



***SELF TUNING FUZZY PI CONTROLLER PADA MODIFIED
SYNCHRONOUS REFERENCE FRAME (MSRF-STF)
UNTUK PENGENDALIAN INVERTER TIGA
FASA SEBAGAI UPS, KOMPENSATOR
HARMONISA DAN POWER FAKTOR***

SKRIPSI

oleh

**Moh Agus
NIM 121910201053**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2016**



***SELF TUNING FUZZY PI CONTROLLER PADA MODIFIED
SYNCHRONOUS REFERENCE FRAME (MSRF-STF)
UNTUK PENGENDALIAN INVERTER TIGA
FASA SEBAGAI UPS, KOMPENSATOR
HARMONISA DAN POWER FAKTOR***

SKRIPSI

**diajukan guna melengkapi skripsi dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi S1 Teknik Elektro
dan mencapai gelar Sarjana Teknik**

oleh

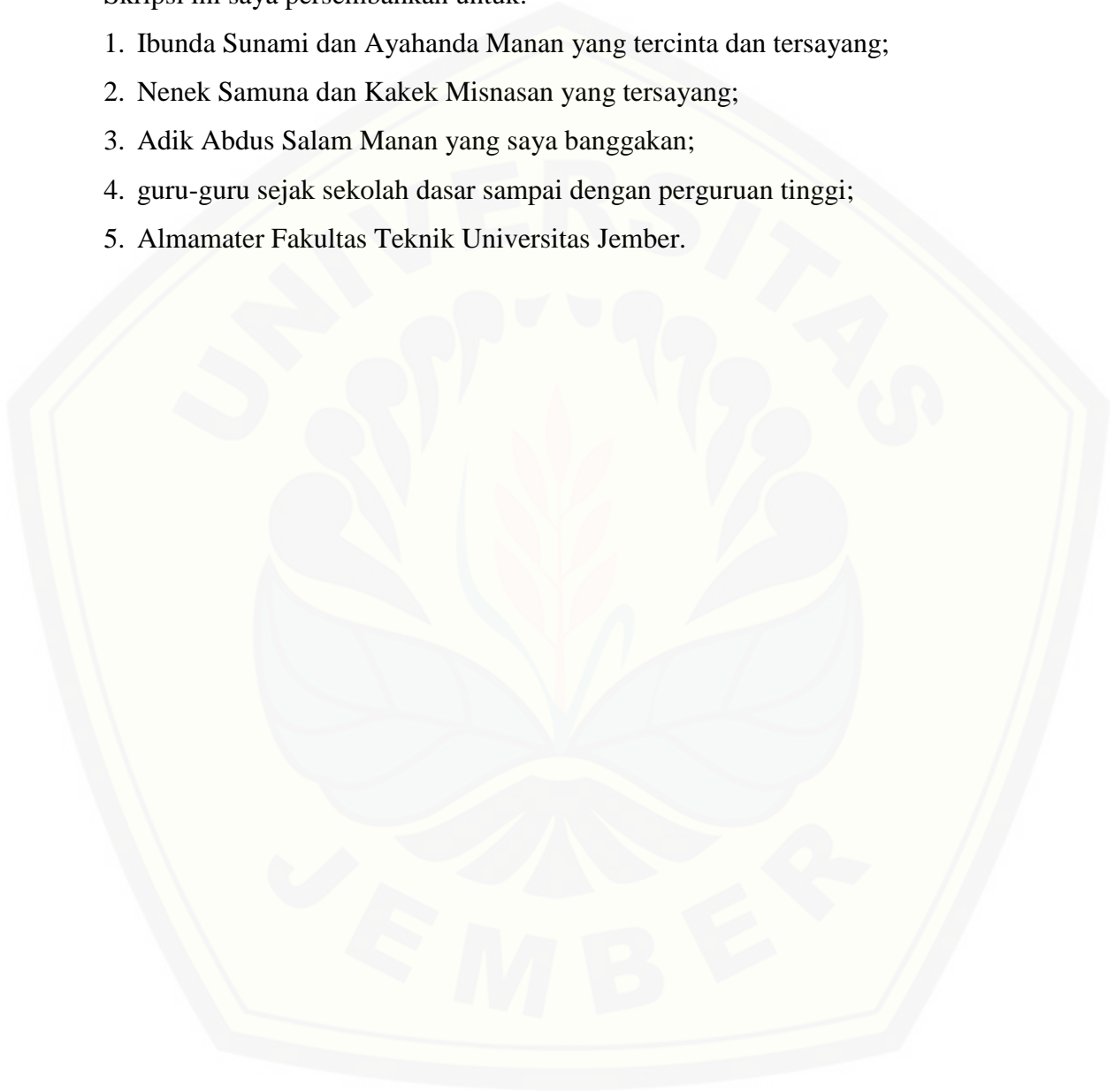
**Moh Agus
NIM 121910201053**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2016**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ibunda Sunami dan Ayahanda Manan yang tercinta dan tersayang;
2. Nenek Samuna dan Kakek Misnasan yang tersayang;
3. Adik Abdus Salam Manan yang saya banggakan;
4. guru-guru sejak sekolah dasar sampai dengan perguruan tinggi;
5. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.



MOTO

Sembahlah Allah dan janganlah kamu mempersekutukan-Nya dengan sesuatupun. Dan berbuat baiklah kepada dua orang ibu-bapa, karib-kerabat, anak-anak yatim, orang-orang miskin, tetangga yang dekat dan tetangga yang jauh, dan teman sejawat, ibnu sabil dan hamba sahayamu. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang-orang yang sombong dan membangga-banggakan diri.^{*)}

وَاسْتَعِينُوا بِالصَّبْرِ وَالصَّلَاةِ

Mintalah pertolongan dengan sabar dan shalat.^{**)}

***)

^{*)} (Q.S An Nisaa', 4:36)

^{**)} (QS Al-Baqarah: 45)

^{***)}

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Moh Agus

NIM : 121910201053

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “*Self Tuning Fuzzy PI Controller Pada Modified Synchronous Reference Frame (MSRF-STF) Untuk Pengendalian Inverter Tiga Fasa Sebagai UPS, Kompensator Harmonisa Dan Power Faktor*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan dalam institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 21 Juni 2016

Yang menyatakan,

Moh Agus
NIM 121910201053

SKRIPSI

***SELF TUNING FUZZY PI CONTROLLER PADA MODIFIED
SYNCHRONOUS REFERENCE FRAME (MSRF-STF)
UNTUK PENGENDALIAN INVERTER TIGA
FASA SEBAGAI UPS, KOMPENSATOR
HARMONISA DAN POWER FAKTOR***

oleh

Moh Agus
NIM 121910201053

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Widjonarko, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “*Self Tuning Fuzzy PI Controller Pada Modified Synchronous Reference Frame (MSRF-STF) Untuk Pengendalian Inverter Tiga Fasa Sebagai UPS, Kompensator Harmonisa Dan Power Faktor*” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Kamis, 21 Juni 2016

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

Tim Penguji:

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T.
NIP 198006102005011003

Widjonarko, S.T., M.T.
NIP 196403171998021001

Penguji I,

Penguji II,

Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T.
NIP 197106141997021001

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.
NIP 197008261997021001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik,

Dr. Ir Entin Hidayah, M.UM.
NIP 196612151995032001

Self Tuning Fuzzy PI Controller Pada Modified Synchronous Reference Frame (MSRF-STF) Untuk Pengendalian Inverter Tiga Fasa Sebagai UPS, Kompensator Harmonisa Dan Power Faktor

Moh Agus

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

ABSTRAK

Dalam tugas akhir ini dijelaskan tentang suatu aplikasi metode *Self Tuning Fuzzy PI Controller Pada Modified Synchronous Reference Frame (MSRF-STF)* untuk pengendalian inverter tiga fasa. Pengendalian inverter ini berfungsi sebagai *Uninterruptible Power Supply (UPS)*, kompensator harmonisa dan faktor daya. Pengendalian inverter MSRF-STF mempunyai keunggulan pada kinerja sistem yang dapat berdiri sendiri (*stand alone*). Berbeda pada inverter lain yang bergantung pada *grid*, apabila *grid* terputus maka inverter tersebut tidak bekerja. Inverter tersebut dikontrol dengan menggunakan metode MSRF-STF. Hasil pengukuran tegangan dan arus pada *grid* yang terhubung dengan beban, akan didekomposisi ke dalam komponen urutan positif, negatif dan nol. Komponen urutan yang ditransformasikan ke dalam *synchronous reference frame (dq)* akan dikontrol menggunakan *fuzzy* kemudian keluaran dari *fuzzy* akan diinjeksikan ke kontrol PI untuk mengkopel tegangan dan arus. Keluaran dari kontrol akan ditransformasikan lagi kedalam urutan komponen tiga fasa. Keluaran urutan komponen tiga fasa ini akan digunakan untuk menyalakan inverter melalui sebuah *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)*. Simulasi pada rangkaian ini menggunakan program simulink dan *simpower blockset* dari Matlab 7.8. Untuk mengetahui performansi dari sistem pengendali inverter ini, digunakan perbandingan dengan sistem tanpa kendali dan sistem MSRF-PI. Dari simulasi yang dilakukan mempunyai hasil bahwa performansi pengendalian inverter dengan sistem MSRF-STF lebih baik dari pada MSRF-PI dalam kompensasi harmonisa dan faktor daya pada sisi jaringannya, yaitu pada Sistem inverter MSRF-PI mampu meredam harmonisa pada fasa A sebesar 6.25%, fasa B sebesar 8.06% dan fasa C sebesar 6.87%, sedangkan sistem MSRF-STF lebih baik dalam meredam harmonisa yaitu pada fasa A sebesar 5.02%, fasa B sebesar 6.29%, dan fasa C sebesar 4.95%. Hasil pengujian faktor daya pada sistem MSRF-PI secara berturut-turut pada fasa A sebesar 0.8955, fasa B 0.8967, dan fasa C sebesar 0.9050 sedangkan pada sistem MSRF-STF mampu menaikkan faktor daya pada fasa A sebesar 0.9010, fasa B sebesar 0.9788, dan fasa C sebesar 0.9657. Dalam kinerja sebagai sistem UPS selama 0.05 detik atau 2.5 siklus (*cycle*), pada MSRF-PI memiliki hasil yang sedikit lebih besar untuk nilai arus dan tegangan yang dibutuhkan beban sedangkan MSRF-STF menghasilkan nilai arus dan tegangan yang sama dengan yang dibutuhkan beban.

Kata kunci: Inverter tiga fasa, MSRF-STF, MSRF-PI

*Self Tuning Fuzzy PI Controller Of Modified Synchronous Reference Frame
(MSRF STF) for The Three Phase Inverter Control as UPS,
Harmonic Compensator and Power Factor.*

Moh Agus

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember

ABSTRACT

In this paper is described on an application method Self Tuning Fuzzy PI Controller for Modified Synchronous Reference Frame (MSRF-STF) to control the three-phase inverter. The inverter control function as Uninterruptible Power Supply (UPS), compensators harmonics and power factor. MSRF inverter control has advantages in system performance that can stand alone (stand alone). Difference from another inverter that depend on the grid, if the grid is disconnected, the inverter is not working. The inverter is controlled by using MSRF-STF methods. Voltage and current measurement results on a grid that is connected to the load, will be decomposed into the component order of positive, negative and zero. Component sequence transformed into the synchronous reference frame (dq) will be controlled by fuzzy then output from fuzzy will be injected to controlled PI for compailing voltage and currents. The output of the PI control will be transformed again into a sequence of three phase components. The output sequence of the three components of this phase will be used to power the inverter via a Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM). Simulate this circuit using Simulink program and simpower blockset of Matlab 7.8. To know performansi of this inverter control system, used the comparison without control system and MSRF-PI system. From the simulations carried out have the result that the performance control inverter system MSRF-STF better than MSRF-PI to compensating harmonics and power factor on the side of the network, the system inverter MSRF-PI is able to reduce harmonics in phase A of 6.25%, the phase B amounted to 8.06% and amounted to 6.87% C phase, while the system MSRF-STF better in reducing the harmonics are in phase A of 5.02%, amounted to 6.29% of phase B, and phase C amounted to 4.95%. Results of testing the power factor of the system MSRF-PI respectively on phase A of 0.8955, phase B 0.8967, and phase C of 0.9050 while the system MSRF-STF able to increase the power factor in phase A of 0.9010, phase B at 0.9788, and phase C of 0.9657. In the performance as a UPS system for 0.05 seconds or 2.5 cycles (cycle), the MSRF-PI has a slightly bigger results for the current and voltage values required load while MSRF-STF produce current and voltage values are equal to the required load.

Key words: *Three Phase Inverter, MSRF-STF, MSRF-PI*

RINGKASAN

Self Tuning Fuzzy PI Controller Pada Modified Synchronous Reference Frame (MSRF-STF) Untuk Pengendalian Inverter Tiga Fasa Sebagai UPS, Kompensator Harmonisa Dan Power Faktor; Moh Agus, 121910201053; 2016; 77 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Dalam tugas akhir ini dijelaskan tentang suatu aplikasi metode *Self Tuning Fuzzy PI Controlle* pada *Modified Synchronous Reference Frame* (MSRF-STF) untuk pengendalian inverter tiga fasa. Pengendalian inverter ini berfungsi sebagai *Uninterruptible Power Supply* (UPS), faktor daya dan kompensator harmonisa. Pengendalian inverter MSRF-STF mempunyai keunggulan pada kinerja sistem yang dapat berdiri sendiri (*stand alone*). Berbeda pada inverter lain yang bergantung pada *grid*, apabila *grid* terputus maka inverter tersebut tidak bekerja. Inverter tersebut dikontrol dengan menggunakan metode MSRF-STF. Hasil pengukuran tegangan dan arus pada *grid* yang terhubung dengan beban, akan didekomposisi ke dalam komponen urutan positif, negatif dan nol. Komponen hasil dekomposisi dari ketiga urutan ditransformasikan ke dalam *modified synchronous reference frame* (dq). Dengan proses transformasi digunakan untuk mempermudah mengontrol nilai tegangan dan arus. Dengan nilai referensi tegangan pada urutan positif sebesar 380 volt, kemudian akan masuk ke kontrol *fuzzy* dan akan mengeluarkan nilai Kp dan Ki yang kemudian akan diinjeksikan ke dalam kontrol PI akan membuat nilai tegangan menjadi seimbang dan dapat meredam harmonisa. Keluaran dari proses pengontrolan tegangan akan dikonversikan kedalam nilai referensi arus sebagai pembanding nilai arus yang error akibat adanya harmonisa. Sehingga dapat dikatakan bahwa kontrol MSRF-STF berfungsi sebagai pengkonversian nilai tegangan dan arus menjadi nilai tegangan yang terkontrol. Keluaran dari kontrol akan ditransformasikan lagi kedalam urutan komponen tiga fasa atau proses *sequence compisition*. Keluaran urutan komponen tiga fasa ini akan digunakan untuk menyalakan IGBT sebagai komponen inverter melalui sebuah *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). Simulasi rangkaian ini menggunakan program simulink dan *simpower blockset* dari Matlab 7.8.0 (2009a)

Untuk mengetahui performasni dari sistem pengendali MSRF-STF ini, digunakan pembandingan sistem tanpa pengendali dan sistem MSRF-PI. Dari hasil pengujian sistem didapatkan hasil menunjukan pengujian rangkain UPS diperoleh hasil performansi yang sangat baik diantara kedua sistem tersebut. Pada sistem MSRF-PI dan sistem MSRF-STF daya yang mengalir ke beban dapat mengalir secara kontinu tanpa terputus meskipun jaringan sumber utama mengalami gangguan (*interruption*).

Pada pengujian perbaikan faktor daya, hasil yang diperoleh untuk sistem MSRF-PI pada fasa A sebesar 0.8955, pada fasa B sebesar 0.8967, dan pada fasa C sebesar 0.9050. Sistem MSRF-PI ini dalam menangani perbaikan faktor daya sudah cukup bagus yaitu hampir mendekati nilai 1 akan tetapi ketika melihat sinyal hasil pengujian sistem MSRF-PI ini tidak stabil. Sedangkan hasil yang diperoleh oleh sistem MSRF-STF dimana melakukan penyempurnaan dari sistem MSRF-PI didapatkan hasil pengujian dalam memperbaiki nilai faktor daya pada jaringan pada fasa A sebesar 0.9010, pada fasa B sebesar 0.9788, dan pada fasa C sebesar 0.9657. Sistem MSRF-STF ini lebih baik dalam melakukan perbaikan faktor daya dibandingkan dengan sistem MSRF-PI terbukti hasil pengujian pada sistem MSRF-STF ini sangat mendekati nilai 1 dan pada sistem MSRF-STF ini lebih stabil dibandingkan dengan MSRF-PI terlihat sinyal faktor daya yang dihasilkan oleh MSRF-STF naik dengan stabil.

