

LAPORAN TUGAS AKHIR

ANALISIS PERFORMA MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN *VARIABLE FREQUENCY DRIVES (VFD)* MENGUNAKAN PULSE GENERATOR PWM DAN SVPWM

Diajukan guna melengkapi sebagian syarat dalam mencapai
gelar Sarjana Strata Satu (S1)



Disusun Oleh :

Nama : Ari Dwiki Baringbing

N.I.M. : 41420120104

Pembimbing : Ir. Budi Yanto Husodo, M.Sc

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MERCU BUANA

JAKARTA

2022

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PERFORMA MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN *VARIABLE FREQUENCY DRIVES (VFD)* MENGUNAKAN PULSE GENERATOR PWM DAN SVPWM



Disusun Oleh:

Nama : Ari Dwiki Baringbing
NIM : 41420120104
Program Studi : Teknik Elektro

Mengetahui,
Pembimbing Tugas Akhir

(Ir. Budi Yanto Husodo, M.Sc)

Kaprodi Teknik Elektro

Koordinator Tugas Akhir

(Dr. Ir. Eko Ihsanto, M.Eng)

(Muhammad Hafizd Ibnu Hajar, ST. M.Sc)

HALAMAN PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Ari Dwiki Baringbing

Nim : 41420120104

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Judul : ANALISIS PERFORMA MOTOR INDUKSI TIGA FASA
DENGAN VARIABLE FREQUENCY DRIVES (VFD)
MENGUNAKAN PULSE GENERATOR PWM DAN SVPWM

Dengan ini menyatakan bahwa hasil penulisan tugas akhir telah saya buat ini merupakan hasil karya saya sendiri dan benar keasliannya. Apabila dikemudian hari penulisan tugas akhir ini merupakan hasil plagiat atau menjiplak terhadap karya orang lain, maka saya bersedia mempertanggung jawabkan sekaligus menerima sanksi berdasarkan aturan tata tertib di Universitas Mercu Buana.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tidak dipaksakan.

Jakarta, 10 Juli 2022

(Ari Dwiki Baringbing)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan Kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang telah melimpahkan anugerah dengan memberikan kelancaran, kesehatan dan ilmu pengetahuan sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul

“ANALISIS PERFORMA MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN VARIABLE FREQUENCY DRIVES (VFD) MENGGUNAKAN PULSE GENERATOR PWM DAN SVPWM”

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan karena menyadari segala keterbatasan yang ada. Untuk itu demi sempurnanya skripsi ini, penulis sangat membutuhkan dukungan dan sumbangsih pikiran yang berupa kritik dan saran yang bersifat membangun.

Penulisan laporan tugas akhir yang dibuat dalam rangka memenuhi salah satu syarat kelulusan untuk memperoleh gelar strata satu (S1) di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana. Dalam pembuatan laporan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa laporan ini dapat terselesaikan dengan bantuan, bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa
2. Kedua Orang tua saya, Wesly Baringbing dan Nuriaty Siagian serta keluarga besar yang tidak henti-hentinya telah memberikan doa serta dukungannya selama ini, baik secara moril maupun materil. Penulis berharap dapat menjadi anak yang dapat dibanggakan.
3. Bapak Ir. Budiyanto Husodo, MSc selaku dosen pembimbing laporan tugas akhir yang telah memberikan arahan dan bimbingan dengan ketelitian dari awal hingga akhir proses penyusunan skripsi ini dan memberikan ilmu dan meluangkan waktunya untuk saya dalam penyelesaian laporan tugas akhir.
4. Bapak Dr. Ir. Eko Ihsanto, M.Eng selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro di Universitas Mercu Buana.

5. Bapak Muhammad Hafizd Ibnu Hajar, ST. MSc selaku Koordinator Tugas Akhir Teknik Elektro di Universitas Mercu Buana.
6. Seluruh Dosen Teknik Elektro Universitas Mercu Buana yang telah memberikan pelajaran dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis untuk menunjang penyelesaian Tugas Akhir ini.
7. Rekan rekan seperjuangan Angkatan 38 Elektro yang menjadi tempat curhat dan mengatasi masalah – masalah sehingga Penulis penuh semangat dan termotivasi untuk bersaing secara sehat.
8. Teman – teman dari kampung halaman yang memberikan motivasi dan semangat, serta penghiburan sehingga penulis tetap optimis untuk melanjutkan mendapatkan gelar S1 di UNIVERSITAS MERCUBUANA

Semoga Tuhan YME senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah Nya selalu. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat, baik bagi penulis pada khususnya maupun bagi yang memerlukan bagi umumnya.

Terimakasih...

Jakarta, 10 Juli 2022

(Ari Dwiki Baringbing)

ABSTRAK

Motor induksi tiga fasa merupakan motor arus bolak-balik yang paling banyak digunakan di perindustrian atau perkantoran. Prinsipnya motor induksi dioperasikan pada kecepatan konstan, apabila motor induksi diberikan beban yang tidak seimbang dengan kecepatan konstantanya maka kecepatan motor induksi akan berubah. Untuk itu salah satu metode yang umum dilakukan untuk mengatur kecepatan putar motor induksi sesuai dengan yang diinginkan adalah dengan menggunakan *Variable Frekuensi Drive (VFD)*. VFD dapat dikendalikan dengan pulse generator PWM (*pulse width modulation*) dan SVPWM (*space-vector pulse width modulation*) yang berfungsi mengatur besaran nilai dari frekuensi dan indeks modulasi. Dalam tugas akhir ini, yang diinvestigasi dan dibandingkan untuk hasil yang lebih optimal adalah nilai output PWM dan SVPWM dengan *variable Rotor Speed*, *Slip*, *Fslip*, Arus stator, dan *THD (Total Harmonic Distortion)*.

Dalam skripsi ini, dilakukan perbandingan simulasi dengan MATLAB antara PWM dan SVPWM menggunakan metode perancangan dan eksperimental.

Hasil akhir yang diperoleh ialah untuk Rotor Speed, kendali SVPWM lebih optimal dengan persentase rata – rata 2,2 %. Untuk Slip kendali SVPWM lebih optimal mencapai 1,53 %. untuk *Fslip* kendali SVPWM lebih optimal mencapai 0,76 %, kendali SVPWM menghasilkan konsumsi arus yang lebih kecil pada frekuensi 50 - 40 Hz. untuk Arus THD, kendali PWM lebih optimal dengan persentase rata – rata 1,07 %.

Kata kunci : Motor Induksi, *Variable Frekuensi Drive*, PWM, SVPWM, *Total Harmonic Distortion*

ABSTRACT

Three-phase induction motor is an alternating current motor that is most widely used in industry or offices. In principle, the induction motor is operated at a constant speed, if the induction motor is given a load that is not balanced with its constant speed, the speed of the induction motor will change. For this reason, one of the common methods used to adjust the rotational speed of an induction motor as desired is to use a Variable Frequency Drive (VFD). The VFD can be controlled by pulse generator PWM (pulse width modulation) and SVPWM (space-vector pulse width modulation) which are part of the value of the frequency and modulation index. In this final project, what is investigated and compared for more optimal results is the PWM and SVPWM output values with the variables of Rotor Speed, Slip, Fslip, Stator Current, and THD (Total Harmonic Distortion).

In this thesis, a simulation comparison with MATLAB between PWM and SVPWM is carried out using design and experimental methods.

The final result obtained is for Rotor Speed, SVPWM control is more optimal with an average percentage of 2.2%. For more optimal SVPWM control slip reaches 1.53%. for Fslip control SVPWM is more optimal reaching 0.76%, SVPWM control produces a smaller current consumption at a frequency of 50 - 40 Hz. for THD Current, PWM control is more optimal with a percentage of 1.07%.

Keyword : *Motor Induction three phase, Variable Frequensi Drive, PWM, SVPWM, Total Harmonic Distortion*

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metode Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Manfaat Penelitian	5
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.1.1 Performance Analysis of Three-Phase Induction Motor with AC Direct and VFD	6
2.1.2 Three Phase Inverter Simulation using Sinusoidal PWM Technique	7
2.1.3 Perbandingan Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Inverter Pulse Width Modulation (Pwm) Dan Sinusoidal Pulse Width Modulation (Spwm)	7

2.1.4 Design and implementation of Open & Close Loop Speed control of Three Phase Induction Motor Using PI Controller	8
2.1.5 Design of Three Phase Inverter System with LC filter	9
2.2 Sistem Penggerak Motor Induksi	13
2.2.1 Karakteristik Motor Induksi Pada Frekuensi dan Tegangan Rating	21
2.2.2 Karakteristik Torsi-Kecepatan	23
2.2.3 Pengasutan (<i>Starting</i>) Motor Induksi	24
2.2.4 Penguatan Tegangan pada Frekuensi Rendah	25
2.2.5 Daerah Kecepatan Motor Induksi	27
2.2.6 Kecepatan di Bawah Rating : Daerah Torsi konstan	28
2.2.7 Kecepatan Lebih Dari Rating : Daerah Daya Konstan	29
2.2.8 Operasi Pada Kecepatan Tinggi : Daerah f_{sl} Konstan	30
2.3 Harmonisa	31
2.3.1 Beban Non Linear	33
2.3.2 Beban Linear	34
2.3.3 Distorsi Harmonisa	35
2.3.4 Orde Harmonisa	37
2.3.5 Sumber – Sumber Harmonisa	37
2.3.6 Standar Harmonisa	38
2.4 Fully-controlled 3-phase Bridge Rectifier	39
2.5 Thyristor	41
2.6 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)	43
2.7 <i>Pulse Width Modulation Inverter</i> Tiga Fasa	44
2.7.1 <i>Linear Modulation</i> ($m_a \leq 1.0$)	45
2.7.2 <i>Over Modulation</i> ($m_a > 1.0$)	47

2.7.3 <i>Square-Wave Operation in Three-Phase Inverters</i>	48
2.8 <i>Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) Inverter</i>	49
2.8.1 Prinsip Kerja Inverter Tiga Fasa SVPWM.....	50
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	53
3.1 Waktu dan Tempat	53
3.2 Bahan dan Peralatan.....	53
3.3 Diagram Alir Penelitian	54
3.4 Model Mesin Induksi Tiga Fasa.....	55
3.4.1 Pengaturan Model Mesin Induksi dan Penggunaannya pada Simulasi.	58
3.5 Model Rectrifier 3 Fasa Fully Control	61
3.6 Model Universal Bridge Inverter	64
3.6.1 Pengaturan Model Universal Bridge Inverter IGBT dan Penggunaannya pada Simulasi	65
3.7 DC Link Konverter	66
3.8 Model Pulse Dan Signal Generator.....	67
3.8.1 Deskripsi Model Pwm Generator (2 – Level).....	67
3.8.2 Pengaturan Model PWM Generator (2 – Level).....	68
3.8.3 Deskripsi Model SVPWM Generator (2 – Level)	69
3.8.4 PENGATURAN MODEL SVPWM GENERATOR (2 – Level).....	70
BAB 4 ANALISA HASIL PENELITIAN	72
4.1 Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives (Vfd) Menggunakan Pulse Generator PWM dan SVPWM	73
4.2 Tahapan Tahapan Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives Menggunakan Pulse Generator Pwm dan SVPWM.....	73
4.3 Hasil Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives (Vfd) Menggunakan Pulse Generator PWM dan SVPWM.....	75

4.3.1 Hasil Simulasi dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 50 hz	76
4.3.2 Hasil Simulasi SVPWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 50 hz.....	85
4.3.3 Hasil Simulasi PWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 40 hz	99
4.3.4 Hasil Simulasi SVPWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) menggunakan Frekuensi 40 Hz.....	108
4.3.5 Hasil Simulasi PWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 30 Hz	122
4.3.6 Hasil Simulasi SVPWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 30 hz.....	132
4.3.7 Hasil Simulasi PWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 20 hz	146
4.3.8 Hasil Simulasi SVPWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 20 hz.....	156
BAB 5 PENUTUP.....	170
5.1 Kesimpulan	170
5.2 Saran.....	171
DAFTAR PUSTAKA	172

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Relevansi Penelitian Sebelumnya Dengan TA	10
Tabel 2.2 Persamaan Penting	20
Tabel 2.3 Batas Distorsi Harmonisa Tegangan Menurut IEEE Std. 519-2014.....	38
Tabel 2.4 Batas Distorsi Arus dengan Sistem Tegangan 120 V-69 KV	38
Tabel 2.5 <i>Generalized Hannonics of V_n for a Large and Odd m_f That Is a Multiple of 3</i>	47
Tabel 2.6 Delapan Kombinasi tegangan Fasa ke Netral dan Tegangan Fasa ke Fasa	52
Tabel 3.1 Subskrip Persamaan Model Mesin Induksi MATLAB.....	55
Tabel 3.2 Definisi Parameter-Parameter Sistem Elektris dan Sistem Mekanis	57
Tabel 3.3 Nilai Konfigurasi/ Parameter dan Ketentuan dari Model Mesin Induksi MATLAB.....	59
Tabel 3.4 Parameter Ac Tiga Fasa	61
Tabel 3.5 Waktu <i>Switching Thyristor</i>	62
Tabel 4.1 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1	76
Tabel 4.2: Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9	78
Tabel 4.3 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8	80
Tabel 4.4 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi 0,7.....	81
Tabel 4.5 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi 0,5.....	83
Tabel 4.6 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi 0,3.....	84
Tabel 4.7 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1	86
Tabel 4.8 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9	88
Tabel 4.9 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8	89
Tabel 4.10 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7	91
Tabel 4.11 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5	92
Tabel 4.12 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,3	93
Tabel 4.13 Hasil Simulasi PWM dan SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1-0.3 menggunakan frekuensi 50 Hz	95

Tabel 4.14 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1	100
Tabel 4.15 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9	102
Tabel 4.16 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8	103
Tabel 4.17 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7	104
Tabel 4.18 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5	106
Tabel 4.19 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,3	107
Tabel 4.20 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1	109
Tabel 4.21 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9	110
Tabel 4.22 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8	112
Tabel 4.23 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7	113
Tabel 4.24 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5	115
Tabel 4.25 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,3	116
Tabel 4.26 Hasil Simulasi PWM dan SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1-0.3 menggunakan frekuensi 40 Hz	118
Tabel 4.27 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1	123
Tabel 4.28 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9	125
Tabel 4.29 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8	126
Tabel 4.30 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7	128
Tabel 4.31 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5	129
Tabel 4.32 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,3	131
Tabel 4.33 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1	133
Tabel 4.34 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9	134
Tabel 4.35 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8	136
Tabel 4.36 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7	137
Tabel 4.37 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5	139
Tabel 4.38 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,3	140
Tabel 4.39 Hasil Simulasi PWM dan SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1-0.3 menggunakan frekuensi 30 Hz	142
Tabel 4.40 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1	146
Tabel 4.41 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9	149
Tabel 4.42 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8	150

Tabel 4.43 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7	152
Tabel 4.44 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5	153
Tabel 4.45 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,3	155
Tabel 4.46 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1	157
Tabel 4.47 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9	158
Tabel 4.48 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8	160
Tabel 4.49 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7	161
Tabel 4.50 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5	163
Tabel 4.51 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,3	164
Tabel 4.52 Hasil Simulasi PWM dan SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1-0.3 menggunakan frekuensi 20 Hz	165

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pompa sentrifugal: (a) Dengan kecepatan konstan, (b) Dengan adjustable speed drive.	13
Gambar 2.2 Gambar rangkaian ekivalen motor induksi	15
Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen motor induksi	18
Gambar 2.4 Karakteristik torsi-kecepatan motor induksi; V_s dan f konstan pada nilai ratingnya.....	21
Gambar 2.5 Grafik I_r versus f_{sl} ; V_s dan f konstan pada nilai ratingnya.....	22
Gambar 2.6 Proses start motor induksi	22
Gambar 2.7 Karakteristik torsi-kecepatan pada slip rendah dengan ϕ_{ag} konstan dan torsi beban konstan.....	23
Gambar 2.8 Torsi beban sentrifugal; torsi naik dengan kuadrat kecepatan.	24
Gambar 2.9 Frekuensi motor pada waktu pengasutan	25
Gambar 2.10 Diagram fasor dengan nilai f_{sl} yang kecil.....	26
Gambar 2.11 Penguatan tegangan untuk menjaga ϕ_{ag} tetap konstan	27
Gambar 2.12 abc Karakteristik dan kapabilitas motor induksi	28
Gambar 2.13 Konsep Dasar Gelombang Harmonisa Arus	31
Gambar 2.14 Gelombang Distorsi, Fundamental, dan Harmonisa Ketiga.....	32
Gambar 2.15 Pembentukan Fungsi Persegi	33
Gambar 2.16 Hubungan V-I pada Beban Non Linear.....	33
Gambar 2.17 Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus pada Beban Non Linear ...	34
Gambar 2.18 Hubungan V-I Pada Beban Linear	35
Gambar 2.19 Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus pada Beban Linear	35
Gambar 2.20 <i>Three-phase full-wave fully-controlled rectifier</i>	40
Gambar 2.21 <i>Three-phase full-wave fully-controlled rectifier output voltage waveform</i>	40
Gambar 2.22 <i>Thyristor: (a) symbol, (b) i-v characteristics, (c) idealized characteristics</i>	43

Gambar 2.23 An IGBT: (a) symbol, (b) i-v characteristics, (c) idealized characteristics	44
Gambar 2.24 Three-phase PWM waveforms	46
Gambar 2.25 Harmonic spectrum	46
Gambar 2.26 Three-phase inverter; $V_{LL}(\mathbf{rms})/V_d$ as a function of m_a	48
Gambar 2.27 Square-wave inverter (three phase)	49
Gambar 2.28 Rangkaian PWM Inverter tiga fasa	51
Gambar 2.29 Konfigurasi saklar daya inverter tiga fasa tiga lengan	52
Gambar 2.30 Dasar vektor dan sektor switching	53
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian	54
Gambar 3.2 Model mesin induksi pada MATLAB.....	55
Gambar 3.3 Electrical System of the Wound-Rotor or Squirrel-Cage Machine....	56
Gambar 3.4 Blok konfigurasi model mesin induksi MATLAB.....	58
Gambar 3.5 Blok parameter model mesin induksi MATLAB.....	59
Gambar 3.6 RECTRIFIER 3 PHASA FULLY CONTROL 120 °	61
Gambar 3.7 Blok parameter thyristor.....	62
Gambar 3.8 Blok parameter pulse generator.....	63
Gambar 3.9 Gelombang penuh keluaran rectrifier dengan sudut $\alpha = 30^\circ$	64
Gambar 3.10 Model universal bridge inverter (kiri) dan konfigurasi jembatan inverter (kanan)	65
Gambar 3.11 Model universal bridge inverter (kiri) dan konfigurasi jembatan inverter (kanan)	66
Gambar 3.12 Dc Link Converter penghubung rectifier dan inverter	67
Gambar 3.13 Pulse PWM Generator (2-Level).....	67
Gambar 3.14 Blok parameter PWM Generator.....	68
Gambar 3.15 Pulse SVPWM Generator (2 - Level)	69
Gambar 3.16 Blok parameter SVPWM Generator	70
Gambar 4.1 Rangkaian Variable Frequency Drive	73
Gambar 4.2 Tegangan Keluaran Inverter.....	77
Gambar 4.3 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7	77
Gambar 4.4 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	78

Gambar 4.5 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7	79
Gambar 4.6 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	79
Gambar 4.7 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7	80
Gambar 4.8 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	81
Gambar 4.9 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7,5	82
Gambar 4.10 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	82
Gambar 4.11 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 9,1	83
Gambar 4.12 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	84
Gambar 4.13 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 12,4 ..	85
Gambar 4.14 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	85
Gambar 4.15 Tegangan Keluaran Inverter	87
Gambar 4.16 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7,3	87
Gambar 4.17 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	88
Gambar 4.18 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7,1	89
Gambar 4.19 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	89
Gambar 4.20 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7	90
Gambar 4.21 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	91
Gambar 4.22 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7,1	92
Gambar 4.23 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	92
Gambar 4.24 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 8,3	93
Gambar 4.25 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	93
Gambar 4.26 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 11,7 ..	94
Gambar 4.27 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	95
Gambar 4.28 Grafik Perbandingan Rotor Speed PWM dengan SVPWM	97
Gambar 4.29 Grafik Perbandingan T_e PWM dan SVPWM	98
Gambar 4.30 Grafik Perbandingan Slip PWM dan SVPWM	98
Gambar 4.31 Grafik Perbandingan Frekuensi Slip PWM dan SVPWM	99
Gambar 4.32 Grafik Perbandingan THD _i PWM dan SVPWM	99
Gambar 4.33 Tegangan Keluaran Inverter	101
Gambar 4.34 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 8	101
Gambar 4.35 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator	101

Gambar 4.36 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7,9 ..	102
Gambar 4.37 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	103
Gambar 4.38 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7,8 ..	104
Gambar 4.39 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	104
Gambar 4.40 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7,9 ..	105
Gambar 4.41 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	106
Gambar 4.42 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9,2 ..	106
Gambar 4.43 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	107
Gambar 4.44 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 12,1	108
Gambar 4.45 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	108
Gambar 4.46 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 8,6 ..	110
Gambar 4.47 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	110
Gambar 4.48 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 8,2 ..	111
Gambar 4.49 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	112
Gambar 4.50 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7,9 ..	113
Gambar 4.51 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	113
Gambar 4.52 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7,8 ..	114
Gambar 4.53 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	114
Gambar 4.54 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 8,6 ..	115
Gambar 4.55 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	116
Gambar 4.56 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,6	117
Gambar 4.57 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	117
Gambar 4.58 Grafik Perbandingan Rotor Speed PWM dengan SVPWM.....	120
Gambar 4.59 Grafik Perbandingan T_e PWM dan SVPWM	120
Gambar 4.60 Grafik Perbandingan Slip PWM dan SVPWM	121
Gambar 4.61 Grafik Perbandingan Frekuensi Slip PWM dan SVPWM	121
Gambar 4.62 Grafik Perbandingan THDi PWM dan SVPWM	122
Gambar 4.63 Tegangan Keluaran Inverter.....	123
Gambar 4.64 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9,9 ..	124
Gambar 4.65 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	124
Gambar 4.66 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9,3 ..	125

Gambar 4.67 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	126
Gambar 4.68 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9	127
Gambar 4.69 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	127
Gambar 4.70 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 8,8 ..	128
Gambar 4.71 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	129
Gambar 4.72 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9,6 ..	130
Gambar 4.73 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	130
Gambar 4.74 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 12,2	131
Gambar 4.75 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	132
Gambar 4.76 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 10,9	133
Gambar 4.77 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	134
Gambar 4.78 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 10,1	135
Gambar 4.79 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	135
Gambar 4.80 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9,4 ..	136
Gambar 4.81 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	137
Gambar 4.82 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9	138
Gambar 4.83 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	138
Gambar 4.84 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9,1 ..	139
Gambar 4.85 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	140
Gambar 4.86 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,5	141
Gambar 4.87 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	141
Gambar 4.88 Grafik Perbandingan Rotor Speed PWM dengan SVPWM.....	144
Gambar 4.89 Grafik Perbandingan Te PWM dan SVPWM	144
Gambar 4.90 Grafik Perbandingan Slip PWM dan SVPWM	145
Gambar 4.91 Grafik Perbandingan Frekuensi Slip PWM dan SVPWM	145
Gambar 4.92 Grafik Perbandingan THDi PWM dan SVPWM	146
Gambar 4.93 Tegangan Keluaran Inverter.....	147
Gambar 4.94 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 13,8	148
Gambar 4.95 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	148
Gambar 4.96 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 12,7	149
Gambar 4.97 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	150

Gambar 4.98 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,8	151
Gambar 4.99 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	151
Gambar 4.100 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11	152
Gambar 4.101 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	153
Gambar 4.102 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 10,6	154
.....	154
Gambar 4.103 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	154
Gambar 4.104 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 12,2	155
.....	155
Gambar 4.105 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	156
Gambar 4.106 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 15,7	157
.....	157
Gambar 4.107 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	158
Gambar 4.108 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 14,3	159
.....	159
Gambar 4.109 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	159
Gambar 4.110 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 13	160
Gambar 4.111 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	161
Gambar 4.112 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,9	162
.....	162
Gambar 4.113 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	162
Gambar 4.114 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 10,6	163
.....	163
Gambar 4.115 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	164
Gambar 4.116 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,8	164
.....	164
Gambar 4.117 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator	165
Gambar 4.118 Grafik Perbandingan Rotor Speed PWM dengan SVPWM.....	167
Gambar 4.119 Grafik Perbandingan Te PWM dan SVPWM	168
Gambar 4.120 Grafik Perbandingan Slip PWM dan SVPWM	168
Gambar 4.121 Grafik Perbandingan Frekuensi Slip PWM dan SVPWM	169

Gambar 4.122 Grafik Perbandingan THDi PWM dan SVPWM.....169

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor induksi tiga fasa merupakan motor arus bolak-balik yang paling banyak digunakan di perindustrian dan gedung perkantoran karena memiliki beberapa keuntungan antara lain motor ini sederhana, murah dan mudah. Kelemahan dari motor induksi sulit nya mengatur kecepatan karena karakteristik motor itu sifatnya linear .untuk mengimbangi hal tersebut diperlukan peralatan tambahan agar motor induksi dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan para penggunanya. Prinsipnya motor induksi di operasikan pada kecepatan konstan apabila motor induksi diberikan beban yang tidak seimbang dengan kecepatan konstannya maka kecepatan motor induksi akan berubah. Untuk mendapatkan kecepatan konstan serta memperbaiki kinerja motor induksi terhadap perubahan beban, maka dibutuhkan suatu pengaturan kecepatan. Salah satu metode yang umum dilakukan untuk mengatur kecepatan putar motor induksi adalah dengan menggunakan *Variable Frekuensi Drive (VFD)*.

VFD dapat dikendalikan dengan pulse Generator PWM dan SVPWM yang berfungsi mengatur besaran nilai dari frekuensi dan indek modulasi , dengan cara mengontrol dua besaran, yaitu torsi dan kecepatan dengan tujuan untuk menyesuaikan kecepatan putaran dengan yang diinginkan atau dengan persyaratan prosesnya, menyesuaikan torsi dengan persyaratan prosesnya, hemat energi dan meningkatkan efisiensinya. Pengaturan *VFD* merupakan standar yang dibutuhkan secara luas dalam perindustrian dan komersial, seperti hal nya penggunaan pasar

dari *VFD* pada motor induksi diproyeksikan meningkat secara global dalam tahun 2021 - 2029. Sumber (Pune, India, March 24, 2022 GLOBE NEWSWI). Bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan *Variable Frequency Drive* tidak berbentuk gelombang sinusoidal murni, melainkan sebuah rangkaian dari gelombang persegi/kotak yang menghasilkan bentuk gelombang arus yang mendekati sinus.

VFD dapat dikontrol dengan Transistor jenis *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)* yang dihubungkan dengan rangkain *Fully controller Three phase Bridge Rectifier* yang banyak digunakan sebagai peralatan swicthing pada inverter yang mempunyai *carrier frequency* yang merupakan sebuah nilai untuk menyalakan IGBT untuk menghasilkan keluaran dari teknik PWM (*pulse width modulation*) dan SVPWM (*space-vector pulse width modulation*). Dengan menaikkan *carrier frequency* maka bentuk gelombang yang dihasilkan akan lebih baik, kurang lebih mendekati gelombang arus sinusoidal. *Carrier frequency inverter* biasanya berkisar antara 1 kHz sampai 20 kHz.

Dalam tugas akhir ini, yang diinvestigasi dan dibandingkan adalah *VFD* menggunakan kendali Pulse Generator PWM dan kendali Pulse Generator SVPWM dengan membandingkan output masing masing simulasi terhadap motor induksi dengan cara mengubah modulation index dari 1 - 0,3 dan frekuensi 20 Hz – 50 Hz, serta membandingkan nilai output dengan *variable Rotor Speed*, *Electromagnetic Torque*, *Stator Current*, Tegangan, Arus, dan *THD (Total Harmonic Distortion)*. *THD* merupakan nilai persentase antara total komponen harmonisa dengan komponen fundamental. Adanya *THD* yang ditimbulkan berasal dari beban non linear (*VFD*) yang membuat distorsi atau cacat gelombang, Semakin besar persentase *THD* akan menyebabkan semakin besarnya risiko kerusakan peralatan akibat harmonisa yang terjadi pada arus maupun tegangan. Harmoni ini mempengaruhi kinerja motor induksi dan menjadi perhatian karena menimbulkan dampak yang buruk kepada peralatan listrik.

Setelah membandingkan nilai variable output dari masing masing *VFD* yang menggunakan Pulse Generator PWM dan kendali Pulse Generator SVPWM

selanjutnya dengan diperolehnya hasil perbandingan sehingga dapat ditentukan kinerja metode pengendalian mana yang lebih unggul atau optimum digunakan untuk perindustrian atau gedung perkantoran yang menggunakan motor induksi.

Untuk Tugas akhir ini penulis menggunakan software MATLAB Simulink 2018b untuk melakukan percobaan simulasi pada setiap rangkaian *VFD* dengan teknik pulse Generator PWM dan SVPWM..

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang masalah tersebut, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

Bagaimana perbandingan nilai output dengan *variable Rotor Speed* , *Slip*, *Fslip*, Arus stator, dan *THD (Total Harmonic Distortion)* dengan menggunakan rangkaian *Variable Frequency Drives* menggunakan Pulse generator PWM dan SVPWM dengan mengubah frekuensi dan indek modulasi.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan Penelitian ini adalah :

1. Mengetahui perbandingan nilai output dengan *Variable Rotor Speed* , *Slip*, *Fslip*, Arus stator, dan *THD (Total Harmonic Distortion)* dengan menggunakan rangkaian *Variable Frequency Drives* menggunakan Pulse generator PWM dan SVPWM dengan mengubah frekuensi dan modulasi.
2. Mengetahui kinerja metode pengendalian mana yang lebih optimal antara PWM dan SVPWM.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini penulis telah membatasi ruang lingkup pembahasan agar isi dan pembahasan menjadi terarah yaitu sebagai berikut:

1. Skripsi ini hanya dilakukan hingga tahap simulasi, tidak sampai ke realisasi hardware.
2. Software simulasi yang digunakan adalah *Default MATLAB R2018b untuk Pulse generator PWM dan SVPWM*

3. Motor induksi yang digunakan adalah motor induksi 3 fasa default *MATLAB R2018b*
4. Rangkaian *variable frequency drives* yang digunakan hanya membandingkan dengan mengubah modulation index dan frequency dengan nilai masukan yang sama.
5. Tidak membahas gangguan pada motor induksi dan THD.

1.5 Metode Penelitian

- Metode Kepustakaan (*Library*)

Studi Pustaka (*Library Research*) adalah suatu metode pengumpulan data dengan cara membaca dan mempelajari artikel, karya ilmiah, jurnal ilmiah atau sumber lain yang berkaitan dengan tema yang dipilih untuk dijadikan bahan penelitian.

- Perancangan dan Eksperimen

Melakukan perancangan/simulasi dan eksperimen alat sesuai dengan alat yang akan dirancang.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk dapat membahas masalah yang bersifat ilmiah, tentu di perlukan ketelitian dan informasi yang cukup lengkap. Begitu pula dengan pembahasannya di perlukan penyusunan yang sistematis, sehingga para pembaca dapat dengan mudah memahami dan mengerti isi dalam laporan tersebut dan memudahkan pembaca dalam pengambilan keputusan.

Perancangan alat / sistem ini terdiri dari 5 (lima) bab yang secara ringkas dapat diuraikan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas secara singkat tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan , metode penelitian, sistematika penulisan dan table perbandingan jurnal.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini berisikan penelitian terdahulu, teori sistem penggerak motor induksi, harmonisa, fully controlled 3 phase bridge rectifier, thyristor, insulated gate bipolar transistor, pwm inverter tiga fasa, dan svpwm inverter tiga fasa yang diambil dari kutipan buku maupun jurnal yang berkaitan dengan penyusunan tugas akhir.

BAB III PERANCANGAN ALAT DAN SISTEM

Bab ini membahas perancangan alat dan sistem sebagai dasar pembuatan alat yang sedang di buat dari awal sampai akhir. Dan membahas model sistem yang di sajikan dalam diagram alur untuk sistem kerjanya.

BAB IV ANALISA HASIL PENELITIAN

Bab ini membahas analisa hasil penelitian perancangan alat sistem pwm dan svpwm serta mencatat dan membandingkan dengan nilai ouput yang sudah ditetapkan pada tujuan penelitian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menjelaskan apakah perancangan alat yang di buat dapat memecahkan masalah, dan apakah dapat di aplikasikan serta bagaimana cara penerapan dalam skala lebih luas. Saran berupa rekomendasi pengembangan alat dengan menambahkan variable serta membahas masalah aliran daya pada alat. .

1.7 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang dilakukan ini adalah untuk dapat mengetahui perbandingan parameter parameter *output* nilai dari setiap variable frequency drive terhadap motor induksi induksi 3 fasa dengan menggunakan teknik Pulse Gunerator PWM dan SVPWM serta dapat menjadi bahan pertimbangan untuk memilih teknik yang mana yang lebih cocok digunakan untuk industri atau sebagainya.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam penulisan penelitian tugas akhir ini peneliti menggali informasi dari berbagai sumber penelitian-penelitian sebelumnya, referensi buku-buku sebagai bahan perbandingan data, dan mengenai teori atau metode yang berkaitan dengan judul yang digunakan untuk memperoleh landasan teori ilmiah.

Berikut penelitian yang berkaitan dengan Konsep *Variable Frequency Drive*, *PWM*, *SVPWM* yang telah dilakukan sebelumnya, dan kemudian digunakan sebagai referensi dalam penulisan penelitian ini, yaitu :

2.1.1 Performance Analysis of Three-Phase Induction Motor with AC Direct and VFD

Penulis : Kumar_2018_IOP_Conf._Ser._Mater._Sci._Eng._331_012025

Nama Jurnal/*Conference* : *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*

Tahun Terbit : 2018

Pembahasan : Analisis mesin listrik dan perhitungan kinerja adalah aspek yang sangat penting daridesain sistem penggerak yang efisien. Perkembangan perangkat elektronika daya dan konverter daya memberikan kontrol kecepatan Motor Induksi yang mulus dengan mengubah frekuensi suplai input. Konverter ini, di satu sisi menyediakan kontrol kecepatan yang lebih fleksibel yang juga mengarah ke

masalah harmonik dan penyakit terkaitnya seperti torsi berdenyut, arus terdistorsi, dan bentuk gelombang tegangan, peningkatan kerugian, dll. Makalah ini mencakup analisis kinerja tiga motor induksi fasa dengan penggerak langsung AC tiga fasa dan penggerak frekuensi variabel (VFD) . (Kumar, 2018)

2.1.2 Three Phase Inverter Simulation using Sinusoidal PWM Technique

Penulis : Dept. of EE, PEC University of Technology, Chandigarh, India

Nama Jurnal/Conference : An ISO 3297: 2007 Certified Organization/UG Student
Tahun Terbit : 2017

Pembahasan : Makalah ini menyajikan simulasi inverter pensaklaran tegangan tiga fasa pada MATLAB/Simulink menggunakan skema Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM). Gelombang pembawa (segitiga) dibandingkan dengan referensi (gelombang sinus), yang frekuensinya merupakan frekuensi yang diinginkan. Indeks modulasi divariasikan dari 0,4 hingga 1 dengan mengubah amplitudo sinyal modulasi. Fase keluaran dan tegangan saluran diamati dalam ruang lingkup bersama dengan Total Harmonic Distortion (THD) yang bervariasi dengan indeks modulasi. Dalam teknik SPWM, amplitudonya konstan tetapi lebar pulsa bervariasi dengan mengubah siklus kerja untuk setiap periode. Lebar pulsa dimodulasi untuk memberikan sinyal gerbang ke sakelar (IGBT) yang terhubung di inverter. Dengan cara ini tegangan keluaran dikendalikan dan THD juga berkurang secara signifikan dengan peningkatan efisiensi inverter. Metode ini populer digunakan dalam kecepatan pengendalian motor induksi tiga fasa. Beban yang diambil disini adalah beban resistif dan induktif (RL). (Anubha Gupta, 2017)

2.1.3 Perbandingan Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Inverter Pulse Width Modulation (Pwm) Dan Sinusoidal Pulse Width Modulation (Spwm)

Penulis : Adi Subrata Silalahi

Nama Jurnal/Conference : Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Universitas Sumatera Utara

Tahun Terbit : 2020

Pembahasan : Motor induksi atau disebut dengan motor asinkron adalah jenis motor listrik AC yang bekerja berdasarkan induksi pada medan magnet yang berada di antara rotor dan stator. Disebut motor induksi karena motor dapat bekerja bila konduktor rotor terinduksi oleh medan putar magnet pada stator. Disebut motor asinkron karena motor ini bekerja berdasarkan adanya perbedaan antara putaran medan stator dan putaran rotor. Motor induksi sangat banyak digunakan, terutama di industri-industri karena memiliki kelebihan, yaitu konstruksi motor yang sederhana dan kokoh, harga relatif lebih murah, perawatannya lebih mudah dibanding dengan jenis motor lainnya. Disamping kelebihannya itu, ternyata motor induksi tiga fasa juga mempunyai kelemahan yaitu kecepatan putarnya sulit dikendalikan yang mengakibatkan kecepatannya tidak bervariasi. Kecepatan motor induksi tersebut dipengaruhi oleh frekuensi suplai motor dan banyaknya kutub pada motor. Untuk mengendalikan kecepatan motor induksi tersebut dapat dilakukan dengan mengubah frekuensi suplai motor, yang dilakukan menggunakan inverter yang dinamakan dengan Variable Frequency Drive (VFD) atau biasa disebut Variable Speed Drive (VSD). Melakukan metode perbandingan simulasi dengan Matlab antara metode pengendalian kecepatan motor induksi Pulse Width Modulation (PWM) dan Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM). (Adi Subrata Silalahi, 2021).

2.1.4 Design and implementation of Open & Close Loop Speed control of Three Phase Induction Motor Using PI Controller

Penulis : Ibtisam Naveed , Adnan Sabir

Nama Jurnal/Conference : International Journal of Engineering Research and General Science Volume 6, Issue 2, March-April, 2018 ISSN 2091-2730

Tahun Terbit : 2018

Pembahasan : Motor induksi dicirikan oleh dinamika yang kompleks, sangat non-linier dan bervariasi terhadap waktu, dan karenanya kontrol kecepatan adalah

masalah yang menantang di industri. Tujuan dari makalah ini adalah untuk menyajikan kontrol kecepatan induksi tiga fasa motor dengan penggerak frekuensi variabel. Penggerak frekuensi variabel untuk motor induksi dicapai dengan menggunakan SPWM yang memberikan hasil yang lebih baik efisiensi dan kinerja yang lebih tinggi. Kecepatan motor diselidiki baik pada beban tetap dan beban variabel. Selain itu, PI loop tertutup pengontrol dirancang pada beban pengenal berdasarkan perilaku dinamis sinyal kesalahan. Telah ditemukan bahwa dengan merancang PI yang tepat pengontrol arus start motor berkurang secara signifikan. Terlebih lagi pada torsi terukur, kecepatan motor dapat dikontrol secara efisien. PI pengontrol kecepatan tidak membantu mengurangi kinerja dinamis sistem tetapi juga membantu mengurangi kesalahan keadaan tunak, kesalahan sensibilitas, kinerja tinggi, dan respons kecepatan yang halus. Model matematika lengkap dari sistem dijelaskan dan disimulasikan dalam MATLAB/SIMULINK. Hasil simulasi memberikan respons kecepatan yang halus dan kinerja tinggi di bawah berbagai dinamika operasi. (Naveed & Sabir, 2018)

2.1.5 Design of Three Phase Inverter System with LC filter

Penulis : H.M. Sohaib Sajid, M. Bilal Shafi, Nadia Malik, Aoun Muhammad, Asjad Amin

Nama Jurnal/Conference : Electrical Engineering Department, The Islamia University of Bahawalpur, Pakistan

Tahun Terbit : 2020

Pembahasan : Inverter tiga fase sangat penting modul elektronik yang digunakan dalam industri modern. Kebanyakan penggerak motor induksi menggunakan inverter untuk kontrol yang diinginkan keluaran. Inverter juga digunakan di berbagai sektor seperti high tegangan (HV), pemanas, catu daya tak terputus (UPS), penggerak motor induksi, pabrik tekstil, kendaraan listrik, rumah peralatan dan sistem energi. Di antara banyak Pulse Teknik Width Modulation (PWM) yang digunakan dalam variable kecepatan frekuensi drive beberapa langkah modulasi lebar pulsa adalah sederhana untuk perangkat dan teknik PWM populer

yang digunakan di industri hari ini. telah ditetapkan bahwa dengan konstanta parameter loop kontrol ini dan juga penggunaan a reaktor nonlinier, yang induktansinya tergantung pada amplitudo arus inverter, kehilangan energi dalam sakelar inverter meningkat beberapa kali atau harmonic komposisi arus beban memburuk secara signifikan. Di dalam sesuai dengan ini, diusulkan untuk mengubah koefisien tautan proporsional dari loop kontrol ini per amplitude referensi arus inverter. Pada nilai arus beban yang rendah, peningkatan frekuensi modulasi diinginkan. Struktur dari sistem dengan perubahan yang sesuai dalam parameter dari loop kontrol ini dalam kasus menggunakan non-linear reaktor diusulkan. (Sajid et al., 2020)

Tabel 2.1 Relevansi Penelitian Sebelumnya Dengan TA

NO	JUDUL PAPER	NAMA JURNAL/CONFERENCE	TAHUN TERBIT	RELEVANSI DENGAN TA
1	Performance Analysis of Three-Phase Induction Motor with AC Direct and VFD	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering/ Kumar_2018_IOP_Conf._Ser._Mater._Sci._Eng._331_012025	2018	1. Prinsip operasi 3 fasa dan komponen menggunakan Motor Ac dengan mengatur kecepatan menggunakan VFD, serta menampilkan analisis dari motor speed, stator current, electromagnetic torque dan harmonic order. 2. menampilkan sebelum dan sesudah menggunakan Vfd with filter dan without filter untuk Vdc dan Dc Current

NO	JUDUL PAPER	NAMA JURNAL/CONFERENCE	TAHUN TERBIT	RELEVANSI DENGAN TA
2	Three Phase Inverter Simulation using Sinusoidal PWM Technique	An ISO 3297: 2007 Certified Organization/UG Student, Dept. of EE, PEC University of Technology, Chandigarh, India	2017	Menganalisis Tiga fasa Inverter dengan komponen dari IGBT serta membandingkan modulation index dari 0,4 – 1. Serta menyimpulkan output masing masing THD per modulation.
3	Perbandingan Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Inverter Pulse Width Modulation (Pwm) Dan Sinusoidal Pulse Width Modulation (Spwm)	Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara	2021	Membandingkan VFD Motor Induksi Tiga Fasa antara PWM dan SVPWM menggunakan Simulasi MATLAB.

NO	JUDUL PAPER	NAMA JURNAL/CONFERENCE	TAHUN TERBIT	RELEVANSI DENGAN TA
4	Design and implementation of Open & Close Loop Speed control of Three Phase Induction Motor Using PI Controller	International Journal of Engineering Research and General Science Volume 6, Issue 2, March-April, 2018 ISSN 2091-2730, Ibtisam Naveed1 , Adnan Sabir	2018	Menggunakan Inverter Tiga Fasa dengan beban Motor induksi , serta menganalisis output dari Motor induksi dengan variable Speed (Rpm), stator current,electromagnetic torque dan menganalisis THD nya.
5	Design of Three Phase Inverter System with LC filter	978-1-7281-9893-4/20/\$31.00 ©2020 IEEE, H.M. Sohaib Sajid, M. Bilal Shafi, Nadia Malik, Aoun Muhammad, Asjad Amin, Electrical Engineering Department, The Islamia University of Bahawalpur, Pakistan	2020	Pada Diagram Inverter PWM, menambahkan LCL pada setiap Fasa untuk memurnikan gelombang sinus AC.

2.2 Sistem Penggerak Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik (AC) yang paling luas digunakan dan dapat dijumpai dalam setiap aplikasi industri maupun rumah tangga. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus rotor 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 arus stator.

Motor induksi terdiri atas dua bagian utama yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian yang statis atau diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar. Stator merupakan kerangka berbentuk silinder berongga yang tersusun atas lapisan-lapisan baja tipis dengan kumparan stator terdistribusi pada alur-alur disekeliling kerangka silindernya. Kumparan stator sebanyak tiga fasa dilingkarkan dengan jumlah kutub tertentu dan diberi spasi geometri sebesar 120° antara setiap fasanya. Ada dua jenis rotor pada motor induksi, yaitu rotor tipe sangkar dan rotor tipe belitan. (Mohan, Ned, Undeland, Tore M., ROBBINS, 1995)

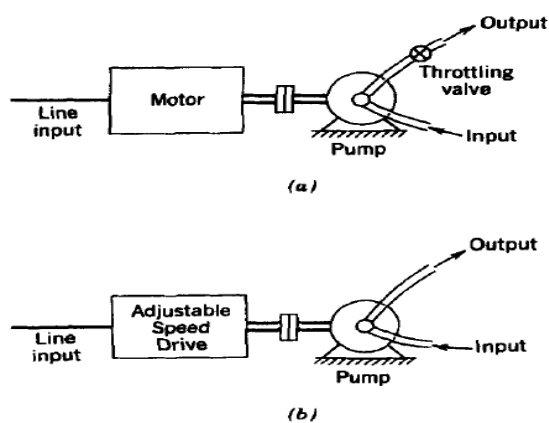
Kategori Motor Induksi :

- **Adjustable Speed Drives (ASD)**

Beberapa contoh aplikasinya antara lain pada kipas (angin), kompresor, system pompa, blower, dan sebagainya.

- **Servo Drives (Motor servo)**

Misalnya pada computer, machine tool, dan robot industri.



Gambar 2.1 Pompa sentrifugal: (a) Dengan kecepatan konstan, (b) Dengan adjustable speed drive.

Motor induksi pada Gambar 2.1 (a), yang menggerakkan pompa sentrifugal dimana motor dan pompa beroperasi pada kecepatan yang hampir konstan. Untuk mengurangi laju aliran katup ditutup sebagian, dan menimbulkan losses yang besar pada katup. Gambar 2.1 (b) kecepatan motor akan diturunkan untuk mendapatkan laju aliran air yang lebih rendah dan menghemat pemakaian energy listrik yang ditarik oleh motor. Penurunan kebutuhan daya ini dapat dihitung dengan persamaan :

$$Torque \cong k_1(speed)^2 \quad 2.1$$

dan oleh karena itu, daya yang dibutuhkan oleh pompa dari motor adalah ;

$$Power \cong k_2(speed)^3 \quad 2.2$$

Saat tegangan sinusoidal tiga fasa dengan frekuensi $f = \omega \pi / 2$ dicatu pada bagian stator, maka akan mengalir arus tiga fasa yang seimbang pada kumparan stator. Arus tersebut akan menghasilkan medan magnet dan fluks yang terus berotasi pada kumparan stator. Fluks pada kumparan stator tersebut akan melalui celah udara antara bagian stator dan bagian rotor dengan amplitudo konstan dan kecepatan rotasi yang juga konstan yang disebut sebagai kecepatan sinkron. Persamaan kecepatan sinkron dapat ditulis sebagai berikut:

$$\omega_s = \frac{2\pi/(p/2)}{1/f} = (2\pi f) = \frac{2}{p}\omega \quad 2.3$$

dengan

ω_s : kecepatan sinkron (rad/s)

p : jumlah kutub pada kumparan stator

f : frekuensi tegangan catu dan arus pada kumparan stator (hertz)

Dalam putaran per menit persamaan kecepatan sinkron dapat dinyatakan sebagai:

$$n_s = 60x \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{p} f \quad 2.4$$

dengan

n_s : kecepatan sinkron (rpm)

p : jumlah kutub pada kumparan stator

f : frekuensi tegangan catu dan arus pada kumparan stator (hertz)

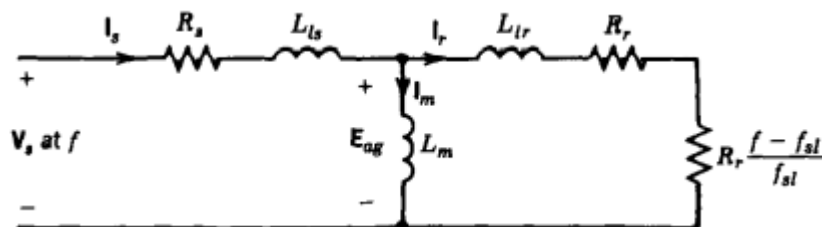
Fluks celah udara ϕ_{ag} (sebagai akibat dari medan magnet putar pada kumparan stator) akan menghasilkan tegangan induksi celah udara E_{ag} pada frekuensi f . Hal ini seperti terlihat pada gambar 2.2 yang merupakan rangkaian ekuivalen motor induksi yang dilihat hanya pada satu fasa saja, dengan R_s merupakan resistansi dan L_{ls} merupakan induktansi bocor dari kumparan stator. komponen arus magnetisasi I_m dari arus stator I_s akan menghasilkan fluks pada celah udara. dari analisis rangkaian magnet, dapat dilihat bahwa

$$N_s \phi_{ag} = L_m I_m \quad 2.5$$

dengan

N_s : jumlah lilitan setiap fasa dari kumparan stator

L_m : induktansi magnetisasi (henry)



Gambar 2.2 Gambar rangkaian ekuivalen motor induksi

Dari hukum Faraday

$$e_{ag} = N_s \frac{d\phi_{ag}}{dt} \quad 2.6$$

dengan fluks celah udara yang terhubung ke kumparan stator $\phi_{ag}(t) = \phi_{ag} \sin \omega t$,

persamaan 2.6 akan menghasilkan :

$$e_{ag} = N_s \omega \phi_{ag} \cos \omega t \quad 2.7$$

dalam nilai akar rata-rata kuadrat menjadi

$$E_{ag} = k f \phi_{ag} \quad 2.8$$

dengan;

k : konstanta

Torsi dari motor induksi dihasilkan dari interaksi antara fluks celah udara dan arus rotor dengan kecepatan putaran rotor yang tidak sama dengan kecepatan putar fluks celah udara. Pada nilai kecepatan putar rotor yang berbeda namun dengan arah putaran yang sama dengan perputaran fluks celah udara, torsi pada rotor dapat dihasilkan. Perbedaan kecepatan putaran fluks celah udara (kecepatan medan putar stator) dan kecepatan putar rotor disebut sebagai kecepatan slip ω_{sl} , yaitu ;

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad \mathbf{2.9}$$

Sedangkan slip s adalah kecepatan slip yang dinormalisasi dengan kecepatan sinkron sehingga dapat ditulis menjadi ;

$$S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad \mathbf{2.10}$$

sehingga kecepatan slip dapat ditulis menjadi;

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r = S\omega_s \quad \mathbf{2.11}$$

Berdasarkan hukum Faraday, tegangan induksi di rangkaian rotor pada frekuensi slip f_{sl} dapat dinyatakan sebagai ;

$$f_{sl} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} f = Sf \quad \mathbf{2.12}$$

Besar dari tegangan induksi E yang diinduksikan ke bagian rotor pada frekuensi slip dapat diperoleh dengan cara yang sama seperti saat memperoleh tegangan induksi pada kumparan stator. dengan nilai fluks celah udara pada bagian rotor yang sama dengan nilai fluks celah udara pada kumparan stator, maka tegangan induksi pada bagian rotor dapat diperoleh dengan mengganti frekuensi f pada persamaan 2.8 dengan frekuensi slip f_{sl} dengan mengasumsikan rotor sangkar terhubung singkat pada ketiga fasanya dengan jumlah lilitan setiap fasanya sama dengan jumlah lilitan pada setiap fasa dari stator maka diperoleh ;

$$E_r = kf_{sl} \phi_{ag} \quad \mathbf{2.13}$$

dengan nilai konstanta k sama dengan nilai konstanta pada persamaan 2.8

Karena pada ujung dari rotor sangkar dihubung singkat dengan menggunakan cincin, maka tegangan induksi pada frekuensi slip juga menghasilkan arus rotor sehingga persamaan tegangan induksi pada frekuensi slip menjadi ;

$$E_r = R_r I_r + j2\pi f_{sl} L_{lr} I_r \quad 2.14$$

dengan

R_r : resistansi pada rotor

L_{lr} : induktansi bocor pada rotor

Arus rotor pada frekuensi slip menghasilkan medan yang berotasi pada kecepatan slip ω_{sl} di rotor, selain itu juga terdapat ω_r yang merupakan kecepatan putar dari rotor. Sehingga pada kecepatan sinkron medan yang berotasi berada pada stator adalah ;

$$\omega_{sl} + \omega_r = \omega_s \quad 2.15$$

Interaksi dari fluks celah udara dan medan yang dihasilkan arus rotor akan menghasilkan torsi elektromagnetik. Rugi daya akibat resistansi pada rotor dapat dituliskan melalui persamaan ;

$$P_r = 3R_r I_r^2 \quad 2.16$$

Dengan mengalikan kedua sisi dari persamaan 2.14 dengan f/f_{sl} dan dengan menggunakan persamaan 2.8 dan 2.13 maka diperoleh ;

$$e_{ag} = \frac{f}{f_{sl}} E = f \frac{R_r}{f_{sl}} I_r + j2\pi f L_{lr} I_r \quad 2.17$$

seperti yang terlihat pada gambar 2.2, dimana fR_r/f_{sl} merupakan penjumlahan dari R_r dan $R_r(f - f)_{sl}/f_{sl}$.

