze 8400 state line C inverter drives and a 4P squirrel cage rotor type three-phase induction motor with a maximum rotation rating of 1500 Rpm. The method used to control the motor speed is to change the input frequency and voltage values in a three-phase induction motor. The program is made on TIA Portal V14 software using a ladder diagram by setting the speed reference value (0 – 10 V). The inverter will process the reference input value data according to the PWM variable setting by comparing the control frequency value of 50 Hz and the carrier frequency of 8 KHz then producing a modulation pulse signal or modulation index value at the IGBT gate so as to produce a three-phase output wave with varying frequency and voltage that will connected to a three-phase induction motor. The results of the experiments carried out are the greater the speed reference value, the greater the frequency and the inverter output voltage and the greater the rotational speed of the motor. The frequency value obtained starts from 10.12 – 50.24 Hz with a motor speed of 303 – 1499 Rpm.

Keywords: Three Phase Induction Motor, Inverter Drives Lenze 8400 State Line C, PLC Siemens S7-300, PWM, Frequency, Voltage.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis PWM Pada Pengontrolan Kecepatan Motor Induksi 3 Phasa Berbasis PLC Siemens S7-300”. Skripsi ini diajukan guna memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Strata 1 (S1) Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Keberhasilan penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. **Orang tua** penulis dan seluruh keluarga yang telah mendidik, mendoakan, memberikan dukungan, nasehat dan motivasi kepada penulis.
2. Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Ansar Suyuti, M.T.** selaku Dosen Pembimbing I dan Ibu **Dr. Ir. Fitriyanti Mayasari, S.T., M.T.** selaku Dosen Pembimbing II.
3. Ibu **Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, M.T.** dan Bapak **Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen penguji.
4. **Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.** selaku Kepala Departemen Teknik Elektro, Para Dosen, Staf Pengajar, Laboran, dan Staf Administrasi Departemen Teknik Elektro
5. Bapak **Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
6. Ibu **Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, MA.** selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
7. Kepada seluruh keluarga besar **HME FT-UH** dan **OKFT-UH.**
8. Kepada seluruh elemen “**PT. KONAN BERSATU**” dan “**EQUAL17ER**” yang telah menjadi komponen penting dalam usaha mencapai cita-cita.

9. Kepada seluruh keluarga sakinah **Ikatan Keluarga Mahasiswa Sinjai**.
10. Kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan yang penulis tidak sempat sebutkan.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat dalam tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan kritik yang membangun dari semua pihak diharapkan untuk kesempurnaan tugas akhir ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat diterima sebagai sumbangan pikiran Penulis yang mendatangkan manfaat baik bagi penulis maupun pembacanya.

Makassar, 22 Februari 2022

Penulis

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Inverter 3 Fasa.....	5
2.2 Motor Induksi 3 Fasa	9
2.2.1 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa.....	10
2.2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa.....	12
2.2.3 Prinsip Terjadinya Slip	15
2.2.4 Metode Kontrol.....	16
2.3 Pulse Width Modulation (PWM).....	23
2.4 Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT).....	30

2.5 Programmable Logic Controller (PLC)	31
2.6 Variable Frequency Drives (VFD).....	34
2.7 Software TIA Portal.....	37
BAB III METODE PENELITIAN.....	39
3.1 Waktu dan tempat penelitian	39
3.2 Alat dan bahan	39
3.3 Prosedur penelitian.....	40
3.3.1 Studi literatur	40
3.3.2 Perancangan sistem.....	40
3.4 Langkah-langkah Penelitian.....	49
3.5 Rangkaian Simulasi	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	53
4.1 Analisa Perangkat Keras (Hardware).....	54
4.1.1 PLC Siemens S7-300 CPU 314C-2 PN/DP	55
4.1.2 Converter Drives Lenze 8400 State Line C	56
4.1.3 Motor Induksi Tiga Fasa	61
4.2 Analisa Perangkat Lunak (Software).....	64
4.3 Simulasi dan Analisa Hasil Pengamatan.....	70
BAB V PENUTUP.....	84
5.1 Kesimpulan	84
5.2 Saran	85
DAFTAR PUSTAKA.....	86
LAMPIRAN	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Topologi Konversi Daya	6
Gambar 2.2 Rangkaian Dasar <i>Inverter</i> Tiga Fasa	7
Gambar 2.3 Model Pentriggeran	8
Gambar 2.4 Konstruksi Motor Induksi 3 Fasa	11
Gambar 2.5 Konstruksi Rotor Sangkar Tupai	11
Gambar 2.6 Rotor <i>Slip</i> Ring	12
Gambar 2.7 Perbandingan nilai torsi dan kecepatan	14
Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Steady-state Motor Induksi	16
Gambar 2.9 Pengontrol Tegangan Stator	17
Gambar 2.10 Skema Scherbius Statis	19
Gambar 2.11 <i>V-f Drive</i>	21
Gambar 2.12 <i>i-f drive PWM inverter</i>	22
Gambar 2.13 <i>Inverter</i> Satu Fasa	27
Gambar 2.14 Sinyal PWM	29
Gambar 2.15 IGBT	30
Gambar 2.16 Karakteristik IGBT	31
Gambar 2.17 Bagian Utama Sistem PLC	32
Gambar 2.18 Blok Diagram VFD PWM	37
Gambar 2.19 TIA Portal V.14	38
Gambar 3.1 <i>Converter drives Lenze 8400 State Line C</i>	43
Gambar 3.2 Keypad X400	44
Gambar 3.3 Langkah-langkah Mengaktifkan pengontrol motor induksi tiga fasa	45
Gambar 3.4 Terminals 0	46

Gambar 3.5 Diagram Blok Pengaturan Kecepatan	47
Gambar 3.6 Power Analyzer Fluke 435 Series II.....	48
Gambar 3.7 Osiloskop GW INSTEK GOS-635G.....	48
Gambar 3.8 Diagram <i>Flowchart</i>	49
Gambar 3.9 Rangkaian Simulasi.....	51
Gambar 4.1 Rangkaian Pengontrolan kecepatan motor induksi tiga fasa.....	53
Gambar 4.2 <i>Wiring</i> Rangkaian.....	54
Gambar 4.3 PLC Siemens S7-300 CPU 314C-2 PN/DP.....	55
Gambar 4.4 CPU, DI/DO dan AI/O	56
Gambar 4.5 Sistem Kerja PLC	56
Gambar 4.6 Rangkaian <i>converter drives</i>	57
Gambar 4.7 Blok control rangkaian PWM.....	60
Gambar 4.8 Bentuk gelombang komparasi dan hasilnya.....	61
Gambar 4.9 Sinyal percepatan dan perlambatan putaran motor	62
Gambar 4.10 Karakteristik torsi-kecepatan.....	64
Gambar 4.11 Motor Induksi Tiga Fasa	65
Gambar 4.12 Alamat <i>input</i> dan <i>Output</i>	66
Gambar 4.13 <i>Network</i> 1 dan 2.....	67
Gambar 4.14 <i>Network</i> 3 dan 4.....	68
Gambar 4.15 <i>Network</i> 5 dan 6.....	68
Gambar 4.16 <i>Network</i> 7.....	69
Gambar 4.17 Sinyal referensi 20%.....	71
Gambar 4.18 Sinyal referensi 40%.....	71
Gambar 4.19 Sinyal referensi 60%.....	71
Gambar 4.20 Sinyal referensi 80%.....	72

Gambar 4.21 Sinyal referensi 100%.....	72
Gambar 4.22 Gelombang tegangan keluaran 20%.....	73
Gambar 4.23 Gelombang tegangan keluaran 40%.....	74
Gambar 4.24 Gelombang tegangan keluaran 60%.....	74
Gambar 4.25 Gelombang tegangan keluaran 80%.....	74
Gambar 4.26 Gelombang tegangan keluaran 100%.....	75
Gambar 4.27 Perbandingan Nilai Tegangan Referensi Terhadap Tegangan Output Inverter.....	75
Gambar 4.28 Perbandingan nilai frekuensi dan tegangan keluaran	76
Gambar 4.29 Perbandingan nilai indeks modulasi terhadap tegangan keluaran <i>inverter</i>	80
Gambar 4.30 Perbandingan nilai tegangan motor terhadap kecepatan putarnya	81

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kondisi Saklar saat <i>switching</i>	7
Tabel 3.1 Alat dan bahan.....	39
Tabel 4.1 Pengalamatan <i>input</i> PLC.....	66
Tabel 4.2 Pengalamatan <i>Output</i> PLC.....	67
Tabel 4.3 Data hasil pengamatan pengaruh sinyal pemicuan (<i>trigger</i>) terhadap frekuensi dan tegangan keluaran (V out).....	70
Tabel 4.4 Data hasil pengamatan pengaruh sinyal pemicuan (<i>trigger</i>) terhadap indeks modulasi (M), tegangan keluaran (V out) <i>inverter</i> secara aktual dan teoritis ...	79
Tabel 4.5 Data hasil pengamatan pengaruh sinyal pemicuan (<i>trigger</i>) terhadap tegangan, arus dan kecepatan pada motor induksi tiga fasa	80
Tabel 4.6 Data hasil pengamatan pengaruh sinyal pemicuan (<i>trigger</i>) terhadap nilai kecepatan motor induksi tiga fasa secara actual dan teoritis	83

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan perindustrian di negara kita mengalami perkembangan yang pesat, baik pada perindustrian besar maupun perindustrian yang kecil. Sebagian besar dari peralatan industri menggunakan tenaga listrik sebagai penggerak utama, salah satunya motor listrik. Motor induksi adalah motor yang paling banyak digunakan saat ini, karena memiliki konstruksi yang sederhana, relatif murah, lebih ringan dan memiliki efisiensi yang tinggi serta mudah dalam pemeliharaannya dibandingkan dengan motor DC. tetapi pengaturan kecepatan motor induksi bukanlah suatu permasalahan yang mudah untuk dilakukan. Oleh sebab itu diperlukan teknologi yang tepat untuk dapat mengatur putaran motor induksi stabil.

