



**TUGAS AKHIR - TF 141581**

**SISTEM PENGENDALIAN INVERTER *BUCK-BOOST* SATU FASA (IBBSF) BERBASIS *NEURO-FUZZY***

**YUSNIA HAMIDAH**  
NRP. 2411 100 013

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

JURUSAN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**FINAL PROJECT- TF 141581**

**CONTROL OF SINGLE PHASE BUCK-BOOST  
INVERTER (SPBBI) SYSTEM USING NEURO-  
FUZZY**

**YUSNIA HAMIDAH**  
NRP. 2411 100 013

Supervisor  
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institut of Technology  
Surabaya 2015

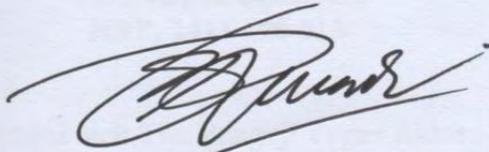
**SISTEM PENGENDALIAN INVERTER BUCK-BOOST  
SATU FASA (IBBSF) BERBASIS NEURO-FUZZY**

**TUGAS AKHIR**

**Oleh :**

**Yusnia Hamidah  
NRP. 2411 100 013**

**Surabaya, 12 Januari 2015  
Mengetahui/Menyetujui,  
Pembimbing,**



**Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.  
NIP 19620822 198803 1 001**

**Ketua Jurusan  
Teknik Fisika FTI-ITS**



**Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA.  
NIP. 19650309 199002 1 001**

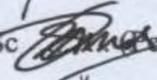
**SISTEM PENGENDALIAN INVERTER *BUCK-BOOST*  
SATU FASA (IBBSF) BERBASIS *NEURO-FUZZY***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :  
**YUSNIA HAMIDAH**  
**NRP. 2411 100 013**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc  (Pembimbing)
2. Ir. Yaumar, MT ..... (Ketua Tim Penguji)
3. Dr. Bambang Lelono W, ST, MT ..... (Penguji I)
4. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc  (Penguji II)
5. Detak Yan Pratama, ST, MSc ..... (Penguji III)
6. Lizda Johar M, ST, MT  (Penguji IV)

**SURABAYA**  
**JANUARI 2015**

## **SISTEM PENGENDALIAN INVERTER *BUCK-BOOST* SATU FASA (*IBBSF*) BERBASIS *NEURO-FUZZY***

**Nama** : Yusnia Hamidah  
**NRP** : 2411100013  
**Jurusan** : Teknik Fisika, FTI-ITS  
**Pembimbing** : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc

### **ABSTRAK**

*Solusi dari krisis energi yang terjadi di Indonesia salah satunya adalah pemanfaatan renewable energy, yang sumber energinya dapat disimpan dalam bentuk baterai. Keluaran baterai yang berupa arus DC perlu diubah menjadi arus AC dengan menggunakan IBBSF. IBBSF mampu menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar maupun lebih kecil dari baterai. Tegangan keluaran yang dihasilkan IBBSF belum sesuai dengan yang diinginkan, sehingga perlu dilakukan pengendalian. Banyak metode dalam pengendalian tegangan IBBSF, diantaranya PI, SMC, neural network dan fuzzy. Pada tugas akhir ini metode pengendali yang digunakan adalah ANFIS yang merupakan gabungan dari neural network dan fuzzy logic. Teknik switching yang digunakan dalam IBBSF adalah SPWM. Perancangan dan pengujian sistem dilakukan dengan menggunakan Matlab, kemudian dibandingkan dengan PSIM sebagai software acuan. Tegangan keluaran IBBSF tanpa pengendali dengan tegangan sumber 12V adalah sebesar 100V. Menggunakan ANFIS dengan set point 220V dan pemilihan mf 7, dihasilkan tegangan keluaran IBBSF sebesar 200V, dengan error 9%, dan settling time 5,1 detik.*

***Kata Kunci*** : AC, ANFIS, IBBSF, SPWM.

**Halaman ini memang dikosongkan**

## **CONTROL SYSTEM SINGLE PHASE BUCK-BOOST INVERTER (SPBBI) USING NEURO-FUZZY**

**Name** : Yusnia Hamidah  
**NRP** : 2411100013  
**Department** : *Engineering Physics, FTI-ITS*  
**Advisor** : **Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc**

### **ABSTRACT**

*The solution of the energy crisis that happened in Indonesia, one of which is the renewable energy utilization, the energy source can be stored in the form of batteries. Output DC current in the form of batteries need to be changed being AC current by using IBBSF. IBBSF is capable of producing a voltage that is larger or smaller than the battery. The resulting IBBSF output voltage has not been in accordance with the desired, so that the control needs to be done. There are a lot of control voltage methods in IBBSF, including PI, SMC, neural network and fuzzy. In this final task, the control method that used is ANFIS, which is the combination of neural network and fuzzy logic. Switching techniques used in IBBSF is SPWM. Design and testing of the system is performed using Matlab, then compared with PSIM software as a reference. Output voltage IBBSF without controlling using voltage source 12V is 100V. Using ANFIS with set point 220V and election mf 7, generated IBBSF output voltage of 200V, with error value 9% and settling time 5,1 second.*

**Keyword** : AC, ANFIS, SPBBI, SPWM.

*This page is left blank*

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	ix
<i>ABSTRACT</i> .....	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xxi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Permasalahan .....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
BAB II SISTEM PENGENDALIAN INVERTER.....	3
2.1 Inverter <i>Buck-Boost</i> Satu Fasa .....	3
2.2 <i>Neuro-fuzzy</i> .....	7
2.3 Teknik SPWM.....	9
2.4 <i>Low pass filter</i> orde dua.....	11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	13
3.1 Studi Literatur.....	13
3.2 Perancangan IBBSF pada <i>Software</i> PSIM dan Matlab ..	14
3.3 Perancangan Pengendali IBBSF berbasis <i>Neuro-Fuzzy</i> pada Matlab .....	23
3.4 Analisis Data dan Kesimpulan.....	30
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Analisis Hasil Simulasi IBBSF tanpa Pengendali Tegangan .....	33
4.2 Analisis Hasil Simulasi IBBSF dengan Pengendali Tegangan .....	33
BAB V PENUTUP.....	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

**Halaman ini memang dikosongkan**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Contoh induktor[6].....	3
Gambar 2.2	Contoh kapasitor[9].....	4
Gambar 2.3	Contoh resistor[10].....	5
Gambar 2.4	Topologi <i>boost inverter</i> oleh Caceres[12] .....	6
Gambar 2.5	Topologi <i>buck-boost inverter</i> oleh Vazquez[3] ....	7
Gambar 2.6	Blok diagram sistem <i>neuro-fuzzy</i> .....	7
Gambar 2.7	Sistem inferensi <i>fuzzy</i> [14] .....	8
Gambar 2.8	Struktur <i>neuro-fuzzy</i> [14] .....	8
Gambar 2.9	Teknik SPWM[16].....	10
Gambar 2.10	SPWM <i>output</i> : (a) <i>duty cycle</i> 10%, (b) <i>duty cycle</i> 50% dan (c) <i>duty cycle</i> 90%[17] .....	10
Gambar 3.1	Proses rancangan penelitian .....	13
Gambar 3.2	Topologi IBBSF[19] .....	14
Gambar 3.3	Kondisi rangkaian (a) S1-S2 <i>on</i> , (b) S3-S4 <i>on</i> ...	15
Gambar 3.4	Pemodelan IBBSF dengan teknik SPWM di PSIM .....	18
Gambar 3.5	Pemodelan sistem <i>open loop</i> di Simulink Matlab .....	19
Gambar 3.6	Pemodelan SPWM <i>open loop</i> .....	19
Gambar 3.7	Pemodelan IBBSF <i>open loop</i> dengan Simulink Matlab .....	21
Gambar 3.8	Pemodelan IBBSF <i>open loop</i> : (a) model arus induktor dan (b) model tegangan kapasitor .....	22
Gambar 3.9	Pemodelan tegangan keluaran dan <i>filter</i> IBBSF <i>open loop</i> dengan Simulink Matlab.....	23
Gambar 3.10	Diagram pengendalian perancangan sistem.....	23
Gambar 3.11	<i>Fuzzy inference system</i> .....	25
Gambar 3.12	<i>Input mf</i> 3: (a) <i>error</i> dan (b) <i>delta error</i> .....	25
Gambar 3.13	<i>Input mf</i> 5: (a) <i>error</i> dan (b) <i>delta error</i> .....	26
Gambar 3.14	<i>Input mf</i> 7: (a) <i>error</i> dan (b) <i>delta error</i> .....	26
Gambar 3.15	ANFIS <i>structure</i> .....	28
Gambar 3.16	Pemodelan pengendali IBBSF berbasis <i>neuro-fuzzy</i> : (a) keseluruhan model inverter dengan kontrol dan (b) model <i>neuro-fuzzy</i> .....	30

Gambar 4.1	Grafik sinyal SPWM <i>open loop</i> : (a) modulasi sinus dengan segitiga, (b) SPWM 1 dan (c) SPWM 2 .....	34
Gambar 4.2	<i>Duty cycle</i> SPWM <i>open loop</i> .....	35
Gambar 4.3	Grafik sinyal tegangan <i>output</i> IBBSF <i>open loop</i> di Simulink Matlab.....	35
Gambar 4.4	Grafik sinyal tegangan <i>filter</i> IBBSF <i>open loop</i> di Simulink Matlab.....	36
Gambar 4.5	Grafik sinyal tegangan <i>output</i> IBBSF di PSIM: (a) sinyal <i>output</i> dan (b) sinyal <i>output filter</i> .....	37
Gambar 4.6	Grafik <i>training data</i> .....	38
Gambar 4.7	Hasil <i>training error</i> ANFIS: (a) 3 mf, (b) 5 mf dan (c) 7 mf.....	39
Gambar 4.8	Hasil <i>plot training data</i> .....	40
Gambar 4.9	Grafik validasi ANFIS .....	42
Gambar 4.10	Grafik sinyal SPWM <i>closed loop</i> : (a) modulasi sinus dengan segitiga, (b) SPWM 1 dan (c) SPWM 2 .....	43
Gambar 4.11	<i>Duty cycle</i> SPWM <i>closed loop</i> .....	44
Gambar 4.12	Grafik arus pada induktor IBBSF <i>closed loop</i> : (a) arus di $L_a$ dan (b) arus di $L_b$ .....	45
Gambar 4.13	Grafik tegangan pada kapasitor IBBSF <i>closed loop</i> : (a) tegangan $C_a$ dan (b) tegangan $C_b$ .....	46
Gambar 4.14	Grafik sinyal tegangan <i>output</i> IBBSF <i>closed loop</i> di Simulink Matlab.....	46
Gambar 4.15	Grafik sinyal tegangan <i>filter</i> IBBSF <i>closed loop</i> di Simulink Matlab.....	47
Gambar 4.16	Grafik perbandingan tegangan keluaran IBBSF <i>open</i> dan <i>closed loop</i> .....	47
Gambar 4.17	Grafik perbandingan antara <i>set point</i> dengan <i>output</i> IBBSF .....	49
Gambar 4.18	Grafik sinyal tegangan <i>filter</i> IBBSF <i>closed loop</i> di Simulink Matlab: (a) <i>set point</i> 110V, (b) <i>set point</i> 140V dan (c) <i>set point</i> 170V .....	51

Gambar 4.19	Grafik respon sistem IBBSF berbasis <i>neuro-fuzzy</i> : (a) <i>set point</i> 110V, (b) <i>set point</i> 140V, (c) <i>set point</i> 170V dan (d) <i>set point</i> 220V .....	52
Gambar 4.20	Grafik respon sistem IBBSF berbasis PID <i>controller</i> : (a) <i>set point</i> 110V, (b) <i>set point</i> 140V, (c) <i>set point</i> 170V dan (d) <i>set point</i> 220V .....	53

**Halaman ini memang dikosongkan**

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Tabel <i>rule base</i> ANFIS.....	27
Tabel 4.1 Parameter IBBSF.....	33
Tabel 4.2 Data I/O ANFIS.....	38
Tabel 4.3 Data validasi ANFIS.....	41
Tabel 4.4 Variasi <i>set point</i> .....	54

**Halaman ini memang dikosongkan**

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, krisis energi menjadi salah satu isu global, termasuk di Indonesia. Menurut Sekretaris Ditjen Migas Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Agus Cahyono, cadangan minyak bumi Indonesia hanya 4,3 miliar Barrel atau 3% dari total cadangan minyak dunia. Angka ini sangat rendah bila dibandingkan dengan pertumbuhan penduduk, ekonomi dan transportasi di Indonesia[1]. Kebutuhan minyak yang semakin meningkat tersebut tidak diimbangi dengan pasokan yang tersedia, sehingga menyebabkan terjadinya krisis energi. Solusinya, pemerintah telah memberikan kebijakan berupa penghematan energi dan pengembangan *renewable energy*. *Biofuel*, *biomassa*, *solar energy* maupun hidrogen, adalah sedikit dari berbagai *renewable energy* yang telah dimanfaatkan. Semua jenis sumber energi ini dapat disimpan dan diisi ulang, misalnya dalam bentuk baterai. Baterai yang menghasilkan arus searah, apabila digunakan sebagai pembangkit maupun alat transportasi, diperlukan komponen inverter sebagai pengubah arus *direct current* (DC) ke *alternating current* (AC).