Pada persamaan 2.17 seluruh nilai dari komponen pada rotor dilihat dari sisi kumparan stator. dengan mengalikan persamaan 2.17 dengan I_r^* dan mengambil bagian riil $\text{Re} [E_r, I_r]$ daya yang melewati celah udara, yang biasa disebut daya celah udara P_{ag} adalah ;

$$P_{ag} = 3 \frac{f}{f_{sl}} R_r I_r^2 \quad 2.18$$

Dari persamaan 2.18 dan 2.16, daya elektromekanik P_{em} dapat dituliskan melalui persamaan ;

$$P_{em} = P_{ag} - P_r = 3R_r \frac{f - f_{sl}}{f_{sl}} I_r^2 \quad 2.19$$

dan

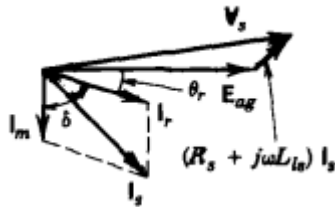
$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} \quad 2.20$$

Dari persamaan 2.9, 2.18, 2.19, dan 2.20 maka diperoleh;

$$T_{em} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad 2.21$$

Arus total I_s pada stator adalah penjumlahan dari arus magnetisasi I_m dan arus rangkaian rotor I_r

$$I_s = I_m + I_r \quad 2.22$$



Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen motor induksi

Diagram fasor dari tegangan dan arus stator ditunjukkan pada Gambar 2.3. Pada gambar tersebut terlihat bahwa arus magnetisasi I_m , yang menghasilkan ϕ_{ag} , tertinggal 90° dari tegangan induksi pada celah udara. Arus I_r , yang bertugas untuk menghasilkan torsi elektromagnetik, tertinggal dari E_{ag} dengan sudut faktor daya θ_r dari rangkaian rotor adalah ;

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{2\pi f_{sl} L_{lr}}{R_r} = \tan^{-1} \frac{2\pi f L_{lr}}{R_r f / f_{sl}} \quad 2.23$$

berdasarkan teori elektromagnetik, torsi yang dihasilkan adalah ;

$$T_{em} = k\phi_{ag} I_r \sin \delta \quad 2.24$$

dimana

$$\delta = 90^\circ + \theta_r \quad 2.25$$

adalah sudut torsi antara arus magnetisasi I_m , yang menghasilkan ϕ_{ag} , dan I_r , yang merepresentasikan medan pada rotor. Persamaan tegangan yang dicatu pada stator V_s untuk setiap fasanya adalah ;

$$V_s = E_{ag} + (R_s + j2\pi f L_{is})I_s \quad 2.26$$

Pada saat nilai frekuensi slip f_{sl} rendah dan motor beroperasi pada keadaan normal dengan desain motor yang juga normal, maka dapat terjadi kondisi berikut ini ;

$$2\pi f_{sl} L_{ir} = R_r \quad 2.27$$

Oleh karena itu, θ_r pada persamaan 2.23 nilainya akan mendekati nol dan sudut torsi δ pada persamaan 2.25 menjadi 90° . Sehingga, persamaan 2.24 dapat diubah menjadi ;

$$T_{em} \cong k \phi_{ag} I_r \quad 2.28$$

Dari persamaan 2.13 dan 2.14, dan dengan menggunakan pendekatan persamaan 2.27 maka diperoleh ;

$$I_r \cong k \phi_{ag} f_{sl} \quad 2.29$$

Dan dengan mengkombinasikan persamaan 2.28 dan 2.29, maka diperoleh ;

$$T_{em} \cong k \phi_{ag}^2 f_{sl} \quad 2.30$$

Dari pendekatan persamaan 2.27 dan dengan memperhatikan hubungan pada persamaan 2.22, maka diperoleh ;

$$I_s \cong \sqrt{I_m^2 + I_r^2} \quad 2.31$$

Untuk parameter motor normal, kecuali pada saat beroperasi pada frekuensi f yang rendah maka persamaan 2.26 dapat diubah menjadi ;

$$V_s = E_{ag} \quad 2.32$$

Dan dengan menggunakan persamaan 2.8 dan persamaan 2.32 maka diperoleh ;

$$V_s = k \phi_{ag} f \quad 2.33$$

Dari persamaan 2.16 dan 2.19 maka akan diperoleh rasio rugi daya pada rotor dengan daya keluaran elektromekanik P_{em} adalah ;

$$\%P_r = \frac{P_r}{P_{em}} = \frac{f_{sl}}{f - f_{sl}} \quad 2.34$$

Tabel 2.2 Persamaan Penting

$$\omega_s = k_7 f$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

$$f_{sl} = s f$$

$$\%P_r = \frac{f_{sl}}{f - f_{sl}}$$

$$V_s \cong k_3 \phi_{ag} f \Rightarrow \frac{V_s}{f} \cong \phi_{ag}$$

$$I_r \cong k_5 \phi_{ag} f_{sl}$$

$$T_{em} \cong k_6 \phi_{ag}^2 f_{sl}$$

$$I_m \cong k_8 \phi_{ag}$$

$$I_s \cong \sqrt{I_m^2 + I_r^2}$$

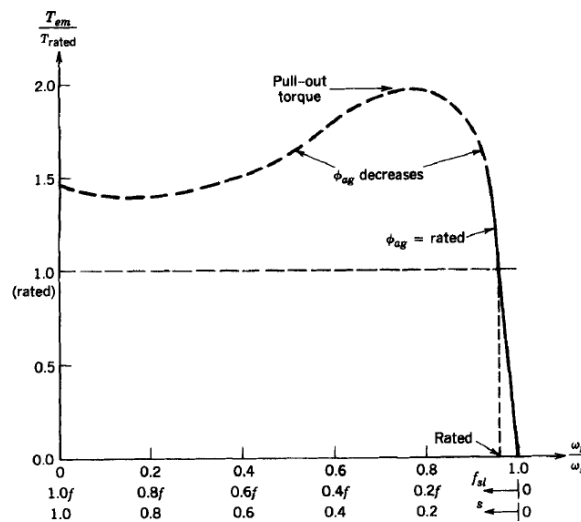
Dari Tabel 2.2 dapat diambil kesimpulan :

1. Kecepatan sinkron dapat diatur dengan mengatur frekuensi (f) daripada tegangan masukan ke stator.
2. Kecuali pada frekuensi yang sangat rendah, persentase rugi daya pada resistansi motor sangat kecil, karena f_{sl} yang kecil. Karena itu, pada kondisi tunak frekuensi slip f_{sl} tidak boleh lebih besar dari nilai ratingnya sebagaimana tertulis pada name plate motor.
3. Dengan f_{sl} yang rendah (kecuali jika frekuensi f sangat rendah), slip “s” kecil dan kecepatan motor berubah mendekati linier terhadap frekuensi f .

4. Agar kemampuan torsi mencapai nilai ratingnya, fluks celah udara ϕ_{ag} harus dijaga konstan pada nilai ratingnya. Maka V_s harus berubah secara proporsional terhadap frekuensi f .
5. Karena I_r proporsional terhadap f_{sl} , untuk mencegah arus stator I_s melampaui nilai ratingnya maka frekuensi slip f_{sl} tidak boleh melebihi nilai ratingnya.
6. Kecepatan motor induksi (ω_r) dapat diatur dengan mengontrol frekuensi tegangan yang diberikan (f), dan fluks celah udara (ϕ_{ag}) harus dijaga konstan pada nilai ratingnya dengan mengontrol besar dari tegangan yang diberikan (V_s) proporsional terhadap frekuensi (f).

2.2.1 Karakteristik Motor Induksi Pada Frekuensi dan Tegangan Rating

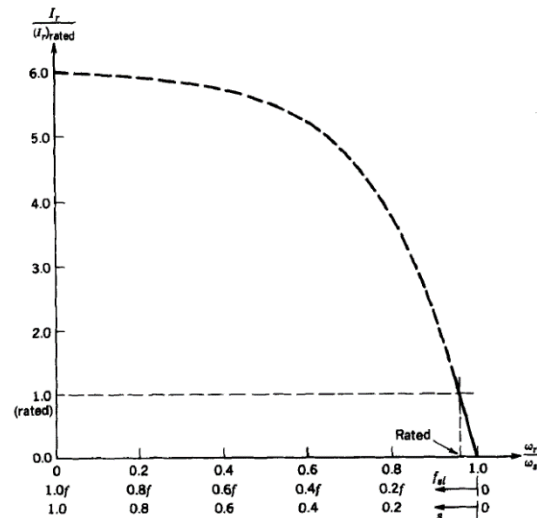
Gambar 2.4 menggambarkan karakteristik dari motor induksi yang bekerja pada frekuensi dan tegangan rating, dimana torsi elektromagnetik T_{em} digambarkan sebagai fungsi dari kecepatan rotor dan frekuensi slip f_{sl} .



Gambar 2.4 Karakteristik torsi-kecepatan motor induksi; V_s dan f konstan pada nilai ratingnya

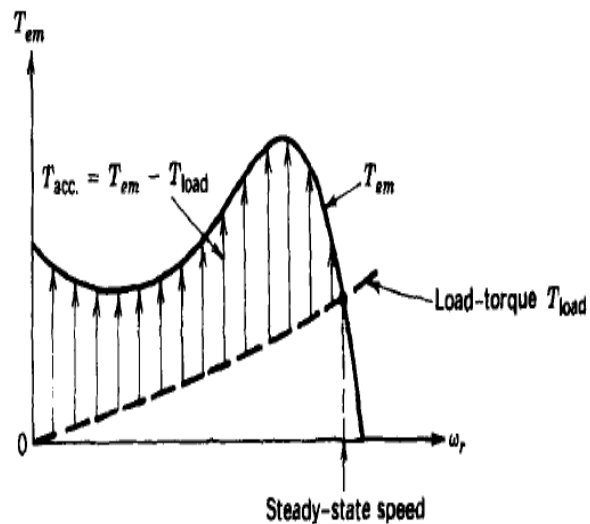
Sedangkan pada gambar 2.5 menggambarkan karakteristik kerja dari motor induksi yang bekerja pada frekuensi dan tegangan rating, dimana arus rotor I_r digambarkan sebagai fungsi dari kecepatan rotor dan frekuensi slip f_{sl} . Saat motor induksi dicatu langsung dari sumber tegangan tanpa menggunakan peralatan

kontrol elektronika daya maka akan dihasilkan arus asut yang lebih besar 6-8 kali dari arus ratingnya, seperti yang terlihat pada gambar 2.5



Gambar 2.5 Grafik I_r versus f_{sl} ; V_s dan f konstan pada nilai ratingnya

Pada saat nilai f_{sl} rendah, T_{em} dan I_r berubah secara linier mengikuti f_{sl} . Saat f_{sl} mulai meningkat, perubahan nilai dari T_{em} dan I_r tidak lagi linier dengan perubahan f_{sl} . f_{sl} dijaga pada nilai yang rendah sehingga bagian berupa garis putus-putus pada gambar 2.4 dan 2.5 tidak dipergunakan.



Gambar 2.6 Proses start motor induksi

Pada gambar 2.6 diperlihatkan torsi percepatan ($T_{em} - T_{load}$) yang diperlukan motor untuk berputar dari keadaan diam, titik operasi motor tercapai pada perpotongan antara kurva karakteristik motor dan kurva beban.

2.2.2 Karakteristik Torsi-Kecepatan

Pada table 2.2 untuk nilai frekuensi slip f_{sl} kecil, dengan menjaga nilai ϕ_{ag} tetap konstan akan menghasilkan hubungan yang linier antara T_{em} dan f_{sl} pada nilai frekuensi f sehingga dapat ditulis ;

$$T_{em} \cong k f_{sl} \quad 2.35$$

Persamaan 2.35 merepresentasikan hubungan karakteristik torsi-kecepatan seperti yang dilukiskan pada gambar 2.4

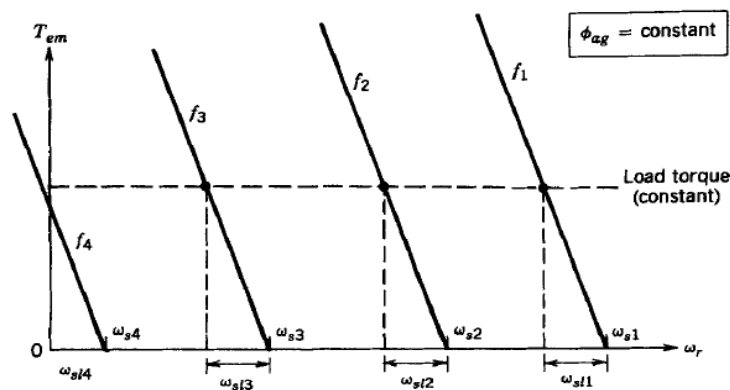
Dengan perubahan nilai frekuensi f , maka persamaan T_{em} lebih mudah dinyatakan sebagai fungsi dari kecepatan slip ω_{sl} . Berdasarkan persamaan 2.3 dan 2.12 maka akan diperoleh persamaan;

$$\omega_{sl} = \frac{f_{sl}}{f} \omega_s = \frac{4\pi}{p} f_{sl} \quad 2.36$$

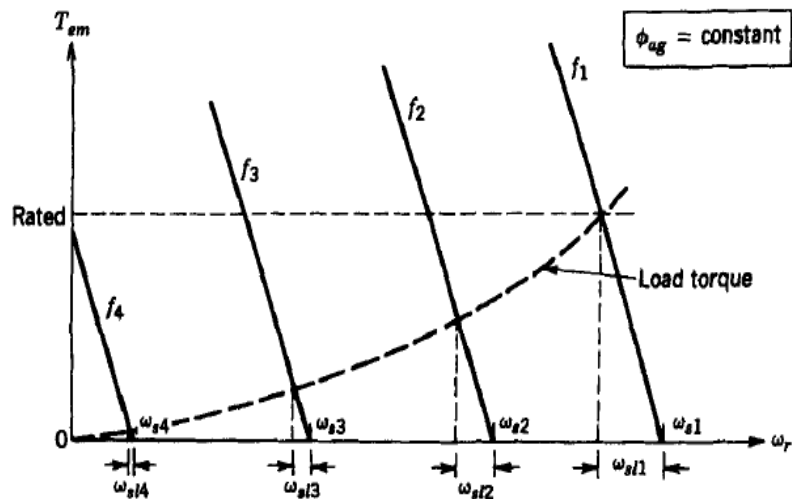
Dan dari persamaan 2.35 dan 2.36 maka didapatkan persamaan;

$$T \cong k \omega_{sl} \quad 2.37$$

Karakteristik hubungan antara torsi dan kecepatan dapat dilihat pada gambar 2.7, dimana saat frekuensi sama dengan f_1 , kecepatan sinkron adalah ω_{s1}



Gambar 2.7 Karakteristik torsi-kecepatan pada slip rendah dengan ϕ_{ag} konstan dan torsi beban konstan.



Gambar 2.8 Torsi beban sentrifugal; torsi naik dengan kuadrat kecepatan.

Pada gambar 2.8 juga dapat dilihat karakteristik torsi-kecepatan yang bergeser horizontal dan sejajar untuk empat nilai dari frekuensi f . Untuk menjelaskan ini, perhatikan frekuensi f_1 dan f_2 . Kecepatan sinkron ω_{s1} dan ω_{s2} sebanding dengan frekuensi f_1 dan f_2 . Jika torsi beban yang sama diberikan pada kedua frekuensi tersebut, maka $\omega_{sl1} = \omega_{sl2}$ berdasarkan persamaan 2.37. Oleh karena itu, pada bidang torsi-kecepatan pada gambar 2.8, torsi yang sama dan kecepatan slip yang sama pada frekuensi f_1 dan f_2 menghasilkan kecepatan yang sejajar namun bergeser secara horizontal.

Pada torsi beban yang konstan, frekuensi slip (yang merupakan frekuensi dari tegangan dan arus pada rangkaian rotor) adalah konstan, namun dari persamaan 2.12 nilai slip s akan bertambah dengan berkurangnya nilai frekuensi f . Berdasarkan persamaan 2.34, presentase rugi daya pada rotor akan meningkat saat nilai frekuensi f turun untuk mengurangi kecepatan motor. Pada gambar 2.8 f_{sl} akan menurun mengikuti frekuensi oleh karena itu rugi rugi rotor akan tetap kecil.

2.2.3 Pengasutan (*Starting*) Motor Induksi

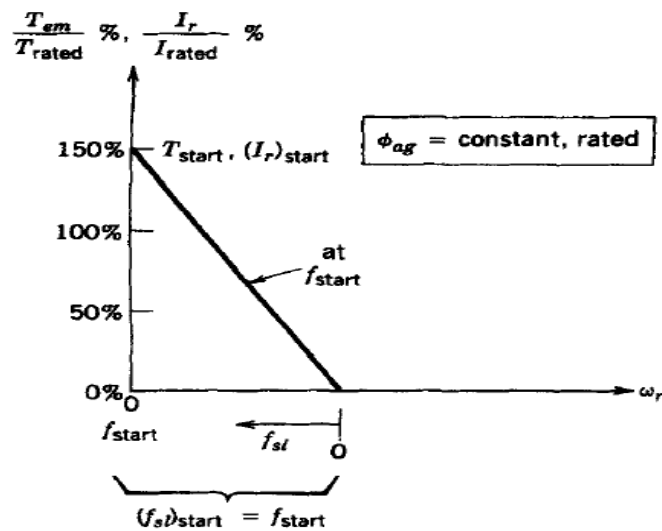
Harus dijaga agar pada waktu pengasutan arus yang ditarik tidak menjadi terlalu besar. Untuk ϕ_{ag} konstan dari persamaan 2.29

$$I_r \cong k f_{sl}$$

2. 38

Pada gambar 2.9 ditunjukkan bagaimana motor dapat diasut (*distart*) pada frekuensi yang rendah ($f = f_{start}$).

karena pada waktu pengasutan $f_{sl} = f_{start}$, maka I_r dapat dibatasi dengan memilih f_{start} yang tepat. Dengan I_m konstan (ϕ_{ag} konstan) maka arus stator I_s dapat dibatasi.



Gambar 2.9 Frekuensi motor pada waktu pengasutan

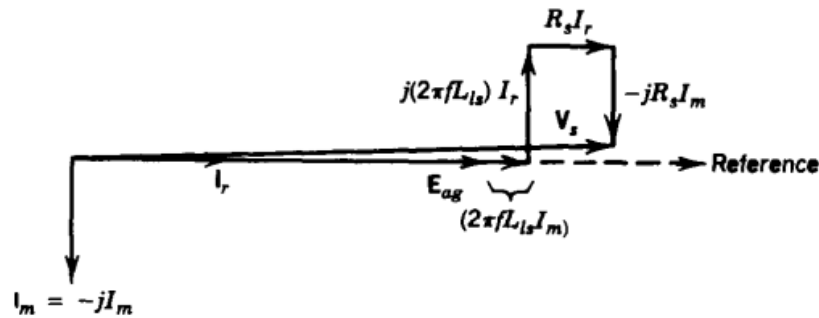
2.2.4 Penguatan Tegangan pada Frekuensi Rendah

Pengaruh dari resistansi stator R_s pada saat motor induksi beroperasi pada frekuensi yang sangat rendah tidak bisa diabaikan, meskipun nilai dari frekuensi slip kecil. Pada desain motor induksi yang umum, $2\pi f L_{lr}$ dapat diabaikan jika dibandingkan dengan $R_r (f/f_{sl})$ pada rangkaian ekivalen gambar 2.2.

Oleh karena itu, arus rotor I_r akan sefasa dengan E_{ag} . Dengan menggunakan E_{ag} sebagai fasor acuan, $I_s = I_r - jI_m$. Sehingga persamaan 2.26 dapat ditulis menjadi :

$$V_s \cong [E_{ag} + (2\pi f L_{is})I_m + R_s I_r] + j[2\pi f L_{is}) I_r - R_s I_m] \quad 2. 39$$

Diagram fasor dari persamaan 2.38 dapat dilihat pada gambar 2.10



Gambar 2.10 Diagram fasor dengan nilai f_{sl} yang kecil

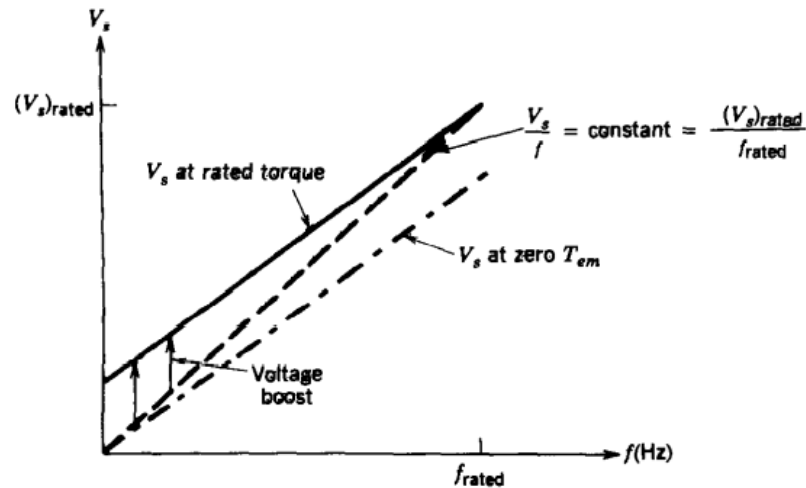
Pada gambar 2.10 pengaruh nilai imajiner dapat diabaikan karena hampir tegak lurus dengan V_s , sehingga persamaan 2.38 dapat diubah menjadi :

$$V_s \cong E_{ag} + (2\pi f L_{ls}) I_m + R_s I_r \quad 2.40$$

Jika ϕ_{ag} dijaga konstan, E_{ag} akan berubah secara linier terhadap f . Jika ϕ_{ag} dijaga konstan, I_m juga akan konstan. Oleh karena itu, tegangan tambahan diperlukan sebagai akibat dari Lls pada persamaan 2.40 yang sebanding dengan frekuensi operasi f . Dengan demikian, untuk ϕ_{ag} yang konstan persamaan 2.40 dapat ditulis menjadi ;

$$V_s \cong kf + R_s I_r \quad 2.41$$

Persamaan 2.41 menunjukkan bahwa diperlukan tegangan tambahan untuk mengkompensasi jatuh tegangan pada R_s sehingga ϕ_{ag} dapat tetap konstan, dimana nilai dari ϕ_{ag} tidak bergantung pada f tetapi bergantung pada I_r , dan I_r sebanding dengan torsi T_{em} , maka tegangan terminal V_s diperlukan untuk menjaga agar ϕ_{ag} tetap konstan pada torsi ratingnya sebagaimana terlihat pada gambar 2.11

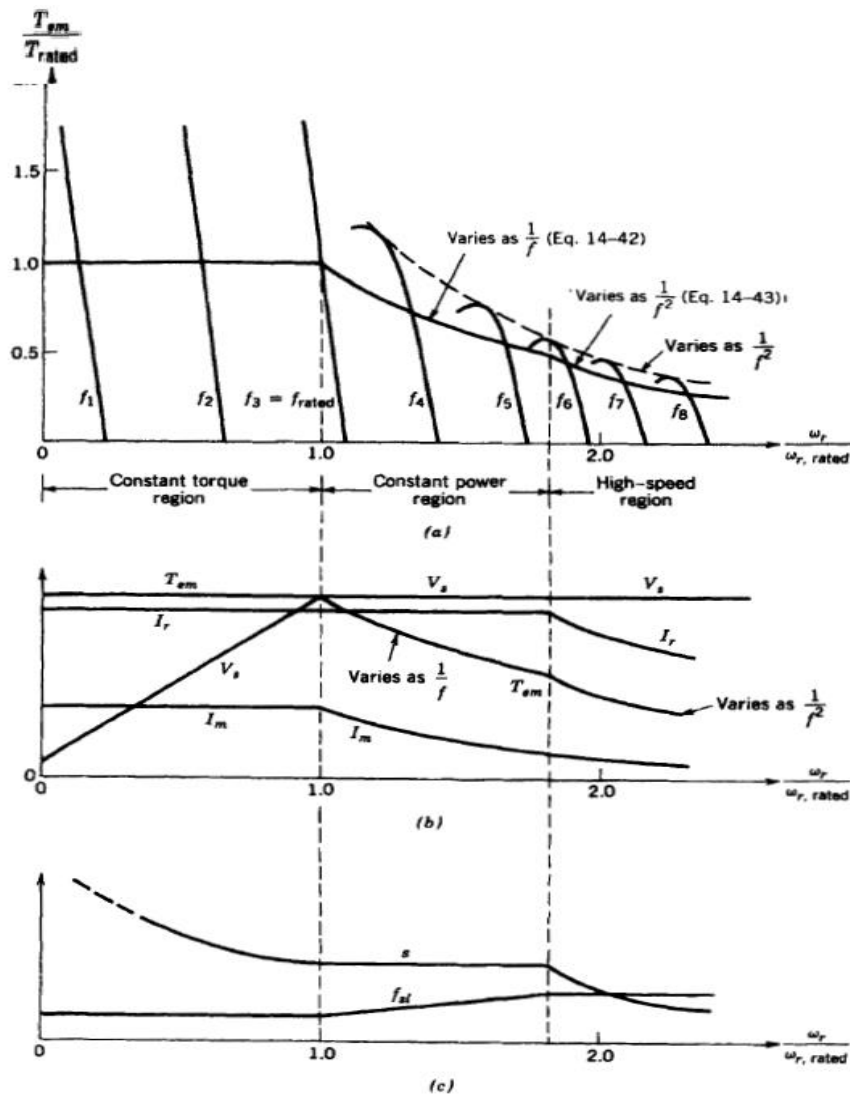


Gambar 2.11 Penguatan tegangan untuk menjaga ϕ_{ag} tetap konstan

Pada gambar 2.11 dapat terlihat dengan jelas bahwa untuk mendapatkan ϕ_{ag} yang konstan pada frekuensi yang rendah diperlukan peningkatan tegangan (*voltage boost*) yang lebih besar untuk menghindari akibat dari jatuh tegangan pada R_s . Sedangkan pada nilai frekuensi yang besar, nilai jatuh tegangan pada R_s dapat diabaikan jika dibandingkan dengan tegangan pada celah udara E_{ag} .

2.2.5 Daerah Kecepatan Motor Induksi

Kontrol kecepatan motor induksi dengan mengubah frekuensi (dan tegangan) menyebabkan motor dapat beroperasi tidak hanya dibawah kecepatan ratingnya tetapi juga diatas kecepatan ratingnya. Hal ini sangat menguntungkan untuk berbagai aplikasi karena motor induksi umumnya mempunyai konstruksi yang kokoh dan kecepatan putarannya dapat dioperasikan dua kali dari kecepatan ratingnya tanpa terjadinya masalah mekanik. namun, kemampuan daya dan torsi sebagai fungsi dari kecepatan rotor perlu dibangun. Karakteristik torsi-kecepatan motor induksi diperlihatkan pada gambar 2. 12 (a) . Pada gambar 2.12 (b), V_s , I_r , I_m , T_{em} diplot sebagai fungsi dari kecepatan. Sedangkan f_{sl} dan s diplot pada gambar 2.12 (c). Perlu diperhatikan bahwa pada motor yang besar, pada batas kemampuannya, $I_s \cong I_r$ disebabkan kontribusi I_m kepada I_s sangatlah kecil.



Gambar 2.12 abc Karakteristik dan kapabilitas motor induksi

2.2.6 Kecepatan di Bawah Rating : Daerah Torsi konstan

Daerah torsi konstan adalah daerah dimana motor induksi beroperasi dengan nilai frekuensi dibawah rating seperti yang terlihat pada gambar 2.12 (a). Pada daerah kecepatan rendah ini, nilai frekuensi slip f_{sl} rendah dan konstan, seperti ditunjukkan pada gambar 2.12 (c). Pengaturan pengoperasian motor induksi pada daerah ini dapat dilakukan dengan cara mengatur nilai tegangan stator V_s dan nilai frekuensi dari tegangan stator. Tegangan stator akan turun sebanding dengan penurunan nilai frekuensi dari nilai ratingnya sampai dengan nilai yang sangat rendah seperti terlihat pada gambar 2.12. Hal ini dilakukan untuk mempertahankan

nilai ϕ_{ag} agar tetap konstan. Jika ϕ_{ag} tetap konstan, maka motor dapat menghasilkan torsi ratingnya dengan arus rating pada nilai f_{sl} yang konstan. Oleh karena itu daerah ini disebut sebagai daerah torsi konstan.

Pada daerah torsi konstan, rugi daya $P_r = 3R_r I_r^2$ pada resistansi rotor juga konstan karena I_r tetap konstan. Meskipun demikian, pada prakteknya panas yang terjadi pada rotor akibat P_r menjadi sebuah masalah pada pengopersian motor induksi dengan kecepatan rendah.

2.2.7 Kecepatan Lebih Dari Rating : Daerah Daya Konstan

Dengan menaikkan frekuensi stator diatas nilai ratingnya, maka motor induksi dapat beroperasi diatas kecepatan ratingnya. Pada kebanyakan aplikasi penggerak kecepatan bervariasi, tegangan motor tidak dapat melebihi nilai nominalnya (ratingnya). Oleh karena itu, dengan menaikkan nilai frekuensi dan menjaga nilai V_s tetap konstan maka akan terjadi penurunan dari nilai ϕ_{ag} ($\phi_{ag} = V_s / f$). Sehingga pada daerah ini berlaku persamaan :

$$T_{em} \cong \frac{k}{f^2} \omega_{sl} \quad 2.42$$

Dari persamaan 2.42 akan dihasilkan kurva torsi-kecepatan dengan kemiringan yang sebanding dengan $\frac{1}{f^2}$ seperti yang terlihat pada gambar 2.12 (a) untuk frekuensi yang lebih tinggi. Pada batas dari kemampuan motor didaerah ini, I_r sama dengan nilai ratingnya seperti terlihat pada daerah operasi sebelumnya. Hal ini sesuai dengan $s = \frac{f_{sl}}{f}$ yang konstan pada daerah ini, yang dapat ditunjukkan dengan menggunakan persamaan 2.3, 2.30, dan 2.33 sehingga didapat :

$$I_r \cong k \frac{f_{sl}}{f} \cong ks = \text{konstan} \quad 2.43$$

Frekuensi slip f_{sl} pada daerah ini akan meningkat dengan f seperti yang terlihat pada gambar 2.12 (c). Pada saat slip konstan :

$$\omega_r \cong (1 - s) \omega_s \cong kf \quad 2.44$$

Dengan V_s dan $s = \frac{f_{sl}}{f}$ yang konstan, maka torsi maksimum pada daerah ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.30 dan 2.32 yang dalam bentuk torsi rating dan frekuensi rating adalah :

$$T_{em,max} = \frac{f_{rated}}{f} T_{rated} \quad 2.45$$

Karena $P_{em,max} = \omega_r T_{em,max}$ maka daya pada daerah ini dapat dianggap konstan pada nilai ratingnya, dan ω_r sebanding dengan f .

Pada prakteknya, motor dapat menarik daya yang lebih besar dari daya ratingnya dengan catatan bahwa:

- I_m turun sebagai akibat penurunan ϕ_{ag} dan kemudian I_s sama dengan nilai ratingnya, sehingga memungkinkan I_r bernilai lebih besar serta daya dan torsi lebih tinggi.
- Karena I_m menurun, rugi pada inti juga berkurang dan pada saat yang bersamaan terjadi pendinginan yang lebih baik pada saat kecepatan yang lebih tinggi.

2.2.8 Operasi Pada Kecepatan Tinggi : Daerah f_{sl} Konstan

Dengan V_s yang sama dengan nilai ratingnya, kecepatan yang lebih tinggi dengan kisaran 1,5 – 2 kali dari kecepatan rating tergantung pada disain motor, ϕ_{ag} menurun dengan cepatnya mencapai torsi keluaran maksimumnya seperti yang terlihat pada gambar 2.12 (a). Pada kecepatan yang lebih tinggi, motor hanya dapat memberikan torsi keluaran maksimum yang tertentu seperti terlihat pada gambar 2.12 (a) dan ω_{sl} (f_{sl}) menjadi konstan. Oleh karena itu, kemampuan torsi dapat ditulis sebagai berikut :

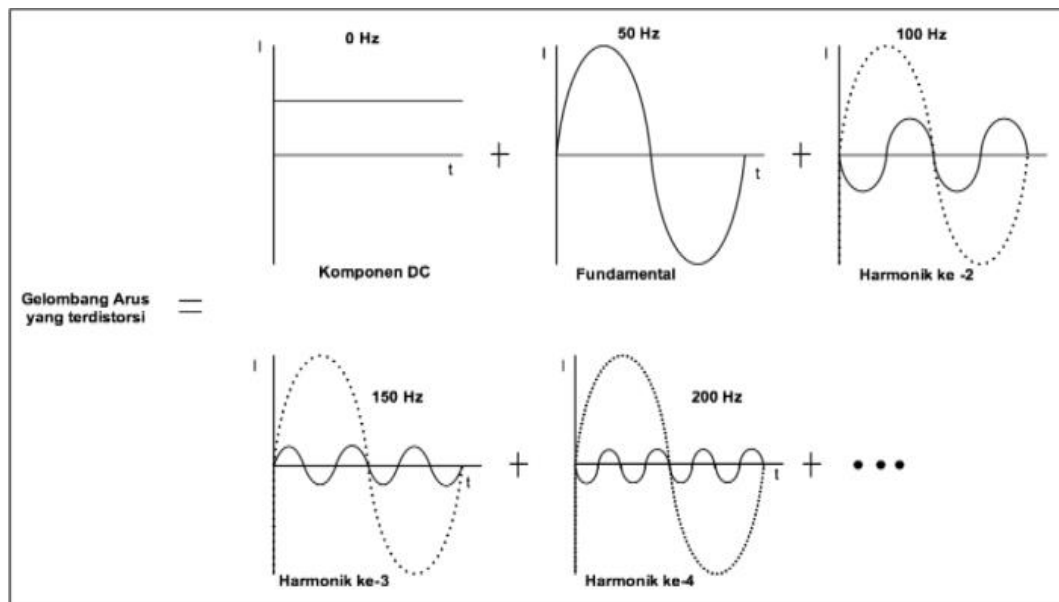
$$T_{em,max} = k \frac{1}{f^2} \quad 2.46$$

Dengan menjaga V_s konstan, torsi motor dalam daerah ini tidak dibatasi oleh kemampuan menanggulangi arus motor tetapi lebih dibatasi oleh kemampuan, motor untuk menghasilkan torsi maksimum karena arusnya lebih kecil dari nilai ratingnya. (Mohan, Ned, Undeland, Tore M., ROBBINS, 1995).

2.3 Harmonisa

Salah satu karakteristik dari mutu listrik (power quality) pada kondisi steady adalah harmonisa (harmonic). Harmonisa adalah suatu fenomena dimana gelombang sinusoidal dalam satu periode memiliki frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental yang diakibatkan dari adanya beban yang tidak linier (non linier) sehingga membuat gelombang yang terbentuk menjadi tidak sinusoidal murni. Arti kelipatan dari frekuensi fundamentalnya dapat dicontohkan sebagai berikut.

- Frekuensi fundamental = 50 Hz
- Harmonisa ke-3 = $50 \times 3 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$
- Harmonisa ke-5 = $50 \times 5 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$, dan seterusnya.



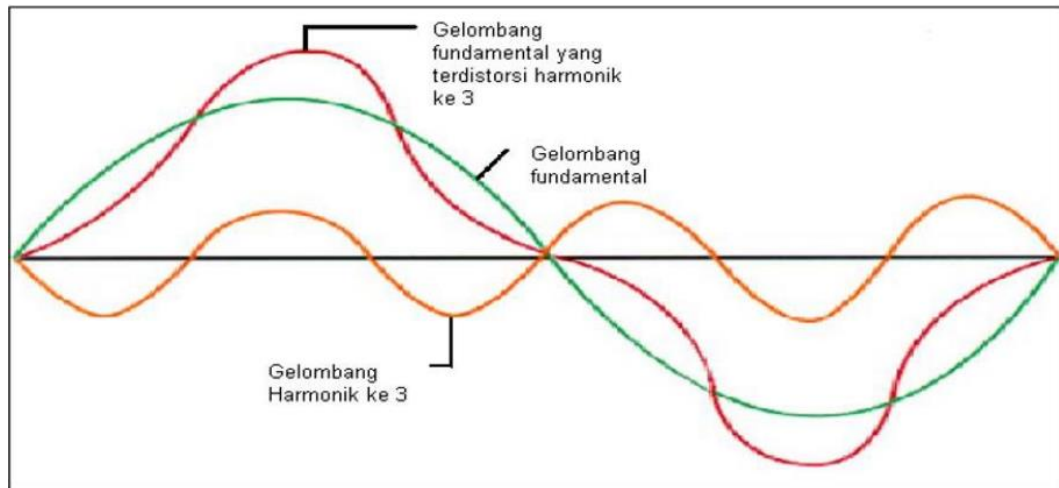
Gambar 2.13 Konsep Dasar Gelombang Harmonisa Arus

Keterangan :

- 0 Hz ialah gelombang arus DC
- 50 Hz ialah gelombang arus fundamental dengan frekuensi 50 Hz.

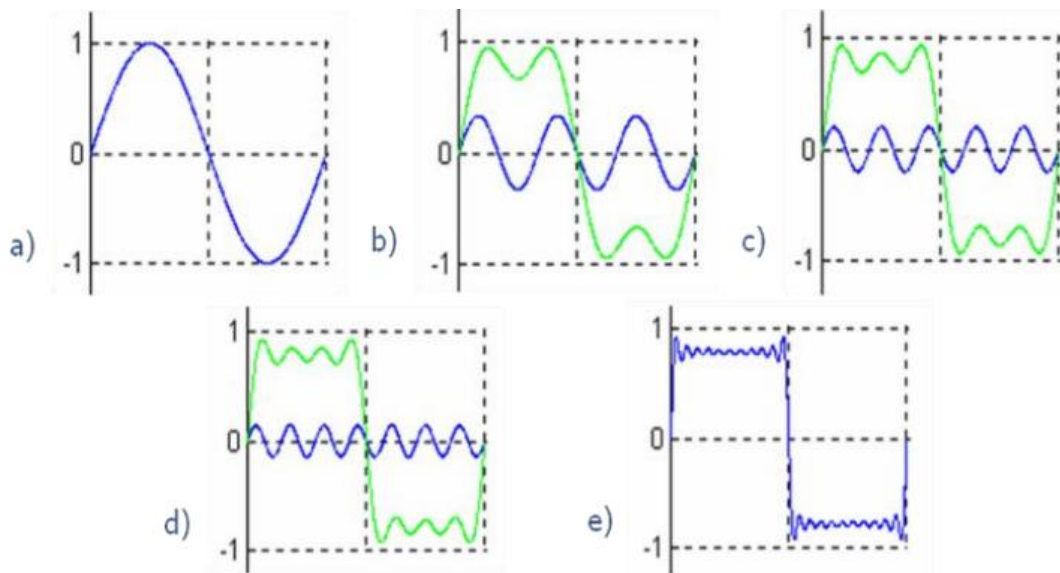
c. 100 Hz ialah gelombang harmonisa arus kedua sebesar 100 Hz dan arus fundamentalnya.

d. 150 Hz ialah gelombang harmonisa arus ketiga sebesar 150 Hz dan arus fundamentalnya.



Gambar 2.14 Gelombang Distorsi, Fundamental, dan Harmonisa Ketiga

Berdasarkan gambar 2.14 dapat diketahui bahwa gelombang harmonisa yang terjadi akan menimbulkan distorsi gelombang sehingga dapat dikatakan gelombang distorsi merupakan penjumlahan dari gelombang fundamental dan gelombang harmonisa.

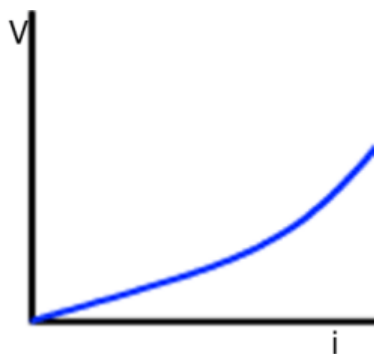


Gambar 2.15 Pembentukan Fungsi Persegi

Berdasarkan gambar 2.15 dapat dikatakan bahwa semakin banyak harmonisa yang terjadi maka bentuk gelombang akan semakin menyimpang dari bentuk sinusoidal yang mana terlihat pada gambar 2.15 harmonisa yang terjadi membuat kurva menjadi berbentuk persegi. (Rusli.2010)

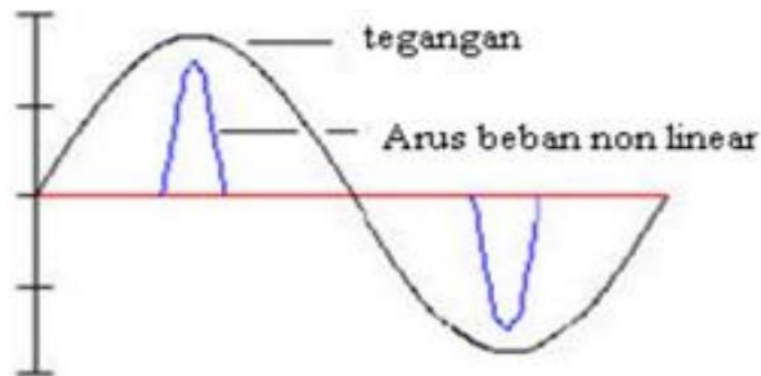
2.3.1 Beban Non Linear

Beban non linear ialah beban yang membuat gelombang masukan arus ataupun gelombang tegangan menjadi tidak sebanding setiap setengah siklus, sehingga dapat dikatakan gelombang tersebut mengalami distorsi. Gambar 2.16 merupakan gelombang non linear arus dan tegangan. (Rusli, 2010)



Gambar 2.16 Hubungan V-I pada Beban Non Linear

Sedangkan gambar 2.17 adalah gelombang tegangan dan gelombang arus pada beban non linear.



Gambar 2.17 Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus pada Beban Non Linear

Berdasarkan gambar 2.17 dapat dilihat bahwa beban non linier dibagi menjadi tiga kelompok yaitu :

- a. Peralatan ferromagnetik, seperti : transformator, motor induksi, ballast dan lain – lain.
- b. Peralatan dengan busur api listrik (arcing devices), seperti : lampu fluoresens, televisi, monitor dan lain – lain.
- c. Peralatan konverter elektronik seperti : penyearah (rectifier), ballast elektronik, invereter, variable speed drive dan lain-lain.

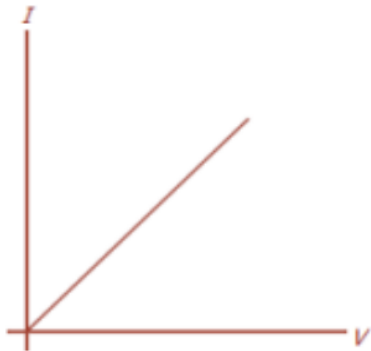
Jika beban bersifat tidak linear maka akan terdapat arus fasa yang dipengaruhi harmonisa, sehingga dapat dikatakan arus pada kawat netral tidak nol meskipun dalam keadaan beban seimbang.

$$I_R + I_S + I_T \neq 0.$$

2.3.2 Beban Linear

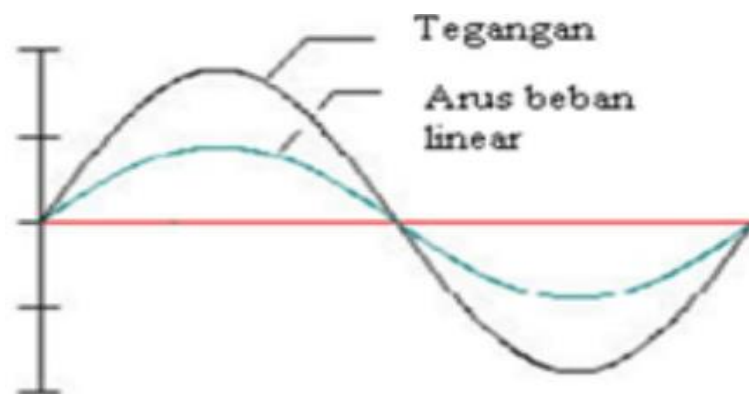
Beban yang menghasilkan bentuk keluaran gelombang arus dan gelombang tegangan yang linear. Beban itu tidak menarik gelombang arus yang non sinusoidal pada saat beban tersebut dipasok oleh sumber tegangan sinusoidal sehingga arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Beberapa

contoh dari beban linear ialah lampu pijar, pemanas dan resistor. Berikut gambar kurva beban linier.



Gambar 2.18 Hubungan V-I Pada Beban Linear

Sedangkan gambar 2.19 adalah gelombang arus dan gelombang tegangan dalam keadaan linear.



Gambar 2.19 Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus pada Beban Linear

Pada beban seimbang beban linear, maka nilai arus setiap fasa bernilai sama dengan beda sudut fasa sebesar 120° . Sehingga arus di kawat netral sama dengan nol. (Juliano, 2019)

2.3.3 Distorsi Harmonisa

Distorsi harmonisa adalah setiap perubahan dalam bentuk sinyal yang tidak disengaja dan secara umum keberadaannya tidak diinginkan pada sistem. Harmonisa merupakan salah satu hal yang dapat menyebabkan distorsi pada bentuk gelombang fundamental tegangan dan arus. Fenomena ini timbul akibat pengaruh

dari karakteristik beban non linier yang dimodelkan sebagai suatu sumber arus yang menginjeksikan arus harmonisa kedalam sistem tenaga listrik.(Yani, 2019)

Arus yang terdistorsi dinyatakan dalam THD (Total Harmonic Distortion). Total Harmonic Distortion yang merupakan parameter untuk menyatakan tingkat harmonisa yaitu sebagai nilai rms dari harmonisa dengan orde diatas fundamental dibagi dengan nilai rms harmonisa fundamental, komponen DC diabaikan.

Besar THD (Total Harmonic Distortion) dinyatakan dengan rumus berikut (IEEE Std. C57.110-2008 , 2008).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100 \%$$

Dimana :

THD_V = Total Harmonic Distortion tegangan (%)

V_n = Nilai RMS tegangan atau arus harmonisa ke-n

V_1 = Nilai RMS tegangan atau arus pada frekuensi fundamental

Total Harmonic Distortion (THD) adalah perbandingan RMS komponen harmonisa terhadap komponen fundamental yang dinyatakan dalam persen (%). Indeks tersebut menunjukkan penyimpangan yang terjadi pada gelombang sinusoidal murni akibat adanya harmonisa. Apabila THD adalah nol maka dalam satu gelombang arus berbentuk sinusoidal sempurna pada frekuensi dasar (fundamental).

Pembatasan distorsi harmonisa beban-beban listrik merupakan salah satu cara untuk menjaga THD system distribusi pada batas yang dianggap aman. IEEE Std. 519-2014 merekomendasikan pembatasan Total Demand Distortion (TDD) untuk konsumen listrik berdasar perbandingan arus beban (IL) terhadap maksimum arus hubung singkat (ISC 3 fase) point common coupling (PCC). Semakin kecil nilai perbandingan maka semakin besar nilai batasan distorsi harmonisanya terhadap maximum demand load current.

Adapun *TDD* (*Total Demand Distortion*) adalah distorsi harmonisa arus total yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I^2 n}}{I_L} \times 100 \%$$

Distorsi arus didefinisikan sebagai hubungan antara total harmonisa arus dan total arus dasar (fundamental). Sama seperti sebelumnya, indeks untuk mengukur level distorsi harmonisa juga dapat dikenal sebagai Harmonic Distortion Factor. Besarnya Total Harmonic Distortion (THD) untuk arus dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I^2 n}}{I_1} \times 100 \%$$

2.3.4 Orde Harmonisa

Suatu perbandingan frekuensi harmonisa terhadap frekuensi fundamental dapat disebut sebagai orde harmonisa yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$n = \frac{fn}{f}$$

Dimana :

n = Orde harmonisa

fn = Frekuensi harmonisa ke-n

f = Frekuensi dasar Frekuensi fundamental tidak dianggap sebagai harmonisa, namun gelombang harmonisa dapat diketahui dari gelombang harmonisa dari orde ke-2 sampai orde ke-n.

2.3.5 Sumber – Sumber Harmonisa

- Automatic/Variable speed drive (ASD)
- DC drive
- Power rectifier

- Printer
- AC
- Komputer, dan lain - lain

2.3.6 Standar Harmonisa

Adapun standar yang mengatur mengenai harmonisa adalah standar IEEE 519-2014. Batas maksimum distorsi harmonisa tegangan dapat diketahui pada tabel 2.2 dibawah ini. (IEEE, 2014)

Tabel 2.3 Batas Distorsi Harmonisa Tegangan Menurut IEEE Std. 519-2014

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV $< V \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV $< V \leq 161$ kV	1.5	2.5
161 kV $< V$	1.0	1.5 ^a

Sumber : IEEE Std. 519-2014

Standar IEEE 519-2014 mengatur mengenai batasan harmonisa yang diijinkan didalam suatu sistem. Sedangkan batas THD arus (ITHD) yang direkomendasikan bagi pelanggan dengan sistem tegangan 120 V sampai 69 KV disesuaikan dengan short circuit ratio (rasio hubung singkat) seperti pada tabel 2.2 dibawah ini.

Tabel 2.4 Batas Distorsi Arus dengan Sistem Tegangan 120 V-69 KV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

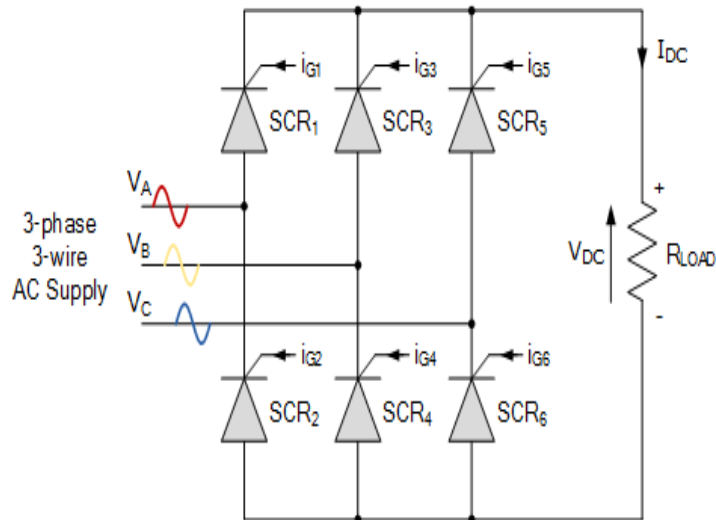
Sumber : IEEE Std. 519-2014

Berdasarkan Standar IEEE 519-2014 batasan harmonisa tegangan dan arus yang ditunjukkan pada tabel diatas, tergantung pada beberapa variabel sebagai berikut :

- *PCC* : Point of Common Coupling. Suatu titik dalam sistem di mana pelanggan dihubungkan.
- *I_{SC}* : Arus hubung singkat (short circuit) pada PCC
- *I_L* : Arus beban maksimum
- *THD* : Total Harmonic Distortion tegangan dan arus yang mengandung harmonisa tegangan dan arus yang diukur berdasarkan rasio RMS harmonisa tegangan dan arus terhadap tegangan dan arus fundamentalnya.
- *TDD* : Total Demand Distortion rasio harga RMS harmonisa arus terhadap arus beban maksimum.

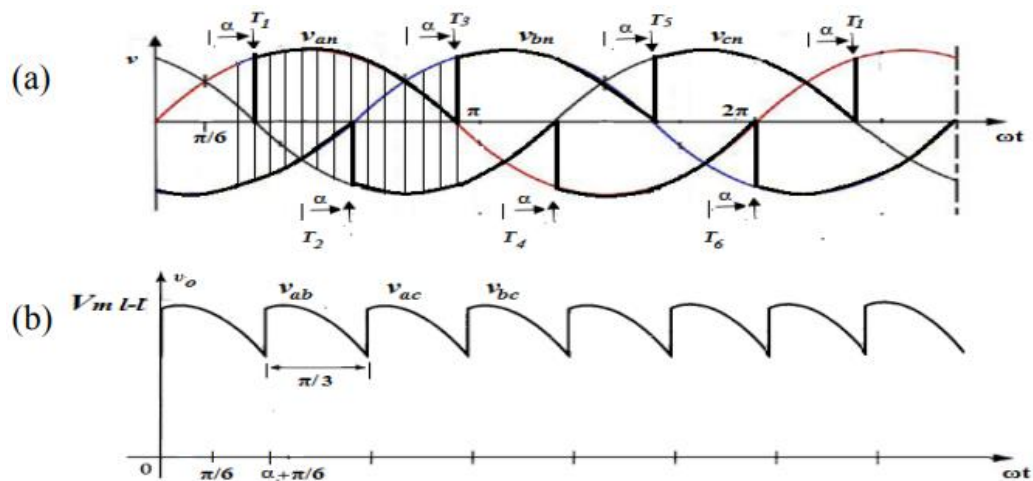
2.4 Fully-controlled 3-phase Bridge Rectifier

Konverter gelombang penuh tiga fase adalah penyearah jembatan yang dikendalikan sepenuhnya menggunakan enam thyristor yang terhubung seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.21 (a). Semua enam thyristor adalah sakelar terkontrol yang dihidupkan pada tingkat yang sesuai waktu dengan menerapkan sinyal pemicu gerbang yang sesuai. Konverter penuh tiga fase banyak digunakan dalam aplikasi daya industri hingga sekitar Tingkat daya keluaran 150kW, di mana operasi dua kuadran diperlukan. Sirkuit ini juga dikenal sebagai jembatan gelombang penuh tiga fase atau sebagai enam pulsa konverter. Frekuensi tegangan riak keluaran adalah $6 f_s$ dan penyaringan persyaratannya kurang dari konverter setengah gelombang tiga fase. (Lazim, n.d.)



Gambar 2.20 *Three-phase full-wave fully-controlled rectifier*

Dalam konfigurasi rangkaian gelombang penuh tiga fase yang dikendalikan penyearah, thyristor yang memiliki tegangan paling positif pada anodanya melakukan ketika dipicu, dan thyristor dengan tegangan paling negatif di katodanya mengembalikan arus beban, jika dipicu. Bentuk gelombangnya adalah sebagai ditunjukkan pada gambar 2.21.



Gambar 2.21 *Three-phase full-wave fully-controlled rectifier output voltage waveform*

Pergantian arus beban dari satu thyristor ke thyristor berikutnya terjadi pada saat pengaturan sudut, ketika thyristor yang masuk terbalik membiaskan thyristor yang melakukan sebelumnya, keluaran bentuk gelombang tegangan DC ditentukan

oleh perbedaan potensial rel positif dan negatif. Dengan asumsi konduksi kontinu, dengan beban induktif tinggi rata-rata DC tegangan output dapat ditemukan dengan mengacu pada gambar 2.21 (b). sebagai berikut,

$$V_{dc} = \frac{6}{2\pi} \int_{\alpha+\pi/6}^{\alpha+\pi/2} V_s(\omega t) d\omega t$$

dimana

$$V_s(\omega t) = V_{ab} = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + 30^\circ)$$

menjadi

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+\pi/6}^{\alpha+\pi/2} \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + 30^\circ) d\omega t$$

sehingga ;

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\alpha) \quad 2.47$$

Nilai rms dari bentuk gelombang tegangan keluaran adalah;

$$V_o(rms) = \left[\frac{6}{2\pi} \int_{\alpha+\pi/6}^{\alpha+\pi/2} V_o^2(\omega t) d\omega t \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_o(rms) = \left[\frac{3}{2\pi} \int_{\alpha+\pi/6}^{\alpha+\pi/2} \sqrt{3}V_m^2 \sin^2(\omega t + 30^\circ) d\omega t \right]^{\frac{1}{2}}$$

sehingga ;

$$V_o(rms) = \sqrt{3} V_m \left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}V}{4\pi} \cos(2\alpha) \right]^{\frac{1}{2}} \quad 2.48$$

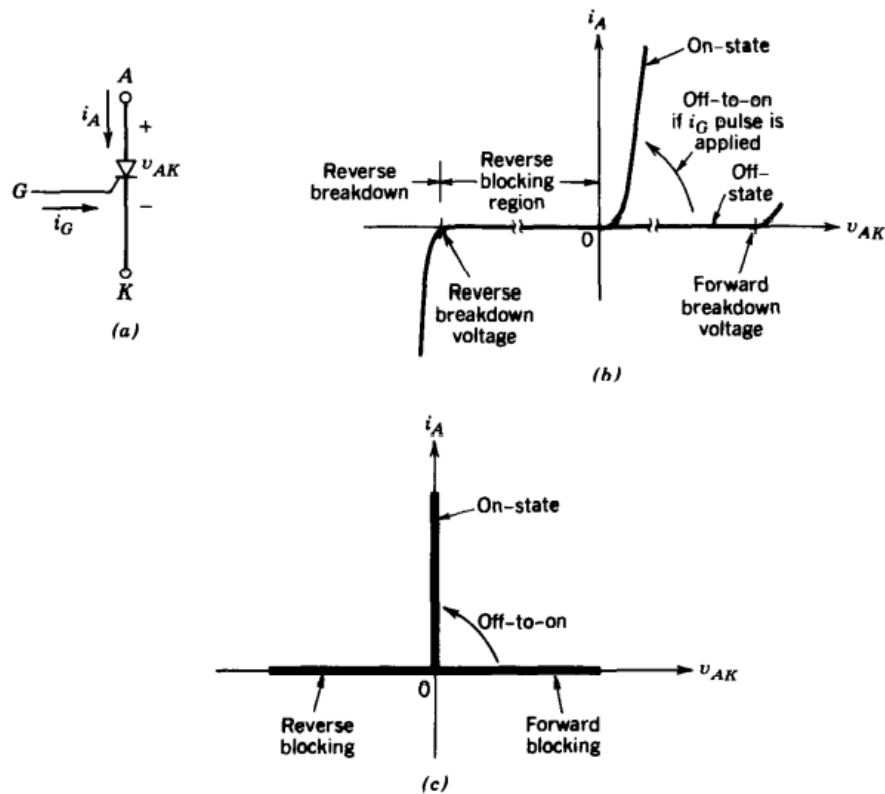
2.5 Thyristor

Semikonduktor daya yang termasuk dalam keluarga thyristor ini, antara lain : SCR (*silicon-controlled rectifier*), GTO (*gate turn-off thyristor*), dan TRIAC. SCR banyak digunakan dalam rangkaian elektronika daya. SCR memiliki tiga terminal, yaitu anoda, katoda, dan gate. SCR dapat digunakan dengan sumber masukan dalam bentuk tegangan bolak-balik (AC) maupun tegangan searah (DC). SCR dalam

rangkaian elektronika daya dioperasikan sebagai sakelar. Gambar 2.22 (a), (b), dan (c) masing-masing ditunjukkan simbol SCR, karakteristik SCR, karakteristik ideal SCR jika dioperasikan sebagai sakelar.

Jika sumber tegangan masukan yang digunakan tegangan searah, SCR akan konduksi (ON) jika potensial pada anoda lebih positif daripada potensial pada katoda dan pada terminal gate dialirkan arus pulsa positif. Kondisi ON SCR ini ditentukan oleh besar arus pulsa positif pada gate. Tetapi, SCR akan terus ON meskipun arus pulsa pada gate diputus. SCR akan putus (OFF) dengan cara membuat potensial pada anoda sama dengan katoda. Proses pengaliran arus listrik pada terminal gate ini disebut penyulutan/ pemicu (*triggering*), sedangkan proses pemutusan (OFF) dari kondisi ON ini disebut komutasi (*commutation*).