Dengan adanya putaran beban yang bervariasi, kecepatan dari motor induksi tersebut harus dapat dikendalikan. Pengaturan kecepatan sebuah motor induksi memerlukan *inverter* yang berfungsi sebagai sumber catu tegangan dengan frekuensi dan *magnitude* yang variabel. Tegangan keluaran *inverter* dapat diatur dengan cara merubah *gain inverter*. Pengaturan *gain inverter* dilakukan dengan cara pengaturan sudut penyalaan saklar *inverter* yang dikenal dengan teknik pengaturan lebar pulsa (teknik modulasi) / *Pulse Width Modulation (PWM)*.

Inverter untuk pengendali kecepatan motor induksi menggunakan penyulutan PWM yang mempunyai kelebihan untuk menggerakkan motor induksi dengan putaran yang stabil. Pada umumnya teknik modulasi yang digunakan adalah

metode *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) karena metode ini sangat mudah untuk diimplementasikan. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk membuat rangkaian penyulutan PWM menggunakan *Inverter Drives Lenze 8400 State Line C* berbasis PLC Siemens S7-300 dan menganalisis hubungan antara siklus kerja PWM pada *Insulated-Gate Bipolar Transistor* (IGBT) dengan tegangan *Output inverter* terhadap kecepatan putaran motor induksi 3 fasa. Analisis dari kinerja modulasi PWM ini akan berguna untuk dijadikan pertimbangan sebagai pengaturan kecepatan variabel.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, permasalahan yang dirumuskan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik kerja komponen IGBT terhadap *Output Inverter*?
2. Bagaimana merancang sistem pengontrolan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan pengendalian PWM menggunakan konverter dan *software TIA Portal* berbasis PLC Siemens S7-300?
3. Bagaimana hubungan antara sudut penyalaan, tegangan *Output* dan kecepatan motor induksi tiga fasa?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Untuk memahami karakteristik kerja komponen IGBT terhadap *Output Inverter*.

2. Merancang sistem pengontrolan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan pengendalian PWM menggunakan konverter dan *software* TIA Portal berbasis PLC Siemens S7-300.
3. Menganalisis hubungan antara sudut penyalaaan, tegangan *Output* dan kecepatan motor induksi tiga fasa.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Komponen untuk mengatur sudut penyalaaan PWM menggunakan *Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)*.
2. Pengontrolan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan pengendalian PWM menggunakan konverter berbasis PLC Siemens S7-300 CPU 314C-2 PN/DP.
3. *Inverter* yang digunakan adalah Lenze 8400 State Line C.
4. Analisis hasil percobaan difokuskan pada pengaruh sinyal referensi terhadap *output inverter*.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan merupakan gambaran umum tentang keseluruhan isi dari penelitian ini maka saya memaparkan dalam beberapa bab sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bagian dari pendahuluan yang berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang teori penunjang yang relevan untuk bahan penelitian yang diperoleh dari sumber referensi untuk menyusun kerangka teori dan konseptual.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tentang waktu dan tempat penelitian, metode pengambilan data, analisis data dan langkah-langkah penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang hasil penelitian dan pembahasan yang diperoleh dari pengujian teknik SPWM pada pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dari pembahasan permasalahan dan saran-saran untuk perbaikan dan penyempurnaan tugas akhir ini.

BAB II

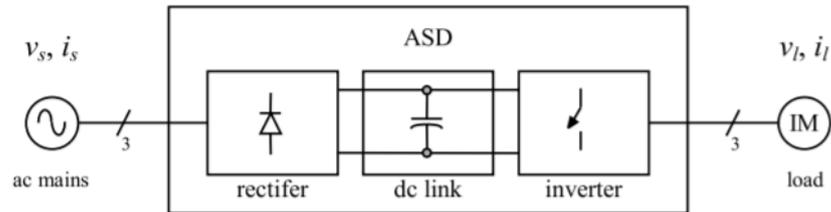
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Inverter* 3 Fasa

Rectifier mengubah arus AC menjadi DC. Dengan penyearah terkontrol, energi juga dapat ditransfer dari sisi DC ke sisi AC. Namun, sumber AC yaitu jaringan selalu diperlukan karena harus menyuplai pergantian sakelar menggunakan ggl sumber atau, dengan kata lain, menggunakan daya reaktif sumber, untuk mematikan thyristor. Oleh karena itu, penyearah terkontrol tidak dapat digunakan untuk mengubah DC menjadi AC dengan frekuensi variabel. Namun demikian, satu-satunya cara yang hemat energi untuk mendapatkan operasi kecepatan variabel dari medan mesin berputar yaitu mesin induksi dan sinkron adalah dengan memberi suplai dari sumber frekuensi variabel. *Inverter* mampu mengubah DC menjadi AC dengan frekuensi variabel dan, dalam banyak kasus, juga variabel amplitudo. Berlawanan dengan penyearah terkontrol, *inverter* memerlukan sakelar yang dapat dihidupkan dan dimatikan kapan saja. Saat ini, sakelar yang digunakan dalam *inverter* sebagian besar adalah MOSFET (untuk daya rendah), IGBT, atau IGCT (untuk daya sangat tinggi) (Melkebeek, 2018).

Inverter merupakan suatu rangkaian elektronika yang mengkonversi sumber tegangan DC menjadi sumber tegangan AC. Sebuah *inverter* disuplai dari sebuah sumber DC dimana *Output* tegangan dan arus AC-nya mempunyai komponen fundamental dengan frekuensi dan amplitudo yang dapat divariasikan (Trzynadlowski, 2016). Tujuan utama dari konverter daya statis adalah untuk menghasilkan bentuk gelombang keluaran AC dari catu daya DC. Gelombang

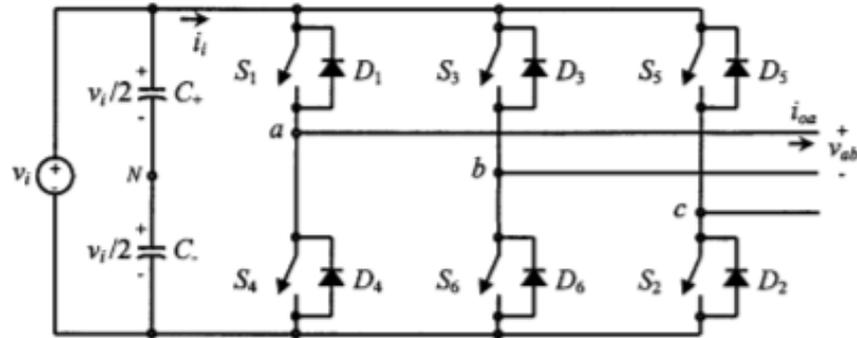
keluaran ini dapat divariasikan untuk menggerakkan motor induksi tiga fasa. Untuk keluaran AC sinusoidal, besarnya, frekuensi, dan fase harus dapat dikontrol. Berdasarkan jenis bentuk gelombang keluaran AC, topologi ini dapat dianggap sebagai *inverter* sumber tegangan (VSI), di mana keluaran AC yang dikontrol secara sendiri adalah bentuk gelombang tegangan. Jenis inverter ini banyak digunakan karena besarnya tegangan keluaran dapat dikontrol sehingga dapat diaplikasikan pada berbagai alat yang membutuhkan sistem *soft starter* sesuai dengan kebutuhan berbagai industri. Demikian pula, topologi lain adalah *inverter* sumber arus (CSI), di mana secara sendiri keluaran AC yang dikontrol adalah bentuk gelombang arus. Jenis inverter ini masih banyak digunakan dalam aplikasi industri tegangan menengah, di mana bentuk gelombang tegangan yang baik diperlukan (Rashid, 2001).



Gambar 2.1 Topologi Konversi Daya (Rashid, 2001)

Inverter tiga fasa mencakup aplikasi daya menengah hingga tinggi. Tujuan utama dari topologi ini adalah untuk menyediakan sumber tegangan tiga fasa, di mana amplitudo, fasa, dan frekuensi tegangan harus selalu dapat dikontrol. *Inverter* dengan frekuensi dan tegangan keluaran yang berubah-ubah digunakan pada pemakaian khusus. Sinyal *Output* pada *inverter* merupakan sinyal arus dan tegangan tiga fasa yang setiap fasanya mempunyai beda sudut 120° . *Inverter* tiga fasa memiliki rangkaian dasar yang terdiri 6 buah komponen pensaklaran dengan

sudut penghantar yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 2.2. Teknik sudut pensaklaran umumnya yang digunakan adalah 120° dan 180° .

