



**SISTEM PENGENDALIAN INVERTER TIGA FASA SEBAGAI UPS,
KOMPENSATOR HARMONISA DAN FAKTOR DAYA
MENGUNAKAN *MODIFIED SYNCHRONOUS
REFERENCE FRAME***

SKRIPSI

oleh

**Budi Novian Syah
NIM 111910201024**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2015**

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
1.6 Metodologi	3
1.7 Sistematika Pembahasan	4
BAB II INVERTER TIGA FASA, <i>UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY</i>, KUALITAS DAYA LISTRIK DAN PERMASALAHANNYA	5
2.1 Inverter	5
2.1.1 Inverter Tiga Fasa	8
2.1.3 <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)</i>	13
2.2 <i>Uninterruptible Power Supply (UPS)</i>	14
2.2.1 Macam Topologi UPS	15
2.2.1.1 <i>Off-Line UPS</i>	15
2.2.1.2 <i>Line Interactive UPS</i>	16
2.2.1.3 <i>Double Conversion (Online UPS)</i>	18
2.2.2 Baterai	19
2.3 Kualitas daya Listrik dan Permasalahannya	20
2.3.1 Parameter Listrik dalam Keadaan Transien	20
2.3.2 Parameter Listrik dalam Keadaan Steady State	22
2.3.3 Harmonisa	24
2.3.3.1 Definisi Harmonisa	25
2.3.3.2 Indeks Harmonisa.....	31
2.3.4 Daya Pada Sitem Tenaga Listrik Tanpa Harmonisa	34
2.3.4.1 Sistem Satu Fasa.....	34
2.3.4.2 Sistem Tiga Fasa Seimbang	38
2.3.5 Daya Pada Sistem Tenaga Listrik dengan Harmonisa.....	39

DAFTAR ISI

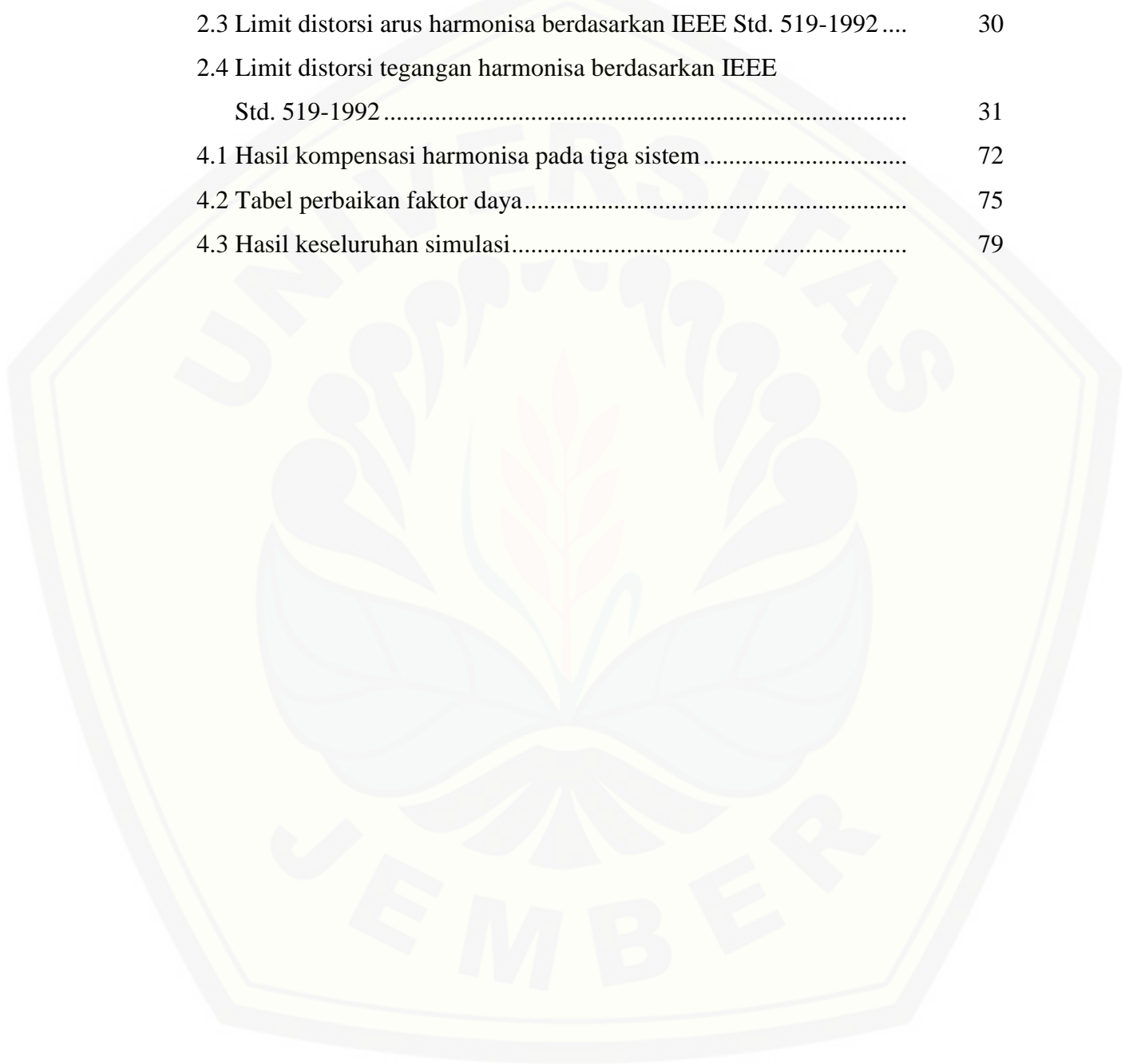
	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Inverter	4
2.1.1 Inverter Tiga Fasa.....	7
2.1.2 <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)</i>	12
2.2 Uninterruptible Power Supply (UPS)	13
2.2.1 Macam Topologi UPS	14
2.2.1.1 <i>Off-Line UPS</i>	14
2.2.1.2 <i>Line Interactive UPS</i>	15
2.2.1.3 <i>Double Conversion (Online UPS)</i>	17
2.2.2 Baterai	18
2.3 Kualitas daya Listrik dan Permasalahannya	19
2.3.1 Parameter Listrik dalam Keadaan Transien	19
2.3.2 Parameter Listrik dalam Keadaan Steady State	21
2.3.3 Harmonisa	23
2.3.3.1 Definisi Harmonisa.....	23
2.3.3.2 Indeks Harmonisa	30
2.3.4 Daya Pada Sitem Tenaga Listrik Tanpa Harmonisa	32
2.3.5 Daya Pada Sistem Tenaga Listrik dengan Harmonisa .	36

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	39
3.1 Simulasi Dengan MATLAB	39
3.2 Model Sistem Pengendalian Inverter	39
3.2.1 Sumber Utama 3 Fasa dan Baterai	41
3.2.2 Inverter Tiga Fasa dan <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i> (SPWM).....	42
3.2.3 Filter Inverter.....	45
3.2.4 Beban Yang Diujikan	46
3.2.4.1 Beban Nonlinier	47
3.2.4.2 Beban Induktif.....	47
3.2.4.3 Beban Resistis	48
3.3 Konfigurasi <i>Modified Synchronous Reference Frame</i> (MSRF)	49
3.3.1 Pemisahan Komponen Simetris.....	50
3.3.2 <i>Sequence Decomposition</i> dan Transformasi abc ke dq	53
3.3.3 Transformasi dq ke abc dan <i>Sequence Composition</i>	55
3.3.4 <i>Phase Locked Loop</i> (PLL).....	56
3.4 Desain Kontroller PI.....	57
3.5 Pemodelan Gangguan (<i>Interruption</i>) Pada Sumber Utama	59
3.6 Sistem <i>Online UPS</i> 3 Fasa	61
3.6.1 Rangkaian Jembatan Penyearah 3 Fasa.....	61
3.6.2 Rangkaian Inverter <i>Online UPS</i> 3 Fasa.....	62
3.6.3 Filter Inverter <i>Online UPS</i>	64
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	61
4.1 Simulasi Sebagai Kompensator Harmonisa Arus.....	68
4.2 Sistem Sebagai Kompensator Faktor Daya.....	72
4.3 Simulasi Sebagai <i>Uninterruptible Power Supply</i> (UPS).....	75
4.4 Hasil dari Keseluruhan Simulasi.....	79
BAB 5. PENUTUP.....	81
5.1 Kesimpulan.....	81
5.2 Saran	81



DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Kategori dan karakteristik gangguan mutu tenaga listrik	20
2.2 Orde harmonisa berdasarkan urutan.....	29
2.3 Limit distorsi arus harmonisa berdasarkan IEEE Std. 519-1992	30
2.4 Limit distorsi tegangan harmonisa berdasarkan IEEE Std. 519-1992	31
4.1 Hasil kompensasi harmonisa pada tiga sistem	72
4.2 Tabel perbaikan faktor daya.....	75
4.3 Hasil keseluruhan simulasi.....	79



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Rangkaian inverter satu fasa.....	4
2.2 Cara kerja inverter satu fasa	5
2.3 <i>Input</i> dan <i>output</i> inverter	5
2.4 Tegangan AC kotak 3-level.....	6
2.5 Tegangan AC kotak 6-level.....	6
2.6 Rangkaian inverter tiga fasa dengan 6 <i>switch</i>	8
2.7 Gelombang konduksi 180^0	9
2.8 Rangkaian ekuivalen beban hubungan bintang saat mode 1	9
2.9 Rangkaian ekuivalen beban hubungan bintang saat mode 2	10
2.10 Rangkaian ekuivalen beban hubungan bintang saat mode 3	10
2.11 Tegangan fasa untuk konduksi 180^0	11
2.12 Rangkaian SPWM	12
2.13 SPWM untuk inverter tiga fasa.....	12
2.14 Blok Diagram UPS	14
2.15 Blok rangkaian <i>off-line</i> (a) UPS biasa (b) dengan AVR.....	15
2.16 <i>Line-Interactive</i> UPS dengan <i>bidirectional</i> inverter.....	16
2.17 <i>Line-Interactive</i> UPS dengan dua konverter	17
2.18 Blok Rangkaian <i>On Line</i> UPS	17
2.19 Baterai yang digunakan pada UPS	19
2.20 Gelombang terdistorsi akibat harmonisa	24
2.21 Rangkaian ekuivalen jaringan sistem tenaga listrik.....	24
2.22 Rangkaian pengganti untuk $n>1$	25
2.23 Elemen tak linier sebagai sumber arus harmonisa.....	25
2.24 Komponen urutan positif	26
2.25 Komponen urutan negatif	27
2.26 Komponen urutan nol	27
2.27 Hubungan arus dan tegangan sefasa	33
2.28 Hubungan arus tertinggal terhadap tegangan	34

2.29	Hubungan arus mendahului tegangan.....	34
3.1	Konfigurasi pengendalian inverter 3 fasa dengan regulasi arus dan tegangan.....	40
3.2	Pemodelan rangkaian inverter 3 fasa.....	42
3.3	SPWM generator inverter.....	43
3.4	Sinyal referensi dan sinyal segitiga dengan $M=1$	44
3.5	Tegangan dan arus <i>output inverter</i> 3 fasa dengan beban seimbang ..	44
3.6	Rangkaian filter RL.....	45
3.7	Tegangan dan arus dengan beban seimbang dan linier.....	46
3.8	Pemodelan beban nonlinier.....	47
3.9	Pemodelan beban tak seimbang.....	47
3.10	Pemodelan beban seimbang.....	48
3.11	Strategi pengendali inverter dengan MSRF.....	49
3.12	Pemodelan blok tegangan urutan positif fundamental.....	52
3.13	Pemodelan blok tegangan urutan negatif fundamental.....	52
3.14	Phasor komponen urutan <i>zero</i>	53
3.15	Pemodelan blok tegangan urutan nol fundamental.....	54
3.16	Blok <i>sequence decomposition</i> dan transformasi abc ke dq (a) untuk nilai tegangan (b) untuk nilai arus.....	55
3.17	Blok transformasi dq ke abc dan <i>sequence composition</i>	56
3.18	Blok <i>Phase Locked Loop</i> tiga fasa.....	57
3.19	Keluaran <i>Phase Locked Loop</i> tiga fasa.....	57
3.20	Blok diagram controller PI.....	58
3.21	Pemodelan gangguan (<i>interruption</i>) pada sumber utama.....	60
3.22	Konfigurasi awal sistem <i>online UPS</i> 3 fasa.....	61
3.23	Pemodelan rangkaian penyearah jembatan 3 fasa.....	61
3.24	Tegangan output penyearah jembatan 3 fasa.....	62
3.25	Pemodelan rangkaian inverter 3 fasa.....	63
3.26	Tegangan dan arus output inverter 3 fasa dengan beban seimbang...	63
3.27	Rangkaian filter LC.....	64
3.28	Tegangan dan arus disisi beban dengan beban seimbang.....	65

4.1	Rangkaian Simulasi Sistem pengendali inverter dengan MSRF	66
4.2	Rangkaian Simulasi Sistem (a) tanpa pengendali (b) <i>online UPS</i>	67
4.3	Hasil simulasi kompensator tegangan harmonisa (a) tanpa kompensasi (b) <i>online UPS</i> , (c) pengendali inverter dengan MSRF.....	69
4.4	Hasil simulasi kompensator harmonisa arus pada sisi beban (a) tanpa kompensasi, (b) <i>online UPS</i> , (c) pengendali inverter dengan MSRF	71
4.5	Hasil simulasi kompensator harmonisa arus pada sisi jaringan (a) <i>online UPS</i> , (b) Pengendali inverter dengan MSRF	72
4.6	Grafik nilai faktor daya sisi jaringan (a) awal sistem (b) <i>online UPS</i> (c) inverter MSRF	73
4.7	Grafik nilai faktor daya sisi beban (a) <i>online UPS</i> (b) inverter MSRF	74
4.8	Sistem awal terjadi gangguan pada jaringan	76
4.9	Arus pada sistem sebagai UPS (a) Tanpa Pengendali, (b) <i>Online UPS</i> (c) Pengendali inverter dengan MSRF.....	77
4.10	Tegangan pada sistem sebagai UPS (a) Tanpa Pengendali, (b) <i>Online UPS</i> (c) Pengendali inverter dengan MSRF.....	78

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Suatu sistem kelistrikan tiga fasa dengan kualitas daya yang baik pastinya dapat menguntungkan pihak PLN dan konsumen. Terutama kelistrikan yang berada di industri ataupun gedung perkantoran, gangguan yang terjadi pada sumber utama dapat mengakibatkan rusaknya peralatan listrik. Oleh karena itu digunakanlah UPS (*Uninterruptible Power Supply*) pada peralatan listrik yang mampu memperbaiki kualitas sumber tenaga listrik yang masuk ke beban, yakni mampu menyuplai beban kritis yang sensitif terhadap perubahan tegangan serta menjamin penyaluran daya listrik dengan kualitas yang baik. Kualitas daya listrik dipengaruhi oleh adanya jenis beban. Penggunaan beban dengan komponen elektronika yang merupakan beban nonlinier dapat menimbulkan distorsi bentuk gelombang arus maupun tegangan (Hirofumi Akagi, 1996). Distorsi gelombang ini disebut harmonisa. Adanya harmonisa ini dapat menimbulkan permasalahan misalnya faktor daya rendah, *overheating*, meningkatkan rugi-rugi energi dan dapat menurunkan kualitas sistem tenaga listrik yang berdampak buruk terhadap peralatan lain pada instalasi.

Pada umumnya UPS yang digunakan pada masyarakat menggunakan sistem *online* UPS. Dimana pada sistem itu menggunakan *rectifier*, inverter dan baterai. Meskipun sistem kelistrikan dapat menyuplai secara kontinyu, tetapi daya listrik yang dihasilkan belum memiliki kualitas yang baik pada sisi jaringannya. *Online UPS* umumnya hanya dapat meredam harmonisa dan perbaikan faktor daya pada sisi beban karena proses pemfilterannya (Wicaksono Adityo Nugroho, 2012). Sedangkan dalam perkembangan saat ini banyak penggunaan filter aktif pada sebuah inverter yang bekerja dengan cara menginjeksikan anti-phase arus maupun tegangan harmonisa sehingga akan mengurangi pengaruh harmonisa (Hirofumi Akagi, 1996). Selain berfungsi mengurangi harmonisa, juga akan meningkatkan faktor daya sistem serta dapat berfungsi sebagai UPS.

Pada penelitian ini digunakan sebuah pengendali inverter tiga fasa dengan metode MSRF (*Modified Synchronous Reference Frame*) yang didasarkan pada dekomposisi tegangan dan arus tiga fasa dari sumber utama ke dalam komponen urutan simetrisnya, yaitu urutan positif, negatif, dan nol. Pengendalian inverter ini terhubung dengan sumber utama. Dari ketiga urutan komponen simetris ini dikendalikan dengan menggunakan dua acuan yang berbeda, yaitu *reference frame* positif dan *reference frame* negatif. *Reference frame* positif memiliki arah putaran yang berlawanan arah dengan putaran jarum jam (*counterclockwise*) dengan frekuensi sudut ω . *Reference frame* negatif memiliki arah putaran searah jarum jam (*clockwise*) pada frekuensi ω . Dengan demikian besaran tegangan dan arus dapat dikendalikan sesuai dengan sinyal DC sebagai referensi masing-masing. Pengendalian *error* supaya inverter dapat sinkron dengan sumber utama yang terdistorsi akibat beban, digunakan *PI controller* sebagai pengendali dalam mengatur *switching* inverter digunakan metode SPWM.

Dengan adanya mekanisme regulasi tegangan dan arus tersebut, bertujuan agar kualitas daya listrik yang masuk ke beban dalam kualitas daya listrik yang baik. Didalam penelitian ini performansi dari pengendali inverter MSRF akan dibandingkan *online UPS*. Selain itu, sistem pengendali inverter juga dapat menyuplai daya secara kontinyu, walaupun suplai daya dari jala-jala terputus layaknya *online UPS*.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini permasalahan yang akan dibahas meliputi :

1. Bagaimana merancang dan menganalisis kontrol pada inverter tiga fasa menggunakan MSRF dalam mengkompensasi *Total Harmonics Distortion* (THD)?
2. Bagaimana merancang dan menganalisis kontrol pada pengendalian inverter tiga fasa menggunakan MSRF dalam memperbaiki faktor daya?
3. Bagaimana mendesain pengendalian inverter tiga fasa berbasis MSRF dapat bekerja menyuplai daya secara kontinyu meskipun kondisi jala-jala sumber terputus?

4. Bagaimana menggabungkan metode MSRF pada pengendalian inverter dalam sebuah kontrol sebagai UPS, kompensator THD dan faktor daya?

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan dalam tugas akhir ini dibatasi oleh beberapa hal sebagai berikut:

1. Perbaikan kualitas daya listrik yang dimaksudkan dalam skripsi ini adalah dilakukan disisi beban dan disisi sumber utama (PLN), dengan mekanisme feedback regulasi tegangan dan arus.
2. Sumber yang digunakan pada simulasi inverter ini adalah sumber DC ideal bukan Baterai.
3. Tidak dilakukan pembahasan mendetail tentang proses *charging* dan juga mekanisme kontrol pada baterai, karena simulasi lebih diutamakan pada *normal mode* dan *back up mode* saat jaringan putus.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan menganalisis dalam sebuah kontrol pada inverter tiga fasa dengan menggunakan metode MSRF dalam meredam THD dan perbaikan faktor daya serta membuat inverter dapat bekerja sebagai UPS yaitu menyuplai daya secara kontinu meskipun kondisi suplai daya utama terganggu (*interruption*).

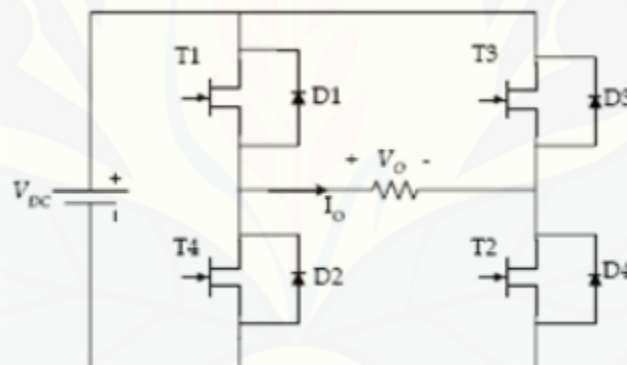
1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah membuat inverter tiga fasa dengan keandalan tinggi. Penggunaan inverter tiga fasa ini dapat dimanfaatkan pada industri dengan berbagai kondisi kualitas daya listrik. Bisa diterapkan untuk kualitas daya listrik yang terdistorsi harmonisa akibat beban nonlinier, faktor daya yang rendah ataupun melindungi peralatan listrik supaya tidak rusak akibat sumber yang sering putus.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

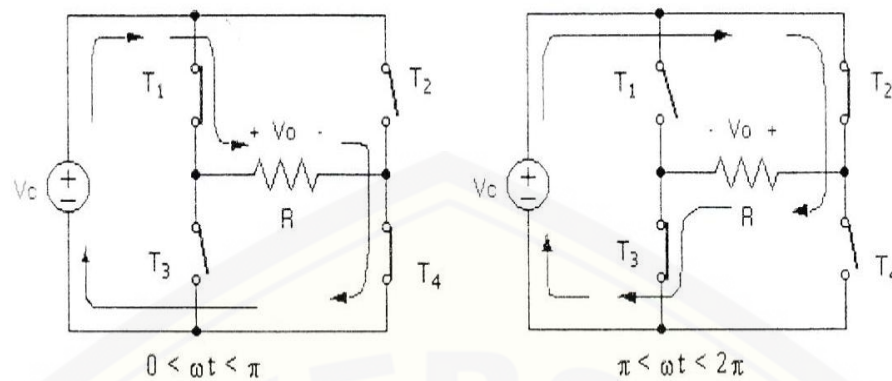
2.1 Inverter

Inverter adalah salah satu komponen penting catu daya yang berfungsi mengubah sumber tegangan masukan DC ke bentuk sumber tegangan keluaran AC. Secara definisi, rangkaian inverter ideal adalah inverter yang tidak menghasilkan riak di sisi masukannya dan menghasilkan sinyal sinusoidal murni di sisi keluarannya, baik yang terkontrol arus/tegangan, terkontrol frekuensi, ataupun terkontrol kedua-duanya. Secara umum rangkaian inverter biasanya digunakan dalam aplikasi pengendali kecepatan motor AC, *variable-frequency drives*, UPS/catu-daya AC, pemanas induksi/*microwave*, *Static VAR Generator*, *FACTS (Flexible AC Transmission System)*, trasn misi daya *HVDC*.



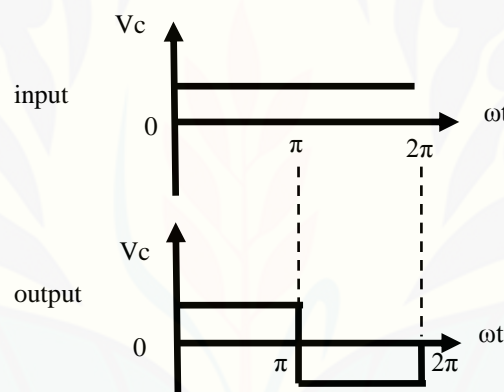
Gambar 2.1 Rangkaian inverter satu fasa
(sumber: Azuan, 2007)

Prinsip kerja inverter satu fasa secara sederhana dapat digambarkan pada Gambar 2.1. empat buah *switch* (T_1 sampai T_4) akan diatur penyalanyaannya, dengan T_1 dan T_4 dinyalakan bersama pada $0 < \omega t < \pi$, sementara T_2 dan T_3 masih terbuka seperti terlihat pada gambar 2.2. Arus akan mengalir seperti yang digambarkan oleh anak panah. Selanjutnya T_2 dan T_3 dinyalakan bersamaan pada $\pi < \omega t < 2\pi$ dan T_1 dan T_4 terbuka seperti terlihat pada gambar 2.2 berikut.



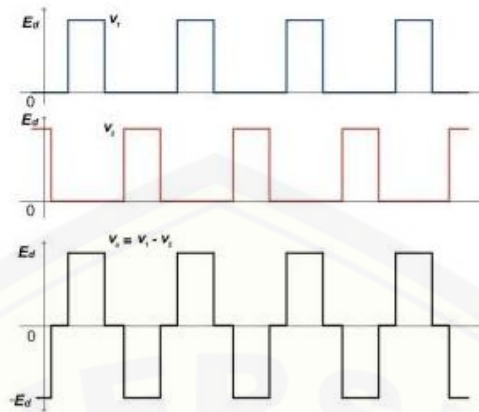
Gambar 2.2 Cara kerja inverter satu fasa
(sumber: IGNA, 2003)

Dengan *input* tegangan searah (dc) yang diberikan, tegangan *output*nya akan menjadi bolak-balik (ac). Hal ini digambarkan seperti pada gambar 2.3.

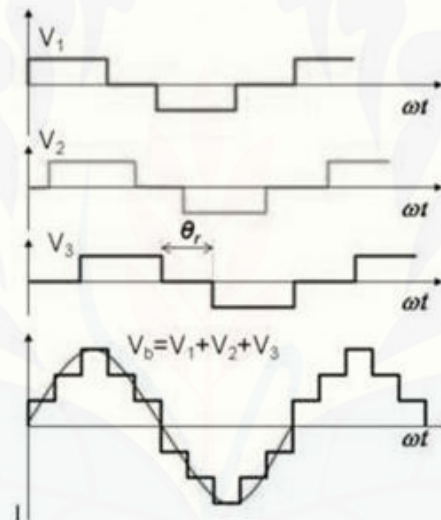


Gambar 2.3 *Input* dan *output* inverter

Dari gambar 2.4 terlihat bahwa dengan menambah jumlah level tegangan keluaran, bentuk gelombang kotak dapat diubah mendekati tegangan sinusoidal. Jumlah level tegangan keluaran ini dapat diperoleh dengan teknik penyaklaran dan topologi inverter *capasitor-split*, *diode-clamped* ataupun inverter yang disusun secara kaskade. Sedangkan gambar 2.5 menunjukkan inverter *six step* yang dikontrol dengan teknik penyaklaran PWM.



Gambar 2.4 Tegangan AC kotak 3-level
(sumber: IGNA, 2003)



Gambar 2.5 Tegangan AC kotak 6-level
(sumber: IGNA, 2003)

Secara umum inverter dibagi menjadi dua bagian yaitu: inverter satu fasa dan inverter tiga fasa. Peralatan elektronika daya yang dipakai untuk inverter, antara lain: *bipolar junction transistors* (BJT), *metal oxide semiconductor field-effect transistors* (MOSFET), *insulated-gate bipolar transistor* (IGBT), *metal oxide semiconductor-controlled thyristors* (MCT), *static induction transistors* (SIT), *gate-turn-off thyristors* (GTO). Pemakaian peralatan tersebut dipilih didasarkan pada jenis penerapannya. Inverter biasanya memakai sinyal kontrol PWM untuk menghasilkan tegangan *output* AC. Inverter dikatakan sumber tegangan (*voltage fed inverter*) jika tegangan inputnya dibuat konstan., dan

dikatakan sumber arus (*current fed inverter*) jika arus inputnya dijaga konstan. Jika tegangan inputnya merupakan tegangan terkendali atau tegangan inputnya merupakan tegangan yang bisa diatur, maka inverter ini bisa disebut *variable DC linked inverter*.