Berbagai macam topologi inverter telah diusulkan dan masih dikembangkan hingga saat ini. Topologi *buck* mudah dalam hal pengendalian tegangannya, akan tetapi tegangan *output* yang dihasilkan selalu lebih kecil dari tegangan DC *input*. Hal ini disebabkan adanya rugi-rugi *switching* itu sendiri. Apabila dibutuhkan tegangan *output* yang lebih besar, diperlukan rangkaian *boost* antara sumber DC dengan inverter. Penambahan rangkaian ini menyebabkan volume, berat, serta harga meningkat, yang tentunya mengurangi efisiensi[2]. Agar didapatkan tegangan keluaran yang lebih besar atau lebih kecil, dipilih inverter yang menggabungkan kedua topologi tersebut, yaitu topologi *buck-boost*. Penerapan IBBSF mampu menghasilkan tegangan *output* yang lebih besar dari tegangan DC *input* secara natural[3].

Besar tegangan AC yang dihasilkan oleh inverter masih belum sesuai dengan yang diinginkan. Agar diperoleh tegangan yang sesuai, dilakukan pengendalian pada *output* inverter. Penerapan *neuro-fuzzy* menggabungkan dua sistem kontrol dari *fuzzy logic controller* dan *artificial neural network*. Hasil penerapan *neuro-fuzzy* pada konverter DC-DC yaitu nilai *overshoot* yang lebih kecil dan performansi yang lebih baik dari kontrol PI, dengan desain kontrolnya juga dapat disesuaikan pada berbagai macam sistem operasi[4]. Sistem kontrol *neuro-fuzzy* yang sudah diterapkan pada konverter DC-DC ini, menjadi acuan bagi penulis untuk diterapkan sebagai kontrol konverter DC-AC, atau umumnya disebut inverter. Tegangan *input* sebesar 12V didapatkan dari DC *source* baterai. Tegangan *output* yang diharapkan dari kontrol inverter adalah sebesar 220V. *Software* Simulink Matlab digunakan untuk membuat rangkaian kontrol inverter, dengan acuan bentuk sinyal hasil dari *software power simulator* (PSIM).

## 1.2 Rumusan Permasalahan

Permasalahan yang diangkat untuk menyelesaikan tugas akhir ini adalah bagaimana cara merancang simulasi pengendali tegangan IBBSF berbasis *neuro-fuzzy* melalui teknik *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM).

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah mampu merancang simulasi pengendali tegangan IBBSF berbasis *neuro-fuzzy* melalui teknik SPWM.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan yang digunakan antara lain sebagai berikut.

1. Topologi yang digunakan yaitu IBBSF *single-stage*.
2. Simulasi dengan *software* Simulink Matlab 2013b dan PSIM 9.0.3.
3. Nilai tegangan keluaran sebesar 220V 50Hz, dengan daya 1 hp.

## **BAB II**

### **SISTEM PENGENDALIAN INVERTER**

#### **2.1 Inverter *Buck-Boost* Satu Fasa**

Inverter berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Jenis inverter secara umum yaitu *voltage source inverter* (VSI) dan *current source inverter* (CSI). VSI memiliki keluaran sumber tegangan yang konstan, sedangkan CSI memiliki keluaran sumber arus yang konstan. Sumber tegangan *input* inverter dapat menggunakan *battery*, *cell* bahan bakar, tenaga surya, atau sumber tegangan DC yang lain. Tegangan *output* yang umum dihasilkan oleh inverter adalah 115V 400Hz, 120V 60Hz dan 220V 50Hz[5].

##### **2.1.1 Komponen inverter *buck-boost* satu fasa**

Komponen-komponen yang digunakan pada IBBSF antara lain induktor, kapasitor, hambatan beban dan transistor.

- **Induktor**

Umumnya sebuah induktor terbuat dari kawat penghantar yang dililitkan pada inti logam membentuk kumparan. Induktor yang ideal memiliki induktansi tanpa resistansi atau kapasitansi, serta tidak memboroskan daya. Bila induktor dilewati arus, maka induktor akan menyimpan dan membuang energi dalam bentuk siklus secara berkala.



**Gambar 2.1** Contoh induktor[6]

Induktor menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. Pengisian muatan pada induktor menimbulkan kenaikan perubahan pada arusnya. Proses ini yang kemudian dikenal dengan istilah induktansi induktor[7]. Induktor bekerja menurut

hukum Faraday, dimana semua perubahan fluks magnetik akan menghasilkan tegangan induksi ( $V_L$ ) yang besarnya ditentukan berdasarkan persamaan (2.1).

$$V_L = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu N^2 A}{l} \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

dimana, N : banyaknya lilitan

A : luas penampang inti ( $m^2$ )

$\Phi$  : fluks magnetik (Wb)

$\mu$  : permeabilitas material inti

l : panjang induktor (m)

i : laju perubahan arus dalam satuan (A).

Besar nilai induktor (L) ditentukan dari persamaan (2.2),

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (2.2)$$

dengan substitusi persamaan (2.2) ke persamaan (2.1), didapatkan persamaan (2.3) untuk menentukan besar tegangan yang dihasilkan dari induktor.

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

- **Kapasitor**

Serupa dengan induktor, kapasitor juga mampu menyimpan energi. Perbedaannya, apabila induktor menyimpan energi dalam bentuk medan magnet, maka kapasitor menyimpan energi dalam bentuk medan listrik. Struktur kapasitor terdiri dari 2 buah plat metal yang dipisahkan oleh bahan dielektrik. Bahan dielektrik tersebut dapat mempengaruhi nilai dari kapasitansi kapasitor. Kapasitansi sendiri adalah kemampuan kapasitor untuk menampung muatan elektron[8].

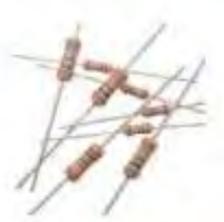


**Gambar 2.2** Contoh kapasitor[9]

Besar tegangan pada kapasitor ( $V_C$ ) dapat dihitung dengan persamaan (2.4), dengan C merupakan nilai kapasitansi.

$$V_C = \frac{1}{C} \int i dt \quad (2.4)$$

- **Hambatan beban**



**Gambar 2.3** Contoh resistor[10]

Resistansi atau hambatan adalah suatu komponen elektronik yang digunakan untuk menahan arus listrik ( $i$ ) dengan menurunkan tegangan ( $V$ ) berdasarkan hukum Ohm, dengan R adalah nilai resistansi.

$$R = \frac{V}{i} \quad (2.5)$$

Apabila dihubungkan dengan rumus daya ( $P$ ), maka nilai R dapat dicari dengan persamaan (2.6) hingga persamaan (2.8).

$$P = Vi \quad (2.6)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2.7)$$

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (2.8)$$

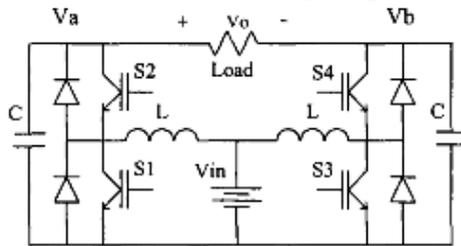
- **IGBT**

*Insulated gate bipolar transistor* (IGBT) adalah piranti semikonduktor yang merupakan gabungan dari *bipolar junction transistor* (BJT) dan *metal oxide semiconductor field effect transistor* (MOSFET). IGBT pada inverter berfungsi sebagai pengubah tegangan DC menjadi tegangan AC melalui konsep penyaklaran (*switching*). Penyaklaran tersebut dilakukan dengan memberikan sinyal SPWM pada masing-masing kombinasi IGBT, sehingga mampu dihasilkan tegangan AC dari tegangan

DC source[11]. Salah satu kelebihan IGBT adalah dapat diaplikasikan pada tegangan dan daya tinggi, namun hanya pada frekuensi yang rendah. Kelebihan lainnya yaitu, IGBT memiliki waktu penyaklaran yang relatif lebih cepat jika dibandingkan dengan transistor lainnya.

### 2.1.2 Cara kerja inverter *buck-boost* satu fasa

Topologi inverter *boost* mampu menghasilkan tegangan *output* AC lebih besar dari tegangan *input* DC. Topologi ini pertama kali diusulkan oleh Caceres seperti gambar 2.4.

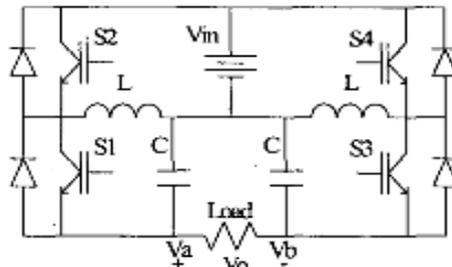


**Gambar 2.4** Topologi *boost inverter* oleh Caceres[12]

Pada gambar 2.4, ketika *switch* pada kondisi *on*, arus akan mengalir ke induktor, sehingga induktor yang awalnya tidak bermuatan kemudian memiliki muatan karena efek induktansi yang menghasilkan gaya gerak listrik (ggl). Oleh karenanya, induktor mampu menyimpan muatan dari tegangan DC *input*, sehingga energi pada induktor naik. Saat *switch off*, induktor beralih fungsi menjadi tegangan *input*. Muatan yang sebelumnya tersimpan dalam induktor dilucuti menuju beban melalui kapasitor, sehingga muatan yang tersimpan di kapasitor akan naik. Sistem penyimpanan muatan pada induktor dan kapasitor ini berlangsung berulang-ulang sesuai dengan kondisi *on-off* pada *switch*. Karena adanya penyimpanan muatan pada induktor dan kapasitor, maka dihasilkan tegangan keluaran yang lebih besar dari tegangan masukannya.

Inverter *boost* kemudian dikembangkan menjadi topologi inverter yang mampu menghasilkan tegangan keluaran lebih besar maupun lebih kecil, yaitu inverter *buck-boost*, seperti ditampilkan

gambar 2.5. Prinsip kerja dan bentuk topologinya sebagian besar serupa dengan inverter *boost*[3].

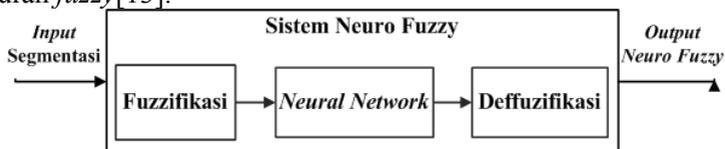


**Gambar 2.5** Topologi *buck-boost inverter* oleh Vazquez[3]

IBBSF *single stage* menampilkan peningkatan dan perubahan tegangan di waktu yang sama, sehingga tidak diperlukan komponen penguat tegangan seperti trafo. Oleh karena itu, inverter dengan topologi ini selain memiliki desain yang sederhana, juga menghasilkan performansi yang bagus dengan rasio biaya yang cukup rendah.

## 2.2 *Neuro-fuzzy*

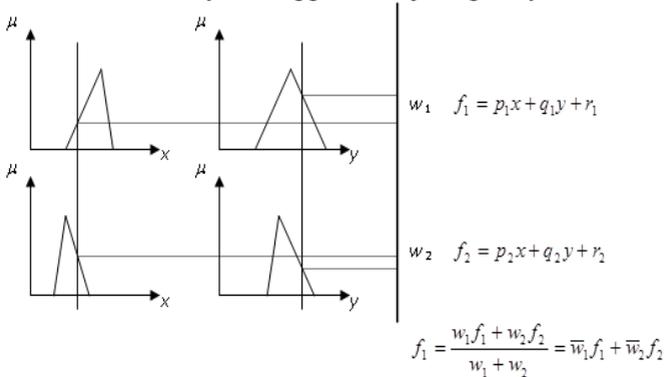
*Neuro-fuzzy* atau dikenal dengan *adaptive neuro-fuzzy inference system* (ANFIS) merupakan salah satu pengendali dari kelas jaringan adaptif yang fungsinya setara dengan *fuzzy inference system* (FIS). Dengan kata lain, ANFIS merupakan suatu model yang dilatih menggunakan jaringan syaraf, namun struktur jaringannya diinterpretasikan dengan sekelompok aturan-aturan *fuzzy*[13].



**Gambar 2.6** Blok diagram sistem *neuro-fuzzy*

Blok diagram pada gambar 2.6 menunjukkan proses pada *neuro-fuzzy controller*. Proses penentuan *input-output* menggunakan

himpunan *fuzzy* (fuzzifikasi dan defuzzifikasi), sedangkan penentuan *rule base*-nya menggunakan jaringan syaraf tiruan.