Selanjutnya, jika sumber tegangan masukan yang digunakan tegangan bolak-balik, SCR akan ON ketika tegangan bolak-balik pada polaritas positif dan akan OFF pada polaritas negatif, tetapi pada terminal gate harus selalu dialirkan arus pulsa positif. Berbeda dengan karakteristik sebelumnya, SCR akan OFF ketika arus pulsa pada gate diputus. Hal ini berarti, arus pulsa pada gate harus selalu dihubungkan dengan terminal gate agar rangkaian dapat bekerja sebagaimana yang diharapkan. (Daya & Daya, 2010)



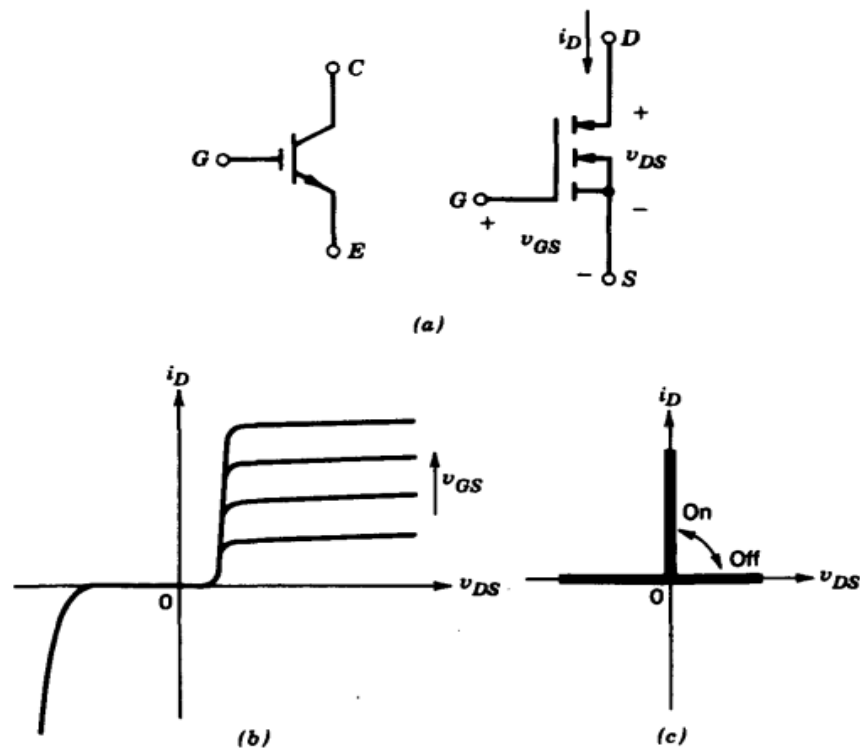
Gambar 2.22 Thyristor: (a) symbol, (b) i - v characteristics, (c) idealized characteristics

Jika SCR dalam kondisi ideal, ketika SCR dalam kondisi ON memiliki karakteristik tegangan pada SCR sama dengan nol dan arus yang mengalir sama dengan arus bebannya. Sebaliknya, SCR dalam kondisi OFF memiliki karakteristik tegangan pada SCR sama dengan tegangan sumbernya dan arus yang mengalir sama dengan nol. Dalam kondisi SCR ON dan OFF ini dapat dinyatakan tidak terjadi kerugian daya pada SCR.

2.6 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

IGBT merupakan komponen elektronika daya yang memiliki karakteristik gabungan antara MOSFET, transistor, dan GTO. Seperti MOSFET, IGBT memiliki impedansi gerbang yang tinggi sehingga hanya memerlukan arus yang kecil untuk mengaktifkannya. Serupa dengan transistor, IGBT memiliki tegangan kondisi-ON yang kecil meskipun komponen ini mempunyai rating tegangan yang besar dan mampu memblokir tegangan negatif seperti halnya GTO. gambar 2.23 (a), (b), dan

(c) masing-masing ditunjukkan simbol IGBT, karakteristik IGBT, dan karakteristik ideal IGBT sebagai sakelar. Seperti halnya semikonduktor daya di muka, IGBT dalam kondisi ON dan OFF tidak terjadi kerugian daya pada IGBT sebagai sakelar. (Daya & Daya, 2010)



Gambar 2.23 An IGBT: (a) symbol, (b) i - v characteristics, (c) idealized characteristics

2.7 Pulse Width Modulation Inverter Tiga Fasa

PWM Inverter adalah alat yang digunakan untuk mengubah atau mengkonversi tegangan masukan searah menjadi tegangan keluaran bolak-balik dengan besar tegangan dan frekuensi tertentu dengan menggunakan teknik modulasi lebar pulsa. Terdapat berbagai macam bentuk pulsa yang dapat digunakan untuk modulasi, namun pada pembahasan selanjutnya hanya akan digunakan pulsa berbentuk sinusoidal. Untuk menghasilkan tegangan keluaran dengan gelombang berbentuk sinusoidal pada nilai frekuensi yang diinginkan, diperlukan sinyal kontrol sinusoidal V_{control} pada frekuensi yang diinginkan dan sebuah gelombang berbentuk

segitiga V_{tri} . Gelombang berbentuk segitiga yang digunakan memiliki frekuensi dan amplitudo yang lebih besar daripada sinyal kontrol sinusoidal.

Gelombang berbentuk segitiga V_{tri} akan dimodulasi oleh sinyal kontrol sinusoidal $V_{control}$ dengan cara membandingkan kedua gelombang tersebut, sehingga dihasilkan lebar pulsa penyalan yang variabel. Frekuensi dari gelombang berbentuk segitiga merupakan frekuensi penyalan f_s atau biasa juga disebut frekuensi pembawa yang akan menunjukkan seberapa cepat nyala dan padamnya tiristor. Sedangkan sinyal $V_{control}$ digunakan untuk mengatur lebar pulsa penyalan tiristor dan memiliki frekuensi sebesar f_1 , dimana frekuensi tersebut adalah frekuensi dasar dari tegangan keluaran inverter yang diinginkan (f_1 juga biasa disebut frekuensi modulasi). Tegangan keluaran dari inverter tidak akan dapat berbentuk gelombang sinus murni karena akan mengandung harmonik akibat dari komponen tegangan $V_{control}$ yang mempunyai frekuensi sebesar f_1 .

Perbandingan modulasi amplitudo didefinisikan sebagai:

$$m_a = \frac{V^{control}}{V^{tri}} \quad 2.49$$

dengan

$V^{control}$: amplitudo puncak dari sinyal kontrol

V^{tri} : sinyal gelombang segitiga yang secara umum tetap konstan

Sedangkan untuk nilai perbandingan modulasi frekuensi didefinisikan sebagai:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad 2.50$$

2.7.1 Linear Modulation ($m_a \leq 1.0$)

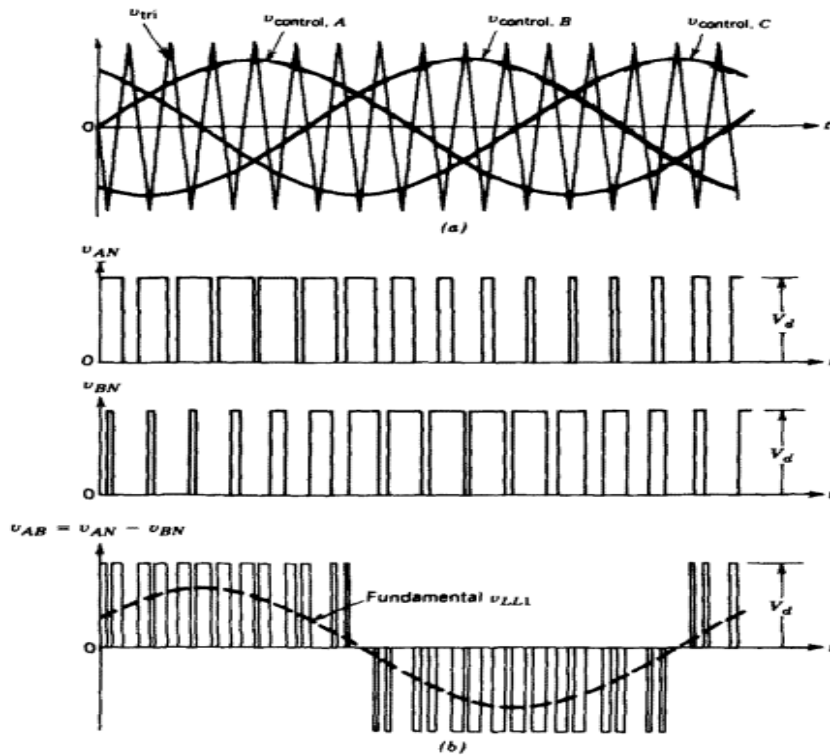
Pada daerah linier ($1.0 m_a \leq$), komponen frekuensi dasar pada tegangan keluaran diatur linier dengan perbandingan modulasi amplitudo m_a . Dari gambar 2.24 (b) terlihat bahwa komponen frekuensi dasar dari satu kaki inverter adalah;

$$(V^{AN})_1 = m_a \frac{V_d}{2} \quad 2.51$$

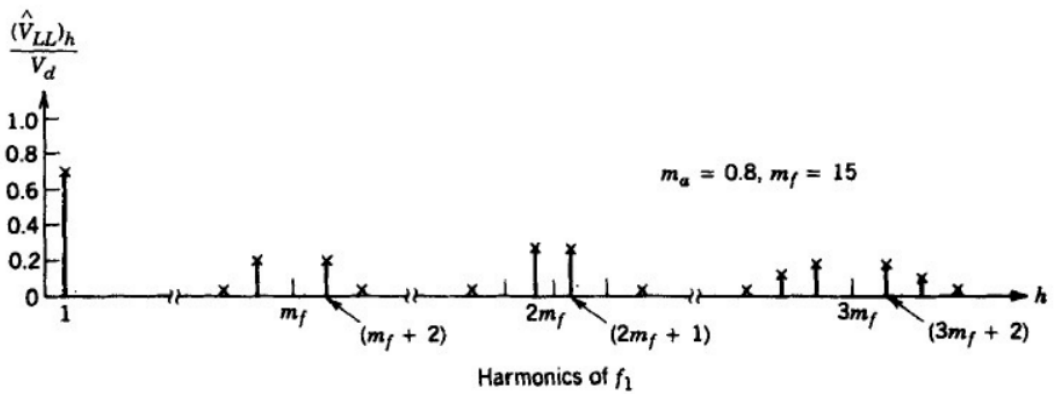
Oleh karena itu, tegangan antar fasa rms pada frekuensi dasar, dengan beda fasa antar tegangan 120 adalah ;

$$\begin{aligned} \hat{V}_{LL1} \text{ (line-line,rms)} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = (\hat{V}_{AN})_1 & 2.52 \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \\ &\approx 0.612 m_a V_d \quad (m_a \leq 1.0) \end{aligned}$$

Tegangan harmonik rms ini tercantum pada tabel 2.4



Gambar 2.24 Three-phase PWM waveforms



Gambar 2.25 Harmonic spectrum

Tabel 2.5 *Generalized Harmonics of V_n for a Large and Odd m_f That Is a Multiple of 3.*

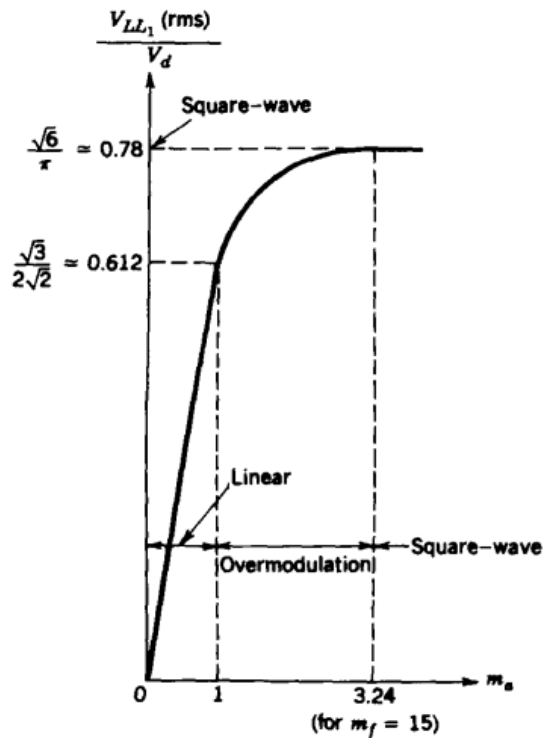
h \ m_a	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1	0.122	0.245	0.367	0.490	0.612
$m_f \pm 2$	0.010	0.037	0.080	0.135	0.195
$m_f \pm 4$				0.005	0.011
$2m_f \pm 1$	0.116	0.200	0.227	0.192	0.111
$2m_f \pm 5$				0.008	0.020
$3m_f \pm 2$	0.027	0.085	0.124	0.108	0.038
$3m_f \pm 4$		0.007	0.029	0.064	0.096
$4m_f \pm 1$	0.100	0.096	0.005	0.064	0.042
$4m_f \pm 5$			0.021	0.051	0.073
$4m_f \pm 7$				0.010	0.030

Note: $(V_{LL})_h/V_d$ are tabulated as a function of m_a where $(V_{LL})_h$ are the rms values of the harmonic voltages.

2.7.2 Over Modulation ($m_a > 1.0$)

Dalam overmodulation PWM, puncak tegangan kontrol diizinkan untuk melebihi puncak bentuk gelombang segitiga. berbeda dengan wilayah linier, dalam mode operasi ini besaran tegangan frekuensi dasar tidak meningkat secara proporsional dengan m_a seperti diperlihatkan pada gambar 2.26. di mana nilai rms dari frekuensi fundamental tegangan line-to-line V_{LL} diplot sebagai fungsi m_a mirip dengan PWM fase tunggal.

Jika m_a diperbesar terus maka PWM akan berubah menjadi gelombang tegangan persegi (square wave) dan tegangan frekuensi fundamental akan konstan sebesar $0,78 V_d$. Pada overmodulasi lebih banyak harmonisa yang muncul.



Gambar 2.26 *Three-phase inverter; $V_{LL}(\text{rms})/V_d$ as a function of m_a*

2.7.3 Square-Wave Operation in Three-Phase Inverters

Jika tegangan input dc dapat dikontrol, inverter pada Gambar 2.27 (a) dapat dioperasikan dalam modus gelombang persegi. Jadi, untuk nilai yang cukup besar dari m_a , PWM memerosot menjadi operasi gelombang persegi dan bentuk gelombang tegangan ditunjukkan pada gambar 2.27 (b) dimana masing-masing sakelar akan aktif selama 180° .

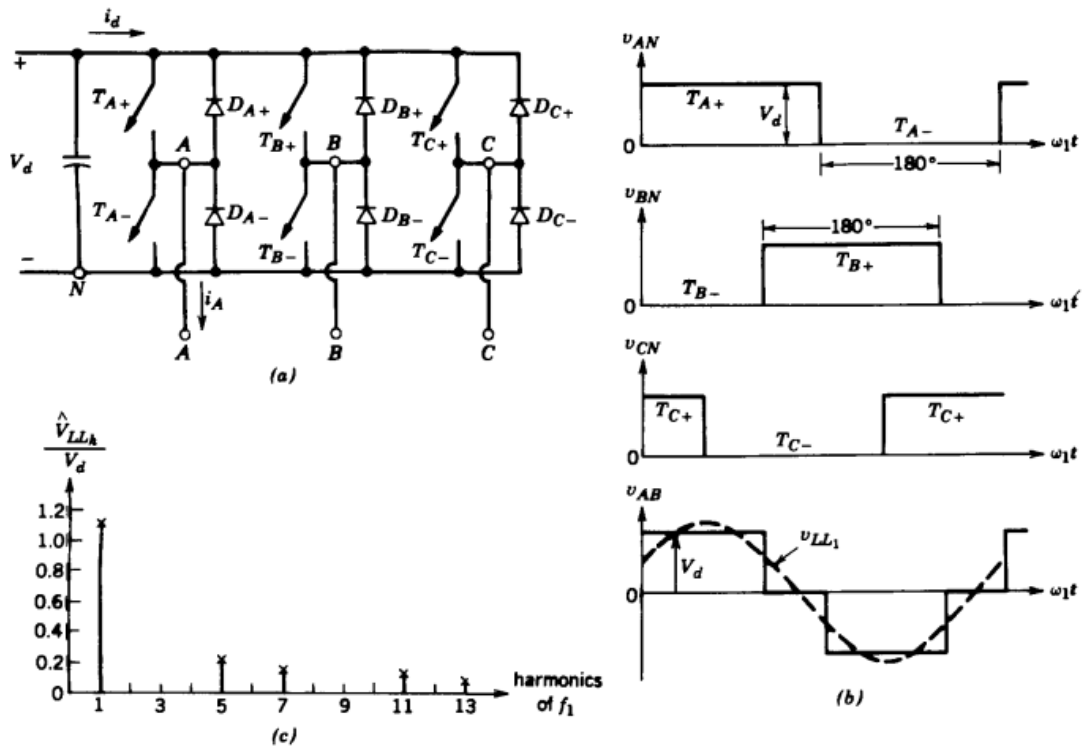
Dalam mode *Square-Wave Operation in Three-Phase* tidak dapat mengontrol besarnya masukan tegangan dari keluaran ac. Oleh karena itu, tegangan input dc harus dikontrol agar dapat mengontrol output *magnitude*, sehingga tegangan keluaran $V_{LL1}(\text{rms})$ dapat diperoleh ;

$$\begin{aligned} V_{LL1}(\text{line-line,rms}) &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} & 2.53 \\ &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_d \\ &\approx 0,78 V_d \end{aligned}$$

Untuk persamaan harmonisa yang eksis ;

$$\hat{V}_{LL-h} = \frac{0,78}{h} V_d \tag{2.54}$$

Dimana $h = 6n \pm 1$ ($n = 1,2,3$):



Gambar 2.27 Square-wave inverter (three phase)

2.8 Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) Inverter

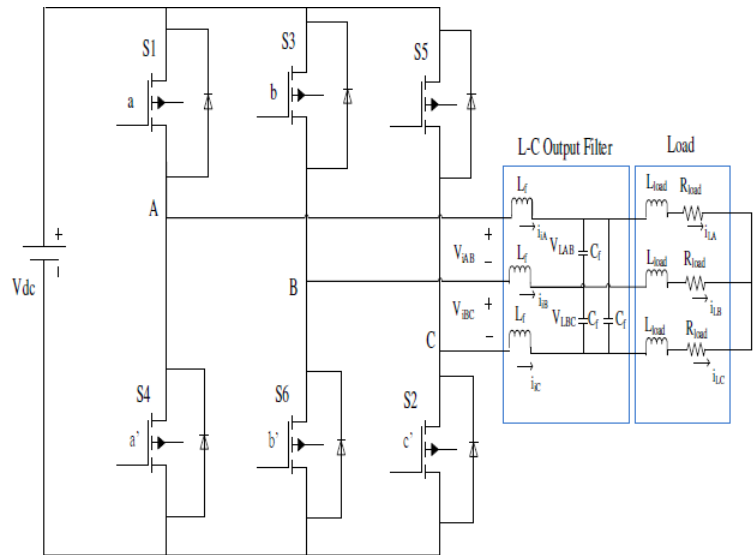
Metode pengendalian SVPWM merupakan modulasi sinyal yang membandingkan sinyal referensi berupa gelombang frekuensi rendah yang diperoleh menggunakan komputasi khusus dengan sinyal carrier berupa gelombang segitiga pada frekuensi tinggi dalam suatu perbandingan amplitudo yang disebut dengan indeks modulasi. Modulasi kedua gelombang tersebut menghasilkan pulsa pengendali saklar daya inverter. Metode SVPWM menghasilkan duty cycle yang lebih lebar pada bagian tengah sinyal output, sehingga mengurangi jumlah komutasi dan losses switching menjadi lebih rendah.

Metode SVPWM merupakan penggabungan dari pengaturan vektor kecepatan motor dengan PWM (Pulse Width Modulation) yang digunakan sebagai pengatur amplitudo dan frekuensi. (Hutabalian & Hamzah, 2016)

Space Vector PWM (SVPWM) pada awalnya dikembangkan sebagai pendekatan vektor untuk Pulse Width Modulation (PWM) untuk tiga inverter fasa. Ini adalah teknik yang lebih canggih untuk menghasilkan gelombang sinus yang menyediakan tegangan yang lebih tinggi untuk motor dengan total distorsi harmonik yang lebih rendah. Tujuan utama dari setiap teknik modulasi untuk mendapatkan variabel output memiliki komponen fundamental maksimal dengan harmonik yang minimum. SVPWM adalah lanjutan perhitungan metode PWM yang intensif dan mungkin teknik terbaik untuk aplikasi Variable Frequency Drive (VFD). (Annapurna & Tulasiramdas, 2015)

2.8.1 Prinsip Kerja Inverter Tiga Fasa SVPWM

Model rangkaian dari inverter PWM tiga fase sumber tegangan ditunjukkan pada gambar 2.29 Saklar S1 – S6 adalah enam saklar daya yang membentuk output, yang dikontrol oleh variabel switching, sebuah a, a', b, b', c dan c'. Ketika saklar daya atas diaktifkan, yaitu, ketika a, b atau c adalah 1 (hidup), maka sisi bawah saklar dayanya harus mati, yaitu, sesuai dengan a', b' atau c' adalah 0 (mati). Oleh karena itu, keadaan hidup dan mati saklar daya sisi atas S1, S3 dan S5 dapat digunakan untuk menentukan tegangan output. (Annapurna & Tulasiramdas, 2015)



Gambar 2.28 Rangkaian PWM Inverter tiga fasa

Hubungan antara variabel switching vektor $[a, b, c]^t$ dan vektor tegangan fasa ke fasa $[V_{ab} \ V_{bc} \ V_{ca}]^t$ adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad 2.55$$

dimana vektor variabel swtiching $[a \ b \ c]^t$

Dan hubungan antara variabel switching vektor $[a \ b \ c]^t$ dan vektor tegangan fasa ke netral $[V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^t$ adalah sebagai berikut:

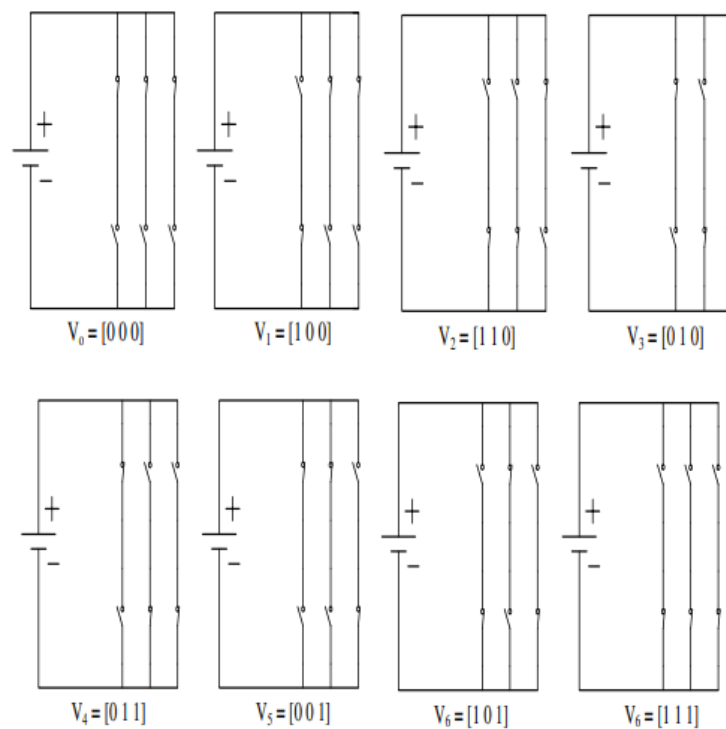
$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad 2.56$$

Seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.28, ada delapan kemungkinan kombinasi pola hidup dan mati tiga saklar daya atas.. Menurut persamaan 2.55 dan 2.56, delapan switching vectors, output tegangan fasa ke netral, dan output tegangan fasa ke fasa dari rangkaian DC-link V_{dc} , ditunjukkan pada tabel 2.5

Tabel 2.6 Delapan Kombinasi tegangan Fasa ke Netral dan Tegangan Fasa ke Fasa

Voltage Vector	Switching Vector			Line to Neutral voltage			Line to Line voltage		
	a	b	c	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
V_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$	1	0	-1
V_2	1	1	0	$1/3$	$1/3$	$-2/3$	0	1	-1
V_3	0	1	0	$-1/3$	$2/3$	$-1/3$	-1	1	0
V_4	0	1	1	$-2/3$	$1/3$	$1/3$	-1	0	1
V_5	0	0	1	$-1/3$	$-1/3$	$2/3$	0	-1	1
V_6	1	0	2	$1/3$	$-2/3$	$1/3$	1	-1	0
V_7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

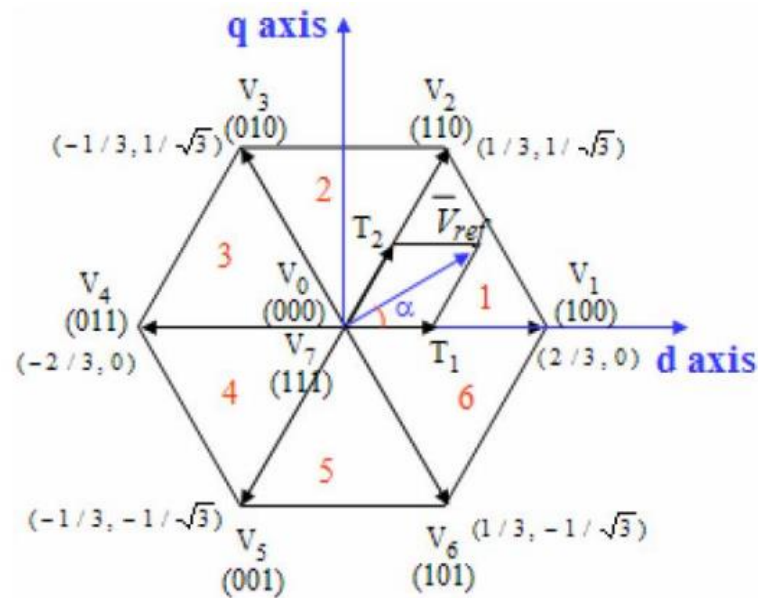
Konfigurasi saklar daya inverter ditunjukkan pada gambar 2.29



Gambar 2.29 Konfigurasi saklar daya inverter tiga fasa tiga lengan

Gambar 2.29 menjelaskan konfigurasi penyaklaran inverter yang dibentuk dari 3 pasang saklar daya sehingga menghasilkan 8 kondisi penyaklaran inverter dari 000 hingga 111.

Dasar vektor dan sektor switching dapat dilihat pada gambar 2.29



Gambar 2.30 Dasar vektor dan sektor switching

Teknik PWM ini memperkirakan tegangan referensi V_{ref} lewat kombinasi kedelapan pola switching ($V_0 - V_7$). Vektor – vektor ($V_1 - V_6$) membagi bidang menjadi 6 sektor (masing – masing 60 derajat). V_{ref} dibangkitkan oleh dua vektor bukan nol yang berdekatan dan dua vektor nol.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan dengan simulasi menggunakan komputer laptop dengan memanfaatkan bantuan software MATLAB@Simulink R2018b. Lama penelitian dilakukan selama 4 bulan.

3.2 Bahan dan Peralatan

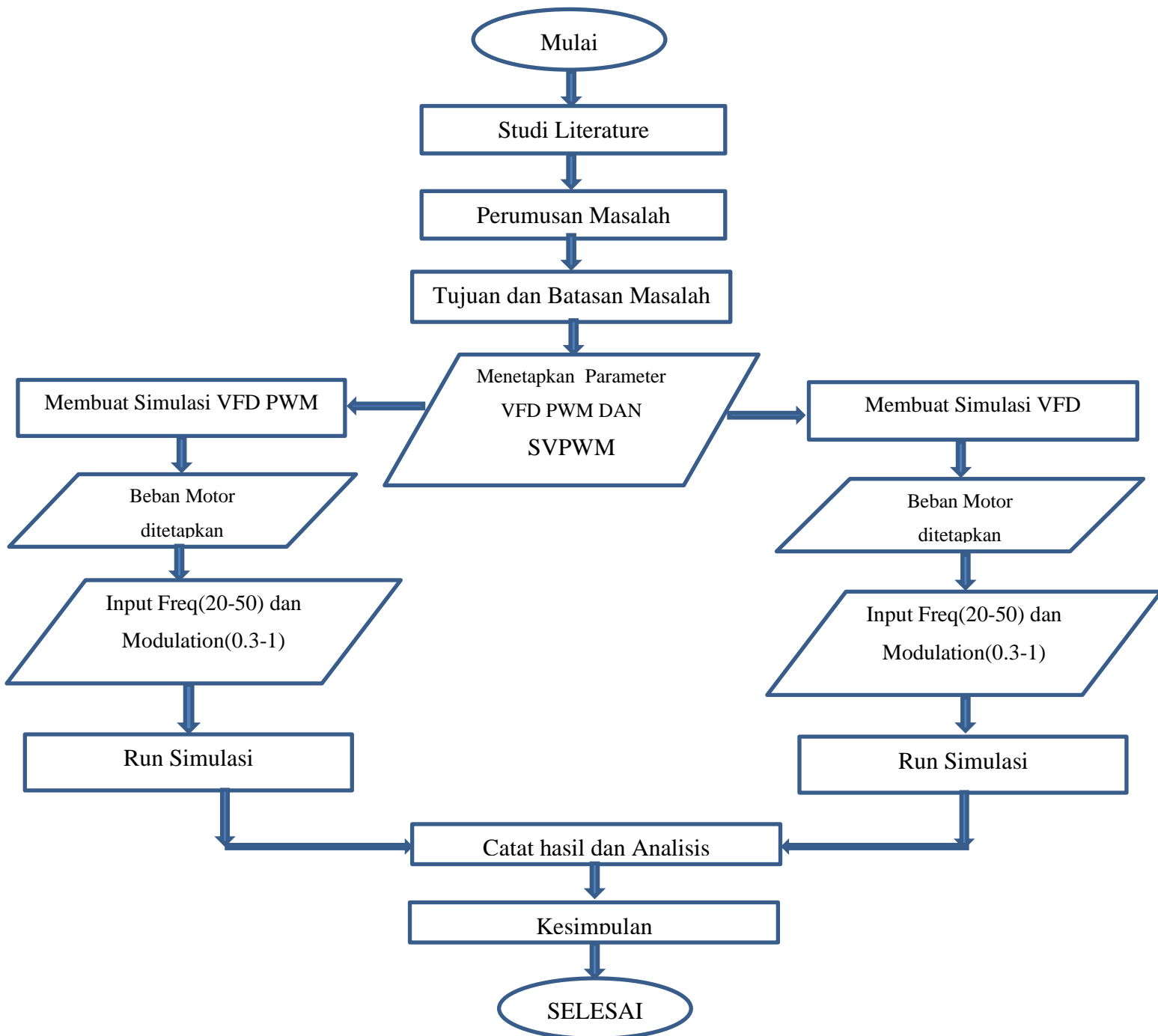
Bahan yang digunakan untuk melakukan penelitian ini adalah jurnal dan buku sebagai referensi.

Dalam penyelesaian Skripsi ini, alat bantu yang digunakan adalah :

- Laptop Toshiba 5300, Intel(R) Core i5, CPU @ 2.30 GHz
- Software MATLAB@Simulink R2018b

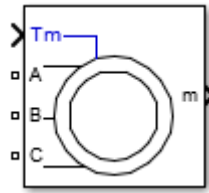
3.3 Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan rencana kerja terhadap Skripsi ini, dibuatlah diagram alir (flowchart) secara keseluruhan yang dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

3.4 Model Mesin Induksi Tiga Fasa



Gambar 3.2 Model mesin induksi pada MATLAB

Pada gambar 3.2 merupakan gambar mesin induksi dengan rotor tipe sangkar. Pada mesin induksi dengan rotor tipe sangkar, ketiga fasa pada bagian rotornya dihubungkan singkat.

Model mesin induksi dapat beroperasi pada mode operasi motor maupun mode operasi generator. Mode operasi dari mesin induksi ditentukan oleh penandaan dari torsi mekaniknya, yaitu:

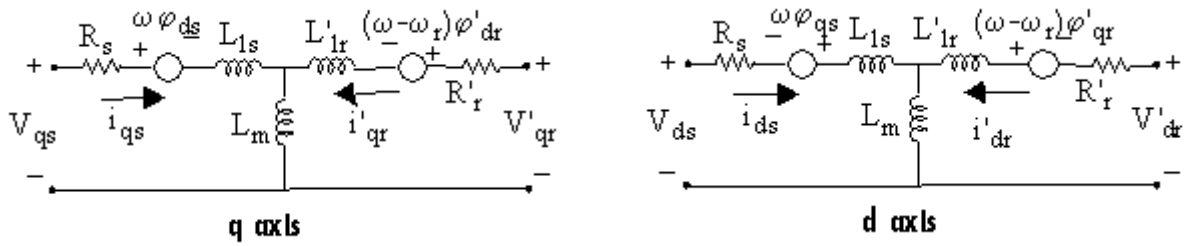
- Jika torsi mekanik T_m positif maka mesin induksi beroperasi sebagai motor
- Jika torsi mekanik T_m negatif maka mesin induksi beroperasi sebagai generator

Bagian elektris dari mesin direpresentasikan dengan model state space orde keempat dan bagian mekanisnya direpresentasikan dengan sistem orde kedua. Seluruh variabel elektris dan parameter-parameter yang ada direferensikan terhadap bagian stator dari mesin. Hal ini diindikasikan dengan tanda-tanda utama pada persamaan mesin yang diberikan dibawah. Seluruh nilai dari stator dan rotor berada dalam kerangka acuan dua sumbu referensi yang berubah-ubah (kerangka dq). Subskrip yang digunakan adalah seperti diperlihatkan pada table 3.1 dibawah ini

Tabel 3.1 Subskrip Persamaan Model Mesin Induksi MATLAB

Subskrip	Definisi
d	kuantitas sumbu d
q	kuantitas sumbu q
r	kuantitas rotor
S	kuantitas stator
I	induktansi bocor
m	induktansi magnetisasi

Berikut ini adalah sistem listrik dari model mesin induksi MATLAB:



Gambar 3.3 *Electrical System of the Wound-Rotor or Squirrel-Cage Machine*

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \quad 3.1$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{qs} \quad 3.2$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad 3.3$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad 3.4$$

$$T_e = 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad 3.5$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad 3.6$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{qr} \quad 3.7$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad 3.8$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad 3.9$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad 3.10$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad 3.11$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m) \quad 3.12$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad 3.13$$

Pada tabel 3.2 akan didefinisikan parameter-parameter sistem listrik dan sistem mekanis dari model mesin induksi MATLAB

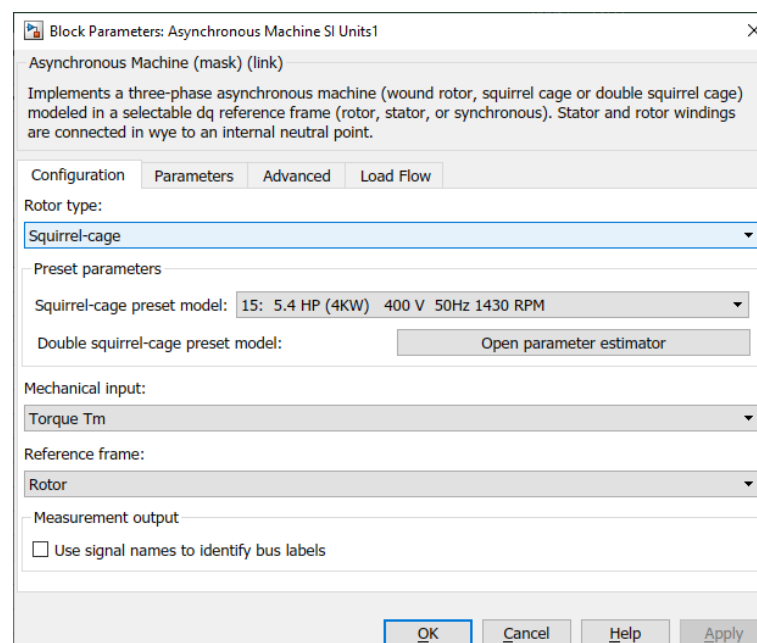
Tabel 3.2 Definisi Parameter-Parameter Sistem Listrik dan Sistem Mekanis

Parameter	Defenisi
R_s, L_{ls}	Resistansi stator dan induktansi bocor
R_r, L_{lr}	Resistansi rotor dan induktansi bocor
L_m	Induktansi hasil magnetisasi
L_s, L'_{lr}	Total induktansi stator dan rotor
V_{qs}, i_{qs}	Tegangan dan arus stator sumbu q
V'_{qr}, i'_{qr}	Tegangan dan arus rotor sumbu q
V_{ds}, i_{ds}	Tegangan dan arus stator sumbu d
V'_{dr}, i'_{dr}	Tegangan dan arus rotor sumbu d
$\varphi_{qs}, \varphi_{ds}$	Fluks stator q dan d
$\varphi'_{qr}, \varphi'_{dr}$	Fluks rotor q dan d
ω_m	Kecepatan angular dari rotor
θ_m	Posisi angular dari rotor
P	Jumlah dari pasangan-pasangan kutub
ω_r	Kecepatan angular dari medan listrik ($\omega_m \times p$)
θ_r	Posisi angular dari medan listrik ($\theta_m \times p$)
T_e	Torsi elektromagnetik

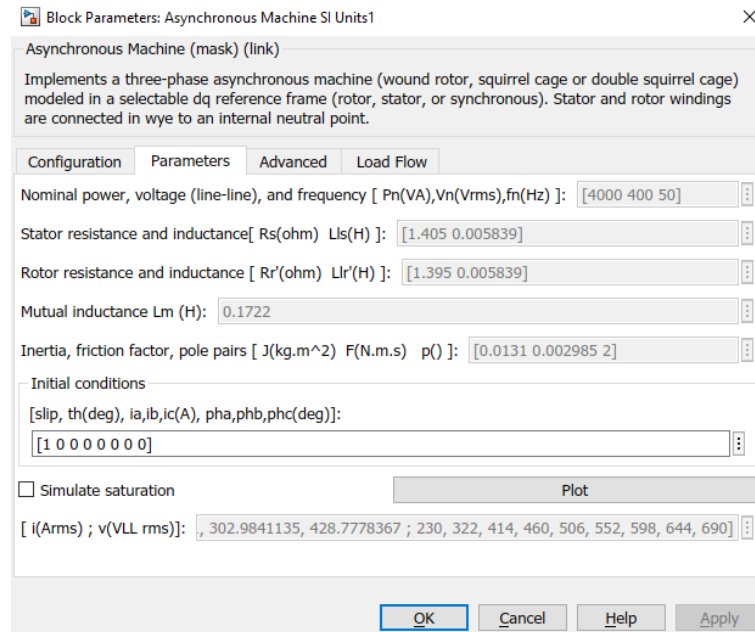
T_m	Torsi poros mekanik
J	Koefisien inersia rotor dan beban yang dikombinasikan. Diatur pada nilai tak hingga untuk mensimulasikan rotor yang dikunci.
H	Konstanta inersia rotor dan beban yang dikombinasikan. Diatur pada nilai tak hingga untuk mensimulasikan rotor yang dikunci.
F	Koefisien gesek rotor dan beban yang dikombinasikan

3.4.1 Pengaturan Model Mesin Induksi dan Penggunaannya pada Simulasi

Pengaturan dari model mesin induksi yang digunakan dilakukan melalui sebuah blok parameter seperti yang terlihat pada gambar 3.4



Gambar 3.4 Blok konfigurasi model mesin induksi MATLAB



Gambar 3.5 Blok parameter model mesin induksi MATLAB

Semua nilai parameter-parameter dan ketentuan-ketentuan yang digunakan pada blok konfigurasi dan parameter dari model mesin induksi MATLAB diperoleh dari Simulink MATLAB yang digunakan pada simulasi dari skripsi ini .

Pada tabel 3.3 akan diperlihatkan dengan lebih jelas nilai konfigurasi /parameter dan ketentuan-ketentuan nilai pengaturan awal parameter tersebut yang digunakan pada simulasi.

Tabel 3.3 Nilai Konfigurasi/ Parameter dan Ketentuan dari Model Mesin Induksi MATLAB

Konfigurasi/Parameter	Ketentuan atau Nilai Pengaturan awal MATLAB
Tipe Rotor	Rotor Sangkar (<i>squirrel-cage</i>)
Input Mekanis	Torsi Tm
Model Motor Rotor Sangkar	5,4 HP (4 KW) 400 V 50 Hz 1430 RPM
Kerangka Referensi	Rotor
Daya Nominal [Pn]	4000 W
Tegangan (line - line) [Vn]	400 Vrms

Frekuensi Nominal [fn]	50 Hz
Resistansi stator [Rs]	1,405 ohm
Induktansi stator [Lls]	0,005839 H
Resistansi rotor [Rr']	1,395 ohm
Induktansi rotor [Llr']	0,005839 H
Induktansi Mutual [Lm]	0,1722 H
Inersia [J]	0,0131 kg.m ²
Faktor gesekan [F]	0,002985 N.m.s
Pasangan Kutub [p]	2
Kondisi Awal Slip	1

Untuk nilai torsi mekanik T_m yang dimasukkan pada model mesin induksi digunakan persamaan torsi nominal dari mesin tersebut. Persamaan torsi nominal T_n diperoleh melalui proses perhitungan sebagai berikut:

Berdasarkan persamaan 2.3 maka kecepatan sinkron dari mesin induksi adalah

$$n_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{p} f \quad 3.14$$

$$n_s = \frac{120}{4} 50 = 1500 \text{ rpm} \quad 3.15$$

$$\omega_s = 1500 \times \frac{2\pi}{60} = 157,14 \text{ rad/s} \quad 3.16$$

Maka pada table 3.3 Pada daya nominal $P_n = 4000 \text{ W}$, maka torsi nominal T_n adalah

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_s} = \frac{4000}{157} = 25,478 \text{ Nm} \quad 3.17$$

Dengan mengasumsikan karakteristik torsi-kecepatan merupakan fungsi kuadrat seperti persamaan 2.1 maka diperoleh :

$$T = k \times \omega^2 \quad 3.18$$

dari persamaan 3.18, dapat dihitung besarnya konstanta k yaitu :

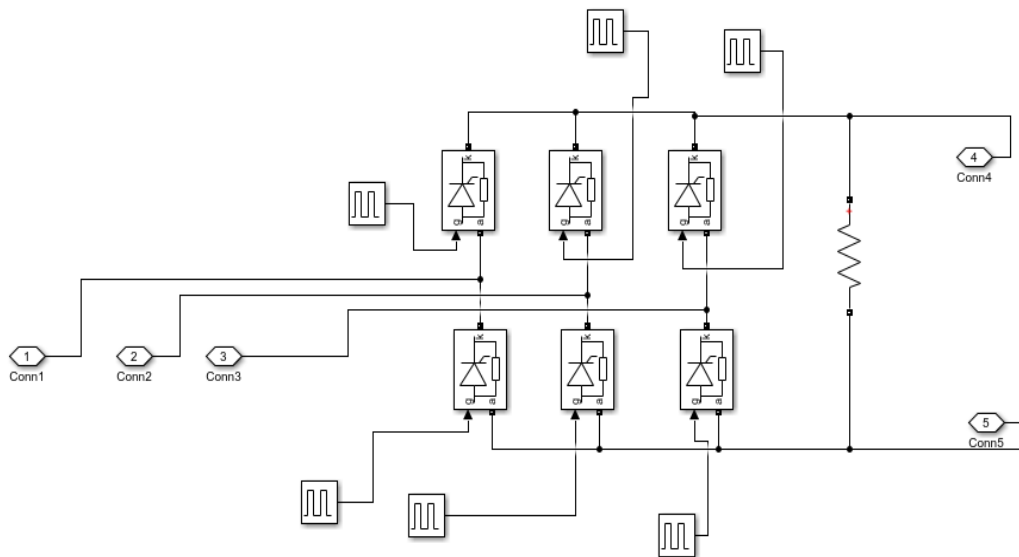
$$k = \frac{T}{\omega^2} = \frac{25,478}{157^2} = 0,001031 \quad 3.19$$

Pada akhirnya akan diperoleh persamaan torsi nominal yaitu :

$$T_n = 0,001031 \times w^2 \quad \mathbf{3.20}$$

Masukan persamaan torsi nominal (T_n) di input pada konstan parameter *Shaft mechanical torque* motor induksi dengan menyesuaikan frekuensi masukan menggunakan blok Fcn yang terdapat pada library Simulink seperti terlihat pada gambar 4.1.

3.5 Model Rectrifier 3 Phasa Fully Control



Gambar 3.6 Rectrifier 3 Phasa Fully Control 120°

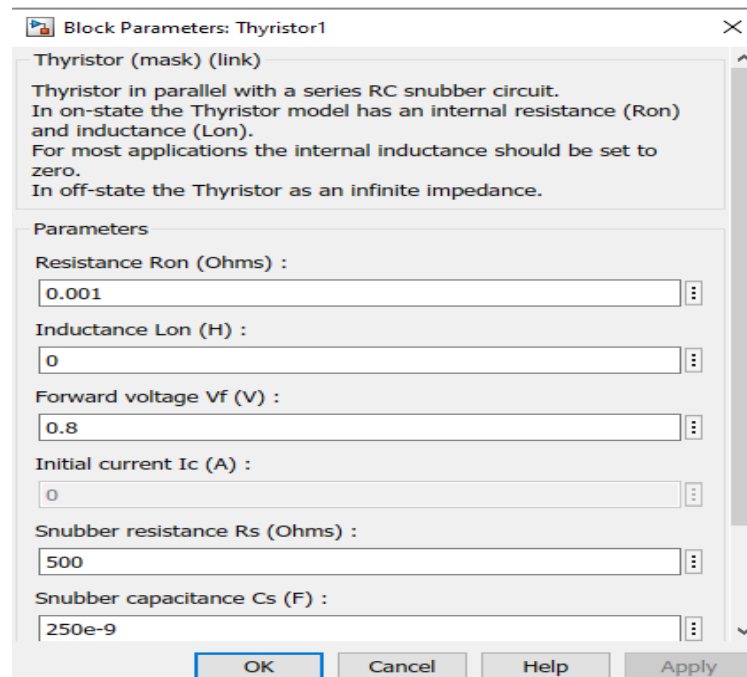
Langkah 1 : Pada gambar 3.6 akan mengubah arus Ac menjadi DC dengan sumber tegangan AC dengan parameter sebagai berikut :

Tabel 3.4 Parameter Ac Tiga Fasa

Ac Source	Peak Amplitudo	Phase (deg)	Frequency
Vaa	420 V	0	50 Hz
Vab	420 V	-120	50 Hz
Vac	420 V	-240	50 Hz

Langkah 2 : Menentuka Parameter *Thyristor*

Setelah menetapkan parameter untuk sumber Ac, maka selanjutnya menetapkan parameter untuk setiap thyristor seperti terlihat pada gambar



Gambar 3.7 Blok parameter thyristor

Thyristor ini diperoleh dari simulink library browser > *simscape* > *electrical* > *specialized power system* > *fundamental blocks* > *power electronic* > *thyristor*.

Untuk nilai parameter – parameter dari *thyristor* merupakan default MATLAB yang akan digunakan untuk menjalankan simulasi.

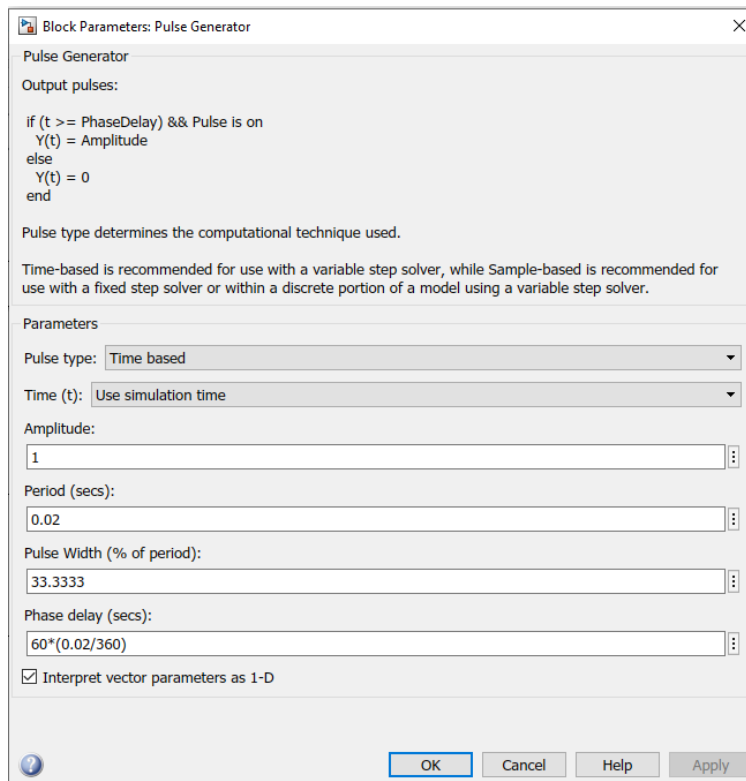
Langkah 3 : Menentukan Waktu *Switching Thyristor*

Setelah menentukan *waktu switching thyristor* pada blok parameter pulse generator seperti yang ditampilkan pada gambar 3.8 dengan menetapkan nilai parameter switching T1 – T6 seperti pada table 3.5.

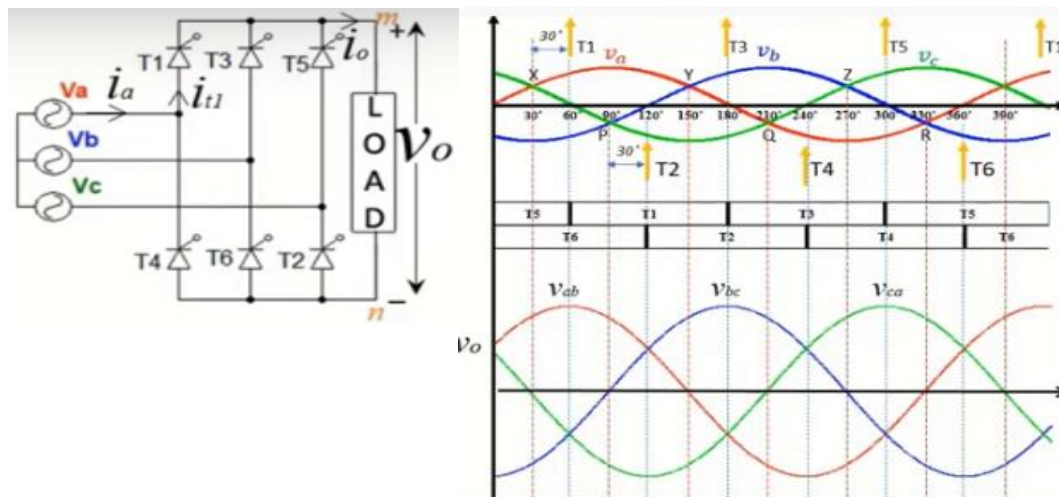
Tabel 3.5 Waktu *Switching Thyristor*

Thyristor	Period (secs)	Pulse Width (% of periode)	Phase delay (secs)
T1	1/f	120/360	60*(0,02/360)
T2	1/f	120/360	120*(0,02/360)

T3	1/f	120/360	180*(0,02/360)
T4	1/f	120/360	240*(0,02/360)
T5	1/f	120/360	300*(0,02/360)
T6	1/f	120/360	360*(0,02/360)



Gambar 3.8 Blok parameter pulse generator



Gambar 3.9 Gelombang penuh keluaran rectifier dengan sudut $\alpha = 30^\circ$

Gambar 3.9 merupakan gelombang penuh keluaran rectifier dengan sudut tembak 30° , dengan konduksi seperti berikut :

$\omega t = 0^\circ - 60^\circ$, T5 and T6 konduksi

$\omega t = 60^\circ - 120^\circ$, T1 and T6 konduksi

$\omega t = 120^\circ - 180^\circ$, T1 and T2 konduksi

$\omega t = 180^\circ - 240^\circ$, T2 and T3 konduksi

$\omega t = 240^\circ - 300^\circ$, T3 and T4 konduksi

$\omega t = 300^\circ - 360^\circ$, T4 and T5 konduksi

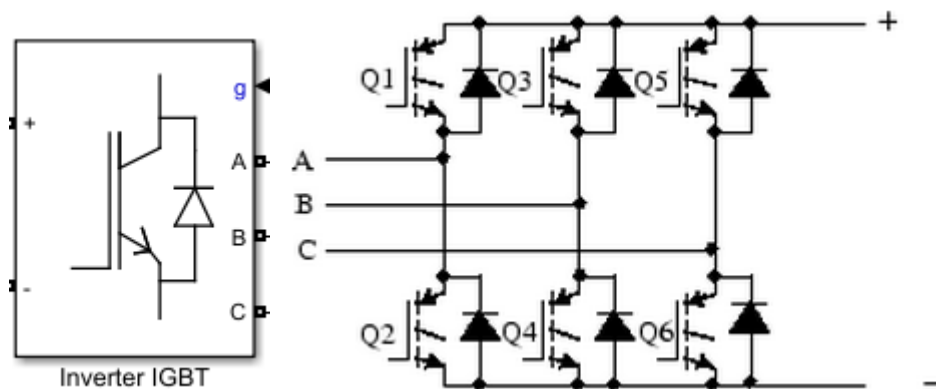
3.6 Model Universal Bridge Inverter

Model universal bridge pada program simulink MATLAB merupakan implementasi dari konverter daya universal dengan topologi dan divais elektronika daya yang dapat dipilih.

Model universal bridge mengimplementasikan sebuah konverter daya universal tiga fasa yang terdiri dari enam saklar daya yang dihubungkan didalam sebuah konfigurasi jembatan. Jenis dari saklar daya dan konfigurasi konverter dapat dipilih melalui blok parameter yang tersedia.

Model universal bridge memungkinkan simulasi dari konverter-konverter yang menggunakan divais elektronika daya terkomutasi secara natural seperti pada dioda dan tiristor dan divais elektronika daya yang terkomutasi melalui pemberian sinyal seperti pada GTO, IGBT, dan MOSFET.

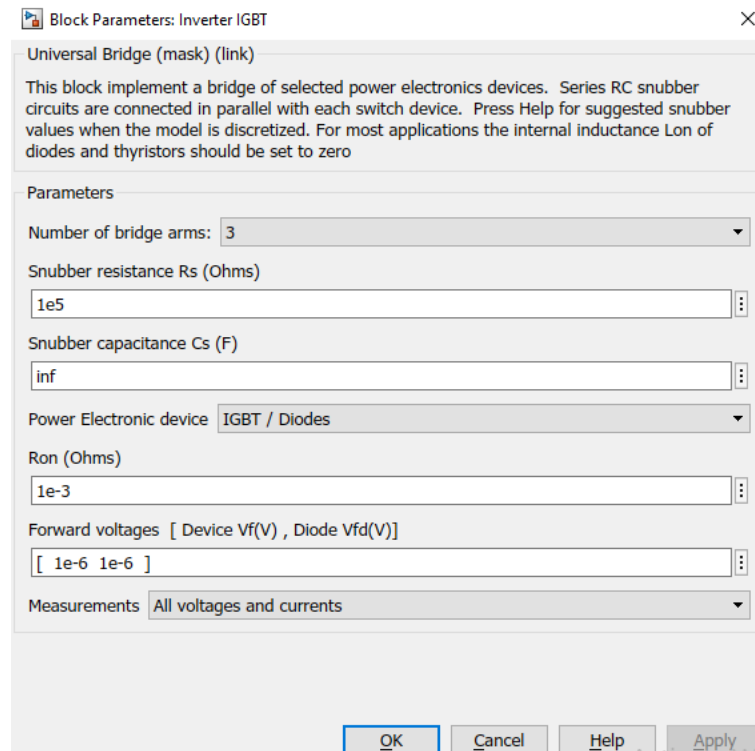
Dalam skripsi ini menggunakan universal bridge dengan konfigurasi saklar berupa IGBT yang digunakan sebagai inverter seperti pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Model universal bridge inverter (kiri) dan konfigurasi jembatan inverter (kanan)

3.6.1 Pengaturan Model Universal Bridge Inverter IGBT dan Penggunaannya pada Simulasi

Pengaturan model universal bridge sama halnya seperti pada model mesin induksi, yaitu dilakukan melalui sebuah blok parameter seperti yang terlihat gambar 3.11.