2.1.1 Inverter Tiga Fasa

Inverter sumber tegangan tiga fasa adalah peralatan elektronik yang berfungsi untuk mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) 3 fasa. Inverter tiga fasa dapat dibuat dari menggabungkan tiga buah inverter satu fasa yang dihubungkan secara paralel. Namun sinyal *gate* setiap inverter satu fasa harus berjarak 120° satu sama lainnya. Hal ini dilakukan agar didapatkan tegangan tiga fasa yang seimbang. Jumlah *switch* yang dibutuhkan dalam rangkaian ini adalah sebanyak 12 buah. Jika tegangan *output* dari inverter satu fasa tidak seimbang dalam magnitude dan fasanya, maka dapat mengakibatkan tegangan *output* tiga fasa juga tidak seimbang. Tegangan *output* rmsnya ditunjukkan pada persamaan 2.1 berikut

$$V_o = \left(\frac{2}{T_o} \int_0^{T_o/2} V_s^2 dt \right)^{1/2} = V_s \quad (2.1)$$

Sedangkan tegangan *output* sesaatnya jika ditulis dalam deret fourier ditunjukkan pada persamaan 2.2

$$V_o = \sum_{n=1,2,3..}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad (2.2)$$

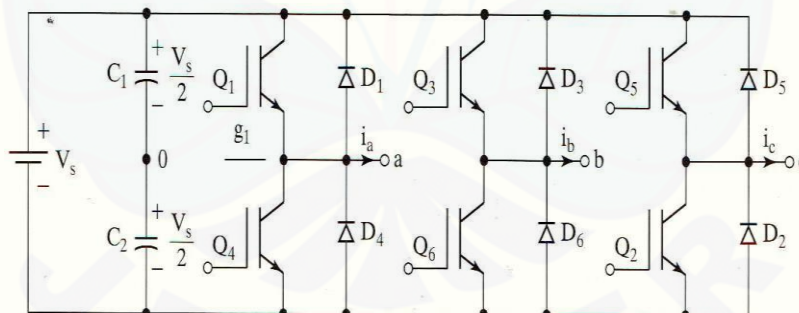
Dan untuk $n = 1$ maka nilai rms untuk tegangan dasar V_1

$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0.9V_s \quad (2.3)$$

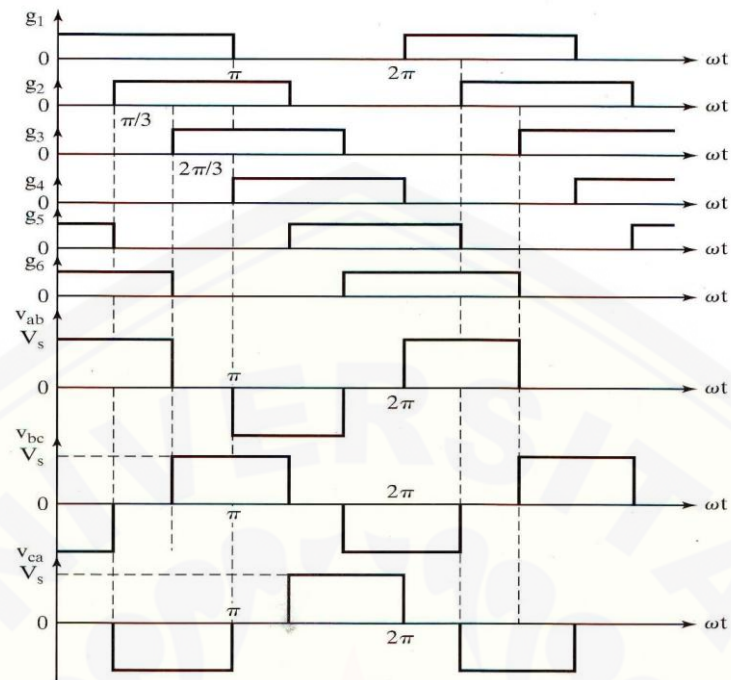
Dengan konfigurasi inverter tiga fasa yang tersusun dari tiga buah inverter satu fasa juga mengakibatkan bentuk inverter yang lebih besar, karena satu buah inverter satu fasa memerlukan 4 buah *switch*, maka untuk inverter 3 fasa yang dibuat dengan cara menyusun tiga buah inverter satu fasa maka akan membutuhkan *switch* hingga 12 buah. Hal ini juga akan berdampak pada biaya pembuatannya yang tentu akan sangat besar.

Dengan konfigurasi yang lebih ringkas, sebuah inverter tiga fasa dapat dibuat dengan konfigurasi yang hanya memerlukan 6 buah *switch*, sebagaimana rangkaian yang terlihat pada gambar 2.6. Jika dibandingkan dengan konfigurasi sebelumnya maka dapat diketahui bahwa jumlah *switch* yang diperlukan adalah lebih sedikit, yakni sebanyak enam buah. Sehingga dalam hal biaya pembuatan adalah lebih rendah daripada konfigurasi sebelumnya.

Untuk mengontrol signal *switch* pada transistor dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain adalah dengan menggunakan konduksi 180° , ataupun gelombang konduksi 120° . Metode konduksi 180° banyak ditemukan dari aplikasi yang telah ada pada umumnya. Tiap transistor dikonduksi 180° , dalam satu *cycle* terdapat enam mode operasi sehingga durasi tiap mode operasi diatur sebesar 30° . Jika transistor Q_1 aktif (on) maka terminal *a* akan terhubung dengan positif sumber dc. Ketika transistor Q_4 aktif (on) maka terminal *a* akan terhubung dengan negatif sumber dc. Gambar 2.7 menunjukkan gelombang konduksi 180° . Sedangkan gambar 2.8, 2.9 dan 2.10 menunjukkan rangkaian ekuivalen dari setiap mode konduksi. Dan gambar 2.11 menunjukkan gelombang tegangan *output* inverter 3 fasa yang menggunakan gelombang konduksi 180° .



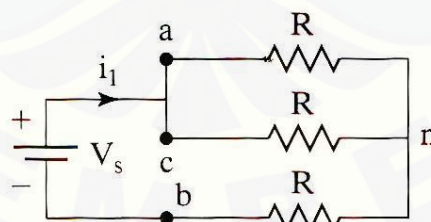
Gambar 2.6 Rangkaian inverter tiga fasa dengan 6 *switch*
(sumber: Ntoni, 2012)



Gambar 2.7 Gelombang konduksi 180⁰
(sumber: Ntoni, 2012)

Bentuk tegangan fasa netral tergantung dari konfigurasi beban yang terhubung, yaitu terhubung bintang atau terhubung delta. Untuk lebih mudahnya dapat dilihat bentuk dan harga tegangan fasa-netral untuk beban terhubung bintang. Sebagai contoh, berikut akan ditentukan besarnya tegangan fasa-netral untuk tiga mode pertama.

- Mode 1 ($0 \leq \omega t \leq \pi/3$, IGBT Q₁, Q₅, dan Q₆ aktif)



Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen beban hubungan bintang saat mode 1

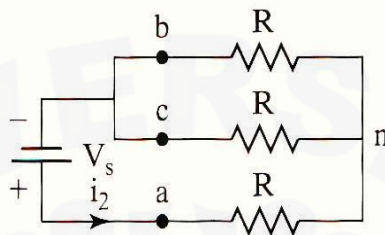
$$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2} \quad (2.4)$$

$$i_1 = \frac{Vs}{R_{eq}} = \frac{2Vs}{3R} \quad (2.5)$$

$$v_{an} = v_{cn} = \frac{i_1 R}{2} = \frac{V_s}{3} \quad (2.6)$$

$$v_{bn} = -i_1 R = \frac{-2V_s}{3} \quad (2.7)$$

- Mode 2 ($\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$, IGBT Q₁, Q₂, dan Q₆ aktif)



Gambar 2.9 Rangkaian ekivalen beban hubungan bintang saat mode 2

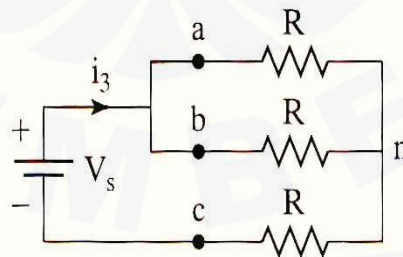
$$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2} \quad (2.8)$$

$$i_2 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2V_s}{3R} \quad (2.9)$$

$$v_{an} = i_2 R = \frac{2V_s}{3} \quad (2.10)$$

$$v_{bn} = v_{cn} = \frac{-i_2 R}{2} = \frac{-V_s}{3} \quad (2.11)$$

- Mode 3 ($2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$), IGBT Q₁, Q₂, dan Q₃ aktif)



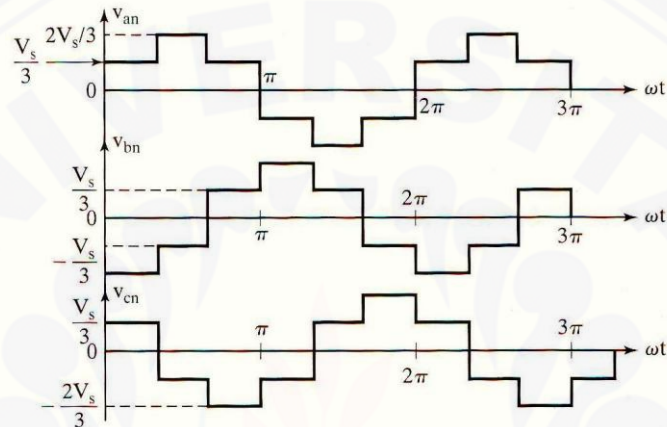
Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen beban hubungan bintang saat mode 3

$$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2} \quad (2.12)$$

$$i_3 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2V_s}{3R} \quad (2.13)$$

$$v_{an} = v_{bn} = \frac{i_3 R}{2} = \frac{V_s}{3} \quad (2.14)$$

$$v_{cn} = -i_3 R = -\frac{2V_s}{3} \quad (2.15)$$



Gambar 2.11 Tegangan fasa untuk konduksi 180⁰
(sumber: Ntoni, 2012)

Tegangan *line to line* rms-nya ditunjukkan pada persamaan 2.16

$$V_o = \left(\frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} V_s^2 d(\omega t) \right)^{1/2} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_s = 0,8165V_s \quad (2.16)$$

sedangkan nilai tegangan *line rms* untuk komponen ke-n, ditunjukkan pada persamaan 2.17

$$V_{Ln} = \frac{4V_s}{\sqrt{2n\pi}} \sin \frac{n\pi}{3} \quad (2.17)$$

dan untuk $n = 1$, maka nilai rms untuk tegangan line adalah

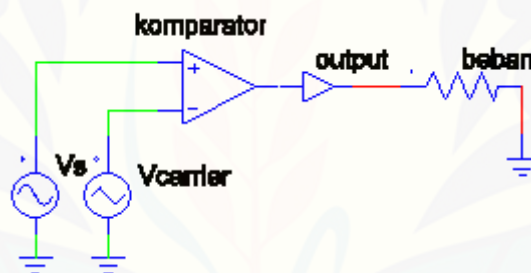
$$V_{L1} = \frac{4V_s \sin 60^\circ}{\sqrt{2\pi}} = 0.7797V_s \quad (2.18)$$

sedangkan nilai tegangan *line to netral rms*, dapat diperoleh dari nilai tegangan *line to line*, seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.19

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}V_s}{3} = 0,4714V_s \quad (2.19)$$

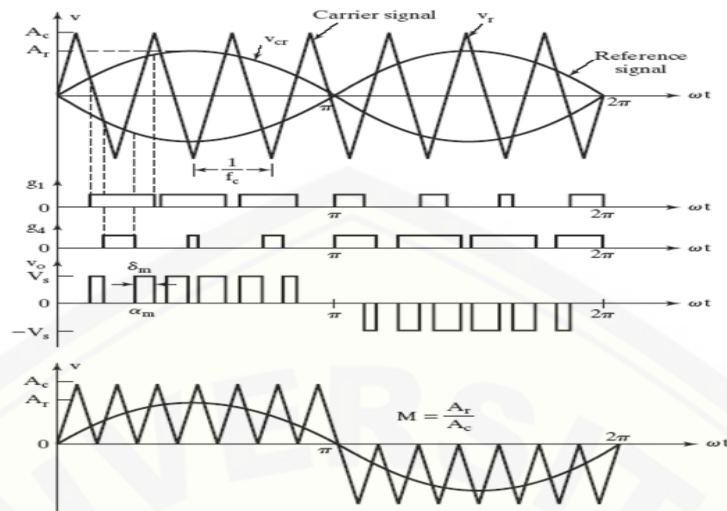
2.1.2 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

Pada SPWM dilakukan oleh sebuah komparator yang akan membandingkan sinyal referensi dan sinyal carrier. Masukan dari komparator terdiri atas dua input yang dilambangkan dengan kutub positif dan kutub negatif. Sinyal referensi yang akan dimodulasi dimasukkan ke input kutub positif dan sinyal carrier ke input kutub negatif. Hasil *output* dari komparator adalah berupa *pulse on* dan *pulse off*. *Pulse on* akan dihasilkan oleh komparator jika sinyal referensi lebih besar daripada sinyal carrier, dan begitu sebaliknya jika sinyal referensi lebih kecil dari sinyal carrier maka komparator akan menghasilkan *pulse off*. Rangkaian SPWM dapat ditunjukkan pada gambar 2.12 berikut ini.



Gambar 2.12 Rangkaian SPWM

Pengontrolan sinyal gate dengan menggunakan SPWM ditunjukkan pada Gambar 2.13



Gambar 2.13 SPWM untuk inverter tiga fasa
(Sumber: Azuan, 2007)

Pada Gambar 2.13 di atas dapat dilihat bahwa ada tiga gelombang sinusoidal yang berbeda fasa 120^0 yang akan digunakan sebagai sinyal referensi. Sinyal referensi v_{ra} , v_{rb} , v_{rc} tersebut akan dibandingkan dengan sinyal carrier yang berupa sinyal segitiga sehingga akan dihasilkan g_1 , g_2 , g_3 yang merupakan pulsa-pulsa untuk menyalakan *switch*. Namun yang terpenting adalah bahwa kondisi dua buah *switch* dalam satu line, misalnya *switch* 1 dan 4, adalah tidak boleh on secara bersamaan, karena akan dapat merusak *switch* tersebut.

2.2 Uninterruptible Power Supply (UPS) (Sumber: Wicaksono, 2012)

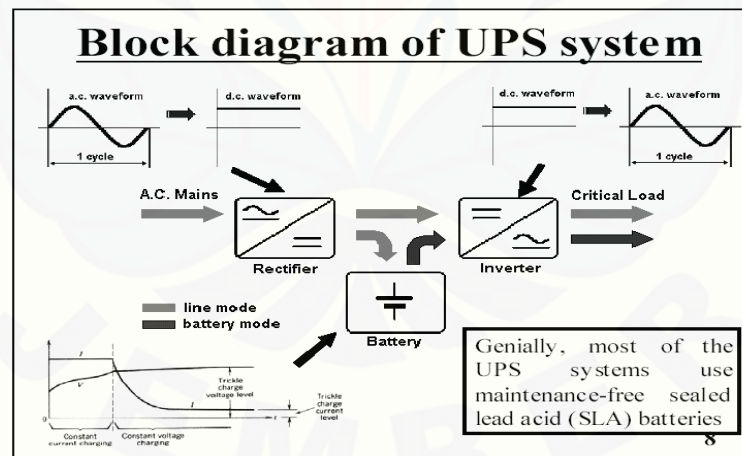
Uninterruptible Power Supply (UPS) merupakan peralatan yang berfungsi sebagai sumber daya listrik dimana mampu melindungi peralatan elektronik yang sensitif terhadap perubahan daya listrik. UPS umum digunakan sebagai peralatan penyedia daya listrik pada beban-beban elektronik saat suplai daya listrik utama (PLN) mengalami gangguan atau kegagalan. Komponen-Komponen dalam UPS pada umumnya ada 3 macam, yaitu:

1. *Rectifier*, yang berfungsi penyearah tegangan yang digunakan untuk pengisian baterai.
2. Baterai, yang berfungsi sebagai energi listrik cadangan.
3. Inverter, yang berfungsi sebagai pengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) untuk menyuplai tegangan pada beban.

Selain ketiga komponen dasar tersebut, memungkinkan terdapat juga komponen-komponen lain yang digunakan seperti *switch*, induktor, AVR, filter, DC-DC konverter dan lain-lain yang penggunaannya tergantung sesuai dengan topologi masing-masing UPS. Sebagaimana yang ditunjukkan gambar 2.14.

Prinsip kerja dari UPS secara umum, dalam mode normal, *rectifier* menyearahkan tegangan AC menjadi DC yang selain digunakan untuk mengisi baterai, juga digunakan menyuplai beban dengan melalui inverter terlebih dahulu. Sedangkan dalam *back up mode* atau saat terjadi gangguan di supla utama, baterai menggantikan peran suplai utama untuk menyuplai beban. Pada kondisi tersebut, tegangan DC baterai selanjutnya akan diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan inverter. Tegangan AC keluaran dari inverter kemudian dilewatkan filter inverter untuk mengurangi harmonisa orde tinggi sehingga didapatkan tegangan AC yang diinginkan.

Banyaknya cara dalam merangkai komponen utama UPS tersebut menyebabkan adanya beberapa topologi UPS yang tiap-tiap topologi mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing.



Gambar 2.14 Blok Diagram UPS
(sumber : Wicaksono, 2012)

2.2.1 Macam Topologi UPS

Menurut standar IEC 62040-3 yang dikeluarkan oleh *International Electrotechnical Commission*, topologi UPS dibagi menjadi tiga jenis, yaitu :

2.2.1.1 Off-Line

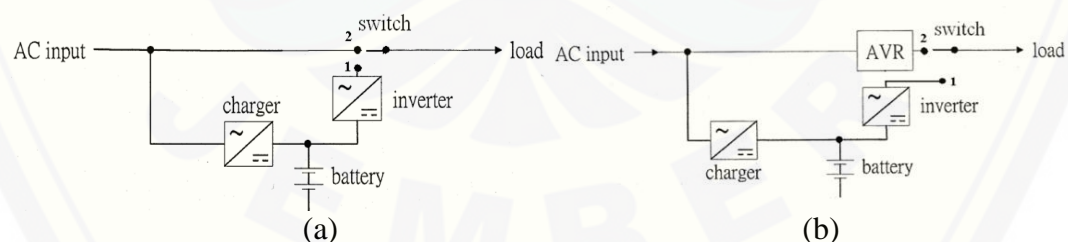
Prinsip dasar dari UPS ini adalah diilustrasikan pada gambar 2.15. Inverter dihubungkan paralel terhadap beban dan bekerja secara sederhana untuk menyalurkan daya listrik beban. Mode operasi dari offline UPS ini dibagi menjadi 2 mode yaitu sesuai dengan posisi *switch* yaitu :

a. Normal mode

Pada mode ini, *switch* berada pada posisi 2, sehingga tegangan pada beban disuplai secara langsung oleh sumber AC dari PLN. Pada umumnya sebelum sampai pada beban terdapat peralatan tambahan seperti AVR (*Automatic Voltage Regulator*) yang berfungsi sebagai stabilisator tegangan. Pada saat mode ini juga baterai mengalami pengisian energi listrik

b. Back UP/ Stored Energy mode

Ketika tegangan Ac pada sumber listrik PLN mengalami gangguan atau terputus, maka *switch* akan berpindah dari posisi 2 ke posisi 1. Pada saat ini tegangan pada beban disuplai oleh baterai yang sebelumnya telah dilakukan proses pengisian. Selanjutnya dari baterai akan dikonversikan oleh inverter menjadi tegangan AC. Pada saat pergantian *switch* mengakibatkan adanya waktu tunda pada sistem ini. UPS ini akan beroperasi sampai tegangan pada sisi input kembali pada keadaan normal.



Gambar 2.15 Blok Rangkaian *Off-line* (a) UPS biasa (b) dengan AVR
(sumber : Wicaksono, Adityo Nugroho, 2012)

UPS jenis ini mempunyai beberapa kelebihan seperti desain yang sederhana, biaya yang rendah dan bentuk fisik yang relatif kecil. Kekurangan yang terdapat pada sistem ini yaitu kurangnya perlindungan terhadap regulasi tegangan *output*, adanya waktu tunda pada saat inverter menyuplai daya listrik

pada beban. Waktu *switching* pergantian mode normal menuju *back up mode* hanya dapat diijinkan untuk peralatan tertentu. Peralatan listrik lain yang sangat sensitif dan membutuhkan kekontinyuitasan daya yang sempurna kurang sesuai menggunakan UPS jenis ini.

2.2.1.2 *Line-Interactive UPS*

Rangkaian UPS jenis ini dapat ditunjukkan pada gambar 2.16 dan gambar 2.17. Pada gambar 2.16 UPS jenis ini memerlukan induktor yang dipasang secara seri pada input dan bilateral inverter yang dipasang secara paralel dengan beban. Sedangkan pada gambar 2.17 menggunakan dua konverter. Untuk konverter yang pertama dihubungkan secara seri dengan input, dan yang kedua dihubungkan secara paralel dengan beban. Pengoperasian dari UPS ini dibagi menjadi :

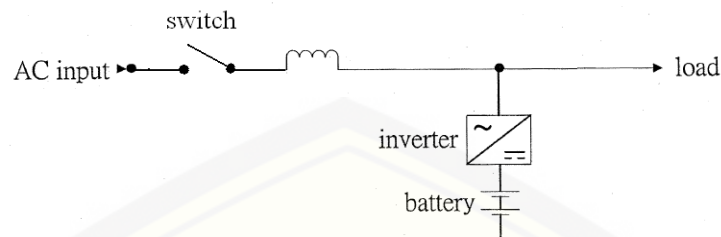
a. Normal mode

Pada mode ini, beban disuplai oleh sumber AC dari PLN. Pada saat ini juga baterai mengalami charge atau pengisian energi listrik melalui inverter bidirectional pada gambar 2.16, sedangkan pada gambar 2.17 pengisian disuplai oleh sebuah konverter yang dihubungkan seri.

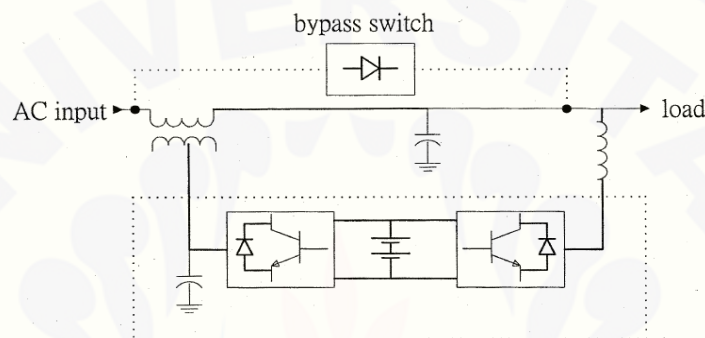
b. *Back Up / Stored Energy mode*

Ketika tegangan AC pada input UPS diluar spesifikasi tegangan yang diperbolehkan, tegangan DC pada baterai akan menggantikan sebagai penyuplai daya pada beban dengan diubah menjadi tegangan AC oleh inverter. Pada mode ini *switch* pada input akan open sehingga arus listrik tidak akan mengalir ke sumber PLN. Pergantian *switch* dari normal mode ke back up mode seolah-olah tidak terputus sehingga hampir tidak ada waktu *switching*.

UPS jenis ini mempunyai beberapa kelebihan diantara semua UPS yang digunakan dimasyarakat seperti regulator tegangan yang lebih baik dari pada konvensional UPS, menyuplai tegangan pada beban dengan tanpa waktu tunda saat terjadi gangguan, mempunyai kemampuan untuk mereduksi harmonisa dengan berfungsi sebagai filter aktif pada sisi jaringan dan beban. Kekurangannya adalah biayanya yang relatif lebih mahal dari pada konvensional, dan memerlukan algoritma kontrol yang kompleks.



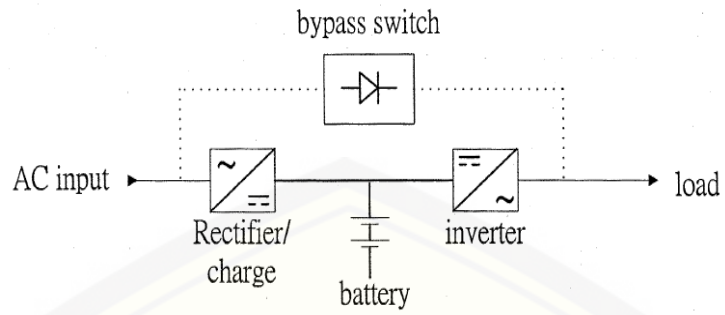
Gambar 2.16 *Line-Interactive* UPS dengan *bidirectional* inverter
(sumber : IGNA, 2003)



Gambar 2.17 *Line-Interactive* UPS dengan dua konverter
(sumber : Saputra, IGNA Dwijaya, 2003)

2.2.1.3 Double Conversion (Online UPS)

Pada *online UPS* secara kontinyu menyuplai daya pada beban melalui *rectifier* dan inverter baik pada saat normal mode maupun keadaan gangguan pada sumber PLN sehingga pada UPS jenis ini ada atau tidak ada gangguan akan mengalami dua proses konversi. Ketika terjadi gangguan, energi pada baterai melalui inverter akan menggantikan peran sumber utama untuk memberi daya pada beban. Dapat dikatakan pula bahwa UPS ini memberikan sistem proteksi pada beban secara kontinyu ketika sumber PLN mengalami perubahan tegangan. UPS ini memiliki performa yang paling baik dari pada jenis UPS yang lain, tetapi biaya pembuatannya paling besar diantara yang lainnya. Gambar 2.18 menunjukkan rangkaian dari *online UPS*.



Gambar 2.18 Blok rangkaian *online* UPS
(Sumber: Tzou, 2005)



2.2.2 Baterai

Baterai adalah peralatan yang mengubah energi kimiawi menjadi energi listrik. Baterai terdiri dari satu atau lebih sel volta, masing-masing sel tersusun atas 2 elektroda dan dihubungkan seri oleh elektrolit. Setiap sel memiliki terminal positif dan negatif. Arus dapat mengalir antara 2 elektroda karena adanya elektrolit yang memungkinkan ion-ion berpindah antar elektroda. Energi listrik yang dihasilkan dari reaksi kimiawi pada sel baterai adalah *emf* (*electro motive force*), besarnya *emf* berbeda-beda bergantung pada jenis elektroda dan elektrolit yang digunakan. Tegangan terminal baterai saat *open circuit* bernilai sama dengan *emf*-nya. Saat kondisi *discharge* tegangan terminal baterai lebih kecil dari *emf*, dan saat kondisi *charge* tegangan terminalnya lebih besar dari *emf*.

Semakin banyak bahan elektrolit dan elektroda di dalam sel baterai, maka semakin besar pula kapasitas dari sel tersebut. Oleh karena itu, sebuah sel berukuran kecil mempunyai kapasitas yang lebih kecil bila dibandingkan dengan sel yang lebih besar. Walaupun keduanya bergantung pada reaksi kimia yang sama yang akan menghasilkan tegangan terminal yang sama pula, namun kapasitas baterai juga bergantung pada kondisi *discharge*-nya seperti besar arus, lamanya penggunaan, batas-batas tegangan yang diijinkan, suhu, dan faktor-faktor lain yang mempengaruhi.