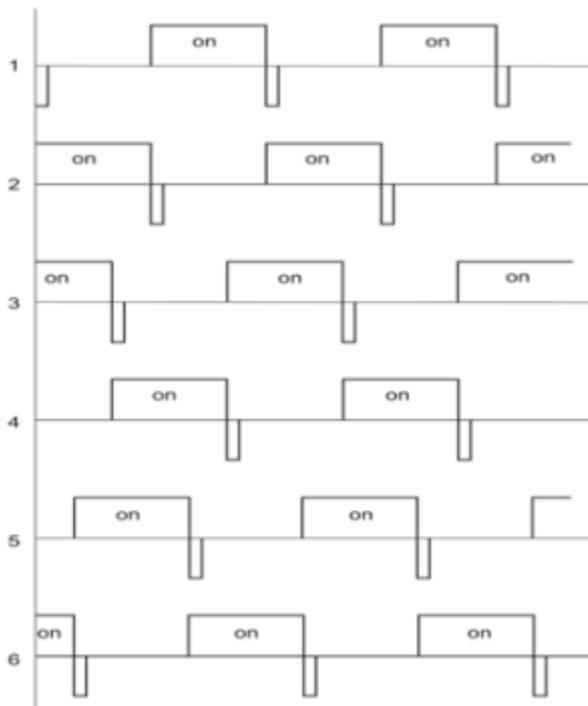


Gambar 2.2 Rangkaian Dasar *Inverter* Tiga Fasa (Rashid, 2001)

Tabel 2.1 Kondisi Saklar saat *switching*

State	State	v_{ab}	v_{bc}	v_{ca}
$S_1, S_2,$ and S_6 are on and $S_4, S_5,$ and S_3 are off	1	v_i	0	$-v_i$
$S_2, S_3,$ and S_1 are on and $S_5, S_6,$ and S_4 are off	2	0	v_i	$-v_i$
$S_3, S_4,$ and S_2 are on and $S_6, S_1,$ and S_5 are off	3	$-v_i$	v_i	0
$S_4, S_5,$ and S_3 are on and $S_1, S_2,$ and S_6 are off	4	$-v_i$	0	v_i
$S_5, S_6,$ and S_4 are on and $S_2, S_3,$ and S_1 are off	5	0	$-v_i$	v_i
$S_6, S_1,$ and S_5 are on and $S_3, S_4,$ and S_2 are off	6	v_i	$-v_i$	0
$S_1, S_3,$ and S_5 are on and $S_4, S_6,$ and S_2 are off	7	0	0	0
$S_4, S_6,$ and S_2 are on and $S_1, S_3,$ and S_5 are off	8	0	0	0

Kedudukan saklar-saklar yang berpasangan (1 dan 2, 3 dan 4, 5 dan 6) diatur sedemikian hingga setiap pasang tidak pernah bersama-sama *ON* ataupun sama-sama *OFF*. Artinya jika saklar 1 dalam keadaan *ON*, maka saklar 2 berada dalam keadaan *OFF* atau sebaliknya. Demikian pula untuk pasangan 3-4 dan 5-6. Pengaturan kombinasi pensaklaran ini dilakukan oleh sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*), model pentriggeran terlihat pada Gambar 2.3. (Hartono & Nurcahyo, 2017).



Gambar 2.3 Model Pentriggeran (Hartono & Nurcahyo, 2017).

Proses pensaklaran pada *inverter* dapat memanfaatkan sinyal *Power Width Modulation* (PWM). Sinyal PWM mempunyai ayunan dan frekuensi dasar tetap, tetapi mempunyai lebar pulsa beragam. Lebar pulsa sinyal PWM berbanding lurus dengan ayunan sinyal murni yang masih belum pada proses modulasi.

Dalam banyak aplikasi, ketika pengereman atau melambatkan kecepatan motor dilakukan, maka energi listrik dari inverter dan energi kinetik yang berupa putaran dari motor dikembalikan atau didistribusikan pada *DC link*. Jika kapasitor digunakan untuk mempertahankan tegangan *DC link* (seperti dalam ASD standar) energi harus dibuang atau dikirimkan kembali ke dalam sistem, jika tidak, tegangan *dc link* secara bertahap meningkat. Pendekatan pertama membutuhkan kapasitor *DC link* dihubungkan secara paralel dengan sebuah resistor, yang harus diaktifkan ketika energi mengalir dari beban motor ke *DC link*. Cara lain adalah

memberi umpan balik energi tersebut ke dalam distribusi sistem. Namun, cara ini membutuhkan arus *reversible* yang terhubung antara sistem distribusi dan kapasitor penghubung DC. Cara tersebut adalah untuk menggunakan jenis penyearah *front-end* aktif di mana mode umpan balik energi ke sistem adalah prinsip kerja dari rangkaian tersebut (Rashid, 2001).

Dalam sistem *inverter* ini mikroprosesor digunakan untuk menghasilkan sinyal PWM yang diperlukan serta deteksi dan sistem proteksi untuk kondisi tegangan berlebih yang tidak normal. Sistem ini terdiri dari penyearah untuk mengubah daya AC frekuensi konstan dari sumber listrik menjadi daya DC, DC *link* untuk memperlancar arus DC, dan *inverter* untuk mengubah daya DC menjadi tegangan dan frekuensi variabel. Dalam sistem ini dua mikroprosesor *on-chip* eksklusif (untuk unit *inverter* dan penyearah) menghasilkan sinyal kontrol PWM tanpa rangkaian logika eksternal. Dengan kata lain, baik unit penyearah maupun *inverter* memerlukan kontrol PWM untuk menghasilkan tegangan dan arus sinusoidal. Selain itu, bagian konverter menggunakan kontrol tegangan DC *link* untuk mengatur besarnya arus motor induksi, sedangkan bagian *inverter* menggunakan kontrol frekuensi dan fasa yang sesuai dengan kecepatan motor (Emadi, dkk. 2009).

2.2 Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi AC sejauh ini merupakan motor yang paling banyak digunakan di industri. Sejak dulu, motor ini telah digunakan dalam aplikasi penggerak langsung dan kecepatan bervariasi yang tidak memberikan proses dinamis yang cepat. Karena perkembangan terbaru dari beberapa teknologi kontrol baru, seperti

vektor dan *direct* kontrol torsi, hal ini berubah dengan cepat. Alasan yang mendasari hal ini adalah bahwa motor induksi sangkar jauh lebih murah dan lebih berat daripada pesaingnya, motor DC, dalam aplikasi kecepatan. Bagian ini dimulai dengan penggerak motor induksi yang didasarkan pada rangkaian ekuivalen kondisi tunak motor, diikuti oleh penggerak yang dikendalikan vektor yang didasarkan pada model dinamisnya (Rashid, 2001).

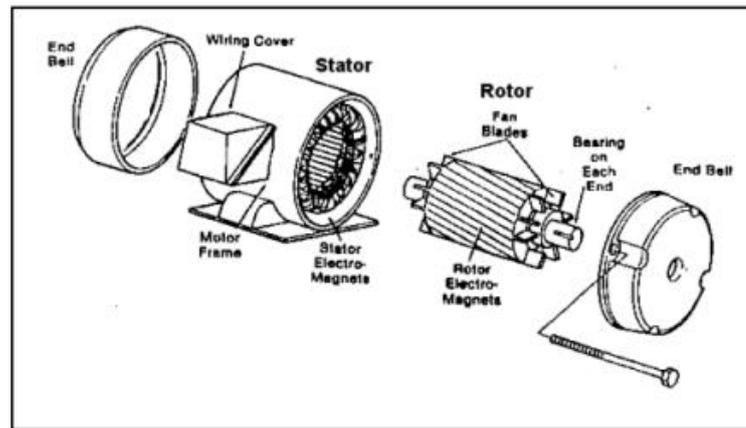
Penamaan induksi berasal dari kenyataan bahwa arus motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator (Zuhal, 2000).

2.2.1 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi memiliki dua komponen listrik utama (Gambar 2.4):

- 1) Kumbaran stator berfungsi untuk menghasilkan medan putar yang digunakan untuk perputaran motor sehingga pada motor induksi kumbaran stator disebut juga dengan kumbaran medan. Stator mempunyai tiga buah kumbaran, ujung-ujung belitan kumbaran dihubungkan melalui terminal untuk memudahkan penyambungan dengan sumber tegangan. Masing-masing kumbaran stator mempunyai beberapa buah kutub, jumlah kutub ini menentukan kecepatan motor tersebut. Semakin banyak jumlah kutubnya maka putaran yang terjadi semakin rendah. (Zuhal, 1991)
- 2) Kumbaran rotor merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumbaran stator yang diinduksikan kepada kumbaran rotor. Diantara stator dan rotor terdapat celah udara yang merupakan ruangan antara

stator dan rotor. Fluksi induksi stator melewati celah udara yang kemudian memotong kumparan rotor sehingga menyebabkan rotor berputar (Zuhal, 1991).



Gambar 2.4 Konstruksi Motor Induksi 3 Fasa (Zuhal, 1991).

Terdapat 2 jenis rotor pada motor induksi, yaitu:

1. Rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*) Rotor jenis ini memiliki merupakan rotor dengan kumparan yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai. Konstruksi rotor seperti ini sangat sederhana bila dibandingkan dengan rotor mesin listrik lainnya. Oleh sebab itu harganya pun murah. konstruksi rotor sangkar dapat dilihat pada Gambar 2.5 dibawah ini (Zuhal, 1991).



Gambar 2.5 Konstruksi Rotor Sangkar Tupai

2. Rotor *slip ring* (*wound rotor*)

Rotor jenis ini merupakan rotor dengan belitan kumparan tiga fasa sama seperti kumparan stator. Kumparan stator dan rotor juga mempunyai jumlah kutub yang sama. Karena konstruksinya demikian, maka dimungkinkan rotor ini diberikan pengaturan tahanan luar. Konstruksi rotor *slip ring* dapat dilihat pada Gambar 2.6 dibawah ini (Zuhal, 1991).



Gambar 2.6 Rotor *Slip Ring*

2.2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi 3-fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan 3-fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya *Lorentz*. Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Kecepatan berputarnya medan

putar ini disebut kecepatan sinkron. Besarnya kecepatan sinkron ini adalah sebagai berikut:

$$n = \frac{120f}{P} \dots\dots\dots(1)$$

dengan :

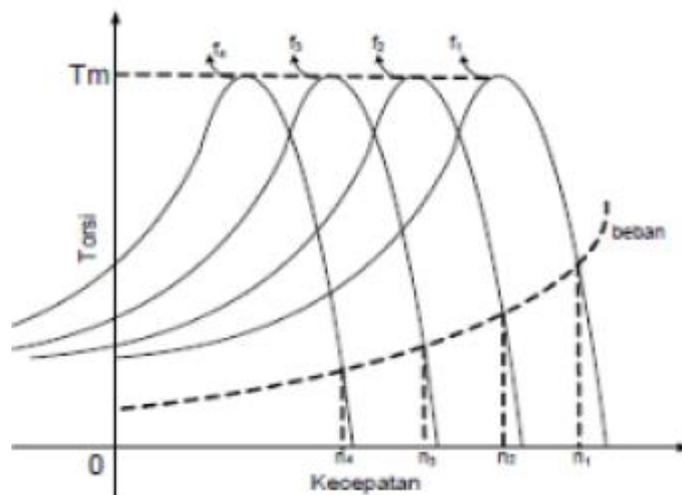
n = kecepatan putar (rpm)

f = frekuensi stator (Hz)

P = jumlah kutub stator (buah)

ω = kecepatan putaran sinkron medan magnet stator

Dari persamaan diatas dapat diketahui bahwa untuk mendapatkan besarnya putaran medan stator dapat dengan menambah atau mengurangi jumlah pasang kutubnya atau mengatur nilai frekuensi. Jumlah kutub dapat diubah dengan merencanakan kumparan stator sedemikian rupa sehingga dapat menerima tegangan masuk pada posisi kumparan yang berbeda-beda. Biasanya diperoleh dua perubahan kecepatan sinkron dengan mengubah jumlah kutub dari 2 menjadi 4. Pengaturan putaran motor induksi dapat dilakukan dengan mengubah-ubah nilai frekuensi jala. Hanya saja untuk menjaga keseimbangan kerapatan fluks perubahan tegangan harus dilakukan bersamaan dengan perubahan frekuensi. Persoalannya sekarang adalah bagaimana mengatur frekuensi dengan cara efektif dan ekonomis (Noorly Evalina dkk, 2018).