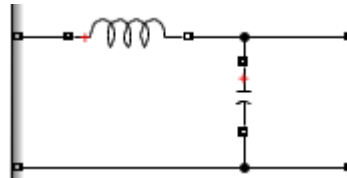
Gambar 3.11 Model universal bridge inverter (kiri) dan konfigurasi jembatan inverter (kanan)

Pengaturan nilai-nilai default pada blok parameter universal bridge inverter IGBT dilakukan sedemikian rupa sehingga diperoleh besar dan bentuk gelombang tegangan masukan pada mesin induksi dengan nilai yang cukup stabil. Sedangkan pengaturan 3 jumlah lengan jembatan (number of bridge arm) dilakukan agar sistem pada simulasi skripsi ini merupakan sistem tiga fasa.

3.7 DC Link Konverter

Pada simulasi ini juga digunakan DC link konverter yang berada diantara rectifier dan model universal bridge untuk inverter. DC link konverter yang digunakan disini terdiri dari induktor dan kapasitor. Secara umum DC link konverter pada simulasi ini berfungsi sebagai filter gelombang keluaran rectifier. Pengaturan besar induktansi bertujuan untuk memperoleh faktor daya dan harmonik yang diinginkan, sedangkan pengaturan besar kapasitansi akan mempengaruhi besar dari frekuensi, temperatur, dan umur penggunaannya. Besar dari induktansi dan kapasitansi yang digunakan pada simulasi skripsi ini sudah

diatur sedemikian rupa sehingga dapat diperoleh gelombang tegangan masukan pada mesin induksi dengan nilai yang tepat (tidak terlalu besar dan tidak terlalu kecil) dan cukup stabil. (Wijenayake et al., 1997)



Gambar 3.12 Dc Link Converter penghubung rectifier dan inverter

3.8 Model Pulse Dan Signal Generator

Pada simulasi skripsi ini akan menggunakan 2 Pulse & Signal Generators PWM dan SVPWM yang akan dianalisis performa mana yang lebih optimal dengan menggunakan *Variable Frequency Drive* dengan beban Motor Induksi yang dihubungkan dengan Gate Inverter IGBT. Hal ini dilakukan karena model universal bridge untuk inverter yang digunakan pada simulasi ini merupakan divais elektronika daya yang terkomutasi melalui pemberian sinyal.

3.8.1 Deskripsi Model Pwm Generator (2 – Level)



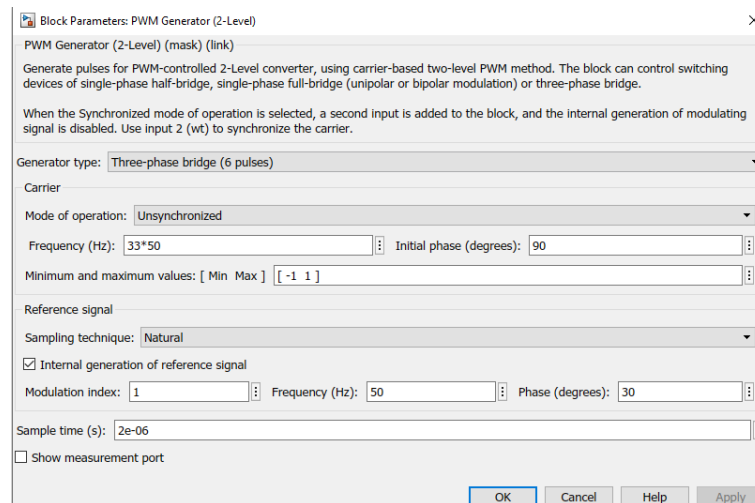
Gambar 3.13 Pulse PWM Generator (2-Level)

Blok PWM Generator (2-Level) menghasilkan pulsa untuk konverter modulasi lebar pulsa (PWM) berbasis operator menggunakan topologi dua tingkat. Blok dapat mengontrol perangkat switching (FET, GTO, atau IGBT) dari tiga jenis konverter yang berbeda: jembatan setengah fase tunggal (1 lengan), jembatan penuh fase tunggal (2 lengan), atau jembatan tiga fase (3 lengan).

Sinyal referensi (Uref) disebut masukan sinyal modulasi, dan P pada gambar 3.13 akan dihubungkan ke masukan gerbang (gate) dari model universal bridge untuk inverter.

3.8.2 Pengaturan Model PWM Generator (2 – Level)

Pengaturan model PWM generator sama halnya seperti pada model-model sebelumnya, yaitu dilakukan melalui sebuah blok parameter seperti yang terlihat pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 Blok parameter PWM Generator

Pilih Jembatan tiga fase (6 pulsa) (default) untuk menyalakan perangkat komutasi sendiri dari konverter jembatan tiga fase. Pulsa 1, 3, dan 5 menyalakan perangkat atas lengan pertama, kedua, dan ketiga. Pulsa 2, 4, dan 6 menyalakan perangkat yang lebih rendah .

Menentukan frekuensi, dalam hertz, dari sinyal pembawa segitiga. *default* adalah $27 \cdot 50$. Parameter ini hanya tersedia jika parameter Mode operasi diatur ke tidak sinkron.

Operator: Nilai minimum dan maksimum, menentukan nilai minimum (valley) dan maksimum (peak) dari sinyal pembawa segitiga. *default* adalah $[-1 \ 1]$.

Sinyal referensi: *Internal generation of reference signal*

Menentukan indeks modulasi untuk mengontrol amplitudo komponen dasar tegangan keluaran konverter. Indeks modulasi harus lebih besar dari 0 dan lebih

rendah dari atau sama dengan 1. Perubahan nilai parameter indeks modulasi juga akan mengubah nilai tegangan keluaran antar fasa dari model universal bridge untuk inverter. Besar tegangan keluaran antar fasa tersebut adalah

$$V_{LL_Converter} = m * \frac{V_{dc}}{2} * \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = m * V_{dc} * 0,6124 \quad 3.21$$

dengan

$V_{LL_Converter}$: Tegangan antar fasa keluaran model universal bridge untuk inverter dalam rms

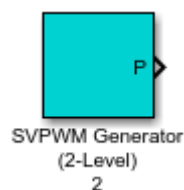
m : Indek Modulasi

V_{dc} : Tegangan masukan searah pada model universal bridge untuk inverter

sehingga dengan mengubah nilai parameter indeks modulasi maka besar tegangan masukan antar fasa pada bagian rotor dan stator dari model mesin induksi juga dapat diubah.

Referensi Signal : Parameter ini hanya tersedia bila generasi internal dari parameter sinyal referensi dipilih. Menentukan frekuensi tegangan keluaran yang digunakan untuk mengontrol frekuensi komponen dasar dari tegangan keluaran converter 10 -50 Hz yang akan digunakan untuk simulasi skripsi ini. sehingga dengan mengubah nilai parameter tegangan frekuesni maka besar tegangan masukan antar fasa pada bagian rotor dan stator dari model mesin induksi juga dapat diubah, . Parameter ini hanya tersedia ketika parameter generasi sinyal modulasi internal dipilih.

3.8.3 Deskripsi Model SVPWM Generator (2 – Level)



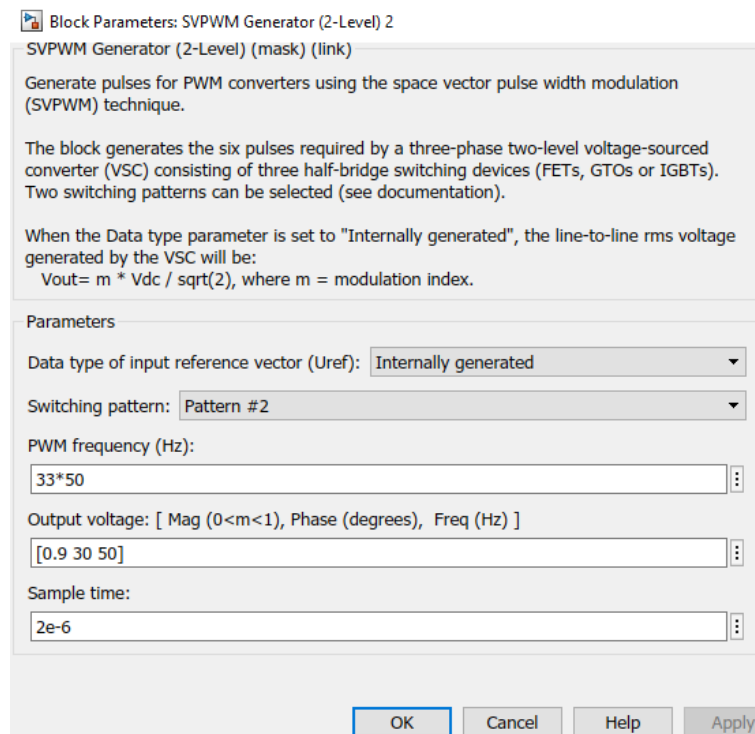
Gambar 3.15 Pulse SVPWM Generator (2 - Level)

Blok Generator SVPWM (2-Level) menghasilkan pulsa untuk konverter DC/AC tiga fase dua tingkat menggunakan teknik space-vector pulse width modulation (SVPWM).

Pada simulasi ini, pada gambar 3.15 akan dihubungkan ke masukan gerbang (gate) dari model universal bridge untuk inverter.

3.8.4 PENGATURAN MODEL SVPWM GENERATOR (2 – Level)

Pengaturan model SVPWM generator sama halnya seperti pada model-model sebelumnya, yaitu dilakukan melalui sebuah blok parameter seperti yang terlihat pada gambar 3.16.



Gambar 3.16 Blok parameter SVPWM Generator

Pada blok parameter ini digunakan *Data type of input reference vector (uref): mode internal generated*, Pada gambar 3.16 untuk Output voltage: [Mag (0<m<1), Fase (degrees), Frekuensi (Hz)] akan digunakan untuk menempatkan indeks modulasi untuk mengontrol amplitudo komponen dasar tegangan keluaran converter dan menentukan frekuensi tegangan keluaran yang digunakan untuk

mengontrol frekuensi komponen dasar dari tegangan keluaran converter. Indeks modulasi harus lebih besar dari 0 dan lebih rendah dari atau sama dengan 1.

Perubahan nilai parameter indeks modulasi dan frekuensi juga akan mengubah nilai tegangan keluaran antar fasa dari model universal bridge untuk inverter. Besar tegangan keluaran antar fasa tersebut adalah :

$$V_{LL_Converter} = m * \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} = m * V_{dc} * 0,7071 \quad \mathbf{3.22}$$

dengan

$V_{LL_Converter}$: Tegangan antar fasa keluaran model universal bridge untuk inverter dalam rms

m : Indek Modulasi

V_{dc} : Tegangan masukan searah pada model universal bridge untuk inverter

indeks modulasi dan nilai dari parameter frekuensi tegangan keluaran merupakan nilai yang dapat diubah-ubah pada simulasi skripsi ini.

Menentukan frekuensi PWM (Hz) dengan menyamakannya seperti yang digunakan pada PWM Generator (2 -level

BAB 4

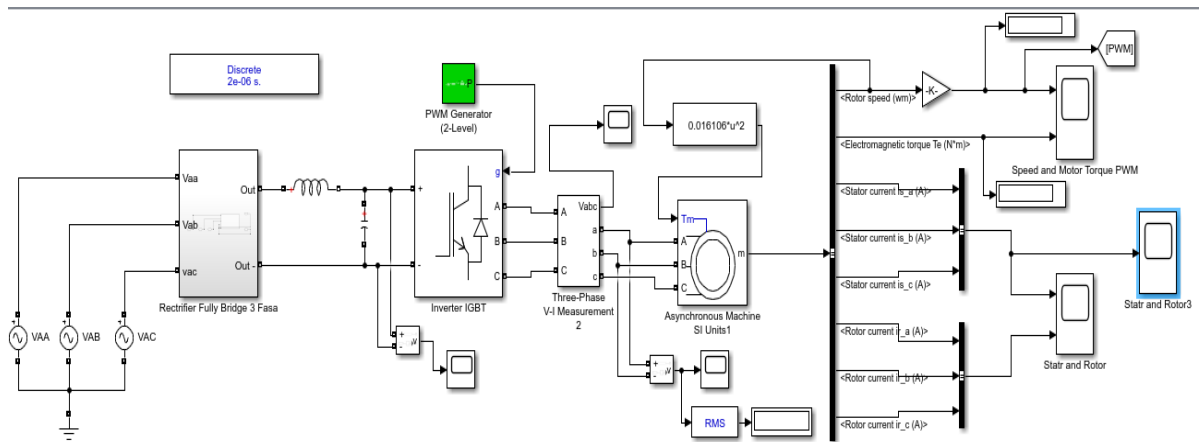
ANALISA HASIL PENELITIAN

Simulasi pada skripsi ini dilakukan dengan cara memvariasikan nilai frekuensi dan amplitudo tegangan masukan pada bagian stator dari motor induksi, dimana pengaturan nilai amplitudo tegangan masukan pada bagian stator dilakukan melalui pengaturan nilai indeks modulasi dan frekuensi switching pada model pulse PWM dan SVPWM generator. Nilai-nilai yang akan dianalisis pada simulasi ini adalah *Shaft mechanical torque (T_m)*, *Electromagnetic torque (T_e)*, *N.m*, *Rotor Speed (ω_m)*, *Nr*, *V Stator (V_{rms})*, *Stator Current (i_s)*, *Irms*, *Rotor Current (i_r)*, *Irms*, *Slip (%)*, *Frekuensi Slip (Hz)*, *THD V_s (%)* dan *THD i_s (%)*.

Berikut ini akan dijelaskan keseluruhan sistem dari simulasi pada skripsi ini. Sumber tegangan yang digunakan pada simulasi ini adalah sumber tegangan bolak-balik tiga fasa 565 Vrms dengan beda fasa 120°. Sumber tegangan bolak-balik tersebut kemudian akan disearahkan dengan menggunakan rectifier 3 fasa fully control. Tegangan searah yang dihasilkan oleh rectifier sebesar 808 Vdc akan dilewatkan melalui filter yang berupa kapasitor dan inductor. Tegangan searah yang dihasilkan setelah di filter sebesar 840 Vdc. Setelah melalui filter, tegangan searah tersebut akan menghasi menjadi masukan universal bridge inverter. Kemudian tegangan keluaran dari universal bridge inverter IGBT akan menjadi tegangan bolak-balik tiga fasa dengan nilai amplitudo dan frekuensi tertentu, sesuai dengan nilai yang dimasukkan pada blok parameter pulse PWM dan SVPWM generator. tegangan bolak-balik tiga fasa tersebut akan menjadi tegangan masukan untuk beban motor induksi.

4.1 Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives (Vfd) Menggunakan Pulse Generator PWM dan SVPWM

Rangkaian simulasi motor induksi tiga fasa dengan variable frequency drives menggunakan pulse generator PWM ditunjukkan pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Rangkaian Variable Frequency Drive

4.2 Tahapan Tahapan Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives Menggunakan Pulse Generator Pwm dan SVPWM

- Menyusun komponen komponen sistem Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives Menggunakan Pulse Generator Pwm dan SVPWM seperti yang diperlihatkan Gambar 4.1 pada halaman kerja Matlab Simulink.
- Memasukkan nilai parameter spesifikasi motor induksi 3 fasa yang terdapat pada Tabel 4.1 dengan cara mengklik gambar komponen Asynchronous Machine SI Unit (Motor Induksi) pada Gambar 4.1. Kemudian akan muncul kotak dialog yang berisi pengisian nilai nilai parameter spesifikasi motor induksi yang digunakan dalam simulasi pada Matlab Simulink. Parameter parameter spesifikasi yang terdapat di kotak dialog ialah Jenis Motor

- Sangkar, f_n (frekuensi, Hz), R_s (Resistansi Stator, ohm), R_r (Resistansi Rotor, ohm), P_n (Daya, HP), V_n (Tegangan Nominal, V), L_s (Induktansi Stator, H), L_r (Induktansi Rotor, H), L_m (Induktansi Bersama, H), J (Momen Inersia, kg.), p (Jumlah Kutub).
- Setelah mendapatkan hasil torsi nominal pada persamaan 3.20 bab 3, maka masukan persamaan torsi nominal pada model mesin induksi dimasukkan dengan menggunakan blok F_{cn} yang terdapat pada library Simulink yang dihubungkan dengan torsi mekanik, seperti yang terlihat pada gambar 4.1
- Melakukan pengaturan waktu pada Pulse Generator yang terdapat pada Parameter Rectrifier Fully Bridge Tiga Fasa yang terdapat 6 buah komponen Pulse Generator. Jadi nantinya pada setiap Pulse Generator tadi akan dipasang pengaturan waktu yang berbeda beda satu sama lain. Tujuan pengaturan waktu yang berbeda beda satu sama lain pada masing masing keenam komponen Pulse Generator ialah agar keenam sakelar yang berupa komponen Thyristor, yang dipasang Pulse Generator yang waktu telah diatur, akan hidup (ON) dan mati (OFF) secara bergantian, dimana hal tersebut juga merupakan prinsip kerja dari Inverter Pulse Width Modulation (PWM).
- Cara melakukan pengaturan waktu pada Pulse Generator ialah dengan double click pada komponen Pulse Generator di Gambar 4.1 lalu akan muncul kotak dialog Pulse Generator. Pada kotak dialog tersebut akan ada pengisian Amplitudo, Periode (secs) , Pulse Width (% of period) dan Phase delay (secs) .
- Menentukan indeks modulasi dan frekuensi pada gate universal IGBT (pulse generator PWM/SVPWM) untuk mendapatkan nilai tegangan keluaran dari inverter. Untuk merubah indeks modulasi dan frekuensi dapat dilakukan dengan double click pada komponen pulse generator PWM dan SVPWM seperti di gambar 3.14 dan 3.16 .
- Menjalankan program simulink, yaitu dengan cara men-click run untuk memberi perintah menjalankan program Simulink tersebut.

- Mengetahui *Electromagnetic torque (Te) N.m, Rotor Speed (wm) Nr*, dilakukan dengan cara double click pada komponen Scope yang terhubung dengan komponen Output Motor Induksi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.1. dan untuk mengetahui *total harmonic distortion, V Stator (Vrms) Stator Current (is), Irms, dan Rotor Current (ir)* dengan cara double click parameter powergui > tools > FFT Analysis > lalu pilih hasil scope yang ingin ditampilkan.

4.3 Hasil Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives (Vfd) Menggunakan Pulse Generator PWM dan SVPWM

Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives (Vfd) Menggunakan Pulse Generator PWM dan SVPWM ini dilakukan untuk memvariasikan kecepatan dan torsi beban dengan mengubah indeks modulation (1 - 0,3) dan frekuensi (50 - 20 Hz). Merujuk pada persamaan **3. 21** maka besar keluaran tegangan stator dengan mengubah indeks modulasi menggunakan Pulse Generator PWM ini adalah :

$$V_{LL_Converter} = m * \frac{V_{dc}}{2} * \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = m * V_{dc} * 0,6124$$

$$V_{LL_Converter} = 1 * 840 * 0,6124 = 514 \text{ Vrms}$$

m = indeks modulasi (1 - 0,3) yang digunakan untuk simulasi

Vdc = Tegangan masukan searah pada model universal bridge untuk inverter

Dnan merujuk pada persamaan 3. 22 maka besar keluaran tegangan stator dengan mengubah indeks modulasi menggunakan Pulse Generator SVPWM ini adalah :

$$V_{LL_Converter} = m * \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} = m * V_{dc} * 0,7071$$

$$V_{LL_Converter} = 1 * 844 * 0,7071 = 597 \text{ Vrms}$$

m = indeks modulasi (1 - 0,3) yang digunakan untuk simulasi

V_{dc} = Tegangan masukan searah pada model universal bridge untuk inverter

4.3.1 Hasil Simulasi dengan Masukan Indeks Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 50 hz

Pada simulasi ini, frekuensi tegangan stator yang digunakan adalah 50 Hz dengan nilai indeks modulasi yang divariasikan antara 1 - 0,3. Dengan frekuensi tegangan stator dan jumlah kutub kumparan stator yang sama maka kecepatan sinkron dari motor induksi yang digunakan pada percobaan ini adalah :

$$n_s = \frac{120}{f} \cdot f = \frac{120}{4} \cdot 50 = 1500 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 1500 \times \frac{2\pi}{60} = 157,14 \text{ rad/s}$$

Pada daya nominal P_n 4000 kW, maka torsi nominal T_m adalah

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_s} = \frac{4000}{157,14} = 25,455 \text{ Nm}$$

Dengan memasukkan torsi beban 25,455 Nm, dari simulasi yang telah dilakukan maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

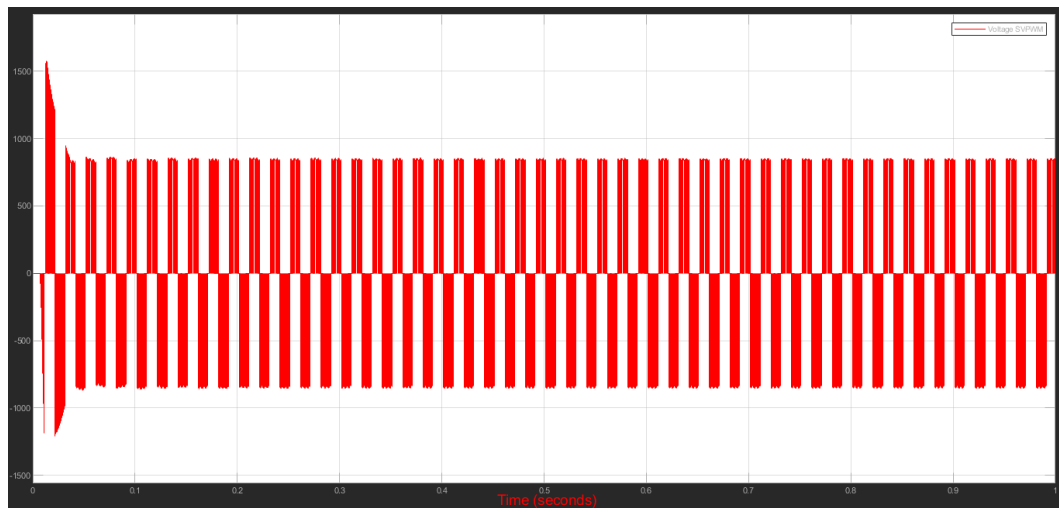
Tabel 4.1 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1

T_m (N.m)	T_e (N.m)	rpm (Nr)	V_{LL} (Vrms)	I_s (irms)	I_r (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
25,45	28,4	1466	517,5	7	0,2	2,26	1,13	0,77	81,39	1,56

Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

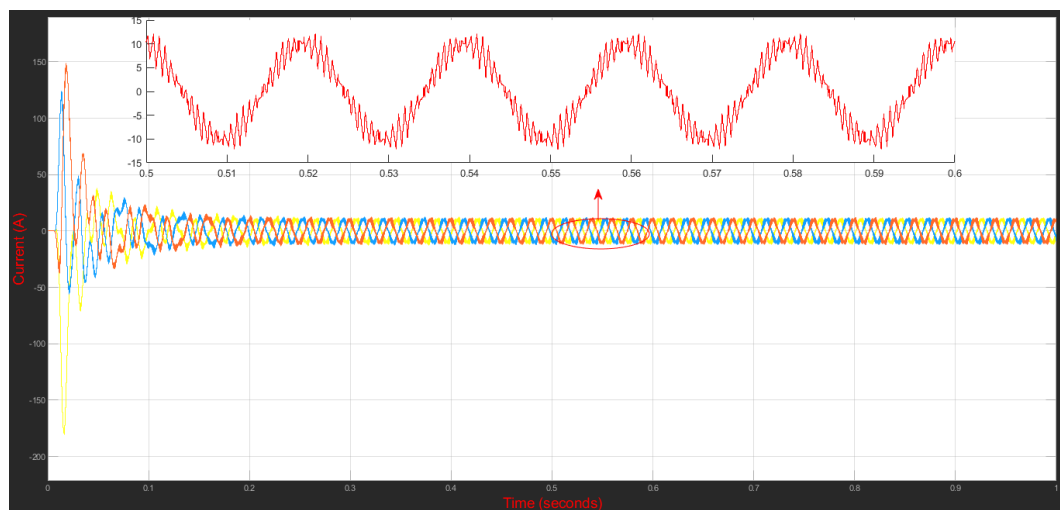
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1466}{1500} = 2,267 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,267 \times 50 = 1,133 \text{ Hz.}$$

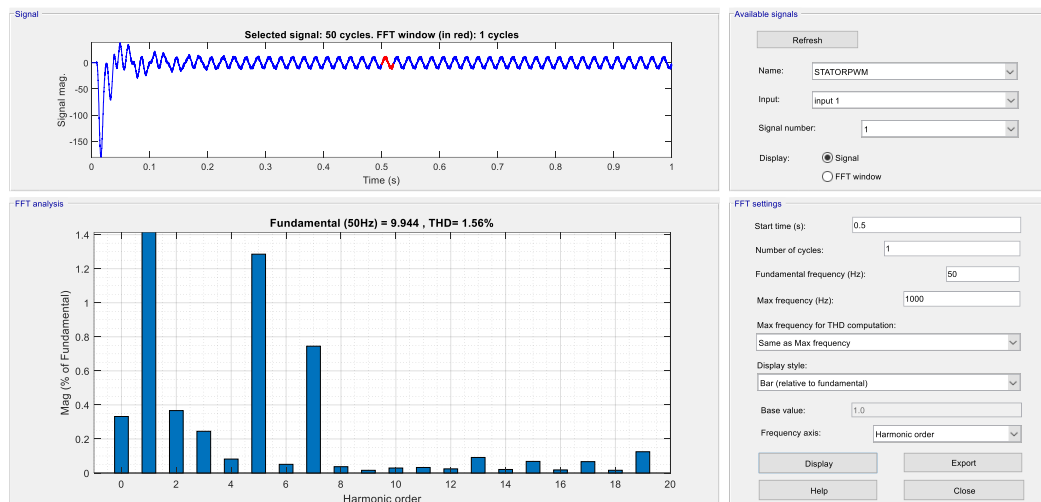


Gambar 4.2 Tegangan Keluaran Inverter

Pada Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives (Vfd) Menggunakan Pulse Generator PWM tegangan keluaran dari inverter adalah sama untuk semua kondisi yang dilakukan melalui simulasi.



Gambar 4.3 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7



Gambar 4.4 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.4 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,56 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kedua, indeks modulasi yang digunakan adalah 0.9. Dengan indeks modulasi 0.9 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

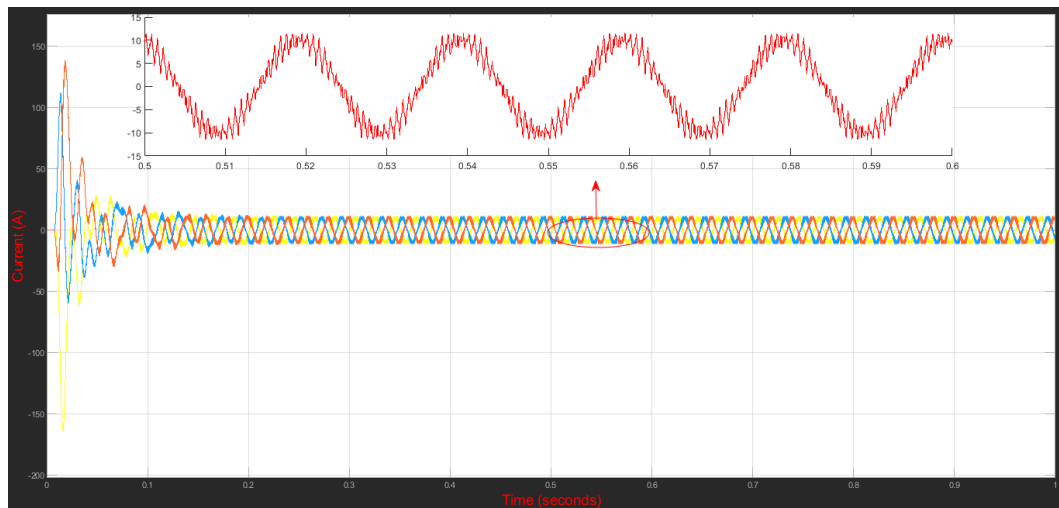
Tabel 4.2: Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,9

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
25,45	25	1458	465,5	7	0,12	2,8	1,4	0,77	151	1,47

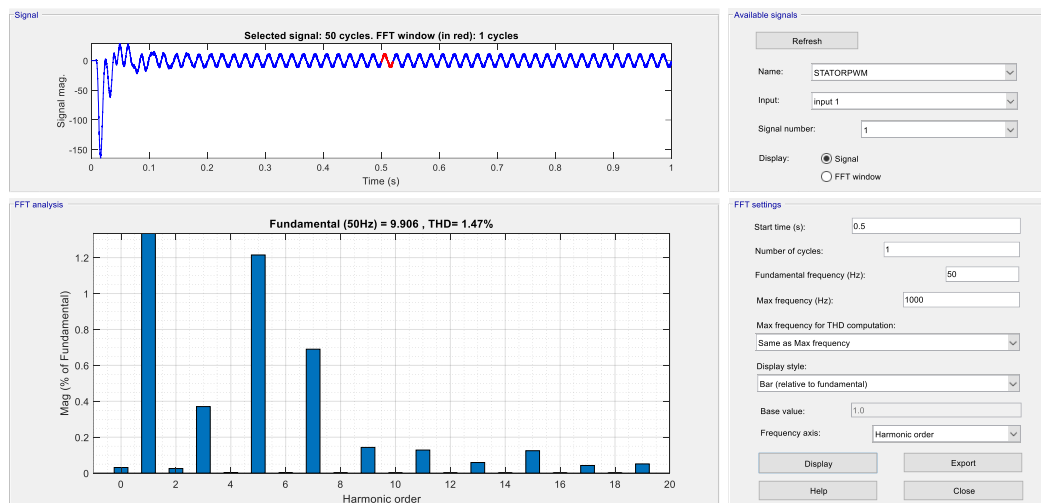
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1458}{1500} = 2,8 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,8 \times 50 = 1,4 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.5 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan I_{rms} 7



Gambar 4.6 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.6 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,47 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi ketiga, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,8. Dengan indeks modulasi 0,8 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

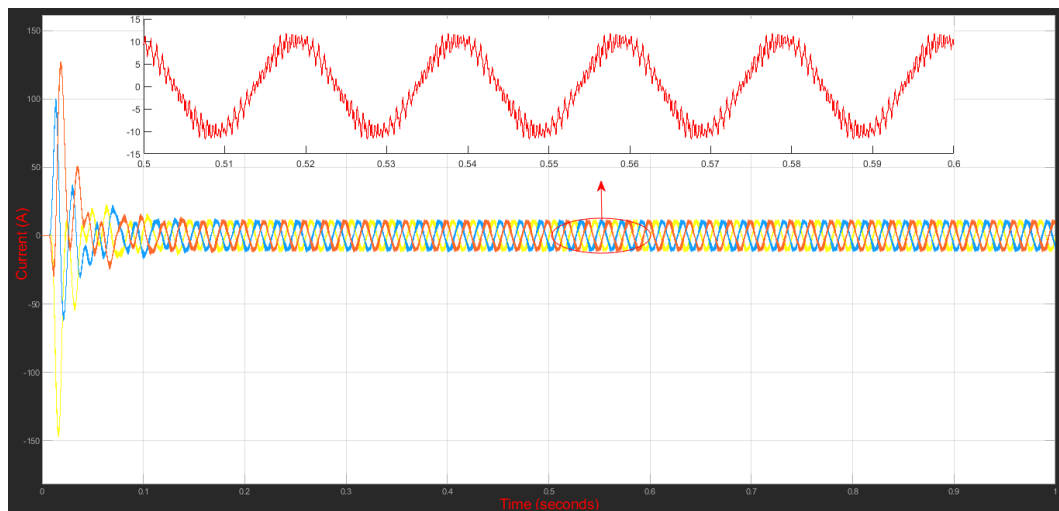
Tabel 4.3 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
25,45	22	1447	414	7,2	0,27	3,533	1,76	0,70	76,2	1,1

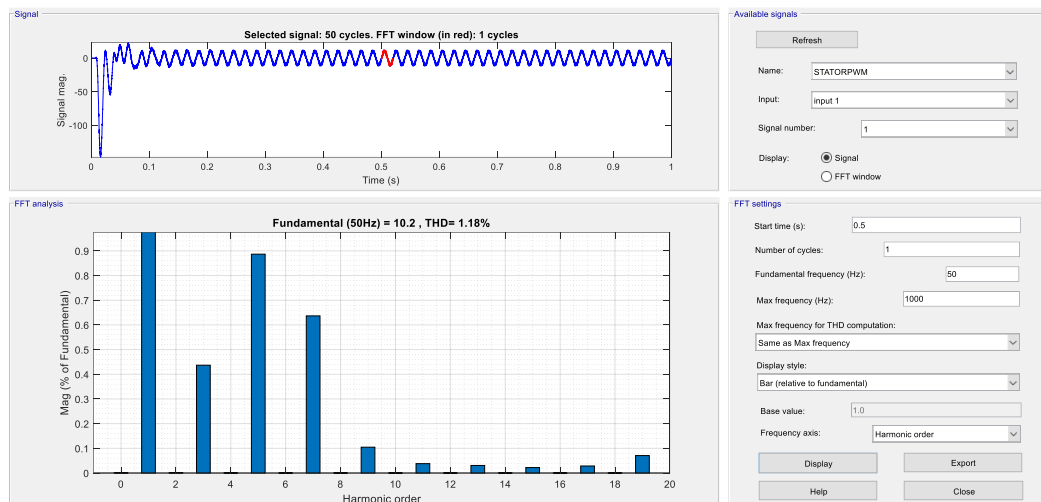
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1447}{1500} = 3,53 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = s f = 3,53 \times 50 = 1,76 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.7 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7



Gambar 4.8 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.8 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,18 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi keempat, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,7. Dengan indeks modulasi 0,7 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

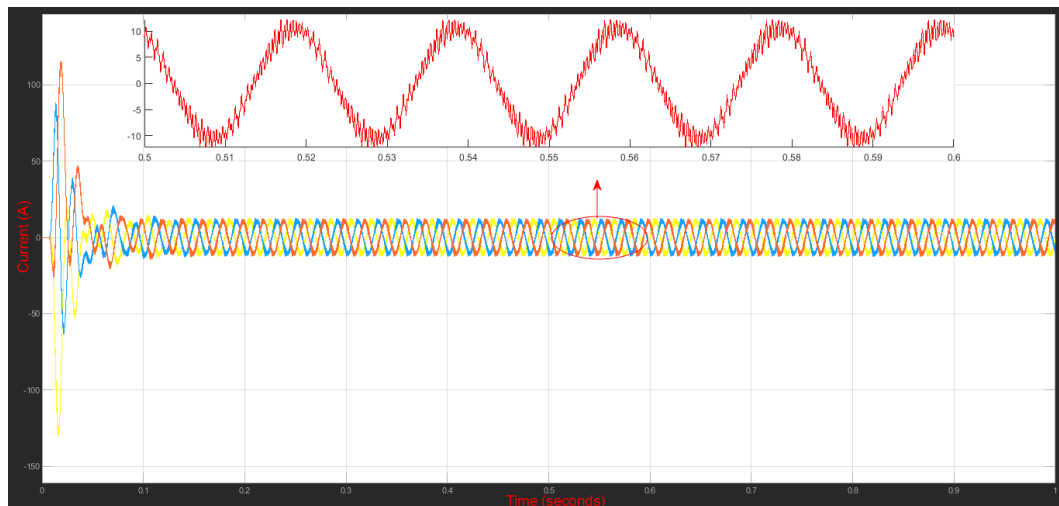
Tabel 4.4 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi 0,7

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
25,45	21	1430	362,9	7,5	0,3	4,66	2,33	0,33	74,37	1,04

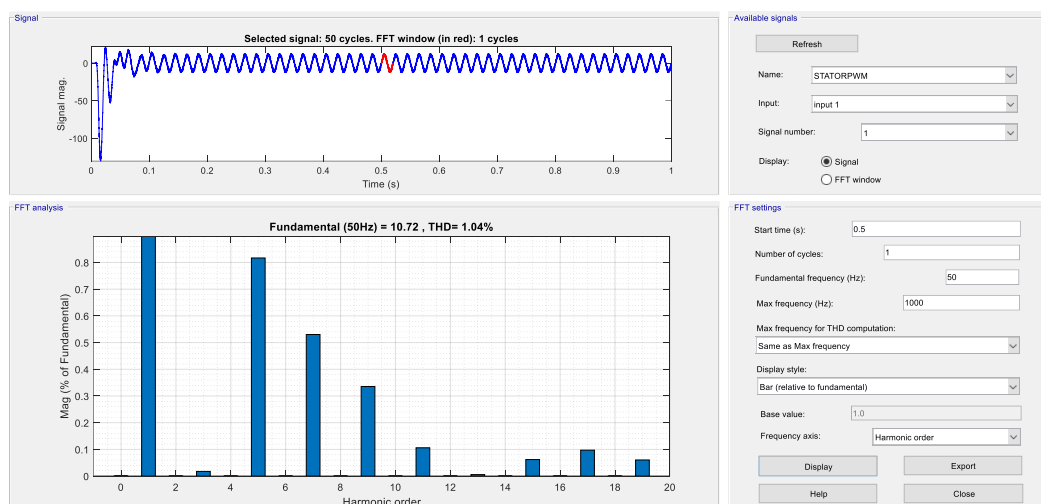
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1430}{1500} = 4,66 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 4,66 \times 50 = 2,33 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.9 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7,5



Gambar 4.10 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.9 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,04 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kelima, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,5. Dengan indeks modulasi 0,5 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

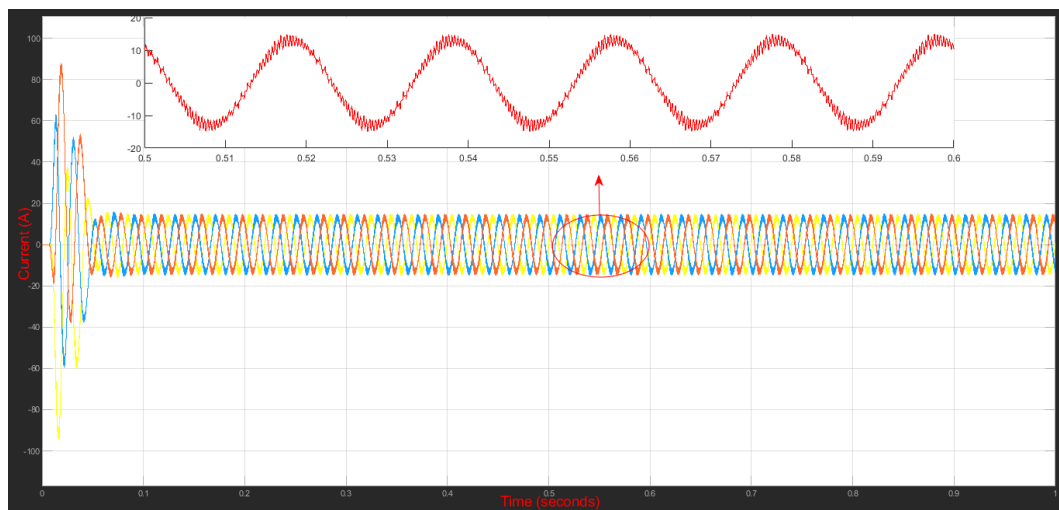
Tabel 4.5 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi 0,5

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
25,45	20	1361	258,8	9,1	1,58	9,26	4,63	0,96	80	0,81

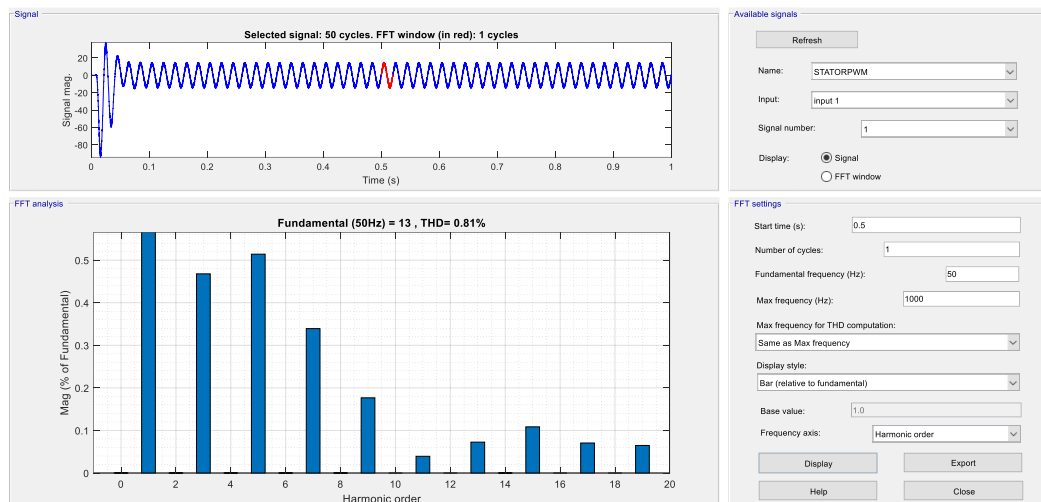
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1361}{1500} = 9,26 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 9,26 \times 50 = 4,63 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.11 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9,1



Gambar 4.12 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.12 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 0,81 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi keenam, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,3. Dengan indeks modulasi 0,3 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

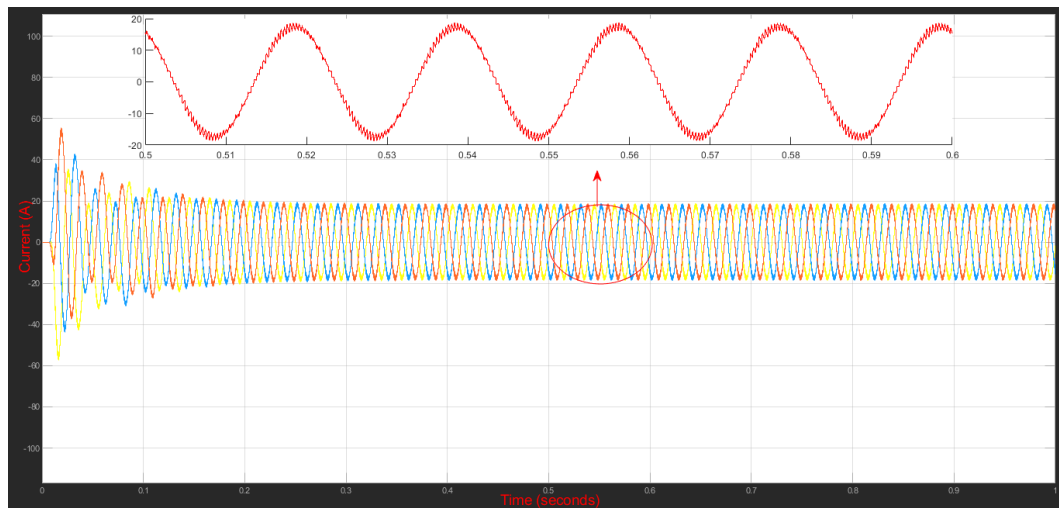
Tabel 4.6 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi 0,3

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
25,45	13	1081	155,6	12,4	6,3	27,93	13,9	1,02	71,8	0,4

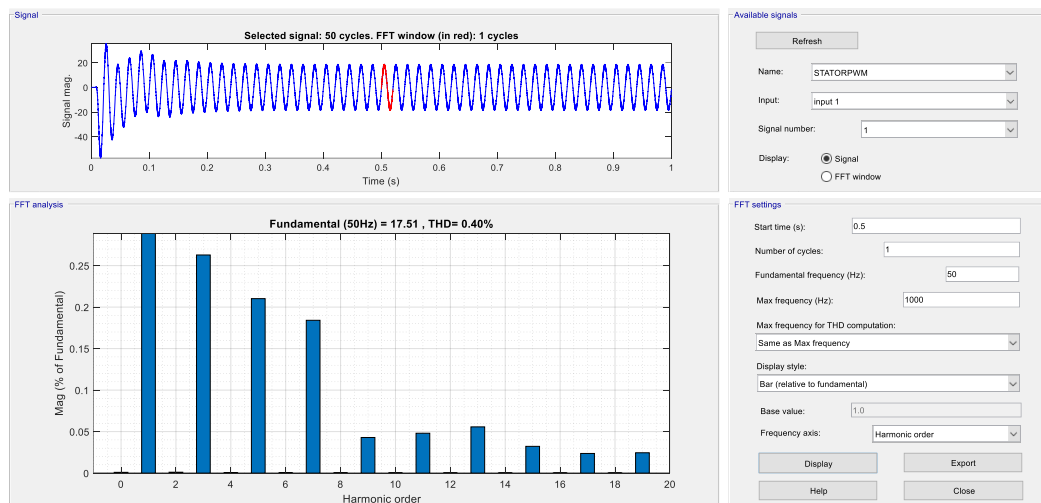
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1081}{1500} = 27,93 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 27,93 \times 50 = 13,9 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.13 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 12,4



Gambar 4.14 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.14 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 0,40 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

4.3.2 Hasil Simulasi SVPWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 50 hz

Pada simulasi pertama, frekuensi tegangan stator yang digunakan adalah 50 Hz dengan nilai indeks modulasi yang divariasikan antara 1 - 0,3. Dengan

frekuensi tegangan stator dan jumlah kutub kumparan stator yang sama maka kecepatan sinkron dari motor induksi yang digunakan pada percobaan ini adalah :

$$n_s = \frac{120}{f} \cdot f = \frac{120}{4} \cdot 50 = 1500 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 1500 \times \frac{2\pi}{60} = 157,14 \text{ rad/s}$$

Pada daya nominal P_n 4000 kW, maka torsi nominal T_m adalah

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_s} = \frac{4000}{157,14} = 25,455 \text{ Nm}$$

Dengan memasukkan torsi beban 25,455 Nm, dari simulasi yang telah dilakukan maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

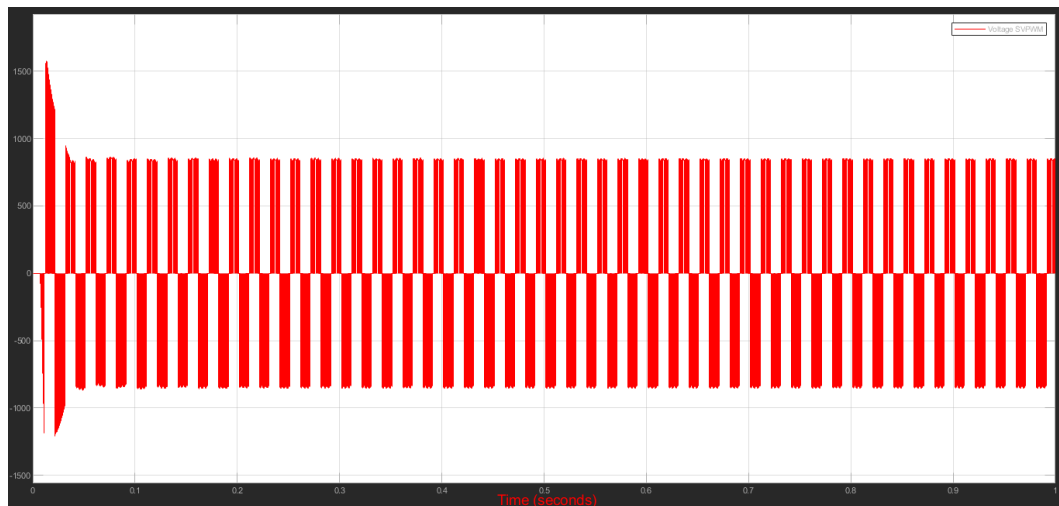
Tabel 4.7 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	V _{LL} (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
25,45	25,4	1477	597	7,3	0,3	1,53	0,76	5,6	72	4,8

Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

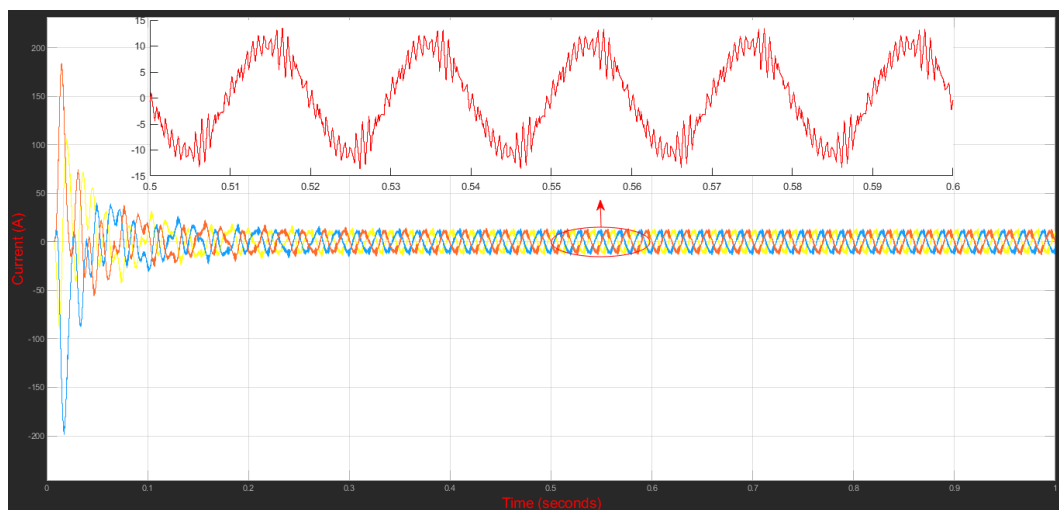
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1477}{1500} = 1,53 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 1,53 \times 50 = 0,76 \text{ Hz.}$$

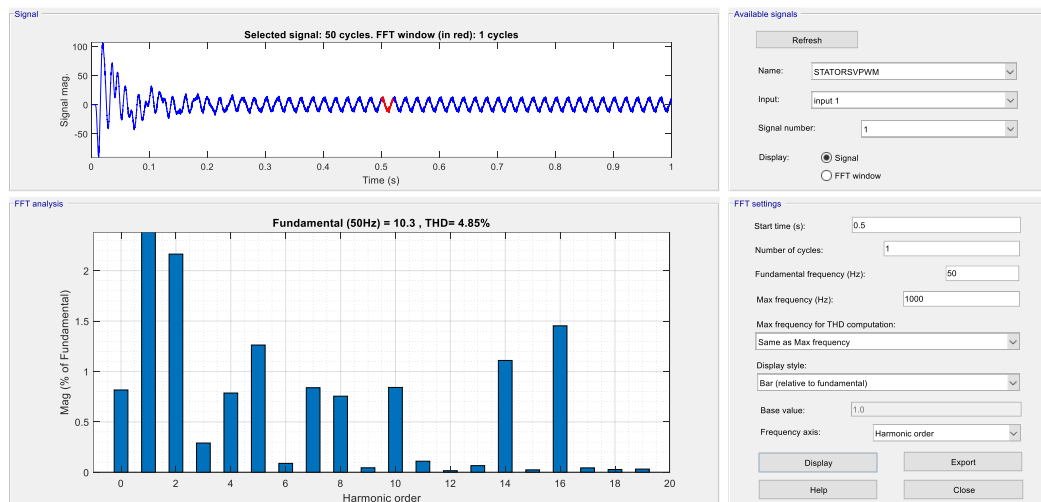


Gambar 4.15 Tegangan Keluaran Inverter

Pada Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives (Vfd) Menggunakan Pulse Generator PWM tegangan keluaran dari inverter adalah sama untuk semua kondisi yang dilakukan melalui simulasi.