Kapasitas yang tersedia pada baterai bergantung pada rating *discharge*. Jika baterai *discharge* pada rating yang cukup tinggi, maka kapasitas tersedianya akan lebih rendah dari yang diharapkan. Karenanya, sebuah baterai dengan rating 100 A.h (ampere x jam) akan menghantarkan arus sebesar 20 ampere selama 5 jam. Tetapi bila dioperasikan untuk menghantarkan arus sebesar 100 ampere, maka baterai hanya akan beroperasi selama 1 jam. Saat dioperasikan pada rating rendah, baterai akan menghantarkan energi lebih efisien dibandingkan dengan pengoperasian pada rating yang lebih tinggi. Contoh baterai yang digunakan pada UPS adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Baterai yang digunakan pada UPS
(Sumber: protorit.blogspot.com)

2.3 Kualitas Daya Listrik dan Permasalahannya

Kualitas daya listrik dapat diartikan sebagai tingkat kualitas dari jaringan listrik dan tingkat efisiensi dari penggunaan energi. Secara umum, kualitas daya listrik terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

- a. Kontinuitas (bebas dari permasalahan perubahan tegangan), yaitu tingkat dimana semua konsumen bisa menggunakan energi listrik yang tersedia sepanjang waktu.
- b. Level tegangan, yaitu level dimana tegangan yang digunakan pada sistem dijaga tetap pada range yang diijinkan .
- c. Efisiensi, yaitu nilai dimana pemakaian energi bisa dioptimalkan.

2.3.1 Parameter Listrik dalam Keadaan Transien

Parameter listrik dalam keadaan peralihan (*transient state*), diukur berdasarkan lamanya gangguan yang terjadi (*Duration of Disturbance*), yakni :

1. Tegangan lebih peralihan yang tajam dan bergetar : tegangan paku (*spike*) positif atau negatif $0,5 - 200 \mu s$ dan bergetar sampai sekitar $16,7 ms$ dengan frekuensi $0,2 - 5 kHz$ atau lebih. Gangguan yang termasuk dalam jenis ini antara lain: *surge*, *spike*, *notch*, dll.

2. Tegangan lebih (*over voltage*) di atas 110 % nominal dan drop tegangan (*under voltage*) di bawah 80 %, berlangsung dengan durasi 10 ms (0.5 cycle) sampai dengan 1 detik. Gangguan yang termasuk di dalamnya adalah *Voltage sags (dips), fluctuation, flicker*, dll.
3. Drop tegangan di bawah 80 % dari tegangan nominal dalam waktu yang lebih lama, sekitar 2 detik. Gangguan yang termasuk di dalamnya antara lain; *Outage, Blackout, interruption*.

Pada tabel 2.1 disebutkan kategori dan karakteristik gangguan mutu tenaga listrik, baik gangguan dalam durasi pendek ataupun gangguan dalam durasi panjang.

Tabel 2.1 Kategori dan karakteristik gangguan mutu tenaga listrik

<i>Categories and Typical Characteristic of Power System Electromagnetic Phenomena</i>			
<i>Categories</i>	<i>Typical Spectral Content</i>	<i>Typical Duration</i>	<i>Typical Voltage Magnitude</i>
<i>Transient</i>			
<i>- Impulsive</i>			
<i>Nanosecond</i>	5 ns rise	50 ns	
<i>Microsecond</i>	1 us rise	50 ns – 1 ms	
<i>Millisecond</i>	0,1 ms rise	1 ms	
<i>- Oscillatory</i>			
<i>Low Frequency</i>	5 kHz	0,3 – 50 ms	0 - 4 pu
<i>Medium Freq.</i>	5 – 500 kHz	20 us	0 – 8 pu
<i>High Freq.</i>	0,5 – 5 kHz	5 us	0 – 4 pu
<i>Short Duration Variation</i>			
<i>- Instantaneous</i>			
<i>Sag</i>		0,5 - 30 cycles	0,1 – 0,9 pu
<i>Swell</i>		0,5 - 30 cycles	1,1 – 1,8 pu
<i>- Momentary</i>			
<i>Interruption</i>		0,5 cycles – 3 s	< 0,1 pu
<i>Sag</i>		30 cycles – 3 s	0,1 – 0,9 pu
<i>Swell</i>		30 cycles – 3 s	1,1 – 1,4 pu
<i>- Temporary</i>			
<i>Interruption</i>		3 s – 1 min	< 0,1 pu
<i>Sag</i>		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
<i>Swell</i>		3 s – 1 min	1,1 – 1,2 pu

<i>Long Duration</i>			
<i>Variation</i>			
<i>Interruption</i>		> 1 min	0 pu
<i>Sustained</i>			
<i>Undervoltage</i>		> 1 min	0,8 – 0,9 pu
<i>Overvoltage</i>		> 1 min	1,1 – 1,2 pu
<i>Voltage Imbalance</i>		<i>steady state</i>	0,5 – 2%
<i>Waveform Distortion</i>		<i>steady state</i>	
<i>Harmonics</i>	0 – 100th Hz	<i>steady state</i>	0 – 20 %
<i>Interharmonics</i>	0 – 6 kHz	<i>steady state</i>	0 – 2 %
<i>Noise</i>	<i>broad-band</i>	<i>steady state</i>	0 -1%
<i>Voltage Fluctuations</i>	<25 kHz	<i>intermittent</i>	0,1 – 7%
<i>Power Frequency</i>		<10 s	
<i>Variations</i>			

2.3.2 Parameter Listrik dalam Keadaan *Steady State*

Parameter listrik dalam keadaan *steady state* yang diterima oleh konsumen adalah:

1. Variasi tegangan

Dalam sistem penyediaan tenaga listrik secara umum, variasi tegangan di titik suplai yang diijinkan adalah +5% dan -10% (standar PLN) sedangkan dalam *ANSI C.84-1* diijinkan -10% dan +4% dalam kondisi normal, sedang dalam kondisi tertentu diijinkan -13% dan +6%.

2. Variasi Frekuensi

Merupakan deviasi frekuensi dasar sistem tenaga dari harga nominalnya. Variasi frekuensi tidak diatur dalam bentuk standar tetapi lebih banyak diatur dalam bentuk petunjuk operasi.

Untuk sistem tenaga listrik interkoneksi Jawa-Madura-Bali diusahakan variasi frekuensi $\pm 0,5\%$, sedangkan daerah lainnya diusahakan tidak lebih dari $\pm 1,5\%$. (standard PLN).

3. Ketidakseimbangan tegangan (*Unbalance*)

Penyebab dari ketidakseimbangan dari tegangan antara lain adalah impedansi yang tidak sama dari transmisi tiga fasa, distribusi beban satu fasa yang tidak sama, adanya *phase to phase load* dan beban tiga fasa tidak seimbang.

Ketika beban tiga fasa terhubung dengan suplai yang tidak seimbang, maka akan mengakibatkan arus yang mengalir ke beban juga menjadi tidak seimbang. Karena sangat sulit untuk membuat suplai dalam keadaan seimbang sempurna, maka untuk meminimalisir ketidakseimbangan tegangan adalah dengan mengatur pembebanan. Level dari ketidakseimbangan tegangan direpresentasikan melalui dua macam definisi yang banyak digunakan pada umumnya.

Definisi yang pertama adalah berdasar standard yang digunakan di eropa (IEC), dimana ketidakseimbangan dalam sistem tiga fasa diukur berdasarkan teori komponen simetris. Tegangan 3 fasa tidak seimbang dapat direpresentasikan menjadi 3 buah komponen simetri, yakni komponen urutan positif, negatif, dan nol. Pada sistem yang seimbang, maka tidak akan terdapat komponen urutan negatif dan nol. Berdasar standard IEC, terdapat dua definisi yakni :

$$a. \text{ negative sequence voltage unbalance factor} = V_2/V_1 \quad (2.20)$$

$$b. \text{ zero sequence voltage unbalance factor} = V_0/V_1 \quad (2.21)$$

dimana V_1, V_2 , dan V_0 adalah komponen urutan positif, negatif dan nol.

Namun arus *zero sequence* tidak dapat mengalir pada sistem tiga kawat seperti pada motor induksi 3 fasa. *Negative sequence* merupakan hal yang lebih perlu diwaspadai karena dapat membuat torka lawan pada motor induksi yang melawan dari torka yang dihasilkan *positive sequence*. Sedangkan *zero sequence* hanya membuat tidak timbulnya medan putar pada motor induksi. Ketidakseimbangan tegangan komponen urutan negatif dapat direpresentasikan dalam persamaan berikut yang hanya memerlukan nilai tegangan rms *line to line*.

$$\text{ketidak seimbangan beban} = \frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.22)$$

$$\text{dengan} \quad \beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.23)$$

Sedangkan definisi yang kedua adalah berdasarkan standard NEMA (*National Electrical Manufacturers Association of USA*), bahwa besarnya ketidakseimbangan tegangan dapat diukur sebagaimana persamaan 2.24 sebagai berikut :

$$\text{Ketidakseimbangan}_{\text{tegangan}} = \frac{\text{Deviasi}_{\text{maksimum}_{\text{dari}_{\text{ratarata}}\{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\}}}}{\text{Rata}_{\text{rata}}\{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\}} \quad (2.24)$$

Perlu diketahui bahwa bahwa baik pada standard IEC maupun standard NEMA, nilai tegangan yang digunakan bukanlah nilai tegangan *line to neutral*, karena komponen urutan nol akan menyebabkan hasil perhitungan yang salah. Selain itu perlu diperhatikan secara perhitungan matematis, definisi IEC dan NEMA akan dapat menghasilkan hasil yang tidak sama.

4. Harmonisa (*Harmonics*)

Dalam sistem tenaga listrik, definisi harmonisa dapat dijelaskan sebagai komponen sinusoidal dari gelombang periodik yang memiliki frekuensi yang merupakan kelipatan integral dari frekuensi dasar. Demikian untuk sistem tenaga dengan f_0 frekuensi dasar, frekuensi harmonisa orde ke- h adalah hf_0 . Harmonisa sering dipakai untuk menjelaskan gelombang sinusoidal yang menyimpang yang berhubungan dengan arus dan tegangan dari amplitudo dan frekuensi yang berbeda.

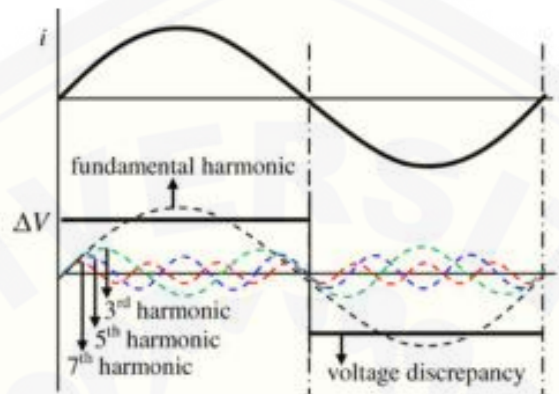
2.3.3 Harmonisa

Secara umum, tenaga listrik didistribusikan dalam sistem tegangan sinusoidal 3 fasa. Seiring dengan semakin meluasnya penggunaan beban-beban non-linier, gelombang arus maupun tegangan sinusoidal tersebut dapat terdistorsi dan bentuknya menjadi cacat. Berbeda dengan beban beban listrik linier yang menarik arus sinusoidal (sebentuk dengan tegangan yang menyuplainya), kebanyakan beban beban non-linier menarik arus non sinusoidal walaupun disuplai dari sumber tegangan sinusoidal.

2.3.3.1 Definisi Harmonisa

Istilah harmonisa sering dipakai untuk menjelaskan penyimpangan gelombang sinusoidal yang berhubungan dengan arus dan tegangan dari amplitudo dan frekuensi yang berbeda. Dalam sistem tenaga listrik, definisi harmonisa dapat dijelaskan sebagai komponen sinusoidal dari gelombang periodik yang mempunyai frekuensi kelipatan bilangan bulat (*integer*) dari frekuensi dasar.

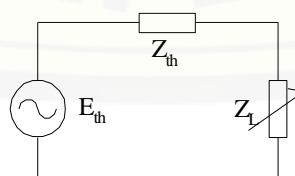
Frekuensi dasar dari gelombang tersebut dinamakan frekuensi fundamental dan gelombangnya dinamakan komponen fundamental. Untuk sistem tenaga dengan frekuensi dasar f_0 , frekuensi dari harmonisa orde ke- n adalah $n \times f_0$.



Gambar 2.20 Gelombang Terdistorsi Akibat Harmonisa
(sumber : xiang, 2012)

Pada gambar 2.20 telah diketahui bahwa gelombang menunjukkan gelombang sinusoidal pada frekuensi fundamental, gelombang harmonisa pada orde ke-3, gelombang harmonisa orde ke-5 dan gelombang total yang terdistorsi harmonisa. Penjelasan mengenai harmonisa yang timbul pada sistem tenaga listrik seperti dalam gambar 2.21, dimana terdapat suatu sistem tenaga listrik yang merupakan rangkaian pengganti Thevenin dari suatu jaringan sistem tenaga listrik AC. E_{th} adalah sumber tegangan yang hanya menghasilkan tegangan sinusoidal, Z_{th} adalah beban linier dan Z_L adalah elemen tak linier. Beban Z_L akan menyerap arus yang mengandung komponen-komponen harmonisa. Dalam kondisi ini misalnya,

$$E_{th} = E_m \sin n(\omega t) \tag{2.25}$$



Gambar 2.21 Rangkaian ekivalen jaringan sistem tenaga listrik

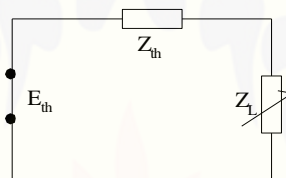
Arus yang diserap oleh komponen tak linier adalah :

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \text{Sin} (\omega_n t + \phi_n) \tag{2.26}$$

karena E_{th} tidak mengandung komponen harmonisa, maka untuk $n > 1$ harga $E_{th} = 0$ dan arus :

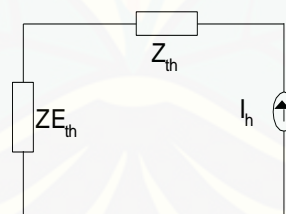
$$i(t) = \sum_{n=2}^{\infty} I_n \text{Sin} (\omega_n t + \phi_n) \tag{2.27}$$

sehingga rangkaian penggantinya seperti yang ditunjukkan gambar 2.22 sebagai berikut :



Gambar 2.22 Rangkaian pengganti untuk $n > 1$

Untuk kondisi ini, dapat disimpulkan bahwa $i(t)$ tetap ada meskipun $E_{th} = 0$. Karena nilai $i(t)$ tetap, maka pada kondisi ini elemen Z_L dapat dipandang sebagai sumber arus dan generator dipandang sebagai sebuah impedansi $Z_{E_{th}}$. Rangkaian pengganti dapat dilihat pada gambar 2.23.



Gambar 2.23 Elemen tak linier sebagai sumber arus harmonisa

Misalnya :

$$i_n(t) = -i(t) \tag{2.28}$$

$$i_n(t) = - \sum_{n=2}^{\infty} I_n \text{Sin} (\omega_n t + \phi_n) \tag{2.29}$$

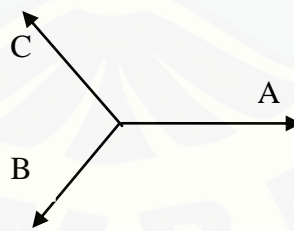
jika $\theta_n = \phi_n + \pi$ maka :

$$i_n(t) = I_n \sin(\omega_n t - \theta_n) \quad (2.30)$$

Dalam sistem tiga fasa, harmonisa yang dihasilkan sama seperti sistem satu fasa. Harmonisa genap biasanya diabaikan karena resultan harmonisa ini dengan komponen fundamental menghasilkan bentuk gelombang yang simetris. Dalam analisis harmonisa sistem tiga fasa, harmonisa ditinjau berdasarkan teori komponen simetris. Pada sistem tiga fasa seimbang, arus-arus dari sumber harmonisa tiga fasa seimbang dapat dikelompokkan menurut arah putaran fasanya. Arus terdistorsi pada tiap fasanya akan mempunyai bentuk gelombang yang sama, dan dianggap bahwa arus pada tiap fasa merupakan fungsi ganjil, agar analisisnya sederhana.

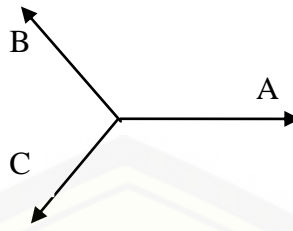
$$I_R(t) = I_1 \sin \omega t + I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t + \dots \quad (2.31)$$

Pada sistem tiga fasa seimbang, jika diasumsikan urutan fasanya a-b-c berarti putaran fasornya adalah fasa a akan datang terlebih dahulu, dilanjutkan fasa b, dan yang terakhir adalah fasa c. Urutan ini dikenal sebagai komponen urutan positif (*positive sequence components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain sebesar 120° dan memiliki arah putaran fasor yang berlawanan dengan arah jarum jam (*counterclockwise*) seperti pada gambar 2.24 berikut



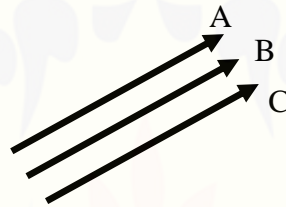
Gambar 2.24 Komponen urutan positif

Sedangkan komponen urutan negatif (*negative sequence components*) terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, dengan beda sudut antar fasanya sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan komponen urutan positif, yaitu a-c-b seperti pada gambar 2.25.



Gambar 2.25 Komponen urutan negatif

Komponen urutan nol terdiri dari tiga fasa yang sama besarnya dengan antara fasor a-b-c adalah sefasa dan tidak ada perbedaan sudut antar fasanya atau dapat dikatakan saling berimpit seperti pada gambar 2.26.



Gambar 2.26 Komponen urutan nol

Komponen harmonisa juga memiliki urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol. Urutan-urutan harmonisa tersebut dapat ditentukan dari hubungan fasor arus harmonisa. Untuk sistem 3 fasa seimbang dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} V_{ah} &= \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \sin(h\omega t) \\ V_{bh} &= \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \sin\left(h\omega t - \frac{2 \cdot h \cdot \pi}{3}\right) \\ V_{ch} &= \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \sin\left(h\omega t + \frac{2 \cdot h \cdot \pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

Sebagai contoh berikut ini diambil tiga orde harmonisa, yaitu :

- 1) Harmonisa orde ketiga

$$i_{a3} = I_{a3} \cdot \sin 3\omega t \quad (2.33)$$

$$i_{b3} = I_{b3} \cdot \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{b3} \cdot \sin(3\omega t - 360^\circ)$$

$$i_{b3} = I_{b3} \cdot \sin 3\omega t \quad (2.34)$$

$$i_{c3} = I_{c3} \cdot \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_{c3} \cdot \sin(3\omega t - 720^\circ)$$

$$i_{c3} = I_{c3} \cdot \text{Sin}3\omega t \quad (2.35)$$

Dari persamaan (2.33), (2.34) dan (2.35) dapat dilihat bahwa untuk harmonisa orde ketiga tidak mempunyai beda sudut antar fasanya, sehingga harmonisa orde ketiga termasuk komponen urutan nol.

2) Harmonisa orde kelima

$$i_{a5} = I_{a5} \cdot \text{Sin}5\omega t \quad (2.36)$$

$$i_{b5} = I_{b5} \cdot \text{Sin}5(\omega t - 120^\circ) = I_{b5} \cdot \text{Sin}(5\omega t - 600^\circ)$$

$$i_{b5} = I_{b5} \cdot \text{Sin}(5\omega t - 240^\circ) \quad (2.37)$$

$$i_{c5} = I_{c5} \cdot \text{Sin}5(\omega t - 240^\circ)$$

$$i_{c5} = I_{c5} \cdot \text{Sin}(5\omega t - 1200^\circ)$$

$$i_{c5} = I_{c5} \cdot \text{Sin}(5\omega t - 120^\circ) \quad (2.38)$$

Dari persamaan (2.36), (2.37), dan (2.38) dapat dilihat bahwa untuk harmonisa kelima mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan komponen urutan positif. Sehingga harmonisa orde kelima termasuk komponen urutan negatif.

3) Harmonisa orde ketujuh

$$i_{a7} = I_{a7} \cdot \text{Sin}7\omega t \quad (2.39)$$

$$i_{b7} = I_{b7} \cdot \text{Sin}7(\omega t - 120^\circ) = I_{b7} \cdot \text{Sin}(7\omega t - 840^\circ)$$

$$i_{b7} = I_{b7} \cdot \text{Sin}(7\omega t - 120^\circ) \quad (2.40)$$

$$i_{c7} = I_{c7} \cdot \text{Sin}7(\omega t - 240^\circ) = I_{c7} \cdot \text{Sin}(7\omega t - 1680^\circ)$$

$$i_{c7} = I_{c7} \cdot \text{Sin}(7\omega t - 240^\circ) \quad (2.41)$$

Dari persamaan (2.39), (2.40), dan (2.41) dapat dilihat bahwa untuk harmonisa orde ketujuh mempunyai urutan fasa a-b-c dengan beda sudut antar fasa 120° , sehingga harmonisa orde ketujuh termasuk komponen urutan positif.

Jadi dapat diambil kesimpulan bahwa harmonisa orde pertama merupakan urutan positif, harmonisa orde kedua merupakan urutan negatif, harmonisa orde ketiga adalah urutan nol, dan berulang untuk harmonisa orde berikutnya. Setiap urutan harmonisa memiliki efek yang berbeda-beda terhadap sistem tenaga listrik dan peralatan-peralatan listrik lainnya. Harmonisa urutan nol yang umumnya

berupa harmonisa kelipatan orde tiga (*triplen harmonics*) dapat menimbulkan efek tambahan kontribusi arus pada kawat netral. Harmonisa urutan negatif umumnya menimbulkan torsi lawan pada motor listrik yang menyebabkan motor berlawanan arah putarannya, hal ini dapat merusak motor. Sedangkan harmonisa urutan positif umumnya menimbulkan panas tambahan pada konduktor. Sehingga dapat diperoleh suatu tabel urutan harmonisa:

Tabel 2.2 Orde Harmonisa berdasarkan urutan

Harmonisa	Urutan
1,4,7,10,13,.....,3n+1	Positif
2,5,8,11,.....,3n-1	Negatif
3,6,9,12,15,.....,3n	Nol

Dari tabel 2.2 tersebut dapat diketahui urutan-urutan fasa harmonisa, namun urutan sederhana tersebut tidak diperuntukkan untuk sistem tenaga listrik yang tidak seimbang, karena harmonisa tiap orde mengandung tiga urutan yang berbeda, sehingga membutuhkan analisis yang lebih kompleks.

Pemakaian komponen elektronika yang dapat menyebabkan sumber sumber harmonisa antara lain:

1. Pemakaian komponen semikonduktor seperti diode dan thyristor dalam konversi energi listrik yang dipakai pada peralatan konverter seperti untuk penyearah (*rectifier*), inverter dan lainnya serta peralatan elektronika yang dipergunakan untuk mengatur tegangan maupun kecepatan putaran motor seperti lampu *flourescent*, dimmer, komputer, TV, *microwave*, pemanas, *variable speed drive* (VSD), *charger* baterai, dan *Uninterruptible Power Supply* (UPS).
2. Tanur busur listrik

Berikut akan dipaparkan beberapa pengaruh yang diakibatkan oleh adanya harmonisa :

1. Resonansi pada sistem tenaga listrik yang menyebabkan tegangan lebih dan meningkatkan rugi rugi serta panas lebih pada *capasitor bank*.
2. Meningkatnya rugi transmisi yang disebabkan oleh meningkatnya nilai *rms* gelombang arus.

3. Meningkatkan rugi-rugi histerisis dan arus *Eddy* pada transformator.
4. Mempengaruhi kerja rele pengaman yang bekerja bergantung pada nilai puncak tegangan atau arus.
5. Arus lebih (*overload current*) pada konduktor netral untuk sistem tiga fasa empat kawat.

2.3.3.2 Indeks Harmonisa

Dalam harmonisa khususnya pada sistem tenaga listrik dipakai istilah *Total Harmonic Distortion* (THD) yang didefinisikan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{THD} = \frac{\left[\sum_{n=2}^k U_n \right]^{\frac{1}{2}}}{U_1} \times 100\% \quad (2.42)$$

U_n = komponen harmonisa

U_1 = komponen fundamental

k = komponen harmonisa maksimum yang diamati

Perhitungan tersebut tidak sama untuk setiap negara tergantung standar yang dipakai. Dalam hal ini diberikan contoh standar dari IEEE Std. 519-1992. Ada dua kriteria yang digunakan dalam analisa distorsi harmonisa. Pertama adalah limitasi untuk distorsi arus, dan yang kedua adalah limitasi untuk distorsi tegangan, seperti pada tabel 2.3 dan 2.4

Tabel 2.3 Limit distorsi arus harmonisa berdasarkan IEEE Std. 519-1992

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
I_{sc}/I_L	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					TDD
	<11	11≤h≤17	17≤h≤23	23≤h≤35	35≤h	
< 20*	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

Even harmonic are limited to 25% of the odd harmonic above.

Current distortion that result in a dc, e.g. half-wave converters, are not allowed.

**All power generation equipment is limited to these values of current distortion regardless of the actual I_{SC}/I_L .*

Where :

I_{SC} = maximum short circuit at PCC

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC

Rasio I_{SC}/I_L adalah arus hubung singkat pada *Point of Common Coupling* terhadap arus beban nominal pada frekuensi fundamental. Untuk tegangan 69 kV sampai dengan 161 kV dipakai standar limitasi untuk sistem subtransmisi. Sedangkan untuk limit distorsi tegangan adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Limit Distorsi Tegangan Harmonisa Berdasarkan IEEE Std. 519-1992

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	THD (%)
69 kV and below	3,0	5,0
69,001 kV through 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV and above	1,0	1,5

Note : High voltage system can have up to 2,0 % THD where the cause is an HVDC

Index harmonik yang selalu digunakan adalah :

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \text{atau} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.43)$$

Persamaan 2.43 menjelaskan mengenai perbandingan antara nilai rms komponen harmonik dengan nilai rms komponen dasar dan biasanya menggunakan satuan persen (%). Indeks ini digunakan untuk mengukur deviasi dari bentuk gelombang yang mengandung harmonisa dari gelombang sinus yang

sempurna. Untuk gelombang sinus sempurna pada frekuensi dasar, THD-nya adalah nol. Sama dengan pengukuran distorsi harmonisa pada orde ke-1 untuk tegangan dan arus orde ke- h bahwa V_h/V_1 dan I_h/I_1 .

Total demand distortion (TDD) adalah distorsi harmonisa total terlihat pada persamaan dibawah ini :

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L}, \quad (2.44)$$

dengan I_L merupakan arus beban demand maksimum (15 atau 30 menit demand) pada frekuensi dasar di PCC (*point of common coupling*), dihitung sebagai arus rata-rata dari beban maksimum. Konsep TDD ini relevan dengan aplikasi dari IEEE Standart 519.