Dalam pengujian kompensasi arus harmonisa yang sebelumnya pada sisi beban dan sisi jaringan arus mengalami distorsi dan memiliki nilai harmonisa pada fasa A sebesar 55.33%, pada fasa B sebesar 68,50%, dan fasa C sebesar 51,33%. Pada sistem MSRF-PI arus yang terdistorsi pada jaringan dapat di kompensasi yaitu pada fasa A menjadi sebesar 6.25%, pada fasa B menjadi sebesar 8.06%, dan pada fasa C dikompensasi menjadi 6.87%. Sistem MSRF-PI dapat mengkompensasi arus yang terdistorsi pada jaringan yang hasilnya tidak melebihi harmonisa arus yang ditetapkan oleh IEEE Std. 519-1992. Sedangkan pada sistem MSRF-STF dapat mengkompensasi harmonisa arus pada jaringan yaitu pada fasa A sebesar 5.02%, pada fasa B sebesar 6.29%, dan pada fasa C sebesar 4.95%. Hal ini membuktikan bahwa sistem MSRF-STF lebih baik dibandingkan dengan sistem MSRF-PI.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “*Self Tuning Fuzzy PI Controller Pada Modified Synchronous Reference Frame (MSRF-STF) Untuk Pengendalian Inverter Tiga Fasa Sebagai UPS, Kompensator Harmonisa Dan Power Faktor*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama, Widjonarko S.T.,M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji I, Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat membangun demi penyempurnaan skripsi ini;
3. Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa;
4. M. Agung prawira N, S.T., M.T. selaku Komisi Bimbingan S1 yang telah membantu penulisan skripsi secara administratif;
5. ibu Sunami dan ayahanda ABD Manan yang telah memberikan dukungan moril dan materiil serta doa yang tiada putus;
6. nenek Samuna dan Kakek Misnasan yang telah memberikan kasih sayang yang tiada putus;
7. adik tercinta Abdus Salam Manan yang selalu menemani;
8. sahabatku Udin, Tyo, Tutut, dan Jarwo yang selalu memberikan motivasi dan semangat pada saat kuliah.
9. teman-teman kontrakan patrang No. 11 Ulil, Budi, Kholid, dan Riko yang selalu memberikan kebersamaan hidup di Kota Jember;

10. teman-teman kontrakan riau No. 60 Ivan, Yuski, Dian, Febri, Deni, Sulhan, dan Kusairi yang selalu memberikan hiburan selama dijember.
11. seorang yang aku sayang Betharia Kusuma Wardani yang turut memberikan semangat dalam penulisan skripsi.
12. bapak Yantoro sebagai pembimbing saat kerja praktek di PLTA Sutami Malang.
13. Alm Taliman sebagai ustad yang mengajari dalam ilmu agama.
14. rekan-rekan *project D* yang telah membantu dalam proses penelitian.
15. aslab sistem kendali 2011, 2012, dan 2013 yang telah menemani di laboratorium dalam mengerjakan skripsi.
16. rekan seperjuangan sejak SMA Thony dan Ade yang menemani ketika ada dijember;
17. dulur-dulur seperjuangan Teknik Elektro 2012 yang telah memberikan motivasi dan semangat dalam perjuangan 4 tahun di bangku kuliah;
18. semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 21 Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN	vi
HALAMAN PEMNGESAHAN	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
RINGKASAN	x
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
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.....	6
2.1.2 <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)</i>	11
2.2 Logika Fuzzy	13

2.2.1 Fungsi ke anggotaan	14
2.3 PID Self Tuning Fuzzy Logic	17
2.4 Uninterruptible Power Supply (UPS).....	19
2.4.1 Macam Topologi UPS	21
2.4.1.1 <i>Off-Line</i>	21
2.4.1.2 <i>Line-Interactive UPS</i>	22
2.4.1.3 <i>Double Conversion (Online UPS)</i>	23
2.4.2 Baterai.....	24
2.5 Kualitas Daya Listrik dan Permasalahannya	25
2.5.1 Parameter Listrik dalam Keadaan Transien	25
2.5.2 Parameter Listrik dalam Keadaan <i>Steady State</i>	26
2.5.3 Harmonisa.....	27
2.5.3.1 Definisi Harmonisa.....	27
2.5.3.2 Indeks Harmonisa	32
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Simulasi dengan MATLAB.....	35
3.2 Desain Penelitian.....	35
3.2.1 <i>Flowchart Penelitian</i>	35
3.2.2 Desain Sistem.....	36
3.2.2.1 MSRF (Modified Synchronous Reference Frame)....	37
3.2.2.2 <i>Self Tuning Fuzzy (STF)</i>	41
3.2.2.3 Transformasi dq ke abc dan <i>Sequence Recomposition</i>	46
3.2.2.4 <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)</i>	47
3.2.2.5 Inverter Tiga Fasa	48
3.2.2.6 Sumber Utama 3 Fasa dan Baterai.....	48
3.2.2.7 Disain beban yang akan diujikan	49
3.2.3 <i>Flowchart Sistem</i>	53
3.2.4 Pemodelan sistem pada matlab	54

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	56
4.1 Simulasi Sebagai <i>Uninterruptible Power Supply (UPS)</i>	59
4.1.1 Beban Resistif.....	59
4.1.2 Beban Induktif	65
4.1.3 Beban <i>non linear</i>	70
4.2 Sistem Sebagai Kompensator Faktor Daya	76
4.2.1 Beban Resistif.....	76
4.2.2 Beban Induktif	79
4.2.3 Beban <i>non linear</i>	83
4.3 Simulasi Sebagai Kompensator Arus Harmonisa	86
4.3.1 Beban Resistif.....	86
4.3.2 Beban Induktif	91
4.3.3 Beban <i>non linear</i>	96
4.4 Penginjeksian secara manual nilai K_p dan K_i hasil	100
keluaran <i>fuzzy</i> ke controller PI pada MSRF.	
4.5 Hasil dari Keseluruhan Simulasi	101
BAB 5. PENUTUP	103
5.1 Kesimpulan	103
5.2 Saran	103
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Orde harmonisa berdasarkan urutan	31
2.2 Limit distorsi tegangan harmonisa berdasarkan IEEE Std. 519-1992 .	33
2.3 Limit distorsi arus harmonisa berdasarkan IEEE Std. 519-1992	33
3.1 Tabel <i>rule</i> untuk nilai Kp	45
3.2 Tabel <i>rule</i> untuk nilai Ki	45
4.1 Nilai Kp dan Ki yang pada sistem MSRF-PI	55
4.2 Nilai Kp dan Ki yang dihasilkan oleh <i>fuzzy</i> pada sistem MSRF-STF .	56
4.3 Arus hasil pegujian sistem sebagai UPS pada beban resistif	58
4.4 Tegangan hasil pegujian sistem sebagai UPS pada beban resistif	60
4.5 Arus hasil pegujian sistem sebagai UPS pada beban induktif	67
4.6 Tegangan hasil pegujian sistem sebagai UPS pada beban induktif	69
4.7 Arus hasil pegujian sistem sebagai UPS pada beban <i>non linear</i>	72
4.8 Tegangan hasil pegujian sistem sebagai UPS pada beban <i>non linear</i> .	75
4.9 Hasil pegujian sistem sebagai kompensator faktor daya pada beban resistif.	78
4.10 Hasil pegujian sistem sebagai kompensator faktor daya pada beban induktif.	81
4.11 Hasil pegujian sistem sebagai kompensator faktor daya pada beban <i>nonlinear</i>	85
4.12 Hasil pengujian sistem sebagai kompensator power faktor	86
4.13 Hasil kompensasi arus harmonisa pada beban resistif	91
4.14 Hasil kompensasi arus harmonisa pada beban induktif	95
4.15 Hasil kompensasi arus harmonisa pada beban <i>non linear</i>	99
4.16 Hasil simulasi kontroler PI dengan Kp dan Ki keluaran fuzzy	100
4.17 Hasil keseluruhan simulasi	101

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 6-level	6
2.5 Rangkaian inverter tiga fasa dengan 6 <i>switch</i>	8
2.6 Gelombang konduksi 180 ⁰	8
2.7 Rangkaian ekivalen beban hubungan bintang saat mode 1	9
2.8 Rangkaian ekivalen beban hubungan bintang saat mode 2	9
2.9 Rangkaian ekivalen beban hubungan bintang saat mode 3	10
2.10 Tegangan fasa untuk konduksi 180 ⁰	10
2.11 Rangkaian SPWM	12
2.12 SPWM untuk inverter tiga fasa.....	12
2.13 Representasi linear naik.....	15
2.14 Representasi linear turun	15
2.15 kurva segitiga.....	16
2.16 Representasi kurva trapezium.....	16
2.17 kontrol PID- <i>Fuzzy Self Tuning</i>	19
2.18 Blok Diagram UPS	20
2.19 Blok rangkaian <i>off-line</i> (a) UPS biasa (b) dengan AVR.....	21
2.20 <i>Line-Interactive</i> UPS dengan <i>bidirectional</i> inverter.....	23
2.21 <i>Line-Interactive</i> UPS dengan dua konverter	23
2.22 Gelombang terdistorsi akibat harmonisa	28
2.23 Komponen urutan positif	29
2.24 Komponen urutan negatif	29
2.25 Komponen urutan nol	29

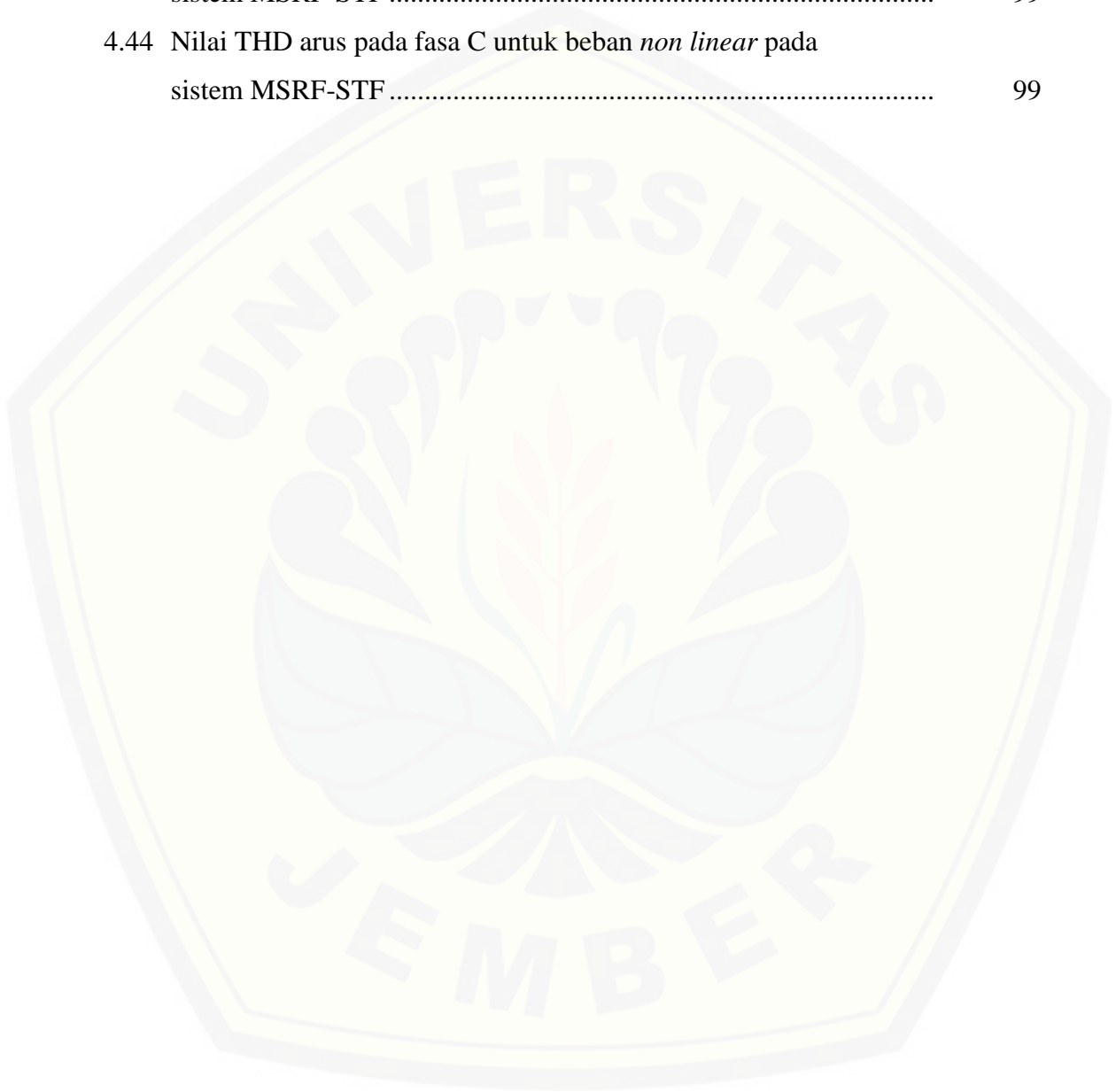
3.1	Bagan Alur Rancangan Penelitian	36
3.2	Desain sistem MSRF-STF	37
3.3	Pemodelan blok tegangan dan arus kedalam bentuk simetris (dekomposisi)	39
3.4	Blok <i>sequence decomposition</i> dan transformasi abc ke dq (a) untuk nilai tegangan (b) untuk nilai arus	40
3.5	<i>Self tuning fuzzy</i>	42
3.6	<i>fuzzy logic</i> yang digunakan pada MSRF-STF	43
3.7	<i>input error</i>	43
3.8	<i>input delta error</i>	44
3.9	<i>output variable "Kp"</i>	44
3.10	<i>output variable "Ki"</i>	44
3.11	Blok transformasi dq ke abc dan <i>sequence composition</i>	46
3.12	Pemodelan SPWM generator inverter	47
3.13	Pemodelan SPWM generator inverter	48
3.14	Pemodelan beban seimbang	50
3.15	Pemodelan beban induktif	50
3.16	Pemodelan beban nonlinier	52
3.17	Flowchart sistem MSRF-STF	53
3.18	Pemodelan sistem MSRF-STF pada matlab	54
3.19	Rangkaian Simulasi Sistem (a) tanpa pengendali (b) MSRF-PI	55
4.1	Kontroler PI pada sistem MSRF-PI	54
4.2	<i>Self tuning fuzzy controller</i> ketika dijalankan	56
4.3	Arus beban resistif pada sistem sebagai UPS (a) tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) Menggunakan MSRF-STF	61
4.4	Tegangan beban resistif pada sistem sebagai UPS (a) tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) Menggunakan MSRF-STF	63
4.5	Arus beban induktif pada sistem sebagai UPS (a) tanpa	

	pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) Menggunakan MSRF-STF	66
4.6	Tegangan beban induktif pada sistem sebagai UPS (a) tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) Menggunakan MSRF-STF	69
4.7	Arus beban <i>non linear</i> pada sistem sebagai UPS (a) tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) Menggunakan MSRF-STF	72
4.8	Tegangan beban <i>non linear</i> pada sistem sebagai UPS (a) tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) Menggunakan MSRF-STF	74
4.9	Grafik faktor daya pada fasa A untuk beban resistif, (a) system tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) menggunakan MSRF-STF	76
4.10	Grafik faktor daya pada fasa B untuk beban resistif, (a) system tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) menggunakan MSRF-STF	77
4.11	Grafik faktor daya pada fasa C untuk beban resistif, (a) system tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) menggunakan MSRF-STF	77
4.12	Grafik faktor daya pada fasa A untuk beban induktif, (a) system tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) menggunakan MSRF-STF	80
4.13	Grafik faktor daya pada fasa B untuk beban induktif, (a) system tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) menggunakan MSRF-STF	80
4.14	Grafik faktor daya pada fasa C untuk beban induktif, (a) system tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) menggunakan MSRF-STF	81