Gambar 2.7 Perbandingan nilai torsi dan kecepatan (Noorly Evalina dkk, 2018).

Misalnya rotor pada motor induksi berputar dengan kecepatan ωr , dan medan magnet stator berputar dengan kecepatan ωs , perbedaan kecepatan relatif antara kecepatan medan magnet putar stator terhadap kecepatan rotor, ini disebut kecepatan *slip* (Amir & Firdaus, 2017).

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi 3 fasa yang 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 gaya gerak listrik (Emf) atau tegangan induksi. Karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. 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. Medan putar pada

stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus, dan sesuai dengan Hukum Lenz, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut *slip*. Bertambahnya beban, akan memperbesar kopel motor yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga *slip* antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi. Bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun (Amir & Firdaus, 2017).

2.2.3 Prinsip Terjadinya *Slip*

Motor induksi tidak dapat berputar pada kecepatan sinkron. Seandainya hal ini terjadi, maka rotor akan tetap diam relatif terhadap fluks yang berputar. Maka tidak akan ada ggl yang di induksikan dalam rotor, tidak ada arus yang mengalir pada rotor, dan karenanya tidak akan menghasilkan kopel. Kecepatan rotor sekalipun tanpa beban, harus lebih kecil sedikit dari kecepatan sinkron agar adanya tegangan induksi pada rotor, dan akan menghasilkan arus di rotor, arus induksi ini akan berinteraksi dengan fluks listrik sehingga menghasilkan kopel. Selisih antara kecepatan rotor dengan kecepatan sinkron disebut *slip* (s).

Slip dapat dinyatakan dalam putaran setiap menit, tetapi lebih umum dinyatakan sebagai persen(2)
dari kecepatan sinkron

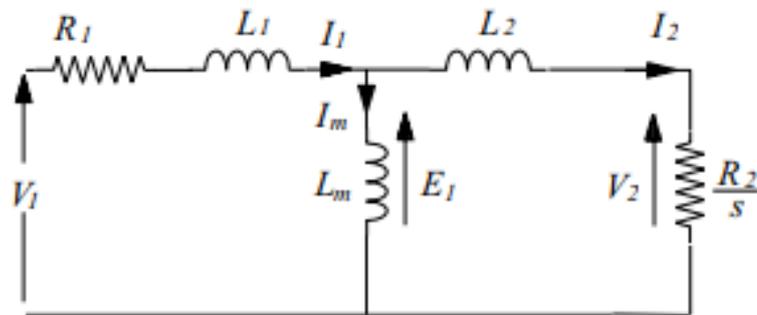
$$\text{Slip (s)} = \frac{ns - nr}{ns} \times 100\%$$

Di mana:

ns = kecepatan sinkron

n_r = kecepatan rotor

Dari persamaan rumus *slip*, dapat memberikan informasi yaitu saat $s=1$ di mana $n_r=0$, ini berarti rotor masih dalam keadaan diam atau akan berputar. $s=0$ menyatakan bahwa $n_s=n_r$, ini berarti rotor berputar sampai kecepatan sinkron. Hal ini dapat terjadi jika arus DC yang diinjeksikan ke belitan rotor, atau rotor digerakkan secara mekanik (Zuhal, 2000).



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Steady-state Motor Induksi (Zuhal, 2000)

2.2.4 Metode Kontrol

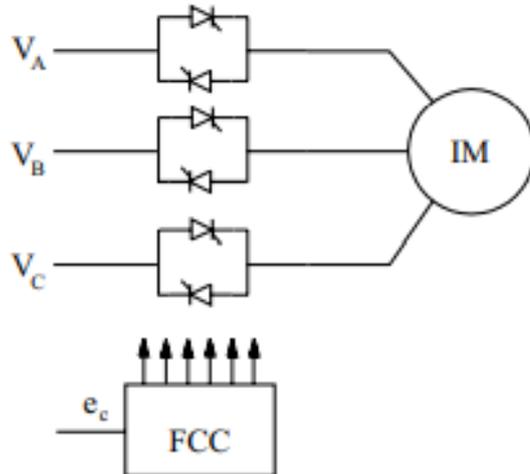
Analisis sebelumnya menyarankan beberapa metode kontrol kecepatan. Berikut ini adalah beberapa metode yang banyak digunakan:

1. Kontrol tegangan stator
2. Kontrol daya *slip*
3. Kontrol tegangan, variable frekuensi (V-f)
4. Kontrol arus, variabel frekuensi (I-f) control

1. Kontrol tegangan stator

Dalam metode kontrol ini, *thyristor back-to-back* digunakan untuk mensuplai motor dengan tegangan AC variabel, seperti yang ditunjukkan dalam diagram rangkaian konverter pada Gambar 2.9. Torsi yang

dibangkitkan berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan RMS *input* ke motor. Hal ini membuat penggerak seperti itu cocok untuk beban tipe kipas dan baling-baling di mana kebutuhan torsi meningkat lebih cepat dengan kecepatan. Untuk jenis beban lain, rentang kecepatan yang sesuai sangat terbatas. Motor dengan resistansi rotor tinggi dapat memberikan rentang kecepatan yang bervariasi. Perlu dicatat bahwa jenis penggerak dengan *thyristor back-to-back* dengan kontrol sudut picu ini mengalami faktor daya dan distorsi harmonik yang tidak baik saat dioperasikan pada kecepatan rendah. Jika sistem bekerja pada operasi yang tidak seimbang maka *thyristor* dalam satu atau dua jalur suplai ke motor dapat dilewati. Ini akan membuat sistem melakukan pengereman atau terhambatnya putaran, yang akan terjadi pada beberapa kondisi (Rashid, 2001).

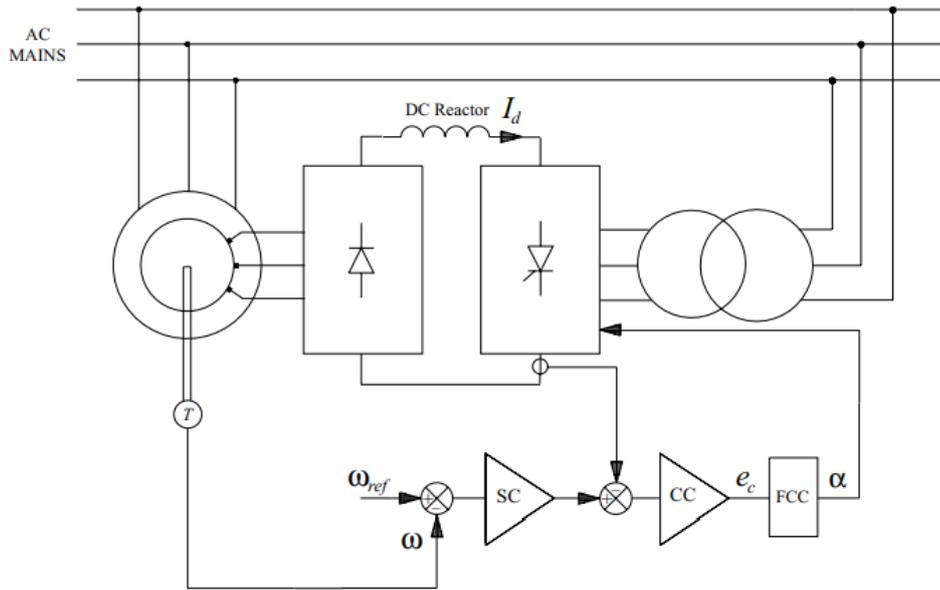


Gambar 2.9 Pengontrol Tegangan Stator (Rashid, 2001)

2. Kontrol daya *slip*

Penggerak motor induksi berkecepatan variabel, tiga fase, rotor lilitan (atau cincin *slip*) dengan kontrol daya *slip* dapat berupa beberapa bentuk. Dalam skema pasif, daya rotor disearahkan dan dialirkan dalam resistor

cair atau dalam resistor yang dapat disetel dan didinginkan. Dalam skema yang lebih populer, yang banyak digunakan dalam instalasi pemompaan berkapasitas sedang hingga besar, daya rotor yang diperbaiki dikembalikan ke sumber listrik AC oleh konverter *thyristor* yang beroperasi dalam mode inversi dua arah. Skema *Scherbius* statis ini ditunjukkan pada Gambar 2.10. Dalam skema ini, terminal rotor dihubungkan ke jembatan dioda tiga fase yang menyearahkan tegangan rotor. *Output* rotor ini kemudian diubah menjadi frekuensi listrik AC oleh konverter *thyristor* yang dikontrol penuh yang beroperasi dari sumber listrik yang sama dengan stator motor. Konverter dalam rangkaian rotor hanya menangani daya *slip* rotor, sehingga biaya rangkaian konverter daya dapat jauh lebih murah daripada penggerak *inverter* yang setara, meskipun dengan mengorbankan motor yang lebih mahal. Arus hubungan DC, dihaluskan oleh reaktor, dapat diatur dengan mengontrol sudut penyalaan konverter untuk mempertahankan torsi yang dikembangkan pada tingkat yang dibutuhkan oleh beban. Pengontrol arus (CC) dan pengontrol kecepatan (SC) juga ditunjukkan pada Gambar 2.10. Keluaran pengontrol arus menentukan sudut penyalaan konverter dari rangkaian kendali penyalaan (FCC) (Rashid, 2001).