Total Harmonic Ratio (THR) adalah nilai distorsi relatif terhadap harga rms-nya, bukan terhadap fundamentalnya.

$$THR = \frac{1}{V_{rms}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2} \quad (2.45)$$

$$THR = \frac{1}{V_{rms}} \sqrt{V_{rms}^2 - V_1^2} \quad (2.46)$$

THR adalah 0% berarti tidak ada komponen distorsi, sedangkan THR maksimum adalah 100 % berarti gelombang cacat total, tidak ada komponen fundamental. Untuk distorsi kecil, harga THD hampir sama dengan THR.

2.3.4 Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Tanpa Harmonisa

Dalam penentuan daya listrik pada jaringan ada dua sistem, yaitu untuk jenis satu fasa dan tiga fasa. Dari sistem itu mempunyai persamaan yang berbeda-beda untuk mencari nilai kualitas daya listriknya. Pada sistem tenaga listrik dengan sumber AC (*Alternating Current*), tegangan suplai berupa gelombang sinusoidal murni, yaitu:

$$v(\omega t) = v_{maks} \cos \omega t \quad (2.47)$$

$v(\omega t)$ = tegangan sesaat (Volt)

v_{maks} = tegangan maksimum (volt)

ωt = sudut (derajat atau radian)

Besar atau magnitude dari tegangan yang terukur pada suatu sistem tenaga listrik adalah nilai dari efektif atau tegangan rms (*root mean square*). Nilai rms dari suatu tegangan berarti nilai dari tegangan AC yang dibutuhkan untuk menghasilkan nilai yang sama dengan nilai tegangan yang dihasilkan oleh tegangan DC (*Direct Current*) untuk memberikan energi yang sama pada suatu beban. Tegangan rms dari suatu sinyal tegangan sinusoidal adalah :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.48)$$

$$V_{rms} = \frac{v_{maks}}{\sqrt{2}} \quad (2.49)$$

Arus pada sistem tenaga listrik dengan sumber berupa sinusoidal murni dapat ditulis dengan persamaan berikut:

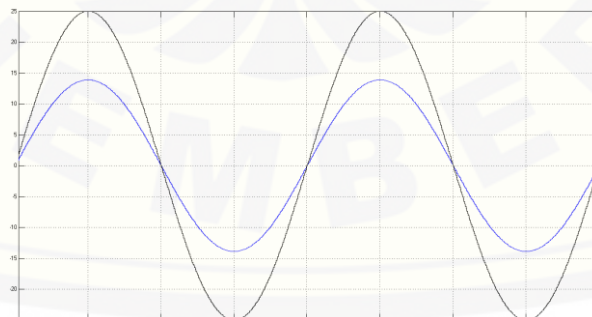
$$i(\omega t) = I_{maks} \cos(\omega t - \varphi) \quad (2.50)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.51)$$

$$I_{rms} = \frac{I_{maks}}{\sqrt{2}} \quad (2.52)$$

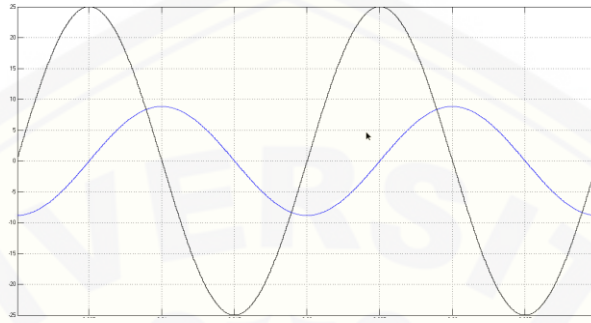
Dilihat dari sudut fasanya, arus dan tegangan pada sistem tenaga listrik dapat dibedakan menjadi 3 kondisi :

1. Arus dan tegangan sefasa, kondisi ini diakibatkan karena beban resistif sehingga nilai arus dan tegangan menjadi sefasa. Sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 2.27 berikut:



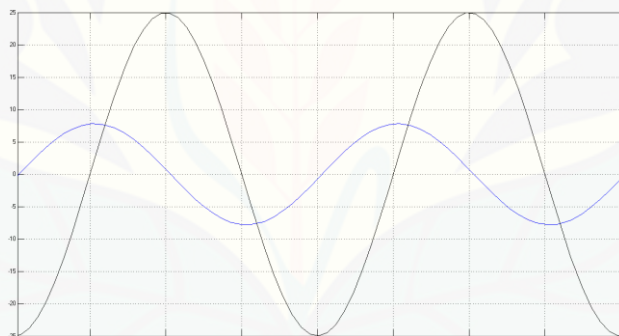
Gambar 2.27 Hubungan arus dan tegangan sefasa

2. Arus tertinggal terhadap tegangan (*lagging*), kondisi seperti ini diakibatkan karena penggunaan beban induktif, sehingga arus tertinggal terhadap tegangan dengan sudut 90° . Seperti yang ditunjukkan gambar 2.28 berikut :



Gambar 2.28 Hubungan arus tertinggal terhadap tegangan

3. Arus mendahului terhadap tegangan (*leading*). Biasanya kondisi ini diakibatkan karena beban kapasitif. Sehingga arus mendahului tegangan sebesar 90° . Sebagaimana yang ditunjukkan seperti gambar 2.29 berikut :



Gambar 2.29 Hubungan arus mendahului tegangan

Daya dalam sistem tenaga listrik berarti kecepatan (*rate*) berubahnya energi terhadap waktu dalam bentuk tegangan dan arus. Satuan unit untuk menyatakan suatu daya adalah watt. Daya dalam watt yang diserap oleh suatu beban setiap saat sama dengan jatuh tegangan (*voltage drop*) pada beban itu, dalam tegangan dikalikan arus yang mengalir lewat beban. Jika arus dan tegangan dinyatakan seperti pada persamaan 2.49 dan 2.52, maka daya sesaat dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S = V \cdot I = V_{maks} I_{maks} \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\omega t - \Phi) \quad (2.53)$$

Sudut Φ dalam persamaan diatas adalah positif untuk arus *lagging* terhadap tegangan dan negatif untuk arus *leading* terhadap tegangan. Dengan menggunakan persamaan trigonometri, persamaan 2.53 dapat diubah menjadi :

$$S = \frac{V_{maks} I_{maks}}{2} \cos\Phi(1 + \cos 2\omega t) + \frac{V_{maks} I_{maks}}{2} \sin\Phi \cdot \sin 2\omega t \quad (2.54)$$

$\frac{V_{maks} I_{maks}}{2}$ Dapat diganti dengan perkalian $|V| \cdot |I|$

Pada persamaan 2.54 terlihat bagian pertama yang mengandung $\cos \Phi$ akan selalu positif dan nilai rata-ratanya adalah :

$$P = \frac{V_{maks} I_{maks}}{2} \cos\Phi \quad (2.55)$$

Atau dengan memasukkan nilai rms dari tegangan dan arus,

$$P = |V| \cdot |I| \cdot \cos\Phi \quad (2.56)$$

P adalah daya rata-rata yang sering disebut dengan daya aktif atau daya nyata (*real power*). Dalam sistem tenaga listrik P biasanya terukur dalam kilowatt atau megawatt. Bagian kedua dari persamaan 2.54, terdapat $\sin \Phi$ selalu berubah-ubah dari positif ke negatif atau sebaliknya dan nilai rata-ratanya adalah nol. Komponen dari daya sesaat ini disebut daya reaktif, dan ditulis dengan Q yaitu sebagai berikut:

$$Q = \frac{V_{maks} I_{maks}}{2} \sin\Phi \quad (2.57)$$

atau,

$$Q = |V| \cdot |I| \cdot \sin\Phi \quad (2.58)$$

Satuan dari daya reaktif adalah VAR (*Voltampere Reactive*) dan dalam sistem tenaga biasanya dalam kiloVAR atau MegaVAR. Perhitungan daya reaktif dan daya aktif akan lebih mudah dalam bentuk kompleks jika fasor tegangan dan arusnya diketahui. Jika tagnagn dan arus pada suatu beban dinyatakan dengan $V = |V| \angle \alpha$ dan $I = |I| \angle \beta$. Maka hasil perkalian antara tegangan dan konjugate arus adalah :

$$VI^* = |V| \angle \alpha \cdot |I| \angle -\beta \quad (2.59)$$

$$VI^* = |V| \cdot |I| \angle (\alpha - \beta) \quad (2.60)$$

Kuantitas ini biasanya ditulis dengan S dan disebut dengan daya kompleks. Dalam bentuk kompleks menjadi:

$$S = |V| \cdot |I| \cos(\alpha - \beta) + j|V| \cdot |I| \sin(\alpha - \beta) \quad (2.61)$$

karena $\alpha-\beta$ merupakan sudut fasa antara tegangan dan arus, jadi sama dengan Φ pada persamaan-persamaan sebelumnya, maka:

$$S = P + jQ \quad (2.62)$$

Daya reaktif Q positif jika sudut fasa $\alpha-\beta$ diantara tegangan dan arus adalah positif yaitu $\alpha>\beta$, berarti arus tertinggal (lagging) terhadap tegangan. Sebaliknya Q menjadi negatif $\alpha<\beta$, berarti arus mendahului (leading) terhadap tegangan.

2.3.5 Daya Pada Sistem Tenaga Listrik dengan Harmonisa

Ketika pada keadaan *steady-state* terjadi harmonisa, tegangan dan arus sesaat dapat dipresentasikan dengan *Fourier Series* sebagaimana berikut ini:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2v_h} \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (2.63)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2i_h} \sin(h\omega_0 t + \delta_h) \quad (2.64)$$

Komponen DC biasanya diabaikan untuk kemudahan V_h dan I_h adalah nilai rms untuk tegangan dan arus harmonisa orde-h. Sehingga dapat diperoleh daya aktif sesaat yang didefinisikan sebagai:

$$P(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.65)$$

Dan daya rata-rata dari satu periode T dari p(t) didefinisikan sebagai:

$$P = P_{maks} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.66)$$

Apabila persamaan 2.63 dan 2.64 disubstitusikan kedalam persamaan 2.66 dan memakai hubungan ortogonal, ini dapat diperhatikan bahwa :

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (2.67)$$

Tiap komponen harmonisa memiliki kontribusi, baik itu positif atau negatif terhadap daya rata-rata. Tidak ada kontribusi terhadap daya rata-rata yang berasal dari tegangan pada salah satu frekuensi dan dari arus pada sisi lain. daya rata-rata yang dihasilkan oleh harmonisa biasanya sangat kecil dibandingkan dengan daya rata-rata pada frekuensi dasarnya. Daya nyata rms pada sistem tenaga listrik dengan harmonisa dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (2.65)$$

$$S = \sqrt{(V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_h^2)(I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_h^2)} \quad (2.66)$$

Q adalah daya reaktif yang didefinisikan sebagai :

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \delta_h) \quad (2.67)$$

Jika V berbentuk sinusoidal, maka persamaan 2,74 akan menjadi:

$$S = V_s \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_h^2} \quad (2.68)$$

dengan Vs adalah nilai rms tegangan sumber.

Ketika harmonisa tidak timbul maka persamaan 2.65 menjadi $S = V_1 \times I_1$ dimana secara konvensional didefinisikan sebagai daya nyata pada frekuensi fundamental. Pada kondisi sinusoidal persamaan daya akan berhubungan dengan daya rata-rata, daya reaktif dan daya nyata dan ini didefinisikan sebagai:

$$(V_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (2.69)$$

Dengan $Q = V_1 I_1 \sin(\theta_1 - \delta_1)$ adalah daya reaktif fundamental yang telah dijelaskan pada persamaan 2.68 untuk $h=1$.

Ketika komponen arus dan tegangan pada sistem tenaga listrik mengandung komponen harmonisa, maka besar tegangan dan arus efektif adalah sama

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots} \quad (2.70)$$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (2.71)$$

Yang kemudian dapat dinyatakan sebagai berikut

$$V_{rms} = V_1 \sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \quad (2.72)$$

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2} \quad (2.73)$$

Dari kedua persamaan diatas, maka faktor daya pada sistem yang mengandung harmonisa adalah :

$$P_{f_{tot}} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}} \quad (2.74)$$

Persamaan 2.74 dapat dinyatakan sebagai perkalian dari dua komponen

$$P_{f_{tot}} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}} \quad (2.75)$$

dengan mengambil dua asumsi bahwa:

1. Dalam kebanyakan kasus, kontribusi harmonisa pada daya aktif relatif sangat kecil, jadi bisa dianggap bahwa $P \approx P_1$
2. Distorsi harmonisa untuk komponen tegangan relatif kecil jadi bisa dianggap bahwa $V_{rms} \approx V_1$

Persamaan 2.76 dapat ditulis menjadi

$$Pf_{tot} \approx \frac{P_1}{V_{rms1} \cdot I_{rms1}} \times \frac{1}{\sqrt{1+(THD_I/100)^2}} = pf_{dlspl} \times pf_{dlst} \quad (2.76)$$

Pf_{disp} adalah power faktor pada frekuensi fundamental sedangkan P_{disp} adalah power faktor distorsi. Dan hubungan diatas dapat kita lihat bahwa semakin besar distorsi yang terjadi pada sistem maka Pf_{tot} akan semakin buruk. Harus diperhatikan juga bahwa penambahan kapasitor untuk memperbaiki faktor daya pada beban seperti itu akan dapat menyebabkan kondisi resonansi. Sebagai alternatif untuk memperbaiki distorsi faktor daya digunakan filter aktif dan pasif untuk menghilangkan harmonisa yang ditimbulkan oleh beban nonlinier. Dengan kata lain, arus dan tegangan harmonisa juga menyebabkan turunnya faktor daya. Hal ini dikarenakan komponen arus dan tegangan harmonisa menyebabkan timbulnya distorsi daya tanpa menambah daya aktif sehingga daya total bertambah.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

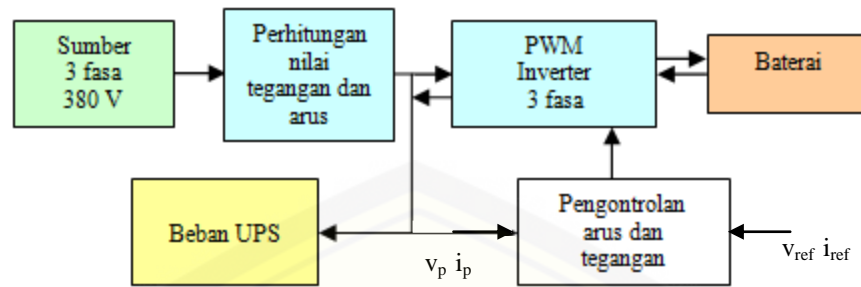
3.1 Simulasi dengan MATLAB

Simulasi pengendalian inverter dengan menggunakan MATLAB secara umum dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pemodelan sistem pengendalian inverter antara sumber 3 fasa dengan baterai dalam simulink MATLAB yang mencakup blok: inverter, SPWM, sumber 3 fasa, beban dan blok kontrol.
2. Pembuatan regulator arus dan tegangan yang terdiri atas: blok dekomposisi, memisahkan tegangan dan arus ke dalam komponen urutan simetri, blok transformasi abc ke dq, blok rekomposisi, menggabungkan tegangan serta arus dari komponen urutan simetri ke abc, dan blok transformasi dq ke abc.
3. Pembuatan model kontrol PI untuk membuat *error* tegangan menjadi seimbang dan mengkonversikan tegangan menjadi arus referensi.
4. Melakukan simulasi pada sistem dengan menggunakan *online UPS*, pengendali inverter dengan metode MSRF, dan tanpa menggunakan kontrol dengan beban bervariasi.
5. Analisis hasil simulasi dan membuat kesimpulan.

3.2 Model Sistem Pengendalian Inverter

Dalam sistem ini terdiri dari sumber AC 3 Fasa, beban, inverter dan baterai. Model sistem aliran daya listrik yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sistem pengendali inverter tiga fasa sebagai kompensasi harmonisa, perbaikan faktor daya dan sebagai UPS. Konfigurasi yang dibahas dalam bagian awal ini adalah sistem inverter tiga fasa dengan menggunakan *feedback* regulasi tegangan dan arus pada sisi jaringan yang diparalel dengan beban dan inverter, regulasi itu digunakan sebagai kontrol inverter saat dilakukan proses pensaklaran. Dalam pemodelan sistem pengendalian inverter tiga fasa dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Konfigurasi pengendalian inverter 3 fasa dengan regulasi arus dan tegangan

Regulator tegangan dan arus ditambahkan dalam sistem pengendalian inverter ini adalah digunakan untuk mengatur atau mengendalikan nilai tegangan dan arus keluaran dari inverter. Hal itu bertujuan supaya tegangan dan arus yang masuk ke beban adalah sinkron dengan sumber utama yang masuk ke beban. Sehingga aliran listrik yang masuk ke dalam beban memiliki kualitas daya yang baik, yakni rendahnya nilai distorsi harmonisa, serta besarnya tegangan di sisi beban dan jaringan berada dalam nilai yang wajar dan seimbang, yaitu berkisar $380 \text{ Vrms phase to phase}$.

Regulasi tegangan dan arus dalam hal ini sebenarnya adalah digunakan pada pengendalian penyalan dari SPWM inverter 3 fasa yang berfungsi meneruskan suplai daya listrik ke beban setelah menerimanya dari sumber utama PLN ataupun dari baterai pada saat terjadi hubungan pada saat mensuplai ke beban maupun saat jaringan terganggu. Dalam hal ini, tegangan referensi yang dipakai pada penyalan SPWM inverter 3 fasa adalah berasal dari nilai aktual pada tegangan di sisi jaringan yang kemudian besarnya dirubah ke dalam besaran *phase to ground*.

Mekanisme regulasi tegangan dan arus di sisi jaringan itu didalamnya mengandung beberapa elemen yang saling menunjang dan memiliki keterkaitan satu sama lainnya. Elemen tersebut antara lain adalah mekanisme pemisahan komponen simetri, transformasi nilai abc ke koordinat dq dan juga sebaliknya, serta kontroler PI sebagai *error* kompensator yang digunakan untuk mengoreksi arus dan tegangan dari jaringan. Dengan konfigurasi seperti ini, maka kondisi SPWM inverter 3 fasa dalam memberikan suplai ke beban adalah sangat bergantung kepada kondisi tegangan dan arus beban, atau bisa dikatakan bahwa

inverter pengendali 3 fasa ini bersifat cukup adaptif pada sisi jaringan maupun beban.

Dan juga dengan memodifikasi metode MSRF itu inverter yang diparalel dengan beban dapat menjaga faktor daya tetap agar tetap mendekati satu dan meredam harmonisa. Dan pada mode normal ini inverter akan mengisi baterai yang dijadikan sebagai sumber cadangan pada saat terjadinya gangguan (*interruption*).

Saat terjadi gangguan (*interruption*) pada sumber AC utama (PLN), inverter akan berfungsi sebagai UPS atau dikatakan inverter beroperasi sebagai *back-up mode*, baterai yang *standby* akan secara langsung menggantikan peran sumber utama untuk menyuplai beban, sehingga beban akan tetap mendapatkan sumber listrik secara kontinyu. Hal ini berarti UPS akan memberikan proteksi maksimum pada beban.

3.2.1 Sumber Utama 3 Fasa dan Baterai

Dengan asumsi bahwa sistem kelistrikan distribusi 3 fasa ini disuplai melalui sebuah sumber AC 3 fasa spesifikasi daya 5 MVA, $Z = 6,75\%$ dan $X/R = 12,14$, $V_{L-N} = 220$ volt, $V_{L-L_{rms}} = 380$ volt, dan $f = 50$ Hz dan tegangan maksimum *line to netral* $V_{LN_{max}} = 311,16$ Volt. (data tipikal untuk transformator 5 MVA dari *ETAP Power Station*), dapat diketahui besarnya R_s dan L_s sebagai berikut

$$Z_T = \frac{(K_{VLL})^2}{M_{VA3\Phi}} \times Z_{TX} (\%) \quad (3.1)$$

$$= \frac{(0,38)^2}{5} \times 0,0675 = 0,00194$$

$$Z_T^2 = X^2 + R^2 \quad (3.2)$$

$$= (12,14R)^2 + R^2 = 148,38R^2$$

$$Z_T = R\sqrt{148,38}$$

$$R_s = \frac{0,00194}{\sqrt{148,38}} = 15,926m\Omega$$

$$X = 12,14R = 193,34m\Omega$$

$$L_s = \frac{X}{2\pi f} \quad (3.3)$$

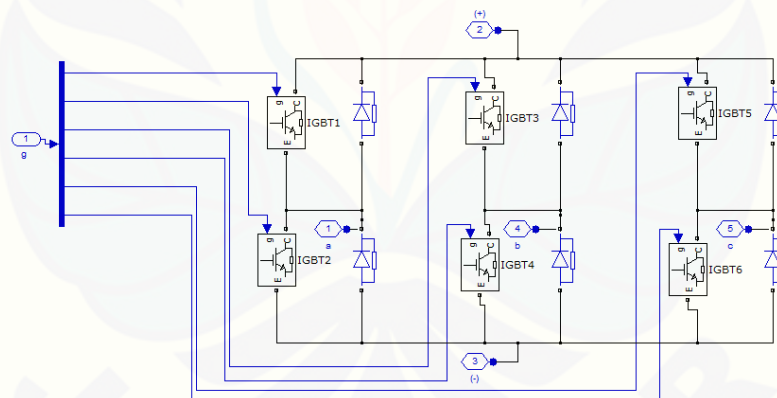
$$= 0,615mH$$

Dari perhitungan di atas, maka dapat diketahui impedansi dari sumber utama 3 fasa yakni yang terdiri dari resistansi $R_s = 15,926 \text{ m}\Omega$ dan induktansi $L_s = 0,615 \text{ mH}$.

Baterai diset dengan nilai tegangan dan kapasitas konstan. Blok baterai yang digunakan terdiri atas sebuah sumber DC dengan tegangan sebesar 600 volt yang dipasang parallel dengan kapasitor yang bertindak sebagai *temporary storage device*.

3.2.2 Inverter Tiga Fasa dan *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)*

Pada sistem pengendalian inverter 3 fasa ini digunakan rangkaian *bidirection* inverter dimana dalam rangkaian tersebut terdapat 6 buah IGBT dan 6 buah dioda sebagaimana pada gambar 3.2. berikut ini

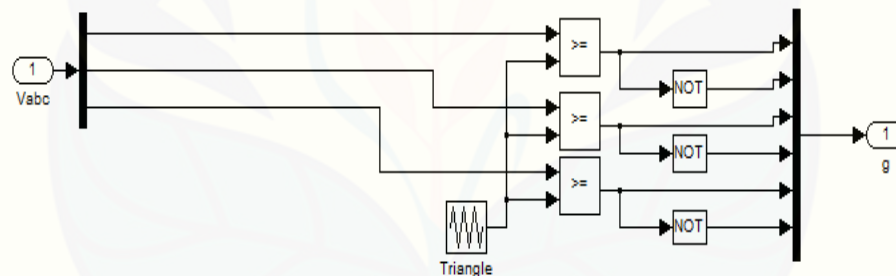


Gambar 3.2 Pemodelan rangkaian inverter 3 fasa

Inverter ini digunakan untuk melakukan proses pengisian baterai melalui dioda dan proses *switching* pada IGBT untuk mengubah tegangan DC dari baterai menjadi tegangan AC dan juga mereduksi harmonisa serta memperbaiki faktor daya pada beban. Pada pengoperasiannya, prinsip kerja inverter yang digunakan dalam sistem ini berdasarkan kontrol *switch* yang berada dalam satu line seperti g_1 dan g_2 harus bekerja berkebalikan, agar tidak terjadi short circuit yang dapat merusak *switch device*.

Nilai amplitudo tegangan yang dihasilkan oleh inverter bergantung pada masukan nilai tegangan DC yang dihasilkan oleh baterai dan sinyal kontrol SPWM. Sinyal kontrol yang berupa pulsa dihasilkan dari komparasi sinyal referensi dan sinyal segitiga (*triangle*). Sinyal referensi memiliki bentuk gelombang dan frekuensi yang sama dengan frekuensi keluaran inverter, dalam hal ini digunakan sinyal sinusoidal yang dihasilkan oleh tegangan V_{abc} dengan frekuensi 50 Hz. Sedangkan sinyal segitiga diatur memiliki frekuensi yang jauh lebih besar dari pada sinyal referensi. Pada inverter ini digunakan sinyal segitiga sebesar 18 KHz.

Pulsa-pulsa kontrol yang dihasilkan SPWM generator digunakan untuk mengatur kerja transistor IGBT pada inverter. Sebagai mana yang telah ditunjukkan pada gambar 3.2. Masing-masing dari transistor IGBT diberikan pensaklaran (*switching*) *on-off*, dengan ketentuan IGBT₁, IGBT₃, dan IGBT₅ diberikan sinyal yang berlawanan dengan IGBT₂, IGBT₄, IGBT₆.



Gambar 3.3 SPWM generator inverter

Amplitudo tegangan keluaran inverter dengan sinyal kontrol bipolar SPWM sangat dipengaruhi oleh indeks modulasi sinyal kontrolnya. Indeks modulasi dapat ditentukan dengan persamaan

$$M = \frac{V_{refrensi}}{V_{triangle}} \quad (3.4)$$

Dimana $v_{refrensi}$ adalah nilai amplitudo sinyal referensi yang berbentuk gelombang sinusoidal dan $v_{triangle}$ adalah amplitudo sinyal segitiga.

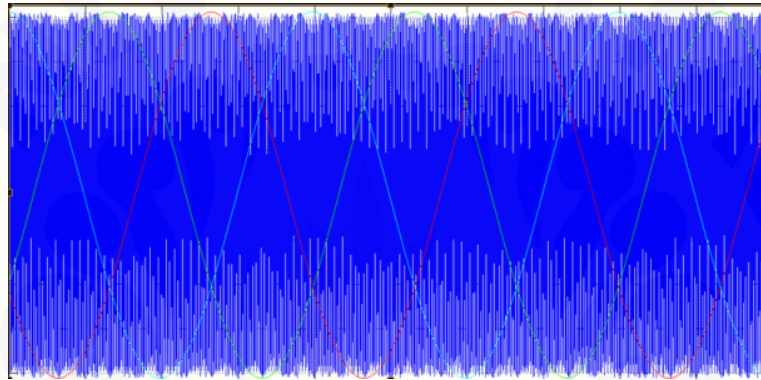
Sedangkan untuk nilai tegangan maksimum keluaran inverter ditentukan oleh persamaan berikut

$$V_{o,maks} = MxV_{DC} \quad (3.5)$$

Nilai tegangan DC yang masuk kedalam inverter bernilai 600 Volt sehingga untuk menghasilkan tegangan AC keluaran 380 volt rms maka indeks modulasi bernilai

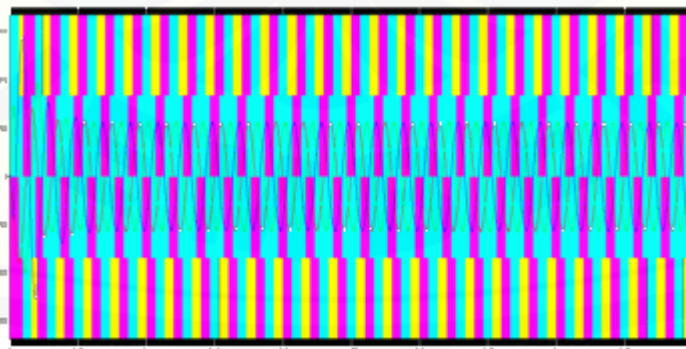
$$M = \frac{380\sqrt{3}}{600} = 1$$

Sesuai perhitungan dari persamaan 3.4, indeks modulasi yang bernilai 1 mengakibatkan nilai amplitudo sinyal referensi dan sinyal segitiga harus bernilai sama. Sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.4 Sinyal referensi dan sinyal segitiga dengan $M=1$

Kedua sinyal itu digunakan sebagai masukan komparator sehingga menghasilkan sinyal pulsa yang memiliki lebar berubah-ubah, pulsa itu mengikuti bentuk sinyal referensi yang berupa sinusoidal. Sinyal keluaran komparator inilah yang digunakan untuk mengendalikan kerja transistor IGBT pada inverter.