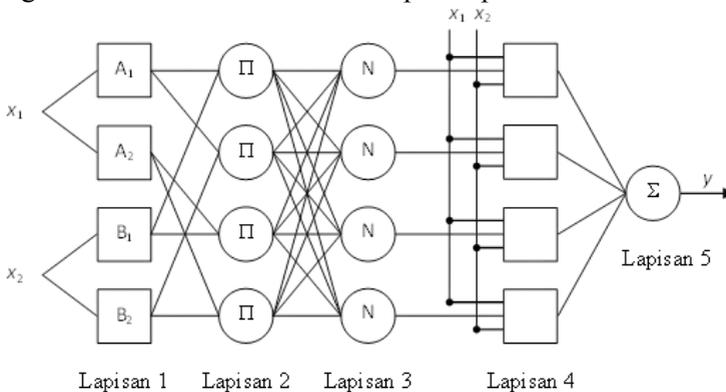
**Gambar 2.7** Sistem inferensi *fuzzy*[14]

Pada sistem inferensi *fuzzy* model Sugeno orde satu dengan dua masukan, aturan yang digunakan yaitu,

aturan 1: *if x is A<sub>1</sub> and y is B<sub>1</sub> then...*

aturan 2: *if x is A<sub>2</sub> and y is B<sub>2</sub> then...*

Sistem *neuro-fuzzy* yang ekuivalen dengan sistem inferensi *fuzzy* gambar 2.7, mempunyai struktur jaringan dengan lima lapisan seperti ditampilkkan gambar 2.8. Tiap lapisan mempunyai fungsi yang berbeda dan terdiri atas beberapa simpul.



**Gambar 2.8** Struktur *neuro-fuzzy*[14]

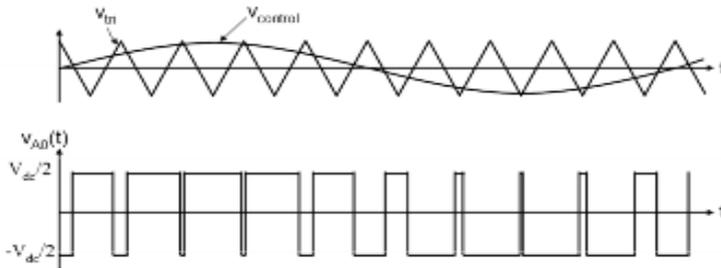
Dalam struktur ANFIS, simpul-simpul adaptif terdapat pada lapisan pertama dan keempat. Simpul pada lapisan pertama mengandung parameter premis yang nonlinier, sedangkan simpul pada lapisan keempat mengandung parameter konsekuen yang linier[14].

Langkah-langkah pembentukan *neuro-fuzzy* model Sugeno adalah sebagai berikut[15].

- i Pemilihan variabel *input-output* dan data.  
Pada langkah ini, akan ditetapkan variabel-variabel *input* yang relevan dengan *output* menggunakan metode eliminasi *backpropagation*. Seleksi variabel dilakukan dengan mengeliminasi variabel-variabel yang tidak diperlukan dan mempertahankan variabel-variabel yang memberikan korelasi signifikan terhadap variabel *output*.
- ii Pengelompokan (*clustering*) data.  
Pada bagian ini, data dibagi menjadi beberapa kelas. Pembelajaran jaringan syaraf yang berhubungan dengan bagian anteseden (bagian *if*) pada aturan-aturan inferensi *fuzzy*.
- iii Pembelajaran jaringan syaraf yang berhubungan dengan bagian konsekuen (bagian *then*) pada aturan-aturan inferensi *fuzzy*.
- iv Penyederhanaan bagian konsekuen (bagian *then*).  
Pada langkah ini dilakukan seleksi variabel *input* kembali dan kemudian melatih jaringan kembali untuk mendapatkan nilai *error* rata-rata.
- v Penentuan *output* akhir.

### 2.3 Teknik SPWM

SPWM merupakan salah satu teknik untuk mengatur penyaklaran pada inverter. SPWM menghasilkan sinyal *digital* yang mempunyai lebar pulsa (*duty cycle*) yang dapat diubah-ubah. Pembuatan SPWM terdiri dari gelombang segitiga (*carrier*) yang dimodulasi dengan gelombang sinusoidal (referensi). Apabila amplitudo sinyal referensi berada di atas sinyal *carrier*, maka dihasilkan sinyal *digital on*, begitu pula sebaliknya.

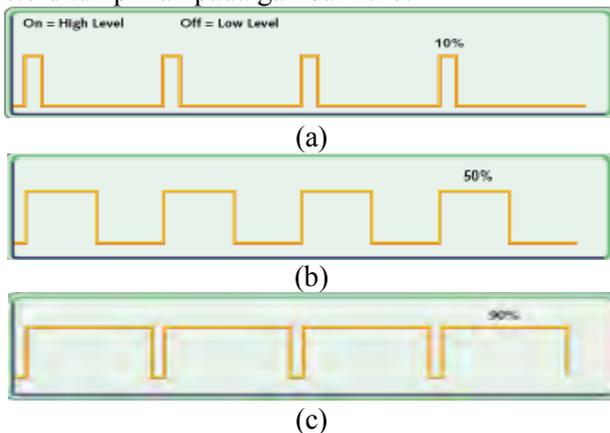


**Gambar 2.9** Teknik SPWM[16]

Perbandingan antara amplitudo sinyal referensi dengan *carrier* disebut indeks modulasi ( $m$ ), yang dapat ditentukan dengan persamaan (2.9), dengan  $V_r$  adalah tegangan referensi, dan  $V_c$  adalah tegangan *carrier*.

$$m = \frac{V_r}{V_c} \quad (2.9)$$

Teknik SPWM mampu menghasilkan keluaran yang mendekati bentuk sinusoidal, akan tetapi masih mengandung riak yang cukup besar. Pengaturan lebar pulsa pada teknik SPWM yaitu dengan mengubah-ubah frekuensi sinyal referensi sinus, sehingga didapatkan *duty cycle* yang berbeda-beda. Perbedaan *duty cycle* ditampilkan pada gambar 2.10.



**Gambar 2.10** SPWM output: (a) *duty cycle* 10%, (b) *duty cycle* 50% dan (c) *duty cycle* 90%[17]

Gambar 2.10 (a) dengan *duty cycle* 10% maksudnya adalah SPWM menghasilkan sinyal *on* 10% dan sinyal *off* 90% dalam 1 perioda. Begitu pula dengan *duty cycle* 50% dan 90% pada gambar 2.10 (b) dan gambar 2.10 (c), yang secara berturut-turut menghasilkan sinyal *on-off* 50%-50% dan 90%-10%.

## 2.4 Low pass filter orde dua

*Low pass filter* (LPF) adalah suatu rangkaian yang meneruskan sinyal-sinyal yang memiliki frekuensi dibawah frekuensi transisinya, dan melemahkan sinyal-sinyal yang memiliki frekuensi diatas frekuensi transisinya. Frekuensi transisi (frekuensi *cut-off*) merupakan suatu frekuensi dimana respon *gain* dari LPF ( $H(\omega)$ ) tersebut turun menjadi 70,7% dari *gain* maksimumnya. Frekuensi *cut-off* ( $f_c$ ) dari filter ini ditentukan oleh nilai RC[18].

Fungsi transfer dari LPF orde dua dapat ditentukan dengan persamaan (2.10),

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.10)$$

dengan  $\omega_n$ : frekuensi resonansi

$\zeta$  : *damping ratio*.

Frekuensi resonansi didapat dari persamaan (2.11) hingga (2.13),

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.11)$$

$$2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.12)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.13)$$

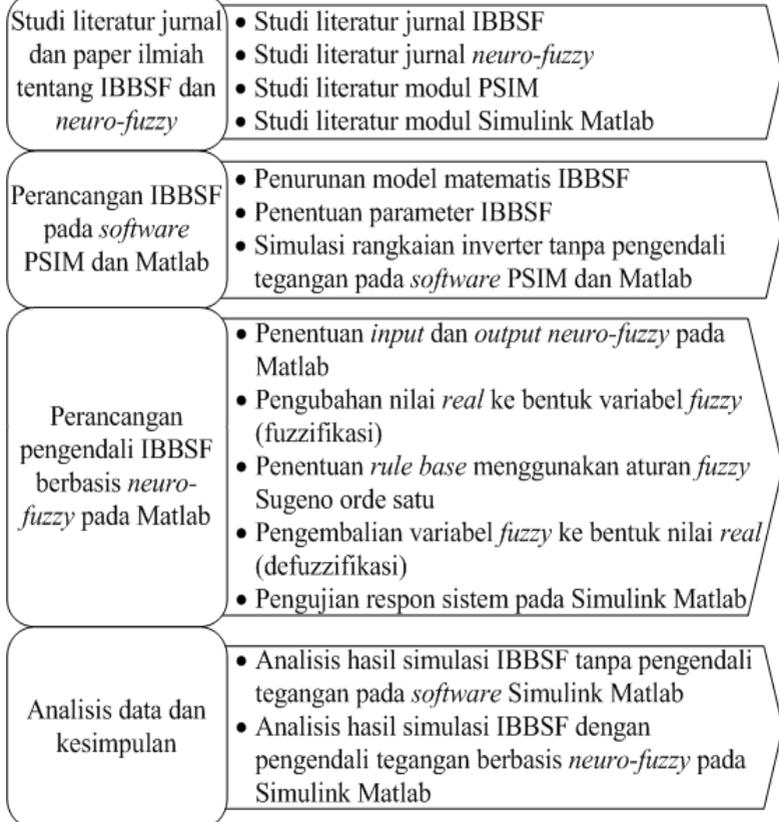
Nilai *damping ratio* dapat dihitung dengan persamaan (2.14), dengan Q merupakan *quality factor* yang memiliki ketetapan nilai 0,707.

$$\zeta = \frac{1}{2Q} \quad (2.14)$$

**Halaman ini memang dikosongkan**

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijabarkan langkah-langkah alur tugas akhir simulasi pengendalian tegangan IBBSF menggunakan *neuro-fuzzy*. *Flowchart* tugas akhir ditampilkan gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Proses rancangan penelitian

### 3.1 Studi Literatur

Bagian ini meliputi pemahaman tentang perancangan IBBSF. Selain itu diperlukan pemahaman mengenai definisi dan desain *neuro-fuzzy*, khususnya *neuro-fuzzy controller* pada

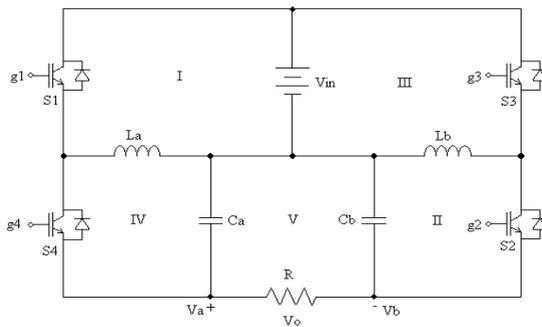
inverter *buck-boost*. Studi mengenai cara penggunaan *software* PSIM dan Simulink Matlab juga diperlukan untuk menunjang pengerjaan tugas akhir ini. PSIM digunakan sebagai simulator acuan dalam melakukan perancangan IBBSF, sedangkan Simulink Matlab digunakan untuk melakukan desain rancangan IBBSF dari model matematis. Pada Matlab juga dimanfaatkan *toolbox* anfis untuk merancang *neuro-fuzzy controller*.

### 3.2 Perancangan IBBSF pada Software PSIM dan Matlab

Bagian ini terdiri dari penurunan model matematis, penentuan parameter inverter, serta simulasi rangkaian pada *software* PSIM dan Matlab.

#### 3.2.1. Penurunan model matematis IBBSF

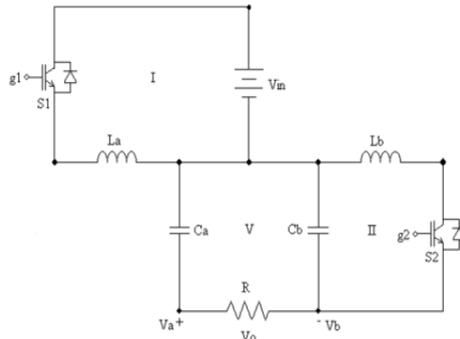
Penurunan model matematis ini didapatkan dari sistem rangkaian IBBSF, yaitu pada kondisi *on-off* dari *switch*. Selanjutnya digunakan pemodelan dengan *state space* untuk mendapatkan fungsi transfernya. Keseluruhan model matematis ini dirujuk dari penelitian sebelumnya[19].



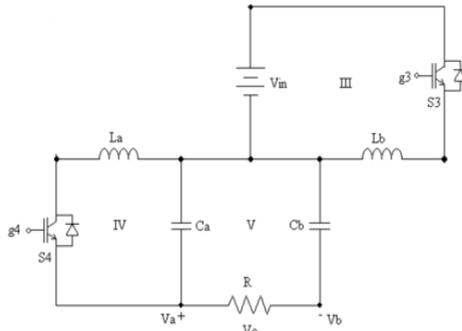
**Gambar 3.2** Topologi IBBSF[19]

Gambar 3.2 menampilkan rangkaian IBBSF *single-stage*, yang terdiri dari dua induktor ( $L_a$ - $L_b$ ), dua kapasitor ( $C_a$ - $C_b$ ), hambatan ( $R$ ) dan *switch* ( $S1$ - $S4$ ). Jenis *switch* yang digunakan adalah IGBT. Sumber tegangan DC ( $V_{in}$ ) dipasang diantara dua induktor, dengan keluaran berupa tegangan AC yang merupakan besar tegangan pada beban ( $V_o$ ). Rangkaian topologi IBBSF yang

ditampilkan gambar 3.2 merupakan rangkaian listrik tertutup lima *loop* yang disimbolkan dengan angka I-V. Rangkaian ini kemudian dibagi menjadi dua bagian sesuai dengan kombinasi *switching* yang digunakan, seperti ditampilkan gambar 3.3.