Gambar 2.10 Skema Scherbius Statis (Rashid, 2001)

3. Kontrol tegangan, variabel frekuensi (V-f)

Ketika motor induksi digerakkan dari sumber tegangan AC yang ideal, kecepatan operasi normalnya kurang dari 5% di bawah kecepatan sinkron, yang ditentukan oleh frekuensi sumber AC dan jumlah kutub motor. Dengan *inverter* termodulasi sinusoidal (SPWM), ditunjukkan pada Gambar 2.11, frekuensi suplai ke motor dapat dengan mudah disesuaikan untuk kecepatan variabel. Jika fluks celah udara pengenal dipertahankan pada nilai pengenalnya pada semua kecepatan, tegangan suplai V_1 ke motor harus divariasikan secara seimbang dengan frekuensi f_1 . Diagram blok pada Gambar 2.11. menunjukkan bagaimana frekuensi f_1 dan tegangan keluaran V_1 dari *inverter* SPWM disesuaikan secara seimbang dengan referensi kecepatan. Sinyal referensi kecepatan biasanya dilewatkan melalui filter yang hanya memungkinkan perubahan bertahap pada frekuensi f_1 . Jenis kontrol ini secara luas disebut sebagai penggerak

inverter V-f. Kontrol tegangan *input* stator V1 sebagai fungsi frekuensi f1 mudah diatur dalam *inverter* dengan memodulasi sakelar T1–T6. Namun, pada kecepatan rendah, di mana tegangan *input* V1 rendah, sebagian besar tegangan *input* dapat turun melintasi impedansi stator, yang menyebabkan penurunan fluks celah udara dan hilangnya torsi. Namun, jika motor menjadi ringan dimuat pada kecepatan rendah, fluks celah udara dapat melebihi nilai pengenal, menyebabkan motor menjadi terlalu panas (Rashid, 2001).

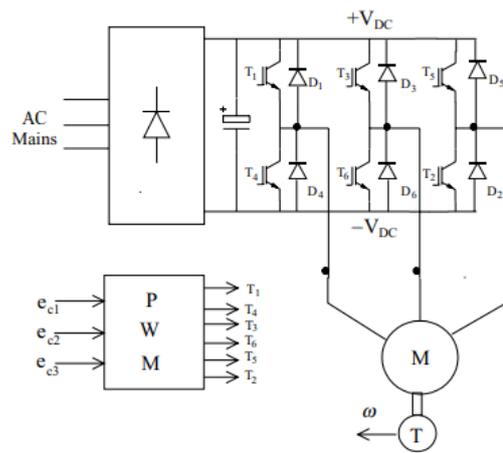
Besarnya nilai kecepatan motor ditentukan oleh nilai tegangan dan nilai frekuensi yang dicatu ke motor berdasarkan kontrol skalar (Volt/Hertz). Penentuan nilai tegangan didasarkan pada nilai rasio tegangan terhadap frekuensi. Jika nilai tegangan nominal motor adalah 220 V dan nilai frekuensi motor adalah 50 Hz. Besarnya nilai tegangan keluaran *inverter* ditentukan berdasarkan(3) ut:
(Pambudi, dkk. 2016).

$$V = \frac{220f}{50}$$

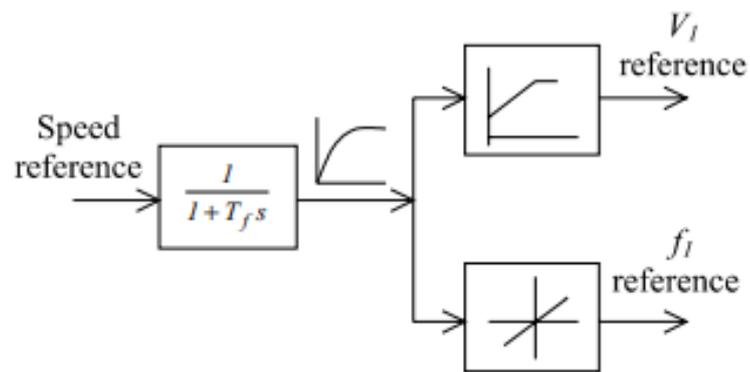
dengan f adalah frekuensi *input* motor

Nilai tegangan keluaran *inverter* yang didapatkan kemudian dimasukkan ke dalam variabel nilai indeks modulasi untuk menentukan pembangkitan sinyal PWM pada *inverter*. Berdasarkan nilai tegangan tersebut, maka nilai indeks modulasi menjadi:

$$M = \frac{220 f/50}{220} = \frac{f}{50} \dots\dots\dots(4)$$



(a)



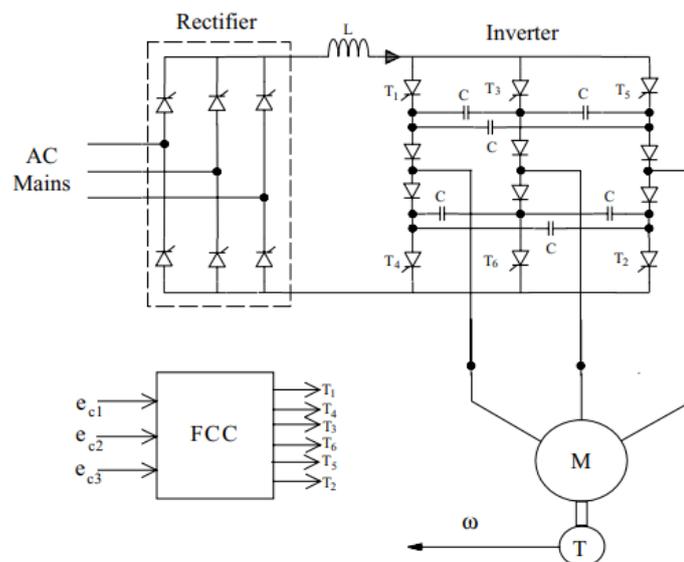
(b)

Gambar 2.11 V-f Drive (a) V-f drive PWM inverter (b) Filter referensi masukan dan pembangkitan referensi tegangan dan frekuensi untuk penggerak inverter V-f (Rashid, 2001)

4. Kontrol arus, variabel frekuensi (I-f) control

Dalam skema ini, motor induksi berkapasitas sedang hingga besar digerakkan dari suplai arus variabel yang dapat diperoleh dari konverter thyristor dan induktor DC link seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12. Frekuensi suplai arus ke motor diatur oleh konverter thyristor dengan

dioda dan kapasitor tambahan. Dioda di setiap kaki *inverter* dan kapasitor di seberangnya diperlukan untuk mematikan *thyristor* ketika arus akan diubah dari satu ke yang berikutnya secara berurutan. Bentuk gelombang arus motor biasanya *six-step*, atau kuasi persegi. Bentuk gelombang tegangan motor ditentukan oleh beban. Bentuk gelombang ini lebih mendekati sinusoidal daripada bentuk gelombang arus. Konverter *thyristor* yang mensuplai bentuk gelombang arus kuasi-kuadrat ke motor memiliki kontrol sudut picu, untuk mengatur arus DC *link* ke *inverter*. Dinamika kontrol arus DC *link* sedemikian rupa sehingga arus ini dapat dianggap konstan selama sakelar *inverter* mengubah arus DC *link* dari satu sakelar ke sakelar berikutnya. Penggerak sumber arus seperti itu menawarkan operasi empat kuadran, dengan kontrol independen dari arus DC *link* dan frekuensi keluaran. Salah satu kelemahannya adalah bentuk gelombang tegangan motor memiliki lonjakan tegangan karena proses *switching* (Rashid, 2001).



Gambar 2.12 i-f drive PWM inverter (Rashid, 2001)

2.3 Pulse Width Modulation (PWM)

Pada konverter elektronika daya, energi listrik dari satu tingkat tegangan/arus/frekuensi diubah menjadi tingkat lain menggunakan sakelar elektronik berbasis semikonduktor. Karakteristik penting dari jenis sirkuit ini adalah bahwa sakelar dioperasikan hanya di salah satu dari dua keadaan - baik sepenuhnya *ON* atau *OFF* sepenuhnya - tidak seperti jenis sirkuit listrik lainnya di mana komponen kontrol dioperasikan di wilayah aktif linier (Peddapelli, 2017).

Seiring berkembangnya industri elektronika daya, berbagai jenis konverter elektronika daya telah berevolusi, sering dikaitkan dengan tingkat daya, perangkat *switching*, dan asal topologi. Area aplikasi konverter daya meningkat pesat dalam teknologi semikonduktor, yang menawarkan tingkatan tegangan dan arus yang lebih tinggi serta karakteristik *switching* yang lebih baik. Sementara itu, keunggulan utama konverter elektronika daya modern adalah efisiensi tinggi, bobot rendah, dimensi kecil, pengoperasian cepat, dan kualitas daya tinggi. Proses pengalihan perangkat elektronik dalam konverter elektronik daya dari satu keadaan ke keadaan lain disebut 'modulasi'. Setiap jenis konverter daya memiliki metode modulasi pilihan yang terkait dengannya yang bertujuan untuk mengoptimalkan operasi rangkaian untuk kriteria target yang paling sesuai untuk jenis tersebut. Parameter seperti frekuensi *switching*, distorsi, kerugian, pembangkitan harmonik, dan kecepatan respon adalah ciri khas dari masalah yang harus dipertimbangkan ketika mengembangkan metode modulasi untuk jenis konverter tertentu. Tegangan keluaran power *inverter* harus berupa gelombang sinusoidal murni dengan distorsi minimum. Namun, untuk *inverter* praktis, tegangan *Output* adalah serangkaian bentuk gelombang persegi panjang. Masalah

utama untuk kontrol *inverter* daya adalah untuk mendapatkan metode modulasi yang sesuai untuk mengontrol *Output* bentuk gelombang persegi panjang untuk mensintesis bentuk gelombang yang diinginkan. Oleh karena itu, metode kontrol modulasi diperlukan untuk mendapatkan tegangan frekuensi dasar yang diinginkan dan untuk menghilangkan harmonik orde tinggi sebanyak mungkin. Dalam konverter modern, modulasi lebar pulsa (PWM) adalah proses kecepatan tinggi mulai tergantung pada daya beban dari beberapa *kilohertz* (kontrol motor) hingga beberapa *megahertz* (konverter resonansi untuk catu daya) (Peddapelli, 2017).