4.15	Grafik faktor daya pada fasa A untuk beban <i>non linear</i> , (a) system tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) menggunakan MSRF-STF	83
4.16	Grafik faktor daya pada fasa B untuk beban <i>non linear</i> , (a) sistem tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) menggunakan MSRF-STF.....	84
4.17	Grafik faktor daya pada fasa C untuk beban <i>non linear</i> , (a) system tanpa pengendali (b) menggunakan MSRF-PI (c) menggunakan MSRF-STF	84
4.18	Nilai THD arus pada fasa A untuk beban resistif pada sistem tanpa kendali.....	87
4.19	Nilai THD arus pada fasa B untuk beban resistif pada sistem tanpa kendali.....	87
4.20	Nilai THD arus pada fasa C untuk beban resistif pada sistem tanpa kendali.....	87
4.21	Nilai THD arus pada fasa A untuk beban resistif pada sistem MSRF-PI.	88
4.22	Nilai THD arus pada fasa B untuk beban resistif pada sistem MSRF-PI	88
4.23	Nilai THD arus pada fasa C untuk beban resistif pada sistem MSRF-PI	89
4.24	Nilai THD arus pada fasa A untuk beban resistif pada sistem MSRF-STF	89
4.25	Nilai THD arus pada fasa B untuk beban resistif pada sistem MSRF-STF	90
4.26	Nilai THD arus pada fasa C untuk beban resistif pada sistem MSRF-STF	90
4.27	Nilai THD arus pada fasa A untuk beban induktif pada sistem tanpa kendali.....	91

4.28	Nilai THD arus pada fasa B untuk beban induktif pada sistem tanpa kendali.....	92
4.29	Nilai THD arus pada fasa C untuk beban induktif pada sistem tanpa kendali.....	92
4.30	Nilai THD arus pada fasa A untuk beban induktif pada sistem MSRF-PI.	93
4.31	Nilai THD arus pada fasa B untuk beban induktif pada sistem MSRF-PI	93
4.32	Nilai THD arus pada fasa C untuk beban induktif pada sistem MSRF-PI	94
4.33	Nilai THD arus pada fasa A untuk beban induktif pada sistem MSRF-STF	94
4.34	Nilai THD arus pada fasa B untuk beban induktif pada sistem MSRF-STF	95
4.35	Nilai THD arus pada fasa C untuk beban induktif pada sistem MSRF-STF	95
4.36	Nilai THD arus pada fasa A untuk beban <i>non linear</i> pada sistem tanpa kendali.....	96
4.37	Nilai THD arus pada fasa B untuk beban <i>non linear</i> pada sistem tanpa kendali.....	96
4.38	Nilai THD arus pada fasa C untuk beban <i>non linear</i> pada sistem tanpa kendali.....	96
4.39	Nilai THD arus pada fasa A untuk beban <i>non linear</i> pada sistem MSRF-PI.	97
4.40	Nilai THD arus pada fasa B untuk beban <i>non linear</i> pada sistem MSRF-PI	97
4.41	Nilai THD arus pada fasa C untuk beban <i>non linear</i> pada sistem MSRF-PI	98
4.42	Nilai THD arus pada fasa A untuk beban <i>non linear</i> pada sistem	

MSRF-STF	98
4.43 Nilai THD arus pada fasa B untuk beban <i>non linear</i> pada sistem MSRF-STF	99
4.44 Nilai THD arus pada fasa C untuk beban <i>non linear</i> pada sistem MSRF-STF	99



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini permintaan energi listrik semakin besar, semakin tingginya permintaan listrik semakin besar pula tuntutan untuk menyuplai listrik yang memiliki kualitas daya dan keandalan sistem. Ada tiga komponen utama yang dapat mempengaruhi kualitas daya yaitu tegangan, arus, dan frekuensi. Pada kualitas daya yang baik nilai tegangan, arus, dan frekuensi selalu konstan. Namun pada kenyataannya sistem kelistrikan tidak dalam keadaan ideal, hal ini dikarenakan adanya suatu beban yang bersifat *non linear* (komponen semikonduktor). jika tegangan menyuplai beban linear (resistor, kapasitor, dan induktor) maka gelombang yang akan dihasilkan seharusnya berbentuk sinusoidal, akan tetapi jika beban yang disuplai bersifat *non linier* maka arus yang diserap tidak memiliki bentuk gelombang yang *non sinusoidal* dengan gelombang tegangan.

Akibat dari adanya beban *non linear* ini akan terjadi suatu gelombang yang tidak sinus (*non sinusoidal*), gelombang yang tidak sinus (*non sinusoidal*) akan mengandung harmonisa pada sistem. Dengan adanya harmonisa pada gelombang tersebut dapat mempengaruhi suatu peralatan listrik yang terpasang pada sistem. Akumulasi dari beban yang bersifat *non linear* yang jumlahnya banyak akan mengakibatkan arus saluran terdistorsi (Igna Dwijaya Saputra, 2015). 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 (Kurnia Dedy Setiawan, 2015).

Hal yang biasa dilakukan untuk mengurangi pengaruh dari harmonisa biasanya menggunakan filter pasif, dan dalam perkembangannya saat ini biasanya menggunakan filter aktif yang fungsinya tidak hanya mengurangi pengaruh dari harmonisa bahkan sekaligus dapat memperbaiki faktor daya pada sistem sekaligus akan mengoreksi beban yang tidak seimbang. Inverter biasanya digunakan untuk filter aktif yang cara kerjanya

yaitu dengan menginjeksikan anti-phase arus harmonisa sehingga akan menghilangkan pengaruh harmonisa (Hirofumi Akagi, 1996).

Pada penelitian yang sebelumnya sistem untuk pengendalian inverter tiga fasa menggunakan *Modified Synchronous Reference Frame* yang menggunakan proportional-integral (PI) sebagai kontrolnya dengan mengatur nilai konstanta K_p dan K_i secara coba-coba (*trial error*) kelemahan dari kontrol ini adalah lamanya waktu yang dibutuhkan untuk menentukan nilai K_p dan K_i secara tepat. Selain itu jika range kontrol melebihi batas kontrol PI pada sistem tiga fasa MSRF maka sistem perlu di tuning ulang dari luar sistem dan ketika mendapatkan nilai K_i dan K_p secara tepat maka kontrol akan dimasukkan lagi ke dalam sistem. Hal ini tentunya perlu penelitian lebih lanjut agar kontrol dari inverter tiga fasa MSRF berjalan sempurna.

Pada penelitian ini akan mengaplikasikan suatu sistem kontrol menggunakan *Self-Tuning Fuzzy PI Controller (STF)* menggunakan aplikasi Matlab yang akan mengontrol *switching* inverter tiga fasa untuk memperbaiki kualitas daya, mengurangi harmonisa, dan sekaligus sebagai pengendali inverter yang dapat menyuplai daya pada saat sistem terjadi gangguan (daya dari sistem terputus). Sasaran pada penelitian ini yaitu akan membandingkan performansi dari penggunaan MSRF-STF dengan MSRF-PI. Harapan penelitian ini dengan penerapan MSRF-STF akan dicapai hasil yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan MSRF-PI.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini permasalahan yang akan dibahas meliputi:

1. Bagaimana merancang MSRF-STF?
2. Bagaimana pengujian MSRF-STF dalam menyuplai daya secara kontinu pada saat jala jala terputus, mengkompensasi faktor daya, dan mengkompensasi *Total Harmonics Disrtortion (THD)*?
3. Bagaimana performansi MSRF-STF dengan MSRF-PI dalam penerapan kontrol pada inverter tiga fasa?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Perbaikan kualitas daya listrik yang dimaksudkan dalam penelitian ini adalah dilakukan disisi beban dan disisi sumber utama (PLN), dengan mekanisme *feedback* regulasi tegangan dan arus.
2. Tidak dilakukan pembahasan mendetail tentang proses *charging* dan juga mekanisme kontrol pada baterai, karena simulasi lebih diutamakan pada *normal mode* dan *backup mode* saat jaringan putus.
3. Penelitian ini difokuskan membahas disisi kontrol dari MSRF-STF.
4. MSRF-PI yang dimaksud merupakan model sistem MSRF yang menggunakan kontroler PI.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang sebuah kontrol *self tuning fuzzy PI controller* pada inverter tiga fasa yang menggunakan metode MSRF untuk dapat menyuplai daya pada beban pada saat sistem terjadi gangguan (jala jala jaringan terputus), untuk perbaikan faktor daya pada sistem, serta mengkompensasi gelombang harmonisa.

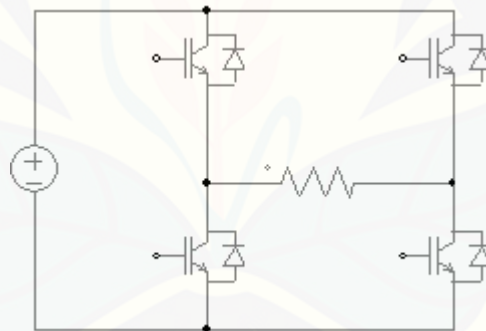
1.5 Manfaat

Manfaat yang di harapkan dari penelitian ini yaitu dapat membuat suatu sistem inverter tiga fasa yang di kontrol secara MSRF-STF untuk membuat sistem dengan kualitas daya yang baik serta dapat meredam THD yang ditimbulkan oleh beban *non linear* sekaligus menjaga peralatan listrik yang sensitif terhadap perubahan tegangan dan arus sehingga peralatan listrik tersebut tidak mudah rusak.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

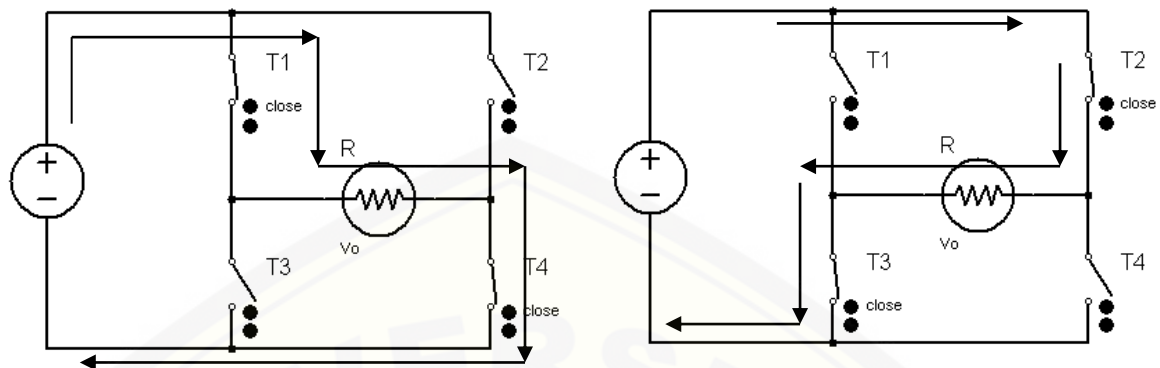
2.1 Inverter

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 keduanya. 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)*, transmisi daya *HVDC* (Budi Novian Syah, 2015).



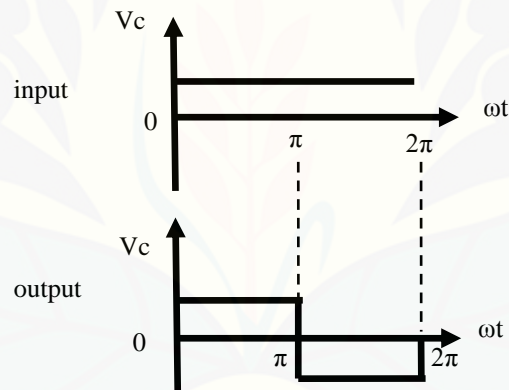
Gambar 2.1 Rangkaian inverter satu fasa

Prinsip kerja inverter satu fasa secara sederhana dapat digambarkan pada Gambar 2.1 empat buah *switch* (T_1 sampai T_4) akan diatur penyalannya, 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 2.1. 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.

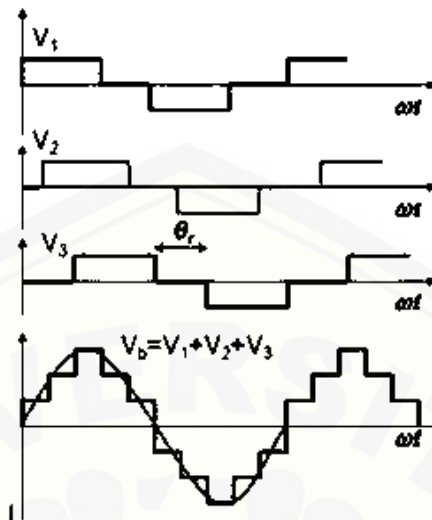


Gambar 2.2 Cara kerja inverter satu fasa

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

Gambar 2.3 *Input* dan *output* inverter

Dari gambar 2.3 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 2.4 menunjukkan inverter *six step* yang dikontrol dengan teknik pensaklaran PWM.



Gambar 2.4 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

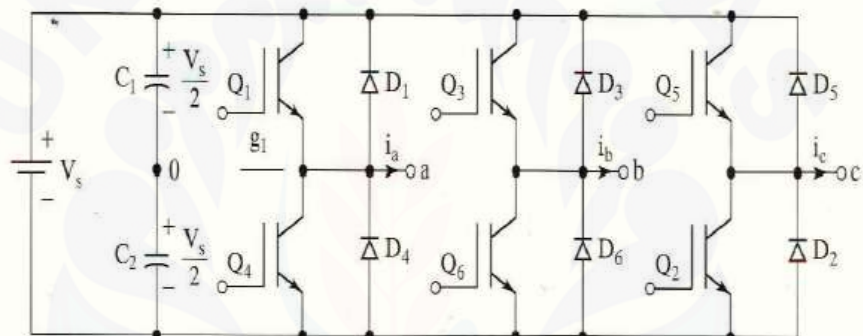
$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0.9V_s \quad (2.3)$$

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.

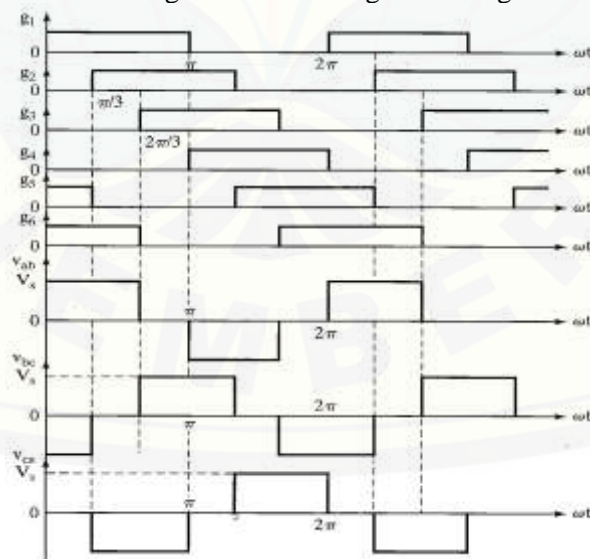
Dengan konfigurasi yang lebih ringkas, sebuah inverter tiga fasa dapat dibuat dengan konfigurasi yang hanya memerlukan 6 buah *switch*, sebagaimana rangkaian yang terlihat pada gambar 2.5. Jika dibandingkan dengan konfigurasi sebelumnya maka dapat diketahui bahwa jumlah *switch* yang diperlukan adalah 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 2.6 menunjukkan gelombang konduksi 180° . Sedangkan gambar 2.7, 2.8 dan 2.9 menunjukkan rangkaian ekuivalen dari setiap mode konduksi. Dan gambar 2.10 menunjukkan gelombang tegangan *output* inverter 3 fasa yang menggunakan gelombang konduksi 180° .