(a)



(b)

**Gambar 3.3** Kondisi rangkaian (a) S1-S2 on, (b) S3-S4 on

Kondisi *switching* pada rangkaian inverter memiliki dua kombinasi, yaitu *switch* S1-S2 dan *switch* S3-S4. Saat kondisi S1-S2 on dan S3-S4 off seperti gambar 3.3 (a), sesuai dengan hukum arus dan tegangan Kirchoff, maka dapat dituliskan persamaan (3.1) hingga persamaan (3.4).

$$V_{La} = V_{in} \quad (3.1)$$

$$V_{Lb} = V_{Cb} \quad (3.2)$$

$$V_o = V_{Cb} - V_{Ca} \quad (3.3)$$

$$i_o = i_{Cb} + i_{Lb} \quad (3.4)$$

Pada *loop* I, arah *loop* yang bergerak ke kiri menyebabkan sumber tegangan ( $V_{in}$ ) lebih dahulu menjumpai kutub negatif (-), sehingga nilai ggl ( $\varepsilon$ ) juga bernilai negatif. Berdasarkan hukum tegangan Kirchoff, penjumlahan  $V_{in}$  dengan  $V_{La}$  bernilai nol, sehingga apabila  $V_{in}$  bernilai negatif, maka pada *loop* ini berlaku persamaan (3.1). Hal ini juga berlaku pada *loop* II, yang matematisnya dituliskan oleh persamaan (3.2).

Apabila persamaan (3.3) disubstitusi ke persamaan (3.2), maka

$$\begin{aligned} V_{Lb} &= V_o + V_{Ca} \\ V_{Lb} &= i_o R + V_{Ca} \end{aligned} \quad (3.5)$$

selanjutnya persamaan 3.4 disubstitusi ke persamaan (3.5), sehingga dapat ditentukan besar arus pada induktor ( $i_{Lb}$ ).

$$\begin{aligned} V_{Lb} &= R(i_{Cb} + i_{Lb}) + V_{Ca} \\ L_b \frac{di_{Lb}}{dt} &= R(i_{Cb} + i_{Lb}) + V_{Ca} \\ L_b \frac{di_{Lb}}{dt} &= Ri_{Cb} + Ri_{Lb} + V_{Ca} \\ \frac{di_{Lb}}{dt} &= \frac{Ri_{Lb}}{L_b} + \frac{Ri_{Cb}}{L_b} + \frac{V_{Ca}}{L_b} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Persamaan (3.3) disubstitusi ke persamaan (3.4), sehingga dapat ditentukan besar tegangan pada kapasitor ( $V_{Cb}$ ).

$$\begin{aligned} i_{Cb} &= i_o - i_{Lb} \\ C_b \frac{dV_{Cb}}{dt} &= \frac{V_o}{R} - i_{Lb} \\ C_b \frac{dV_{Cb}}{dt} &= \frac{V_{Cb}}{R} - \frac{V_{Ca}}{R} - i_{Lb} \\ \frac{dV_{Cb}}{dt} &= \frac{-i_{Lb}}{C_b} + \frac{V_{Cb}}{RC_b} - \frac{V_{Ca}}{RC_a} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Persamaan (3.6) dan persamaan (3.7) dapat dituliskan dalam bentuk matrik yang ditampilkan persamaan (3.8).

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{Lb}}{dt} \\ \frac{dV_{Cb}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{L_b} & 0 \\ -1 & \frac{1}{RC_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lb} \\ V_{Cb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R}{L_b} & \frac{1}{L_b} \\ 0 & \frac{-1}{RC_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Cb} \\ V_{Ca} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Serupa dengan penjelasan gambar 3.3 (a) yang berdasarkan hukum Kirchoff, saat kondisi S1-S2 *off* dan S3-S4 *on* seperti gambar 3.3 (b), berlaku persamaan (3.9) hingga persamaan (3.12).

$$V_{Lb} = V_{in} \quad (3.9)$$

$$V_{La} = V_{Ca} \quad (3.10)$$

$$V_o = V_{Ca} - V_{Cb} \quad (3.11)$$

$$i_o = i_{Ca} + i_{La} \quad (3.12)$$

Pada *loop* III, arah *loop* yang bergerak kekanan menyebabkan sumber tegangan ( $V_{in}$ ) lebih dahulu menjumpai kutub negatif (-), sehingga nilai ggl ( $\epsilon$ ) juga bernilai negatif. Berdasarkan hukum tegangan Kirchoff, penjumlahan  $V_{in}$  dengan  $V_{Lb}$  bernilai nol, sehingga apabila  $V_{in}$  bernilai negatif, maka pada *loop* ini berlaku persamaan (3.9). Hal ini juga berlaku pada *loop* IV, yang matematisnya dituliskan oleh persamaan (3.10).

Apabila persamaan (3.11) disubstitusi ke persamaan (3.10), maka

$$V_{La} = V_o + V_{Cb}$$

$$V_{La} = i_o R + V_{Cb} \quad (3.13)$$

selanjutnya persamaan (3.12) disubstitusi ke persamaan (3.13), sehingga dapat ditentukan besar arus pada induktor ( $i_{La}$ ).

$$\begin{aligned} V_{La} &= R(i_{Ca} + i_{La}) + V_{Cb} \\ L_a \frac{di_{La}}{dt} &= R(i_{Ca} + i_{La}) + V_{Cb} \\ L_a \frac{di_{La}}{dt} &= Ri_{Ca} + Ri_{La} + V_{Cb} \\ \frac{di_{La}}{dt} &= \frac{Ri_{La}}{L_a} + \frac{Ri_{Ca}}{L_a} + \frac{V_{Cb}}{L_a} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Persamaan (3.11) disubstitusi ke persamaan (3.12), sehingga dapat ditentukan besar tegangan pada kapasitor ( $V_{Ca}$ ).

$$\begin{aligned} i_{Ca} &= i_o - i_{La} \\ C_a \frac{dV_{Ca}}{dt} &= \frac{V_o}{R} - i_{La} \\ C_a \frac{dV_{Ca}}{dt} &= \frac{V_{Ca}}{R} - \frac{V_{Cb}}{R} - i_{Lb} \\ \frac{dV_{Ca}}{dt} &= \frac{-i_{La}}{C_a} + \frac{V_{Ca}}{RC_a} - \frac{V_{Cb}}{RC_a} \end{aligned} \quad (3.15)$$

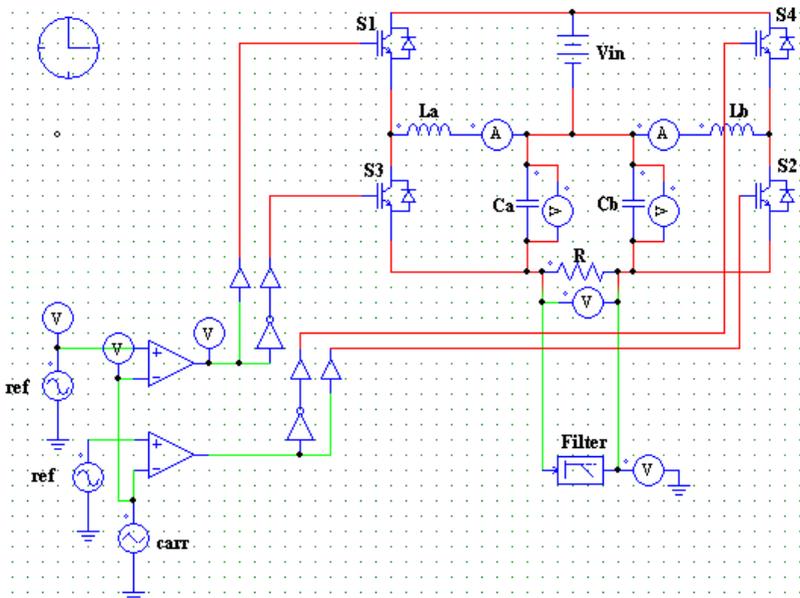
Persamaan (3.14) dan persamaan (3.15) dapat dituliskan dalam bentuk matriks yang ditampilkan persamaan (3.16).

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{La}}{dt} \\ \frac{dV_{Ca}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{L_a} & 0 \\ -\frac{1}{C_a} & \frac{1}{RC_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ V_{Ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R}{L_a} & \frac{1}{L_a} \\ 0 & -\frac{1}{RC_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ V_{Cb} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

### 3.2.2. Penentuan parameter IBBSF

Ada 3 parameter yang ditentukan dalam perancangan IBBSF, yaitu tegangan *input*, tegangan *output* dan frekuensi *carrier*. Nilai tiap komponen pada inverter seperti induktor dan kapasitor mengacu pada penelitian oleh Vazquez seperti yang dituliskan pada tabel 4.1[20]. Nilai resistor didapatkan dari perhitungan dengan persamaan (2.8), dimana besar daya dan tegangan disesuaikan dengan yang diinginkan.

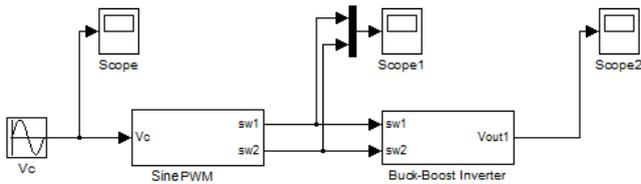
### 3.2.3. Simulasi rangkaian inverter tanpa pengendali tegangan pada software PSIM dan Matlab



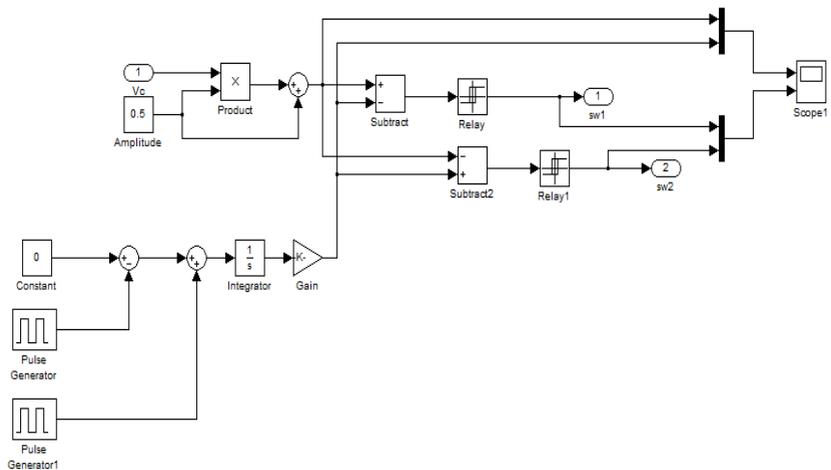
**Gambar 3.4** Pemodelan IBBSF dengan teknik SPWM di PSIM

Berdasarkan parameter dan rujukan penelitian sebelumnya[20], dilakukan simulasi menggunakan *software* PSIM sebagai acuan. Bentuk sinyal yang dihasilkan dari simulasi dengan PSIM menjadi parameter kebenaran dari hasil simulasi dengan Simulink Matlab. Rangkaian simulasi dengan PSIM tampak seperti gambar 3.4, dimana selain IBBSF juga terdapat blok *filter* sebagai pengurangan riak pada sinyal keluaran. Ada juga blok SPWM yang terdiri dari 1 sinyal *carrier* berupa gelombang segitiga dan 2 sinyal referensi berupa gelombang sinusoidal. Kedua sinyal ini dihubungkan dengan komparator dan logika NOT untuk didapatkan modulasi berupa sinyal *digital* 1 0.

Pemodelan IBBSF tanpa pengendali menggunakan Simulink Matlab secara keseluruhan ditampilkan gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Pemodelan sistem *open loop* di Simulink Matlab



**Gambar 3.6** Pemodelan SPWM *open loop*

Sesuai gambar 3.6, digunakan sinyal referensi berupa gelombang sinus sebagai modulasi dengan sinyal *carrier* pada SPWM. Keluaran SPWM berupa dua buah sinyal *digital* 1 0 yang dituliskan dengan simbol  $sw_1$  dan  $sw_2$  sebagai masukan blok IBBSF. Pemodelan SPWM secara matematis diawali dari persamaan (3.17), yang merupakan persamaan umum dari sinyal sinusoidal

$$y_{\text{sinus}} = A \sin(\omega t) \quad (3.17)$$

$$y_{\text{ref}} = AB \sin(\omega t) + B \quad (3.18)$$

dengan A: amplitudo

$\omega$  : frekuensi sudut

t : waktu

y : keluaran gelombang sinus

B :  $\frac{1}{2} A$ .

Keluaran gelombang sinus berdasarkan persamaan (3.17) menghasilkan amplitudo yang bernilai  $\pm A$ . Agar didapatkan gelombang sinus yang bernilai 0 1, maka persamaan (3.17) dikalikan dengan setengah dari amplitudo, yang selanjutnya dijumlahkan lagi dengan setengah amplitudo. Persamaan sinus yang baru sebagai referensi ditampilkan persamaan (3.18).