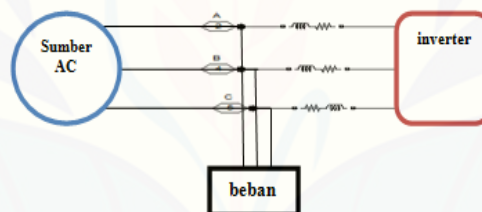
Gambar 3.5 Tegangan dan arus *output* inverter 3 fasa dengan beban seimbang

Dari gambar 3.5 dapat diketahui bahwa tegangan AC yang dihasilkan oleh SPWM inverter 3 fasa adalah tidak berbentuk murni *sinusoidal*, melainkan masih

berbentuk *squarewave* dengan frekuensi yang sangat tinggi. Dengan *tools* power GUI dapat diketahui bagaimana spektrum harmonisa dari gelombang tersebut dan berapa besar nilai THD-nya. Dengan besarnya nilai harmonisa yang ada pada inverter itu dibutuhkan filter harmonisa agar tegangan yang masuk ke beban dan jaringan tidak mengandung harmonisa.

3.2.3 Filter Inverter

Setelah rangkaian inverter digunakan filter pasif bertujuan untuk memfilter tegangan yang menuju beban agar tidak mengandung distorsi harmonisa frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh SPWM inverter. Dalam sistem ini filter pasif yang digunakan adalah filter RL (resistor dan induktor). Rangkaian filter RL ini diletakkan pada tiap fasa A, fasa B dan fasa C. Untuk rangkaian filter seperti yang ditunjukkan di gambar 3.6, induktor dan resistor dipasang seri dengan inverter dan rangkaian filter dipasang paralel dengan beban.



Gambar 3.6 Rangkaian filter RL

Penentuan parameter filter RL dapat dilakukan dengan memilih terlebih dahulu frekuensi yang akan dilewatkan. Tentunya dalam hal ini, frekuensi yang dilewatkan adalah frekuensi fundamental 50 Hz dan frekuensi di atas 50 Hz akan terfilter.

$$\begin{aligned} X_L &= \omega L \\ X_L &= R \\ R &= 2\pi fL \end{aligned} \quad (3.6)$$

f = frekuensi *cut off* (Hertz)

L = nilai induktor (Henry)

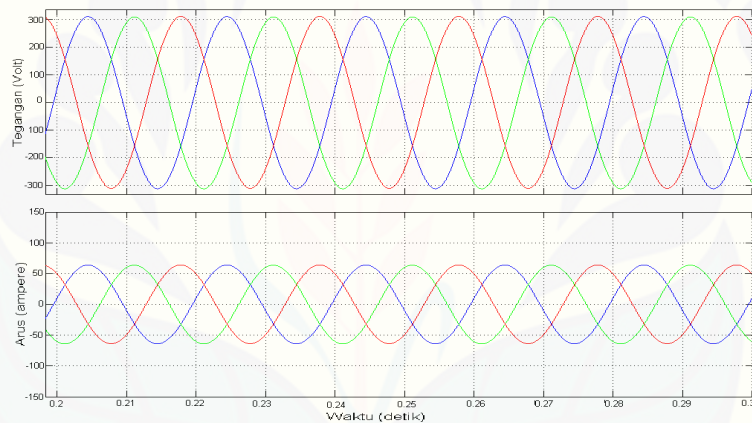
R = nilai resistor (Ohm)

Jika ditentukan nilai induktor (L) adalah 0.3 mH dan frekuensi *cut off* filter 50 Hz maka nilai resistor adalah

$$R = 2 \times 3,14 \times 50 \times 3 \times 10^{-4}$$

$$R = 0,1\Omega$$

Dengan parameter-parameter tersebut, inverter 3 fasa ini kemudian diparalel dengan beban dan sumber utama. Bentuk gelombang tegangan dan arus beban yang dihasilkan oleh filter ini akan berbentuk murni sinusoidal, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.7 dibawah ini. Nilai kandungan distorsi harmonisa arus dan tegangan akan lebih rendah dibanding harmonisa arus dan tegangan sebelum filter, dalam hal ini mendefinisikan bahwa distorsi harmonisa orde tinggi telah terfilter.



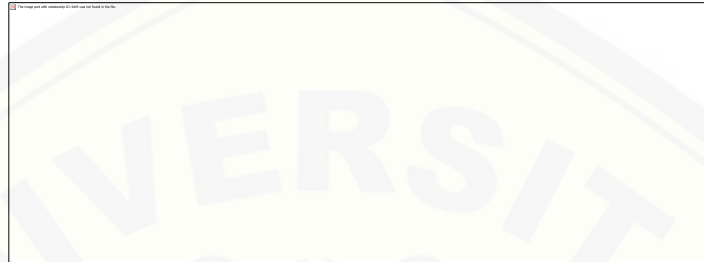
Gambar 3.7 Tegangan dan arus dengan beban seimbang dan linier

3.2.4 Beban Yang Diujikan

Pengendalian inverter ini akan diujikan untuk tiga macam kondisi beban. Kondisi beban yang pertama adalah beban nonlinier, yaitu rangkaian RL yang diparalel dengan *rectifier* 3 lengan dan beban *rectifier* berupa resistor dan kapasitor paralel. Kemudian kondisi beban yang kedua adalah beban RL tak seimbang dan pada beban ketiga menggunakan beban resistif yang seimbang.

3.2.4.1 Beban nonlinier

Pada pengujian kompensasi harmonisa digunakan beban nonlinier. Beban nonlinier yang digunakan pada sistem ini dapat ditunjukkan oleh gambar 3.8 berikut ini.



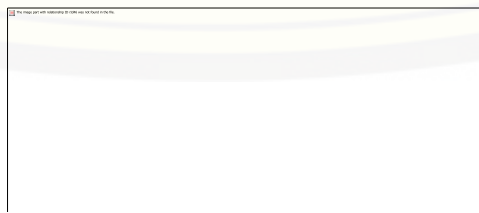
Gambar 3.8 Pemodelan beban nonlinier

Dari gambar 3.8 tersebut dapat dilihat bahwa terdapat rangkaian RL yang diparalel dengan rectifier 3 lengan dan pada sisi rectifier dibebani berupa resistor dan kapasitor yang diparalel. Dengan kondisi beban tersebut, maka akan menimbulkan distorsi harmonisa yaitu pada harmonisa orde ke-5, ke-7, ke-11, ke-13 dan seterusnya yang memenuhi persamaan $3k+1$, dimana k adalah bilangan integer.

Sedangkan harmonisa orde genap tidak muncul, karena bentuk gelombang yang dihasilkan adalah simetri, begitu juga dengan harmonisa orde kelipatan tiga karena ketiga fasa dapat dikatakan berada dalam kondisi dibebani secara bersamaan. Besarnya distorsi harmonisa yang muncul di setiap fasa pun relatif sama satu sama lain.

3.2.4.2 Beban induktif

Pada pengujian perbaikan faktor daya digunakan beban RL seri. Untuk nilai rangkaian tak seimbang dapat dilihat pada gambar 3.9 berikut ini.

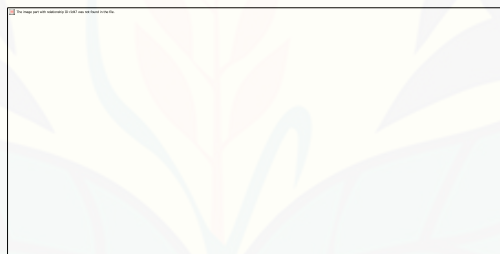


Gambar 3.9 Pemodelan beban induktif

Untuk sistem pengujian perbaikan faktor daya ini digunakan beban RL tak seimbang. Hal itu karena untuk mengetahui bahwa pada tiap fasa akan memiliki nilai faktor daya yang berbeda-beda. Dengan beban RL itu maka beda fasa pada tiap fasa tidak akan seimbang, sehingga dengan penggunaan pengendali inverter ini akan membuktikan bahwa beban yang tak seimbang pada jaringan akan menjadi seimbang dengan faktor daya yang hampir mencapai 1. Gambar 3.9 menunjukkan pemodelan beban tidak seimbang pada jaringan, sehingga arus pada jaringan akan menjadi *lagging* (mendahului tegangan).

3.2.4.3 Beban Resistif

Pada pengujian kerja dari pengendali inverter sebagai UPS digunakan pengujian beban menggunakan beban resistif dengan nilai tiap fasanya seimbang. Dimana beban seimbang pada sistem ini digunakan beban resistif sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.10 berikut ini



Gambar 3.10 Pemodelan beban seimbang

Pada gambar 3.10 dapat dilihat bahwa hubungan beban resistif adalah hubungan *wye*. Sehingga dalam perhitungan nilai tegangan pada beban ini adalah fasa ke ground. Dengan persamaan berikut

$$V_{maks} = V_{rms}\sqrt{2} \quad (3.7)$$

Dimana untuk nilai θ adalah sudut pada beban ke netral. Pada beban resistif yang terhubung *wye* memiliki nilai θ adalah 120° . Dan juga dengan penggunaan beban resistif ini membuktikan bahwa kualitas daya listrik yang dihasilkan oleh pengendali inverter saat terjadinya gangguan (*interruption*) memiliki kualitas yang baik sehingga dapat melindungi beban dari kerusakan akibat sistem kelistrikan.

3.3 Konfigurasi *Modified Synchronous Reference Frame* (MSRF)

Dalam sistem pengendalian inverter, digunakan MSRF untuk memudahkan proses pengendalian pada kontrol PI yang nantinya hasil kontrol akan masuk kedalam SPWM. MSRF merupakan proses mengkonversikan nilai tegangan dan arus yang semula dalam bentuk fasa abc akan diubah menjadi koordinat dq. Untuk konfigurasi MSRF dapat ditunjukkan oleh gambar 3.11 berikut ini.



Gambar 3.11 Strategi pengendali inverter dengan MSRF

Keterangan :

- i_a, i_b, i_c : Arus tiap-tiap fasa
- V_{AN}, V_{BN}, V_{CN} : Tegangan fasa ke netral
- $V_{dq,p}^*, V_{dq,n}^*, V_{dq,z}^*$: Tegangan referensi dengan koordinat dq
- $V_{dq,p}, V_{dq,n}, V_{dq,z}$: Tegangan hasil *sequence decomposition* dan transformasi komponen simetri koordinat abc ke koordinat dq untuk masing-masing urutan simetri
- $i_{dq,p}, i_{dq,n}, i_{dq,z}$: Arus hasil *sequence decomposition* dan transformasi komponen simetri koordinat abc ke koordinat dq untuk masing-masing urutan simetri
- V_{fa}, V_{fb}, V_{fc} : Tegangan abc hasil transformasi dq ke abc dan *sequence composition*

Berdasarkan gambar 3.11 dapat dijelaskan bahwa pada saat kondisi sumber utama normal atau dikatakan *normal mode*, tegangan V_{AN} , V_{BN} , dan V_{CN} serta arus i_a , i_b , dan i_c , yang merupakan hasil perhitungan jaringan sumber utama yang terhubung ke beban dan inverter. Masing-masing besaran didekomposisi ke dalam komponen urutan simetrinya yaitu komponen urutan positif, urutan negatif dan urutan nol (*zero*). Hal ini digunakan untuk mendeteksi keberadaan terjadinya distorsi harmonisan dan ketidakseimbangan beban dalam sistem. Sistem dikatakan seimbang apabila tegangan sistem hanya memiliki nilai pada komponen urutan positifnya. Dan juga sistem yang terjadi harmonisa akan diinjeksi oleh kontrol PI. Kontrol PI juga berfungsi untuk menjaga nilai tegangan sistem agar tetap sama atau mendekati nilai referensi. Tiap-tiap komponen simetri pada kedua regulator arus dan tegangan diubah ke dalam *synchronous reference frame* atau koordinat dq, menjadi v_{dq} , dan $v_{dq,z}$ serta $i_{dq,p}$, $i_{dq,n}$, dan $i_{dq,z}$.

3.3.1 Pemisahan Komponen Simetri

Tiga buah fasor yang tidak seimbang dari sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga sistem fasor yang seimbang. Himpunan seimbang komponen itu adalah:

1. Komponen urutan positif (*positive sequence component*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai fasa urutan yang sama seperti fasor aslinya.
2. Komponen urutan negatif (*negative sequence component*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai fasa urutan yang berlawanan dengan fasor aslinya.
3. Komponen urutan nol (*zero sequence component*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan penggeseran fasa 0 antara fasor yang satu dengan yang lain.

Jadi permasalahan ketidakseimbangan tegangan akibat pembebanan tidak seimbang akan dapat teratasi. Dengan memecah terlebih dahulu komponen utama ke komponen urutan positif, negatif dan nol, kemudian dilakukan mekanisme

kompensasi. Hal tersebut juga berlaku sebagai kompensator harmonisa dan faktor daya pada tiap fasanya.

Tegangan dan arus *output* perhitungan sisi jaringan utama didekomposisi ke dalam komponen urutan : positif, negatif dan nol. Masing-masing urutan ditransformasi ke dalam MSRF. Dengan menggunakan regulasi arus dan tegangan, sinyal dq dari hasil transformasi abc ke dq dikendalikan secara terpisah sesuai dengan komponen urutan simetrinya. Proses pengendalian ini dibagi menjadi 3 buah urutan yaitu urutan positif, negatif dan nol. Hasilnya kemudian di transformasi ke *abc reference frame* dan digunakan untuk membangkitkan sinyal modulasi untuk inverter menggunakan metode SPWM. Dalam penentuan nilai v_a , v_b dan v_c pada sistem digunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_a = v_{a(+)} + v_{a(-)} + v_{a(0)} \quad (3.8)$$

$$v_b = v_{b(+)} + v_{b(-)} + v_{b(0)} \quad (3.9)$$

$$v_c = v_{c(+)} + v_{c(-)} + v_{c(0)} \quad (3.10)$$

Pada representasi tegangan *output* inverter kedalam komponen simetri dapat diperlihatkan pada persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BC} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{AN,p} + V_{AN,n} + V_{AN,z} \\ V_{BN,p} + V_{BN,n} + V_{BN,z} \\ V_{CN,p} + V_{CN,n} + V_{CN,z} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Penentuan komponen urutan positif dan komponen urutan negatif. Untuk mempermudah mentransformasi abc ke dq digunakan 90° *phase shift operator*.

Sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_p(t) = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0,5 & -0,5 \\ -0,5 & 1 & -0,5 \\ -0,5 & -0,5 & 1 \end{bmatrix} X_1(t) - \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} X_2(t) \quad (3.12)$$

$$V_p(t) = \begin{bmatrix} v_{a(+)} \\ v_{b(+)} \\ v_{c(+)} \end{bmatrix} X_1(t) = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} X_2(t) = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

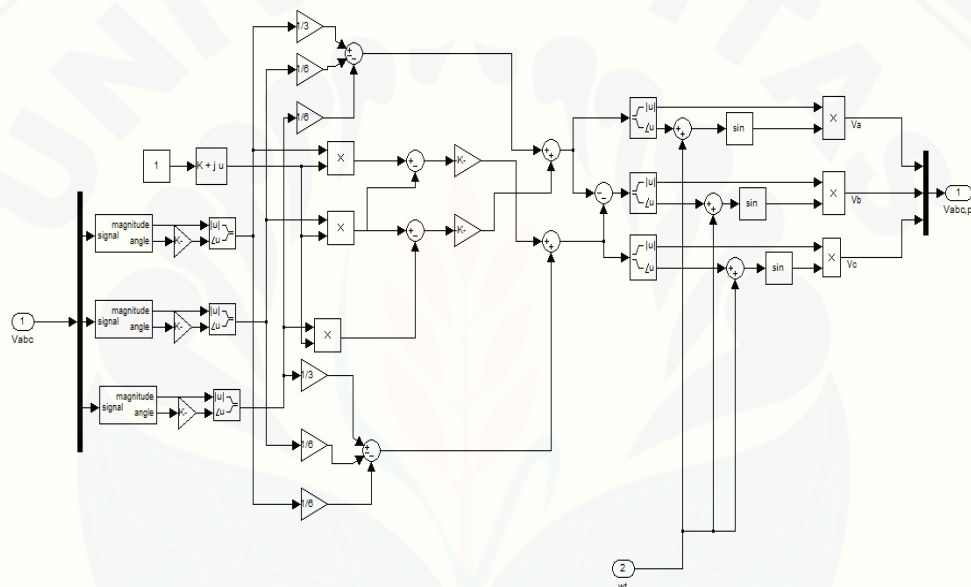
$$V_n(t) = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0,5 & -0,5 \\ -0,5 & 1 & -0,5 \\ -0,5 & -0,5 & 1 \end{bmatrix} X_1(t) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} X_2(t) \quad (3.13)$$

$$V_n(t) = \begin{bmatrix} v_{a(-)} \\ v_{b(-)} \\ v_{c(-)} \end{bmatrix} X_1(t) = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} X_2(t) = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

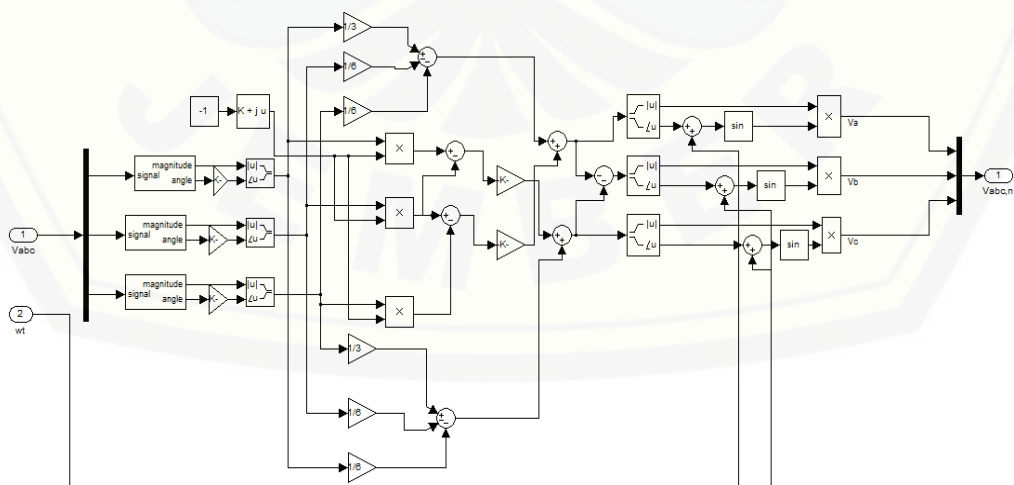
Dengan,

- $X_1(t)$ = sinyal input fundamental
- $X_2(t)$ = sinyal input fundamental yang digeser 90°

Dengan persamaan 3.12 dan 3.13 dapat dijadikan diagram blok pada MATLAB untuk mengurutkan komponen simetrinya. Sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.12 dan 3.13 berikut ini yang merupakan blok urutan pada nilai tegangan. Pada persamaan tersebut apabila variabel v diganti dengan variabel i , maka persamaan itu berlaku untuk nilai arus.



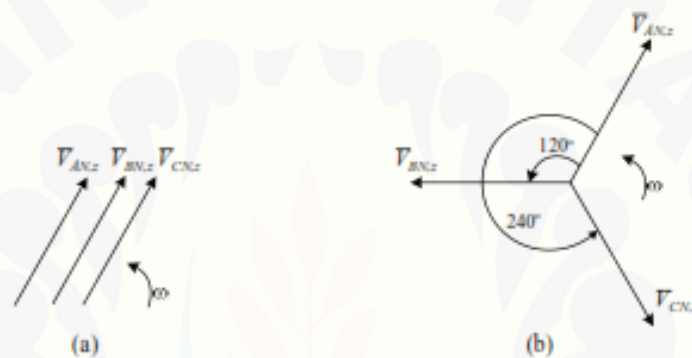
Gambar 3.12 Pemodelan blok tegangan urutan positif fundamental



Gambar 3.13 Pemodelan blok tegangan urutan negatif fundamental

3.3.1.1 Sequence Decomposition dan Transformasi abc ke dq

Pada urutan zero, ketiga komponen adalah identik, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.14 (a). Komponen urutan ini tidak dapat langsung ditransformasikan ke MSRF karena phasornya memiliki fasa dan amplitudo yang sama. Ketiga komponen pada urutan nol adalah independen dari sudut pandang amplitudonya (Fortescue CL, AIEETrans 1918). Dengan demikian dimungkinkan untuk melakukan pergeseran ruang sebesar 120° dan 240° pada phasor urutan zero, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.14 (b) berikut ini.

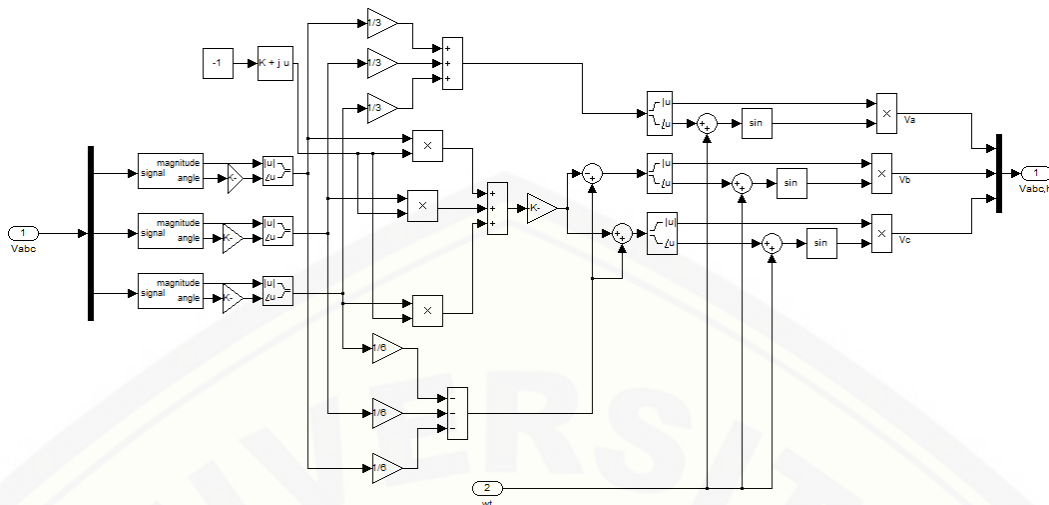


Gambar 3.14 Phasor komponen urutan zero

Sehingga phasor ini memiliki putaran yang searah dengan putaran komponen urutan negatif dan nilai urutan zeronya menjadi persamaan 3.14 berikut ini:

$$V_z(t) = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -0,5 & -0,5 & -0,5 \\ -0,5 & -0,5 & -0,5 \end{bmatrix} X_1(t) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} X_2(t) \quad (3.14)$$

Dengan persamaan 3.14 tersebut maka dapat dibuat blok *sequence decomposition zero* dalam MATLAB sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.15 berikut:

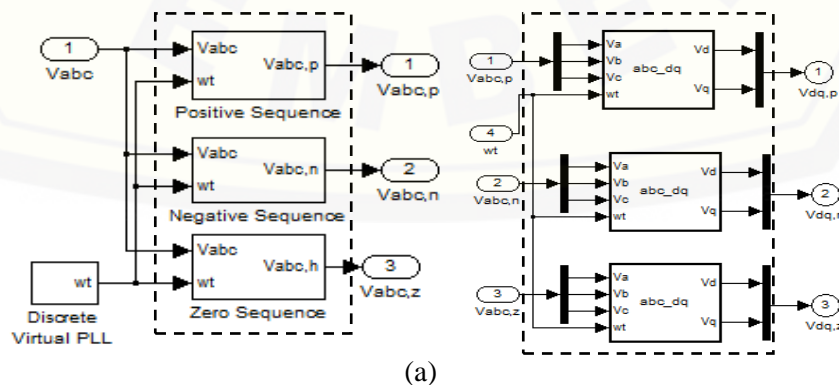


Gambar 3.15 Pemodelan blok tegangan urutan nol fundamental

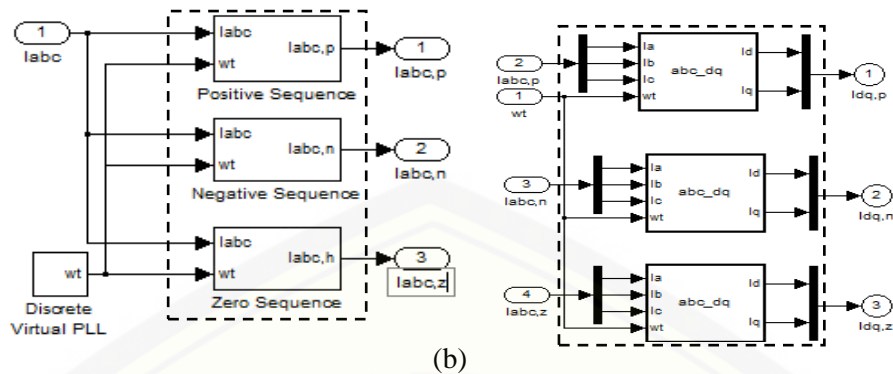
Hasil dekomposisi tegangan dan arus *output* inverter ke dalam komponen simetri ditransformasi ke MSRF yang berputar pada frekuensi fundamental. *Reference Frame* positif berputar berlawanan arah dengan arah jarum jam, sedangkan pada *reference frame* negatif putarannya searah jarum jam. Agar dapat ditransformasikan dari abc ke dalam dq digunakan persamaan (3.15) berikut ini (P Kundur, 1994):

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Semua persamaan yang digunakan dalam mentransformasikan abc ke dq itu diubah dengan variabel *i*, maka persamaan itu dapat berlaku untuk arus. Dengan persamaan-persamaan itu, blok *sequence decomposition* dan transformasi abc ke dq ditunjukkan oleh gambar 3.16. Dimana dari blok ini berlaku untuk nilai arus ataupun tegangan.



(a)



Gambar 3.16 Blok *sequence decomposition* dan transformasi abc ke dq (a) untuk nilai tegangan (b) untuk nilai arus

Blok pemodelan transformasi abc ke dq merupakan fungsi matematis yang ditulis dalam *embedded MATLAB editor*. Fungsi pada blok *sequence decomposition* adalah sebagai berikut:

```
function [Vd,Vq] = abc_dq(Va,Vb,Vc,wt)

Vd= 2/3*(Va*sin(wt)+ Vb*sin(wt-(2*pi/3))+ Vc*sin(wt+(2*pi/3)));
Vq= 2/3*(Va*cos(wt)+ Vb*cos(wt-(2*pi/3))+ Vc*cos(wt+(2*pi/3)));
```

Pada blok *sequence decomposition* diatas merupakan blok urutan positif, sedangkan pada urutan negatif dan nol yang membedakan adalah pada nilai ωt . Untuk urutan positif ωt bernilai positif sedangkan untuk urutan negatif ωt bernilai negatif. Dari ketiga blok tersebut didasarkan pada persamaan 3.12, 3.13 dan 3.14.