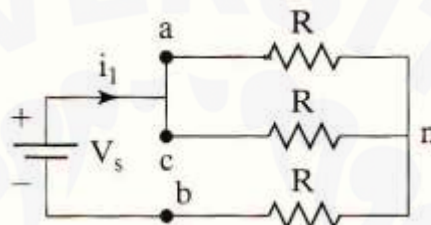
Gambar 2.5 Rangkaian inverter tiga fasa dengan 6 switch



Gambar 2.6 Gelombang konduksi 180°
(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 2.7 Rangkaian ekivalen beban hubungan bintang saat mode 1

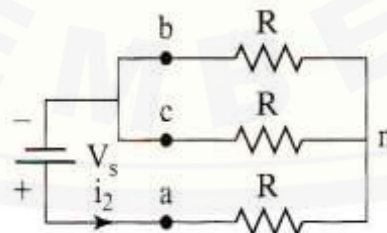
$$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2} \quad (2.4)$$

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

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

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

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



Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen beban hubungan bintang saat mode 2

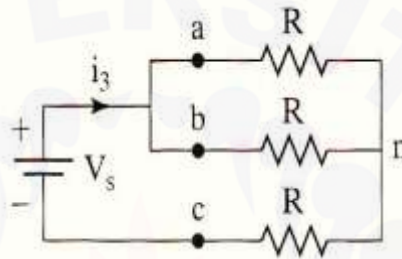
$$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2} \quad (2.8)$$

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

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

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

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



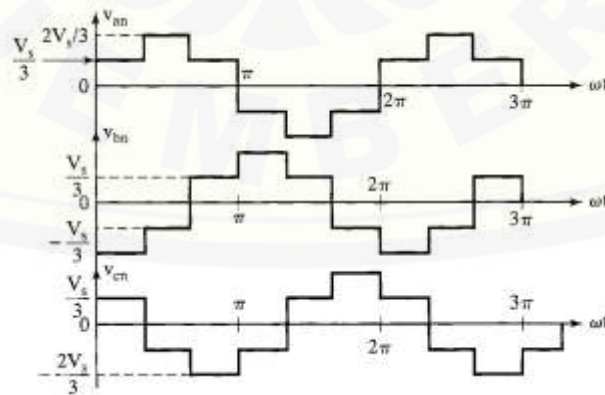
Gambar 2.9 Rangkaian ekivalen beban hubungan bintang saat mode 3

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

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

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

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



Gambar 2.10 Tegangan fasa untuk konduksi 180°
(sumber: Ntoni, 2012)

Tegangan *line to line* rms-nya ditunjukkan pada persamaan 2.17

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

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

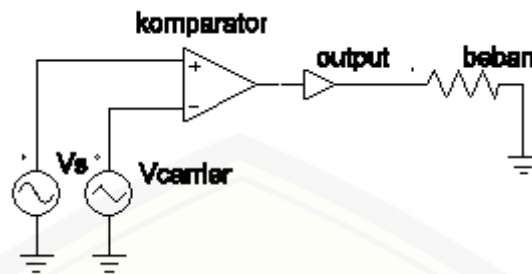
$$V_{L1} = \frac{4V_s \sin 60^\circ}{\sqrt{2\pi}} = 0,7797V_s \quad (2.18)$$

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

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

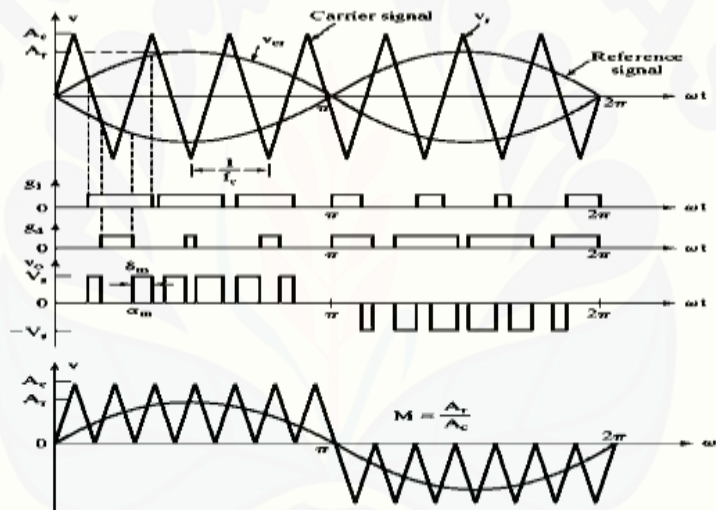
2.1.2 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

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*. Rangkain SPWM dapat ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.11 Rangkaian SPWM

Pengontrolan sinyal *gate* dengan menggunakan SPWM ditunjukkan pada Gambar 2.12. Sinyal *gate* merupakan sinyal yang mentrigger IGBT untuk membuat tegangan *sequer* menjadi sinusoidal.

Gambar 2.12 SPWM untuk inverter tiga fasa
(Sumber: Azuan, 2007)

Pada Gambar 2.12 di atas dapat dilihat bahwa ada tiga gelombang sinusoidal yang berbeda fasa 120° 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 Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* adalah suatu cara yang tepat untuk memetakan suatu ruang input kedalam suatu ruang output. Titik awal dari konsep modern mengenai ketidakpastian adalah paper yang dibuat oleh Lofti A Zadeh (1965), dimana Zadeh memperkenalkan teori yang memiliki obyek-obyek dari himpunan *fuzzy* yang memiliki batasan yang tidak presisi dan keanggotaan dalam himpunan *fuzzy*, dan bukan dalam bentuk logika benar (*true*) atau salah (*false*), tapi dinyatakan dalam derajat (*degree*). Konsep seperti ini disebut dengan *Fuzziness* dan teorinya dinamakan *Fuzzy Set Theory*. *Fuzziness* dapat didefinisikan sebagai logika kabur berkenaan dengan semantik dari suatu kejadian, fenomena atau pernyataan itu sendiri. Seringkali ditemui dalam pernyataan yang dibuat oleh seseorang, evaluasi dan suatu pengambilan keputusan.

Fuzzy system (sistem kabur) didasari atas konsep himpunan kabur yang memetakan domain input kedalam domain output. Perbedaan mendasar himpunan tegas dengan himpunan kabur adalah nilai keluarannya. Himpunan tegas hanya memiliki dua nilai output yaitu nol atau satu, sedangkan himpunan kabur memiliki banyak nilai keluaran yang dikenal dengan nilai derajat keanggotaannya.

Logika *fuzzy* adalah peningkatan dari logika Boolean yang berhadapan dengan konsep kebenaran sebagian. Dimana logika klasik (*crisp*) menyatakan bahwa segala hal dapat diekspresikan dalam istilah *binary* (0 atau 1, hitam atau putih, ya atau tidak). Logika *fuzzy* menggantikan kebenaran Boolean dengan tingkat kebenaran. Logika *fuzzy* memungkinkan nilai keanggotaan antara 0 dan 1, tingkat keabuan dan juga hitam dan putih, dan dalam bentuk *linguistic*, konsep tidak pasti seperti “sedikit”, “lumayan”, dan “sangat”. Logika ini diperkenalkan oleh Dr. Lotfi Zadeh dari Universitas California, Barkeley pada tahun 1965. Logika *fuzzy* telah digunakan pada bidang-bidang seperti taksonomi, topologi, linguistik, teori automata, teori pengendalian, psikologi, pattern recognition, pengobatan, hukum, decision analysis, system theory and information retrieval. Pendekatan *fuzzy* memiliki kelebihan pada hasil yang terkait dengan sifat kognitif manusia, khususnya pada situasi yang

melibatkan pembentukan konsep, pengenalan pola, dan pengambilan keputusan dalam lingkungan yang tidak pasti atau tidak jelas.

Ada beberapa alasan mengapa orang menggunakan logika *fuzzy* (Kusumadewi S, Purnomo H, 2010) antara lain:

1. Konsep logika *fuzzy* mudah dimengerti. Konsep matematis yang mendasari penalaran *fuzzy* sangat sederhana dan mudah dimengerti.
2. Logika *fuzzy* sangat fleksibel.
3. Logika *fuzzy* memiliki toleransi terhadap data-data yang tidak tepat.
4. Logika *fuzzy* mampu memodelkan fungsi-fungsi nonlinear yang sangat kompleks.
5. Logika *fuzzy* dapat membangun dan mengaplikasikan pengalaman-pengalaman para pakar secara langsung tanpa harus melalui proses pelatihan.
6. Logika *fuzzy* dapat bekerjasama dengan teknik-teknik kendali secara konvensional.
7. Logika *fuzzy* didasarkan pada bahasa alami

2.2.1 Fungsi keanggotaan

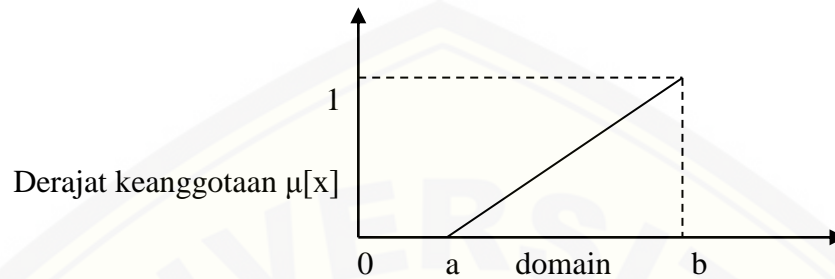
Fungsi keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik *input* data kedalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui pendekatan fungsi. Apabila U menyatakan himpunan universal dan A adalah himpunan fungsi *fuzzy* dalam U , maka A dapat dinyatakan sebagai pasangan terurut (Wang, 1997 dari Wulandari, F., 2005). Ada beberapa fungsi yang bisa digunakan.

a. Representasi Linear

Pada representasi linear, pemetaan input ke derajat keanggotaannya digambarkan sebagai suatu garis lurus. Bentuk ini paling sederhana dan menjadi pilihan yang baik untuk mendekati suatu konsep yang kurang jelas.

Ada 2 keadaan himpunan *fuzzy* yang *linear*. Pertama, kenaikan himpunan dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan nol(0) bergerak ke

kanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi (Kusumadewi S, Purnomo H, 2010). Seperti terlihat pada gambar 2.13.

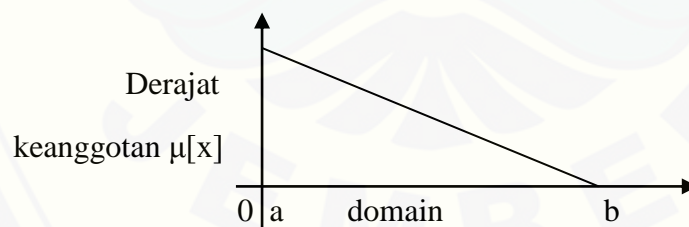


Gambar 2.13 Representasi linear naik

Fungsi keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ (x-a) / (b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; x \geq b \end{cases} \quad (2.20)$$

Kedua, merupakan kebalikan dari yang pertama. Garis lurus dimulai dari nilai domain dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri, kemudian bergerak menurun ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih rendah. Seperti terlihat pada gambar 2.14.



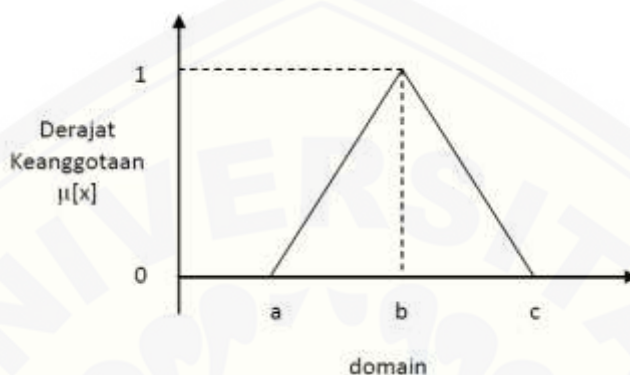
Gambar 2.14 Representasi linear turun

Fungsi keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0 & ; x \geq b \\ (b-x) / (b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; x \leq a \end{cases} \quad (2.21)$$

b. Representasi kurva segitiga

Kurva segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis (*linear*). Seperti terlihat pada gambar 2.15.



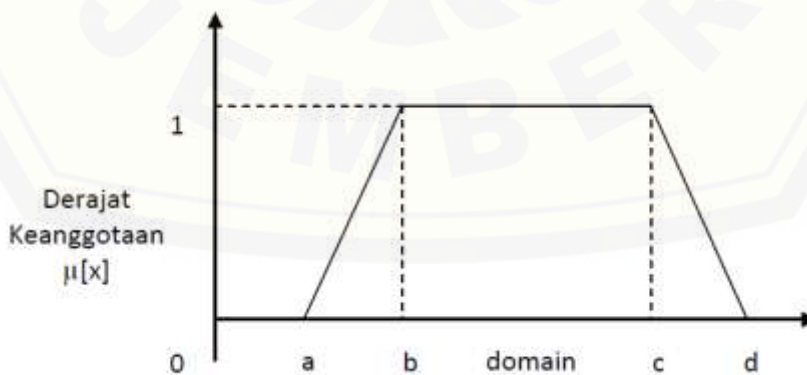
Gambar 2.15 kurva segitiga

Fungsi Keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0 & ; x \geq c \text{ atau } x \leq a \\ (x-a) / (b-a) & ; a < x < b \\ (c-x) / (c-b) & ; b < x < c \end{cases} \quad (2.22)$$

c. Representasi kurva trapezium

Kurva trapesium pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja ada titik yang memiliki nilai keanggotaan 1. Seperti terlihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Representasi kurva trapezium

Fungsi keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0 & ; x \geq d \text{ atau } x \leq a \\ (x-a) / (b-a) & ; a < x < b \\ (d-x) / (d-c) & ; c < x < d \\ 1 & ; b \leq x \leq c \end{cases} \quad (2.23)$$

2.3 PID Self Tuning Fuzzy Logic

Kontroler PID (*Proportional – Integral – Derivative*) merupakan kombinasi dari tiga jenis kontroler. Jika masing-masing dari ketiga jenis kontroler tersebut berdiri sendiri maka hasil yang dicapai akan kurang baik sebab masing-masing memiliki kelemahan maupun kelebihan sendiri-sendiri.

Apabila dikombinasikan ketiga jenis kontroler tersebut menjadi sistem kontrol tunggal, diharapkan memberikan kontribusi dari kelebihan masing-masing. Kontrol *proportional* adalah suatu penguat linier yang dapat diatur penguatannya. Hubungan antara keluaran $u(t)$ dan sinyal kesalahan $e(t)$ adalah :

$$u(t) = K_P e(t) \quad (2.24)$$

Dimana : $K_P = \text{gain proportional}$

$u(t) = \text{sinyal aksi kontrol}$

$e(t) = \text{Sinyal error}$

Kontrol *Proportional-Integral* (PI) merupakan perubahan keluaran kontrol gabungan *proportional* dan *integral* $u(t)$ berubah dengan fungsi yang sebanding dengan sinyal error. Hubungan antara keluaran kontroler $u(t)$ dan sinyal eror $e(t)$ adalah :

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{K_I} \int_0^t e(t) dt \quad (2.25)$$

Dimana : $T_i = \text{waktu integral}$

Terapan waktu *integral* T_i mengatur aksi kontrol *integral*, sedangkan K_P memperkuat bagian *proportional* maupun bagian *integral* dari aksi kontrol. Terapan

T_i disebut laju reset. Laju reset adalah adalah banyaknya pengulangan bagian *proportional* dari aksi pengontrolan per detik. Kontrol *Proportional-Derivative* (PD) didefinisikan sebagai berikut :

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de}{dt}(t) \quad (2.26)$$

Dimana : T_d = Terapan waktu *derivative*

Kontrol *derivative* sering disebut kontrol laju (*rate control*), karena besar keluaran *controller* sebanding dengan laju perubahan sinyal kesalahan. Terapan waktu turunan T_d adalah selang waktu bertambah majunya respon kontrol *proportional* yang disebabkan oleh aksi aksi laju (*rate action*).

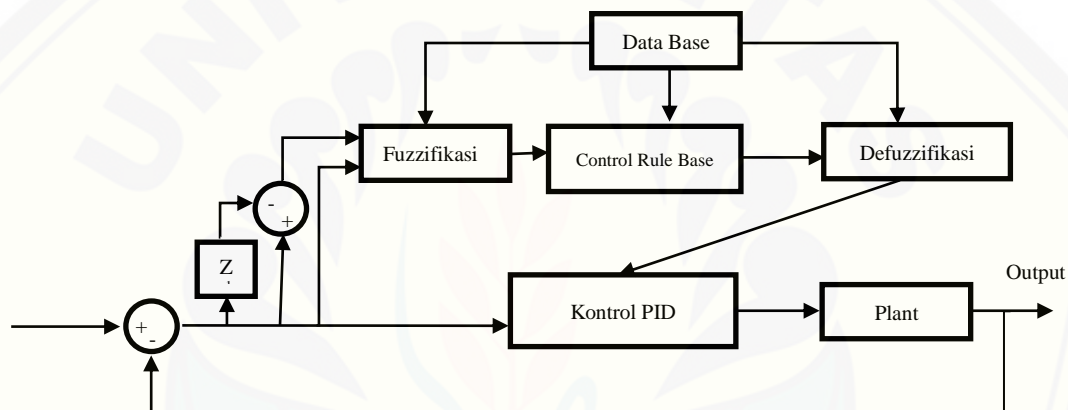
Kontroller *Proportional-Integral-Derivative* (PID), merupakan kombinasi dari kontrol *proportional*, kontrol *integral* dan kontrol *derivative*. Gabungan kontrol ini mempunyai keunggulan dalam memperbaiki kesalahan sinyal dibandingkan dengan masing-masing dari tiga jenis kontroller tersebut. Persamaan kontroller PID diberikan dalam persamaan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{K_I} \int_0^t e(t) dt \quad (2.27)$$

Untuk memenuhi system yang diinginkan maka ketiga parameter PID harus ditetapkan secara optimal. Ada beberapa cara untuk menentukan parameter tersebut, diantaranya adalah metode coba-coba (*cut and try method*), metode *Ziegler-Nichols*, metode tanggapan (*step respons*), dan metode analitik.