Gambar 4.16 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7,3



Gambar 4.17 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.17 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonik sebesar 4,85 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kedua, indeks modulasi yang digunakan adalah 0.9. Dengan indeks modulasi 0.9 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

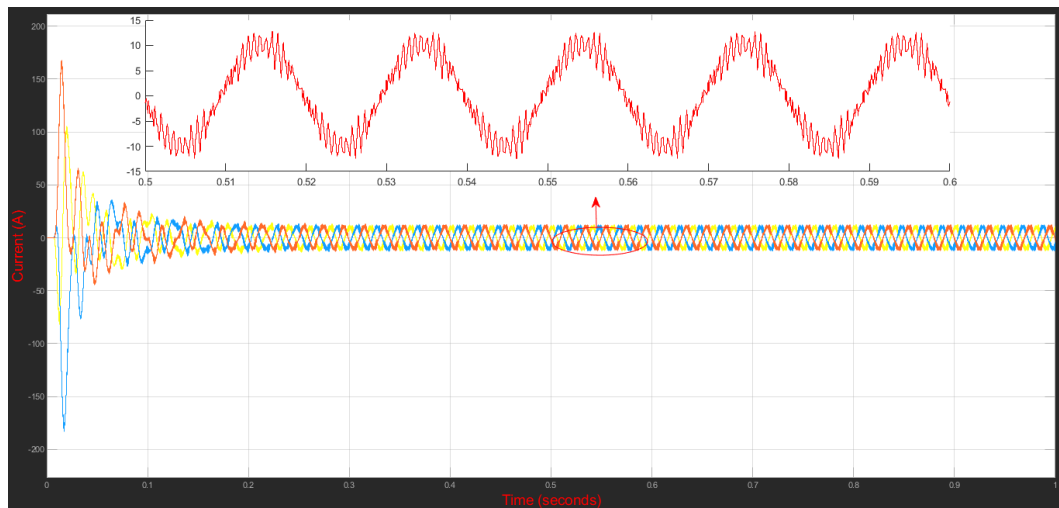
Tabel 4.8 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
25,45	24	1469	537	7,1	0,2	2,06	1,03	5,2	64	4,1

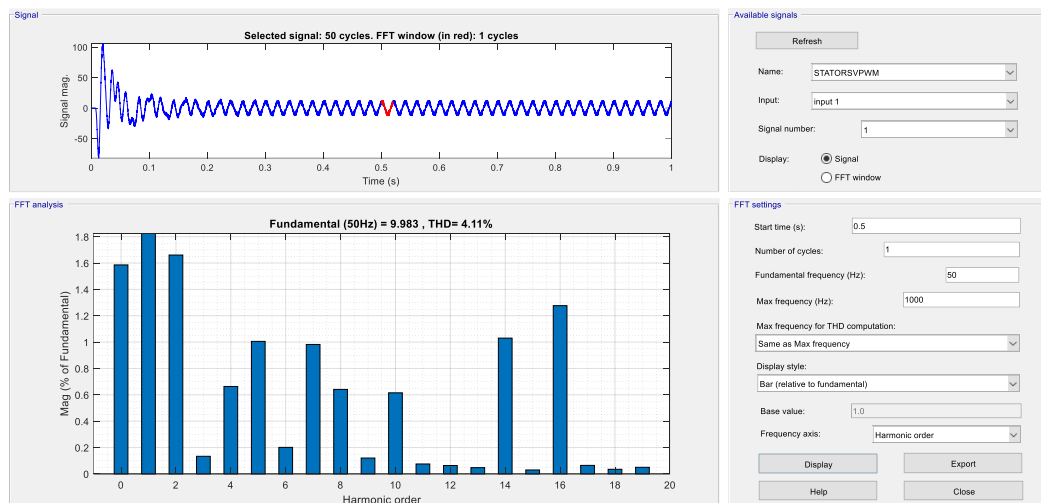
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1469}{1500} = 2,06 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = s f = 2,06 \times 50 = 1,03 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.18 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7,1



Gambar 4.19 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.19 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 4,11 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi ketiga, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,8. Dengan indeks modulasi 0,8 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

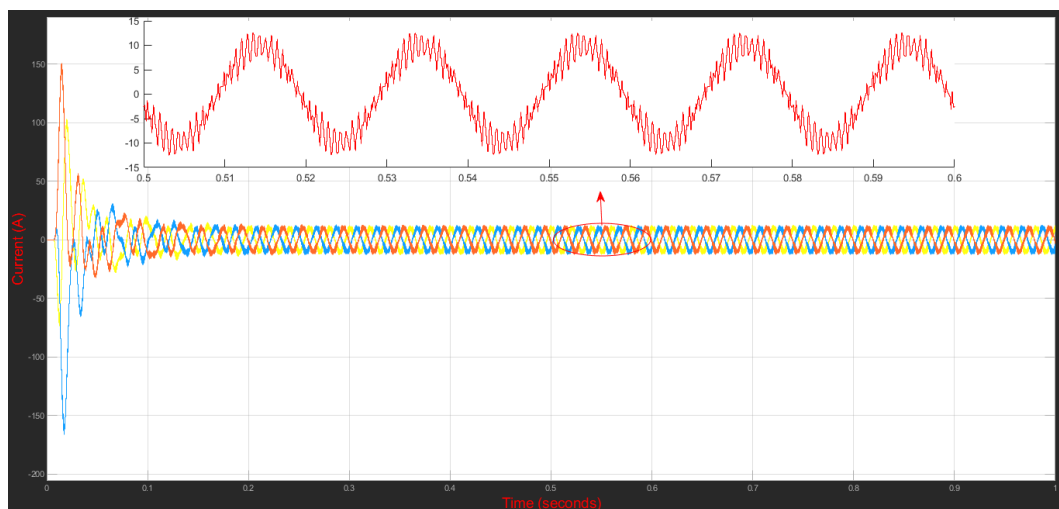
Tabel 4.9 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8

Tm	Te	rpm	Vs	Is	Ir	Slip	Fslip	THD	THD	THD
(N.m)	(N.m)	(Nr)	(Vrms)	(irms)	(irms)	(%)	(Hz)	Vs (%)	Ir (%)	Is (%)
25,45	24	1459	477	7	0,1	2,73	1,36	4,58	105	3

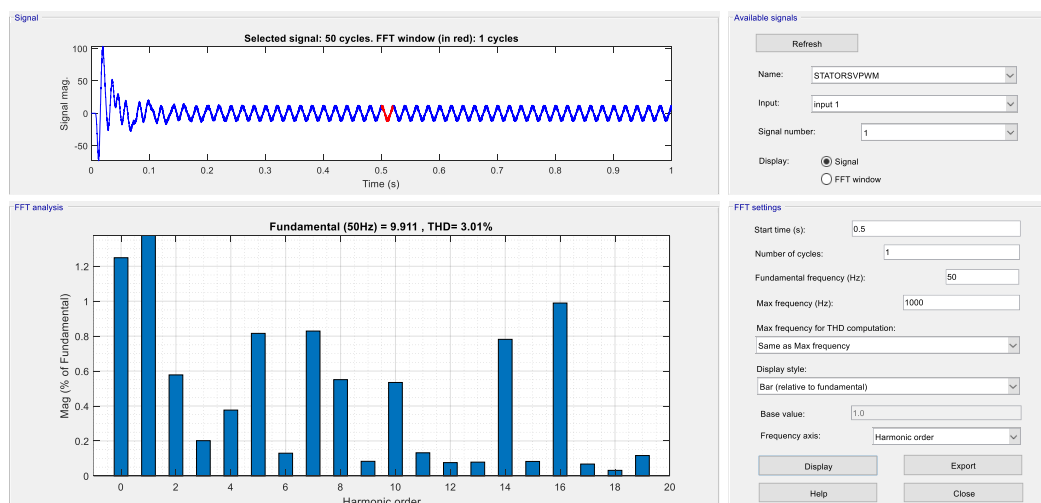
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{ns - nr}{ns} = \frac{1500 - 1459}{1500} = 2,73 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,73 \times 50 = 1,36 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.20 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7



Gambar 4.21 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.21 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 3 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi keempat, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,7. Dengan indeks modulasi 0,7 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

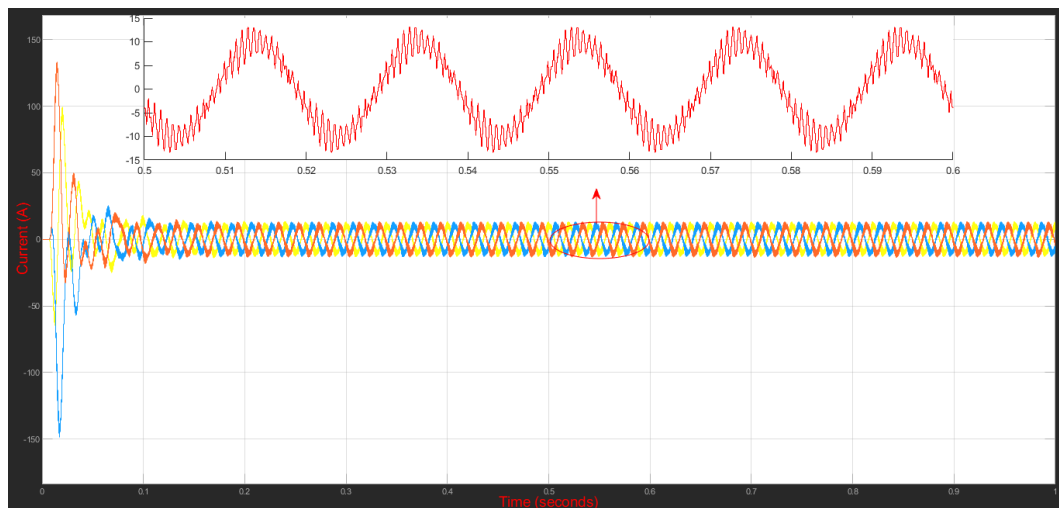
Tabel 4.10 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
25,45	24,9	1447	417	7,1	0,35	3,53	1,76	3,8	68	2,24

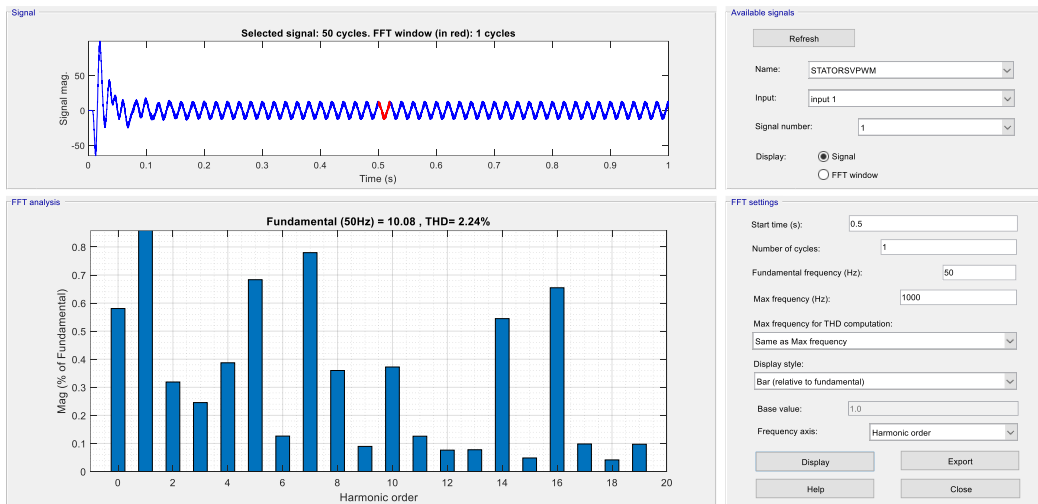
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1447}{1500} = 3,53 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 3,53 \times 50 = 1,76 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.22 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7,1



Gambar 4.23 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.23 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 2,24 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kelima, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,5. Dengan indeks modulasi 0,5 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

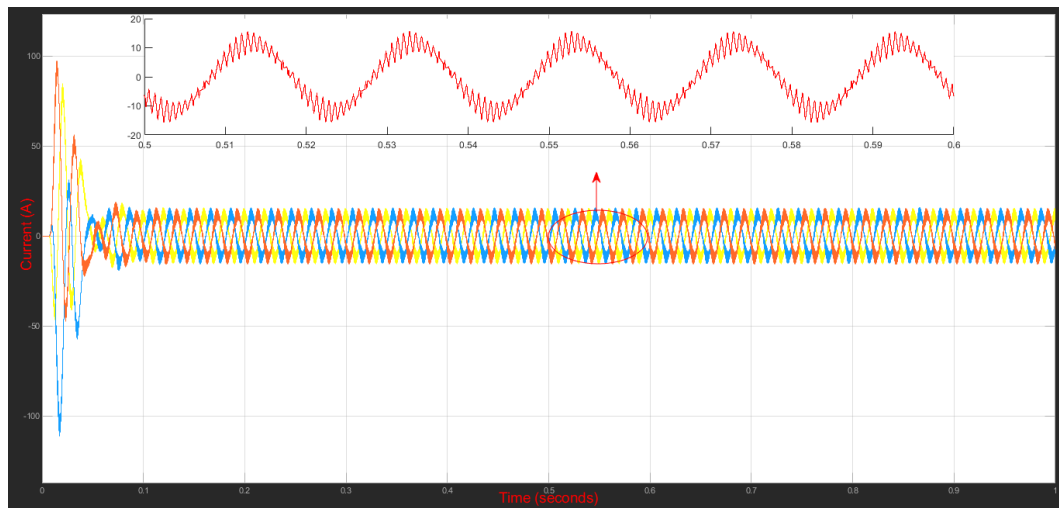
Tabel 4.11 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,5

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
25,45	22,5	1369	298,5	8,3	1,03	6,93	3,46	2,26	75	1,05

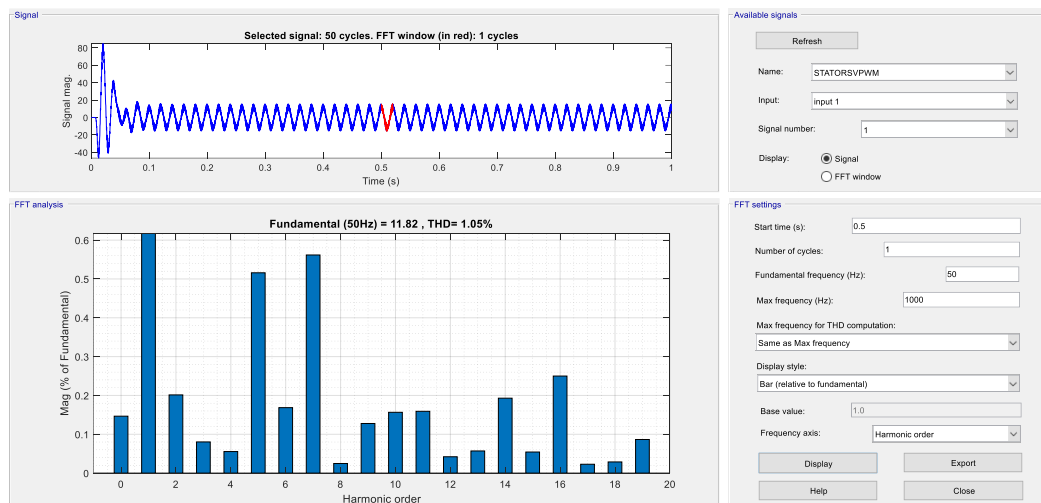
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{ns-nr}{ns} = \frac{1500-1369}{1500} = 6,93 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 6,93 \times 50 = 3,46 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.24 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 8,3



Gambar 4.25 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.25 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 1,05 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi keenam, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,3. Dengan indeks modulasi 0,3 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

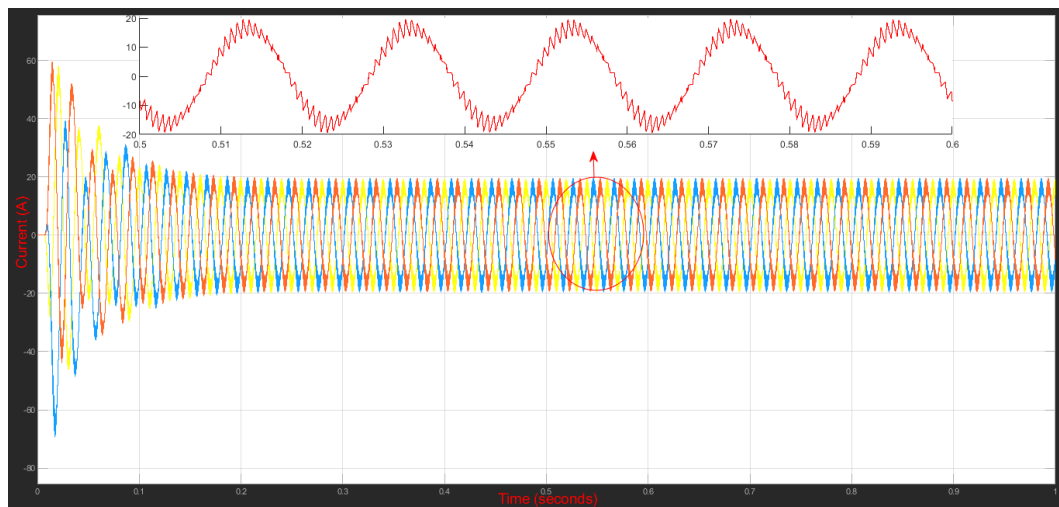
Tabel 4.12 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,3

Tm	Te	rpm	Vs	Is	Ir	Slip	Fslip	THD	THD	THD
(N.m)	(N.m)	(Nr)	(Vrms)	(irms)	(irms)	(%)	(Hz)	Vs(%)	Ir(%)	Is (%)
25,45	16	1192	179,4	11,7	1,3	20,53	10,26	1,27	55	0,49

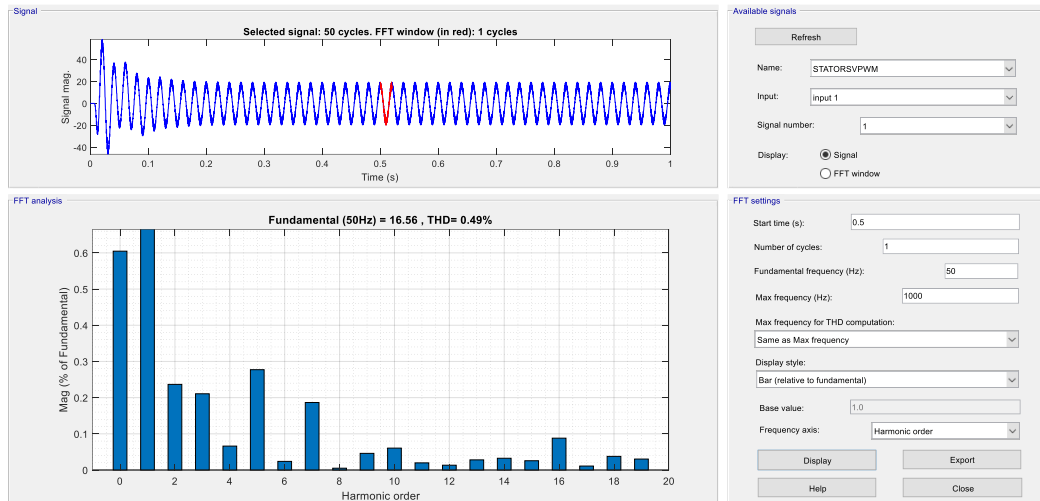
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1500 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{ns - nr}{ns} = \frac{1500 - 1192}{1500} = 20,53 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 20,53 \times 50 = 10,26 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.26 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,7



Gambar 4.27 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.27 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 50 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 0,49 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Tabel 4.13 Hasil Simulasi PWM dan SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 1-0.3 menggunakan frekuensi 50 Hz

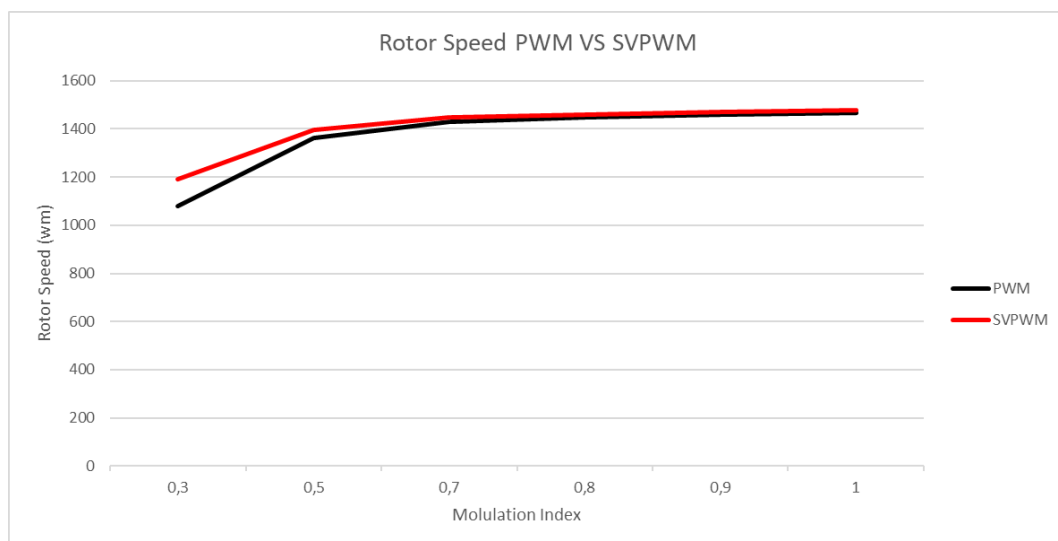
Metode	Tm (N.m)	M. Index	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is(%)	TDD IEEE STD 519-2014
PWM	25,45	1	28,4	1466	517,5	7	0,2	2,26	1,13	0,77	81,39	1,56	5%
		0,9	25	1458	465,5	7,2	0,12	2,8	1,4	0,77	151	1,47	
		0,8	22	1447	414	7,2	0,27	3,533	1,76	0,70	76,2	1,1	
		0,7	21	1430	362,9	7,5	0,3	4,66	2,33	0,33	74,37	1,04	
		0,5	20	1361	258,8	9,1	1,58	9,26	4,63	0,96	80	0,81	
		0,3	13	1081	155,6	12,4	6,3	27,93	13,9	1,02	71,8	0,4	
SVPWM	25,45	1	25,4	1477	597	7,3	0,3	1,53	0,76	5,6	72	4,8	
		0,9	24	1469	537	7,1	0,2	2,06	1,03	5,2	64	4,1	
		0,8	24	1459	477	7	0,1	2,73	1,36	4,58	105	3	
		0,7	24,9	1447	417	7,1	0,35	3,53	1,76	3,8	68	2,24	
		0,5	22,5	1369	298,5	8,3	1,03	6,93	3,46	2,26	75	1	
		0,3	16	1192	179,4	11,7	1,3	20,53	10,26	1,27	55	0,49	

Dari **Table 4.13** terlihat perbandingan antara kendali PWM dan SVPWM dengan modulasi indeks yang sama pada frekuensi 50 Hz. Pada percobaan pertama sampai dengan percobaan keenam, semakin besar nilai indeks modulasi maka nilai dari tegangan stator juga akan semakin besar. Hal ini terjadi karena nilai tegangan stator merupakan fungsi dari indeks modulasi dan tegangan searah yang merupakan masukan dari universal bridge inverter. Nilai kecepatan putar rotor pada frekuensi 50 Hz semakin meningkat mengikuti peningkatan dari amplitudo tegangan stator. Kecepatan putar rotor akan meningkat seiring dengan kenaikan indeks modulasi, hal ini terjadi karena percepatan putar rotor dari motor induksi berbanding lurus dengan peningkatan nilai torsi elektromagnetik sesuai dengan persamaan 3.12 . Grafik peningkatan nilai kecepatan putar rotor tersebut dapat dilihat pada **gambar 4.28** dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM , terlihat pada perbedaan rpm, dimana rotor speed dari SVPWM mencapai 1477-1192 Nr sedangkan untuk PWM mencapai 1466-1081 Nr yang dibandingkan dengan kecepatan sinkron pada motor induksi yang digunakan adalah 1500 Ns.

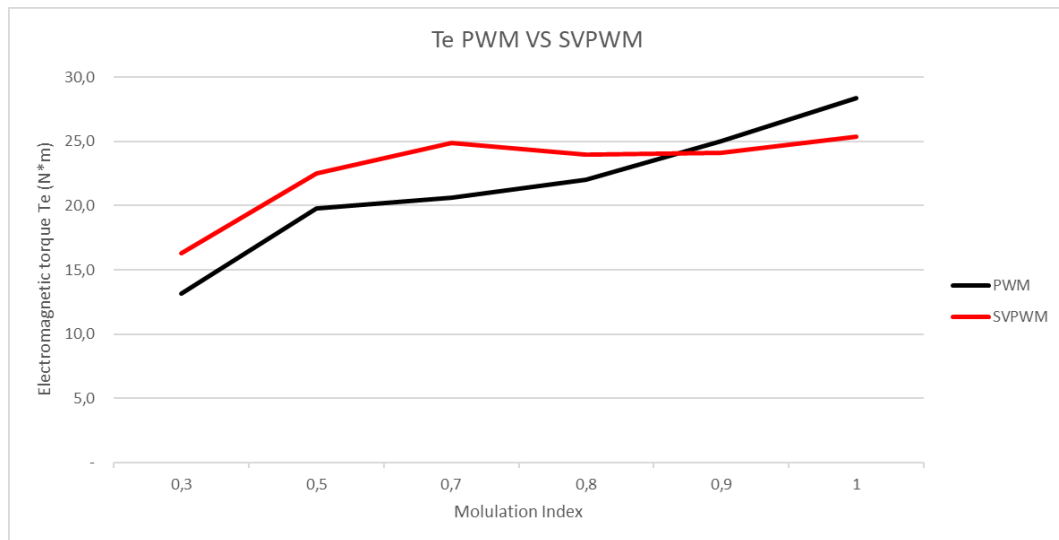
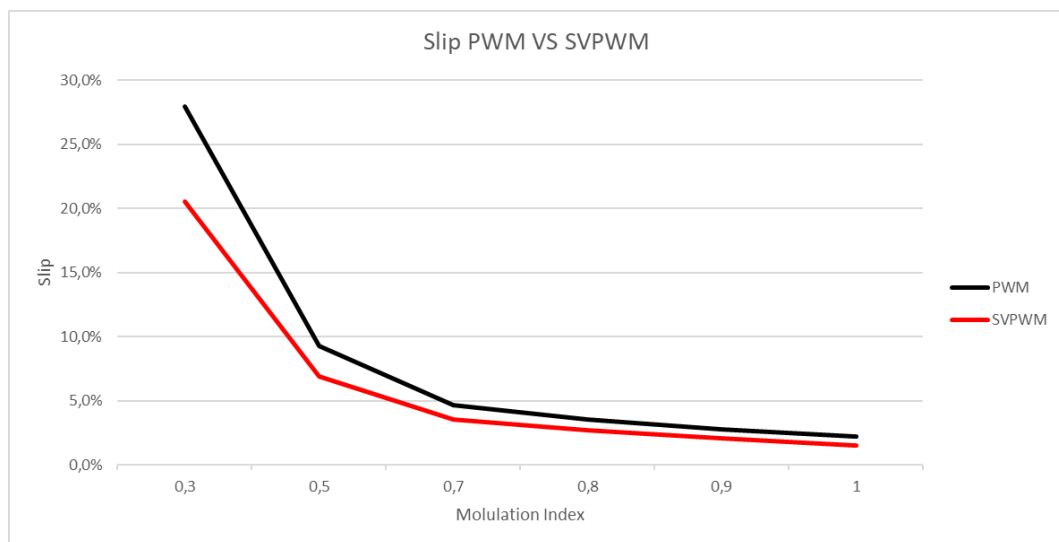
Kenaikan nilai indeks modulasi dengan nilai frekuensi yang sama pada percobaan pertama sampai dengan percobaan keenam juga mengakibatkan kenaikan nilai torsi elektromagnetik. Hal ini terjadi karena semakin meningkatnya tegangan stator (indeks modulasi) maka fluks celah udara yang dihasilkan akan semakin meningkat, sehingga nilai dari torsi elektromagnetik juga akan meningkat. Grafik kenaikan nilai torsi elektromagnetik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.29.

Nilai slip pada percobaan dengan frekuensi 50 Hz ini akan terus menurun mengikuti peningkatan nilai amplitudo tegangan stator. Hal ini terjadi karena semakin besar amplitudo tegangan stator maka nilai kecepatan putar rotor juga akan semakin besar, sehingga dengan nilai kecepatan medan putar stator yang tetap pada 1500 rpm maka nilai slip akan semakin berkurang. Grafik penurunan nilai slip tersebut dapat dilihat pada gambar 4.30 dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM dengan perbandingan slip 1,53% - 13,9 % (dengan indek modulasi 1 - 0,3) pada kendali SVPWM dan untuk kendali PWM 2,26% - 27,93 % (dengan indek modulasi 1 - 0,3). Nilai frekuensi slip pada percobaan pertama sampai dengan percobaan keenam akan terus menurun seiring dengan kenaikan indeks modulasi.

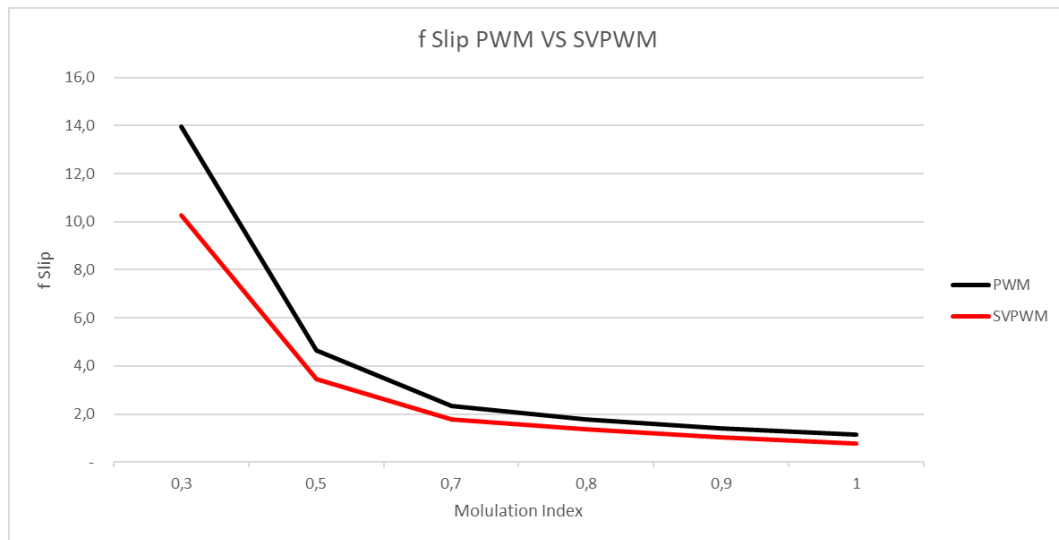
ini terjadi karena persamaan frekuensi slip dari motor induksi merupakan fungsi dari nilai slip dan nilai frekuensi stator, sehingga dengan nilai frekuensi stator yang tetap pada 50 Hz dan nilai slip yang semakin menurun mengikuti kenaikan dari indeks modulasi maka nilai dari frekuensi slip juga akan semakin menurun. Grafik penurunan nilai frekuensi slip pada setiap kenaikan nilai indeks modulasi dapat dilihat pada gambar 4.31 dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM dengan perbandingan frekuensi slip 0,76 Hz – 10,26 Hz (dengan indek modulasi 1 - 0,3) pada kendali SVPWM dan untuk kendali PWM 1,13 Hz – 13,9 Hz (dengan indek modulasi 1 - 0,3). Sedangkan untuk nilai total harmonic distortion, kendali PWM lebih optimal dari pada SVPWM. Grafik arus THD pada setiap kenaikan nilai indeks modulasi dapat dilihat pada gambar 4.32



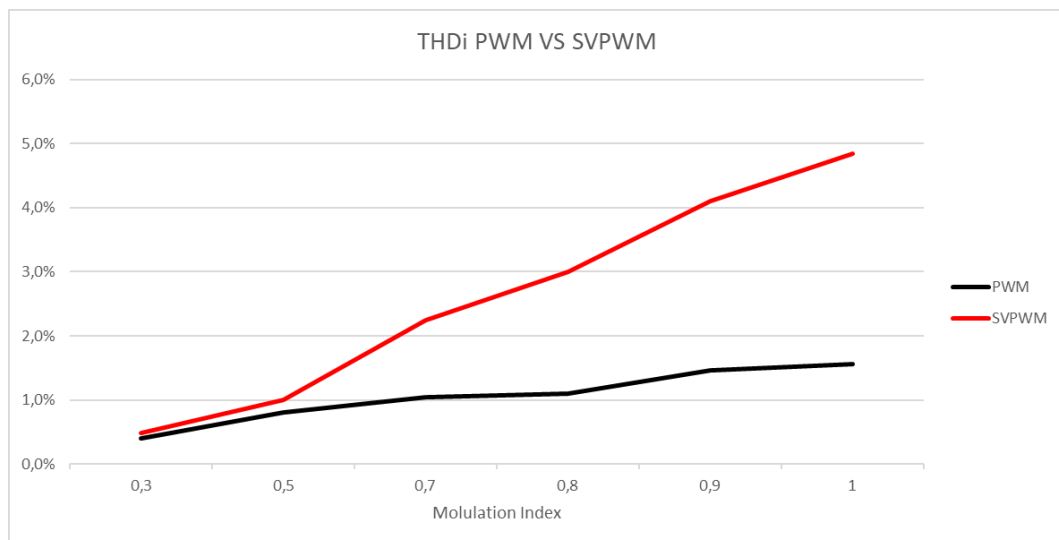
Gambar 4.28 Grafik Perbandingan Rotor Speed PWM dengan SVPWM

Gambar 4.29 Grafik Perbandingan T_e PWM dan SVPWM

Gambar 4.30 Grafik Perbandingan Slip PWM dan SVPWM



Gambar 4.31 Grafik Perbandingan Frekuensi Slip PWM dan SVPWM



Gambar 4.32 Grafik Perbandingan THDi PWM dan SVPWM

4.3.3 Hasil Simulasi PWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 40 hz

Pada simulasi ketujuh, frekuensi tegangan stator yang digunakan adalah 40 Hz dengan nilai indeks modulasi yang divariasikan antara 1 - 0,3. Dengan frekuensi tegangan stator dan jumlah kutub kumparan stator yang sama maka kecepatan sinkron dari motor induksi yang digunakan pada percobaan ini adalah :

$$n_s = \frac{120}{f} \cdot f = \frac{120}{4} \cdot 40 = 1200 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 1200 \times \frac{2\pi}{60} = 125,71 \text{ rad/s}$$

Pada daya nominal P_n 4000 kW, maka torsi nominal T_m adalah

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_s} = \frac{4000}{125,71} = 31,818 \text{ Nm}$$

Dengan memasukkan torsi beban 38,818 Nm, dari simulasi yang telah dilakukan maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

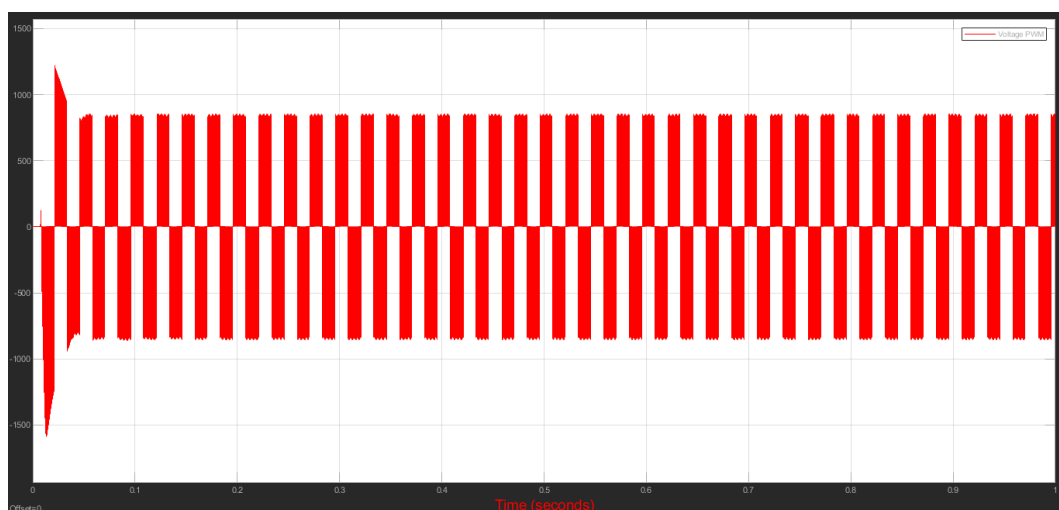
Tabel 4.14 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
31,81	35,97	1171	515	8	0,12	2,41	0,96	3,38	125	1,8

Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

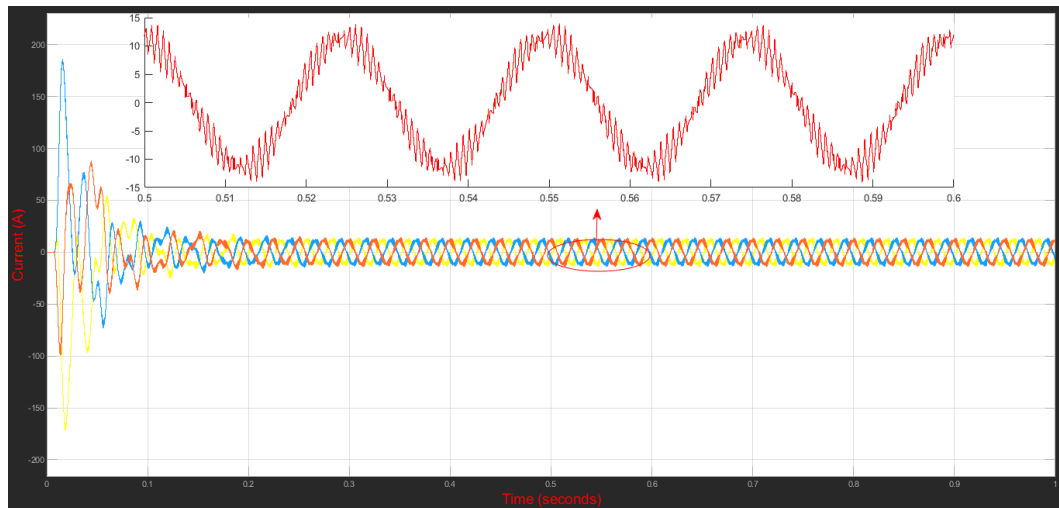
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1200 - 1171}{1200} = 2,41 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,41 \times 40 = 0,96 \text{ Hz.}$$

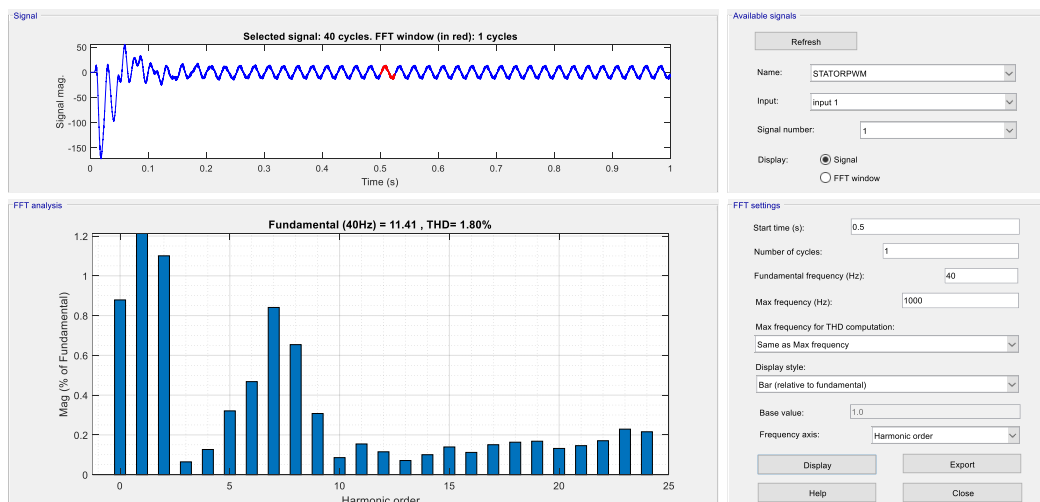


Gambar 4.33 Tegangan Keluaran Inverter

Pada Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives (Vfd) Menggunakan Pulse Generator PWM tegangan keluaran dari inverter adalah sama untuk semua kondisi yang dilakukan melalui simulasi.



Gambar 4.34 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 8



Gambar 4.35 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.35 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,8%, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kedelapan, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,9. Dengan indeks modulasi 0,9 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

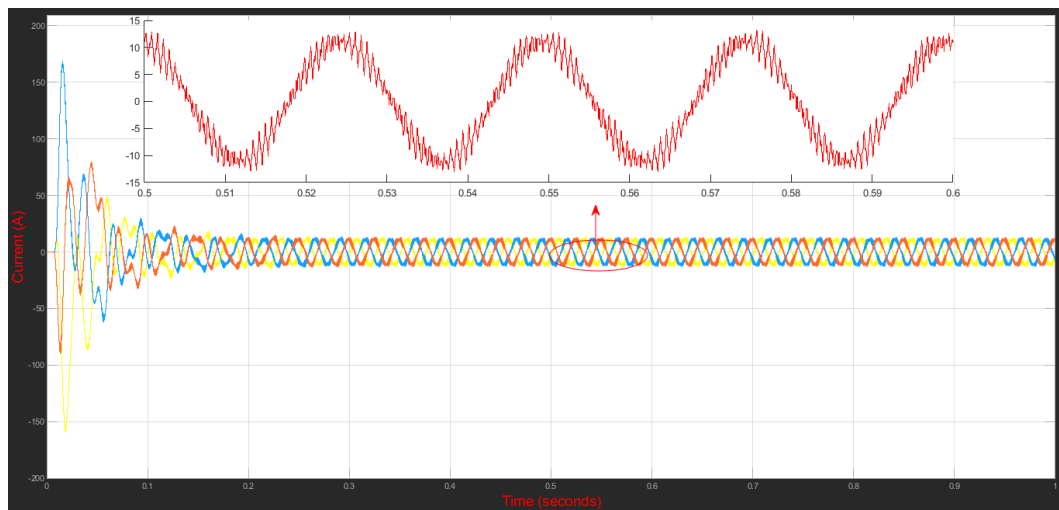
Tabel 4.15 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
31,81	31	1171	464,4	7,9	0,3	2,41	0,96	2,4	44	2,18

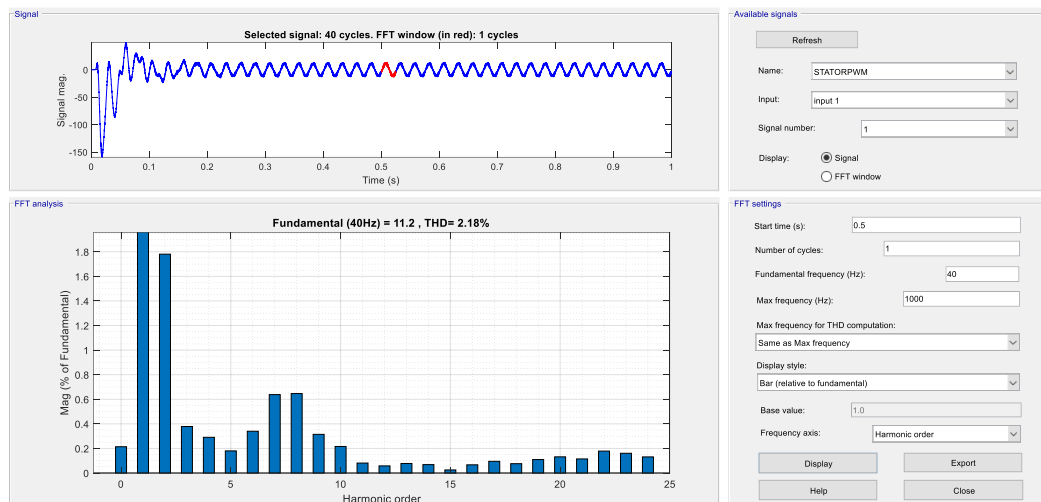
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{ns - nr}{ns} = \frac{1200 - 1171}{1200} = 2,41 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,41 \times 40 = 0,96 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.36 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7,9



Gambar 4.37 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.37 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 2,18 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kesembilan, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,8. Dengan indeks modulasi 0,8 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

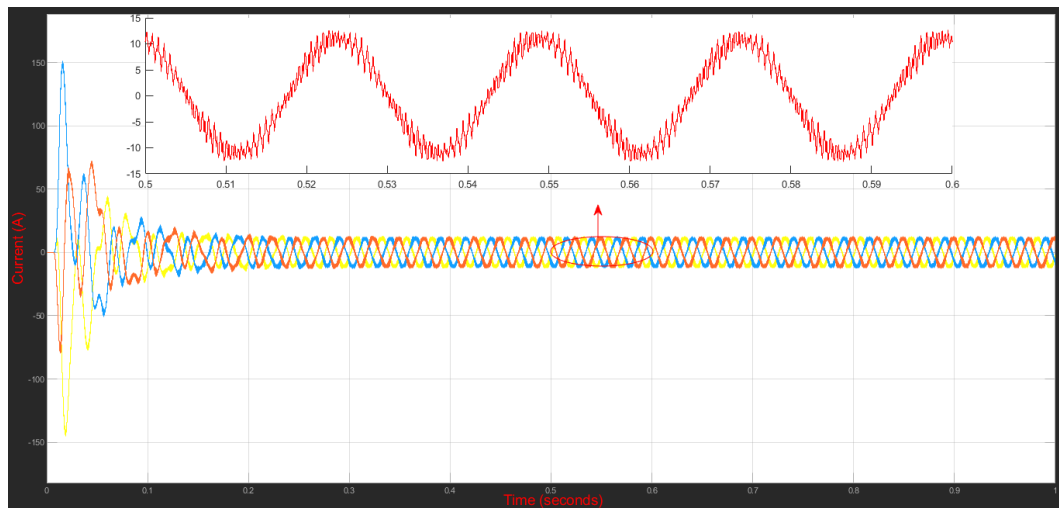
Tabel 4.16 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
31,81	27,5	1157	414	7,8	0,32	3,58	1,43	1,4	97	1,3

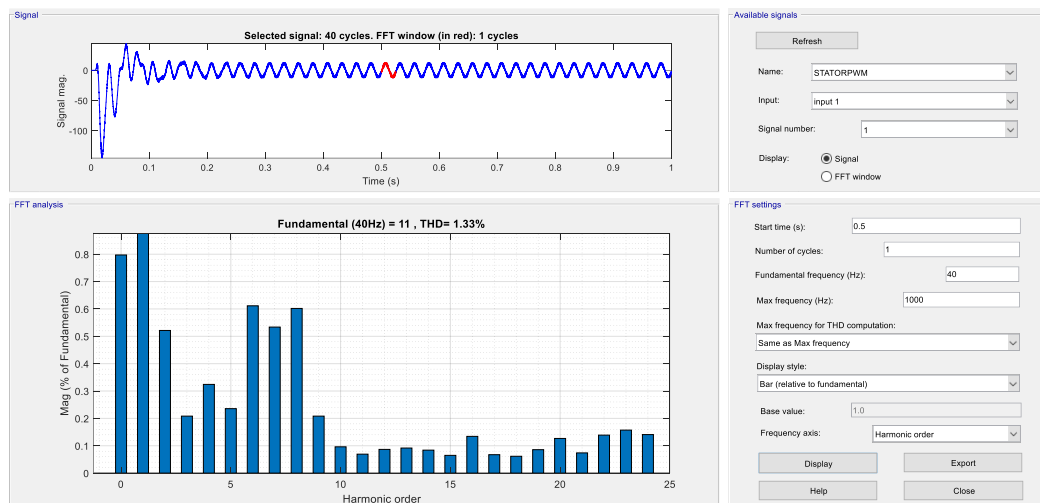
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1200 - 1157}{1200} = 3,58 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 3,58 \times 40 = 1,43 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.38 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7,8



Gambar 4.39 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.39 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,33 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kesepuluh, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,7. Dengan indeks modulasi 0,7 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

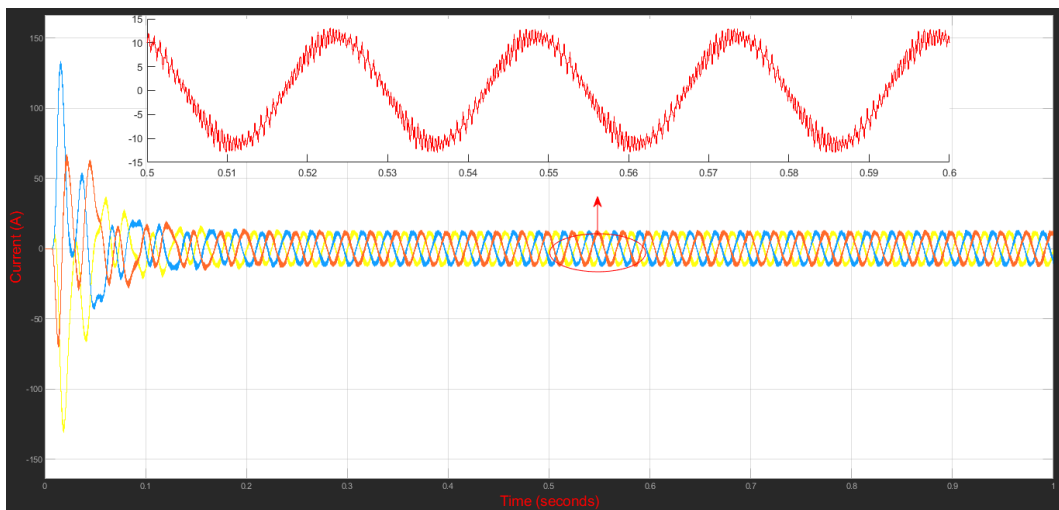
Tabel 4.17 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7

Tm	Te	rpm	Vs	Is	Ir	Slip	Fslip	THD	THD	THD
(N.m)	(N.m)	(Nr)	(Vrms)	(irms)	(irms)	(%)	(Hz)	Vs(%)	Ir(%)	Is (%)
31,81	25,6	1145	362,9	7,9	0,24	4,58	1,83	1,35	94	1,11

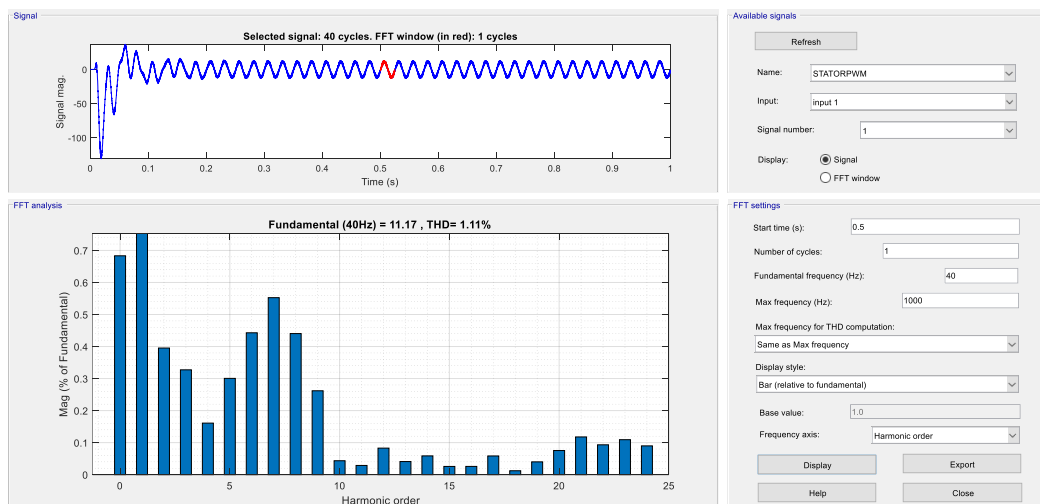
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{ns - nr}{ns} = \frac{1200 - 1145}{1200} = 4,58 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 4,58 \times 40 = 1,83 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.40 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 7,9



Gambar 4.41 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.41 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,11 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi kesebelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,5. Dengan indeks modulasi 0,5 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

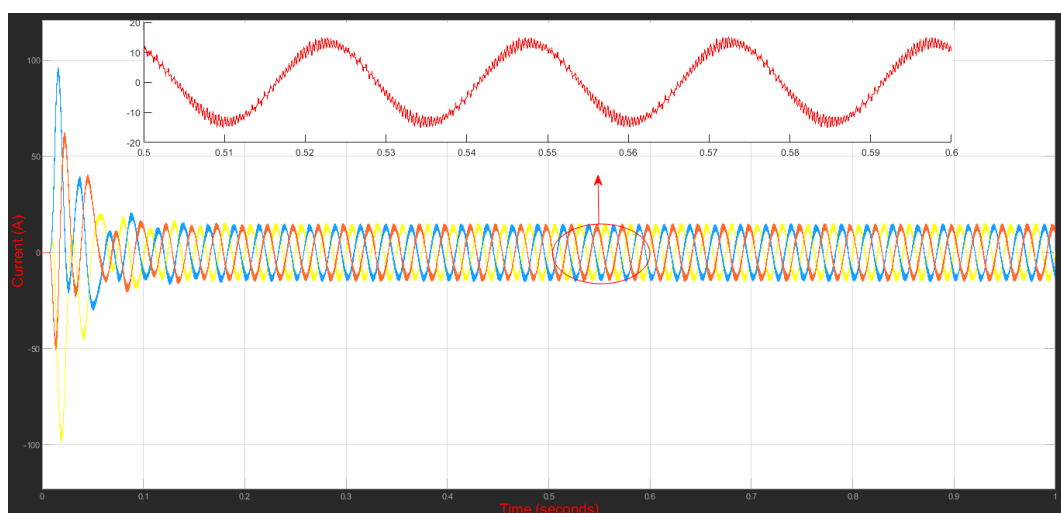
Tabel 4.18 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
31,81	24,4	1092	260	9,2	0,33	9	3,6	2,97	75	0,98

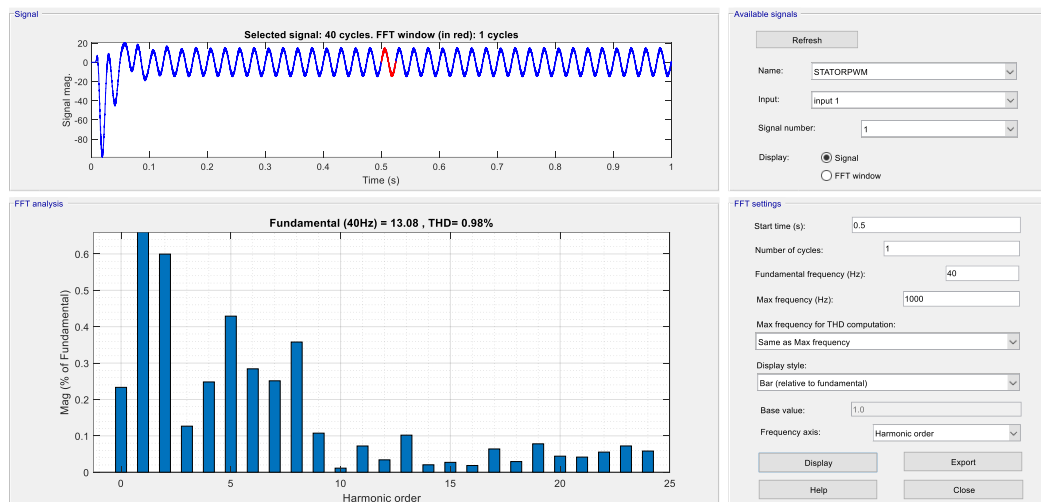
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1200 - 1092}{1200} = 9\% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 9 \times 40 = 3,6 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.42 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9,2



Gambar 4.43 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.43 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 0,98 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi keduabelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,3. Dengan indeks modulasi 0,3 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

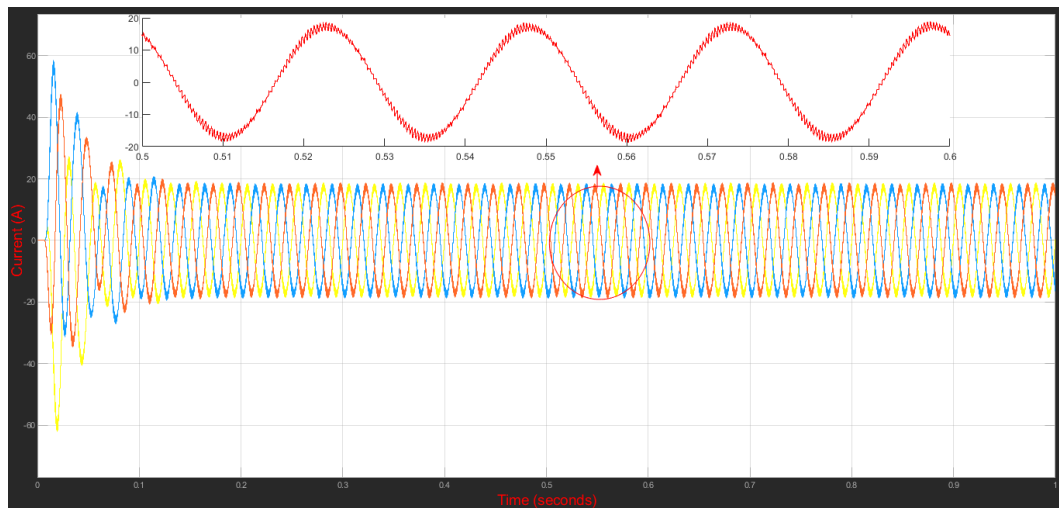
Tabel 4.19 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,3

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
31,81	17,6	895	156,9	12,1	2,6	25,41	10,16	6,38	71,2	0,52

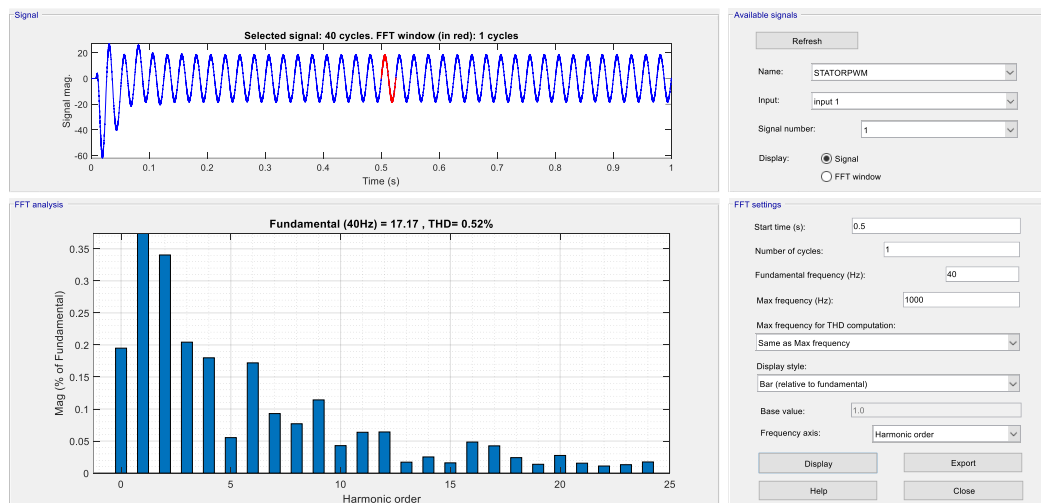
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1200 - 895}{1200} = 25,41 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 25,41 \times 40 = 10,16 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.44 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 12,1



Gambar 4.45 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.45 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 0,52 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

4.3.4 Hasil Simulasi SVPWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) menggunakan Frekuensi 40 Hz

Pada simulasi ketujuh, frekuensi tegangan stator yang digunakan adalah 40 Hz dengan nilai indeks modulasi yang divariasikan antara 1 - 0,3. Dengan

frekuensi tegangan stator dan jumlah kutub kumparan stator yang sama maka kecepatan sinkron dari motor induksi yang digunakan pada percobaan ini adalah :

$$n_s = \frac{120}{f} \cdot f = \frac{120}{4} \cdot 40 = 1200 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 1200 \times \frac{2\pi}{60} = 125,71 \text{ rad/s}$$

Pada daya nominal P_n 4000 kW, maka torsi nominal T_m adalah

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_s} = \frac{4000}{125,71} = 31,818 \text{ Nm}$$

Dengan memasukkan torsi beban 38,818 Nm, dari simulasi yang telah dilakukan maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