Teknik PWM adalah salah satu strategi yang paling banyak digunakan untuk mengontrol *Output* AC dari konverter elektronika daya. Dalam teknik ini, siklus kerja sakelar konverter dapat divariasikan pada frekuensi tinggi untuk mencapai tegangan atau arus keluaran frekuensi rendah rata-rata yang diinginkan. Teori modulasi telah menjadi bidang penelitian utama dalam elektronika daya selama lebih dari tiga dekade dan terus menarik banyak perhatian dan minat. Pada prinsipnya, semua skema modulasi bertujuan untuk membuat rangkaian pulsa pensaklaran yang memiliki rata-rata volt-detik fundamental yang sama sebagai bentuk gelombang referensi target setiap saat. Kesulitan utama dengan rangkaian pulsa yang diaktifkan ini adalah bahwa komponen memiliki harmonik yang tidak diinginkan yang harus diminimalkan. Oleh karena itu, untuk skema PWM apa pun, tujuan utama dapat diidentifikasi, yaitu menghitung waktu pengaktifan konverter, yang menghasilkan tegangan atau arus keluaran target (frekuensi rendah) yang diinginkan. Setelah memenuhi tujuan utama ini, tujuan sekunder untuk strategi PWM adalah untuk menentukan cara paling efektif mengatur proses

switching untuk meminimalkan distorsi harmonik yang tidak diinginkan, kerugian *switching*, atau kriteria kinerja spesifik lainnya. *Input DC* ke *inverter* dipotong dengan mengganti perangkat di *inverter*. Amplitudo dan kandungan harmonik dari bentuk gelombang AC dikendalikan dengan memvariasikan siklus kerja sakelar. Tegangan dasar V_1 memiliki amplitudo maksimum $4 V_d/\pi$ untuk keluaran gelombang persegi, tetapi dengan membuat takik, amplitudo V_1 berkurang. Biasanya, sakelar daya di satu kaki *inverter* selalu dalam keadaan *ON* atau *OFF*. Oleh karena itu, rangkaian *inverter* dapat disederhanakan menjadi 3 sakelar dua posisi. Baik tegangan DC *link* positif atau negatif diterapkan ke salah satu fase motor untuk waktu yang singkat. PWM adalah metode di mana pulsa tegangan yang diaktifkan dihasilkan untuk frekuensi dan tegangan *Output* yang berbeda (Peddapelli, 2017).

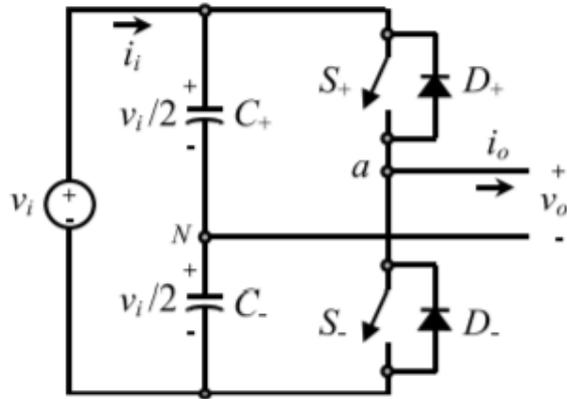
Modulator tipikal menghasilkan nilai tegangan rata-rata, sama dengan tegangan referensi dalam setiap periode PWM. Mempertimbangkan periode PWM yang sangat singkat, tegangan referensi menjadi acuan oleh bentuk pulsa yang diaktifkan. Ada beberapa teknik PWM yang berbeda, berbeda dalam metode implementasinya. Namun, dalam semua teknik ini, tujuannya adalah untuk menghasilkan tegangan keluaran, yang setelah beberapa penyaringan, akan menghasilkan bentuk gelombang tegangan keluaran sinusoidal berkualitas baik dengan frekuensi dan besaran dasar yang diinginkan. Namun, dalam kasus *inverter*, tidak mungkin untuk mengurangi distorsi tegangan keseluruhan karena harmonik, tetapi dengan kontrol *switching* yang tepat, besaran tegangan harmonik orde rendah dapat dikurangi, seringkali dengan biaya peningkatan besaran tegangan harmonik orde tinggi. Situasi seperti itu dapat

diterima dalam banyak kasus, karena tegangan harmonik dari frekuensi yang lebih tinggi dapat disaring menggunakan filter dan kapasitor ukuran lebih rendah. Banyak beban, seperti beban motor, memiliki kualitas untuk menekan arus harmonik frekuensi tinggi, dan karenanya, filter eksternal mungkin tidak diperlukan. Untuk menilai kualitas tegangan yang dihasilkan oleh *inverter* PWM, perlu dilakukan analisis harmonik yang terperinci dari bentuk gelombang tegangan (Peddapelli, 2017).

Dalam banyak aplikasi industri, digunakan tegangan keluaran *inverter* sinusoidal PWM (SPWM). SPWM memberikan kinerja *drive* yang baik di seluruh rentang operasi antara 0 dan 78% dari nilai yang akan dicapai oleh operasi gelombang persegi. Jika indeks modulasi melebihi nilai ini, hubungan linier antara indeks modulasi dan tegangan *Output* tidak dipertahankan, dan metode modulasi berlebih diperlukan. SPWM mengacu pada pembangkitan *Output* PWM dengan gelombang sinus sebagai sinyal modulasi. Dalam metode modulasi ini, contoh *ON* dan *OFF* dari sinyal PWM dapat ditentukan dengan membandingkan sinyal referensi dengan gelombang segitiga frekuensi tinggi, seperti yang ditunjukkan pada. Frekuensi tegangan keluaran dapat ditentukan oleh frekuensi gelombang modulasi. Amplitudo puncak gelombang modulasi menentukan indeks modulasi dan pada gilirannya mengontrol nilai RMS dari tegangan *Output*. Ketika indeks modulasi diubah, nilai RMS dari tegangan *Output* juga berubah (Peddapelli, 2017).

SPWM adalah suatu metode yang digunakan untuk menentukan sudut pemicuan dengan cara membandingkan gelombang segitiga dengan 3 gelombang

sinus (fasa R, fasa S, dan fasa T) yang masing-masing berbeda fasa 120° (Setiawan, dkk. 2016).



Gambar 2.13 *Inverter* Satu Fasa (Rashid, 2001)

Seperti disebutkan sebelumnya, diinginkan bahwa tegangan keluaran AC $V_o = V_{aN}$ mengikuti bentuk gelombang tertentu (misalnya, sinusoidal) secara terus menerus dengan mengganti katup daya dengan benar. Teknik PWM berbasis operator memenuhi persyaratan seperti itu karena mendefinisikan status *ON* dan *OFF* dari sakelar satu fasa VSI dengan membandingkan sinyal modulasi V_c (*Output AC* yang diinginkan tegangan) dan bentuk gelombang segitiga V_d (sinyal pembawa). Di dalam prakteknya, ketika $V_c > V_d$ saklar S_+ hidup dan saklar S_- tidak aktif; demikian pula, ketika $V_c < V_d$ saklar S_+ mati dan saklar S_- aktif. Kasus khusus adalah ketika sinyal modulasi V_c adalah sinusoidal pada frekuensi f_c dan amplitudo \hat{v}_c dan sinyal segitiga V_d berada pada frekuensi f_d dan amplitudo \hat{v}_{tri} . Ini adalah skema PWM sinusoidal (SPWM). Dalam hal ini, indeks modulasi m_a (juga dikenal sebagai rasio modulasi amplitudo) didefinisikan sebagai:

$$m_a = \frac{\hat{v}_c}{\hat{v}_{tri}} \dots\dots\dots(5)$$

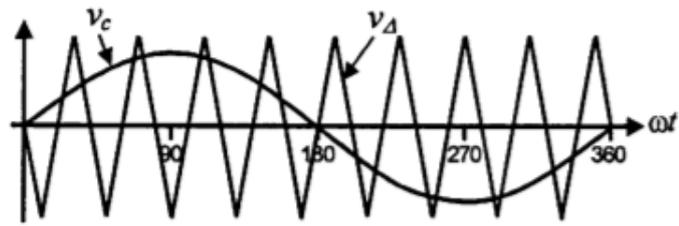
dan frekuensi pembawa m_f (juga dikenal sebagai rasio frekuensi-modulasi) adalah

$$m_f = \frac{f_d}{f_c} \dots\dots\dots(6)$$

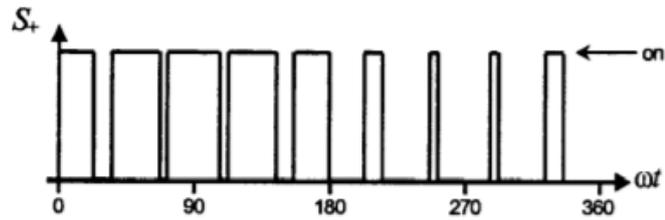
Diantara teknik PWM, mode SPWM lebih banyak digunakan karena untuk mengontrol tegangan dan frekuensi keluaran *inverter* dapat dilakukan sesuai dengan fungsi sinus yang digunakan. Resolusi adalah jumlah variasi perubahan nilai dalam PWM tersebut. Misalkan suatu PWM memiliki resolusi 8 bit berarti PWM ini memiliki variasi perubahan nilai sebanyak $2^8 = 256$ variasi mulai dari 0 – 255 perubahan nilai yang mewakili duty cycle 0 – 100% dari keluaran PWM tersebut (Prayogo, 2012).