PID kontroler konvensional hanya dapat mengolah *error* secara apa adanya, artinya *error* diolah secara *deterministic*, misalnya dikalikan secara proporsional, di integralkan, di differensialkan. Disimpan beberapa saat untuk selanjutnya digunakan untuk sinyal kontrol berikutnya. Kontrol PID konvensional hanya tepat pada *plant* yang linier dan tidak terjadi perubahan beban, sedangkan untuk beban berubah perlu merubah parameter K_p , K_i dan K_d .

Kontrol PID-*Fuzzy Self Tuning* bekerja dengan menerima sinyal dari sensor sebagai output dari plant yang telah terkontrol. Sinyal tersebut kemudian dibandingkan dengan *set point* sehingga menghasilkan error yang baru. Selanjutnya mencari kwantisasi dari error dan delta berdasarkan tabel kwantisasi yang telah dibuat sebelumnya. Nilai kwantisasi kemudian dijadikan dalam nilai-nilai *Fuzzy* melalui proses *fuzzifikasi* yang akan menghasilkan derajat keanggotaan dari error dan delta error. Adapun diagram blok kontrol PID – *Fuzzy Self Tuning* dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.17 kontrol PID-*Fuzzy Self Tuning*.

Proses selanjutnya membandingkan antara derajat keanggotaan dari sinyal estimasi a dan b . Derajat keanggotaan yang terkecil dipilih sebagai derajat keanggotaan untuk sinyal kontrol dalam hal ini adalah nilai K_p (T_i dan T_d constant) dengan menggunakan rumus yang telah ada harga K_p yang masih dalam bentuk *fuzzy* dirubah menjadi harga sebenarnya melalui proses *Defuzzifikasi*. Untuk mendapatkan sinyal kontroler maka harga K_p , K_i dan K_d dimasukkan dalam rumus PID (Tatang Sukendar, 2007)

2.4 Uninterruptible Power Supply (UPS)

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

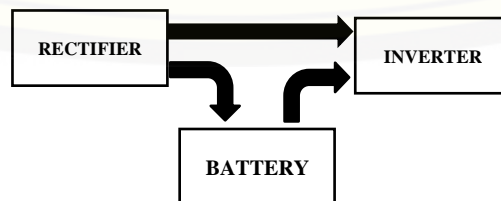
(PLN) mengalami gangguan atau kegagalan. Komponen-Komponen dalam UPS pada umumnya ada 3 macam, yaitu:

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 2.18.

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 2.18 Blok Diagram UPS

2.4.1 Macam Topologi UPS

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

2.4.1.1 *Off-Line*

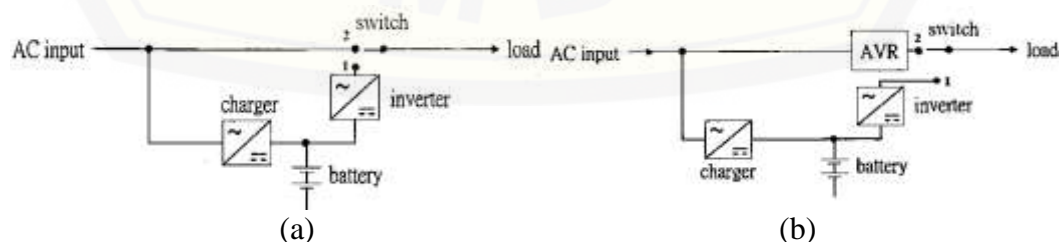
Prinsip dasar dari UPS ini adalah diilustrasikan pada gambar 2.19. Inverter dihubungkan paralel terhadap beban dan bekerja secara sederhana untuk menyalurkan daya listrik beban. Mode operasi dari offline UPS ini dibagi menjadi 2 mode yaitu sesuai dengan posisi *switch* yaitu :

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 2.19 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.

2.4.1.2 Line-Interactive UPS

Rangkaian UPS jenis ini dapat ditunjukkan pada gambar 2.20 dan gambar 2.21. Pada gambar 2.20 UPS jenis ini memerlukan induktor yang dipasang secara seri pada input dan bilateral inverter yang dipasang secara paralel dengan beban. Sedangkan pada gambar 2.21 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

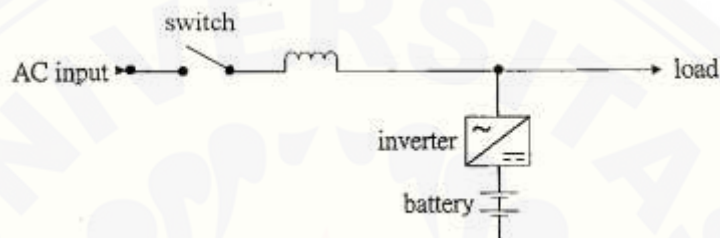
Pada mode ini, beban disuplai oleh sumber AC dari PLN. Pada saat ini juga baterai mengalami charge atau pengisian energi listrik melalui inverter bidirectional pada gambar 2.20 sedangkan pada gambar 2.21 pengisian disuplai oleh sebuah konverter yang dihubungkan seri.

b. *Back Up / Stored Energy mode*

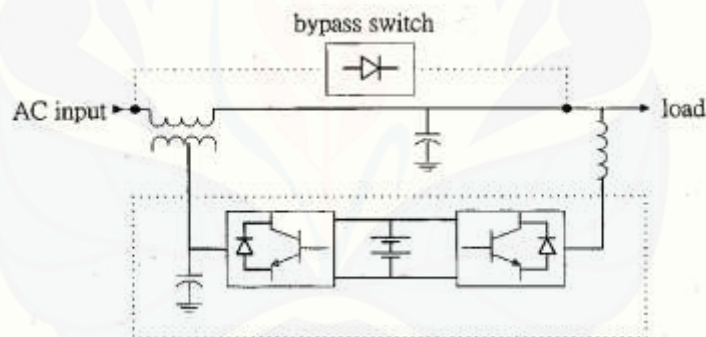
Ketika tegangan AC pada input UPS diluar spesifikasi tegangan yang diperbolehkan, tegangan DC pada baterai akan menggantikan sebagai penyuplai daya pada beban dengan diubah menjadi tegangan AC oleh inverter. Pada mode ini *switch* pada input akan open sehingga arus listrik tidak akan mengalir ke sumber 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 2.20 *Line-Interactive* UPS dengan *bidirectional* inverter
(sumber : IGNA, 2003)

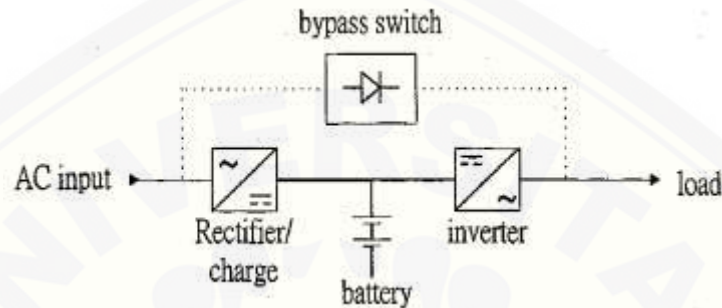


Gambar 2.21 *Line-Interactive* UPS dengan dua konverter
(sumber : Saputra, IGNA Dwijaya, 2003)

2.4.1.3 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 performansi yang paling baik dari pada jenis UPS yang lain, tetapi biaya pembuatannya paling besar diantara yang lainnya. Gambar 2.22 menunjukkan rangkaian dari *online UPS*.



Gambar 2.22 Blok rangkaian *online UPS*
(Sumber: Tzou, 2005)

2.4.2 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.

2.5 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.

2.5.1 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 μ 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.

2.5.2 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 $\pm 1,5\%$. (standar 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.

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.

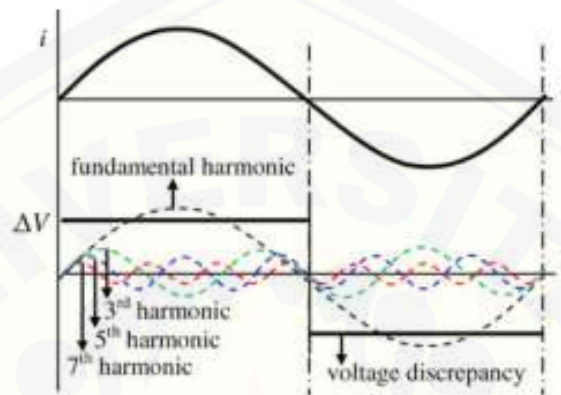
2.5.3 Harmonisa

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

2.5.3.1 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 2.23 Gelombang Terdistorsi Akibat Harmonisa
(sumber : xiang, 2012)

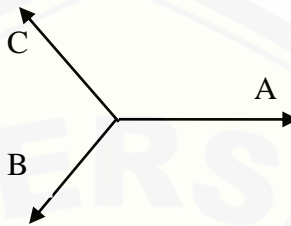
Pada gambar 2.23 telah diketahui bahwa gelombang menunjukkan gelombang sinusoidal pada frekuensi fundamental, gelombang harmonisa pada orde ke-3, gelombang harmonisa orde ke-5 dan gelombang total yang terdistorsi harmonisa.

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.

$$I_R(t) = I_1 \sin \omega t + I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t + \dots \quad (2.28)$$

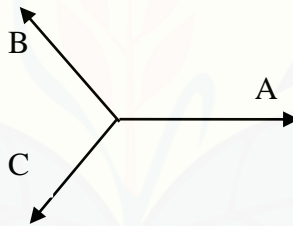
Pada sistem tiga fasa seimbang, jika diasumsikan urutan fasanya a-b-c berarti putaran fasornya adalah fasa a akan datang terlebih dahulu, dilanjutkan fasa b, dan yang terakhir adalah fasa c. Urutan ini dikenal sebagai komponen urutan positif

(*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



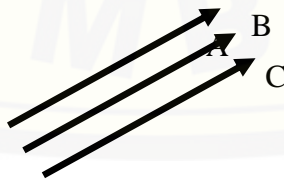
Gambar 2.24 Komponen urutan positif

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:

$$\left. \begin{aligned} V_{ah} &= \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \sin(h\omega t) \\ V_{bh} &= \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \sin\left(h\omega t - \frac{2 \cdot h \cdot \pi}{3}\right) \\ V_{ch} &= \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \sin\left(h\omega t + \frac{2 \cdot h \cdot \pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Sebagai contoh berikut ini diambil tiga orde harmonisa, yaitu :

1) Harmonisa orde ketiga

$$i_{a3} = I_{a3} \cdot \sin 3\omega t \quad (2.30)$$

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

$$i_{b3} = I_{b3} \cdot \sin 3\omega t \quad (2.31)$$

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

$$i_{c3} = I_{c3} \cdot \sin 3\omega t \quad (2.32)$$

Dari persamaan (2.30), (2.31) dan (2.32) 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

$$i_{a5} = I_{a5} \cdot \sin 5\omega t \quad (2.33)$$

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

$$i_{b5} = I_{b5} \cdot \sin(5\omega t - 240^\circ) \quad (2.34)$$

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

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

$$i_{c5} = I_{c5} \cdot \sin(5\omega t - 120^\circ) \quad (2.35)$$

Dari persamaan (2.33), (2.34), dan (2.35) 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

$$i_{a7} = I_{a7} \cdot \text{Sin}7\omega t \quad (2.36)$$

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

$$i_{b7} = I_{b7} \cdot \text{Sin}(7\omega t - 120^\circ) \quad (2.37)$$

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

$$i_{c7} = I_{c7} \cdot \text{Sin}(7\omega t - 240^\circ) \quad (2.38)$$

Dari persamaan (2.36), (2.37), dan (2.38) 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.

Tabel 2.1 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:

a. 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).

b. 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. Meningkatkan 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.

2.5.3.2 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 :

$$THD = \frac{\left[\sum_{n=2}^k U_n \right]^{\frac{1}{2}}}{U_1} \times 100\% \quad (2.39)$$

U_n = komponen harmonisa

U_1 = komponen fundamental

k = komponen harmonisa maksimum yang diamati

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 2.3.

Tabel 2.2 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

Tabel 2.3 Standar Distorsi Harmonisa Arus berdasarkan Standar IEEE Distorsi Arus Harmonik Maksimum Dalam % Nilai Fundamental

Isc/IL	THD
<20	5.0
20 - 50	8.0
50 – 100	12.0
100 – 1000	15.0
>1000	20.0
T H D = total harmonic distorstion	
Isc = arus hubung singkat maksimum	
IL arus beban maksimum	

Index harmonik yang selalu digunakan adalah :

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \text{atau} \quad \text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.40)$$

Persamaan 2.40 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 .

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Simulasi dengan MATLAB

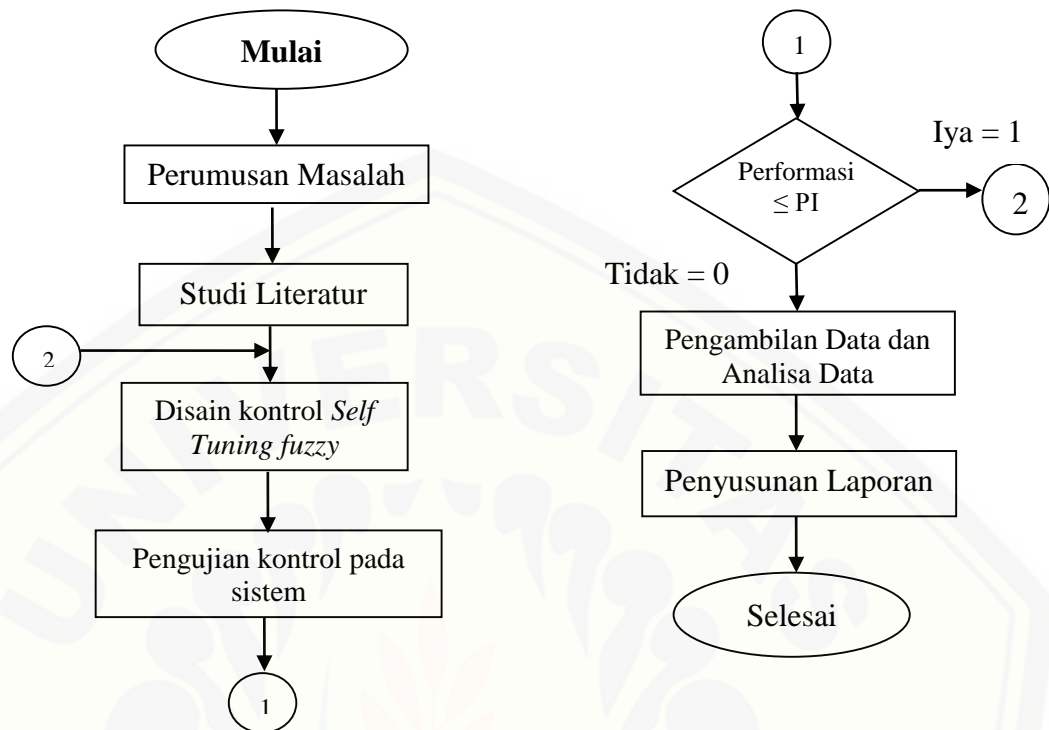
Simulasi pengendalian inverter MSRF-STF dengan menggunakan MATLAB secara umum dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pemodelan sistem pengendalian inverter MSRF-STF 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 *Self Tuning Fuzzy* untuk membuat *error* tegangan menjadi seimbang dan mengkonversikan tegangan menjadi arus referensi.
4. Melakukan simulasi pengujian UPS, kompensator power faktor, dan kompensator harmonisa pada sistem dengan beban bervariasi yaitu beban resistif seimbang, induktif, dan *non linear*.
5. Analisis hasil simulasi dan membuat kesimpulan.

3.2 Desain Penelitian

3.2.1 Flowchart Penelitian

Berikut ini merupakan diagram alir (*Flowchart*) penelitian tentang Pengendalian Inverter Tiga Fasa Sebagai UPS, Kompensator Harmonisa, Dan Faktor Daya Pada Metode *Modified Synchronous Reference Frame* Dengan Menggunakan *Self Tuning Fuzzy PI Controller*. Untuk alur rancangan penelitian bisa dilihat pada gambar 3.1 sebagai berikut.