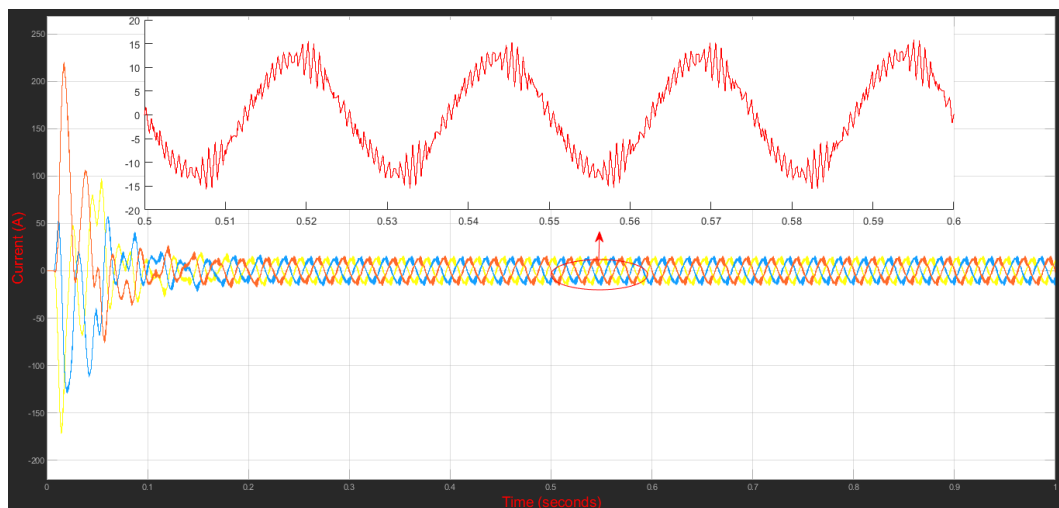
Tabel 4.20 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
31,81	32,83	1177	594	8,6	0,13	1,91	0,76	6,46	224	3,24

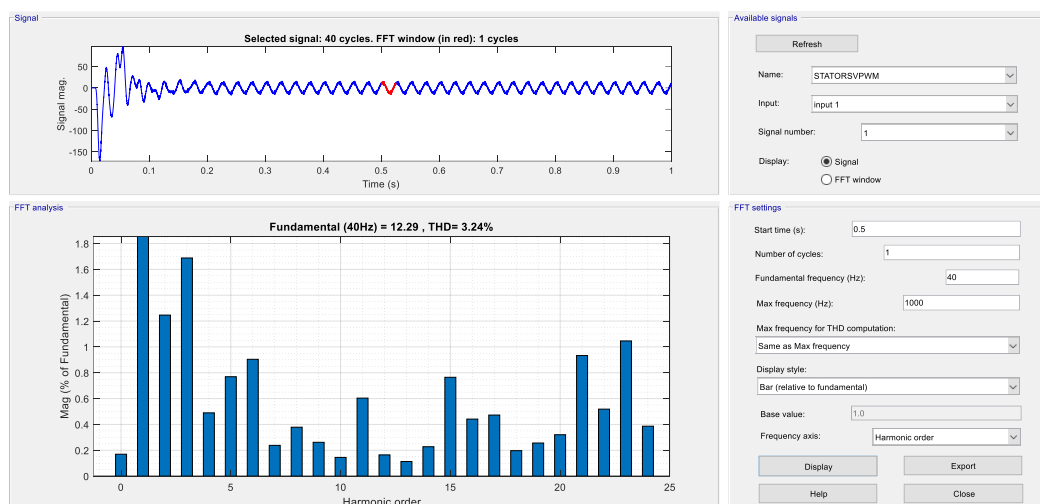
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1200 - 1177}{1200} = 1,91 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 1,91 \times 40 = 0,76 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.46 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 8,6



Gambar 4.47 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.47 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 3,24 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kedelapan, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,9. Dengan indeks modulasi 0,9 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

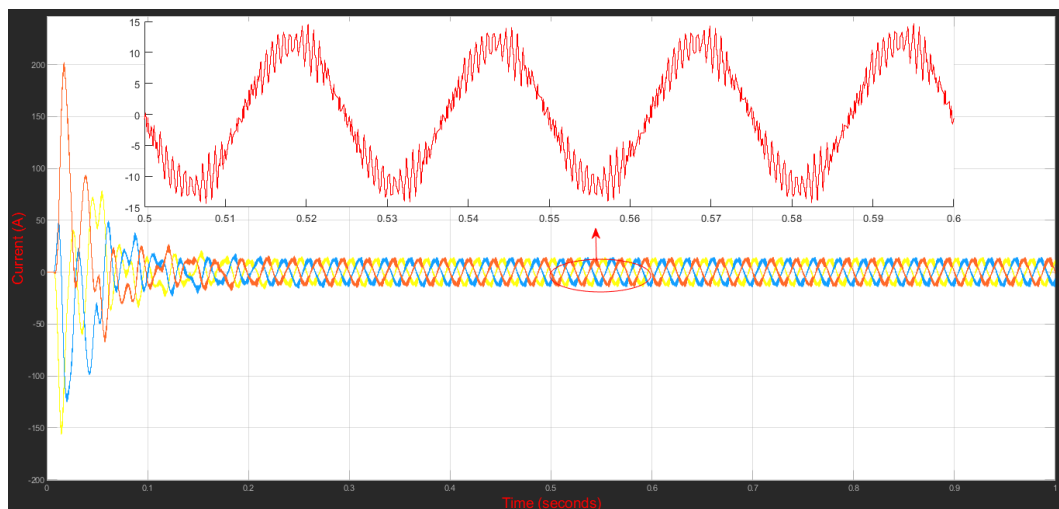
Tabel 4.21 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,9

Tm	Te	rpm	Vs	Is	Ir	Slip	Fslip	THD	THD	THD
(N.m)	(N.m)	(Nr)	(Vrms)	(irms)	(irms)	(%)	(Hz)	Vs(%)	Ir(%)	Is (%)
31,81	31,7	1171	535	8,2	0,18	2,417	0,967	6,5	199	2,84

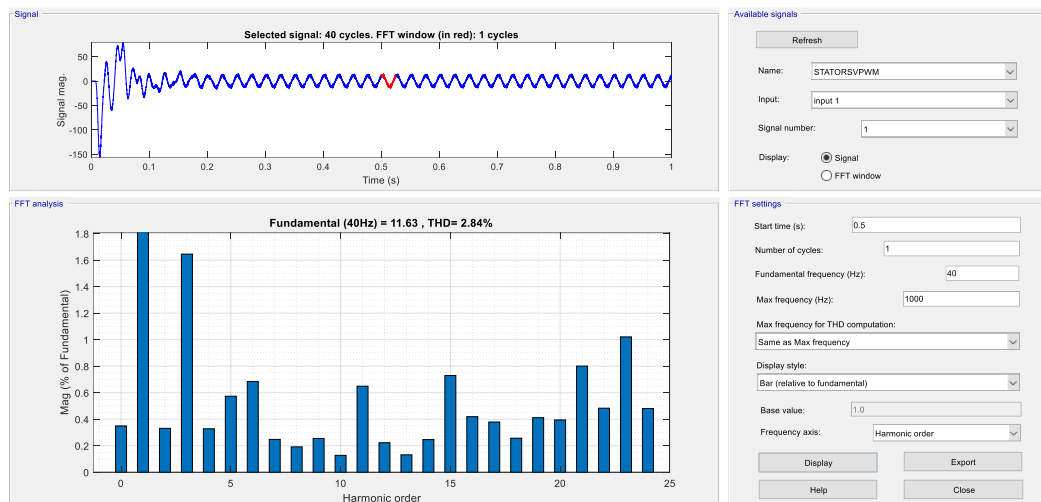
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1200 - 1171}{1200} = 2,41 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,41 \times 40 = 0,96 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.48 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 8,2



Gambar 4.49 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.49 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 2,84 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi kesembilan, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,8. Dengan indeks modulasi 0,8 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

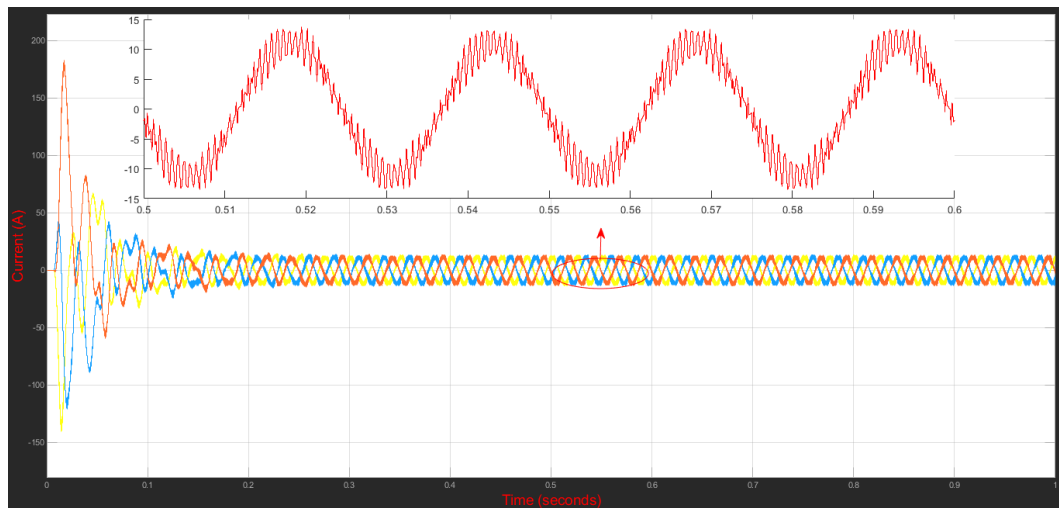
Tabel 4.22 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,8

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
31,81	31	1167	475	7,9	0,16	2,75	1,1	6,5	162	2,89

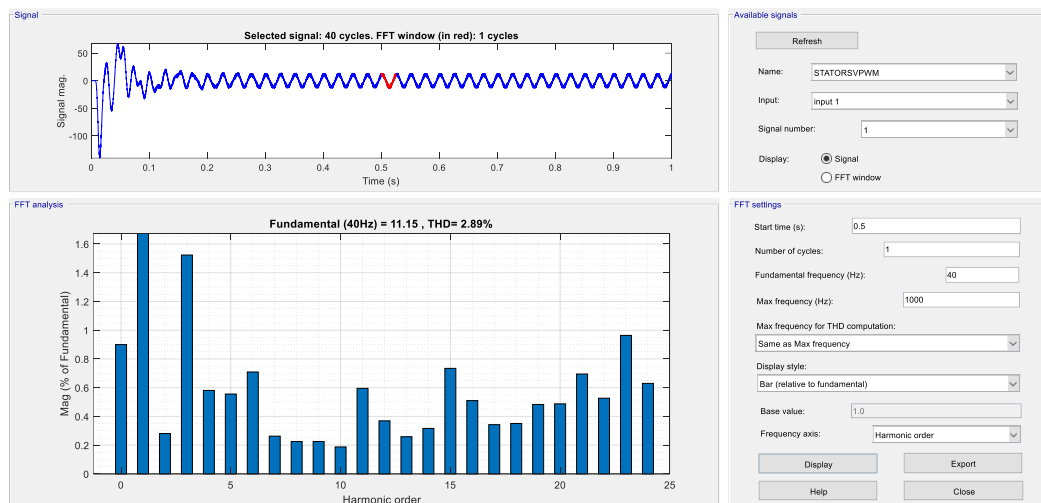
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{ns-nr}{ns} = \frac{1200-1167}{1200} = 2,75 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,75 \times 40 = 1,1 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.50 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7,9



Gambar 4.51 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.51 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 2,89 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi kesepuluh, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,7. Dengan indeks modulasi 0,7 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

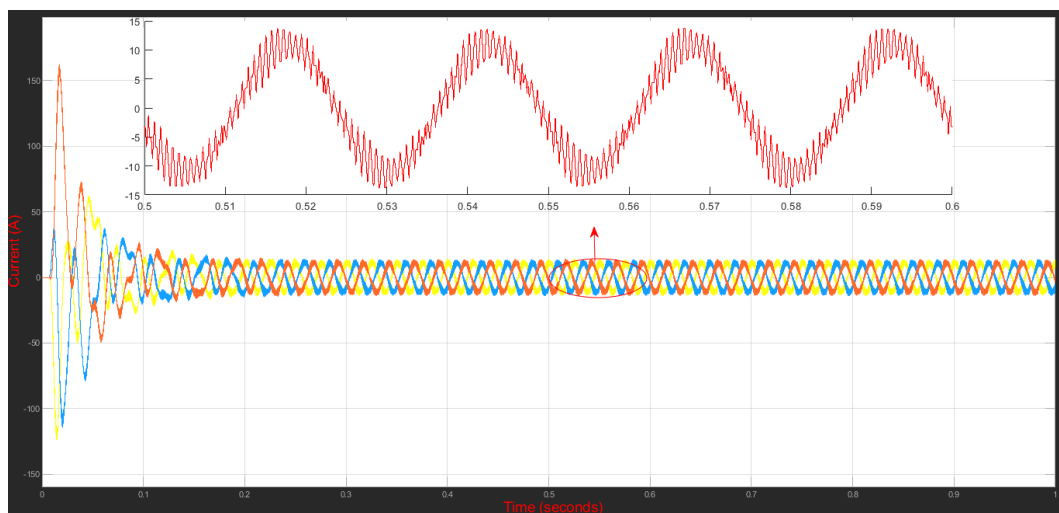
Tabel 4.23 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,7

Tm	Te	rpm	Vs	Is	Ir	Slip	Fslip	THD	THD	THD
(N.m)	(N.m)	(Nr)	(Vrms)	(irms)	(irms)	(%)	(Hz)	Vs(%)	Ir(%)	Is (%)
31,81	30,7	1160	416,5	7,8	0,18	3,33	1,33	6,53	128	2,93

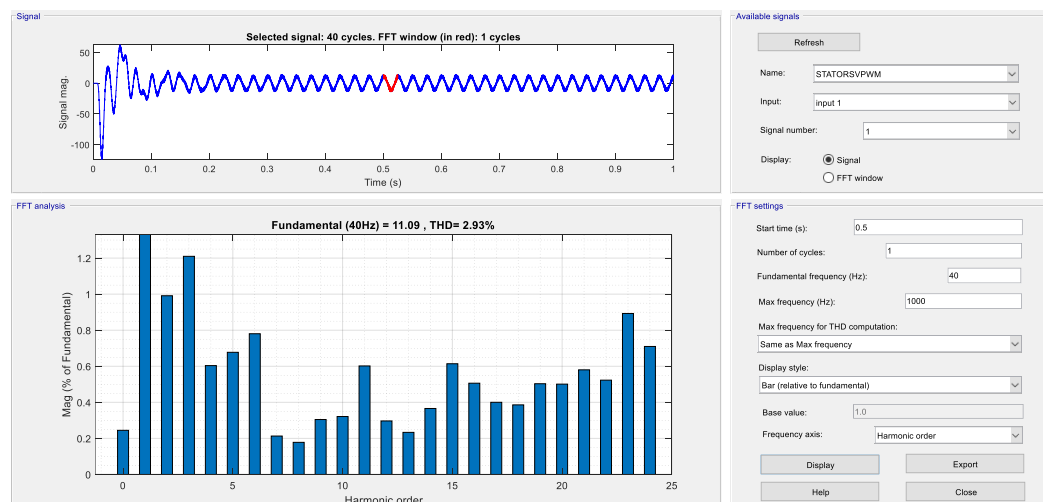
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{ns - nr}{ns} = \frac{1200 - 1160}{1200} = 3,33 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 3,33 \times 40 = 1,33 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.52 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 7,8



Gambar 4.53 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.53 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 2,93 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kesebelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,5. Dengan indeks modulasi 0,5 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

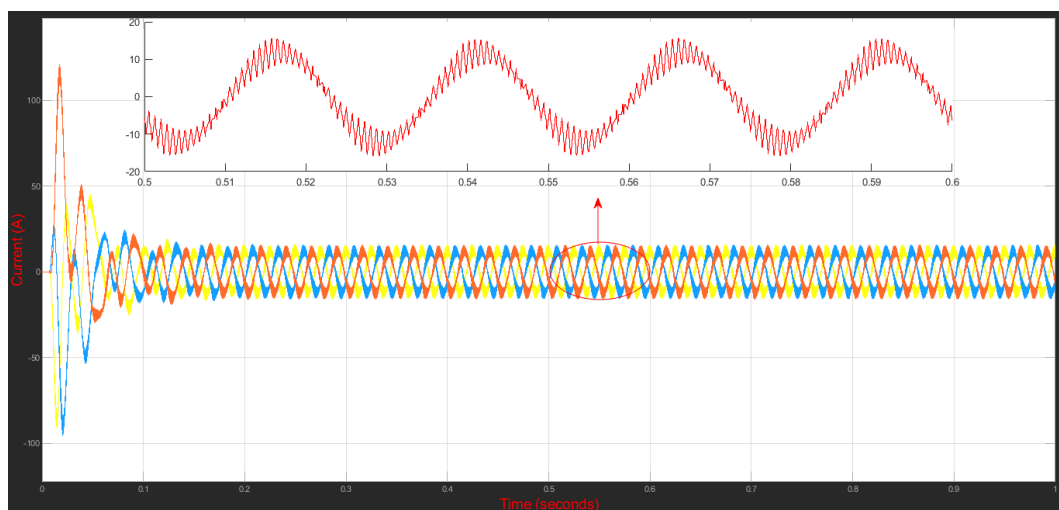
Tabel 4.24 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
31,81	28	1118	297	8,6	1,06	6,83	2,73	6,55	77	2,27

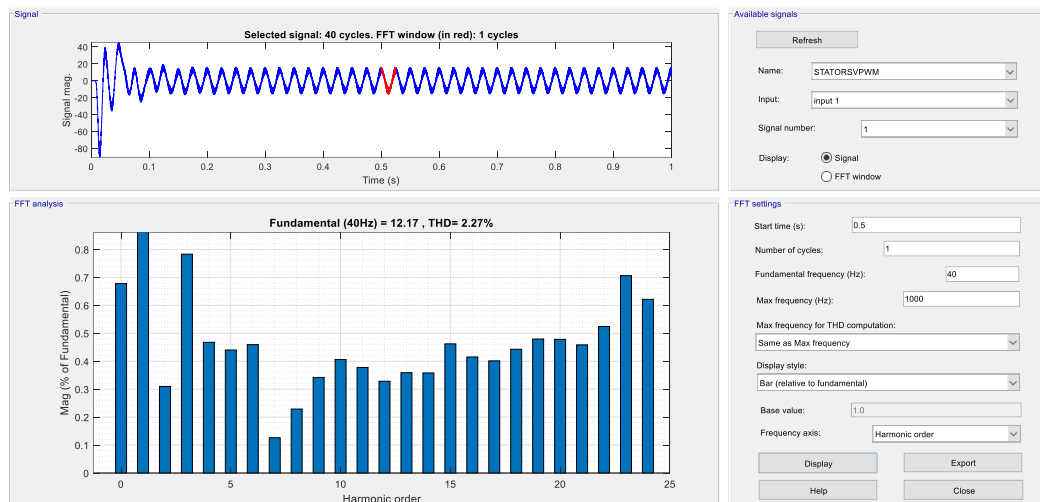
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1200 - 1118}{1200} = 6,83 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 6,83 \times 40 = 2,73 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.54 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 8,6



Gambar 4.55 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.55 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 2,27 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi keduabelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,3. Dengan indeks modulasi 0,3 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

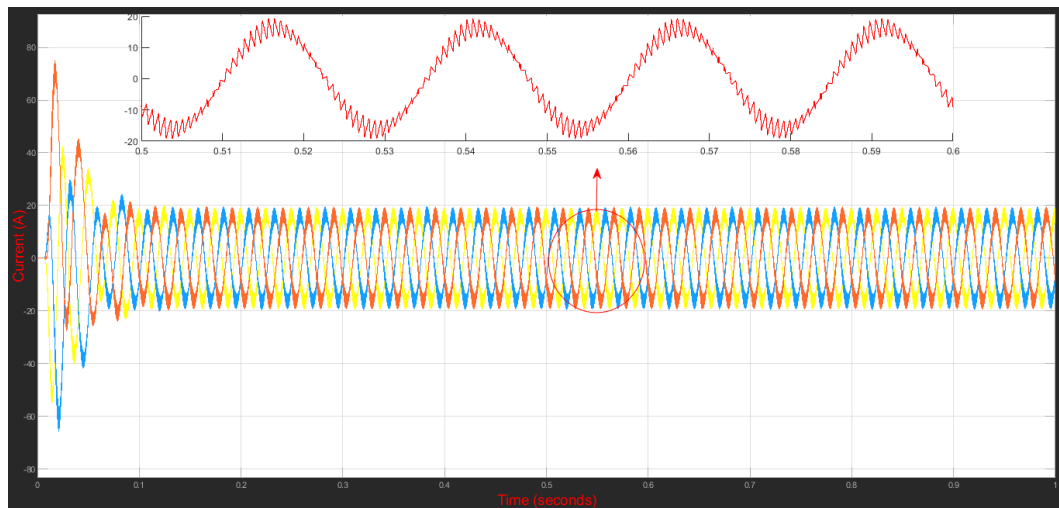
Tabel 4.25 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,3

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
31,81	20,8	970	178	11,6	2,4	19,16	7,66	6,65	75	1,3

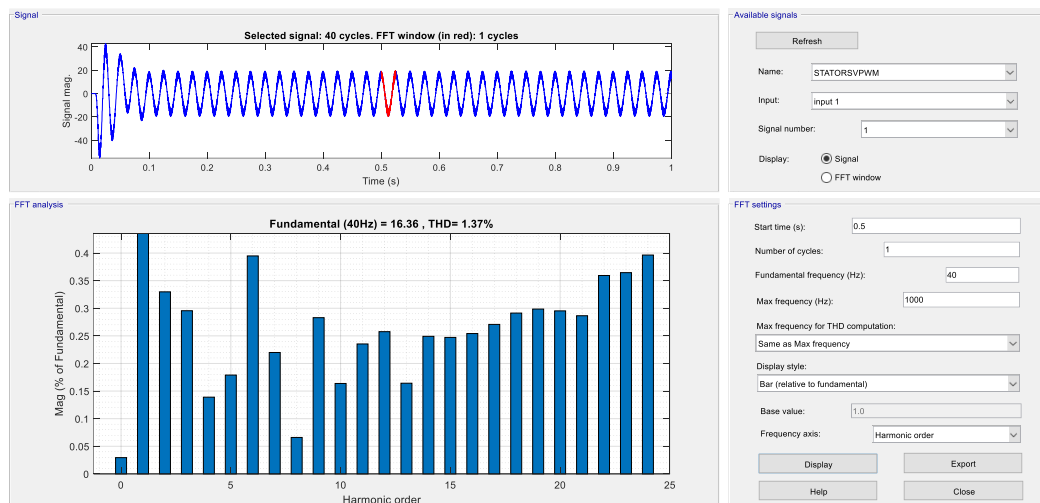
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 1200 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{ns-nr}{ns} = \frac{1200-970}{1200} = 19,16 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 19,16 \times 40 = 7,66 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.56 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,6



Gambar 4.57 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.14 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 40 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 1,37 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

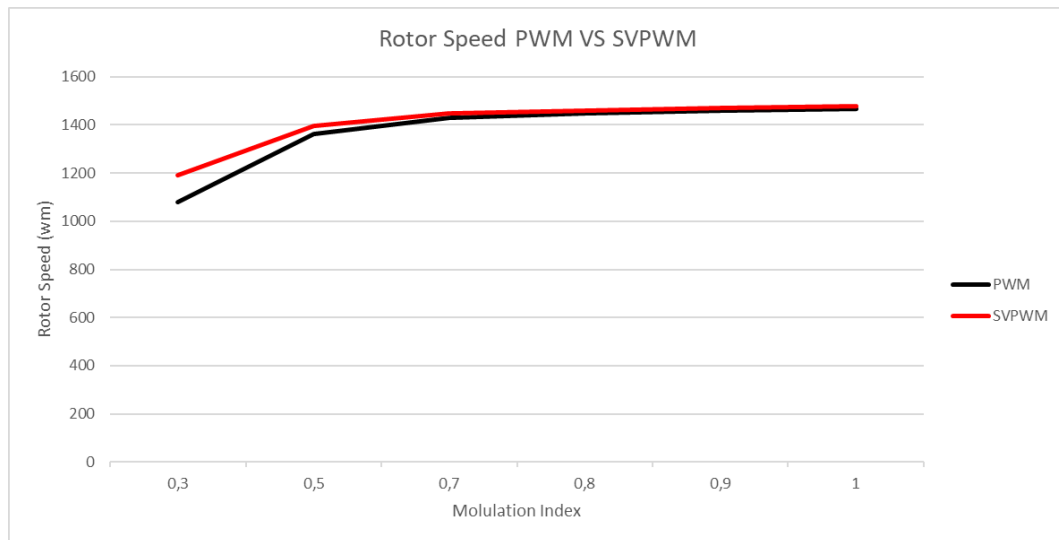
Tabel 4.26 Hasil Simulasi PWM dan SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1-0.3 menggunakan frekuensi 40 Hz

Metode Kendali	Tm (N.m)	M. Index	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is(%)	TDD IEEE STD 519-2014
PWM	31,81	1	35,97	1171	515	8	0,12	2,41	0,96	3,38	125	1,8	5%
		0,9	31	1171	464,4	7,9	0,3	2,41	0,96	2,4	44	2,18	
		0,8	27,5	1157	414	7,8	0,32	3,58	1,43	1,4	97	1,3	
		0,7	25,6	1145	362,9	7,9	0,24	4,58	1,83	1,35	94	1,11	
		0,5	24,4	1092	260	9,2	0,33	9	3,6	2,97	75	0,98	
		0,3	17,6	895	156,9	12,1	2,6	25,41	10,16	6,38	71,2	0,52	
SVPWM	31,81	1	32,83	1177	594	8,6	0,13	1,91	0,76	6,46	224	3,24	
		0,9	31,7	1171	535	8,2	0,18	2,417	0,967	6,5	199	2,84	
		0,8	31	1167	475	7,9	0,16	2,75	1,1	6,5	162	2,89	
		0,7	30,7	1160	416,5	7,8	0,18	3,33	1,33	6,53	128	2,93	
		0,5	28	1118	297	8,6	1,06	6,83	2,73	6,55	77	2,27	
		0,3	20,8	970	178	11,6	2,4	19,16	7,66	6,65	75	1,3	

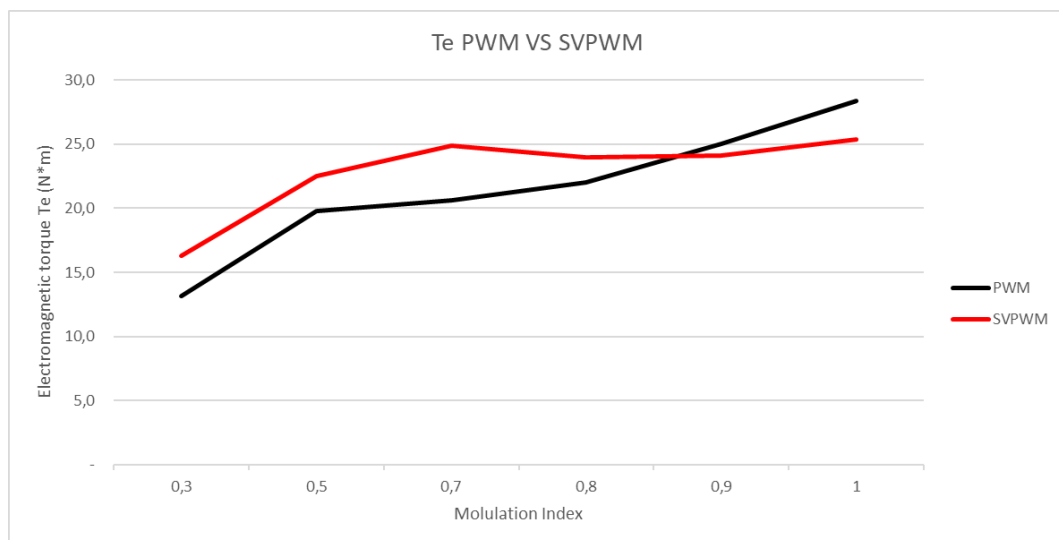
Dari **Table 4.26** terlihat perbandingan antara kendali PWM dan SVPWM dengan modulasi indeks yang sama pada frekuensi 40 Hz. pada percobaan ketujuh sampai dengan percobaan keduabelas, semakin besar nilai indeks modulasi maka nilai dari tegangan stator juga akan semakin besar. Hal ini terjadi karena nilai tegangan stator merupakan fungsi dari indeks modulasi dan tegangan searah yang merupakan masukan dari universal bridge inverter. Nilai kecepatan putar rotor pada frekuensi 40 Hz semakin meningkat mengikuti peningkatan dari amplitudo tegangan stator. Kecepatan putar rotor akan meningkat seiring dengan kenaikan indeks modulasi, hal ini terjadi karena percepatan putar rotor dari motor induksi berbanding lurus dengan peningkatan nilai torsi elektromagnetik. Grafik peningkatan nilai kecepatan putar rotor tersebut dapat dilihat pada **gambar 4.58**. dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM, terlihat pada perbedaan rpm, dimana rotor speed dari SVPWM mencapai 1177-970 Nr sedangkan untuk PWM mencapai 1171-895 Nr yang dibandingkan dengan kecepatan sinkron pada motor induksi yang digunakan adalah 1200 Nr.

Kenaikan nilai indeks modulasi dengan nilai frekuensi yang sama pada percobaan ketujuh sampai dengan percobaan keduabelas juga mengakibatkan kenaikan nilai torsi elektromagnetik. Hal ini terjadi karena semakin meningkatnya tegangan stator (indeks modulasi) maka fluks celah udara yang dihasilkan akan semakin meningkat, sehingga nilai dari torsi elektromagnetik juga akan meningkat. Grafik kenaikan nilai torsi elektromagnetik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.59.

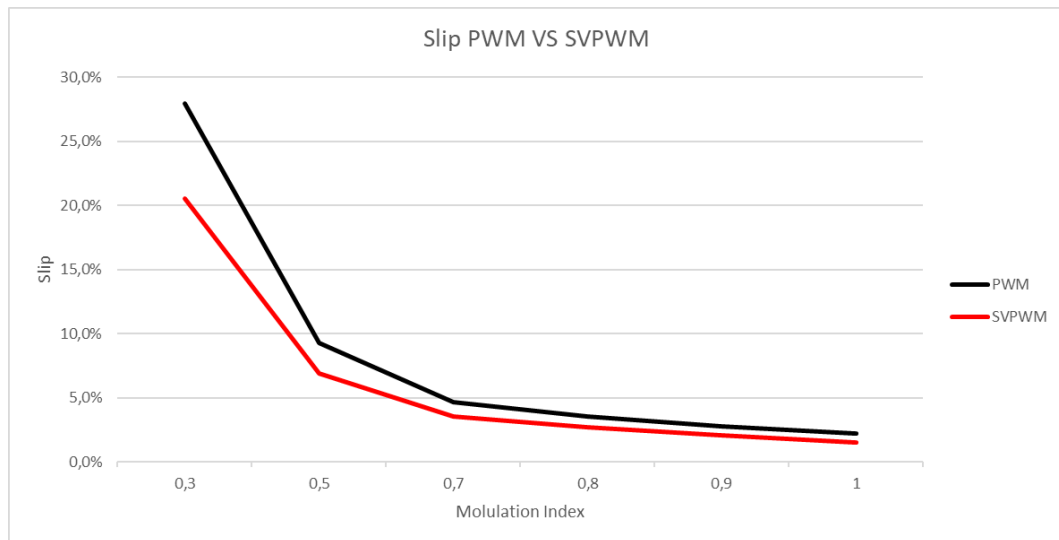
Nilai slip pada percobaan dengan frekuensi 40 Hz ini akan terus menurun mengikuti peningkatan nilai amplitudo tegangan stator. Hal ini terjadi karena semakin besar amplitudo tegangan stator maka nilai kecepatan putar rotor juga akan semakin besar, sehingga dengan nilai kecepatan medan putar stator yang tetap pada 1200 rpm maka nilai slip akan semakin berkurang. Grafik penurunan nilai slip tersebut dapat dilihat pada gambar 4.60 dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM dengan perbandingan slip 1,91% - 19,16 % (dengan indek modulasi 1 - 0,3) pada kendali SVPWM dan untuk kendali PWM 2,41% - 25,41 % (dengan indek modulasi 1 - 0,3) . Nilai frekuensi slip pada percobaan ketujuh sampai dengan percobaan keduabelas akan terus menurun seiring dengan kenaikan indeks modulasi. ini terjadi karena persamaan frekuensi slip dari motor induksi merupakan fungsi dari nilai slip dan nilai frekuensi stator, sehingga dengan nilai frekuensi stator yang tetap pada 40 Hz dan nilai slip yang semakin menurun mengikuti kenaikan dari indeks modulasi maka nilai dari frekuensi slip juga akan semakin menurun. Grafik penurunan nilai frekuensi slip pada setiap kenaikan nilai indeks modulasi dapat dilihat pada gambar 4.61 dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM dengan perbandingan frekuensi slip 0,76 Hz – 7,66 Hz (dengan indek modulasi 1 - 0,3) pada kendali SVPWM dan untuk kendali PWM 0,96 Hz – 10,16 Hz (dengan indek modulasi 1 - 0,3) . Sedangkan untuk nilai total harmonic distortion, kendali PWM lebih optimal dari pada SVPWM. Grafik Arus THD pada setiap kenaikan nilai indeks modulasi dapat dilihat pada gambar 4.62.



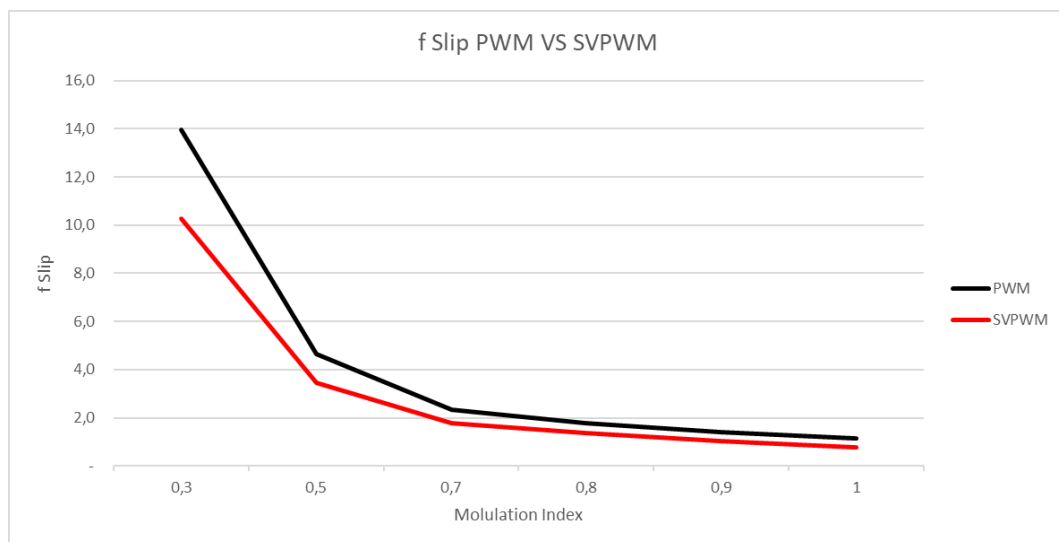
Gambar 4.58 Grafik Perbandingan Rotor Speed PWM dengan SVPWM



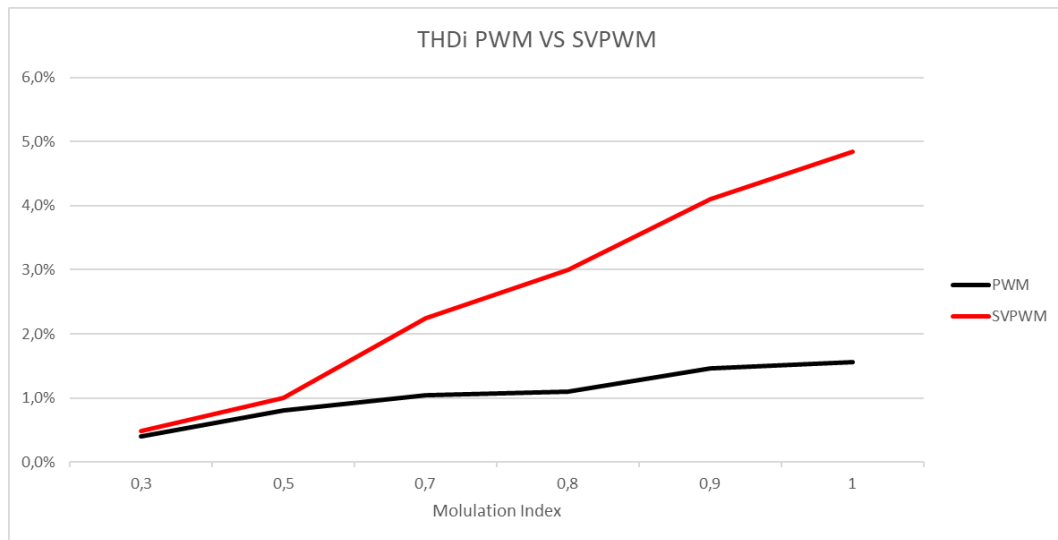
Gambar 4.59 Grafik Perbandingan T_e PWM dan SVPWM



Gambar 4.60 Grafik Perbandingan Slip PWM dan SVPWM



Gambar 4.61 Grafik Perbandingan Frekuensi Slip PWM dan SVPWM



Gambar 4.62 Grafik Perbandingan THDi PWM dan SVPWM

4.3.5 Hasil Simulasi PWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 30 Hz

Pada simulasi ketigabelas, frekuensi tegangan stator yang digunakan adalah 30 Hz dengan nilai indeks modulasi yang divariasikan antara 1 - 0,3. Dengan frekuensi tegangan stator dan jumlah kutub kumparan stator yang sama maka kecepatan sinkron dari motor induksi yang digunakan pada percobaan ini adalah :

$$n_s = \frac{120}{f} \cdot f = \frac{120}{4} \cdot 30 = 900 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 900 \times \frac{2\pi}{60} = 94,286 \text{ rad/s}$$

Pada daya nominal P_n 4000 kW, maka torsi nominal T_m adalah

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_s} = \frac{4000}{94,286} = 42,424 \text{ Nm}$$

Dengan memasukkan torsi beban 42,424 Nm, dari simulasi yang telah dilakukan maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

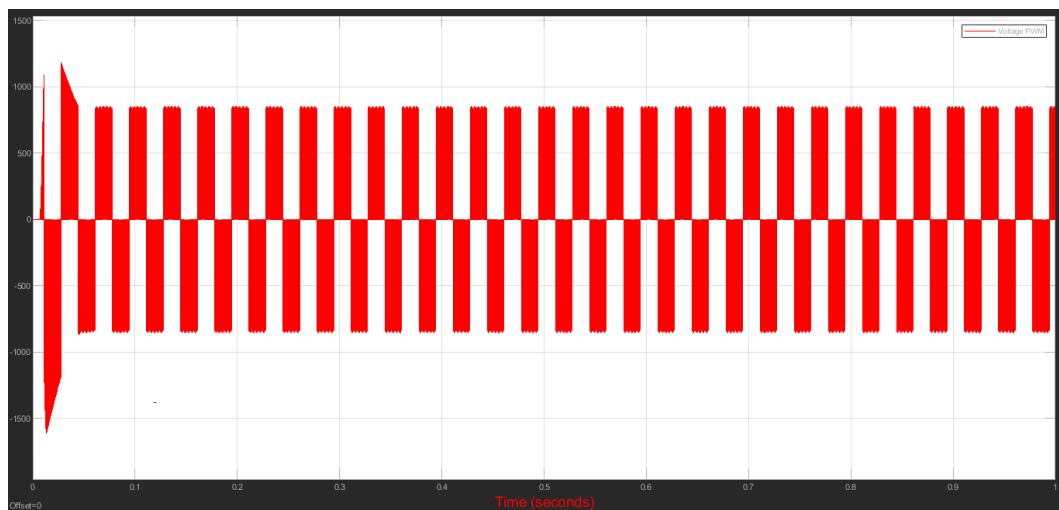
Tabel 4.27 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
42,42	47,39	877	517	9,9	0,16	2,61	0,78	0,74	107	1,44

Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

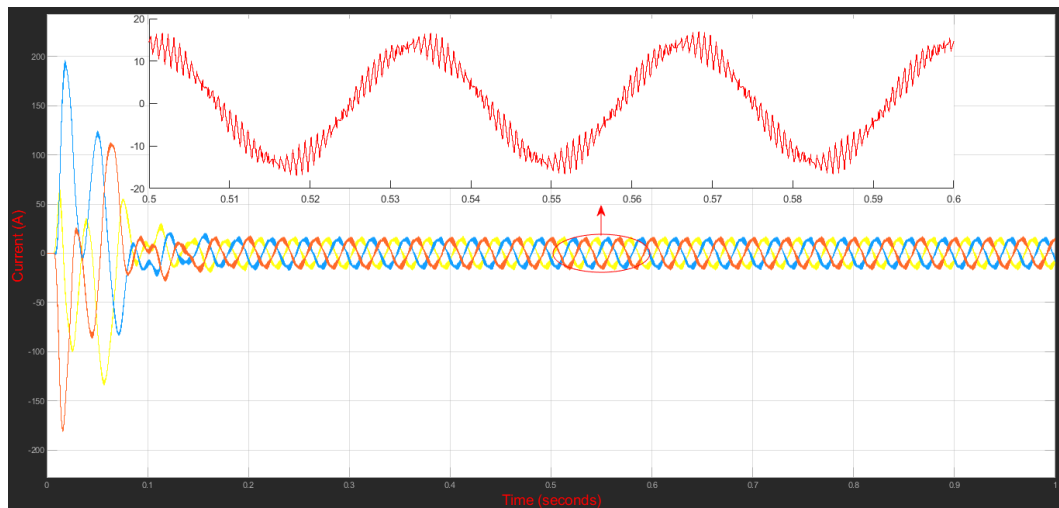
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 877}{900} = 2,61 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,61 \times 30 = 0,78 \text{ Hz.}$$

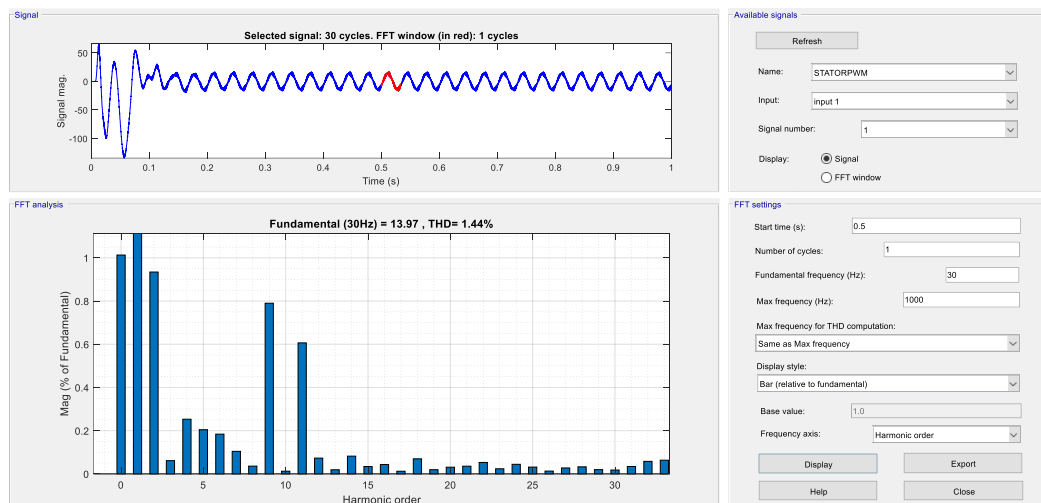


Gambar 4.63 Tegangan Keluaran Inverter

Pada Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives (Vfd) Menggunakan Pulse Generator PWM tegangan keluaran dari inverter adalah sama untuk semua kondisi yang dilakukan melalui simulasi.



Gambar 4.64 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 9,9



Gambar 4.65 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.65 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,44 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi keempatbelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,9. Dengan indeks modulasi 0,9 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

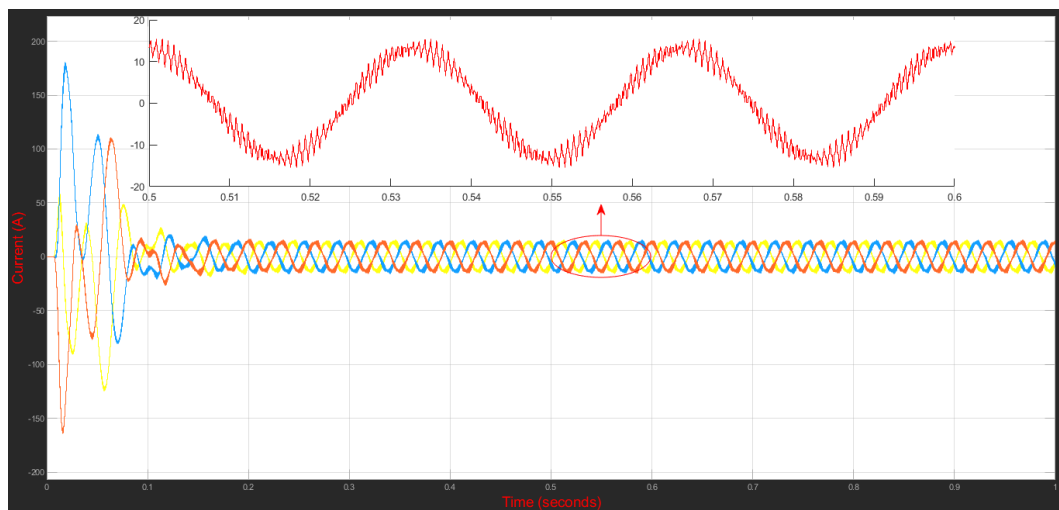
Tabel 4.28 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
42,42	41	873	465,6	9,3	0,2	3	0,9	0,76	79	1,1

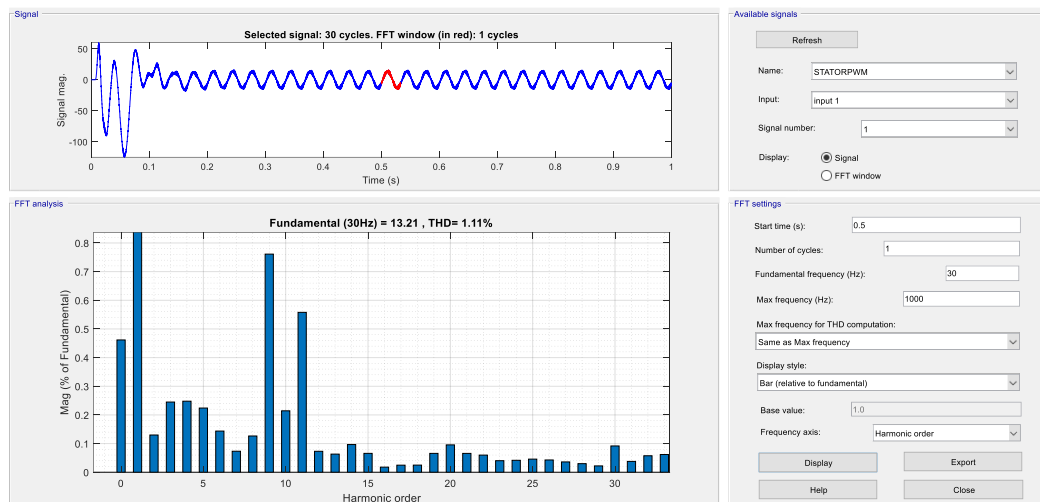
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 873}{900} = 3\% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 3 \times 30 = 0,9 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.66 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9,3



Gambar 4.67 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.67 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,11 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kelimabelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,8. Dengan indeks modulasi 0,8 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

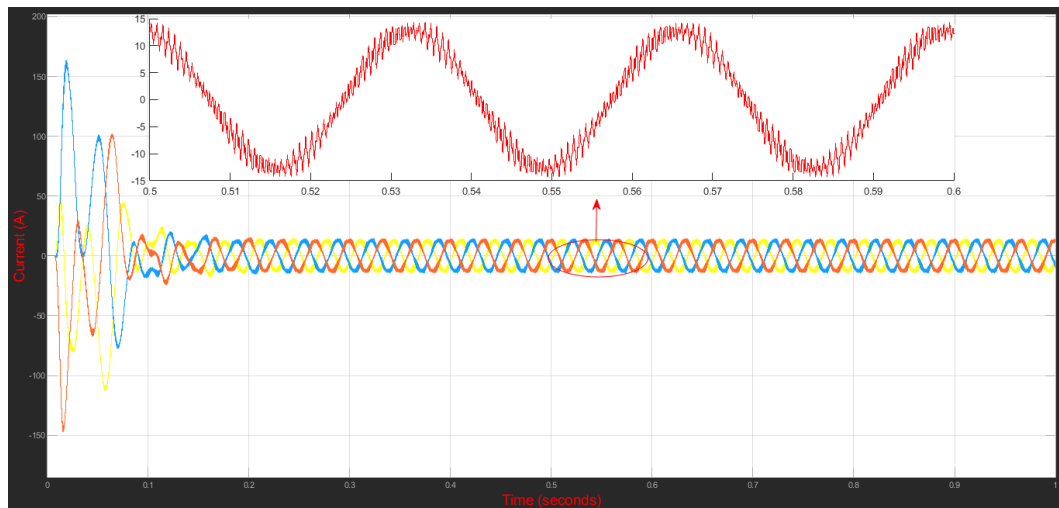
Tabel 4.29 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
42,42	37	868	414	9	0,03	3,61	1,08	0,78	368	0,98

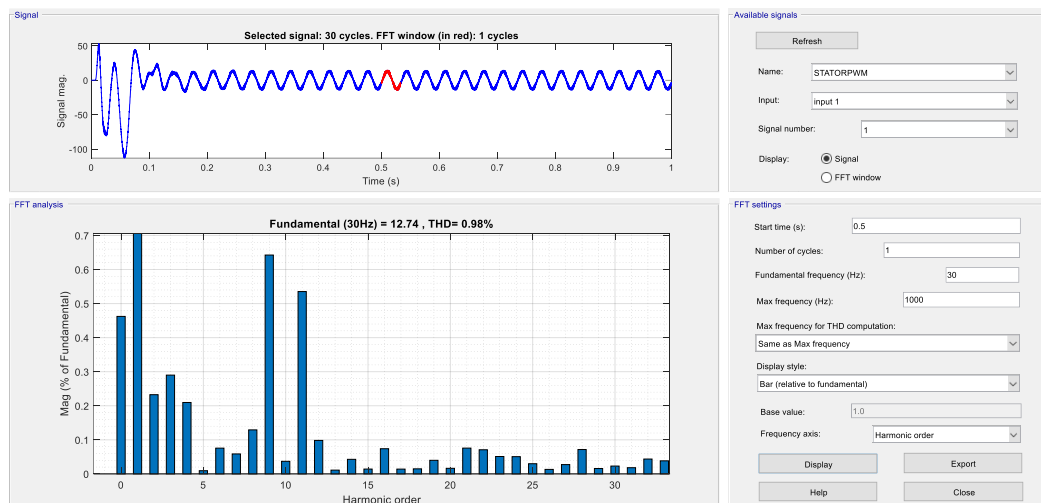
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 868}{900} = 3,61 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 3,61 \times 30 = 1,08 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.68 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 9



Gambar 4.69 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.69 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 0,98 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi keenambelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,7. Dengan indeks modulasi 0,7 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

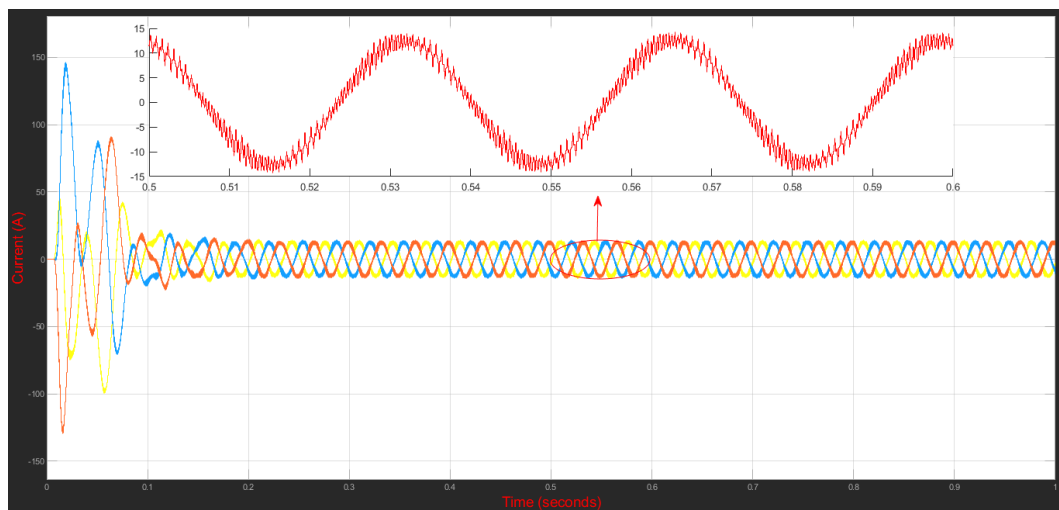
Tabel 4.30 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
42,42	34	860	362	8,8	0,55	4,41	1,32	0,83	80	1,15

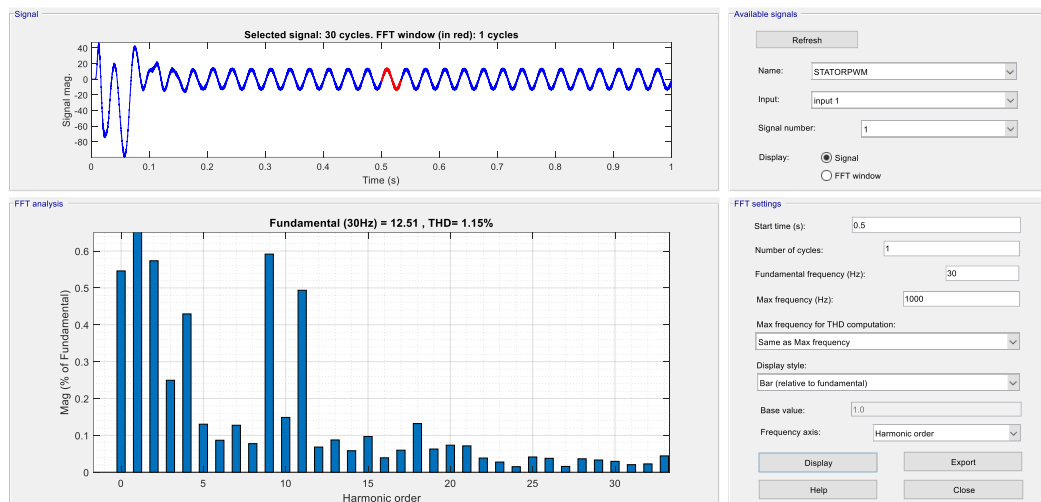
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 860}{900} = 4,41 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 4,41 \times 30 = 1,32 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.70 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 8,8



Gambar 4.71 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.71 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,15 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi ketujuhbelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,5. Dengan indeks modulasi 0,5 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

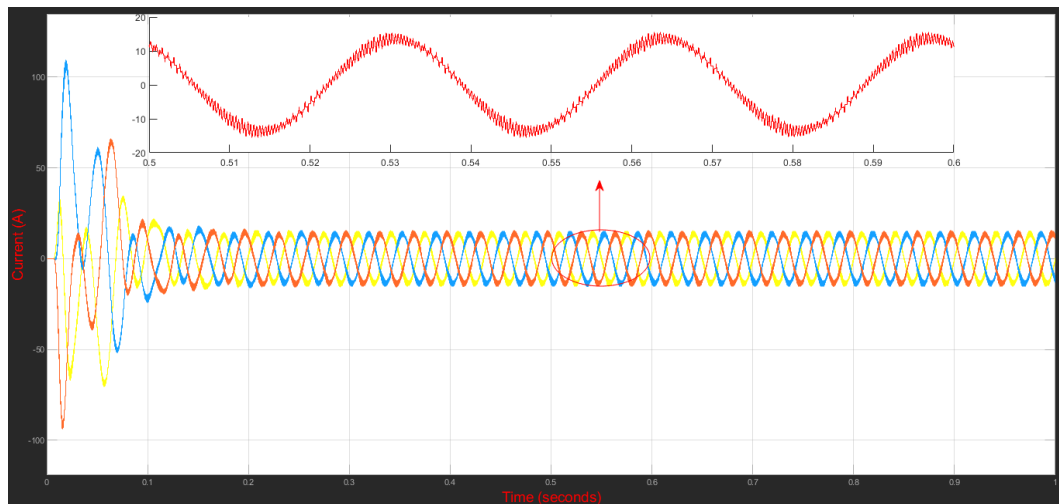
Tabel 4.31 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
42,42	32,4	821	258,7	9,6	1,48	8,81	2,64	0,9	79	0,95