Index modulasi dari SPWM biasanya berada antara 0 dan 1. Semakin mendekati 1 maka nilai THD akan semakin berkurang. Berikut beberapa keuntungan menggunakan teknik SPWM untuk inverter tiga fasa mode VSI (Asnil dkk, 2018).

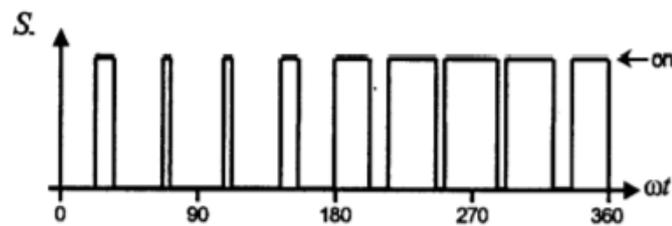
1. Metode SPWM mudah untuk diimplementasikan dan dikontrol
2. Variasi suhu tidak signifikan sehingga tidak terjadi degradasi dan pengurangan susut umur.
3. Susut daya berkurang terutama akibat pensaklaran rendah
4. Bisa diaplikasikan menggunakan mikroprosesor
5. Pemanfaatan sumber DC lebih efektif karena dapat menghasilkan nilai keluaran yang lebih tinggi
6. Dapat mereduksi harmonik orde rendah



(a)



(b)



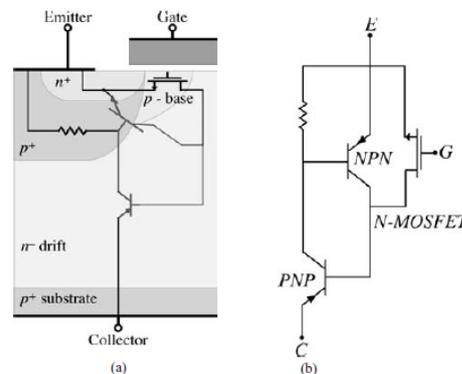
(c)

Gambar 2.14 Sinyal PWM, (a) Komparasi sinyal sinusoidal dengan segitiga, (b) Sinyal Switching S_+ (c) Sinyal Switching S_- (Rashid, 2001)

Dalam metode PWM sinusoidal, gelombang pembawa segitiga frekuensi f_c dan gelombang modulasi frekuensi m_f (frekuensi yang sama dengan keluaran *inverter*) digunakan untuk memodulasi tegangan kutub. Tegangan kutub S_+ dialihkan antara *link* positif dan negatif di persimpangan gelombang pembawa dan gelombang modulasi. Demikian pula, tegangan kutub S_- dimodulasi oleh gelombang pembawa (Sen, 2012).

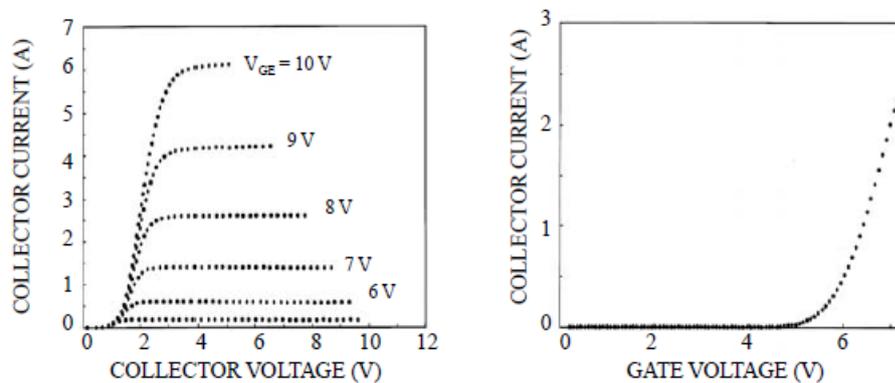
2.4 Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)

Penampang melintang vertikal dari setengah sel dari salah satu sel paralel IGBT saluran-n yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 mirip dengan MOSFET daya difusi ganda (DMOS) kecuali untuk lapisan p^+ di bagian bawah. Lapisan ini membentuk kolektor IGBT dan pn -junction dengan daerah n -drift, di mana modulasi konduktivitas terjadi dengan menyuntikkan pembawa yang lebih rendah ke dalam daerah drift drain MOSFET vertikal. Oleh karena itu, kerapatan arus jauh lebih besar daripada MOSFET daya dan penurunan tegangan maju berkurang. Ketika potensial positif diterapkan ke gerbang dan melebihi tegangan ambang yang diperlukan untuk membalikkan daerah MOS di bawah gerbang, saluran-n terbentuk, yang menyediakan jalur bagi elektron untuk mengalir ke daerah n -drift. Persimpangan pn antara p -substrat dan daerah n -drift dibias maju dan lubang disuntikkan ke daerah drift. Elektron di daerah drift bergabung kembali dengan lubang ini untuk menjaga netralitas muatan ruang dan lubang yang tersisa dikumpulkan di emitor, menyebabkan aliran arus vertikal antara emitor dan kolektor (Rashid, 2001).



Gambar 2.15 IGBT (a) Penampang vertical setengah sel (b) Model rangkaian ekivalen (Rashid, 2001)

Gambar 2.16. Karakteristik transfer IGBT dan MOSFET serupa. IGBT berada dalam keadaan tidak aktif jika potensial gerbang-emitor di bawah tegangan ambang. Untuk tegangan gerbang yang lebih besar dari tegangan ambang, kurva transfernya linier pada sebagian besar rentang arus. Kerusakan oksida gerbang dan arus pengurasan IGBT maksimum membatasi tegangan emitor gerbang maksimum. Untuk mematikan IGBT, gerbang dihubung singkat ke emitor untuk menghilangkan saluran MOS dan arus basis transistor pnp (Rashid, 2001).



Gambar 2.16 Karakteristik IGBT (a) Bias maju (b) Karakteristik Transfer
(Rashid, 2001)

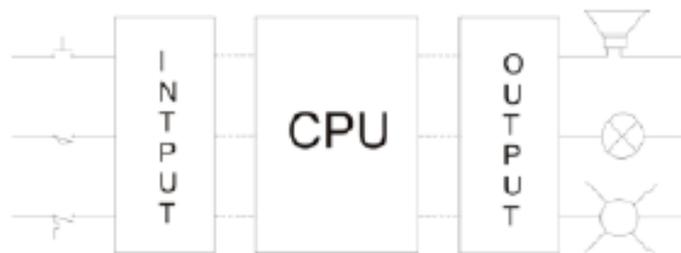
2.5 Programmable Logic Controller (PLC)

Programmable Logic Controller (PLC) adalah komputer elektronik yang mudah digunakan (*user friendly*) yang memiliki fungsi kendali untuk berbagai tipe dan tingkat kesulitan yang beraneka ragam. Definisi *Programmable Logic Controller* menurut Capiel (1982) adalah sistem elektronik yang beroperasi secara digital dan didesain untuk pemakaian di lingkungan industri, dimana sistem ini menggunakan memori yang dapat diprogram untuk penyimpanan secara internal instruksi-instruksi yang mengimplementasikan fungsi-fungsi spesifik seperti

logika, urutan, pewaktuan, pencacahan dan operasi aritmatik untuk mengontrol mesin atau proses melalui modul *input Output* digital maupun analog. Sehingga PLC dapat diartikan sebagai sebuah alat kontrol yang bekerja berdasarkan pada pemrograman dan eksekusi instruksi logika. PLC mempunyai fungsi internal seperti *timer, counter dan shift register*. PLC beroperasi dengan cara memeriksa *input* dari sebuah proses guna mengetahui statusnya kemudian sinyal *input* ini diproses berdasarkan instruksi logika yang telah diprogram dalam memori. Dan sebagai hasilnya adalah berupa sinyal *Output*. Sinyal *Output* inilah yang dipakai untuk mengendalikan peralatan atau mesin. Antarmuka (*interface*) yang terpasang di PLC memungkinkan PLC dihubungkan secara langsung ke *actuator* atau *transducer* tanpa memerlukan *relay* (Pratama, 2015).

Pada prinsipnya PLC mempunyai tiga bagian pokok yang masing-masing mempunyai tugas yang berbeda, tiga bagian tersebut adalah sebagai berikut: (Pratama, 2015)

1. *Input* atau *Output*
2. Memori
3. Pemroses.



Gambar 2.17 Bagian Utama Sistem PLC (Pratama, 2015)

Berdasarkan namanya, konsep PLC adalah sebagai berikut: ((Pratama, 2015))

1. *Programmable*, menunjukkan kemampuan dalam hal memori untuk menyimpan program yang telah dibuat yang dengan mudah diubah-ubah fungsi atau kegunaannya.
2. *Logic*, menunjukkan kemampuan dalam memproses *input* secara aritmatik dan *logic* (ALU), yakni melakukan operasi membandingkan, menjumlahkan, mengalikan, membagi, mengurangi, negasi, AND, OR, dan lain sebagainya.
3. *Controller*, menunjukkan kemampuan dalam mengontrol dan mengatur proses sehingga menghasilkan *Output* yang diinginkan.