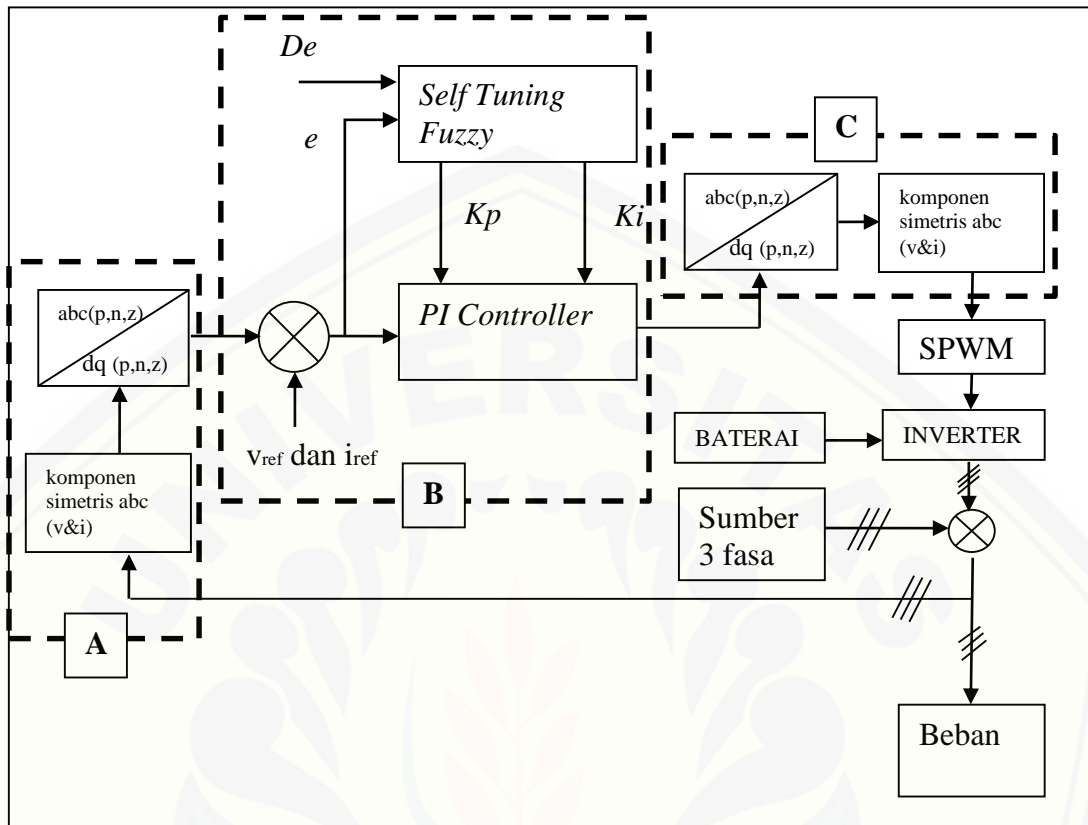


Gambar 3.1 Bagan Alur Rancangan Penelitian

Dari gambar 3.1 dapat dijelaskan bahwa alur rancangan penelitian dimulai dari perumusan masalah yang akan diteliti, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur, dari studi literatur tersebut akan dilanjutkan dengan disain kontrol STF, setelah disain kontrol selesai maka akan dilakukan pengujian sistem dan akan di analisa apakah sistem yang dibuat error atau tidak, bila sistem yang dibuat error maka akan dilakukan disain ulang kontrol STF dan bila sistem tidak error maka akan dilakukan pengambilan data dan Analisa data, dan terakhir penyusunan laporan.

3.2.2 Desain Sistem

Pada penelitian inverter tiga fasa MSRF-STF ini dapat diketahui blok desain sistem seperti gambar 3.2 sebagai berikut :



Gambar 3.2 Desain sistem MSRF-STF

Dari gambar 3.2 mengenai desain sistem MSRF-STF terbagi dalam blok-blok, untuk penjelasan mendetail mengenai desain sistem dapat dilihat dari penjelasan sebagai berikut.

3.2.2.1 MSRF (*Modified Synchronous Reference Frame*).

Pada tahap ini dapat dilihat pada gambar 3.2 pada bagian blok A yaitu fasa abc dari grid di ubah kedalam bentuk komponen simetrisnya (dekomposisi) yaitu ke dalam bentuk positif, negatif, dan zero.

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. Dalam penentuan nilai v_a , v_b dan v_c pada sistem digunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_a = v_{a(+)} + v_{a(-)} + v_{a(0)} \quad (3.1)$$

$$v_b = v_{b(+)} + v_{b(-)} + v_{b(0)} \quad (3.2)$$

$$v_c = v_{c(+)} + v_{c(-)} + v_{c(0)} \quad (3.3)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BC} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{AN,p} + & V_{AN,n} + & V_{AN,z} \\ V_{BN,p} + & V_{BN,n} + & V_{BN,z} \\ V_{CN,p} + & V_{CN,n} + & V_{CN,z} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Penentuan komponen urutan positif dan komponen urutan negatif. Untuk mempermudah mentransformasi abc ke dq digunakan 90° *phase shift operator*. Sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut (Kurnia, Setiawan Dedy, 2015):

$$V_p(t) = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0,5 & -0,5 \\ -0,5 & 1 & -0,5 \\ -0,5 & -0,5 & 1 \end{bmatrix} X_1(t) - \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} X_2(t) \quad (3.5)$$

$$V_n(t) = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0,5 & -0,5 \\ -0,5 & 1 & -0,5 \\ -0,5 & -0,5 & 1 \end{bmatrix} X_1(t) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} X_2(t) \quad (3.6)$$

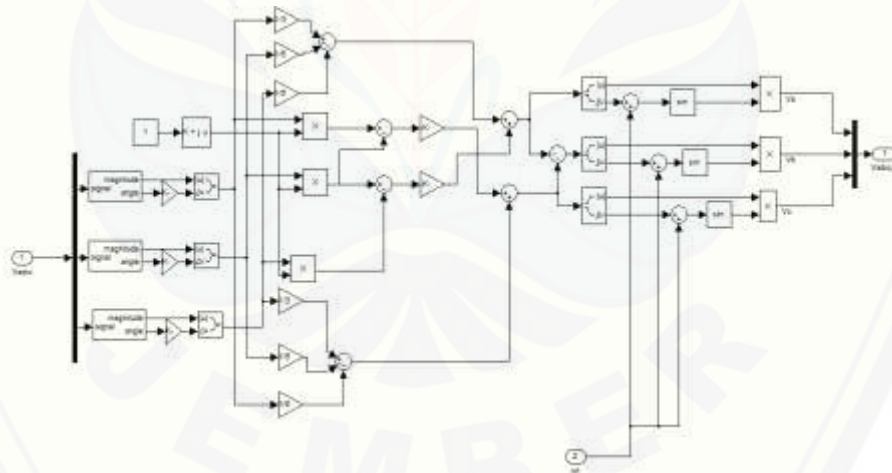
$$V_z(t) = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -0,5 & -0,5 & -0,5 \\ -0,5 & -0,5 & -0,5 \end{bmatrix} X_1(t) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} X_2(t) \quad (3.7)$$

Dengan,

$$X_1(t) = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}; X_2(t) = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

- $X_1(t)$ = sinyal input fundamental untuk variable tegangan V maupun arus I.
- $X_2(t)$ = sinyal input fundamental yang digeser 90°

Dengan persamaan 3.5, 3.6 dan 3.7 dapat dijadikan diagram blok pada MATLAB untuk mengurutkan komponen simetrinya. Sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.3 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 3.3 Pemodelan blok tegangan dan arus kedalam bentuk simetris (dekomposisi).

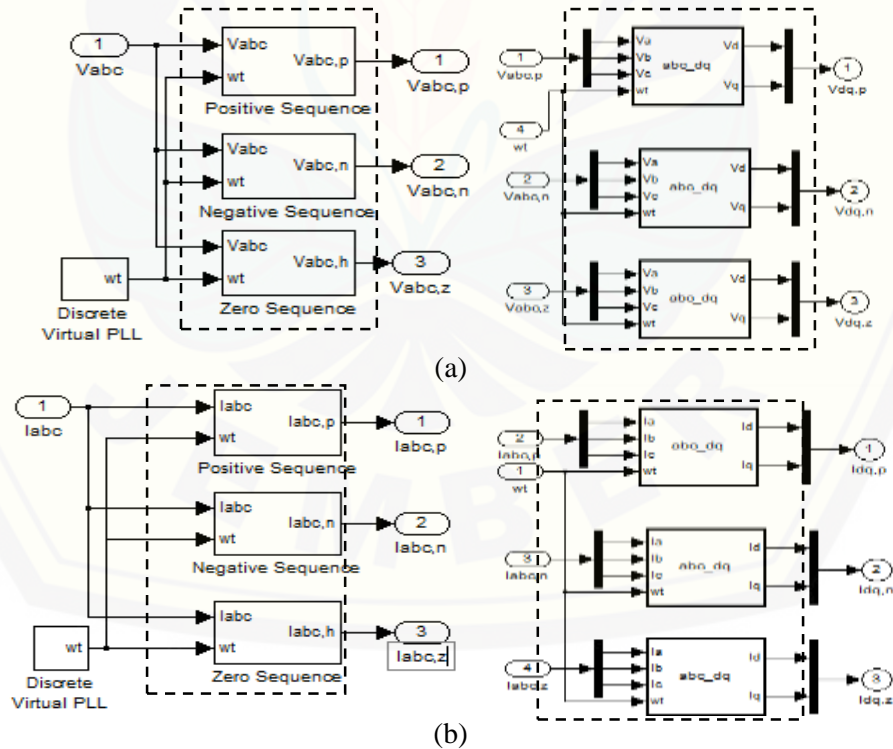
Pada pemodelan blok tegangan dan arus kedalam bentuk semetrisnya (dekomposisi) seperti pada gambar 3.3 masing-masing urutan komponen positif, negatif, dan zero memiliki blok pemodelan tersendiri. Setiap pemodelan untuk ketiga bentuk simetrisnya memiliki pemodelan yang sama seperti pada gambar 3.3 perbedaan

dari ketiga pemodelan hanya pada nilai konstanta yang digunakan, dimana konstanta untuk urutan positif dikalikan dengan 1, untuk urutan negatif dikalikan dengan -1, dan untuk urutan zero mengikuti urutan yang negatif yaitu dikalikan dengan -1.

Kemudian masuk ke tahap synchronous reference frame yaitu tahap pengubahan fasa abc ke dalam koordinat dq (transformasi). Agar dapat ditransformasikan dari abc ke dalam dq digunakan persamaan (3.8) berikut ini (Kundur, 1994):

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Semua persamaan yang digunakan dalam mentransformasikan abc ke dq itu diubah dengan variabel i , maka persamaan itu dapat berlaku untuk arus. Ketika kedua tahap ini digabungkan yaitu tahap dekomposisi dan tahap transformasi maka sistem ini dinamakan MSRF.



Gambar 3.4 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)