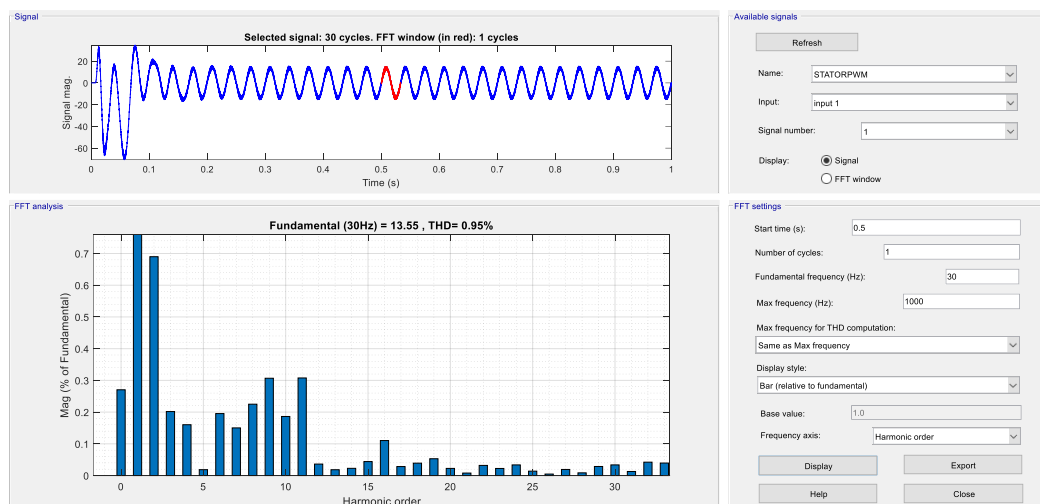
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 821}{900} = 8,81 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 8,81 \times 30 = 2,64 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.72 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 9,6



Gambar 4.73 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.73 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 0,95 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi kedelapanbelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,3. Dengan indeks modulasi 0,3 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

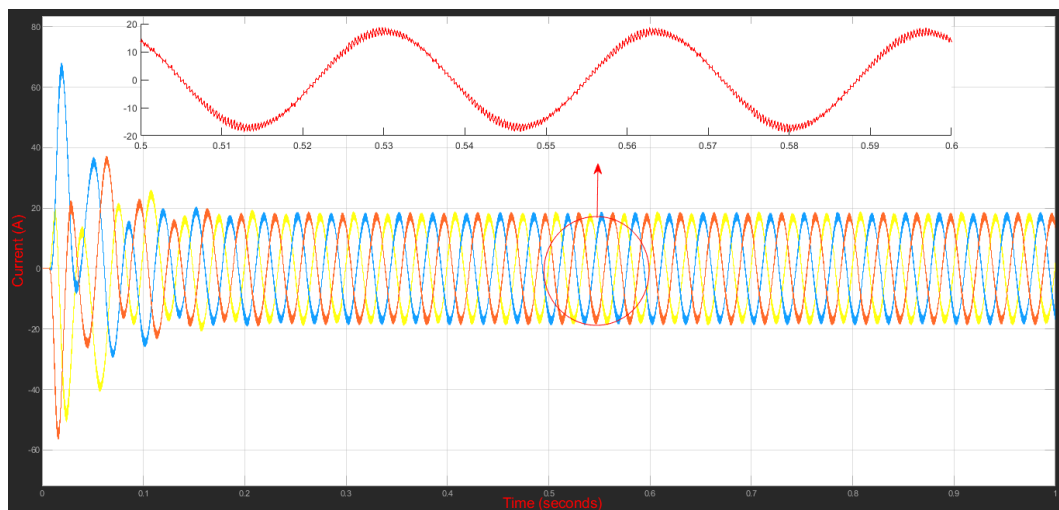
Tabel 4.32 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,3

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
42,42	24	685	155,6	12,2	5	23,88	7,16	1,21	74	0,6

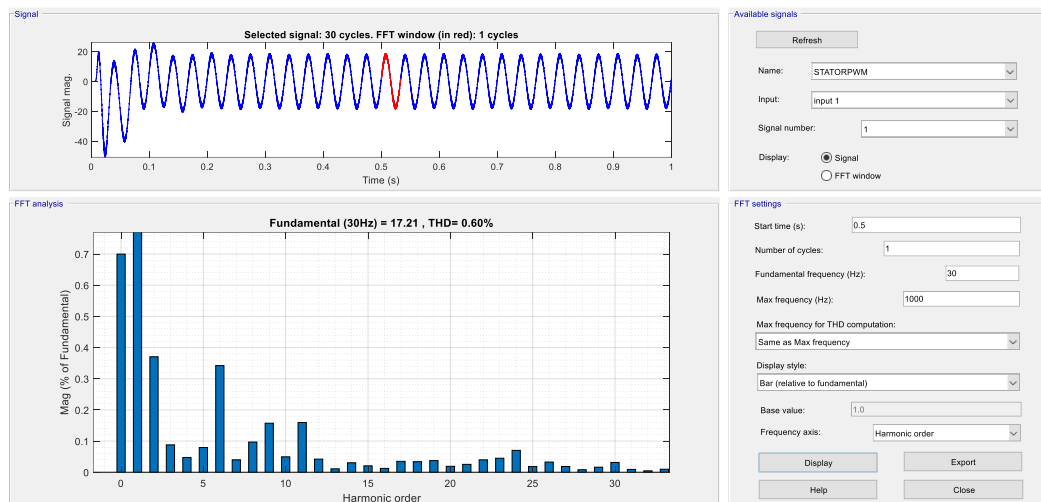
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 685}{900} = 23,88 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 23,88 \times 30 = 7,16 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.74 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 12,2



Gambar 4.75 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.75 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 0,6 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

4.3.6 Hasil Simulasi SVPWM dengan Masukan Indeks Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 30 hz

Pada simulasi ketigabelas, frekuensi tegangan stator yang digunakan adalah 30 Hz dengan nilai indeks modulasi yang divariasikan antara 1 - 0,3. Dengan frekuensi tegangan stator dan jumlah kutub kumparan stator yang sama maka kecepatan sinkron dari motor induksi yang digunakan pada percobaan ini adalah :

$$n_s = \frac{120}{f} \cdot f = \frac{120}{4} \cdot 30 = 900 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 900 \times \frac{2\pi}{60} = 94,286 \text{ rad/s}$$

Pada daya nominal P_n 4000 kW, maka torsi nominal T_m adalah

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_s} = \frac{4000}{94,286} = 42,424 \text{ Nm}$$

Dengan memasukkan torsi beban $42,424 \text{ Nm}$, dari simulasi yang telah dilakukan maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

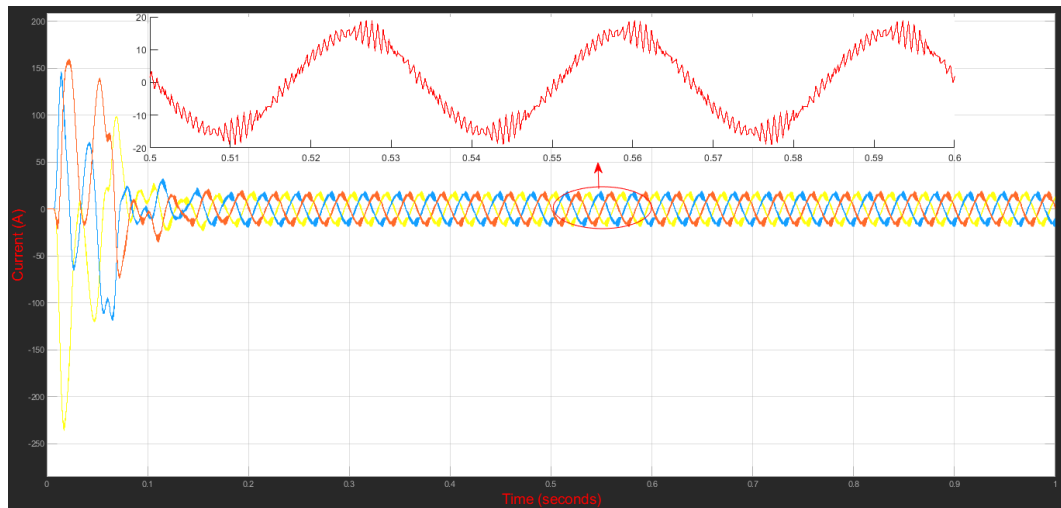
Tabel 4.33 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
42,42	42,8	886	597	10,9	0,05	1,6	0,48	1,49	263	1,56

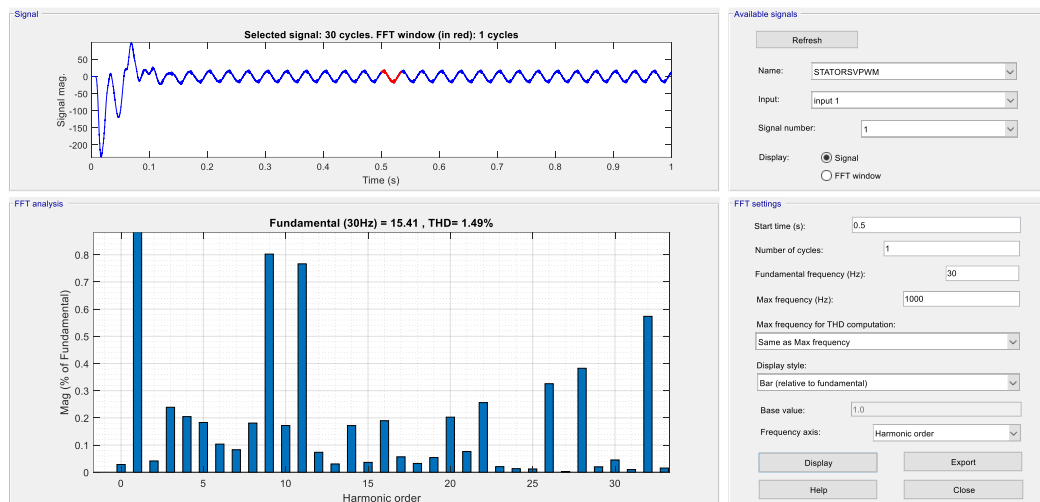
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 886}{900} = 1,6 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 1,6 \times 30 = 0,48 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.76 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 10,9



Gambar 4.77 Spectrum Harmonic Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.77 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 1,49 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi keempatbelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,9. Dengan indeks modulasi 0,9 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

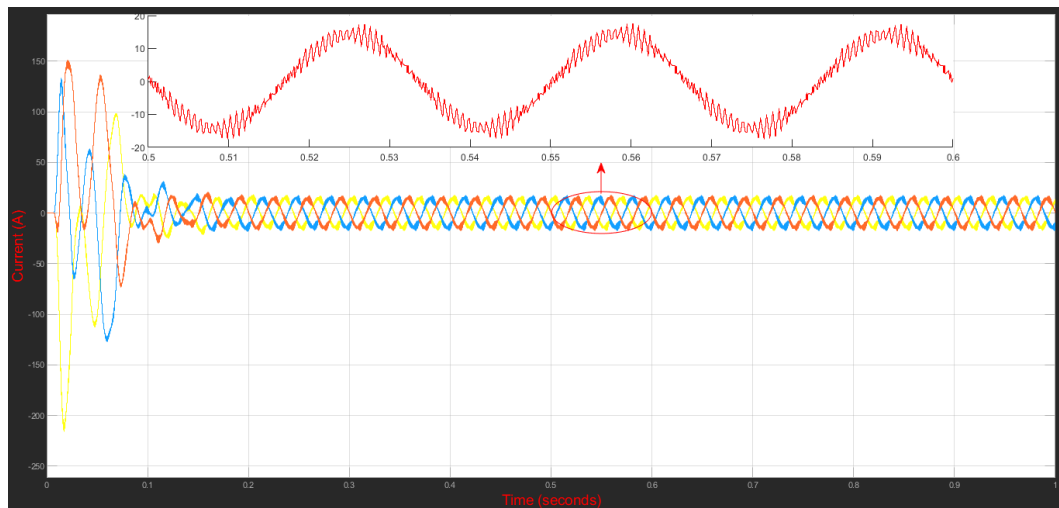
Tabel 4.34 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,9

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
42,42	41,4	882	537	10,1	0,2	2,04	0,61	1,68	100	1,44

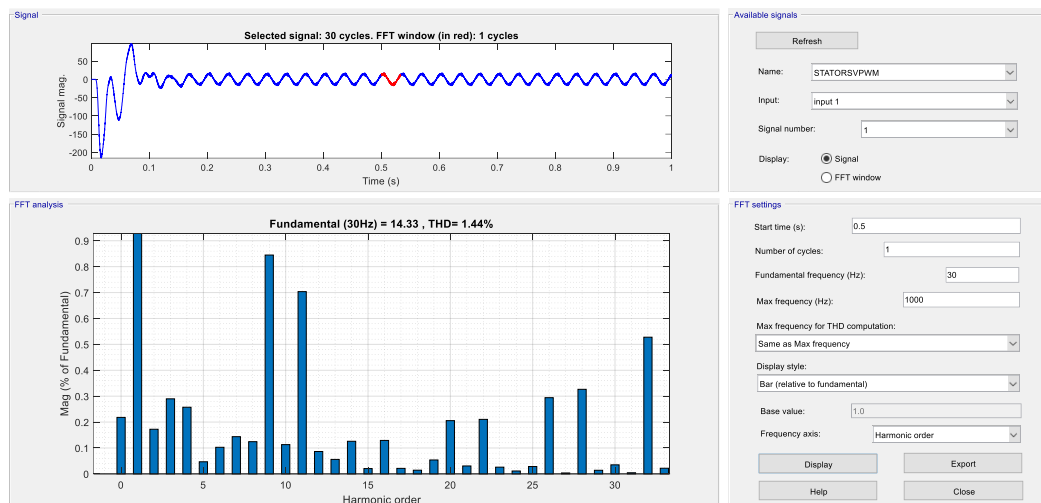
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 882}{900} = 2,04 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,04 \times 30 = 0,61 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.78 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 10,1



Gambar 4.79 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.79 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 1,44 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kelimabelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,8. Dengan indeks modulasi 0,8 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

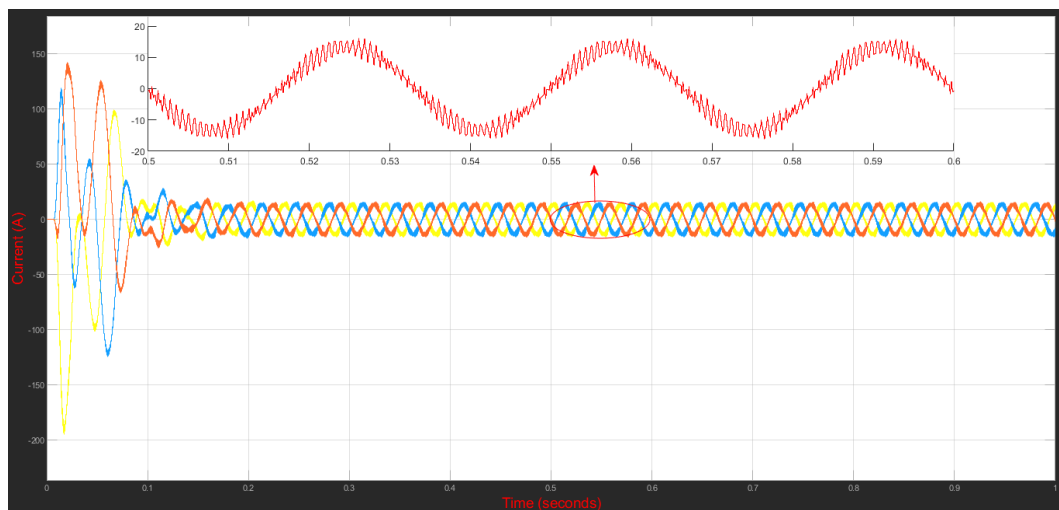
Tabel 4.35 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
42,42	41	875	477	9,4	0,09	2,77	0,83	1,54	151	1,3

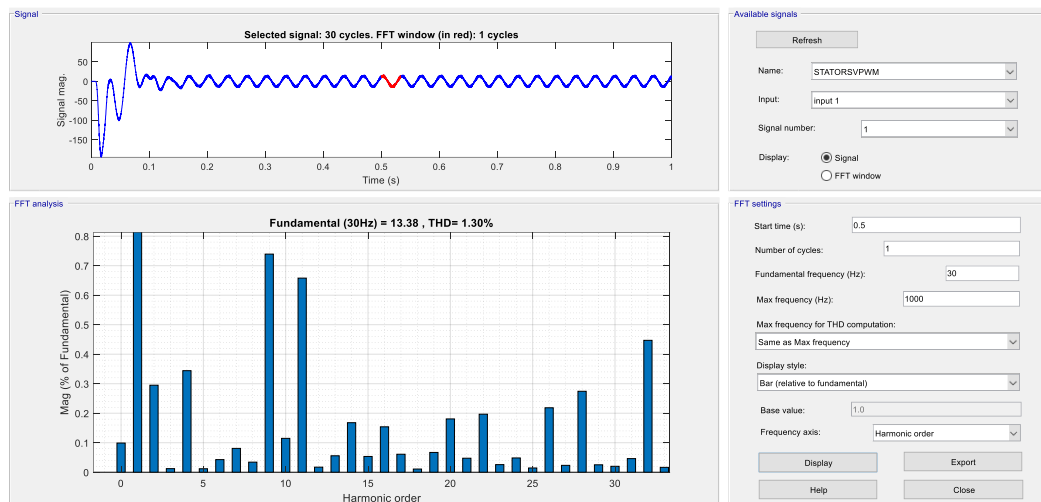
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 875}{900} = 2,77 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,77 \times 30 = 0,83 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.80 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 9,4



Gambar 4.81 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.81 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonik sebesar 1,3 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi keenambelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,7. Dengan indeks modulasi 0,7 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

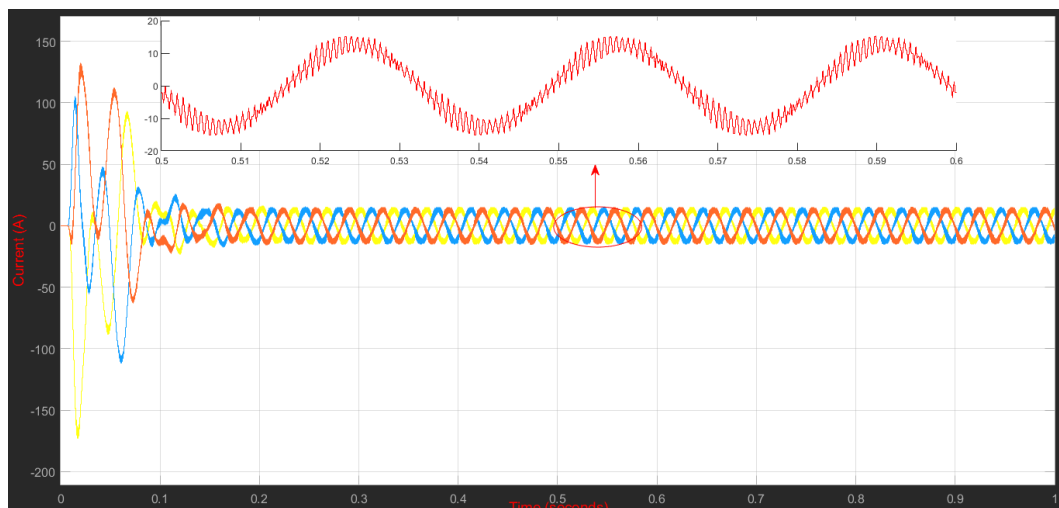
Tabel 4.36 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,7

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
42,42	40	868	418	9	0,31	3,52	1,05	1,4	106	1,25

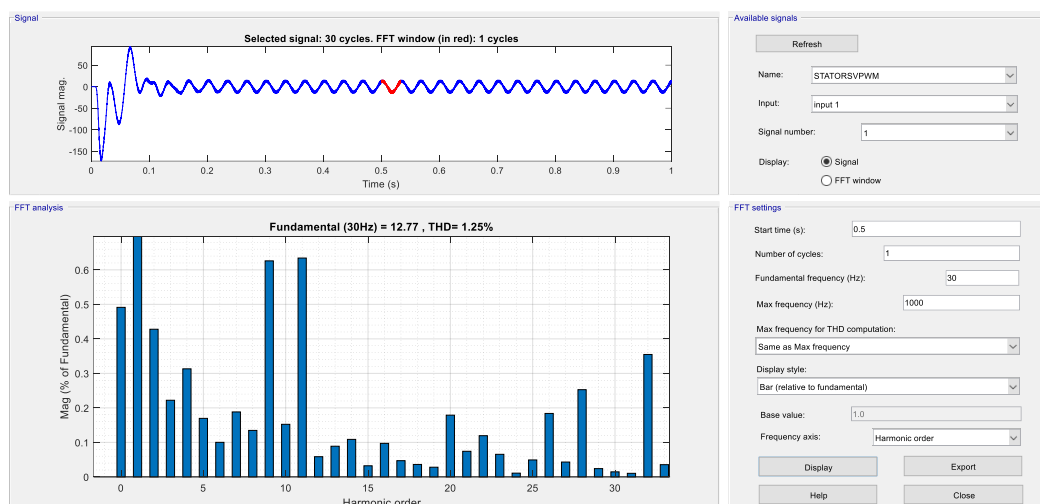
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 868}{900} = 3,52 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 3,52 \times 30 = 1,05 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.82 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 9



Gambar 4.83 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.83 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 1,25 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi ketujuhbelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,5. Dengan indeks modulasi 0,5 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

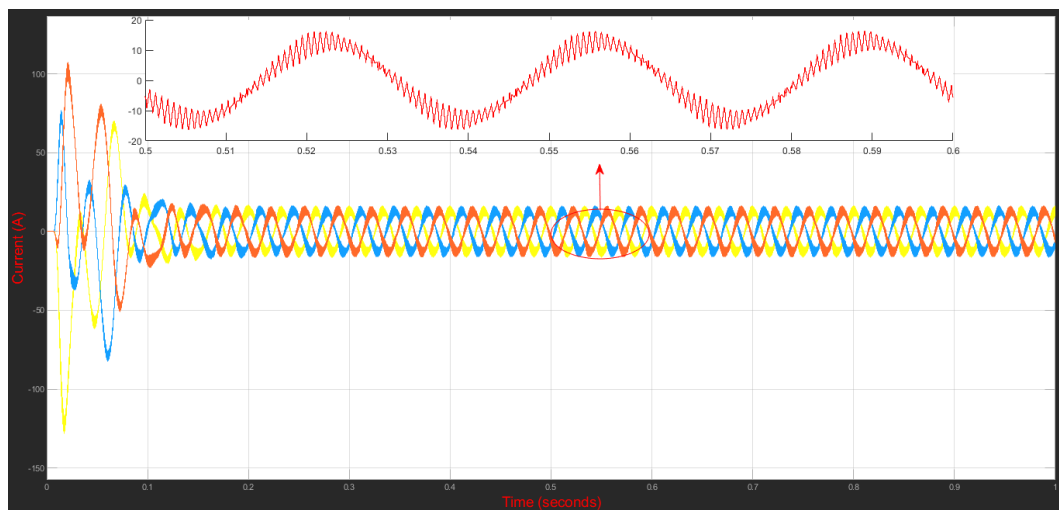
Tabel 4.37 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
42,42	37	840	298	9,1	0,99	6,7	2,01	1,12	78	0,96

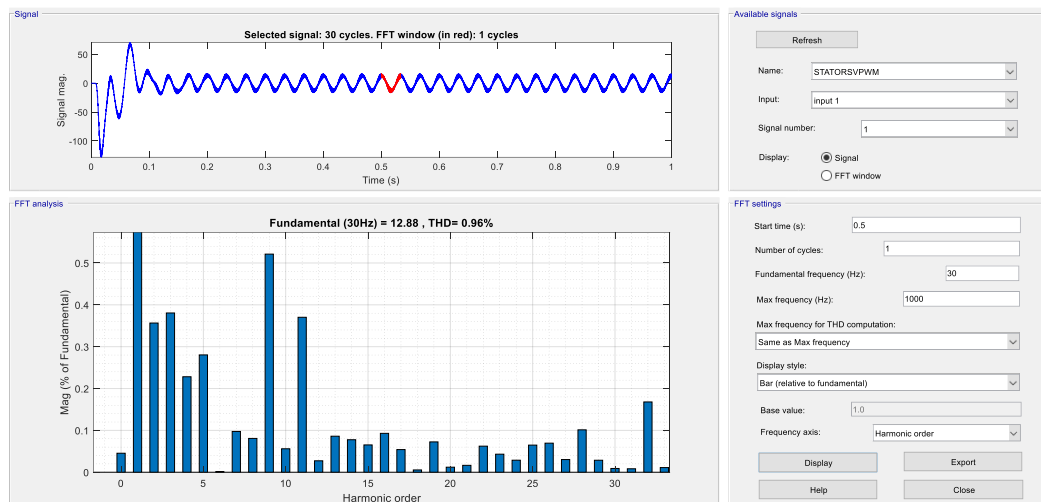
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 840}{900} = 6,7 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 6,7 \times 30 = 2,01 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.84 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 9,1



Gambar 4.85 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.85 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 0,96 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi kedelapanbelas, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,3. Dengan indeks modulasi 0,3 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

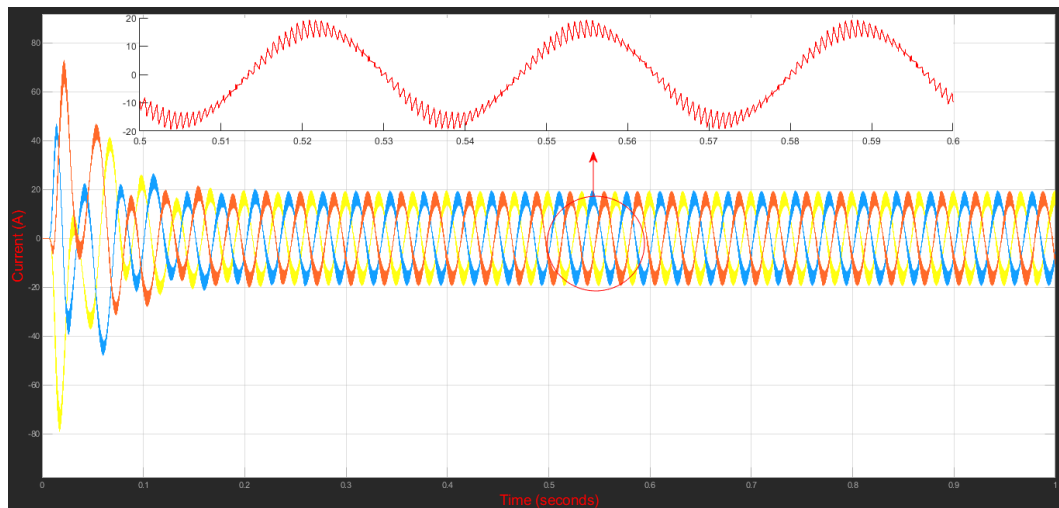
Tabel 4.38 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,3

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
42,42	28	735	179	11,5	3,8	18,3	5,5	1,14	75	0,46

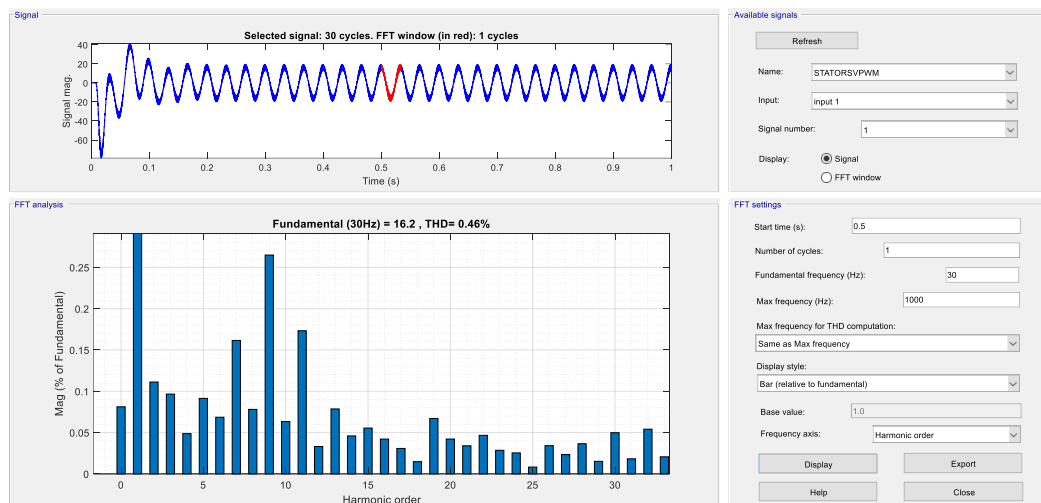
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 900 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 735}{900} = 18,3\% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 18,3 \times 30 = 5,5 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.86 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,5



Gambar 4.87 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.87 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 30 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 0,46 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Tabel 4.39 Hasil Simulasi PWM dan SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1-0.3 menggunakan frekuensi 30 Hz

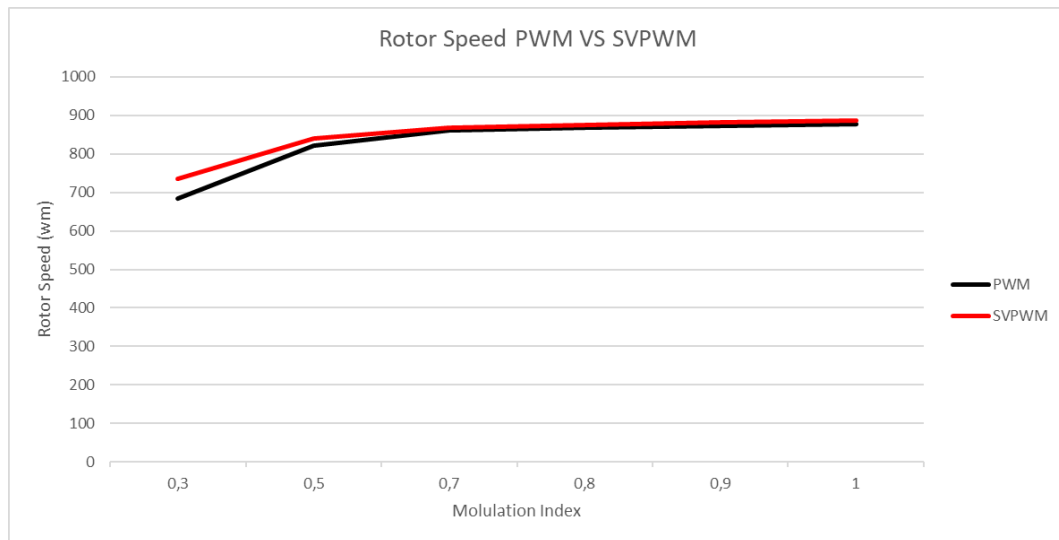
Metode	Tm (N.m)	M. Index	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is(%)	TDD IEEE STD 519- 2014
PWM	42,42	1	47,39	877	517	9,9	0,16	2,61	0,78	0,74	107	1,44	5%
		0,9	41	873	465,6	9,3	0,2	3	0,9	0,76	79	1,1	
		0,8	37	868	414	9	0,03	3,61	1,08	0,78	368	0,98	
		0,7	34	860	362	8,8	0,55	4,41	1,32	0,83	80	1,15	
		0,5	32,4	821	258,7	9,6	1,48	8,81	2,64	0,9	79	0,95	
		0,3	24	685	155,6	12,2	5	23,88	7,16	1,21	74	0,6	
SVPWM	42,42	1	42,8	886	597	10,9	0,05	1,6	0,48	1,49	263	1,56	
		0,9	41,4	882	537	10,1	0,2	2,04	0,61	1,68	100	1,44	
		0,8	41	875	477	9,4	0,09	2,77	0,83	1,54	151	1,3	
		0,7	40	868	418	9	0,31	3,52	1,05	1,4	106	1,25	
		0,5	37	840	298	9,1	0,99	6,7	2,01	1,12	78	0,96	
		0,3	28	735	179	11,5	3,8	18,3	5,5	1,14	75	0,46	

Dari Tabel 4.39 terlihat perbandingan antara kendali PWM dan SVPWM dengan modulasi indeks yang sama pada frekuensi 30 Hz. pada percobaan ketigabelas sampai dengan percobaan kedelapanbelas, semakin besar nilai indeks modulasi maka nilai dari tegangan stator juga akan semakin besar. Hal ini terjadi karena nilai tegangan stator merupakan fungsi dari indeks modulasi dan tegangan searah yang merupakan masukan dari universal bridge inverter. Nilai kecepatan putar rotor pada frekuensi 30 Hz semakin meningkat mengikuti peningkatan dari amplitudo tegangan stator. Kecepatan putar rotor akan meningkat seiring dengan kenaikan indeks modulasi, hal ini terjadi karena percepatan putar rotor dari motor induksi berbanding lurus dengan peningkatan nilai torsi elektromagnetik. Grafik peningkatan nilai kecepatan putar rotor tersebut dapat dilihat pada gambar 4.88 dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM, terlihat pada perbedaan rpm, dimana rotor speed dari SVPWM mencapai 886 - 735 Nr sedangkan untuk

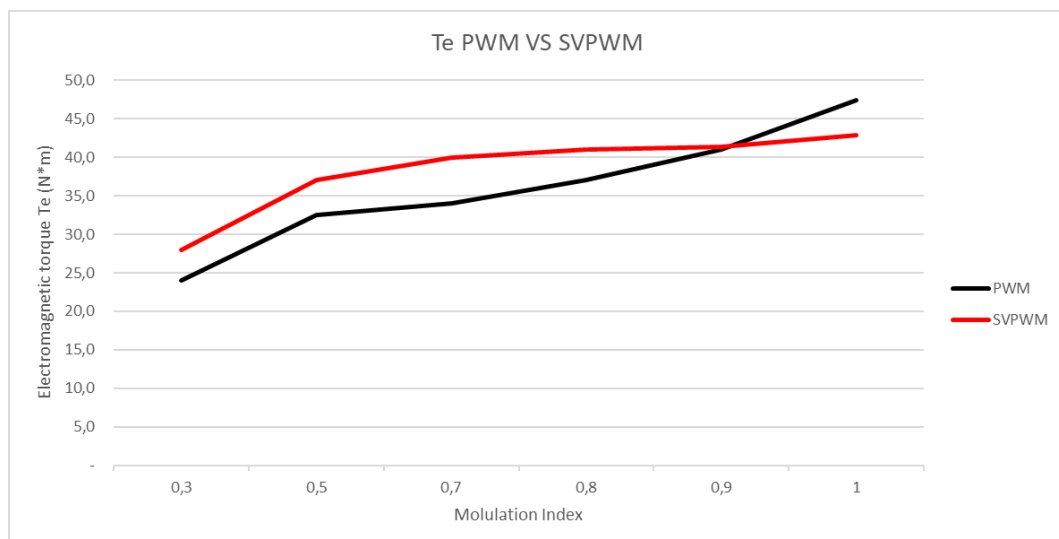
PWM mencapai 877 - 685 Nr yang dibandingkan dengan kecepatan sinkron pada motor induksi yang digunakan adalah 900 Ns.

Kenaikan nilai indeks modulasi dengan nilai frekuensi yang sama pada percobaan pertama sampai dengan percobaan keenam juga mengakibatkan kenaikan nilai torsi elektromagnetik. Hal ini terjadi karena semakin meningkatnya tegangan stator (indeks modulasi) maka fluks celah udara yang dihasilkan akan semakin meningkat, sehingga nilai dari torsi elektromagnetik juga akan meningkat. Grafik kenaikan nilai torsi elektromagnetik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.89.

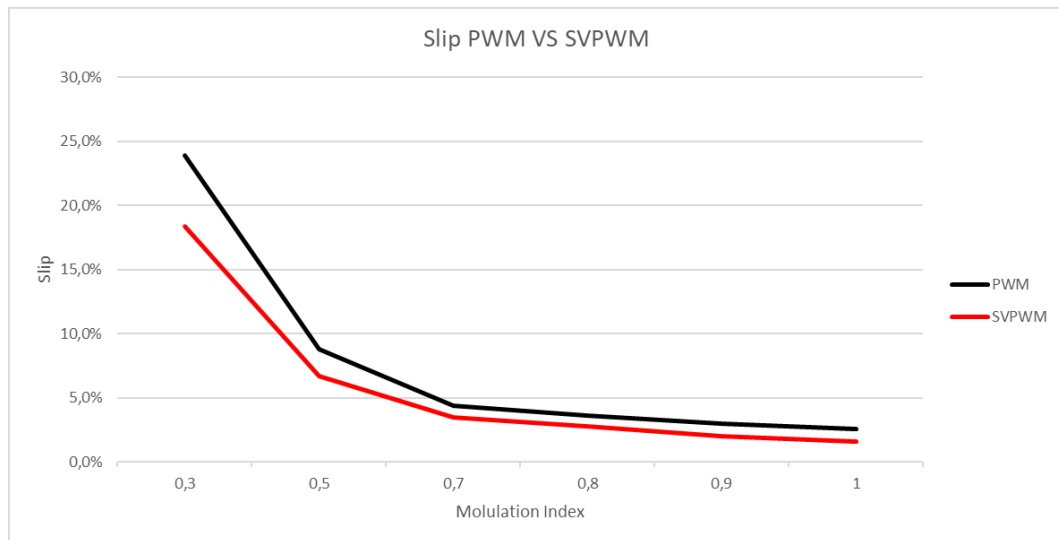
Nilai slip pada percobaan dengan frekuensi 50 Hz ini akan terus menurun mengikuti peningkatan nilai amplitudo tegangan stator. Hal ini terjadi karena semakin besar amplitudo tegangan stator maka nilai kecepatan putar rotor juga akan semakin besar, sehingga dengan nilai kecepatan medan putar stator yang tetap pada 1500 rpm maka nilai slip akan semakin berkurang. Grafik penurunan nilai slip tersebut dapat dilihat pada gambar 4.90 dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM dengan perbandingan slip 1,6% - 18,3 % (dengan indek modulasi 1 - 0,3) pada kendali SVPWM dan untuk kendali PWM 2,61% - 23,88 % (dengan indek modulasi 1 - 0,3). Nilai frekuensi slip pada percobaan pertama sampai dengan percobaan keenam akan terus menurun seiring dengan kenaikan indeks modulasi. ini terjadi karena persamaan frekuensi slip dari motor induksi merupakan fungsi dari nilai slip dan nilai frekuensi stator, sehingga dengan nilai frekuensi stator yang tetap pada 30 Hz dan nilai slip yang semakin menurun mengikuti kenaikan dari indeks modulasi maka nilai dari frekuensi slip juga akan semakin menurun. Grafik penurunan nilai frekuensi slip pada setiap kenaikan nilai indeks modulasi dapat dilihat pada gambar 4.91 dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM dengan perbandingan frekuensi slip 0,48 Hz – 5,5 Hz (dengan indek modulasi 1 - 0,3) pada kendali SVPWM dan untuk kendali PWM 0,78 Hz – 7,16 Hz (dengan indek modulasi 1 - 0,3). Sedangkan untuk nilai total harmonic distortion, kendali PWM lebih optimal dari pada SVPWM. Grafik arus THD pada setiap kenaikan nilai indeks modulasi dapat dilihat pada gambar 4.92



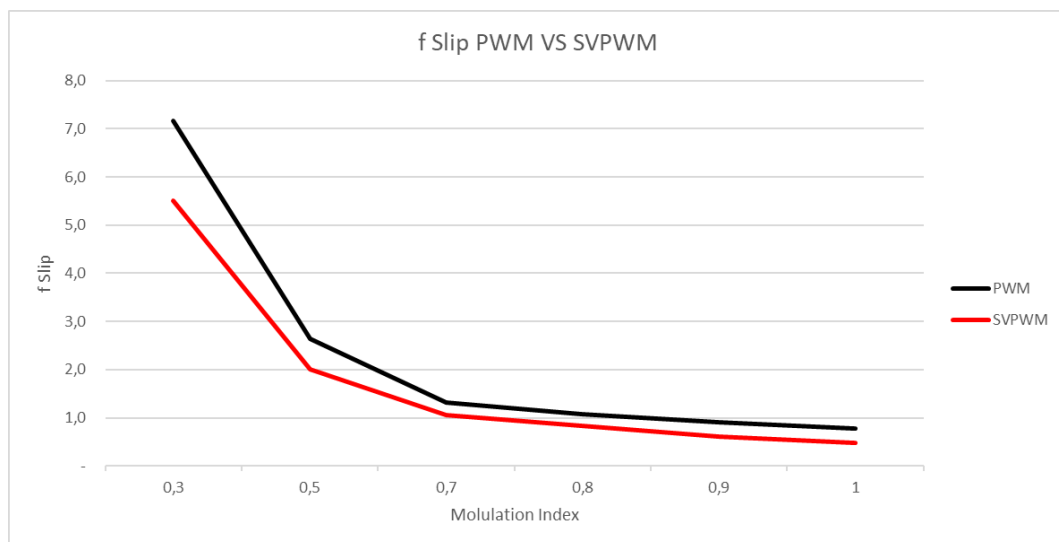
Gambar 4.88 Grafik Perbandingan Rotor Speed PWM dengan SVPWM



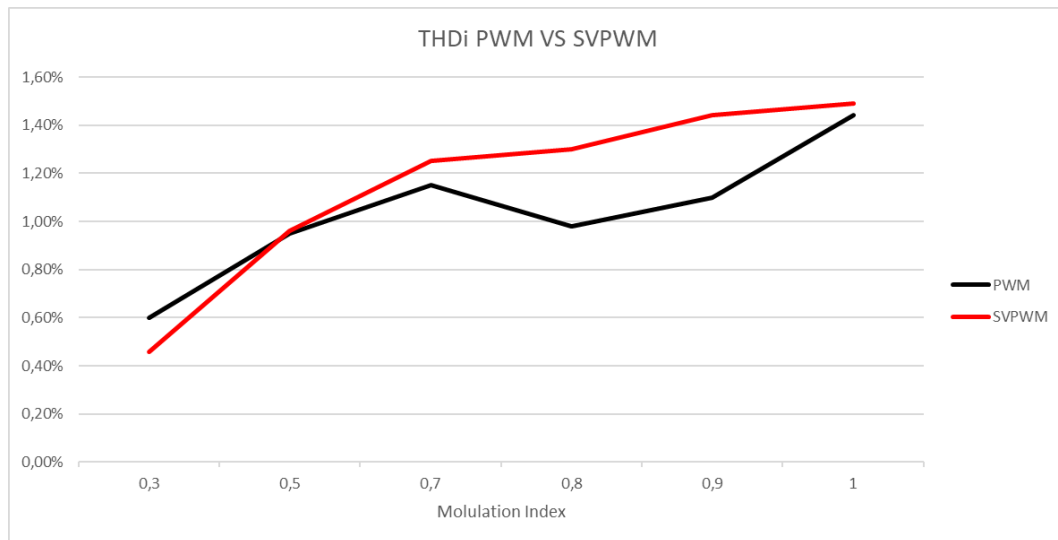
Gambar 4.89 Grafik Perbandingan T_e PWM dan SVPWM



Gambar 4.90 Grafik Perbandingan Slip PWM dan SVPWM



Gambar 4.91 Grafik Perbandingan Frekuensi Slip PWM dan SVPWM



Gambar 4.92 Grafik Perbandingan THDi PWM dan SVPWM

4.3.7 Hasil Simulasi PWM dengan Masukan Indeks Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 20 hz

Pada simulasi kesembilanbelas, frekuensi tegangan stator yang digunakan adalah 20 Hz dengan nilai indeks modulasi yang divariasikan antara 1 - 0,3. Dengan frekuensi tegangan stator dan jumlah kutub kumparan stator yang sama maka kecepatan sinkron dari motor induksi yang digunakan pada percobaan ini adalah :

$$n_s = \frac{120}{f} \cdot f = \frac{120}{4} \cdot 20 = 600 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 600 \times \frac{2\pi}{60} = 62,857 \text{ rad/s}$$

Pada daya nominal P_n 4000 kW, maka torsi nominal T_m adalah

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_s} = \frac{4000}{62,857} = 63,636 \text{ Nm}$$

Dengan memasukkan torsi beban 63,636 Nm, dari simulasi yang telah dilakukan maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

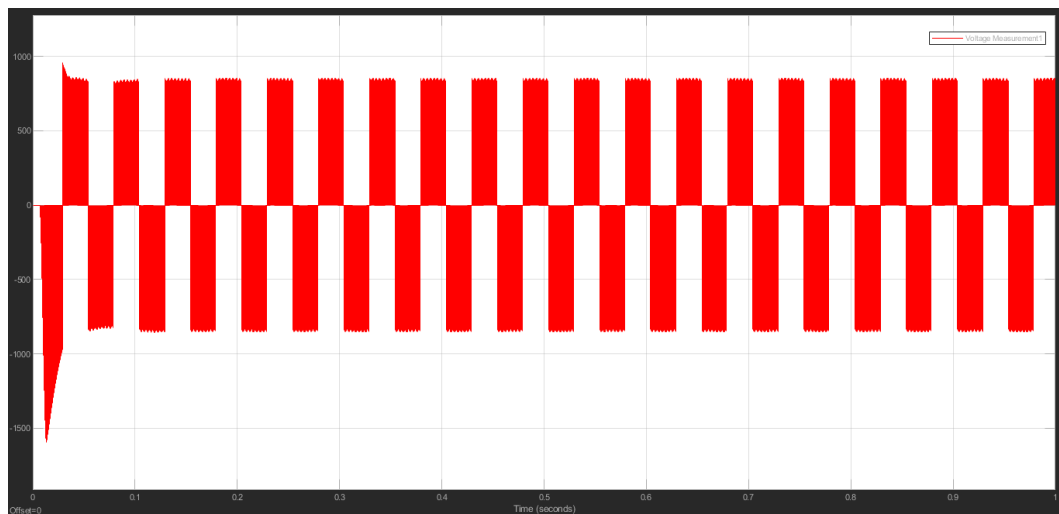
Tabel 4.40 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
63,63	69,10	583	515,9	13,8	0,07	2,83	0,56	3,29	263	1

Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

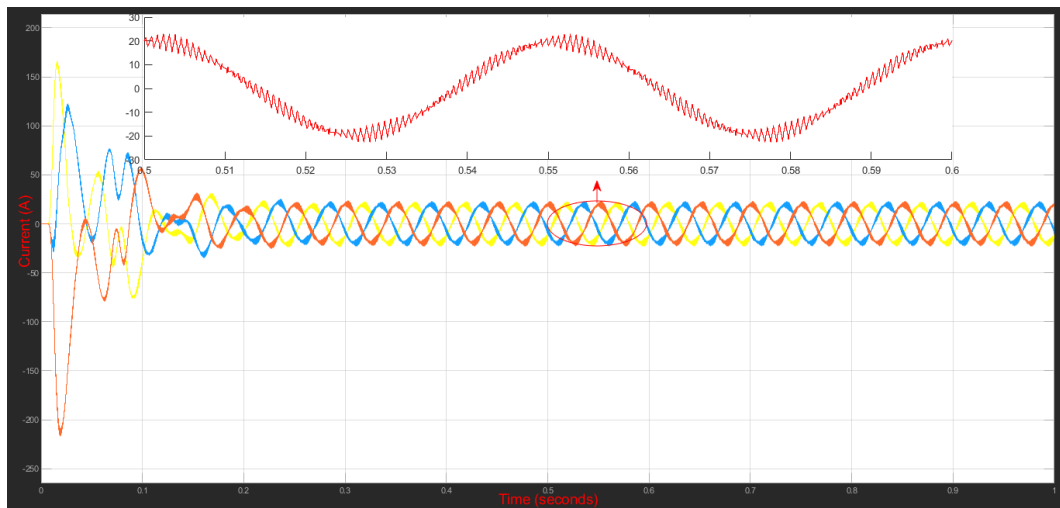
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 583}{600} = 2,83 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,83 \times 20 = 0,56 \text{ Hz.}$$

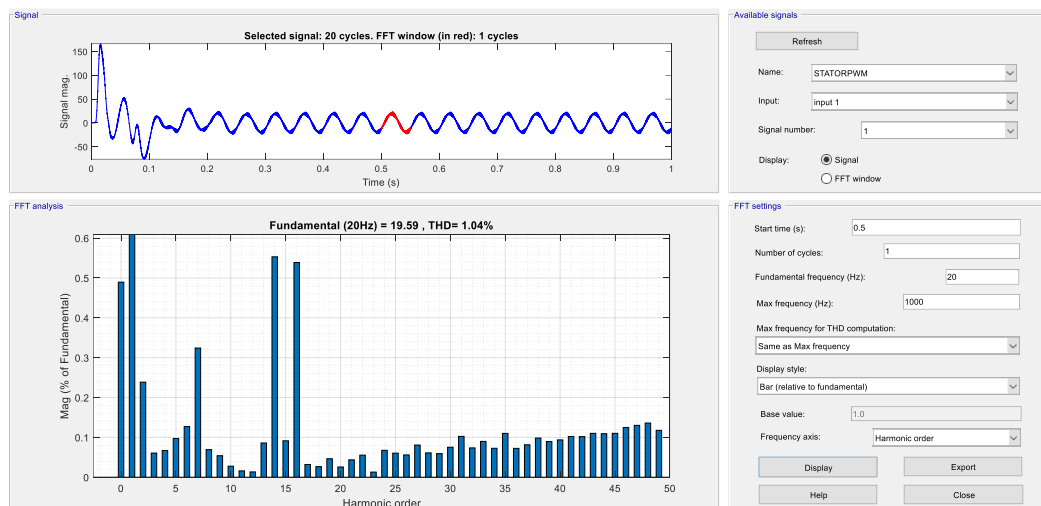


Gambar 4.93 Tegangan Keluaran Inverter

Pada Simulasi Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drives (Vfd) Menggunakan Pulse Generator PWM tegangan keluaran dari inverter adalah sama untuk semua kondisi yang dilakukan melalui simulasi.