3.3.1.2 Transformasi dq ke abc dan *Sequence Composition*

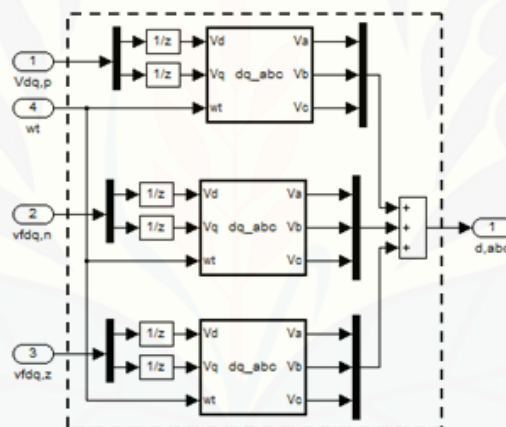
Untuk proses pengembalian tegangan maupun arus dari koordinat dq ke koordinat abc, digunakan persamaan matrik seperti pada persamaan 3.16 berikut. Persamaan ini merupakan invers dari persamaan 3.15 (P Kundur, 1994) :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Dengan persamaan 3.16 tersebut maka ditulis kedalam *embedded MATLAB editor* untuk digunakan pada blok transformasi dq ke abc dan *sequence decomposition*. Sebagaimana yang ditunjukkan pada *embedded MATLAB* berikut:

```
function [Va,Vb,Vc] = dq_abc(Vd,Vq,wt)
Va= Vd*sin(wt) + Vq*cos(wt);
Vb= Vd*sin(wt-2*pi/3)+Vq*cos(wt-2*pi/3);
Vc= Vd*sin(wt+2*pi/3)+Vq*cos(wt+2*pi/3);
```

Persamaan ini digunakan untuk transformasi dq ke abc pada urutan positif. Sedangkan pada urutan negatif yang membedakan adalah pada nilai ωt memiliki nilai negatif. Dengan persamaan yang dibuat pada *embedded* itu maka ditransformasikan kedalam blok untuk menghasilkan nilai tegangan dalam koordinat abc, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.17. Hasil transformasi dari blok transformasi dq ke abc yang masih berupa komponen urutan simetri, kemudian disusun ulang (*sequence composition*) ke dalam komponen tiga fasanya.



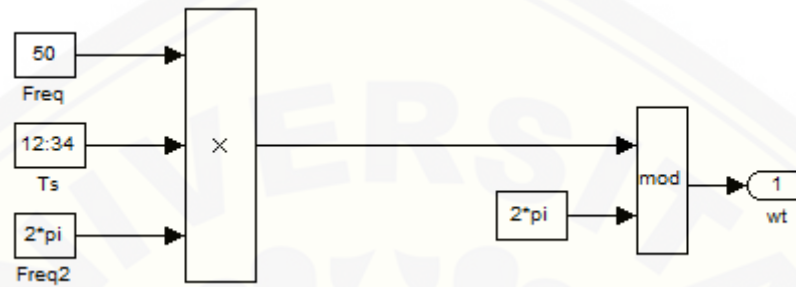
Gambar 3.17 Blok transformasi dq ke abc dan *sequence composition*

3.3.2 Phase Locked Loop (PLL)

Phase Locked Loop (PLL) adalah suatu sistem kendali umpan balik negatif. PLL secara otomatis akan menyesuaikan fasa sinyal yang dibangkitkan disisi *output* dengan suatu sinyal dari luar disisi inputnya. Dengan kata lain, PLL akan menghasilkan sinyal *output* dengan frekuensi yang sama dengan sinyal input. Pada bidang elektronika daya, PLL dipakai untuk sinkronisasi antara pengendali inverter dengan sumber utama atau *grid*.

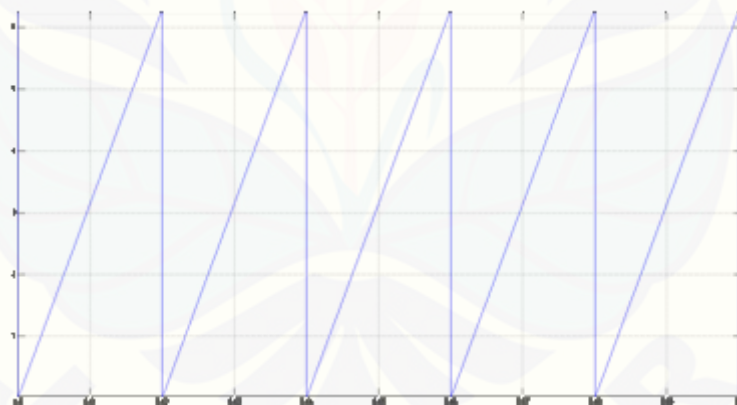
Dalam simulasi ini digunakan PLL tiga fasa. Blok PLL tiga fasa ditunjukkan pada gambar 3.18, digunakan untuk mensinkronisasikan sudut fasa

sumber utama (*grid*) dengan sinyal abc yang digunakan sebagai SPWM untuk memodulasi inverter. Input PLL tiga fasa adalah tegangan sumber utama dan *output* adalah sudut fasa ωt . Sudut fasa ωt diperlukan saat melakukan transformasi abc ke dq dan sebaliknya.



Gambar 3.18 Blok *phase locked loop* tiga fasa

Output blok PLL diperlihatkan pada gambar 3.19 berdasarkan pada gambar ini, sudut fasa ωt mengalami pergeseran nilai sebesar 0,001 detik pada tiap kelipatan 0,02 detik.



Gambar 3.19 Keluaran *phase locked loop* tiga fasa

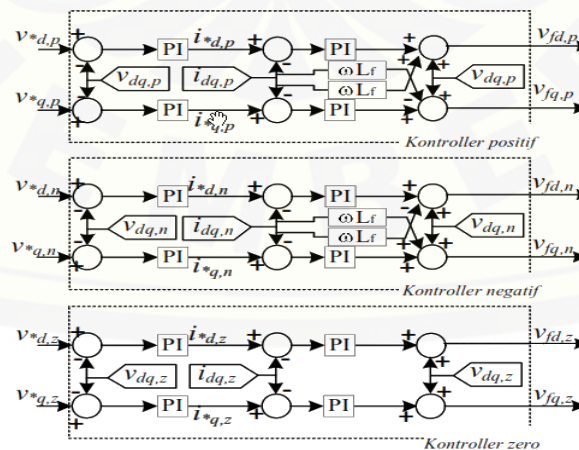
3.4 Desain Kontroller PI

Untuk mendapatkan respon yang tepat dan cepat diperlukan *error* kompensator yang dalam hal ini dipilih kontroler Proporsional Integral (PI). *Error* dihasilkan dengan membandingkan tegangan referensi yang dalam hal ini adalah nilai *virtual dq* dengan tegangan dan arus hasil pengukuran (*actual*). Kontrol akan mengolah selisih perbedaan tegangan menjadi besaran yang digunakan untuk

kompensasi agar tegangan menjadi normal kembali. Dalam regulasi tegangan yang berbasis pada MSRF, kontroler PI bekerja dalam koordinat nilai dq, sehingga dirasa karena lebih konstan maka akan dapat memberikan kompensasi *error* lebih mudah dan cepat daripada jika kontroler PI bekerja dalam koordinat nilai abc.

Kontroler ini mempunyai dua konstanta, yaitu Kp (konstanta proposional) dan Ki (konstanta integral). Kp dan Ki dituning sampai mencapai respon yang dikehendaki. Dengan pengaturan Kp dan Ki yang sesuai maka didapatkan respon yang sesuai. Dalam penentuan besarnya gain Kp dan Ki digunakan metode *trial error*. Agar nilai keluaran kontroler tidak terus menerus menghasilkan nilai, maka dipasang limiter pada keluaran kontroler PI. Untuk blok diagram kontroler PI pada pemodelan di software MATLAB dapat ditunjukkan pada gambar 3.20. Blok diagram ini mempunyai input tegangan referensi, tegangan dan arus hasil pengukuran.

Blok kontrol ini meliki tiga buah channel atau saluran, yaitu saluran positif, negatif dan zero, masing-masing untuk mengendalikan komponen urutan positif, negatif dan zero secara terpisah pada koordinat dq. Nilai referensi tegangan $v_{q,p}^*$, $v_{d,n}^*$, $v_{q,n}^*$, $v_{d,z}^*$, dan $v_{q,z}^*$ bernilai nol, sedangkan $v_{d,q}^*$ bernilai sama dengan v_{max} tegangan sumber utama (*grid*). Hal ini mengingatkan bahwa sistem dalam keadaan seimbang dan sinkron jika hanya memiliki nilai komponen urutan positif.



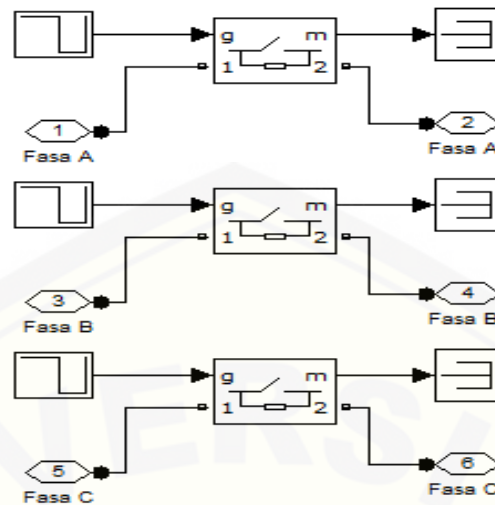
Gambar 2.20 Blok diagram kontroler PI (sumber: Kurnia, Setiawan Dedy, 2010)

Selain menjaga agar nilai tegangan yang terukur sama atau mendekati nilai tegangan referensi, kontrol PI juga mengkonversikan besaran tegangan menjadi arus. Sehingga saat nilai tegangan sistem sudah sama atau mendekati nilai referensinya, maka arus pada keadaan ini menjadi arus referensi sistem. Arus *output* PI pertama $i_{d,p}^*$, $i_{q,p}^*$, $i_{d,n}^*$, $i_{d,z}^*$, dan $i_{q,z}^*$, merupakan arus referensi bagi blok PI yang kedua. Dengan demikian pada saat tegangan sistem dalam keadaan seimbang dan sinkron terhadap *grid*, maka arus sumber utama (*grid*) yang masuk kedalam beban juga dalam keadaan seimbang dan sinkron dengan memiliki harmonisa yang kecil dan nilai faktor daya yang lebih baik.

3.5 Pemodelan Gangguan (*Interruption*) Pada Sumber Utama

Interruption adalah penurunan tegangan suplai atau tegangan beban yang mencapai kurang dari 0,1 pu selama kurun waktu kurang dari satu menit. *Interruption* dapat disebabkan oleh gangguan hubung singkat, kegagalan peralatan, dan kesalahan dalam pengontrolan. *Interruption* diukur ketika magnitude tegangan kurang dari 10% dari tegangan nominal. Lama waktu terjadinya *interruption* tergantung lamanya gangguan pada sistem sampai alat proteksi bekerja.

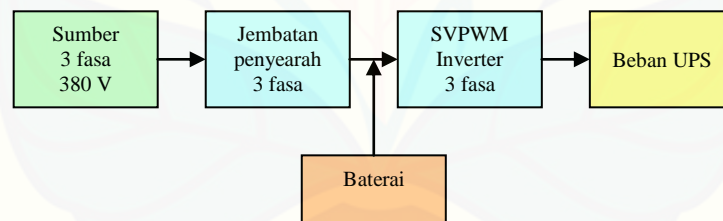
Untuk mensimulasikan *interruption*, maka sumber utama yang sebelumnya mampu menyuplai tenaga listrik secara kontinyu ke beban, dalam hal ini diasumsikan pada rentang waktu tertentu tidak mampu memberikan suplai ke beban, atau dengan kata lain pada rentang waktu tersebut suplai listrik terputus. Dengan adanya gangguan tersebut, maka apabila dalam suatu sistem diasumsikan tidak menggunakan peralatan UPS sebagai pengganti suplai listrik sementara saat sumber utama mengalami gangguan, maka tegangan di sisi beban akan turun dan tidak terdapat aliran listrik kedalam beban. Pemodelan penyebab terjadinya gangguan *interruption* adalah dengan menggunakan komponen *switch ideal* pada setiap fasanya, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.21.



Gambar 3.21 Pemodelan gangguan (*interruption*) pada sumber utama

Dengan melakukan pemodelan terjadinya gangguan *interruption* dalam rentang waktu 0,075 detik hingga 0,125 detik atau dapat dianggap 2,5 siklus (*cycle*), maka tidak akan ada suplai daya listrik yang mengalir dari sumber utama yang masuk kedalam beban.

3.6 Sistem *Online UPS* 3 Fasa



Gambar 3.22 Konfigurasi awal sistem *online UPS* 3 fasa

Model sistem kelistrikan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah sistem *online UPS* tiga fasa. Konfigurasi yang dibahas dalam bagian awal ini adalah konfigurasi *online UPS* tiga fasa tanpa regulator tegangan, sebagaimana diagram yang ditunjukkan pada gambar 3.22, dimana tidak terdapat *feedback* yang digunakan untuk mengontrol tegangan. Sistem terdiri beberapa komponen utama, antara lain adalah sebuah sumber tiga fasa yang terhubung *wye-grounded*, penyearah jembatan tiga fasa, baterai, inverter tiga fasa, kemudian dibebani dengan beban UPS. Sistem *online UPS* disebut juga dengan sistem UPS *double conversion*, dimana terjadi dua proses konversi energi, yakni *rectifier* mengubah

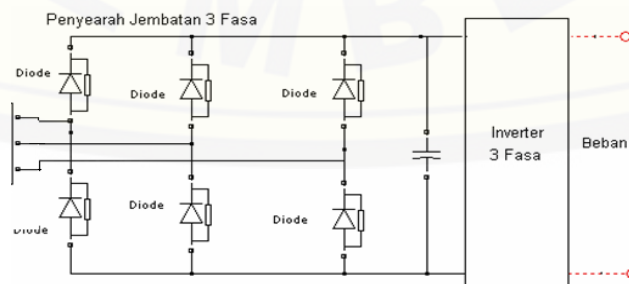
tegangan AC menjadi DC, dan *inverter* menghasilkan tegangan AC dari tegangan DC dari keluaran rectifier ataupun baterai. Dalam kondisi sumber utama normal, atau dikatakan mode *normal*, maka tegangan AC dari sumber utama disearahkan oleh rectifier, kemudian dirubah kembali menjadi tegangan AC oleh inverter.

Sedangkan apabila terjadi gangguan pada suplai utama (PLN), atau dengan kata lain dalam mode *back-up*, baterai yang *standby* akan secara langsung menggantikan peran sumber utama untuk menyuplai beban. Dengan konfigurasi seperti ini, *Online UPS* tidak membutuhkan *switch* untuk merubah mode operasi seperti pada sistem *offline UPS*, sehingga tidak ada waktu tunda perubahan mode normal menjadi *mode back up* saat terjadi gangguan pada suplai utama. Hal ini berarti pula bahwa UPS akan memberikan proteksi maksimum pada beban.

Selain bahwa komponen penyusun UPS memungkinkan menjadi penyebab timbulnya harmonisa, peningkatan penggunaan beban non linier di masa sekarang ini juga akan mengakibatkan semakin tingginya nilai distorsi harmonisa. Selain itu, beban tak seimbang juga mengakibatkan permasalahan ketidakseimbangan tegangan. Sehingga dengan kata lain, untuk mendapatkan kualitas daya listrik yang baik maka perlu dilakukan perancangan terperinci termasuk tentang bagaimana mekanisme regulasi tegangannya agar dapat memastikan bahwa kualitas daya listrik yang masuk ke beban adalah baik.

3.6.1 Rangkaian Penyearah Jembatan 3 Fasa

Pada sistem *online UPS* 3 fasa ini digunakan rangkaian penyearah berupa rangkaian penyearah jembatan 3 fasa dimana di dalamnya digunakan 6 buah dioda, sebagaimana pada gambar 3.24.

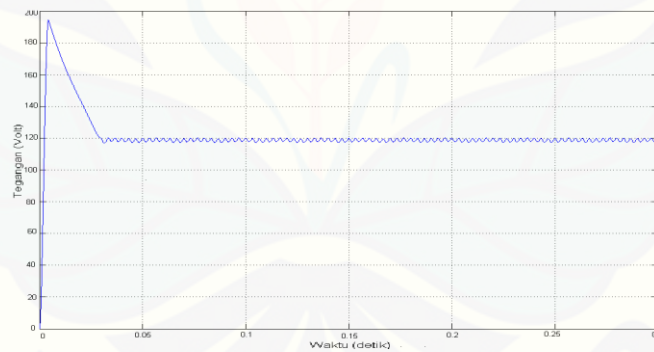


Gambar 3.23 Pemodelan rangkaian penyearah jembatan 3 fasa

Sumber utama 3 fasa menyuplai tegangan sebesar 380 V *line-to-line*, namun karena tegangan yang diijinkan pada DC *Link* adalah sekitar 504 V, maka dilakukan proses pengubah tegangan menjadi searah. Dengan menggunakan persamaan 2.13, maka akan dapat diperoleh nilai rms tegangan output dari rangkaian penyearah jembatan 3 fasa sebesar 514 V, sebagaimana perhitungan berikut

$$\begin{aligned} V_{dc} &= 1.654V_m \\ &= 1.654x \frac{380}{\sqrt{3}} x \sqrt{2} \\ &= 514V \end{aligned}$$

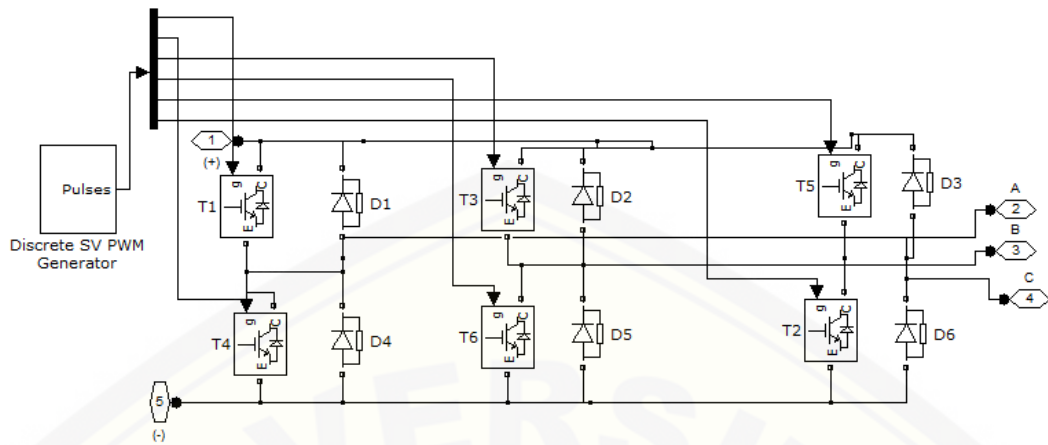
Untuk meminimalisir besarnya ripple tegangan output dari penyearah tersebut, maka digunakan *smoothing capacitor* dengan kapasitas 120mF. Dengan pemasangan kapasitor ini maka ripple tegangan mampu direduksi hingga mencapai sekitar 2 V peak to peak, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.24 dimana saat sistem diuji dengan diberi beban linier dan seimbang.



Gambar 3.24 Tegangan output penyearah jembatan 3 fasa

3.6.2 Rangkaian Inverter *Online UPS* 3 Fasa

Inverter 3 fasa yang digunakan di pemodelan sistem UPS ini menggunakan enam buah *switch*, sebagaimana ditunjukkan gambar 3.25. Pada pengoperasiannya, *switch* yang berada dalam satu line seperti d_1 dan d_2 harus bekerja berkebalikan, agar tidak terjadi *short circuit* yang dapat merusak *switch device*. Dalam hal ini tiap *switch* diaktifkan dengan sinyal pulsa yang dihasilkan rangkaian sinusoidal SVPWM 3 fasa.



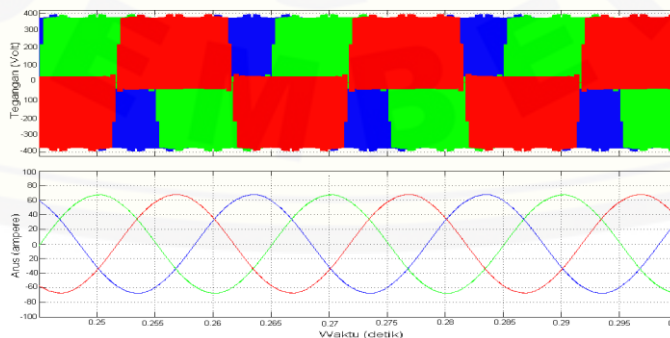
Gambar 3.25 Pemodelan rangkaian inverter 3 fasa

Tegangan DC yang dijadikan sebagai input dari inverter 3 fasa diperoleh dari penyearahan tegangan AC dari suplai utama menggunakan penyearah jembatan 3 fasa. Besarnya tegangan di *DC Link* adalah 500 V. Dengan menggunakan persamaan 2.42 dapat diperoleh besarnya tegangan rms *line to netral*

$$V_{ph_rms} = 0,4714 \times 500 = 235,7V$$

$$V_{peak} = 235,7 \times \sqrt{2} = 333V$$

Besarnya nilai tegangan output ini harus memiliki nilai phase to netral sebesar 333 Volt. Penentuan parameter nilai baterai tersebut juga dengan pertimbangan terhadap terjadinya drop tegangan pada filter inverter sebelum disalurkan ke beban. Pada gambar 3.26 menunjukkan tegangan dan arus output inverter 3 fasa dengan beban berupa penyearah satu fasa yang seimbang di setiap fasanya.

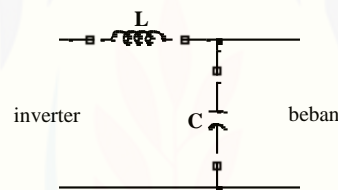


Gambar 3.26 Tegangan dan arus output inverter 3 fasa dengan beban seimbang

Dari gambar 3.26 dapat diketahui bahwa tegangan AC yang dihasilkan oleh SPWM inverter 3 fasa adalah tidak berbentuk murni sinusoidal, melainkan masih berbentuk *squarewave* dengan frekuensi yang sangat tinggi.

3.6.3 Filter Inverter *Online UPS*

Tujuan dipasangnya filter inverter adalah untuk memfilter tegangan yang menuju beban agar tidak mengandung distorsi harmonisa frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh SVPWM inverter. Filter yang biasa digunakan adalah filter LC (induktor dan kapasitor). Rangkaian filter LC ini di setiap fasa seperti yang ditunjukkan di gambar 3.27, induktor dipasang seri dengan *inverter* dan kapasitor dipasang paralel dengan beban.



Gambar 3.27 Rangkaian filter LC

Penentuan parameter filter LC dapat dilakukan dengan memilih terlebih dahulu frekuensi yang akan dilewatkan. Tentunya dalam hal ini, frekuensi yang dilewatkan adalah frekuensi fundamental 50 Hz dan frekuensi di atas 50 Hz akan terfilter.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (3.17)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

$$2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f = frekuensi *cut off* (Hertz),

L = nilai induktor (Henry) dan

C = nilai kapasitor (Farad)

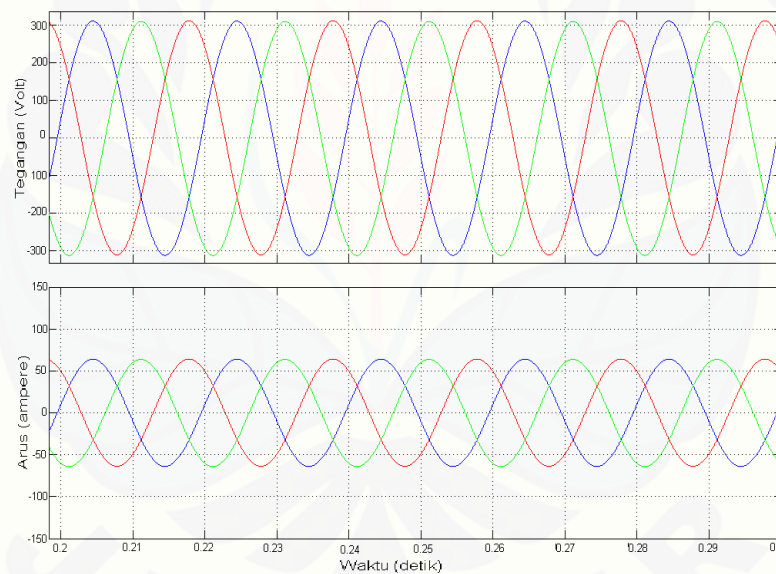
Jika ditentukan nilai induktor (L) adalah 5 mH dan frekuensi *cut off* filter 150 Hz maka nilai kapasitor (C) adalah

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \quad (3.18)$$

$$C = \frac{1}{(2 \times 3.14 \times 150)^2 \times 5 \times 10^{-3}} \quad (3.19)$$

$$C = 0.22 \text{ mF}$$

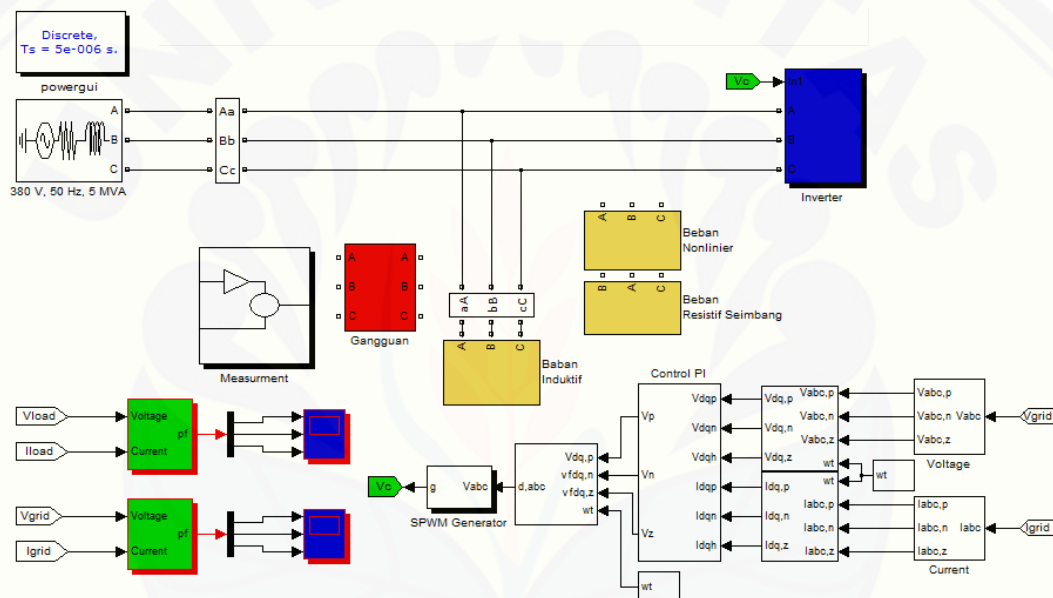
Dengan parameter-parameter tersebut, sistem *Online UPS* 3 fasa ini kemudian diujikan dengan beban yang seimbang. Bentuk gelombang tegangan dan arus beban yang dihasilkan dari pengujian ini adalah berbentuk murni sinusoidal, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.28. Level tegangan di sisi beban juga berada dalam batas normal yakni seimbang sebesar 220 V *rms line to neutral* atau 380 V *rms line to line*.