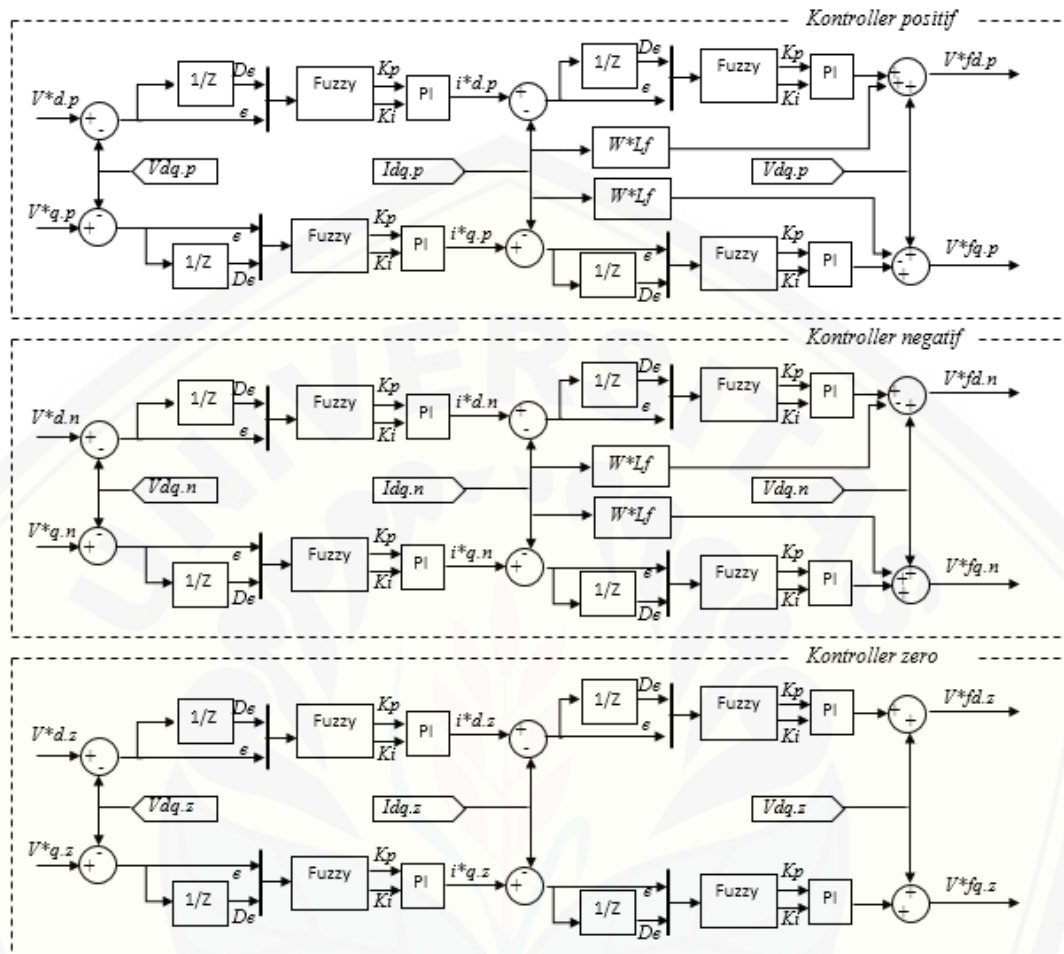
Vd= 2/3*(Va*sin(wt)+ Vb*sin(wt-(2*pi/3))+ Vc*sin(wt+(2*pi/3)));
Vq= 2/3*(Va*cos(wt)+ Vb*cos(wt-(2*pi/3))+ Vc*cos(wt+(2*pi/3)));
```

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.

3.2.2.2. Self Tuning Fuzzy (STF)

Pada tahap ini dapat dilihat pada gambar 3.2 pada bagian blok B yaitu tahap pengontrolan untuk mendapatkan respon yang tepat dan cepat dari sistem diperlukan *error* kompensator yang dalam hal ini dipilih kontroler *Self Tuning Fuzzy* (STF). *Error* dihasilkan dengan membandingkan tegangan referensi yang dalam hal ini adalah nilai *virtual dq* dengan tegangan dan arus hasil pengukuran aktual. Kontrol akan mengolah selisih perbedaan tegangan menjadi besaran yang digunakan untuk kompensasi agar tegangan menjadi normal kembali.

Kontroler ini terdiri dari sistem *fuzzy* yang didesain secara khusus untuk mendapat nilai K_p dan K_i secara tepat dengan membandingkan nilai *error* dan *delta error*. Nilai keluaran dari *fuzzy* akan di injeksikan ke kontroler PI. Nilai K_p dan K_i secara tepat akan menentukan keluaran hasil respon yang sesuai. Berikut *self tuning fuzzy* seperti yang ditunjukkan gambar 3.5 sebagai berikut.



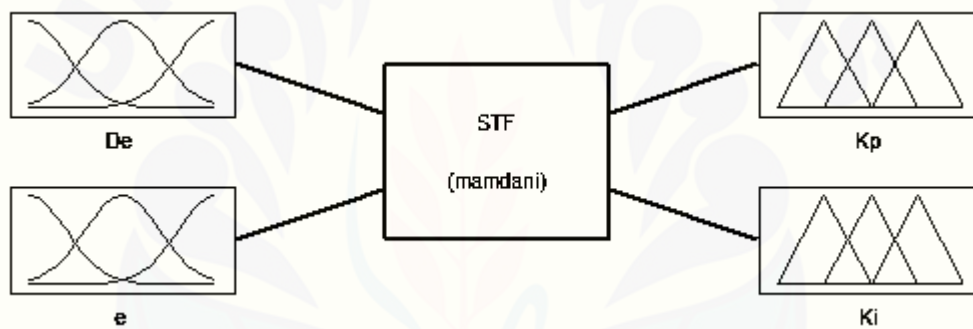
Gambar 3.5 Self tuning fuzzy.

Blok kontrol ini memiliki 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.

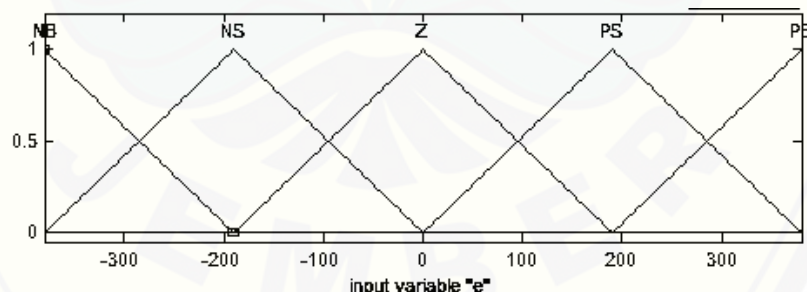
Selain menjaga agar nilai tegangan yang terukur sama atau mendekati nilai tegangan referensi, kontrol STF PI juga mengkonversikan besaran tegangan menjadi arus. Sehingga saat nilai tegangan sistem sudah sama atau mendekati nilai referensinya,

maka arus pada keadaan ini menjadi arus referensi sistem. Arus *output* STF PI pertama $i^*_{d,p}$, $i^*_{q,p}$, $i^*_{d,n}$, $i^*_{d,z}$, dan $i^*_{q,z}$, merupakan arus referensi bagi blok STF 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.

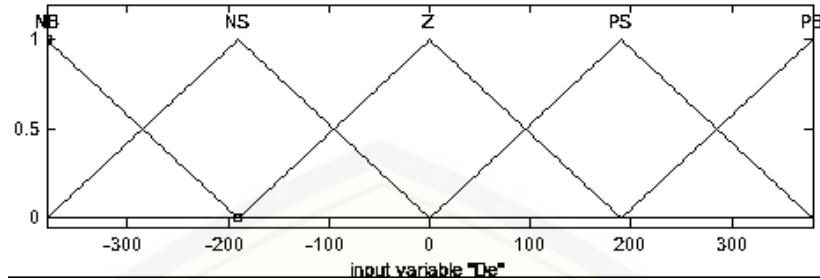
Pada gambar 3.5 terdapat blok *fuzzy* yang perlu diisi dengan logika *fuzzy* agar kontrol tersebut berjalan dengan sempurna, berikut rancangan logika *fuzzy* yang akan digunakan sebagai tuning otomatis pada kontroler PI.



Gambar 3.6 *fuzzy logic* yang digunakan pada MSRF-STF.

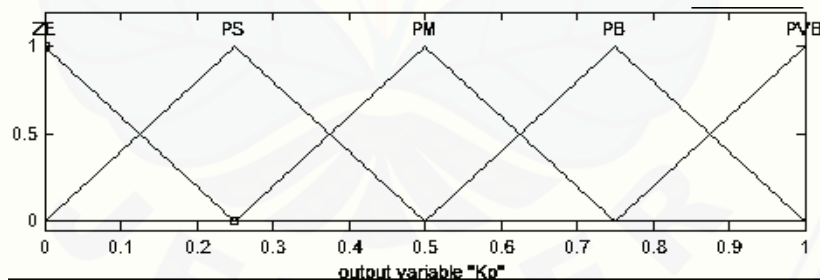


Gambar 3.7 *input error*

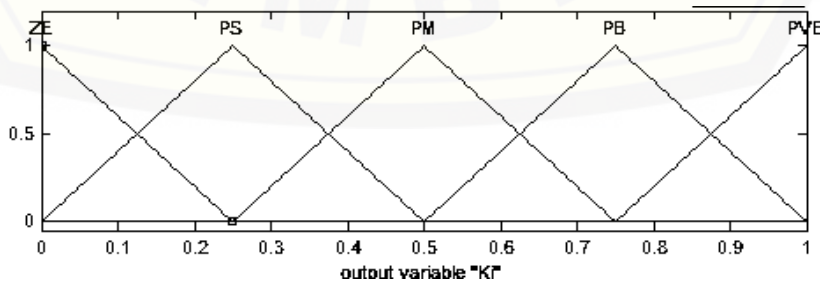


Gambar 3.8 input delta error.

Pada gambar 3.7 dan gambar 3.8 merupakan *membership function fuzzy* pada bagian *input* dimana terdapat beberapa *variable* menggunakan *type* "trimf" yaitu NB (*Negatif Big*) dengan parameter [-570; -380; -190], NS (*Negatif Small*) dengan parameter [-380; -190; 0], Z (*zero*) dengan parameter [-190; 0; -190], PS (*Positif Small*) dengan parameter [0; 190; 380], dan PB (*Positif Big*) dengan parameter [190; 380; 570]. Untuk *input error (e)* dan *delta error (De)* memiliki *range* yang sama yaitu (-380 , 380) dan menggunakan *fuzzy type* Mamdani. Penggunaan nilai *range fuzzy input* sebesar (-380 , 380) karena masukan nilai *input* pada sistem kontrol memiliki nilai referensi terbesar yaitu 380. Untuk *membership function* bagian *output* bisa dilihat pada gambar 3.9 dan gambar 3.10 sebagai berikut.



Gambar 3.9 output variable "Kp"



Gambar 3.10 output variable "Ki"

Pada gambar 3.9 dan gambar 3.10 merupakan *membership function fuzzy* pada bagian *output* dimana terdapat beberapa *variable* menggunakan *type* “trimf” diantaranya yaitu ZE (*Zero*) dengan parameter $[-0.25; 0; 0.25]$, PS (*Positif Small*) dengan parameter $[0; 0.25; 0.5]$, PM (*Positif Medium*) dengan parameter $[0.25; 0.5; 0.75]$, PB (*Positif Big*) dengan parameter $[0.5; 0.75; 1]$, dan PVB (*Positif Very Big*) dengan parameter $[0.75; 1; 1.25]$. Untuk *output* Kp dan Ki memiliki *range* yang sama yaitu $(0, 1)$ dan menggunakan *fuzzy type* Mamdani. Setelah *membership function* sudah siap maka perlu adanya *rule fuzzy* sebagai data base yang nantinya akan digunakan sebagai logika. Berikut *rule fuzzy* yang akan digunakan pada penelitian ini.

Tabel 3.1 Tabel *rule* untuk nilai Kp

De e	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PVB	PB	PM	PS	ZE
NS	PB	PM	PS	ZE	PS
Z	PM	PS	PS	PS	PVB
PS	PS	ZE	PS	PVB	PB
PB	ZE	PS	PVB	PB	PM

Tabel 3.2 Tabel *rule* untuk nilai Ki

De e	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PM	PB	PVB	PS	PB
NS	PB	PVB	PS	ZE	PS
Z	PVB	PS	ZE	PS	PM
PS	PS	ZE	PS	PM	PB
PB	PB	PS	PM	PB	PVB

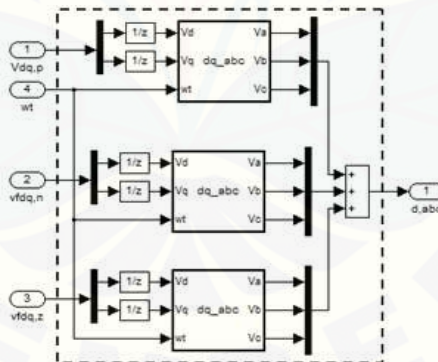
3.2.2.3 Transformasi dq ke abc dan *Sequence Recomposition*

Untuk proses pengembalian tegangan maupun arus dari koordinat dq ke koordinat abc, digunakan persamaan matrik seperti pada persamaan 3.9 berikut. Persamaan ini merupakan invers dari persamaan 3.8 (Kundur, 1994) :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Dengan persamaan 3.9 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);
```



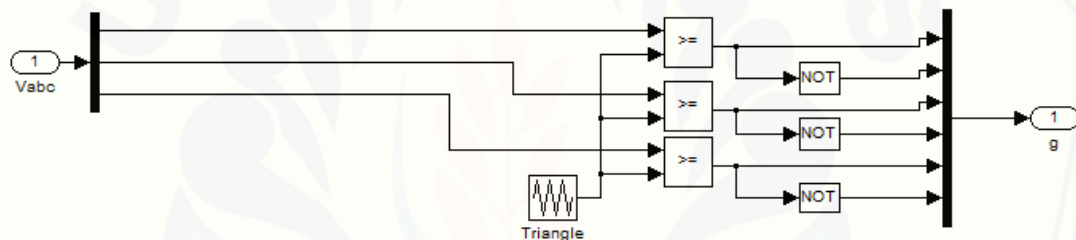
Gambar 3.11 Blok transformasi dq ke abc dan *sequence composition*

Hasil transformasi dari blok transformasi dq ke abc yang masih berupa komponen urutan simetri. Perbedaan antara urutan positif dan negatif yaitu terletak pada nilai ωt , untuk urutan positif ωt bernilai positif dan untuk urutan negatif ωt

bernilai negatif. kemudian disusun ulang (*sequence composition*) ke dalam komponen tiga fasanya.

3.2.2.4 Sinusoidal Pulse Width Modulation (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. Gambar *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)* dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.12 Pemodelan SPWM generator inverter.

Nilai keluaran tegangan inverter sangat dipengaruhi oleh indeks modulasi sinyal kontrolnya. Indeks modulasi dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$M = \frac{V_{refrensi}}{V_{triangle}} \quad (3.10)$$

Sedangkan untuk nilai tegangan maksimum keluaran inverter ditentukan oleh persamaan berikut

$$V_{o,maks} = M \times V_{DC} \quad (3.11)$$

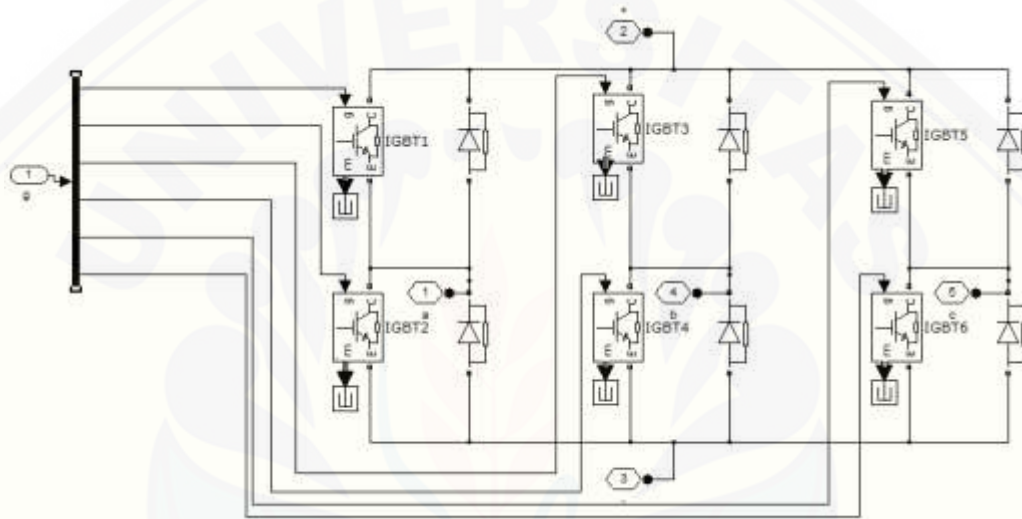
Nilai tegangan DC yang masuk kedalam inverter bernilai 600 Volt sehingga untuk menghasilkan tegangan AC keluaran 380 volt rms maka indeks modulasi bernilai

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

Sesuai perhitungan dari persamaan 3.17, indeks modulasi yang bernilai 1 mengakibatkan nilai amplitudo sinyal referensi dan sinyal segitiga bernilai sama.

3.2.2.5 Inverter Tiga Fasa

Pada sistem ini akan digunakan rangkaian *bidirection* inverter dimana dalam rangkaian tersebut terdapat 6 buah IGBT dan 6 buah dioda sebagaimana pada gambar 3.14. berikut ini.



Gambar 3.14 Pemodelan SPWM generator inverter

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*.

3.2.2.6 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*

$V_{LN \text{ max}} = 311,16$ Volt. (data tipikal untuk transformator 5 MVA dari *ETAP Power Station*). Penelitian ini menggunakan sumber tiga dengan *type* tersebut karena didasari dengan penggunaan sumber 3 fasa pada penelitian sebelumnya dan penelitian ini hanya memfokuskan untuk melakukan desain pada sistem kontrolnya saja. Berdasarkan pada data tersebut dapat diketahui besarnya R_s dan L_s sebagai berikut.

$$Z_T = \frac{(K_{VLL})^2}{M_{VA3\Phi}} \times Z_{TX} (\%) \quad (3.12)$$

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

$$Z_T^2 = X^2 + R^2 \quad (3.13)$$

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

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

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

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

$$L_s = \frac{X}{2\pi f} \quad (3.14)$$

$$= 0,615mH$$

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 $L_s = 0,615 \text{ mH}$.

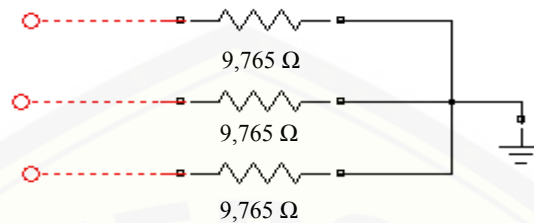
Baterai diset dengan nilai tegangan dan kapasitas konstan. Blok baterai yang digunakan terdiri atas sebuah sumber DC dengan tegangan sebesar 600 volt yang dipasang parallel dengan kapasitor yang bertindak sebagai *temporary storage device*.

3.2.2.7 Disain beban yang akan diujikan

1. Beban Resistif

Pada pengujian kerja dari pengendalian inverter MSRF-STF sebagai UPS digunakan pengujian beban menggunakan beban resistif dengan nilai tiap fasanya seimbang. Dimana beban seimbang pada sistem ini digunakan beban resistif denga

besar resistansi $9,765 \Omega$ pada setiap fasanya dengan penggunaan daya sebesar 10.000 watt sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.14 berikut ini



Gambar 3.14 Pemodelan beban seimbang

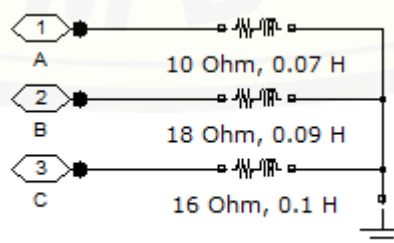
Pada gambar 3.14 dapat dilihat bahwa hubungan beban resistif adalah hubungan *weye*. Sehingga dalam perhitungan nilai tegangan pada beban ini adalah fasa ke ground. Dengan persamaan berikut

$$V_{rms} = V_{load} \sqrt{2} \quad (3.15)$$

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

2. Beban dengan power faktor rendah

Pada pengujian perbaikan faktor daya digunakan beban RL. Untuk nilai rangkaian tak seimbang dapat dilihat pada gambar 3.15 berikut ini.



Gambar 3.15 Pemodelan beban induktif

Pada gambar 3.15 di atas beban induktor yang digunakan sebagai beban pengujian memiliki nilai faktor daya rendah yang dapat di tunjukan melalui perhitungan berikut ini.

Fasa A

$$R = 10 \Omega ; L = 0.07 \text{ H}$$

$$XL = \omega L = 21.98 \Omega$$

$$ZL = \sqrt{0 + j21.98} \Omega \text{ atau } 21,98 \Omega \angle 90^\circ$$

$$ZR = \sqrt{10 + j0} \Omega \text{ atau } 10 \Omega \angle 0^\circ$$

$$ZT = \sqrt{10 + j21.98} \Omega \text{ atau } 24,147 \Omega \angle 65.53^\circ$$

$$Pf = \text{Cos } 65.53^\circ = 0.41$$

Fasa B

$$R = 18 \Omega ; L = 0.09 \text{ H}$$

$$XL = \omega L = 28,26 \Omega$$

$$ZL = \sqrt{0 + j28.26} \Omega \text{ atau } 28,26 \Omega \angle 90^\circ$$

$$ZR = \sqrt{18 + j0} \Omega \text{ atau } 18 \Omega \angle 0^\circ$$

$$ZT = \sqrt{18 + j28.26} \Omega \text{ atau } 33,5 \Omega \angle 57.5^\circ$$

$$Pf = \text{Cos } 57.5^\circ = 0.53$$

Fasa C

$$R = 16 \Omega ; L = 0.1 \text{ H}$$

$$XL = \omega L = 31.4 \Omega$$

$$ZL = \sqrt{0 + j31.4} \Omega \text{ atau } 31,4 \Omega \angle 90^\circ$$

$$ZR = \sqrt{16 + j0} \Omega \text{ atau } 16 \Omega \angle 0^\circ$$

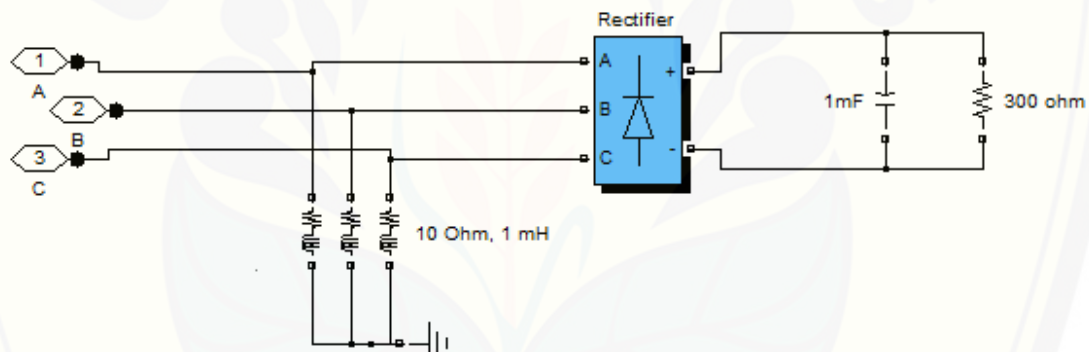
$$ZT = \sqrt{16 + j31.4} \Omega \text{ atau } 1,114 \Omega \angle 62.9986^\circ$$

$$Pf = \text{Cos } 62,9986^\circ = 0.454$$

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 penggunaan pengendalian inverter MSRF-STF ini akan membuktikan bahwa beban tak seimbang pada jaringan menjadi seimbang dengan faktor daya mendekati 1. Gambar 3.15 menunjukkan pemodelan beban tidak seimbang pada jaringan, sehingga arus pada jaringan akan menjadi *lagging* (tertinggal terhadap tegangan).