*Pulse generator* yang digunakan memiliki persamaan umum (3.19) dan (3.20), dengan  $\phi$  adalah fasa yang menunjukkan dimana posisi awal gerakan ketika  $t=0$ .

$$y_{\text{pulse1}} = A \sin(\omega t + \phi) \quad (3.19)$$

$$y_{\text{pulse2}} = A \sin(\omega t) \quad (3.20)$$

Fasa yang diperoleh dari setengah perioda pada persamaan (3.19), membalikkan amplitudo sinyal keluaran 0 1 menjadi -1 0. Fasa yang bernilai 0 pada persamaan (3.20), tetap menghasilkan keluaran 0 1. Penjumlahan dari persamaan (3.19) dan (3.20) seperti ditampilkan persamaan (3.21), menghasilkan keluaran gelombang kotak dengan amplitudo  $\pm 1$ . Penambahan integrator dimaksudkan untuk mendapatkan gelombang segitiga sebagai sinyal *carrier*, sehingga dapat dituliskan seperti persamaan (3.22).

$$y_{\text{pulse1,2}} = -[A \sin(\omega t + \phi)] + [A \sin(\omega t)] \quad (3.21)$$

$$y_{\text{car}} = k \int [-A \sin(\omega t + \phi) + A \sin(\omega t)] \quad (3.22)$$

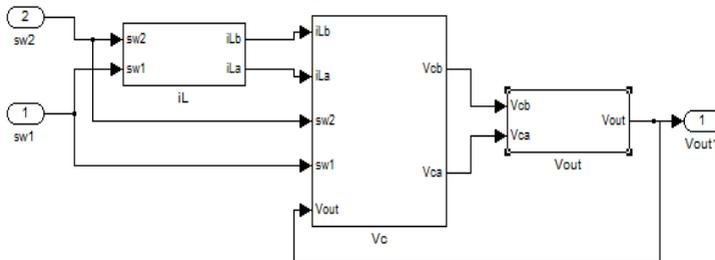
Persamaan (3.18) dijumlahkan dengan persamaan (3.22) untuk mendapatkan modulasi sinyalnya berupa sinyal *digital on-off*, sehingga dapat dituliskan seperti persamaan (3.23) dan (3.24).

$$sw1 = [AB \sin(\omega t) + B] - [k \int (-A \sin(\omega t + \varphi) + A \sin(\omega t))] \quad (3.23)$$

$$sw2 = -[AB \sin(\omega t) + B] + [k \int (-A \sin(\omega t + \varphi) + A \sin(\omega t))] \quad (3.24)$$

Keluaran sinyal  $sw1$  pada persamaan (3.23) mengatur *switching* pada kombinasi saklar S1-S2, sementara  $sw2$  pada persamaan (3.24) mengatur *switching* pada kombinasi saklar S3-S4.

Fungsi transfer yang didapatkan dari penurunan model matematis rangkaian persamaan (3.8) dan (3.16) disimulasikan sebagai rangkaian IBBSF seperti gambar 3.7.

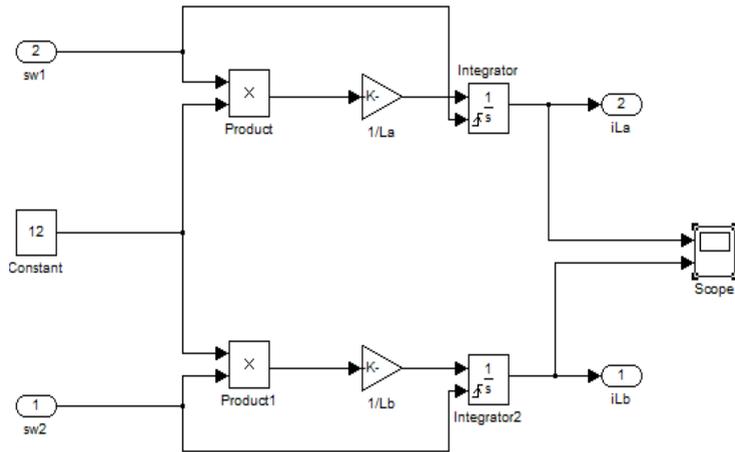


**Gambar 3.7** Pemodelan IBBSF *open loop* dengan Simulink Matlab

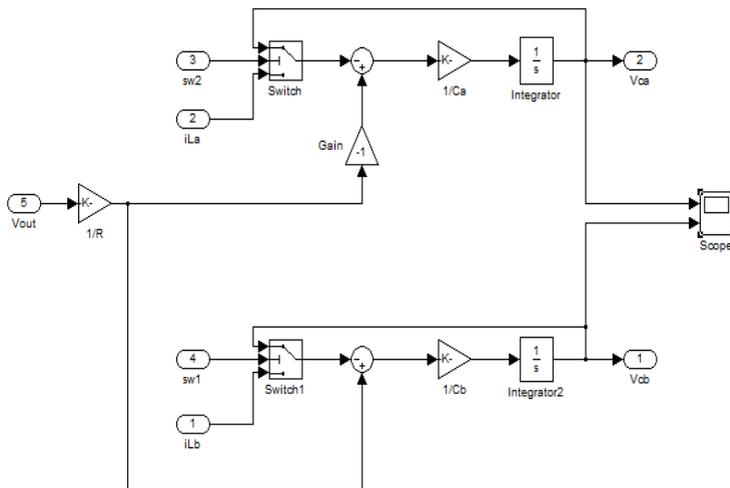
Gambar 3.7 menunjukkan model IBBSF secara keseluruhan yang terdiri dari tiga bagian, yaitu arus pada induktor, tegangan pada kapasitor, dan tegangan pada beban. Pada tiap-tiap blok dalam gambar 3.7, terdapat pemodelan yang lebih rinci lagi seperti ditampilkan gambar 3.8.

Gambar 3.8 (a) didapatkan dari persamaan (3.1) dan (3.9), dengan nilai konstan 12 merupakan tegangan sumber DC. Metode penyaklaran sebelumnya telah dijelaskan pada gambar 3.3, sehingga  $sw1$  yang mengatur kombinasi *switch* S1-S2 digunakan untuk mendapatkan arus di  $L_a$ . Sementara  $sw2$  digunakan untuk mendapatkan arus di  $L_b$ . Gambar 3.8 (b) didapatkan dari substitusi persamaan (3.3) ke (3.7), dan substitusi persamaan (3.11) ke (3.15). Tegangan di  $C_a$  dipengaruhi oleh muatan yang

disimpan di  $L_a$ , hal ini berlaku juga untuk  $C_b$ , yang dipengaruhi oleh muatan di  $L_b$ .

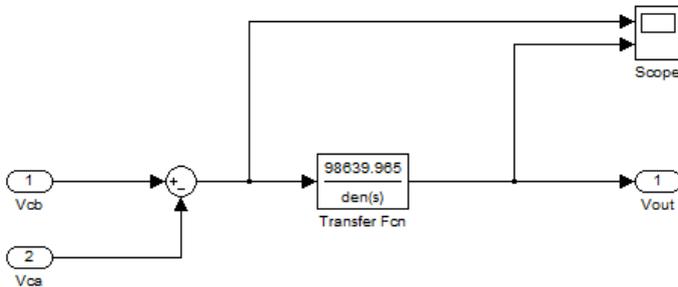


(a)



(b)

**Gambar 3.8** Pemodelan IBBSF *open loop*: (a) model arus induktor dan (b) model tegangan kapasitor

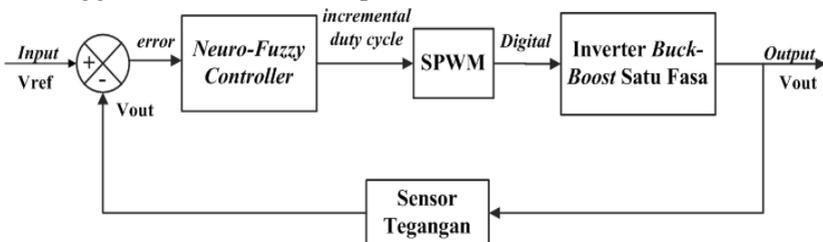


**Gambar 3.9** Pemodelan tegangan keluaran dan *filter* IBBSF *open loop* dengan Simulink Matlab

Pemodelan tegangan keluaran pada gambar 3.9 didapatkan dari persamaan (3.3), sedangkan fungsi transfer sebagai LPF didapatkan dengan menggunakan persamaan (2.10). Adanya LPF orde 2 adalah untuk menghilangkan riak pada keluaran inverter, serta menghasilkan sinyal keluaran berupa sinusoidal.

### 3.3 Perancangan Pengendali IBBSF berbasis *Neuro-Fuzzy* pada Matlab

Perancangan *neuro-fuzzy controller* meliputi 5 tahap yaitu, identifikasi, fuzzifikasi, penentuan *rule base*, defuzzifikasi, dan pengujian respon sistem. Keseluruhan tahap ini dilakukan dengan menggunakan *toolbox* anfis pada Matlab.



**Gambar 3.10** Diagram pengendalian perancangan sistem

Berdasarkan gambar 3.10, tampak bahwa keluaran *neuro-fuzzy controller* yang berupa penambahan *duty cycle*, digunakan untuk mengubah besar *duty cycle* sebelumnya yang merupakan

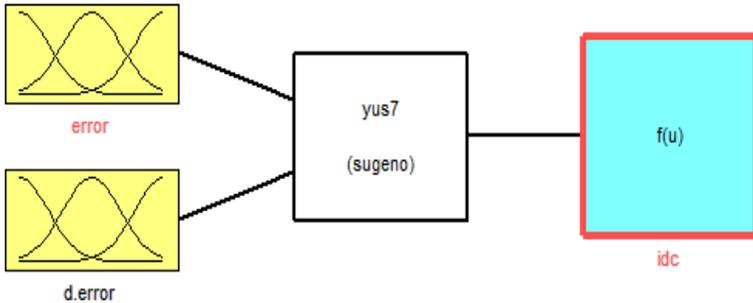
rangkaian *open loop*. *Duty cycle* sendiri merupakan proporsi waktu dimana sistem beroperasi. Pengaturan *duty cycle* mempengaruhi besar kecilnya tegangan keluaran yang dihasilkan oleh inverter dengan masukan pada IBBSF berupa sinyal *digital* 1 0. Pengaturan ini dilakukan dalam blok SPWM.

Perbedaan SPWM *closed loop* dengan *open loop* yaitu terletak pada gelombang sinus yang digunakan. Jika pada rangkaian *open loop* gelombang sinusnya dari sinyal referensi, maka pada rangkaian *closed loop* gelombang sinusnya dari penjumlahan sinyal referensi dengan sinyal kontrol. Oleh karena itu hasil keluaran SPWM IBBSF *closed loop* juga berbeda dari IBBSF *open loop*. Blok IBBSF yang terdiri dari rangkaian pada gambar 3.7, sistem kerjanya dipengaruhi oleh sinyal *digital* yang dihasilkan dari SPWM. Sensor tegangan pada diagram pengendalian ini bernilai 1. Hal ini dikarenakan keluaran dari IBBSF yang berupa tegangan, juga merupakan keluaran dari sensor tegangan itu sendiri. Artinya, *input-output* (I/O) dari sensor yang digunakan adalah sama, sehingga sensor tersebut dapat diasumsikan bernilai 1. Sinyal keluaran dari sensor yang berupa tegangan *output*, diubah menjadi nilai *error* sebagai salah satu masukan *neuro-fuzzy* dengan melakukan pengurangan terhadap tegangan referensi.

### 3.3.1. Penentuan *input* dan *output neuro-fuzzy* pada Matlab

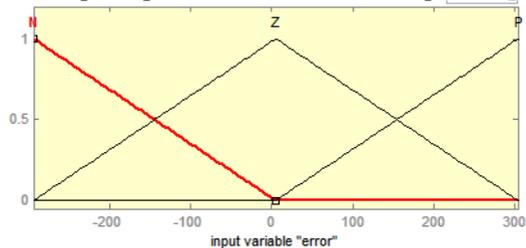
Pada tugas akhir ini metode *fuzzy* yang digunakan adalah metode Sugeno, dimana keluaran sistem tidak berupa himpunan *fuzzy*, melainkan persamaan linier. Langkah pertama dalam perancangan *neuro-fuzzy* yaitu dilakukan penentuan parameter masukan yang dapat mempengaruhi performansi sistem. Masukan dari *neuro-fuzzy controller* adalah *voltage error* yang didapat dari selisih antara tegangan referensi dengan tegangan keluaran dari inverter, serta *delta error* yang diperoleh dari selisih antar *voltage error*. Keluaran *neuro-fuzzy* adalah penambahan *duty cycle* pada gelombang sinus yang digunakan sebagai modulasi sinyal *carrier* pada blok SPWM. Semakin besar *duty cycle* sinyal SPWM, maka tegangan yang dihasilkan oleh IBBSF juga semakin besar.