Gambar 3.28 Tegangan dan arus disisi beban dengan beban seimbang

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas hasil yang diperoleh dari simulasi dan dilakukan proses analisis. Simulasi dikerjakan menggunakan simulink dan *simpower blocket* dari program MATLAB 7.8.0 (2009a). Untuk memperoleh hasil yang baik digunakan *time sampling* 5×10^{-6} detik. Rangkaian simulasi dilakukan pada sistem inverter MSRF yang telah dibuat dapat ditunjukkan gambar 4.1 berikut ini.



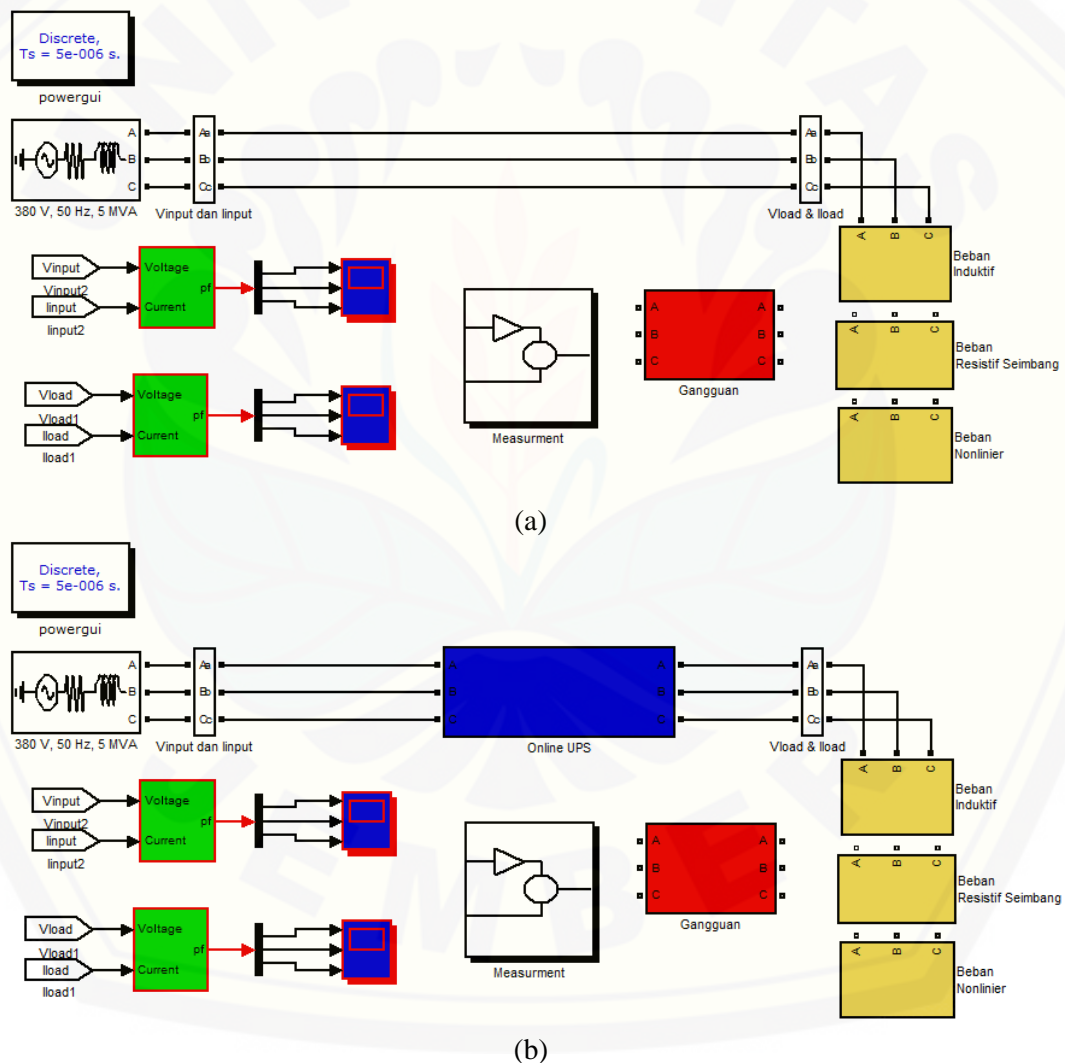
Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi Sistem pengendali inverter dengan MSRF

Gambar tersebut merupakan rangkaian sistem pengendali inverter dengan menggunakan metode MSRF, dimana rangkaian sistem itu mengacu pada penjelasan dari bab 3. Dengan rangkaian sistem tersebut digunakan untuk menguji semua kondisi beban. Untuk jenis beban yang diujikan terdapat tiga macam, yaitu:

1. beban nonlinier berupa *rectifier* tiga lengan digunakan untuk menguji sistem sebagai kompensator harmonisa
2. beban induktif digunakan untuk menguji sistem sebagai kompensator faktor daya

3. beban resistif yang seimbang digunakan untuk menguji sistem sebagai UPS. Saat sistem digunakan sebagai UPS maka dalam sumber utama terdapat gangguan seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.8.

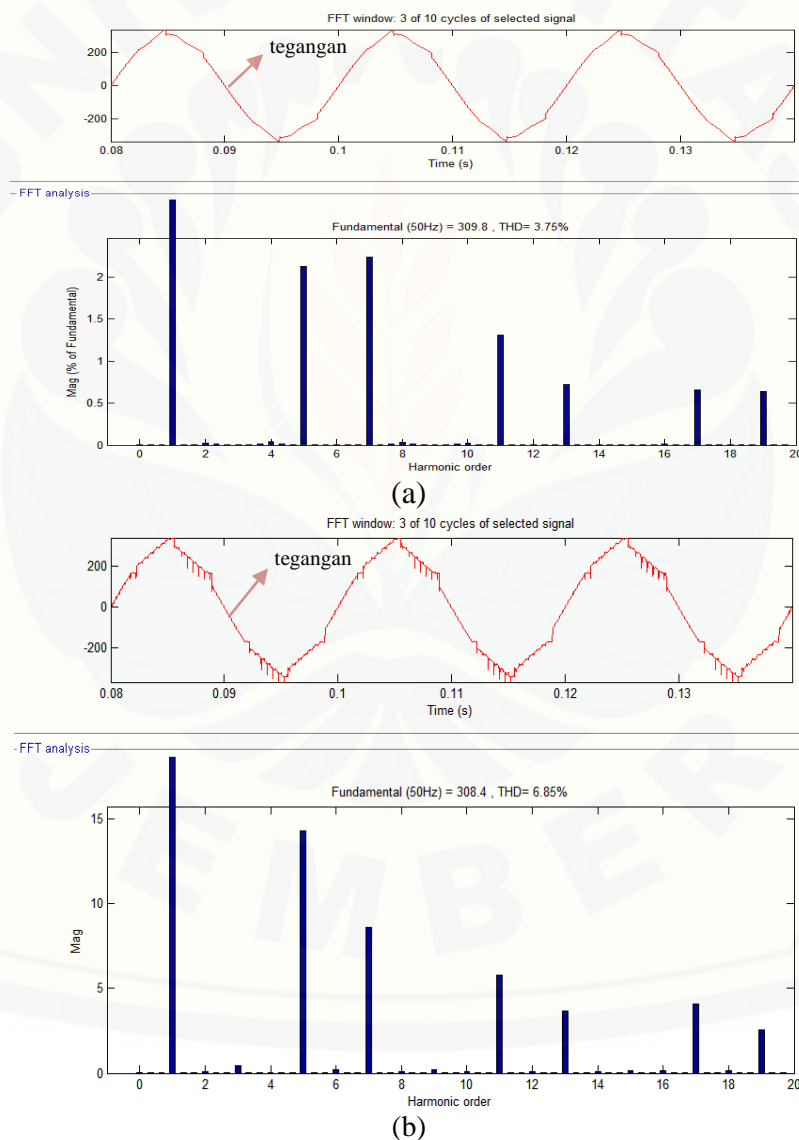
Sebagai pembanding performansi sistem pengendali inverter menggunakan MSRF pada kondisi beban tersebut. Maka telah dibuat sistem tanpa menggunakan pengendali dan sistem dengan *online UPS* dengan SVPWM generator (Sankalp, 2012) sebagai pembandingnya. Sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.2 berikut.

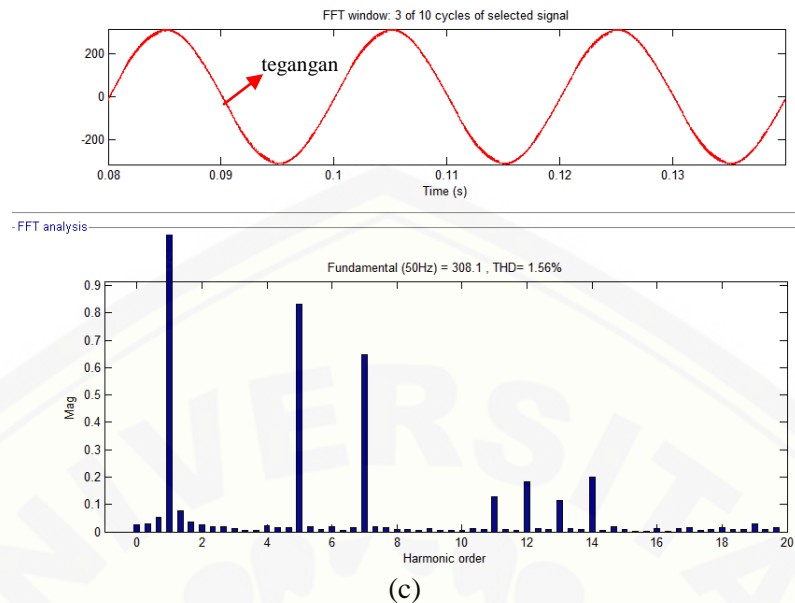


Gambar 4.2 Ragkaian Simulasi Sistem (a) tanpa pengendali (b) *online UPS*

4.1 Simulasi Sebagai Kompensator Arus Harmonisa

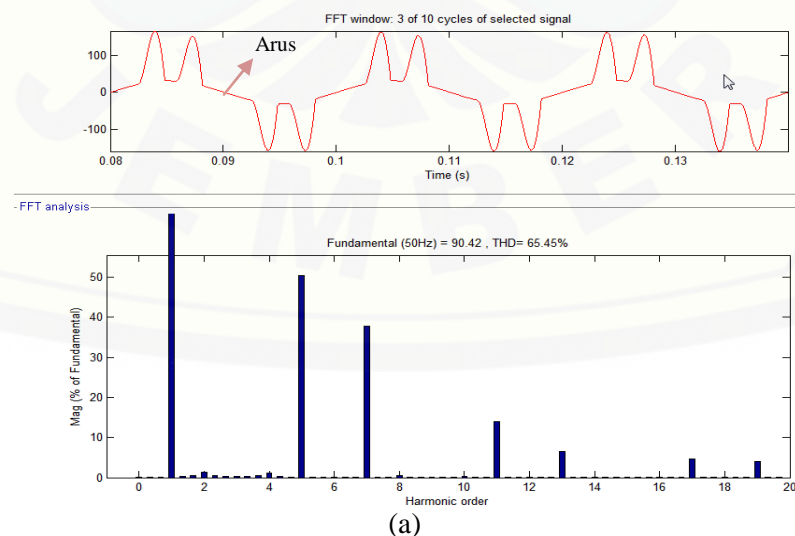
Simulasi sistem sebagai kompensator harmonisa dilakukan untuk mengetahui performansi sistem pada saat kondisi beban adalah nonlinier. Beban nonlinier yang digunakan mengacu pada penjelasan bab 3. Penentuan nilai harmonisa yang layak digunakan pada sistem mengacu pada standart IEEE Std. 519-1992, melalui persamaan 2.40. Pengujian dilakukan pada arus yang terdistorsi harmonisa bukan tegangannya. Karena distorsi harmonisa pada tegangan memiliki nilai yang kecil. Sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.3 berikut ini.

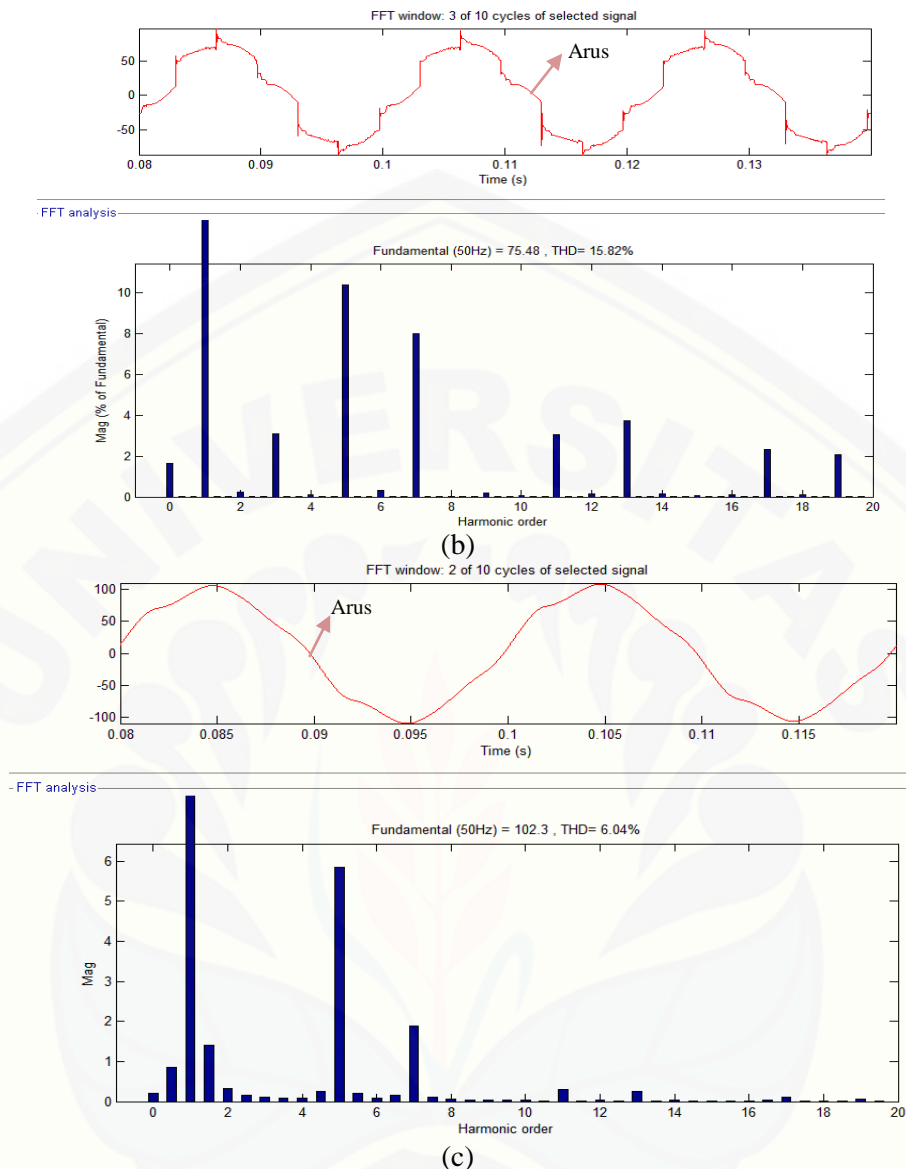




Gambar 4.3 Hasil simulasi kompensator tegangan harmonisa (a) tanpa kompensasi, (b) *online UPS*, (c) pengendali inverter dengan MSRF

Pada gambar 4.3 tersebut telah diperoleh bahwa nilai tegangan harmonisa pada sisi jaringan telah memiliki nilai yang kecil. Karena beban nonlinier tidak begitu pengaruh terhadap besarnya pada tegangan harmonisa. Besarnya harmonisa tegangan pada sistem awal yaitu orde ke 5 dan 7 dengan besar THD 3.75%., dengan *online UPS* didapatkan nilai THD 6.85%. Sedangkan dengan menggunakan inverter MSRF THD mencapai nilai 1.56%. Pada hasil pengujian pada setiap sistem diperoleh perbedaan nilai arus harmonisa yang mengalir disisi beban ditunjukkan oleh gambar 4.4 berikut ini





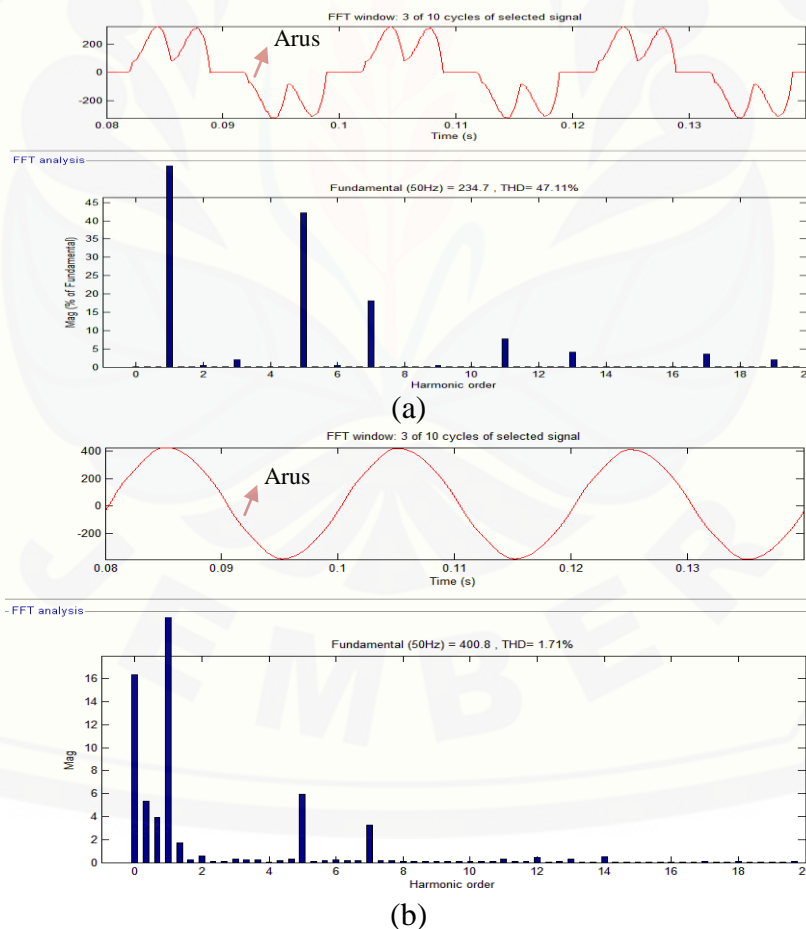
Gambar 4.4 Hasil simulasi kompensator arus harmonisa pada sisi beban (a) tanpa kompensasi, (b) *online UPS*, (c) pengendali inverter dengan MSRF

Pada gambar 4.4 (a) menunjukkan bahwa arus sumber yang masuk ke beban. Pada standart IEEE Std. 519-1992 nilai arus beban ≥ 100 A limit distorsi harmonisanya adalah 12%-15%. Pada simulasi sistem fasa A yang semula sinusoidal menjadi tidak sinusoidal. Hal itu diakibatkan karena adanya arus harmonisa yang disebabkan oleh beban nonlinier. Dengan menggunakan powergui pada software MATLAB 7.8.0 maka dapat diketahui dari spektrum frekuensinya. Diperoleh frekuensi fundamental 90.42 *peak* dan *highest harmonics* pada urutan (*orders*) ke 5, 7 dan 11 dengan nilai harmonisa secara berturut-turut yaitu 50.32%,

37.88%, dan 14.01%. Sehingga dapat diketahui harmonisa terbesar pada frekuensi harmonisa ke-5 sebesar 50.32% dan nilai THD sebesar 65.45%.

Pada hasil simulasi kompensasi harmonisa yang ditunjukkan oleh gambar 4.4 (b) dengan menggunakan *online UPS* terlihat bahwa gelombang arus dari fasa A yang dihasilkan menjadi hampir sinusoidal, yaitu pada orde ke 5 dapat ditekan sampai 11.58% dengan THD 15.82%. Berbeda dengan dengan menggunakan inverter MSRF yang ditunjukkan pada gambar 4.3 (c) bentuk gelombang arus dari sisi beban menjadi sinusoidal, dengan arus harmonisa tertinggi yaitu sebesar 5.78% dan THD sebesar 6.04%.

Dengan penggunaan sistem yang sama yaitu *online UPS* dan pengendali inverter MSRF arus harmonisa yang ada pada sisi jaringan sumber utama diperoleh bentuk gelombang seperti pada gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4.5 Hasil simulasi kompensator arus harmonisa pada sisi jaringan (a) *online UPS*, (b) Pengendali inverter dengan MSRF

Pada gambar 4.5 (a) diperoleh hasil bahwa distorsi arus harmonisa pada fasa A yang terjadi disisi jaringan pada orde ke 5 hanya dapat ditekan mencapai 42.20% dengan THD sebesar 47.11 %. Sedangkan pada pengendali inverter dengan metode MSRF, untuk kompensasi arus harmonisa pada fasa A diperoleh hasil yang jauh lebih baik yaitu arus harmonisa tertinggi pada orde ke 5 sebesar 1.65% dan THD sedikit lebih baik yaitu 1.71%.

Berdasarkan limit distorsi arus harmonisa IEEE Std. 519-1992 bahwa *online UPS* masih belum layak sebagai kompensasi arus harmonisa. Karena dengan nilai arus beban ≥ 100 A THD dari *online UPS* $> 15\%$. Sedangkan inverter SMRF sudah layak digunakan sebagai kompensasi harmonisa. Agar lebih jelas dapat dilihat berdasarkan tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Hasil kompensasi arus harmonisa pada tiga sistem

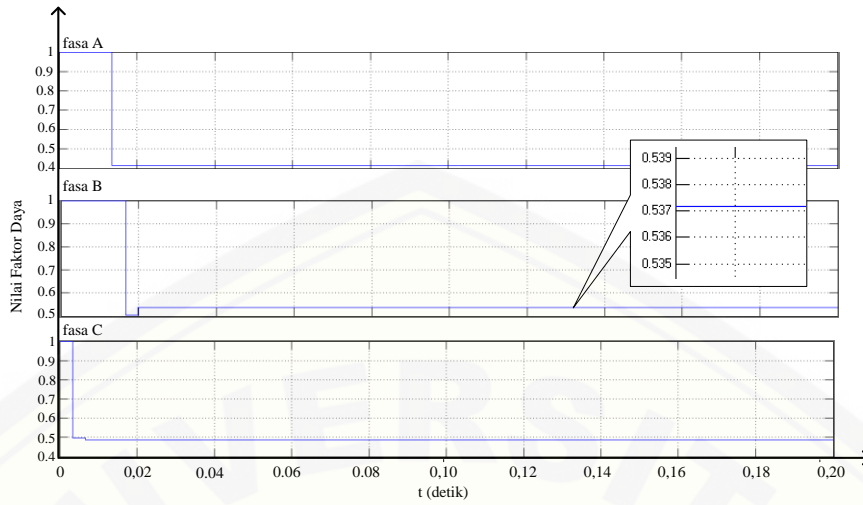
No.	Parameter	Total Harmonic Distortion (%)								
		Arus			Sisi Jaringan			Sisi Beban		
		Sistem	<i>Online</i>	Inverter	Sistem	<i>Online</i>	Inverter	Sistem	<i>Online</i>	Inverter
1.	Fasa A	65.45	47.11	1.71	65.45	15.82	6.04			
2.	Fasa B	65.39	47.16	1.70	65.39	15.82	6.01			
3.	Fasa C	65.36	47.11	1.68	65.36	15.80	6.11			

4.2 Sistem Sebagai Kompensator Faktor Daya

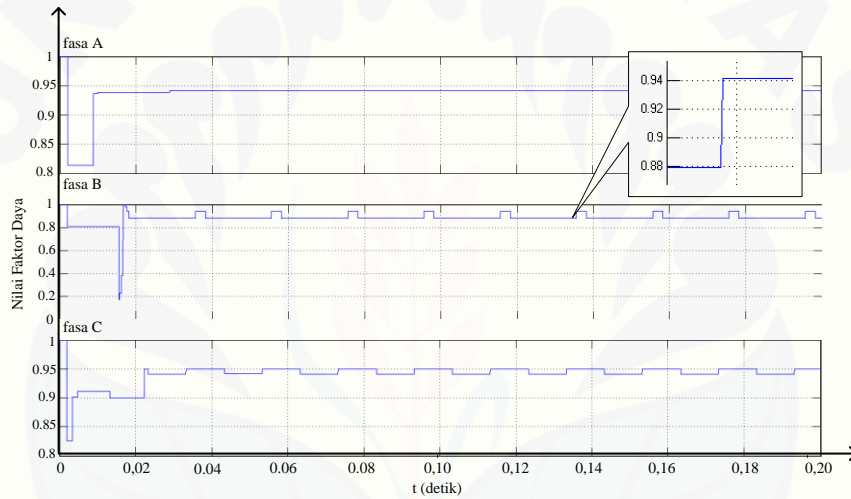
Pada sistem sebagai kompesator faktor daya digunakan beban RL dengan nilai tiap fasanya berbeda-beda. Besar untuk nilai tiap resistor dan induktor yang digunakan dalam rangkaian adalah sebagai berikut:

- Pada fasa A yaitu besar resistor adalah 1 ohm dan induktor 7 mH
- Pada fasa B yaitu besar resistor adalah 2 ohm dan induktor 10 mH
- Pada fasa C yaitu besar resistor adalah 3 ohm dan induktor 17 mH

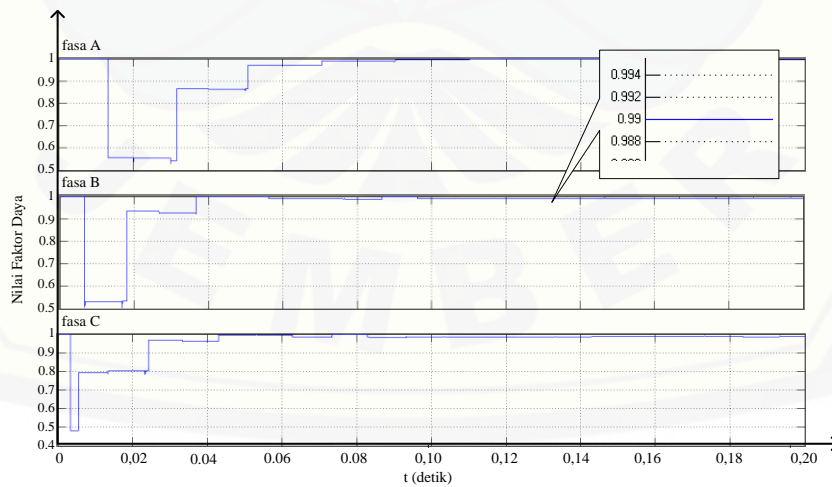
Pada sistem pengujian nilai faktor daya sisi jaringan (*grid*) data nilai faktor dapat dikonversikan kedalam grafik seperti pada gambar 4.6 berikut ini.