3. Beban *non linear*

Pada pengujian kompensasi harmonisa digunakan beban *non linear*. Beban *non linear* yang digunakan pada sistem ini dapat ditunjukkan oleh gambar 3.16 berikut ini.

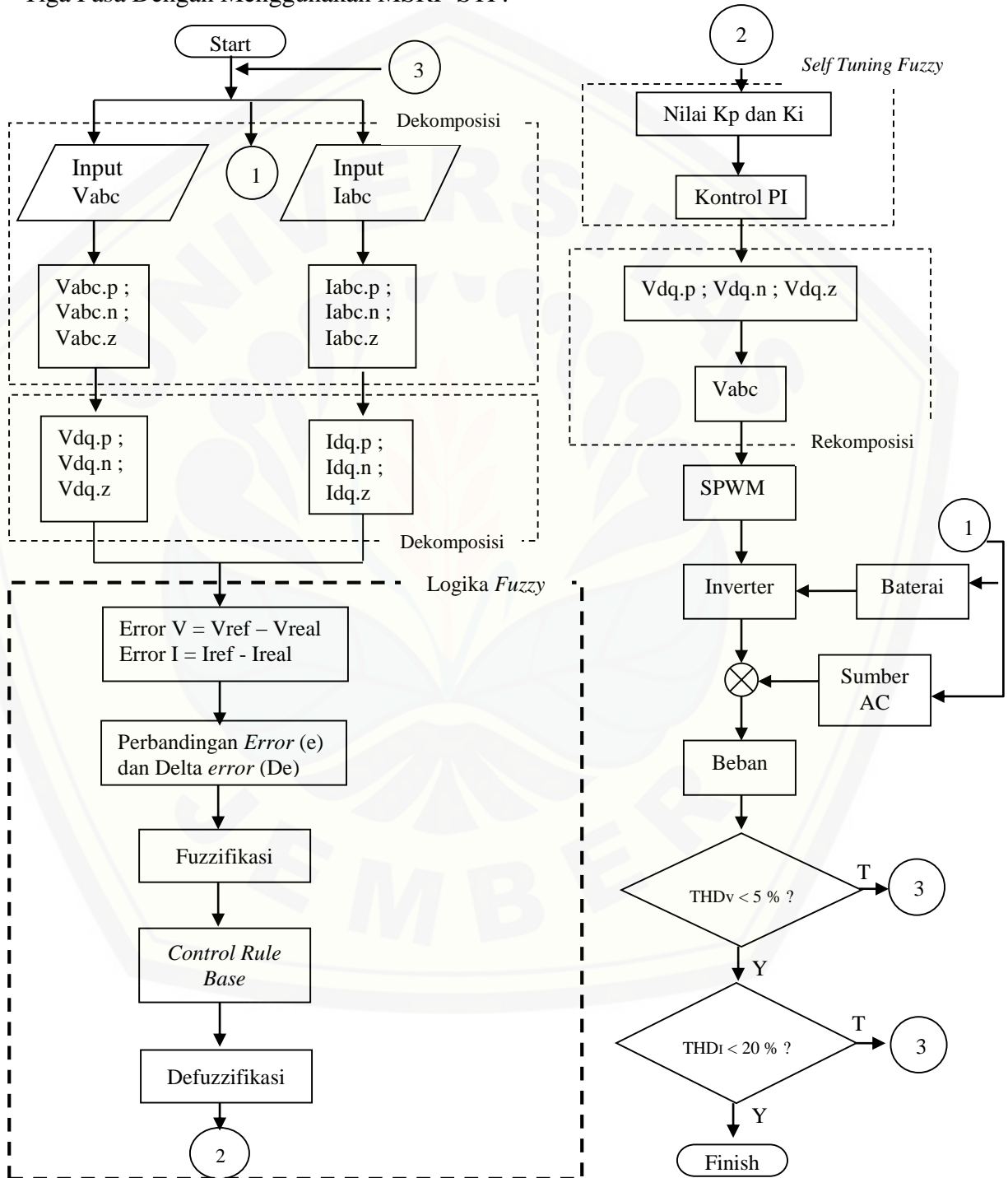


Gambar 3.16 Pemodelan beban *non linear*

Dari gambar 3.16 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 beban akan menimbulkan distorsi harmonisa pada jaringan.

3.2.3 Flowchart Sistem

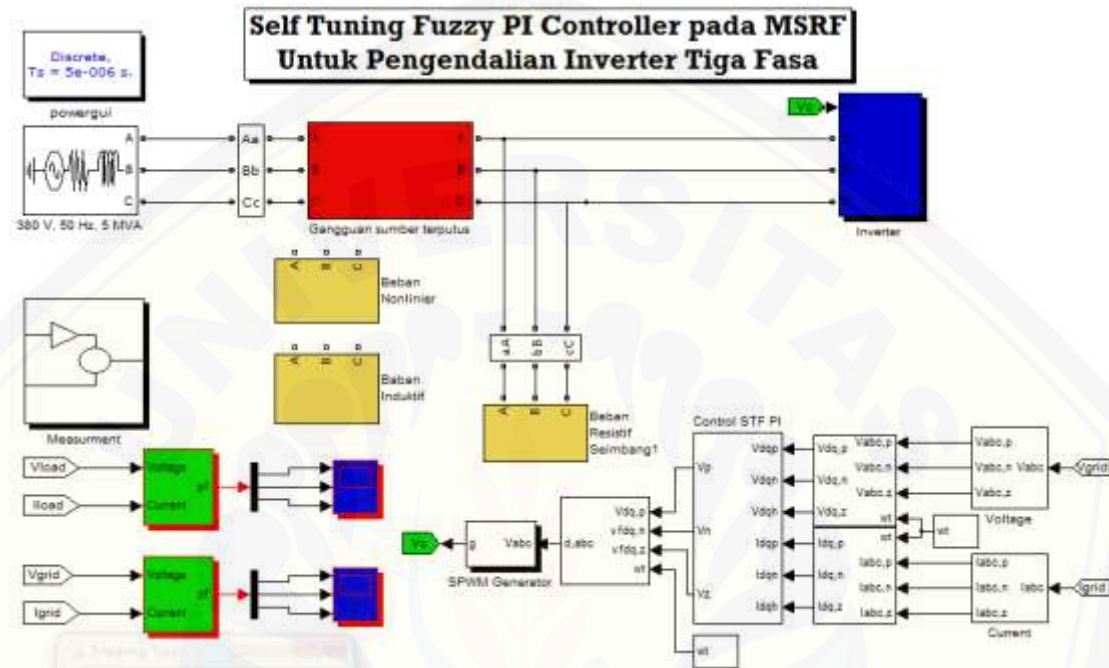
Berikut ini merupakan diagram alir (*Flowchart*) tentang Pengendalian Inverter Tiga Fasa Dengan Menggunakan MSRF-STF.



Gambar 3.17 Flowchart sistem MSRF-STF

3.2.4 Pemodelan sistem pada matlab

Pemodelan sistem MSRF-STF secara keseluruhan pada matlab dapat dilihat pada gambar 3.18 berikut ini.



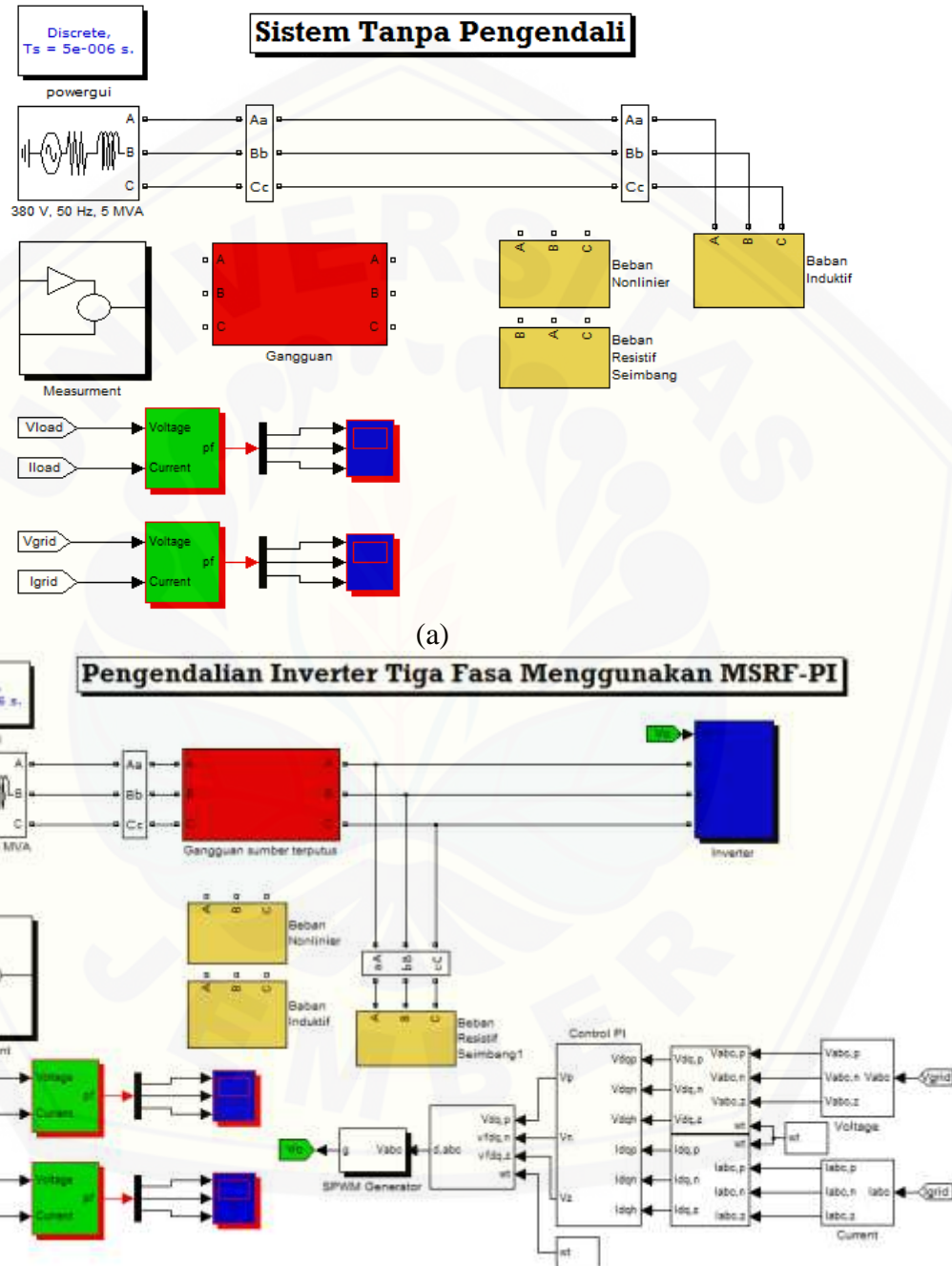
Gambar 3.18. Pemodelan sistem MSRF-STF pada matlab.

Pada Gambar 3.18 tersebut merupakan rangkaian sistem pengendali inverter dengan menggunakan metode MSRF-STF, dimana rangkaian sistem itu mengacu pada penjelasan sebelumnya. Dengan rangkaian sistem tersebut digunakan untuk menguji semua kondisi beban. Untuk jenis beban yang diujikan terdapat tiga macam, yaitu:

1. beban resistif seimbang.
2. beban induktif.
3. beban *non linear*.

Dari ketiga beban tersebut akan digunakan untuk pengujian sistem sebagai UPS, kompensator faktor daya, dan kompensator harmonisa. Sebagai pembanding performansi sistem pengendali inverter menggunakan MSRF-STF pada kondisi beban tersebut. Maka telah dibuat sistem tanpa menggunakan pengendali dan sistem dengan

MSRF-PI sebagai pembandingnya. Sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.19 berikut.



(b) Gambar 3.19 Ragkaian Simulasi Sistem (a) tanpa pengendali (b) MSRF-PI.

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 inverter MSRF-STF dapat berfungsi secara bersama-sama untuk meredam harmonisa, memperbaiki nilai faktor daya dan sebagai UPS.
2. Hasil pengujian sistem sebagai UPS pada beban resistif selama 0.06 detik atau 3 siklus menunjukkan performa sistem MSRF-STF lebih baik dari pada sistem MSRF-PI karena tegangan dan arus yang dibutuhkan beban yaitu mendekati 310 V dan 32 A.
3. Performansi perbaikan faktor daya antara sistem MSRF-PI dengan sistem MSRF-STF mempunyai nilai yang sama baik, tetapi pada sistem MSRF-STF dalam memperbaiki faktor daya pada jaringan lebih baik dan lebih stabil.
4. Sistem inverter MSRF-STF mampu meredam harmonisa pada jaringan dari 68.50% menjadi 6.29%, sedangkan sistem MSRF-PI hanya mampu meredam harmonisa sebesar 8.06%, sampel ini diambil dari fasa B untuk beban *non linear* yang memiliki nilai harmonisa terbesar dari fasa yang lain.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian *Modified Synchronous Reference Frame – Self Tuning Fuzzy* (MSRF-STF) pada inverter tiga fasa, maka ada beberapa saran yang perlu menjadi bahan pertimbangan, yaitu:

1. Untuk penelitian lebih lanjut, perlu dianalisis respon sistem dengan menggunakan kontrol yang lebih kompleks agar hasil yang dikeluarkan sistem MSRF lebih baik, terutama pada pengujian sistem sebagai UPS hal ini karena tegangan dan arus yang dikirim ke beban masih memiliki sedikit *noise*.

2. Simulasi yang dilakukan pada sistem MSRF-STF sudah menghasilkan respon sistem yang baik, maka perlu adanya penerapan secara nyata agar dapat dinikmati oleh masyarakat.



DAFTAR PUSTAKA

- Kurnia, Setiawan Dedy, dan Budi Novian Syah. 2015. "Three Phase Inverter of UPS Control System for Harmonic Compensator and Power Factor Correction Using Modified Synchronous Reference Frame ", International Electronics Symposium (IES) PENS. Surabaya.
- 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.
- 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.
- Philip, Riya. 2014. "Synchronous Reference Frame Detection and Hysteresis Control for Active Power Filter". ISSN. India.
- Anton, Dimas A. "Kombinasi Feed Back dan Feed Forward Kontroller PI Sebagai Kendali Dynamic Voltage Restorer (DVR) Untuk Memulihkan Voltage Sag dan Interruption". ITS. Surabaya.
- Sukendar, tatang dan Berayan Munth. 2007. "Sistem Pengaturan Motor Ac Servo Dengan Kontroller Pid Self Tuning Berbasis Fuzzy Logic". Di SainTek. Bandung.
- Adel A. El-samahy dan Mohamed A. Shamseldin. 2016. "Brushless DC Motor Tracking Control Using Self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control". Ain Shams University. Mesir.

S.M, Rakhtala dan E. Shafiee Roudbari. 2015. “ Fuzzy PID Control of a Stand-alone System Based on PEM Fuel Cell”. Department of Electrical Engineering, Golestan University. iran.