### 3.3.2. Perubahan nilai *real* ke bentuk variabel *fuzzy* (fuzzifikasi)

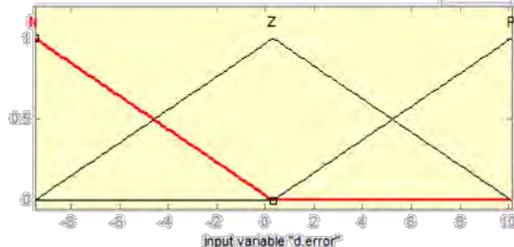


**Gambar 3.11** *Fuzzy inference system*

Masukan dari *fuzzy* yang sudah ditentukan sebelumnya (*crisp*) ditransfer ke dalam himpunan *fuzzy* untuk digunakan dalam perhitungan nilai kebenaran dari premis pada setiap aturan. Tahapan ini mengambil nilai-nilai *crisp* dan menentukan derajat dimana nilai tersebut menjadi anggota dari setiap himpunan *fuzzy* yang sesuai. FIS pada proses fuzzifikasi ditampilkan gambar 3.11.

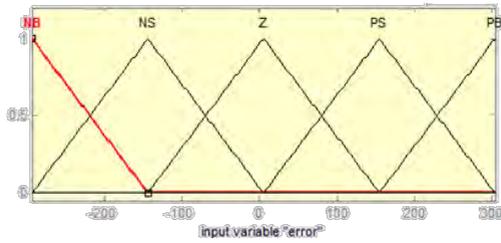


(a)

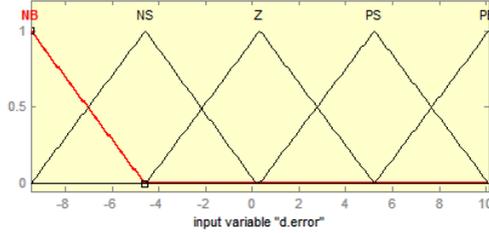


(b)

**Gambar 3.12** *Input mf 3: (a) error dan (b) delta error*

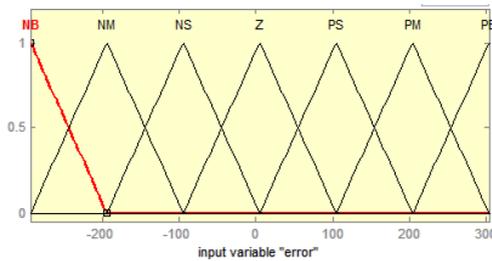


(a)

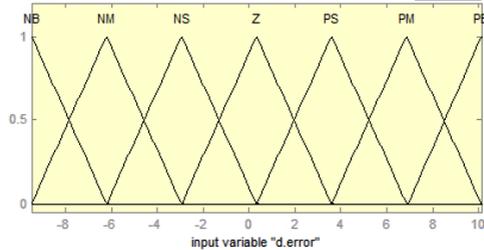


(b)

**Gambar 3.13** *Input mf 5: (a) error dan (b) delta error*



(a)



(b)

**Gambar 3.14** *Input mf 7: (a) error dan (b) delta error*

Perlu dilakukannya proses fuzzifikasi yaitu untuk proses pemetaan nilai *input* dari numerik menjadi linguistik berdasarkan fungsi keanggotaan. Dua *input* yang berupa *error* dan *delta error* divariasikan dengan 3 macam *membership function* (mf), yaitu mf 3 pada gambar 3.12, mf 5 pada gambar 3.13, dan mf 7 pada gambar 3.14. Banyaknya jumlah mf akan mempengaruhi nilai *average error* selama proses *training data*, sehingga untuk mendapatkan nilai *training error* yang terkecil, perlu dilakukan beberapa variasi pada mf.

### 3.3.3. Penentuan *rule base* menggunakan aturan fuzzy sugeno orde satu

Aturan yang digunakan menghubungkan *input* dan *output* tunggal yang dimengerti oleh sistem. Umumnya aturan fuzzy memiliki logika struktur *if...then...* Nilai-nilai masukan yang diberikan dikombinasikan dengan operator AND. Selain penentuan aturan (*rule base*) pada fuzzy, diperlukan penentuan keanggotaan himpunan juga. Keanggotaan inilah yang memanfaatkan sistem *neural network* atau umumnya dikenal dengan ANFIS. Penentuan aturan dan keanggotaan ini dilakukan secara otomatis dengan memanfaatkan *toolbox* *anfis* Matlab yang ditampilkan tabel 3.1. Tabel *rule base* yang ditampilkan menggunakan mf 7, dengan 49 aturan logika. Seluruh aturan logika ini digunakan untuk menentukan *output* ANFIS dari *input* yang diberikan, dengan *e* adalah *error* dan *de* adalah *delta error*.

**Tabel 3.1** Tabel *rule base* ANFIS

<b>de</b> \ <b>e</b>	<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>Z</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
<b>NM</b>	NB	NM	NM	NS	Z	Z	PS
<b>NS</b>	NM	NM	NS	Z	Z	NS	PS
<b>Z</b>	NM	NS	NS	Z	PS	NS	PM
<b>PS</b>	NS	NS	Z	Z	PS	PM	PM
<b>PM</b>	NS	Z	Z	PS	PM	PM	PB
<b>PB</b>	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB

Keterangan:

NB : *Negative Big*

NM : *Negative Medium*

NS : *Negative Small*

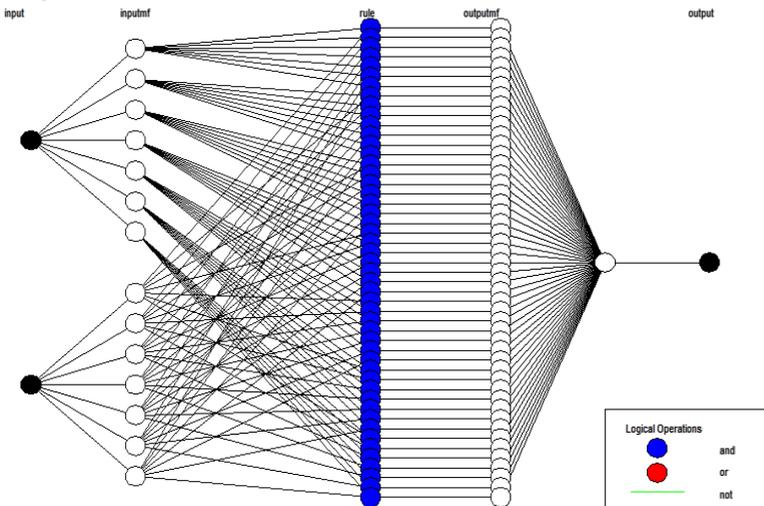
Z : *Zero*

PS : *positive Small*

PM : *Positive Medium*

PB : *Positive Big*

Notasi pada tabel 3.1 merupakan fungsi keanggotaan yang digunakan pada tiap-tiap *input*, dengan hasilnya berupa *output* mf dari *incremental duty cycle* (idc). Penjelarasannya adalah sebagai berikut. Jika *error* adalah NB dan *delta error* adalah NB, maka idc adalah NB. Jika *error* adalah NB dan *delta error* adalah NM, maka idc adalah NB. Hal ini berlaku seterusnya untuk logika yang lain.



**Gambar 3.15** ANFIS *structure*

Berdasarkan proses fuzzifikasi dengan memanfaatkan sistem jaringan syaraf (*neural network*), model struktur ANFIS ditampilkan pada gambar 3.15. Terdapat 5 lapisan pada struktur ANFIS yang dihasilkan. Lapisan pertama merupakan masukan

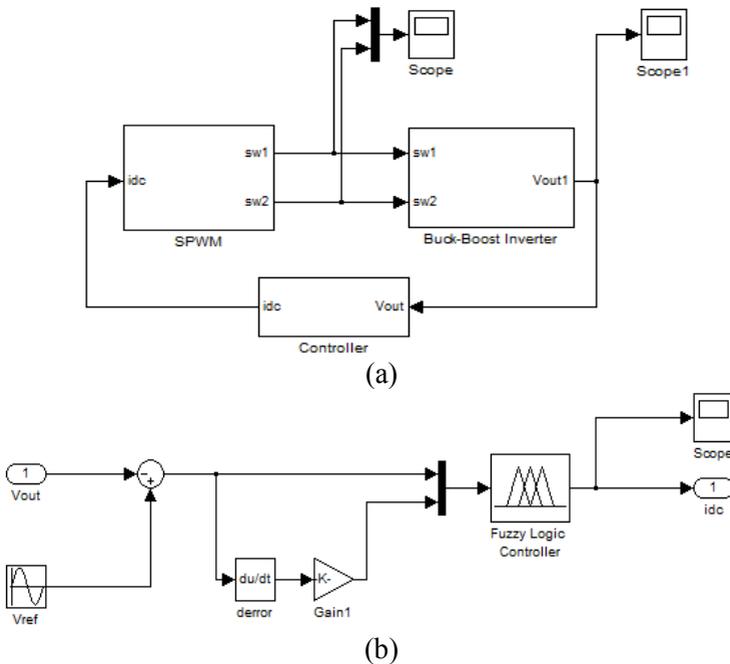
dari ANFIS berupa *error* dan *delta error*. Lapisan kedua adalah pemetaan mf dari tiap masukannya. Lapisan ketiga berupa aturan-aturan yang mungkin, seperti ditampilkan tabel 3.1. Lapisan keempat merupakan keluaran berupa persamaan linier terhadap masukannya, serta lapisan terakhir berupa keluaran total dari ANFIS.

### **3.3.4. Pengembalian variabel fuzzy ke bentuk nilai real (defuzzifikasi)**

Proses defuzzifikasi digunakan untuk mengubah kembali variabel *fuzzy* ke variabel nyata, atau dengan kata lain aksi *fuzzy control* yang masih berupa himpunan diubah menjadi nilai nyata tunggal. *Output* dari masing-masing aturan yang diberikan bersifat linear dengan variabel *input*. Keseluruhan *output* tersebut dijumlahkan hingga menghasilkan satu keluaran berupa penambahan *duty cycle*.

### **3.3.5. Pengujian respon sistem pada simulink matlab**

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan grafik hasil simulasi pengendali tegangan IBBSF. Grafik hasil simulasi kemudian dianalisis dan diambil kesimpulan. Dalam pengujian sistem *closed loop*, diperlukan perancangan *neuro-fuzzy controller* seperti gambar 3.16 (a) yang menunjukkan pemodelan Simulink dengan pengendali (*closed loop*). Perbedaan dari rangkaian *open loop* sebelumnya adalah jika rangkaian *open loop* keluaran dari IBBSF tidak diumpankan kembali ke SPWM, maka pada rangkaian *closed loop* keluaran IBBSF dengan perantara *controller* digunakan sebagai *feedback* menjadi masukan SPWM. Gambar 3.16 (b) merupakan model dari blok *Controller* pada gambar 3.16 (a), yang berisi FIS dari *neuro-fuzzy*, dengan masukan berupa *error* dari selisih antara tegangan referensi ( $V_{ref}$ ) dengan tegangan keluaran ( $V_{out}$ ). *Delta error* sebagai masukan keduanya didapatkan dengan melakukan diferensial terhadap *error*. Keluaran dari pengendali ini berupa *idc* yang digunakan untuk mengubah *duty cycle* sebelumnya di SPWM.



**Gambar 3.16** Pemodelan pengendali IBBSF berbasis *neuro-fuzzy*: (a) keseluruhan model inverter dengan kontrol dan (b) model *neuro-fuzzy*

### 3.4 Analisis Data dan Kesimpulan

Bagian ini meliputi analisis hasil simulasi perancangan rangkaian IBBSF dengan *software* PSIM dan Matlab. Grafik yang dihasilkan berupa grafik tegangan sinus, sehingga dapat diketahui besar tegangan yang mampu dicapai oleh sistem. Analisis hasil simulasi pengendali tegangan IBBSF dengan metode *neuro-fuzzy* pada Matlab juga dilakukan, sehingga didapatkan grafik tegangan sinus yang sudah dikontrol berdasarkan parameter masukan yang diberikan. Perbandingan antara grafik tegangan *open* dan *closed loop* kemudian dibandingkan, sehingga dapat diketahui besar tegangan yang mampu dinaikkan oleh *neuro-fuzzy controller*. Grafik respon *closed loop* juga dibuat agar dapat dianalisis *maximum overshoot* dan *settling time* yang dihasilkan. Grafik ini

selanjutnya dibandingkan dengan grafik respon sistem dengan pengendali PID, agar dapat dianalisis kelebihan dan kekurangan masing-masing metode pengendali yang digunakan. Semua hasil analisis inilah yang kemudian menjadi acuan untuk ditarik kesimpulan, seberapa besar manfaat dari penerapan metode *neuro-fuzzy* ini pada IBBSF.