(a)



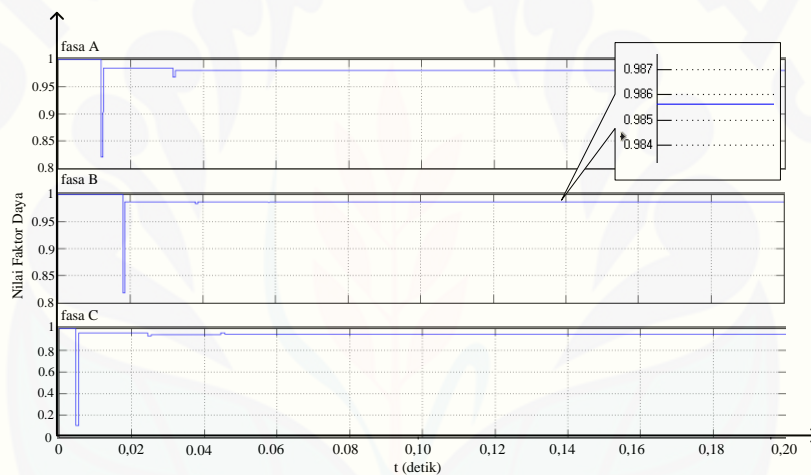
(b)



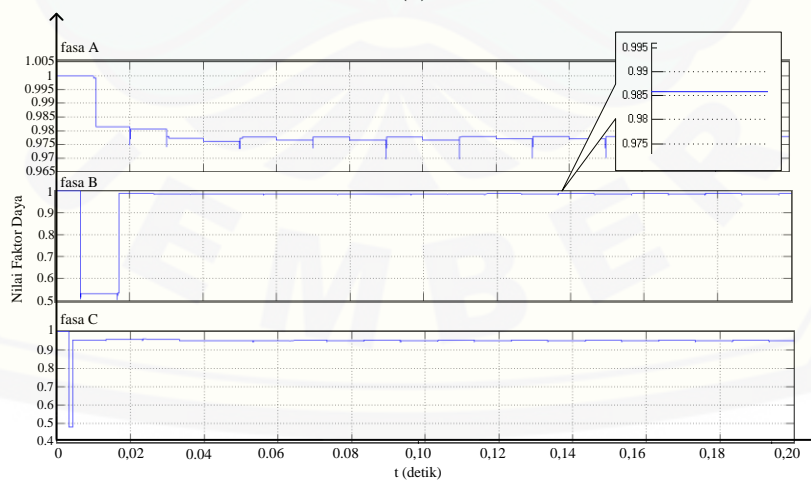
(c)

Gambar 4.6 Grafik nilai faktor daya sisi jaringan (a) awal sistem (b) *online UPS* (c) inverter MSRF

Berdasarkan gambar 4.6 diatas diketahui bahwa sistem yang telah dirancang dengan menggunakan *online UPS* dan *inverter MSRF* telah didapatkan nilai faktor daya yang lebih baik dari sistem awal. Pada *online UPS* nilai faktor daya pada fasa B disisi jaringan disaat nilai konstan sebesar 0,8793. Sedangkan dengan *inverter MSRF* nilai faktor daya saat konstan sebesar 0,9911. Hasil dari *online UPS* lebih kecil karena pada sisi jaringan yang dihubungkan seri dengan *online UPS* masih terdapat beban kapasitif dan nonlinier. Hal itu berbeda dengan perbaikan faktor daya disisi beban. Data yang diperoleh pada sisi beban dikonversikan kedalam grafik sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 4.7 berikut ini.



(a)



(b)

Gambar 4.7 Grafik nilai faktor daya sisi beban (a) *online UPS* (b) *inverter MSRF*

Pada gambar 4.7 telah ditunjukkan bahwa nilai faktor daya fasa B yang masuk pada sisi beban antara *online UPS* dengan inverter MSRF hasilnya tidak begitu jauh selisihnya. *Online UPS* dapat memperbaiki faktor daya sebesar 0.9856 sedangkan pada inverter MSRF sebesar 0.9864. Tetapi waktu transisi untuk membuat nilai faktor daya menjadi konstan, dengan inverter MSRF memiliki waktu sedikit lebih lama dibandingkan dengan *online UPS*. Untuk lebih jelasnya pada setiap fasa untuk hasil perbaikan faktor daya saat nilainya konstan dapat dilihat pada tabel 4.2

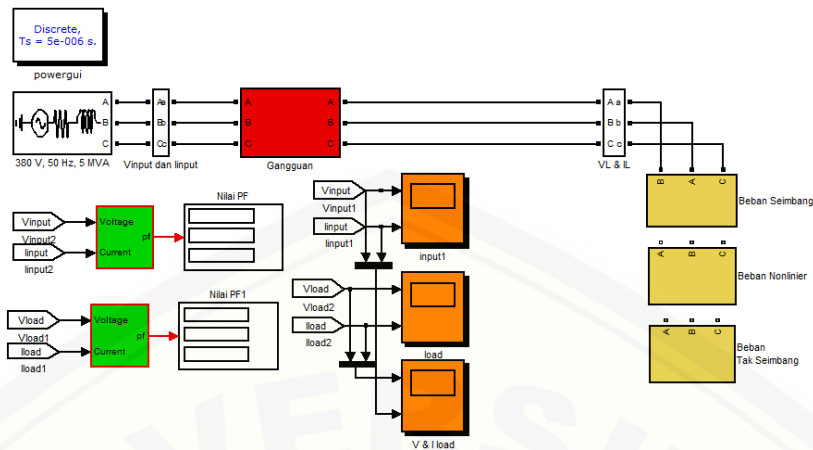
Tabel 4.2 Tabel perbaikan faktor daya

Fasa	Sisi Jaringan			Sisi Beban		
	Sistem Awal	<i>Online UPS</i>	Inverter MSRF	Sistem Awal	<i>Online UPS</i>	Inverter MSRF
A	0.4145	0.9425	0.9957	0.4145	0.9799	0.9779
B	0.5372	0.8793	0.9911	0.5372	0.9856	0.9864
C	0.4886	0.9496	0.9872	0.4886	0.9481	0.9490

4.3 Simulasi Sebagai *Uninterruptible Power Supply (UPS)*

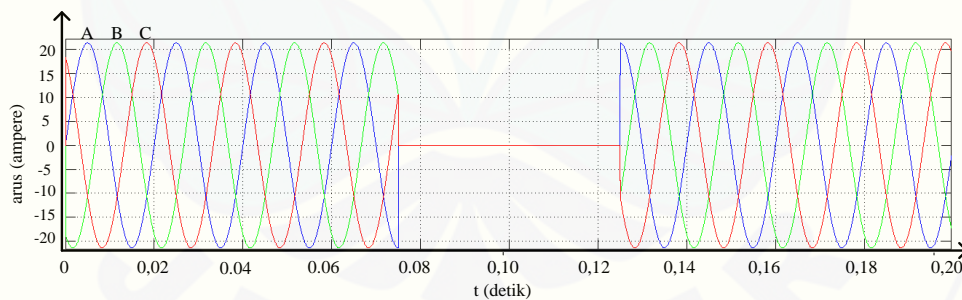
Dalam pengujian rangkaian UPS ini, digunakan beban seimbang yaitu dengan menggunakan parameter resistor pada tiap fasanya. Besar nilai resistor adalah 10 kohm. Selanjutnya pada sistem itu sumber utama jaringan listrik diputus pada waktu 0,075 detik sampai dengan 0,125 detik.

Pada proses *back-up mode* sistem penyuplai daya digunakan sumber DC ideal yang dihubungkan dengan inverter. Ketika rangkaian dioperasikan saat mode normal sumber utama menyuplai beban dan melakukan proses *charger* pada sumber DC. Saat terjadi gangguan sumber DC akan menyuplai daya ke beban sehingga beban akan tetap dialiri daya listrik secara kontinu. Untuk rangkaian simulasi UPS yang digunakan dalam sistem ini dapat dilihat pada gambar 4.8 berikut, dalam sistem terdapat gangguan pada sumber utama.

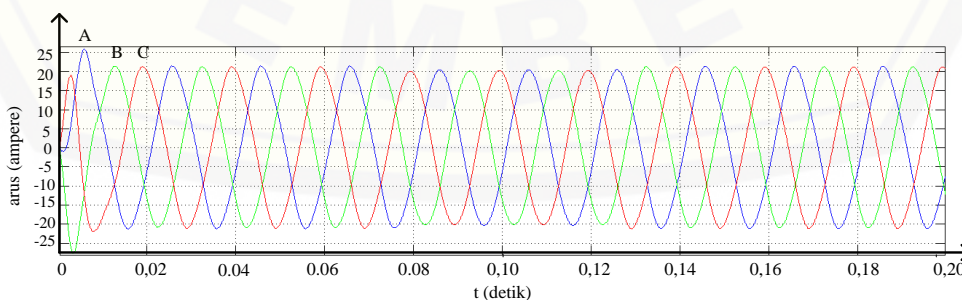


Gambar 4.8 Sistem awal terjadi gangguan pada jaringan

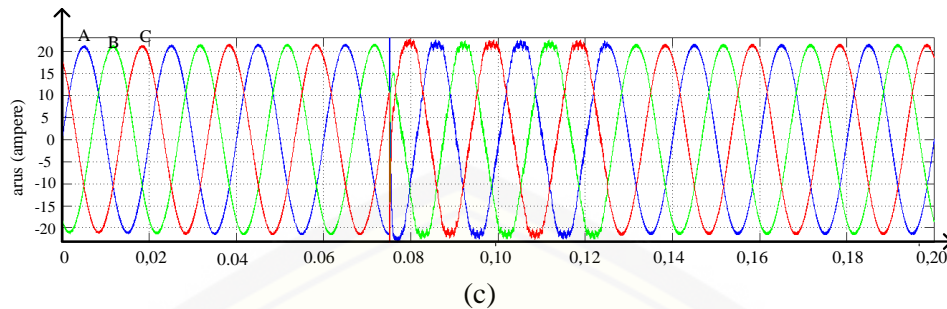
Seperti yang dijelaskan pada batasan masalah sebelumnya telah dijelaskan bahwa saat disimulasikan terjadi gangguan (*interruption*) pada *back up mode* ini tidak dilakukan analisis faktor daya dan harmonisa seperti pada rangkaian sebelumnya. Akan tetapi sistem ini ditunjukan performansi pada kestabilan tegangan dan arus saat terjadinya perubahan mode normal ke *back up mode*. Dari proses simulasi yang dilakukan selama 0,2 detik. Diperoleh hasil pada sistem awal, hasil pada penggunaan *online UPS* dan menggunakan pengendali inverter seperti yang ditunjukan oleh gambar 4.9 dan 4.10 berikut ini.



(a)



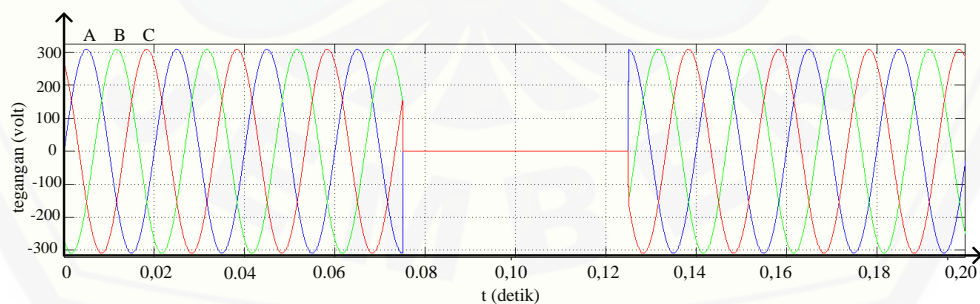
(b)



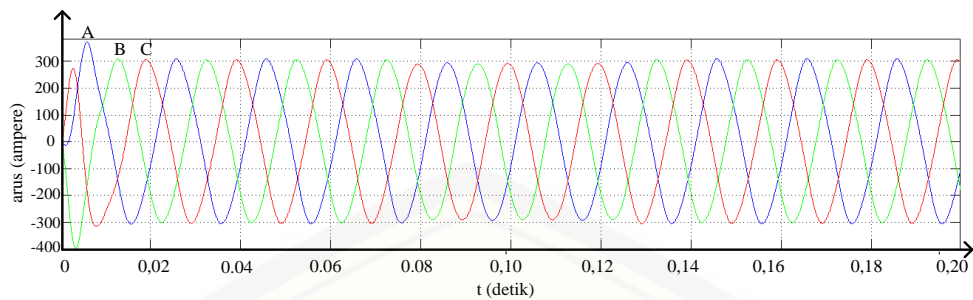
Gambar 4.9 Arus pada sistem sebagai UPS (a) Tanpa Pengendali, (b) *Online UPS* (c) Pengendali inverter dengan MSRF

Pada gambar 4.9 (a) telah tampak aliran arus yang masuk ke beban telah putus pada saat 0,075 detik sampai 0,125 detik atau selama 2,5 siklus (*cycle*) dengan frekuensi 50 Hz. Sistem awal nilai arus puncak yang masuk kedalam beban mencapai 22 A. Berbeda dengan sistem *online UPS* saat terdapat gangguan aliran listrik masuk ke beban, arus puncak menurun mencapai 20 A. Sedangkan dengan menggunakan inverter MSRF arus akan tetap stabil yaitu 22 A.

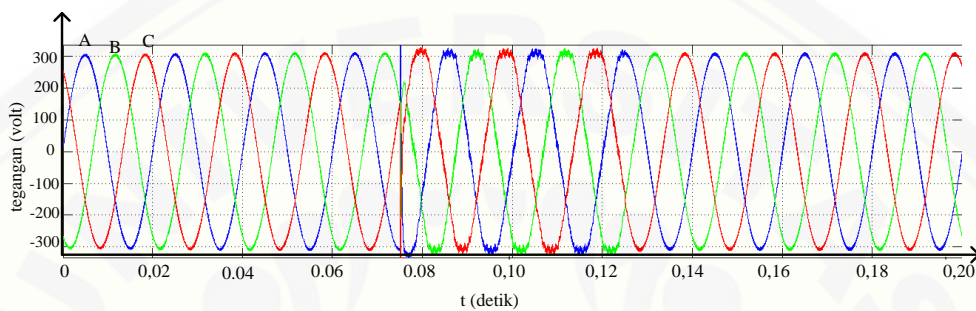
Pada aliran tegangan yang ditunjukkan pada gambar 4.10 memiliki nilai tegangan puncak yang masuk ke beban sebesar 311 volt saat jaringan tidak menggunakan sistem. Dengan *online UPS* nilai tegangan puncak saat menyuplai terjadinya gangguan pada sumber utama mempunyai nilai 295 volt. Berbeda dengan menggunakan inverter MSRF saat menyuplai daya listrik ketika sumber utama putus yaitu tetap stabil yaitu 311 volt. Hasil dari data nilai tegangan puncak tersebut dapat ditunjukkan pada gambar 4.10 berikut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.10 Tegangan pada sistem sebagai UPS (a) Tanpa Pengendali, (b) *Online UPS* (c) Pengendali inverter dengan MSRF

Pada gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan bahwa hasil dari sistem *online UPS* dan pengendali inverter dengan menggunakan MSRF beban akan tetap mendapatkan suplai daya dengan performansi nilai tegangan dan arus yang sama, sehingga meskipun suplai dari sumber terputus beban akan tetap terhubung oleh jaringan listrik. Daya yang disalurkan saat terjadi gangguan berasal dari baterai yang terhubung ke inverter.

Akan tetapi ketika sumber utama (*grid*) terputus, sistem inverter MSRF membutuhkan sedikit waktu transisi yang digunakan untuk mensinkronkan arus dan tegangan saat menyuplai beban yaitu sebesar 3,65 milidetik. Dan juga gelombang arus dan tegangan inverter MSRF masih belum murni sinusoidal. Berbeda halnya dengan menggunakan sistem *online UPS*. Sistem ini mampu menyuplai daya aliran listrik secara kontinu tanpa adanya waktu transisi seperti sistem inverter MSRF. Bentuk gelombang arus dan tegangannya juga sudah murni sinusoidal.

4.4 Hasil dari Keseluruhan Simulasi

Dari hasil simulasi yang telah diperoleh berdasarkan proses *running* yang dilakukan oleh MATLAB, diperoleh data seperti pada tabel 4.3 berikut ini

Tabel 4.3 Hasil keseluruhan simulasi

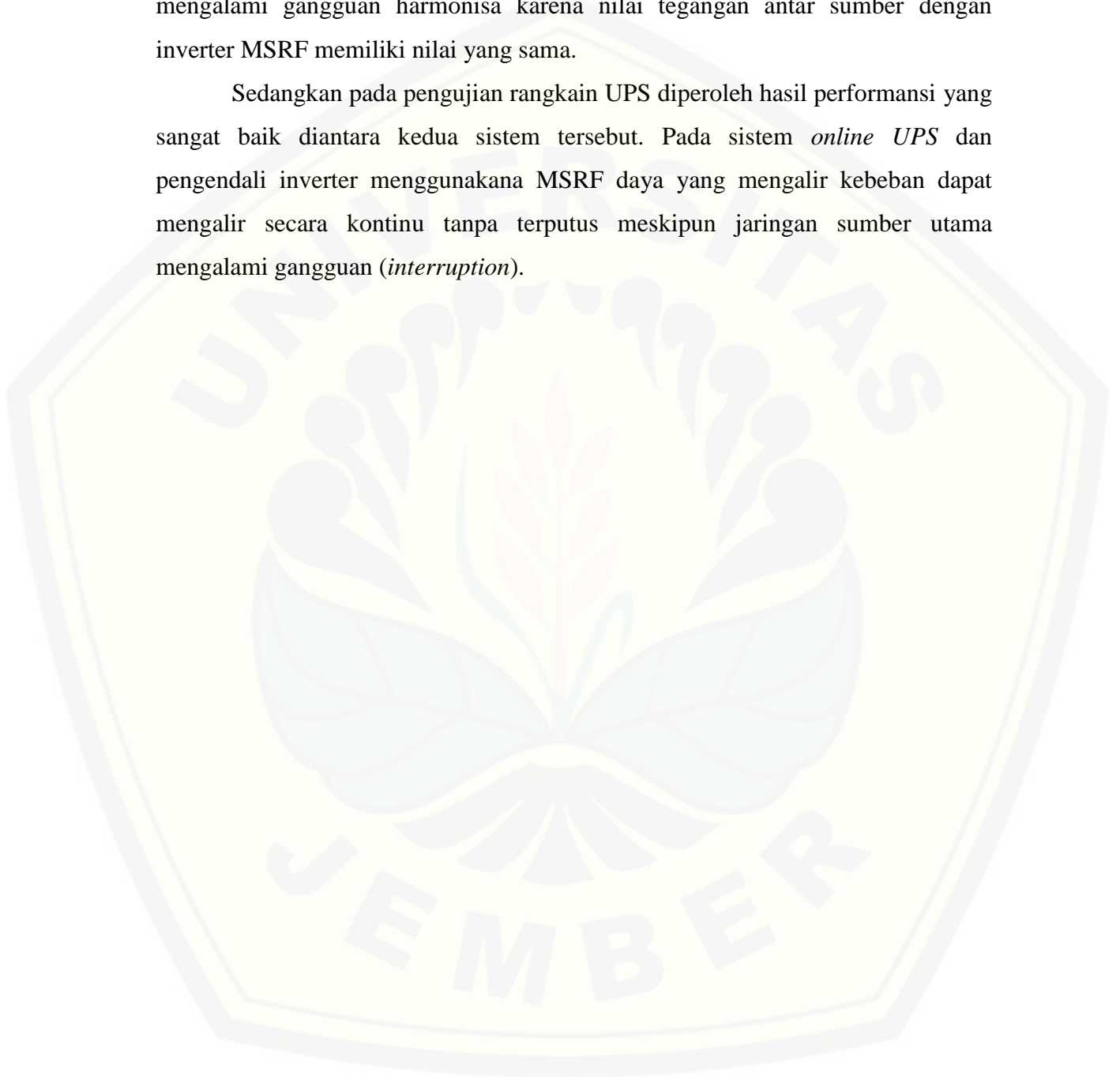
Perfomansi	Fasa	Sisi Jaringan			Sisi Beban		
		Sistem Awal	Online UPS	Inverter MSRF	Sistem Awal	Online UPS	Inverter MSRF
Kompensasi arus harmonisa	A	65.45%	47.11%	1.71%	65.45%	15.82%	6.04%
	B	65.39%	47.16%	1.70%	65.39%	15.82%	6.01%
	C	65.36%	47.11%	1.68%	65.36%	15.80%	6.11%
Perhitungan faktor daya	A	0.4144	0.9425	0.9957	0.4144	0.9799	0.9779
	B	0.5372	0.8793	0.9911	0.5372	0.9856	0.9864
	C	0.4886	0.9496	0.9872	0.4886	0.9481	0.9495
Saat sumber utama terputus	A	Tidak terdapat daya yang masuk ke beban	Daya tetap menyuplai beban secara kontinu		Tidak terdapat daya yang masuk ke beban	Daya tetap menyuplai beban secara kontinu	
	B						
	C						

Dari tabel 4.3 diatas terlihat bahwa *Total Harmonic Distorsi* (THD) pada fasa A saat sistem awal memiliki nilai yang sangat tinggi baik dari sisi jaringan dan sisi beban yaitu sebesar 65.45%. Dengan menggunakan *online UPS* terjadi pengurangan harmonisa yang sangat besar pada sisi beban yaitu sebesar 15.82%, dan pada sisi jaringan hanya mampu meredam harmonisa sebesar 47.11%. Sedangkan dengan menggunakan MSRF yang digunakan pada pengendalian inverter. Sistem ini dapat meredam arus harmonisa yang masuk kedalam beban maupun pada sisi jaringan. Sehingga sistem kelistrikan yang masuk kedalam beban memiliki nilai daya dengan kualitas yang baik.

Pada pengujian perbaikan faktor daya, hasil yang diperoleh setelah simulasi dilakukan pada beban RL tak seimbang untuk sistem *online UPS* menunjukkan nilai faktor daya pada sisi beban mencapai nilai hampir 1, sedangkan pada sisi jaringan nilai faktor daya yang masuk ke *online UPS* tidak mempunyai nilai yang konstan mencapai 1. Pada pengendalian inverter menggunakan MSRF menunjukkan nilai faktor daya yang sangat berubah secara signifikan. Dapat diterapkan pada sisi beban maupun jaringan memiliki nilai faktor daya hampir satu. Penggunaan *online UPS* pada sisi beban mempunyai nilai yang cukup berbeda antara faktor daya dengan harmonisa. Hal itu disebabkan karena

pemasangan *online UPS* dengan sumber utama adalah seri, sehingga beban yang ada pada UPS tetap akan terpengaruh oleh besar harmonisa. Berbeda dengan inverter MSRF yang pemasangan secara paralel sehingga beban tidak mengalami gangguan harmonisa karena nilai tegangan antar sumber dengan inverter MSRF memiliki nilai yang sama.

Sedangkan pada pengujian rangkain UPS diperoleh hasil performansi yang sangat baik diantara kedua sistem tersebut. Pada sistem *online UPS* dan pengendali inverter menggunakan MSRF daya yang mengalir ke beban dapat mengalir secara kontinu tanpa terputus meskipun jaringan sumber utama mengalami gangguan (*interruption*).



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari simulasi yang telah dilakukan menggunakan software MATLAB 7.8.0 (2009a) dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu:

1. Sistem pengendali inverter menggunakan MSRF dapat berfungsi secara bersama-sama untuk meredam harmonisa, memperbaiki nilai faktor daya dan sebagai UPS.
2. Sistem pengendali inverter menggunakan MSRF pada sisi beban mampu meredam harmonisa mencapai 6.05% sedangkan sistem *online UPS* hanya mampu meredam harmonisa pada sisi beban yaitu 15.82%, sedangkan pada sisi jaringan sistem *online UPS* harmonisa hanya mampu diredam dari 65.45% menjadi 47.11% dan untuk pengendali inverter dengan MSRF harmonisa pada jaringan dapat diredam dari 65.39% menjadi 1.46%.
3. Performansi perbaikan faktor daya pada sisi beban antara *online UPS* dengan pengendali inverter dengan MSRF mempunyai nilai yang sama baik, tetapi pada sisi jaringan sistem pengendali inverter dengan MSRF dalam memperbaiki faktor daya lebih baik dari pada *online UPS* yaitu dari 0.5372 menjadi 0.9911 sedangkan pada *online UPS* hasilnya yaitu 0.5372 menjadi 0.8793.
4. Hasil pengujian sistem sebagai UPS selama 0.05 detik performansi *online UPS* sedikit lebih baik yaitu tanpa ada delay waktu, sedangkan pada pengendali inverter memiliki waktu transisi untuk menyuplai sebesar 6,25 milidetik.

5.2 Saran

Aplikasi metode *Modified Sinchronous Reference Frame* (MSRF) untuk *inverter MSRF* tiga fasa sudah mempunyai performansi yang sudah bagus, tetapi perlu digunakan metode yang lainnya untuk membuat kesempurnaan dari sistem

ini, terutama saat terjadinya *interruption*. Sistem ini juga masih sebatas simulasi. Pengembangan kearah implementasi secara nyata sangat terbuka, karena dengan kemajuan teknologi baru yaitu dengan penggunaan mikroprosesor ataupun FPGA (*Field Programmable Gate Array*) dapat menjadikan produk yang langsung digunakan oleh konsumen.



DAFTAR PUSTAKA

- Bin, Alias Azuan. 2007. *Modeling And Simulation Of Single Phase Inverter With PWM Using Matlab/Simulink*. Universitas Malaysia
- Dickson Ntoni, Amakye. 2014. "Control Of Inverter To support Bidirectional Power Flow In Grid Connected System". College of Engineering, Guindy, Anna University, Chennai
- Fortescue CL. Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks. *AIEE Trans* 1918;37(Part II):1027–140
- IGNA Dwijaya S., M. Ashari, Imam Robandi. 2003. "Application of Fuzzy Logic Controller for Single Phase Multifunction Inverter". *Proceeding of CECI & SITIA*, Surabaya, Indonesia
- Kim, Kyung-Hwan. 2005. "Advanced Synchronous Reference Frame Controller For Three-Phase UPS Powering Unbalanced And Nonlinear Loads. Hanyang University. Korea
- Kurnia, Setiawan Dedy. 2010. "Modified Synchronous Reference Frame Untuk Inverter MSRF Empat Lengan Pada Sistem Hibrida Generator Diesel dan Battery dengan Beban Tidak Seimbang". ITS. Surabaya
- P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc, 1994
- Prof. Ying-Yu Tzou. 2005. *Development Of A DSP-Controlled On-Line UPS*. Taiwan
- Trowler, Derik and Whitaker, Bret. 2008. *Bi-Directional Inverter and Energy Storage System*. Universitas Arkansas
- Wicaksono Adityo Nugroho. 2012. *Uninterruptible Power Supply (UPS) Tiga Fasa Untuk Beban Tak Seimbang dan Non Linier Menggunakan Metode Modified Synchronous Reference Frame (SRF)*. ITS. Surabaya
- Xiang, Dawei Li Ran. 2012. *Condition Monitoring Power Module Solder Fatigue Using Inverter Harmonic Identification*. *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.27, No.1