PLC ini dirancang untuk menggantikan suatu rangkaian sequensial *relay* dalam suatu sistem kontrol. PLC ini memiliki bahasa pemrograman yang mudah dipahami dan dapat dioperasikan bila program yang telah dibuat dengan menggunakan *software* yang sesuai dengan jenis PLC yang digunakan sudah dimasukkan. Fungsi dan kegunaan PLC sangat luas. Dalam prakteknya PLC dapat dibagi secara umum dan secara khusus. Secara umum fungsi PLC adalah sebagai berikut: (Pratama, 2015)

1. *Sequential Control*. PLC memproses *input* yang berupa sinyal biner menjadi *Output* yang digunakan untuk keperluan pemrosesan secara berurutan (sequensial). Disini PLC menjaga agar semua tahap atau langkah dalam proses sequensial berlangsung dalam urutan yang tepat.
2. *Monitoring Plant*. PLC secara terus menerus memonitor status suatu sistem dan mengambil tindakan yang diperlukan sehubungan dengan proses yang dikontrol atau menampilkan pesan tersebut pada operator.

3. *Shutdown System*. Sedangkan fungsi PLC secara khusus adalah dapat memberikan *input* ke CNC (*Computerized Numerical Control*). Beberapa PLC dapat memberikan *input* ke CNC untuk kepentingan pemrosesan lebih lanjut. CNC bila dibandingkan dengan PLC mempunyai ketelitian yang lebih tinggi dan lebih mahal harganya. CNC biasanya dipakai untuk proses *finishing*, membentuk benda kerja dan *moulding*.

2.6 Variable Frequency Drives (VFD)

Variable-Frequency Drive (VFD) adalah perangkat yang mengontrol tegangan dan frekuensi yang disuplai ke motor sehingga dapat mengubah kecepatan motor dan sistem yang digerakkannya. Dengan memenuhi tuntutan proses yang dibutuhkan, efisiensi sistem ditingkatkan. Sebuah VFD mampu menyesuaikan baik kecepatan dan torsi dari sebuah motor induksi. Oleh karena itu, mampu mengontrol proses perubahan kecepatan terus menerus dibandingkan dengan kecepatan diskrit kontrol yang disediakan oleh *gearbox* atau motor multi-kecepatan. Motor kecepatan tetap (atau motor induksi AC) digunakan pada sebagian besar aplikasi. Dalam aplikasi atau sistem ini, elemen kontrol seperti peredam dan katup digunakan untuk mengatur aliran dan tekanan. Perangkat ini biasanya menghasilkan operasi yang tidak efisien dan kehilangan energi karena tidak dapat dikontrol. Seringkali diinginkan untuk mengatur motor yang beroperasi pada dua atau lebih kecepatan diskrit, atau operasi kecepatan variabel penuh. Elemen kontrol konvensional sering dapat digantikan oleh operasi kecepatan variabel menggunakan VFD. Penghematan energi yang besar dapat dicapai dalam banyak hal dengan memvariasikan kecepatan motor dan beban yang digerakkan menggunakan VFD yang tersedia secara komersial.

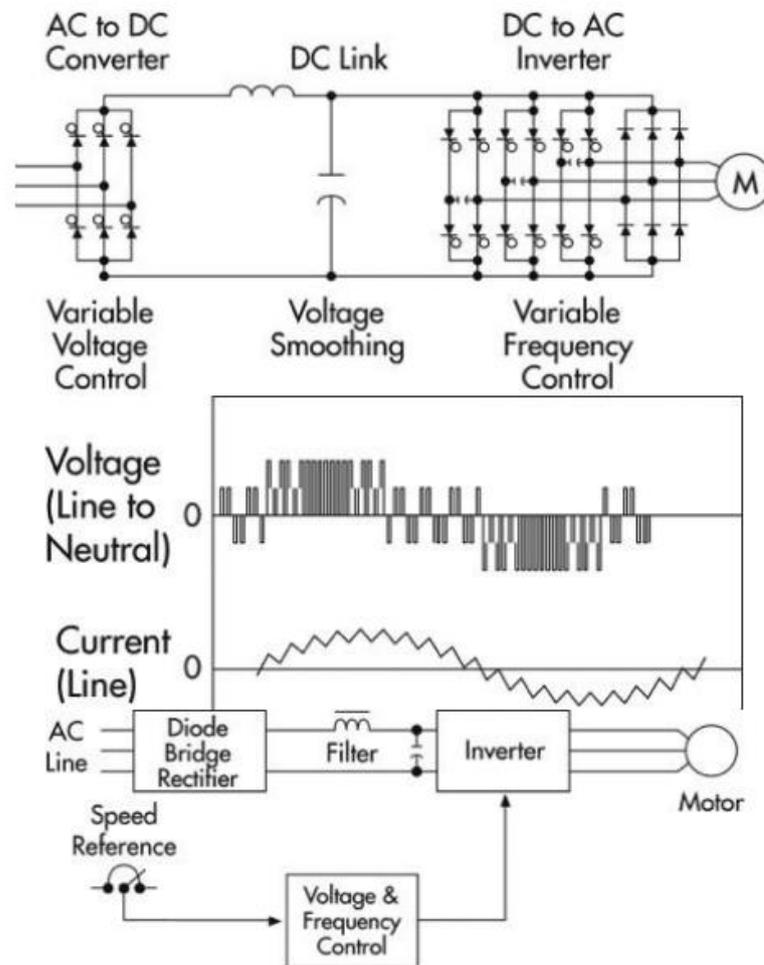
Penghematan termasuk biaya modal dan biaya pemeliharaan yang terkait dengan elemen kontrol (BC Hydro Power Smart, 2015).

VFD elektronik dapat memvariasikan tegangan dan frekuensi ke motor induksi menggunakan teknik yang disebut *Pulse Width Modulation* (PWM). VFD merupakan sistem yang banyak dipakai untuk mencapai operasi kecepatan variabel, karena relatif murah dan sangat andal. VFD menggunakan perangkat semikonduktor daya yang disebut gerbang-terisolasi transistor bipolar (IGBT). Menggunakan PWM, kecepatan karakteristik motor dan torsi dapat disesuaikan agar sesuai dengan persyaratan beban. Langkah pertama dalam proses PWM adalah mengubah suplai AC tegangan menjadi DC dengan menggunakan penyearah. Daya DC mengandung riak tegangan yang dihaluskan menggunakan kapasitor filter. Ini bagian dari VFD sering disebut sebagai DC *link*. Tegangan DC ini kemudian diubah kembali menjadi AC. Konversi biasanya dicapai melalui penggunaan daya perangkat elektronik seperti transistor daya IGBT menggunakan teknik yang disebut *Pulse Width Modulation* (PWM). Tegangan *Output* dihidupkan dan dimatikan pada frekuensi tinggi, dengan durasi tepat waktu, atau lebar pulsa, dikendalikan untuk mendekati bentuk gelombang sinusoidal. Seluruh proses dikendalikan oleh mikroprosesor yang memantau:

- Suplai tegangan masuk;
- Variasi kecepatan;
- tegangan DC *link*; dan
- Tegangan dan arus keluaran untuk memastikan pengoperasian motor dalam parameter yang ditetapkan. (BC Hydro Power Smart, 2015)

Dalam *drive* atau aplikasi yang paling sederhana, referensi kecepatan hanyalah *set-point*; namun, dalam aplikasi yang lebih kompleks, referensi kecepatan berasal dari pengontrol proses seperti *Programmable Logic Controller* (PLC) atau *tachometer*. Teknologi *drive* lama, seperti *Current Source Inverter* dan Pengontrol Tegangan Variabel, menggunakan SCR atau Thyristor sebagai perangkat kontrol. Teknologi tersebut kini telah digantikan oleh PWM VFD, yang dapat mengatur kecepatan motor induksi antara 10% hingga 200%. Rentang kecepatan yang lebih luas dimungkinkan tergantung pada model dan opsi yang dipilih. Akurasi kecepatan dipengaruhi oleh *slip* motor, menghasilkan operasi yang sedikit lebih lambat daripada kecepatan sinkron untuk frekuensi tertentu. Akurasinya bisa ditingkatkan dengan menggunakan umpan balik *tachometer*. Kontrol kecepatan dan posisi poros motor yang sangat presisi dapat dicapai dengan menggunakan VFD dengan Kontrol Vektor. VFD dapat memberikan banyak solusi tergantung pada: aplikasi yang dibutuhkan. VFD memiliki keuntungan sebagai berikut:

1. Penghematan energi pada aplikasi kipas dan pompa
2. Kontrol dan regulasi proses yang lebih baik
3. Mempercepat atau memperlambat mesin
4. Koreksi faktor daya
5. Kemampuan menghentikan mesin jika terjadi keadaan darurat
6. Perlindungan dari arus beban lebih
7. Akselerasi yang aman. (BC Hydro Power Smart, 2015)



Gambar 2.18 Blok Diagram VFD PWM (BC Hydro Power Smart, 2015)

2.7 Software TIA Portal

Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal adalah *software* terbaru dari SIEMENS dengan seri terbaru yang memiliki kelebihan bahwa untuk *software* pemrograman PLC dan *software* pemrograman SCADA atau HMI sudah menjadi satu dalam *software* ini. Karena aplikasi ini sudah terpadu sehingga memungkinkan semua jenis PLC Siemens, HMI operator panel dan *drives* dikonfigurasi melalui satu *environment development* yang sama. Kelebihan ini dapat menurunkan biaya *interfacing* serta konfigurasi pada layanan-layanan yang

biasa dilakukan ketika pengaturan komunikasi antar *controller* perangkat tambahan dan perangkat HMI. Sebagai contoh pengguna hanya perlu melakukan *drags and drops* sebuah tag yang ada di dalam PLC, seperti sinyal dari modul IO ke dalam tampilan HMI. Tag tersebut secara otomatis terbentuk di dalam HMI dan koneksi antara *controller* dengan HMI akan terbuat secara otomatis tanpa diperlukan konfigurasi manual (Siemens, 2016).



Gambar 2.19 TIA Portal V.14 (Siemens, 2016)

Fitur-fitur yang ada pada TIA Portal

- Pemrograman PLC
- Konfigurasi *Hardware*
- Pemrograman HMI (WinCC) dan SCADA
- Diagnosis secara *Online*