**Halaman ini memang dikosongkan**

## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 1.1 Analisis Hasil Simulasi IBBSF tanpa Pengendali Tegangan

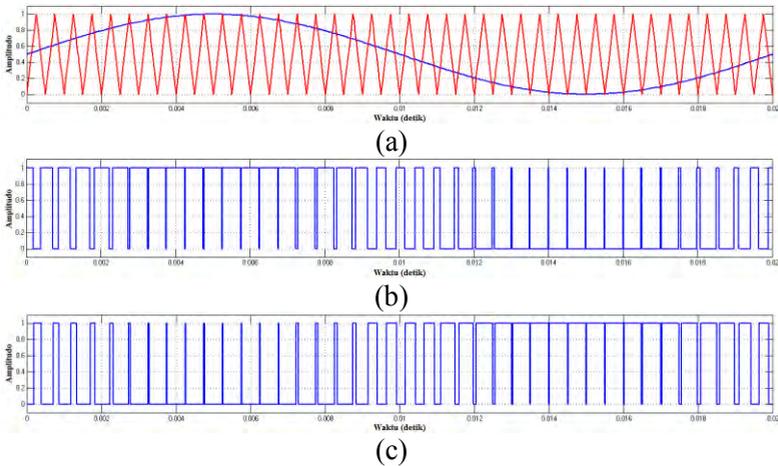
Parameter-parameter dalam memodelkan inverter *buck-boost* disajikan pada tabel 4.1, yang merujuk pada penelitian sebelumnya[20]. Nilai R didapat dari perhitungan menggunakan persamaan (2.8), dengan tegangan keluaran sebesar 220V dan daya sebesar 1 hp atau setara dengan 745,7 Watt.

**Tabel 4.1** Parameter IBBSF

Parameter	Nilai	Satuan
Frekuensi kontrol ( $f_{con}$ )	50	Hz
Frekuensi pembawa ( $f_{car}$ )	2000	Hz
Tegangan masukan ( $V_{in}$ )	12	Volt
Tegangan keluaran ( $V_{out}$ )	220	Volt
Hambatan beban (R)	65	$\Omega$
Induktor (L)	360	$\mu H$
Kapasitor (C)	22	$\mu F$

Pada IBBSF terdapat dua induktor dan dua kapasitor, dimana  $L_a=L_b$  dan  $C_a=C_b$ , sehingga  $L_a=L_b=L$  dan  $C_a=C_b=C$ .

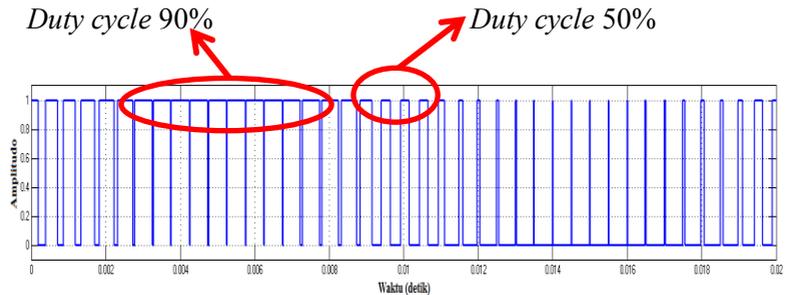
*Software* PSIM digunakan sebagai acuan peneliti untuk memodelkan inverter pada Simulink Matlab. Merujuk pada gambar 3.4, dimodelkan IBBSF dengan teknik SPWM pada Simulink Matlab seperti gambar 3.5. Sinyal referensi dengan frekuensi 50Hz digunakan untuk memodulasi sinyal *carrier* yang berupa gelombang segitiga. Penggunaan frekuensi sinus 50Hz disesuaikan dengan frekuensi sinus yang umumnya digunakan oleh Perseroan Listrik Negara (PLN) maupun industri pembangkit lainnya. Frekuensi 2000Hz pada sinyal *carrier* didapatkan dari simulasi dengan *software* PSIM, yang menunjukkan hasil keluaran inverter dengan riak terkecil. Modulasi sinyal sinus dengan segitiga dan hasil SPWM selama 1 periode ditampilkan pada gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Grafik sinyal SPWM *open loop*: (a) modulasi sinus dengan segitiga, (b) SPWM 1 dan (c) SPWM 2

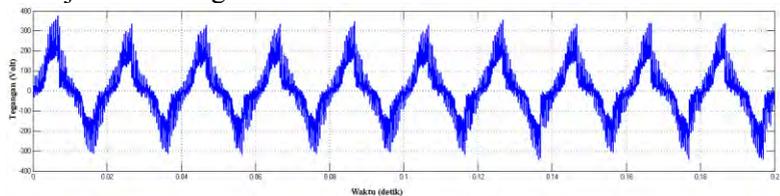
Prinsip teknik SPWM yaitu, sinyal akan bernilai 1 ketika gelombang sinus diatas gelombang segitiga, dan bernilai 0 ketika gelombang sinus dibawah gelombang segitiga. Gambar 4.1 (a) merupakan modulasi sinyal segitiga dengan sinusoidal, dengan garis sinus biru merupakan sinyal referensi dan garis segitiga merah merupakan sinyal *carrier*. Gambar 4.1 (b) merupakan hasil sinyal digital pada *switch* S1-S2, sedangkan gambar 4.1 (c) bawah merupakan hasil sinyal digital pada *switch* S3-S4. Hubungan antara modulasi sinyal dengan *switching* inverter dapat dijelaskan seperti berikut. Ketika gelombang sinus berada diatas gelombang segitiga, maka sinyal SPWM saat kondisi *switch* S1-S2 adalah *on* atau bernilai 1, sedangkan sinyal SPWM pada *switch* S3-S4 adalah *off* atau bernilai 0. Begitu pula sebaliknya, jika *switch* S1-S2 *off*, maka *switch* S3-S4 *on* karena bernilai 1. Kedua sinyal digital keluaran SPWM ini yang mempengaruhi sistem penyimpanan muatan pada induktor dan kapasitor inverter. *Duty cycle* dengan waktu *on-off* yang lebih lama (sekitar 90%), mampu menguatkan dan menurunkan tegangan DC, sehingga konsep *buck-boost* pada inverter terpenuhi. Penjelasan ini

ditampilkan pada gambar 4.2, dimana tampak bahwa *duty cycle* 90% jumlahnya lebih banyak daripada *duty cycle* yang lainnya.



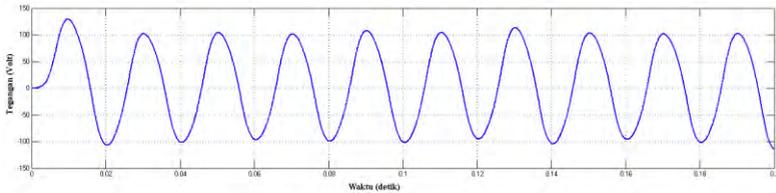
**Gambar 4.2** *Duty cycle SPWM open loop*

Keluaran dari teknik SPWM yang berupa pengendali *switch* pada IBBSF, dengan menggunakan rangkaian seperti gambar 3.7, tegangan masukan yang bernilai 12 Volt mampu dinaikkan hingga mencapai 300 Volt. Hasil grafik tegangan keluarannya ditunjukkan oleh gambar 4.3.



**Gambar 4.3** Grafik sinyal tegangan *output IBBSF open loop* di Simulink Matlab

Selain pengeruh dari sinyal keluaran SPWM, kenaikan tegangan pada keluaran IBBSF juga dipengaruhi oleh proses penyimpanan muatan pada induktor dan kapasitor. Grafik tegangan keluaran yang dihasilkan IBBSF meskipun mengandung banyak riak sesuai gambar 4.3, namun bentuk gelombangnya mendekati sinus, karena sudah tampak adanya bukit maupun lembah pada sinyal tersebut. Agar menghasilkan sinyal keluaran berupa gelombang sinus murni, maka perlu dilakukan *filter* pada tegangan keluaran IBBSF tersebut. Hasil grafik dari *filter* yang dimodelkan sesuai dengan gambar 3.9 ditampilkan gambar 4.4.

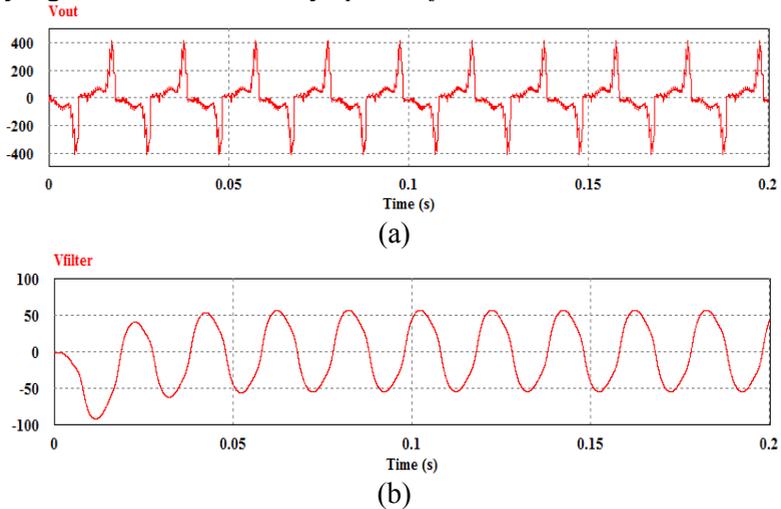


**Gambar 4.4** Grafik sinyal tegangan *filter* IBBSF *open loop* di Simulink Matlab

Jenis *filter* yang digunakan adalah *low pass filter* (LPF) orde dua. Adapun penggunaan *filter* LPF didasarkan dari simulasi menggunakan *software* PSIM, yang apabila dibandingkan dengan pemasangan *filter* yang lain, hasil grafik dari pemasangan LPF menghasilkan bentuk gelombang sinus tanpa riak. Penggunaan orde dua pada *filter*, dikarenakan fungsi transfer sistem IBBSF sendiri adalah fungsi transfer orde dua. Blok *filter* pada Simulink Matlab menggunakan *transfer function*, yang nilainya didapat dari persamaan (2.10), dengan penentuan frekuensi *cut off* sebesar 50Hz. Pemilihan nilai frekuensi ini didasarkan pada besar frekuensi yang umum digunakan di industri dan disesuaikan dengan besar tegangan keluaran yang diinginkan. Teori ini sebelumnya telah dijelaskan dalam tinjauan pustaka IBBSF. Nilai *quality factor* dari persamaan (2.14) yang digunakan untuk mendapatkan *damping ratio*, ditentukan sebesar 0,707, sehingga didapatkan besar *damping rationya*. Tegangan keluaran sebesar 300V yang dihasilkan oleh IBBSF, turun sebanyak 33% setelah dilakukan *filtering*, sehingga tegangan keluarannya menjadi 100V. Meskipun ada pelemahan tegangan setelah dilakukan *filter*, akan tetapi besar tegangan keluaran dari *filter* ini masih lebih besar dari tegangan DC *source*, sehingga konsep *buck-boost* pada inverter masih tercapai.

Kebenaran bentuk gelombang sinus yang dihasilkan dari Simulink Matlab dapat dilihat dengan membandingkannya pada grafik sinyal keluaran dari PSIM, seperti ditampilkan gambar 4.5. Gambar 4.5 (a) menunjukkan keluaran IBBSF tanpa *filter* dari PSIM yang belum berupa sinus dengan banyak riak, sedangkan

gambar 4.5 (b) merupakan hasil *filter* menggunakan LPF orde dua yang sudah tersedia bloknnya pada *software* PSIM.



**Gambar 4.5** Grafik sinyal tegangan *output* IBBSF di PSIM:  
(a) sinyal *output* dan (b) sinyal *output filter*

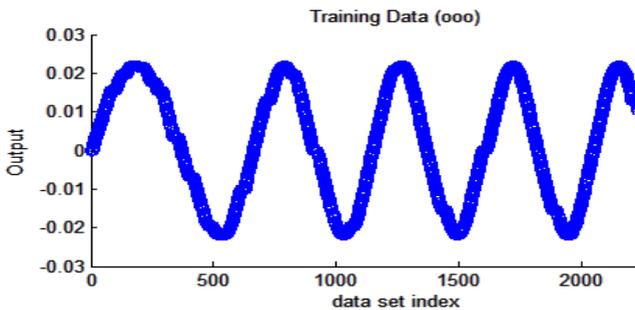
Jika dilakukan perbandingan antara gambar 4.3 hingga gambar 4.5, bentuk sinyal keluaran dari Simulink Matlab mendekati kemiripan dengan bentuk sinyal keluaran dari PSIM. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa, pemodelan IBBSF tanpa pengendali menggunakan Simulink Matlab sudah tercapai, dengan tegangan DC sumber 12V mampu dinaikkan menjadi tegangan AC sebesar 100V.

## 1.2 Analisis Hasil Simulasi IBBSF dengan Pengendali Tegangan

*Neuro-fuzzy controller* digunakan untuk menaikkan besar tegangan keluaran yang dihasilkan dari inverter sesuai dengan yang diinginkan. *Toolbox* anfis pada Matlab dimanfaatkan untuk melakukan prediksi *neuro-fuzzy*, dengan sebelumnya telah menentukan parameter-parameter I/O FIS seperti yang telah ditampilkan pada gambar 3.11 hingga gambar 3.14. Data yang digunakan pada ANFIS ditampilkan tabel 4.2.