Gambar 4.94 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 13,8



Gambar 4.95 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.95 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,04 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi kedua, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,9. Dengan indeks modulasi 0,9 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

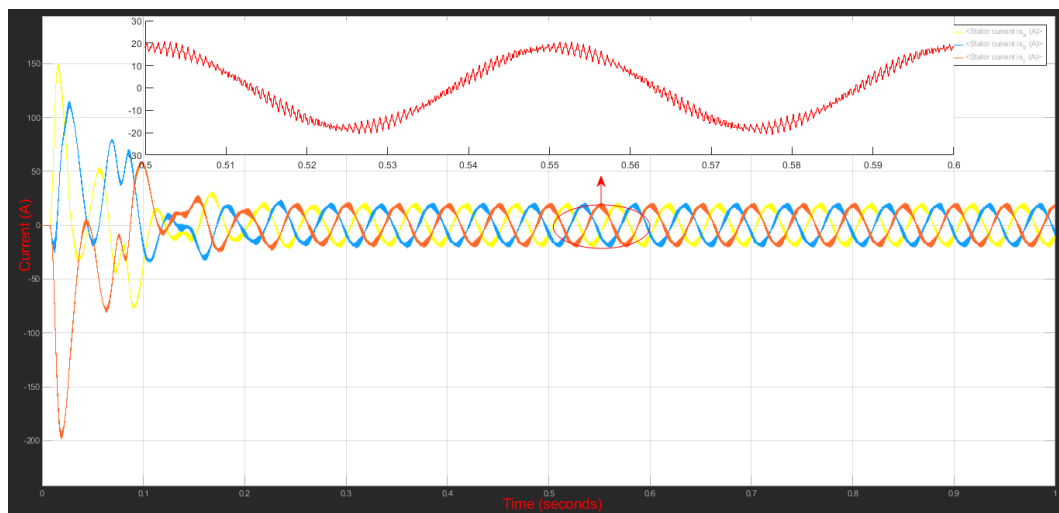
Tabel 4.41 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
63,63	61,3	583	464,7	12,7	0,26	2,93	0,58	2,89	86,43	1,1

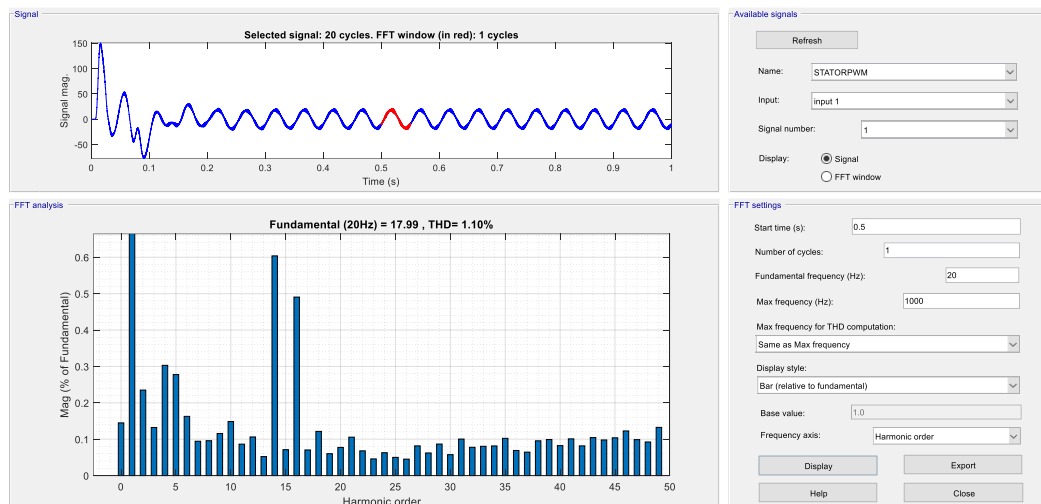
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 583}{600} = 2,93 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,93 \times 20 = 0,58 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.96 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 12,7



Gambar 4.97 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.97 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,1 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi keduapuluhsatu, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,8. Dengan indeks modulasi 0,8 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

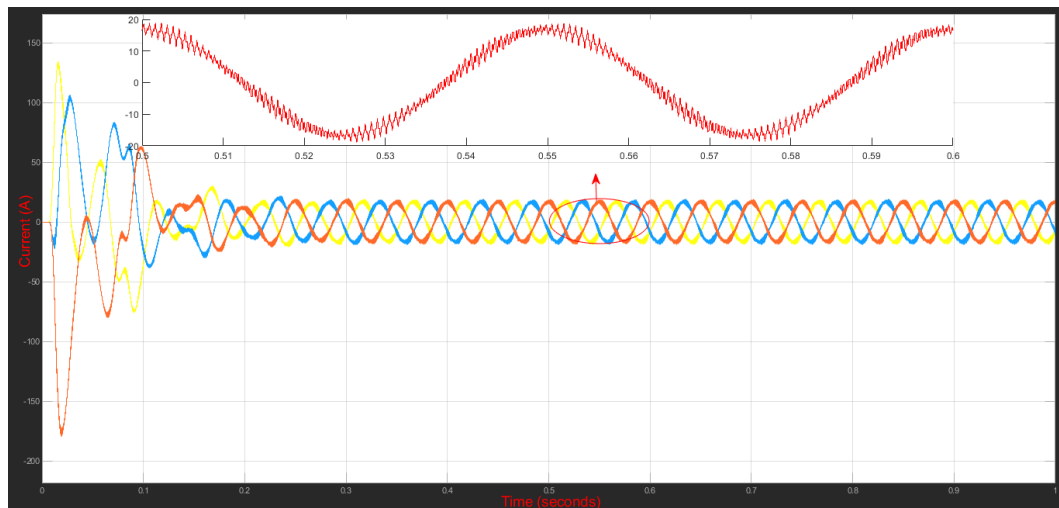
Tabel 4.42 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,8

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
63,63	55,5	578	413,6	11,8	0,34	3,61	0,72	2,51	100	1,05

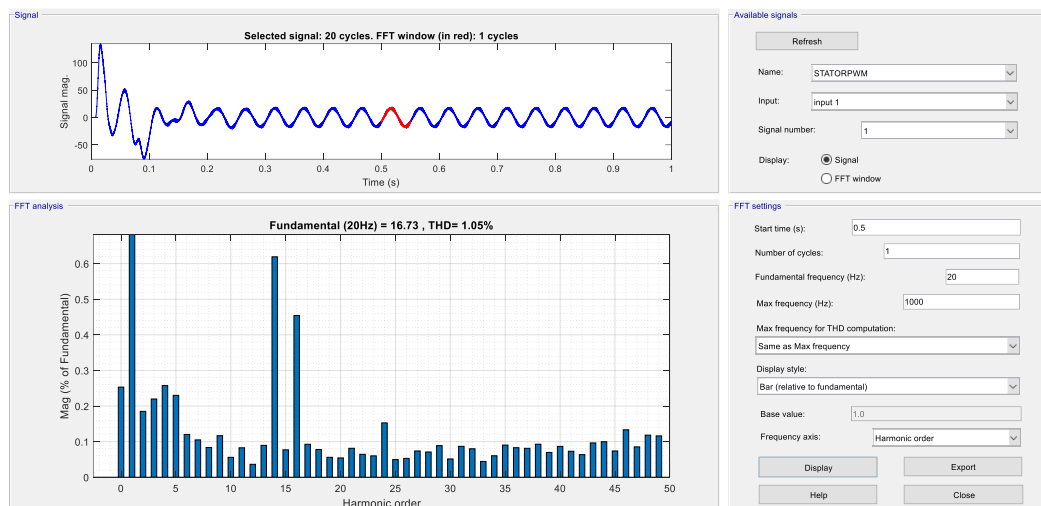
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 578}{600} = 3,61 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = s f = 3,61 \times 20 = 0,72 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.98 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,8



Gambar 4.99 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.99 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 1,06 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kedua puluh dua, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,7. Dengan indeks modulasi 0,7 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

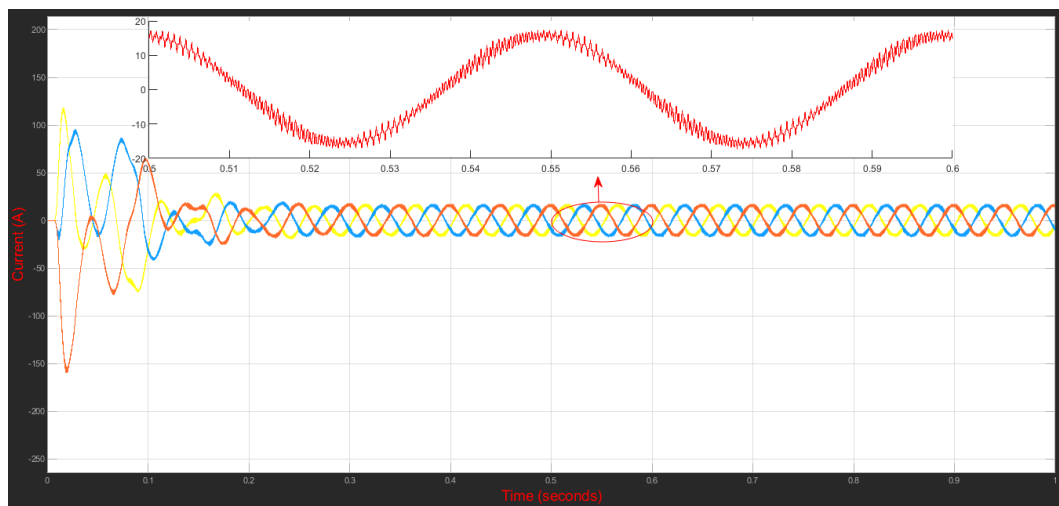
Tabel 4.43 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
63,63	50,6	574	362	11	0,11	4,4	0,88	2,1	148	1

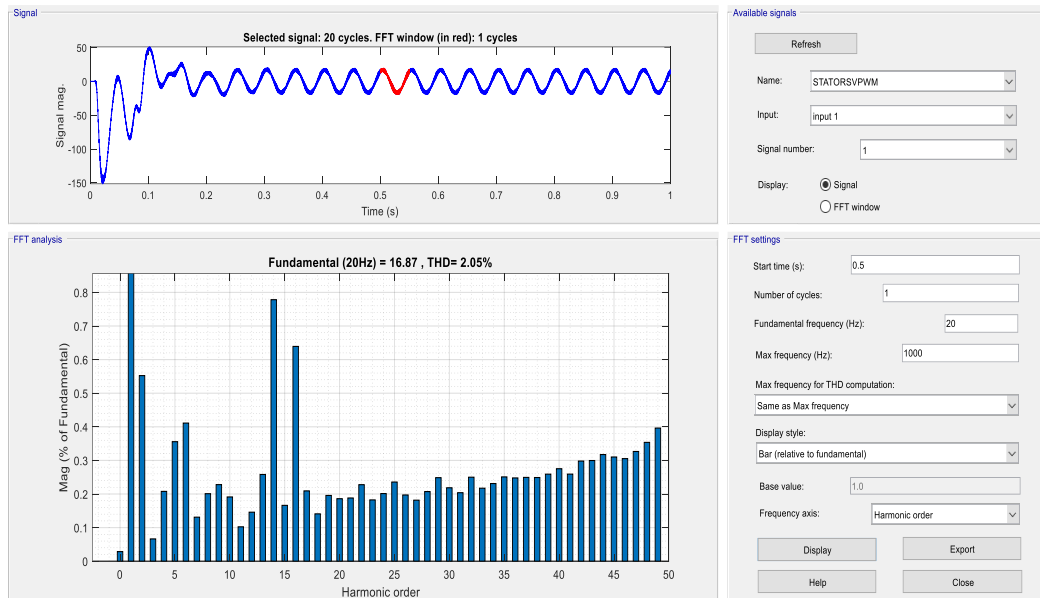
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 574}{600} = 4,4 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 4,4 \times 20 = 0,88 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.100 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11



Gambar 4.101 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.101 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 2,05 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi keduapuluhtiga, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,5. Dengan indeks modulasi 0,5 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

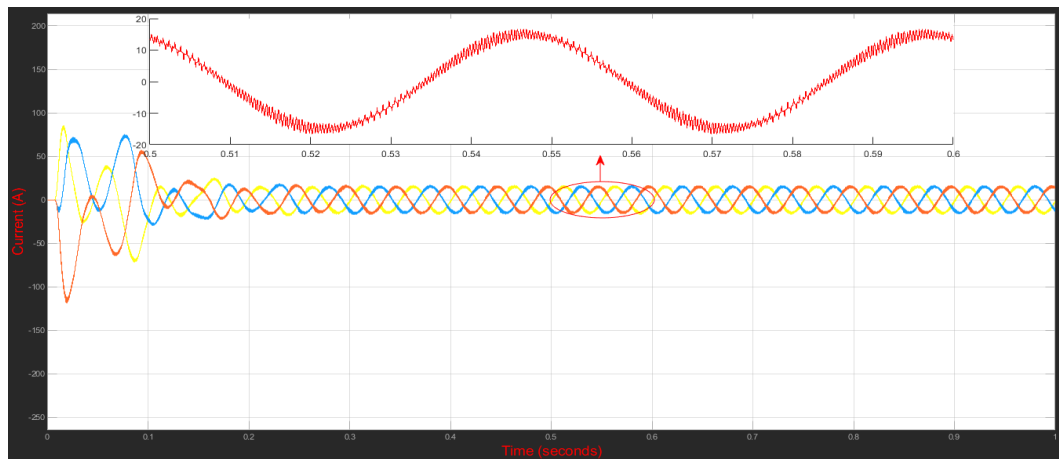
Tabel 4.44 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
63,63	49	545	258,7	10,6	1,38	9,13	1,82	1,66	81	0,7

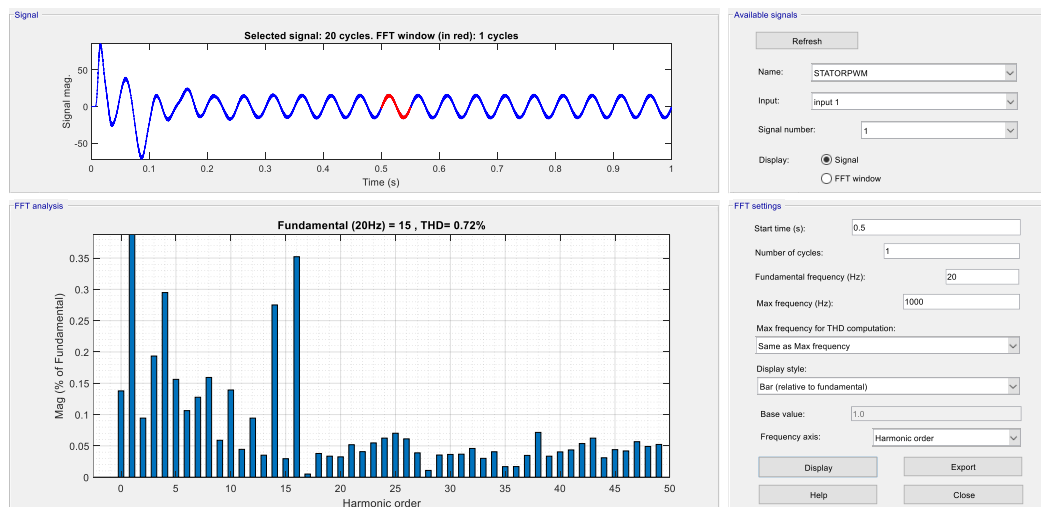
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 545}{600} = 9,13 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = s f = 9,13 \times 20 = 1,82 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.102 Gelombang Arus Keluaran Inverter pada Stator dengan Irms 10,6



Gambar 4.103 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.103 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 0,72 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi keduapuluhempat, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,3. Dengan indeks modulasi 0,3 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

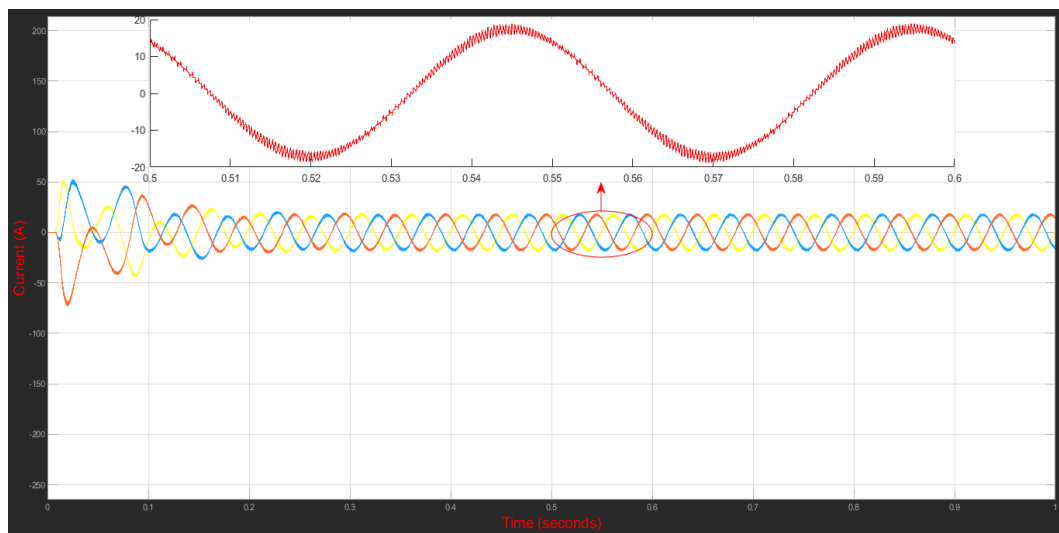
Tabel 4.45 Hasil Simulasi PWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,3

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
63,63	36,7	464	155,6	12,2	3,7	22,68	4,53	1,37	75	0,5

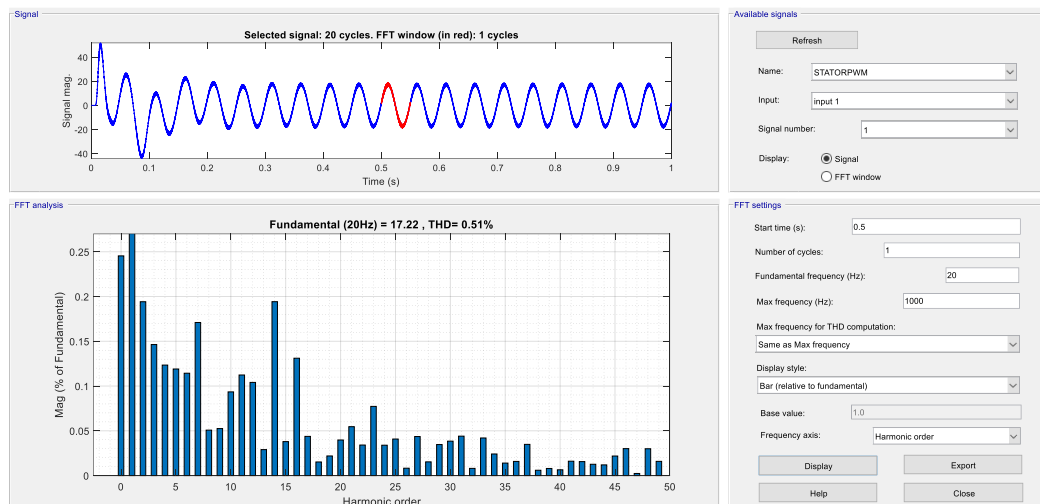
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 464}{600} = 22,68 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 22,38 \times 20 = 4,53 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.104 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 12,2



Gambar 4.105 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.105 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode PWM mengandung harmonic sebesar 0,61 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

4.3.8 Hasil Simulasi SVPWM dengan Masukan Indek Modulasi (1 - 0,3) dengan Frekuensi 20 hz

Pada simulasi kesembilanbelas, frekuensi tegangan stator yang digunakan adalah 20 Hz dengan nilai indeks modulasi yang divariasikan antara 1 - 0,3. Dengan frekuensi tegangan stator dan jumlah kutub kumparan stator yang sama maka kecepatan sinkron dari motor induksi yang digunakan pada percobaan ini adalah :

$$n_s = \frac{120}{f} \cdot f = \frac{120}{4} \cdot 20 = 600 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 600 \times \frac{2\pi}{60} = 62,857 \text{ rad/s}$$

Pada daya nominal P_n 4000 kW, maka torsi nominal T_m adalah

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_s} = \frac{4000}{62,857} = 63,636 \text{ Nm}$$

Dengan memasukkan torsi beban $63,636 \text{ Nm}$, dari simulasi yang telah dilakukan maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

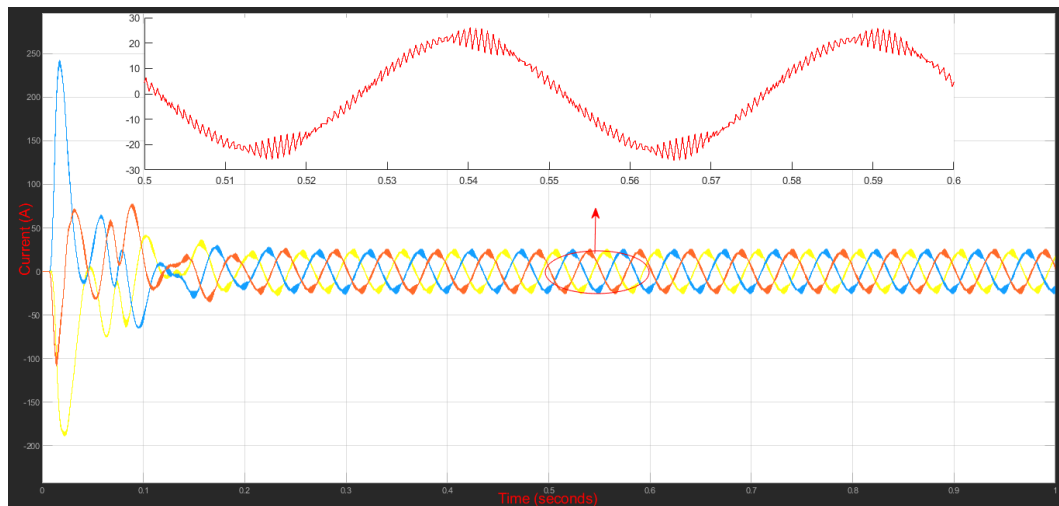
Tabel 4.46 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 1

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs (%)	THD Ir (%)	THD Is (%)
63,63	64,4	589	597	15,7	0,09	1,83	0,36	3,4	296	1,34

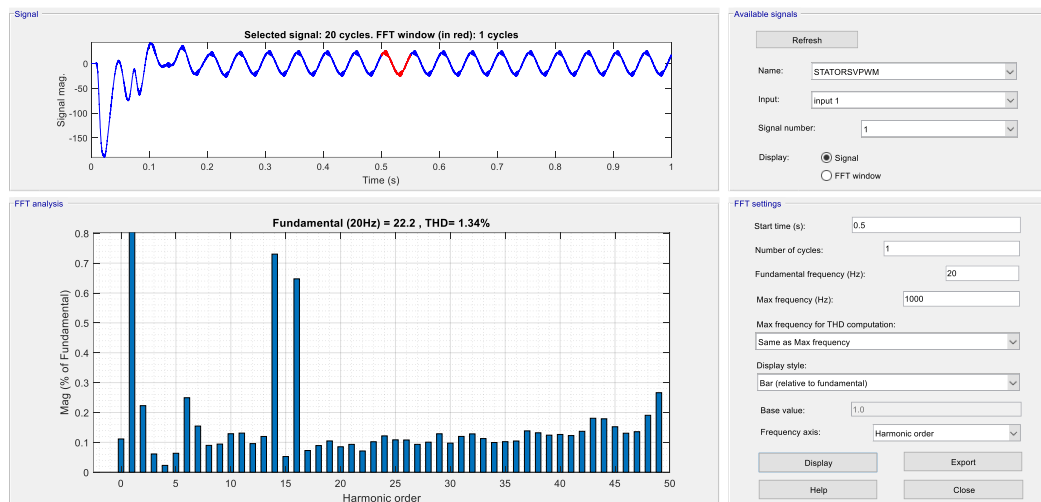
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 589}{600} = 1,83 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 1,83 \times 20 = 0,36 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.106 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 15,7



Gambar 4.107 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.107 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonik sebesar 1,34 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kedua puluh, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,9. Dengan indeks modulasi 0,9 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

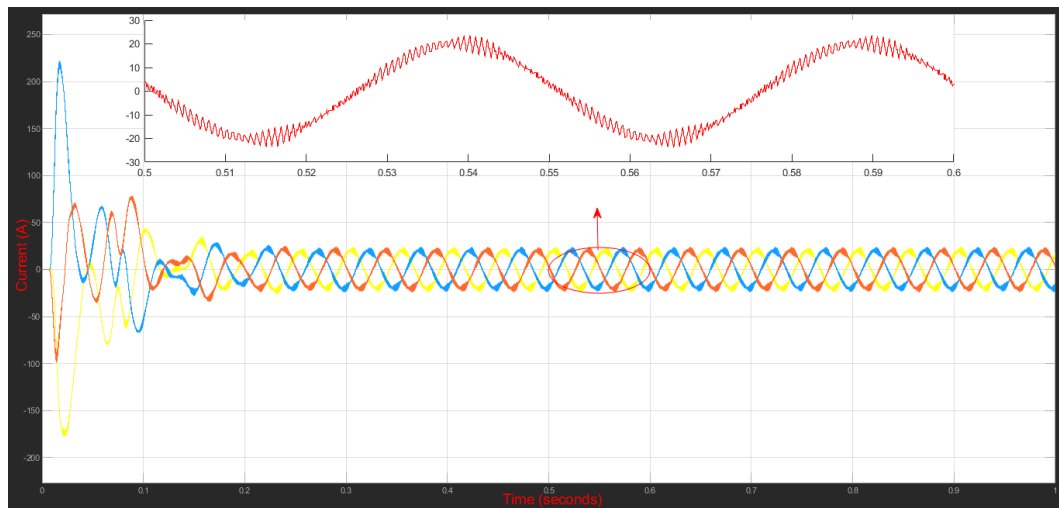
Tabel 4.47 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,9

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
63,63	63,9	587	537	14,3	0,17	2,11	0,42	3,6	166	1,52

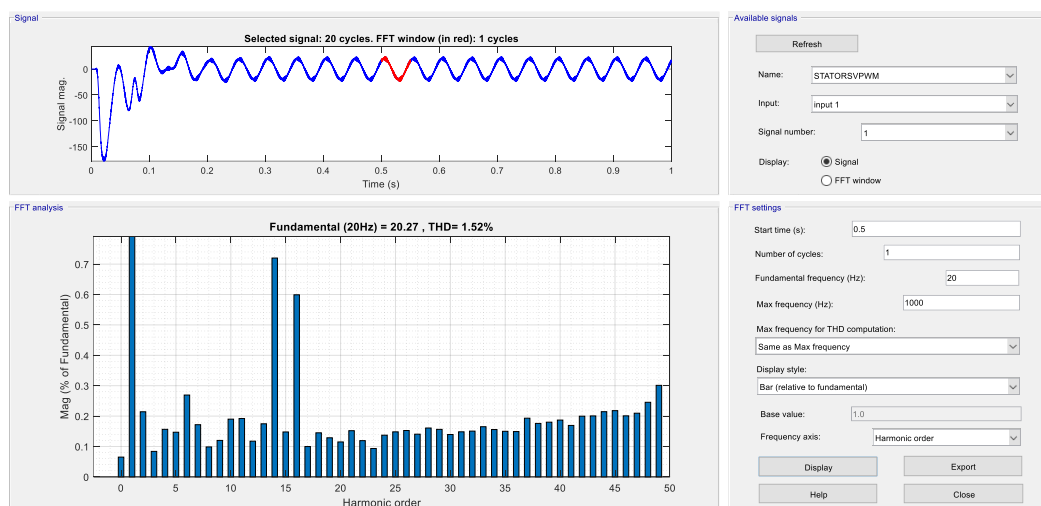
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 587}{600} = 2,11 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 2,11 \times 20 = 0,42 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.108 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 14,3



Gambar 4.109 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.109 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 1,52 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kedua puluh satu, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,8. Dengan indeks modulasi 0,8 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

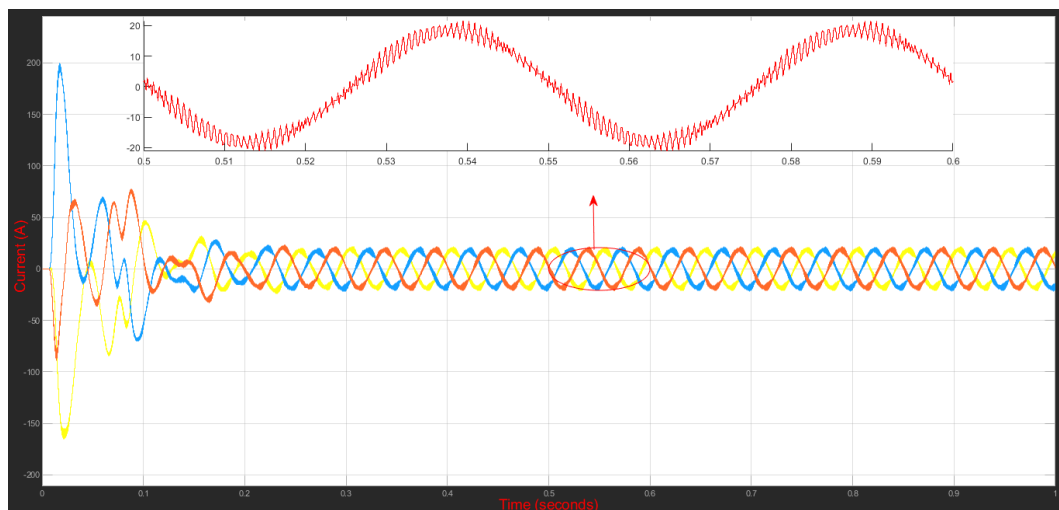
Tabel 4.48 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi =0,8

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
63,63	62	582	478	13	0,14	3	0,6	3,85	189	1,83

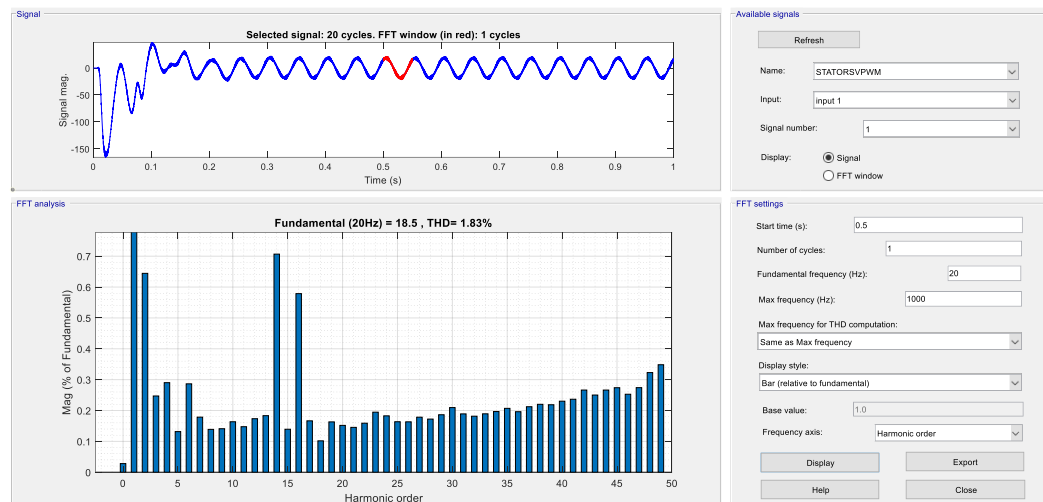
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 582}{600} = 3\% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 3 \times 20 = 0,6 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.110 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 13



Gambar 4.111 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.111 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonik sebesar 1,83 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Pada simulasi kedua puluh dua, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,7. Dengan indeks modulasi 0,7 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

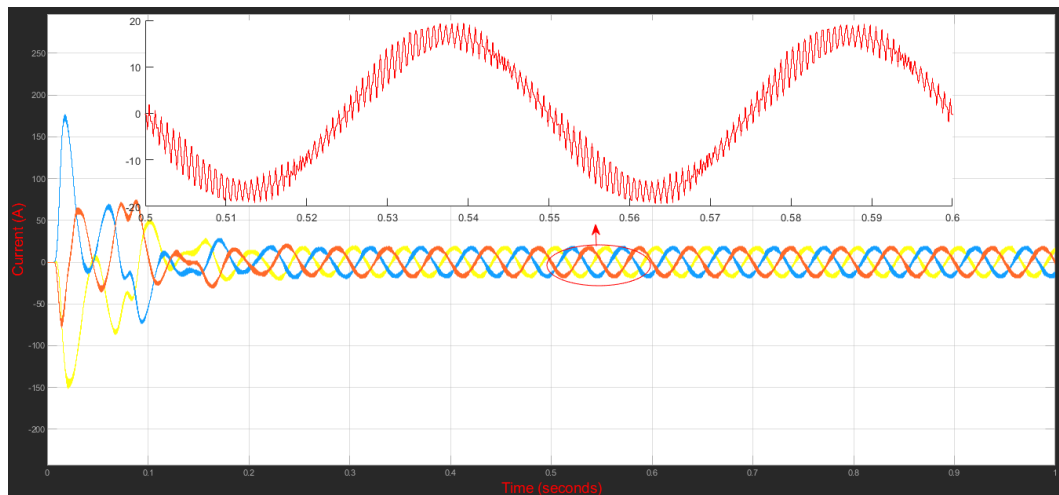
Tabel 4.49 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,7

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
63,63	61	578	418	11,9	0,02	3,73	0,74	4	957	2

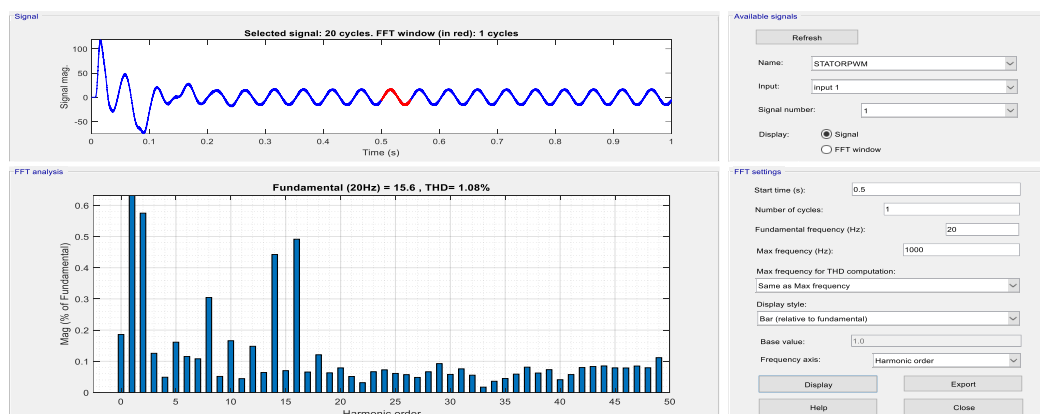
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 578}{600} = 3,73 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 3,73 \times 20 = 0,74 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.112 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,9



Gambar 4.113 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.113 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 1,06 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi keduapuluhtiga, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,5. Dengan indeks modulasi 0,5 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

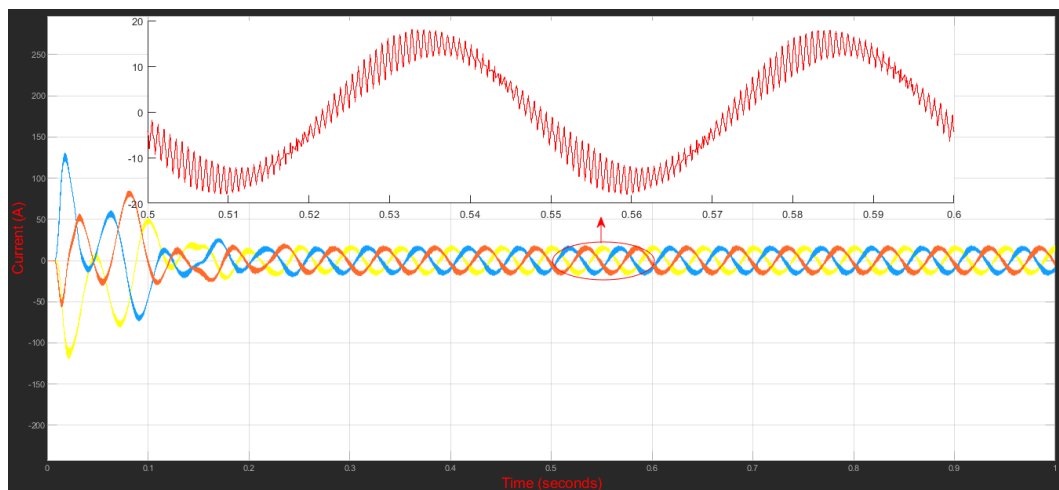
Tabel 4.50 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 0,5

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
63,63	56	558	298	10,6	0,8	6,98	1,39	4,48	92	2,1

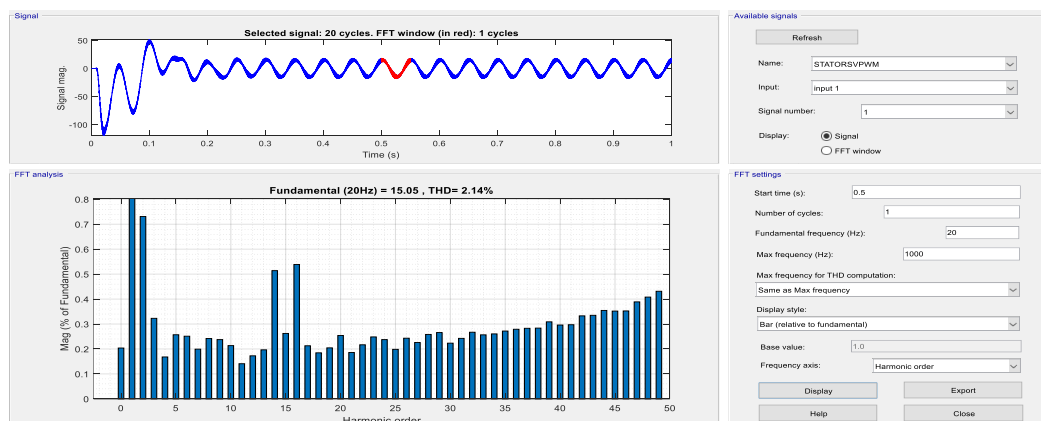
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 558}{600} = 6,98 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 6,98 \times 20 = 1,39 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.114 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 10,6



Gambar 4.115 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inveter pada Stator

Gambar 4.115 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 2,14 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014

Pada simulasi keduapuluhempat, indeks modulasi yang digunakan adalah 0,3. Dengan indeks modulasi 0,3 maka diperoleh nilai output dengan variable yang disajikan pada table berikut :

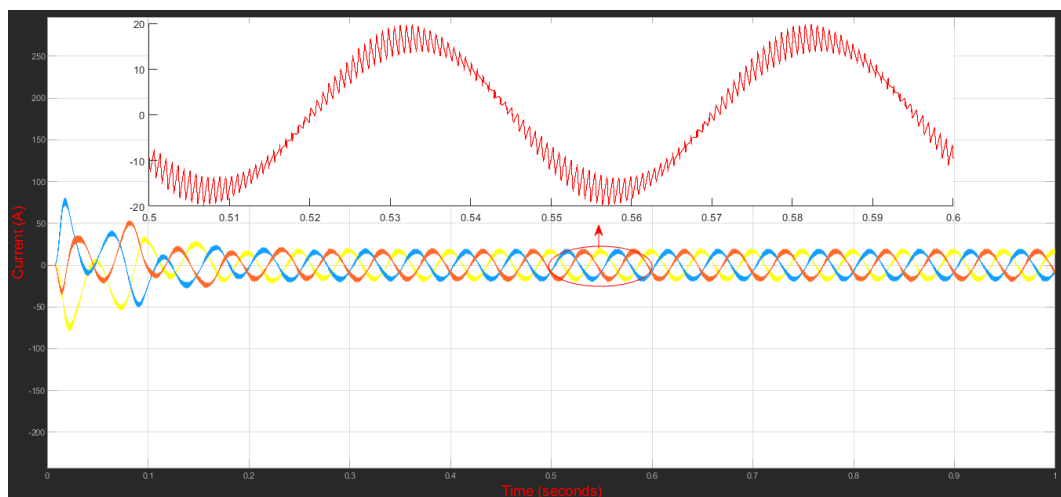
Tabel 4.51 Hasil Simulasi SVPWM Inverter dengan Indek modulasi = 0,3

Tm (N.m)	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is (%)
63,63	43	493	179	11,8	1,9	17,86	3,57	5	74	1,43

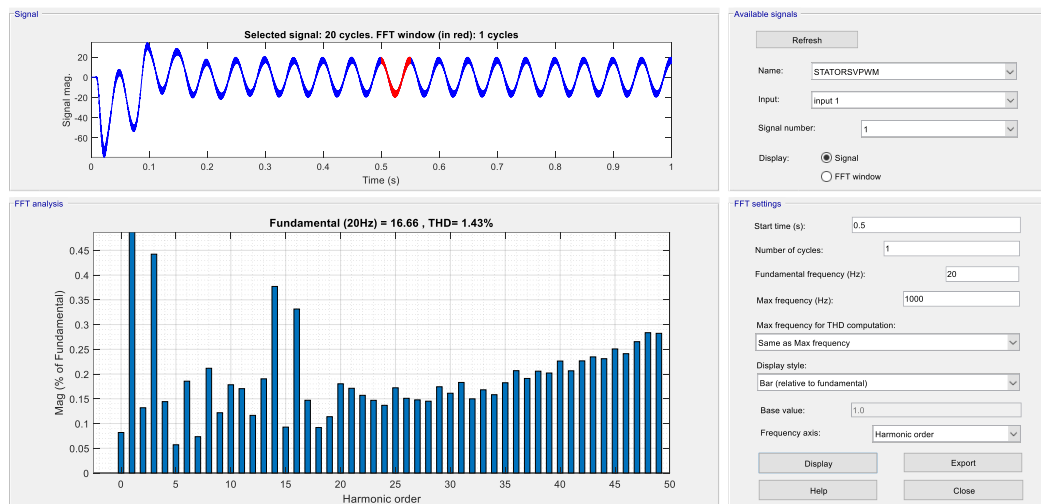
Dengan kecepatan sinkron n_s sebesar 600 rpm maka slip yang dihasilkan pada percobaan pertama ini adalah :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{600 - 493}{600} = 17,86 \% , \text{ dengan nilai frekuensi slip adalah :}$$

$$f_{slip} = sf = 17,86 \times 20 = 3,57 \text{ Hz.}$$



Gambar 4.116 Gelombang Arus Keluaran Inveter pada Stator dengan Irms 11,8



Gambar 4.117 Spectrum Harmonik Arus Keluaran Inverter pada Stator

Gambar 4.117 adalah grafik spektrum harmonik dengan frekuensi fundamental 20 Hz menggunakan metode SVPWM mengandung harmonic sebesar 1,43 %, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan dan sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

Tabel 4.52 Hasil Simulasi PWM dan SVPWM Inverter dengan Indeks modulasi = 1-0.3 menggunakan frekuensi 20 Hz

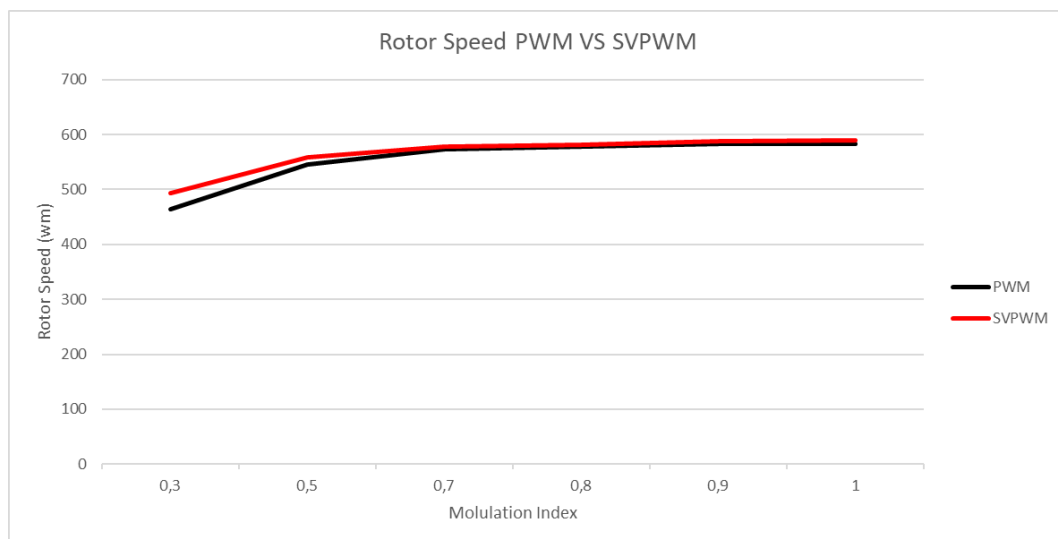
Metode Kendali	Tm (N.m)	M. Index	Te (N.m)	rpm (Nr)	Vs (Vrms)	Is (irms)	Ir (irms)	Slip (%)	Fslip (Hz)	THD Vs(%)	THD Ir(%)	THD Is(%)	TDD IEEE STD 519-2014
PWM	63,63	1	69,10	583	515,9	13,8	0,07	2,83	0,56	3,29	263	1	5%
		0,9	61,3	583	464,7	12,7	0,26	2,93	0,58	2,89	86,43	1,1	
		0,8	55,5	578	413,6	11,8	0,34	3,61	0,72	2,51	100	1,05	
		0,7	50,6	574	362	11	0,11	4,4	0,88	2,1	148	1	
		0,5	49	545	258,7	10,6	1,38	9,13	1,82	1,66	81	0,7	
		0,3	36,7	464	155,6	12,2	3,7	22,68	4,53	1,37	75	0,5	
SVPWM	63,63	1	64,4	589	597	15,7	0,09	1,83	0,36	3,4	296	1,34	
		0,9	63,9	587	537	14,3	0,17	2,11	0,42	3,6	166	1,52	
		0,8	62	582	478	13	0,14	3	0,6	3,85	189	1,83	
		0,7	61	578	418	11,9	0,02	3,73	0,74	4	957	2	
		0,5	56	558	298	10,6	0,8	6,98	1,39	4,48	92	2,1	
		0,3	43	493	179	11,8	1,9	17,86	3,57	5	74	1,43	

Dari Tabel 4.52 terlihat perbandingan antara kendali PWM dan SVPWM dengan modulasi indeks yang sama pada frekuensi 20 Hz. pada percobaan kesembilanbelas sampai dengan percobaan keduapuluhempat, semakin besar nilai indeks modulasi maka nilai dari tegangan stator juga akan semakin besar. Hal ini terjadi karena nilai tegangan stator merupakan fungsi dari indeks modulasi dan tegangan searah yang merupakan masukan dari universal bridge inverter. Nilai kecepatan putar rotor pada frekuensi 20 Hz semakin meningkat mengikuti peningkatan dari amplitudo tegangan stator. Kecepatan putar rotor akan meningkat seiring dengan kenaikan indeks modulasi, hal ini terjadi karena percepatan putar rotor dari motor induksi berbanding lurus dengan peningkatan nilai torsi elektromagnetik. Grafik peningkatan nilai kecepatan putar rotor tersebut dapat dilihat pada gambar 4.58. dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM, terlihat pada perbedaan rpm, dimana rotor speed dari SVPWM mencapai 589 - 493 Nr sedangkan untuk PWM mencapai 583 - 464 Nr yang dibandingkan dengan kecepatan sinkron pada motor induksi yang digunakan adalah 600 Ns.

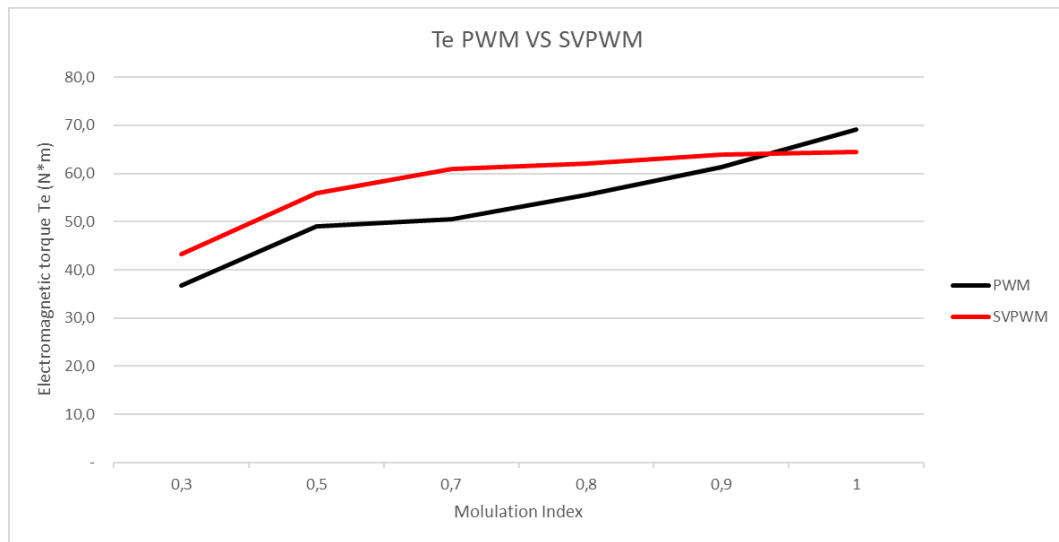
Kenaikan nilai indeks modulasi dengan nilai frekuensi yang sama pada percobaan kesembilanbelas sampai dengan percobaan keduapuluhempat juga mengakibatkan kenaikan nilai torsi elektromagnetik. Hal ini terjadi karena semakin meningkatnya tegangan stator (indeks modulasi) maka fluks celah udara yang dihasilkan akan semakin meningkat, sehingga nilai dari torsi elektromagnetik juga akan meningkat. Grafik kenaikan nilai torsi elektromagnetik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.59.

Nilai slip pada percobaan dengan frekuensi 20 Hz ini akan terus menurun mengikuti peningkatan nilai amplitudo tegangan stator. Hal ini terjadi karena semakin besar amplitudo tegangan stator maka nilai kecepatan putar rotor juga akan semakin besar, sehingga dengan nilai kecepatan medan putar stator yang tetap pada 600 rpm maka nilai slip akan semakin berkurang. Grafik penurunan nilai slip tersebut dapat dilihat pada gambar 4.60 dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM dengan perbandingan slip 1,83% - 27,86% (dengan indeks modulasi 1 - 0,3) pada kendali SVPWM dan untuk kendali PWM 2,83% - 22,68% (dengan indeks modulasi 1 - 0,3) . Nilai frekuensi slip pada percobaan kesembilanbelas

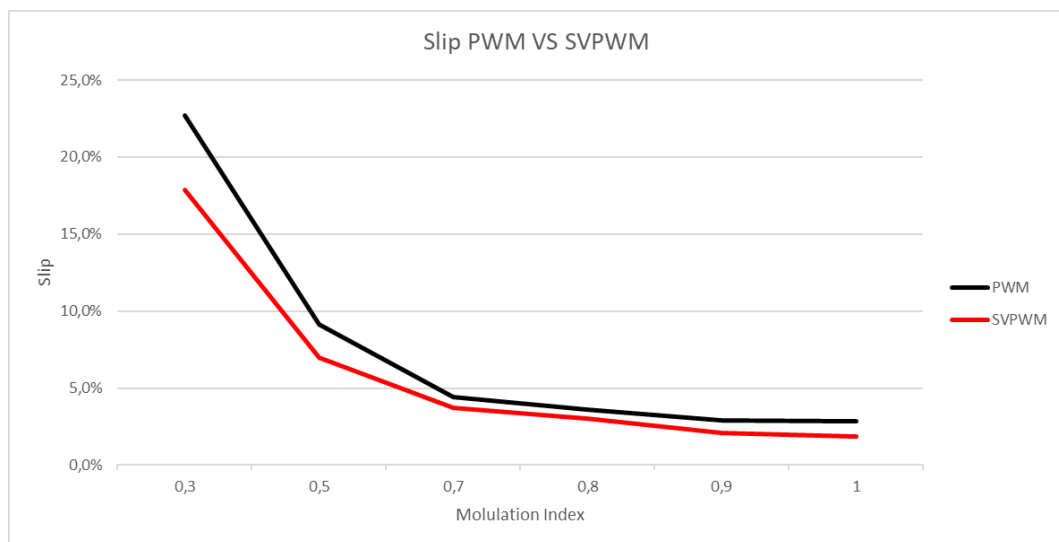
sampai dengan percobaan kedupuluhempat akan terus menurun seiring dengan kenaikan indeks modulasi. ini terjadi karena persamaan frekuensi slip dari motor induksi merupakan fungsi dari nilai slip dan nilai frekuensi stator, sehingga dengan nilai frekuensi stator yang tetap pada 20 Hz dan nilai slip yang semakin menurun mengikuti kenaikan dari indeks modulasi maka nilai dari frekuensi slip juga akan semakin menurun. Grafik penurunan nilai frekuensi slip pada setiap kenaikan nilai indeks modulasi dapat dilihat pada gambar 4.61 dengan kendali SVPWM lebih optimal dari pada PWM dengan perbandingan frekuensi slip 0,36 Hz – 3,57 Hz (dengan indek modulasi 1 - 0,3) pada kendali SVPWM dan untuk kendali PWM 0,56 Hz – 4,53 Hz (dengan indek modulasi 1 - 0,3) . Sedangkan untuk nilai total harmonic distortion, kendali PWM lebih optimal dari pada SVPWM. Grafik Arus THD pada setiap kenaikan nilai indeks modulasi dapat dilihat pada gambar 4.62.



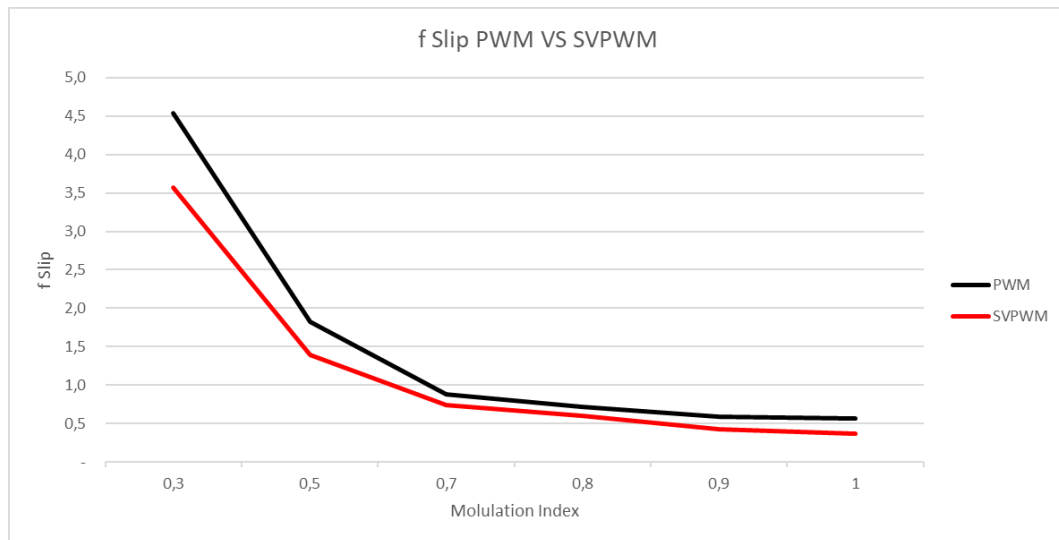
Gambar 4.118 Grafik Perbandingan Rotor Speed PWM dengan SVPWM



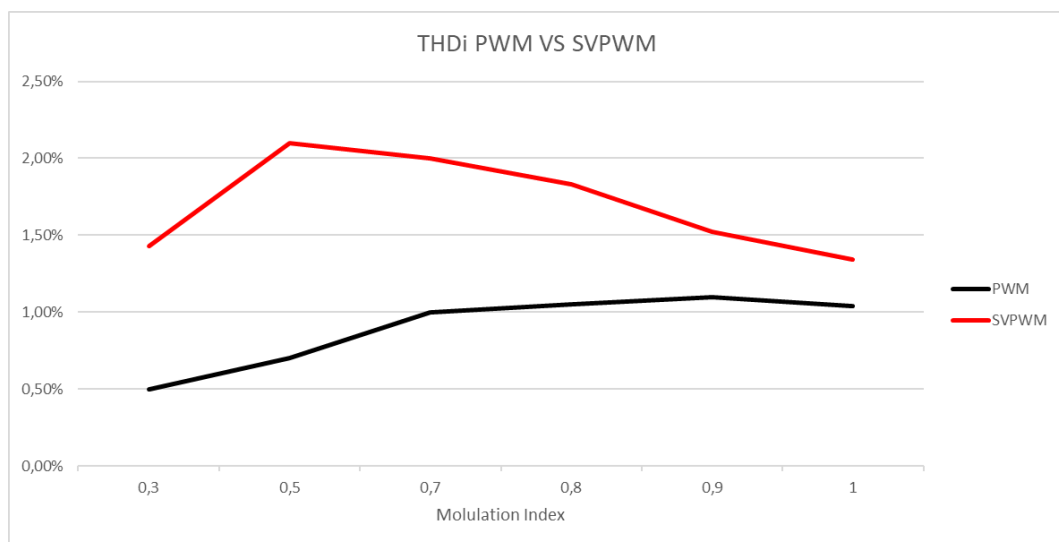
Gambar 4.119 Grafik Perbandingan Te PWM dan SVPWM



Gambar 4.120 Grafik Perbandingan Slip PWM dan SVPWM



Gambar 4.121 Grafik Perbandingan Frekuensi Slip PWM dan SVPWM



Gambar 4.122 Grafik Perbandingan THDi PWM dan SVPWM

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Untuk Rotor Speed, kendali SVPWM lebih unggul dari pada kendali PWM. Persentase keunggulan SVPWM jika di rata - rata kan mencapai 2,207 % dari seluruh simulasi yang dilakukan dengan frekuensi 50 Hz – 20 Hz dan Modulasi Indeks 1 – 0,3 .
2. Untuk Slip, kendali SVPWM memiliki nilai lebih rendah dari pada PWM, dengan nilai perbandingan slip untuk frekuensi 50 Hz : SVPWM 1,53% dan PWM 2,26 % pada frekuensi 40 Hz : SVPWM 1,91 % dan PWM 2,41 % pada frekuensi 30 Hz : SVPWM 1,61 % dan PWM 2,61 % dan pada frekuensi 20 Hz : SVPWM 1,83 % dan PWM 2,83 %
3. Untuk Frekuensi Slip, kendali SVPWM memiliki nilai lebih rendah dari pada PWM, dengan nilai perbandingan slip untuk frekuensi 50 Hz : SVPWM 0,76 Hz dan PWM 1,13 Hz pada frekuensi 40 Hz : SVPWM 0,76 Hz dan PWM 0,96 Hz pada frekuensi 30 Hz : SVPWM 0,48 Hz dan PWM 0,78 Hz pada frekuensi 20 Hz : SVPWM 0,36 Hz dan PWM 0,56 Hz.
4. Untuk Arus Total Harmonik Distorsi , kendali PWM lebih unggul dari pada kendali SVPWM. Persentase keunggulan PWM jika di rata - rata kan mencapai 1,07 % sedangkan SVPWM mencapai 2,01 % dari seluruh simulasi yang dilakukan dengan frekuensi 50 Hz – 20 Hz dan Modulasi Indeks 1 – 0,3.

5. Metode kendali SVPWM menghasilkan konsumsi arus yang lebih kecil sehingga lebih hemat energi pada frekuensi 50 - 40 Hz.

5.2 Saran

Untuk pengembangan alat lebih lanjut, maka penulis memberikan saran sebagai berikut :

1. Melakukan analisis terhadap total harmonic distorsion.
2. Menambahkan LC Filter dan membandingkannya antara sesudah dan sebelum di filter.
3. Menambahkan rangkaian dengan kendali SPWM serta membandingkannya.
4. Membahas perbandingan aliran daya dan efisiensi motor.

DAFTAR PUSTAKA

- Annapurna, G., & Tulasiramdas, G. (2015). Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for two level UPQC. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 78(1), 24–33.
- Anubha Gupta. (2017). Three Phase Inverter Simulation using Sinusoidal PWM Technique. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 6(5), 4102–4108. <https://doi.org/10.15662/IJAREEIE.2017.0605072>
- Daya, S., & Daya, E. (2010). *Semikonduktor Daya 2010*. 1–12.
- Hutabalian, R., & Hamzah, A. (2016). Desain dan Analisa Inverter Tiga Fasa Dengan Metode SVPWM Sebagai Penggerak Motor Induksi Tiga Fasa Pada Aplikasi Sepeda Listrik. *Jom FTEKNIK*, 3(2), 1–11.
- IEEE. (2014). IEEE Standard 519-2014. *Ieee*, 1–50. https://www.schneider-electric.com.tw/documents/Event/2016_electrical_engineering_seminar/IEEE_STD_519_1992vs2014.pdf
- IEEE Std. C57.110-2008 . (2008). IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents . New York : IEEE-SA Standards Board
- Juliano, B. (2019). Studi Analisis Dampak Harmonik terhadap Penurunan Daya Mampu pada Transformator Distribusi di PT. PLN (Persero) Unit Pelayanan Pelanggan (UP3) Bandengan . Jakarta: STT.PLN
- Kumar, D. (2018). Performance Analysis of Three-Phase Induction Motor with AC Direct and VFD. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 331(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/331/1/012025>
- Lazim, M. T. (2019). *Power Electronics & drives* .

- Mohan, Ned, Undeland, Tore M., ROBBINS, W. P. (1995). *1995_BOOK_Mohan_820p_Power Electronics_2nd.pdf*.
- Naveed, I., & Sabir, A. (2018). *Design and implementation of Open & Close Loop Speed control of Three Phase Induction Motor Using PI Controller*. 6(2), 6–17.
- Rusli, M. (2010). *Pelatihan Analisis dan Evaluasi Dampak Harmonisa pada Transformator*. Sumatera : PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban.
- Sajid, H. M. S., Shafi, M. B., Malik, N., Muhammad, A., & Amin, A. (2020). *Design of Three Phase Inverter System with LC filter*. *Proceedings - 2020 23rd IEEE International Multi-Topic Conference, INMIC 2020*. <https://doi.org/10.1109/INMIC50486.2020.9318075>
- Silalahi, A. S. (2021). *Perbandingan Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Inverter Pulse Width Modulation (PWM) dan Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)*.
- Wijenayake, A. H., Braun, D. H., Gasperi, M. L., Gilmore, T. P., & Pixler, D. C. (1997). *Modeling and analysis of DC link bus capacitor and inductor heating effect on AC drives (Part I)*. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 2(Part I), 1052–1057. <https://doi.org/10.1109/ias.1997.628991>
- Yani, A. (2019). *Pengaruh Harmonisa Terhadap Kesalahan Pengukuran Energi Listrik Pada KWH Meter Analog/Digital*. *Buletin Utama Teknik*, 14(2), 99–105. <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/but/article/download/1092/848>