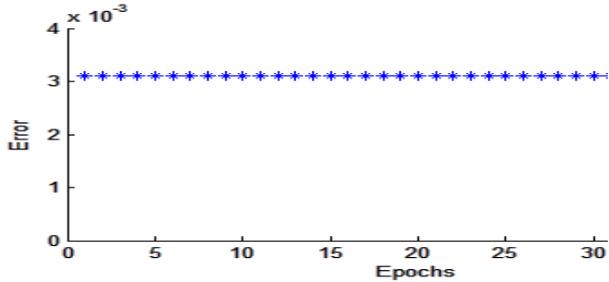
**Tabel 4.2** Data I/O ANFIS

No	Error	Delta Error	Incremental Duty Cycle
1	0.00	4.17E-04	0.00
2	4.17E-04	0.002083308	4.17E-08
3	2.50E-03	0.010416539	2.50E-07
4	0.0129	0.052082696	1.29E-06
5	0.0650	0.260413362	6.50E-06
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
2228	75.5	-5.35972178	0.0124
2229	70.2	-4.62888906	0.0119
2230	65.6	-5.9170714	0.0115
2231	59.6	-8.3259085	0.0110
2233	51.3	-8.33	0.0104

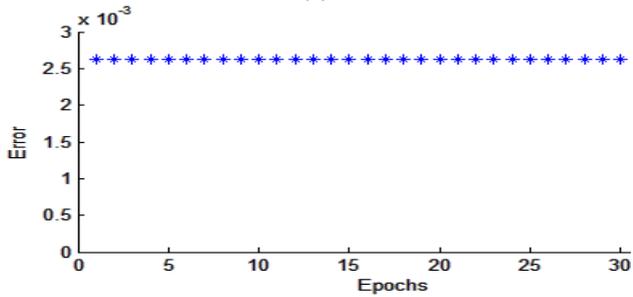
**Gambar 4.6** Grafik *training data*

Data pada tabel 4.2 disimpan dalam bentuk matriks, sehingga data dapat dibaca oleh Matlab ketika digunakan sebagai data *training* ANFIS. Hasil yang didapatkan pada model *training data* dengan mf 7 ditampilkan gambar 4.6, dengan data sejumlah 2233 data pada masing-masing masukan. Grafik ini menghasilkan bentuk data berupa sinus, dikarenakan masukan *neuro-fuzzy*

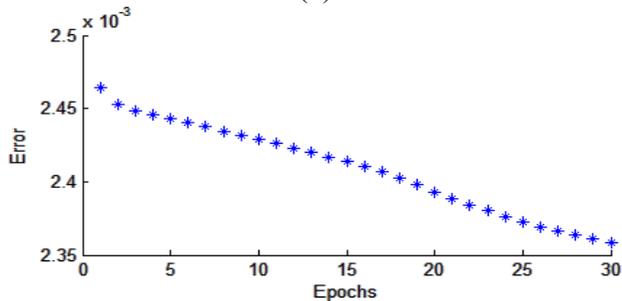
berupa grafik sinus yang didapat dari selisih antara tegangan keluaran dengan tegangan referensi. Tiga macam variasi mf yang dilakukan dengan menggunakan data yang sama dari tabel 4.2, menghasilkan *training error* yang berbeda, seperti ditampilkan gambar 4.7.



(a)



(b)

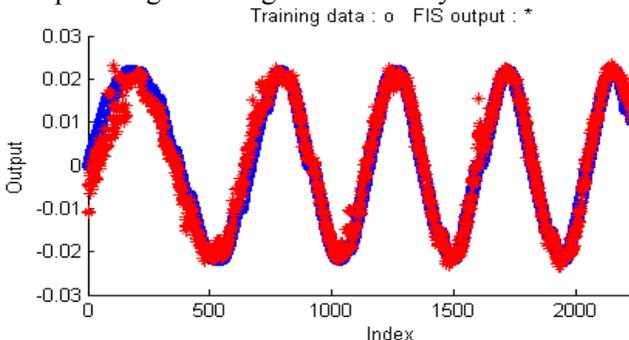


(c)

**Gambar 4.7** Hasil *training error* ANFIS: (a) 3 mf, (b) 5 mf dan (c) 7 mf

Gambar 4.7 (a) menampilkan hasil *training error* dengan menggunakan variasi mf 3, *error* yang dihasilkan stabil sejak iterasi pertama, dengan nilai *error* sebesar  $4 \times 10^{-3}$ . Pada gambar 4.7 (b), *error* yang dihasilkan juga stabil sejak iterasi pertama dengan nilai sebesar  $2.6 \times 10^{-3}$ . Gambar 4.7 (c) menunjukkan hasil *training error* mf 7 yang menurun dari iterasi pertama hingga mencapai nilai *error* sebesar  $2.35 \times 10^{-3}$  pada iterasi ke 30. Secara berturut-turut, *error* pada ketiga variasi mf dari yang terbesar adalah  $mf\ 3 > mf\ 5 > mf\ 7$ . FIS dengan mf 7 dipilih sebagai parameter pengendali karena memiliki nilai *error* paling kecil jika dibandingkan dengan *error* pada mf 3 maupun mf 5. Metode *hybrid* dan iterasi sebanyak 30 kali dipilih sebagai parameter *train* ANFIS. Penentuan nilai iterasi digunakan untuk mendapatkan nilai *error* yang paling mendekati dengan nilai sesungguhnya. Semakin banyak iterasi yang dilakukan, maka hasil *training error* akan semakin kecil. Teori ini terbukti dengan penurunan nilai *training error* sesuai dengan gambar 4.7 (c).

Data keluaran yang digunakan adalah data *duty cycle* yang didapat dari *duty cycle* sinyal tegangan referensi. Data *duty cycle* ini digunakan sebagai penambahan *duty cycle* pada rangkaian *open loop*, dengan tujuan agar dapat menaikkan tegangan keluaran IBBSF yang lebih besar. Hasil *plotting training data* ditampilkan oleh gambar 4.8, dengan amplitudo -0,02 hingga 0,02 merupakan amplitudo dari *duty cycle* yang akan dimodulasi dengan amplitudo gelombang sinus dari sinyal referensi.



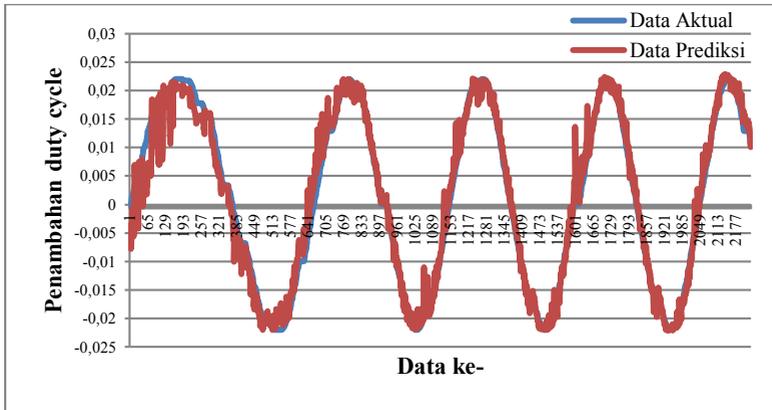
**Gambar 4.8** Hasil *plot training data*

Gambar 4.8 menampilkan garis grafik sinus berwarna merah sebagai hasil *plotting* hampir menutupi seluruh garis grafik sinus berwarna biru sebagai data *training*. Artinya, dengan menggunakan parameter masukan berupa *error* dan *delta error*, hasil prediksi mengenai besar nilai penambahan *duty cycle* mendekati nilai sebenarnya. Hal ini juga didukung dengan nilai *training error* yang dihasilkan kecil.

Agar dapat diketahui kebenaran dari sistem *neuro-fuzzy* yang digunakan, maka dilakukan validasi antara data aktual dengan data prediksi. Nilai *error* didapatkan dari selisih antara data hasil prediksi dengan data aktual. Data validasi ANFIS yang menggunakan mf 7 ditampilkan pada tabel 4.3. Dari data tersebut, dilakukan perbandingan dalam bentuk grafik yang ditampilkan gambar 4.9. Grafik sinus berwarna biru merupakan grafik dari data aktual, yang digunakan sebagai parameter *output* ANFIS, dan grafik sinus berwarna merah merupakan grafik dari data prediksi yang dihasilkan.

**Tabel 4.3** Data validasi ANFIS

No	Data Aktual	Data Hasil Prediksi	Error
1	0	-0.00678	-0.00678
2	4.17E-08	-0.0068	-0.0068
3	2.50E-07	-0.0069	-0.0069
4	1.29E-06	-0.00745	-0.00745
5	6.5E-06	-0.0036	-0.0036
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
2228	0.012377	0.013264	0.000888
2229	0.011899	0.013108	0.001209
2230	0.011495	0.012248	0.000753
2231	0.01098	0.010664	-0.00032
2233	0.010446	0.010112	-0.00033

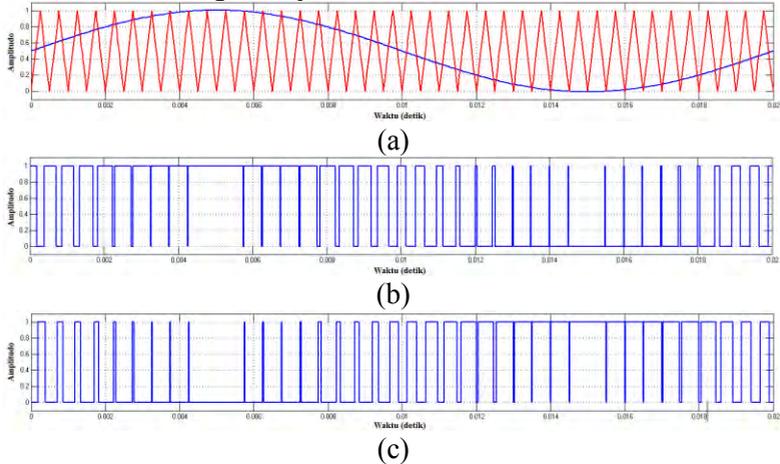


**Gambar 4.9** Grafik validasi ANFIS

Sesuai dengan hasil *training* yang dilakukan sebelumnya seperti ditunjukkan gambar 4.8, grafik validasi antara hasil prediksi terhadap data sebenarnya dengan mf 7 pada gambar 4.9 memiliki *error* rata-rata yang kecil, yaitu sebesar  $7,5 \times 10^{-8}$ . Besar *error* ini juga ditunjukkan dari grafik antara kedua data tersebut yang bertumpukan satu sama lain. Artinya, nilai dari hasil prediksi mendekati nilai sebenarnya, sehingga dengan kata lain sistem dikatakan valid. Oleh sebab itu, *neuro-fuzzy* ini selanjutnya dapat diterapkan sebagai *controller* tegangan pada sistem pengendalian IBBSF.

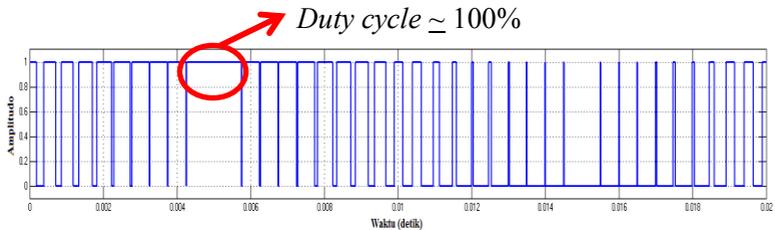
Penerapan *neuro-fuzzy* yang dimaksudkan untuk menaikkan tegangan, mengacu pada pemodelan sesuai gambar 3.16. Akan tetapi, ada perubahan amplitudo pada gelombang sinus sinyal referensi yang digunakan. Keluaran ANFIS yang juga berupa gelombang sinus memiliki amplitudo 0,02. Gelombang inilah yang akan dijumlahkan dengan gelombang sinus dari sinyal referensi. Adanya penambahan amplitudo pada sinyal referensi, menghasilkan SPWM *closed loop* yang berbeda dengan SPWM *open loop*. Gambar 4.10 merupakan keluaran SPWM dari sinyal pembawa yang dimodulasi dengan sinyal referensi, dimana gelombang sinusnya sudah dilakukan penjumlahan dengan *duty cycle* keluaran dari ANFIS. Pengaturan amplitudo awal pada

gelombang sinus sinyal referensi adalah 0,9, yang jika ditambahkan dengan keluaran ANFIS maka amplitudonya menjadi 0,92. Adanya peningkatan amplitudo gelombang sinus pada sinyal referensi menyebabkan *duty cycle* yang dihasilkan dari modulasi dengan sinyal *carrier* lebih besar.



**Gambar 4.10** Grafik sinyal SPWM *closed loop*: (a) modulasi sinus dengan segitiga, (b) SPWM 1 dan (c) SPWM 2

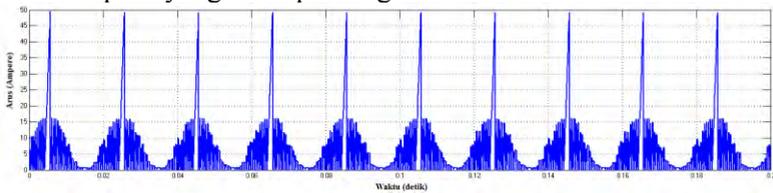
Bentuk keluaran SPWM dari gambar 4.10 serupa dengan gambar 4.1, dimana *duty cycle* 90% lebih dominan daripada *duty cycle* lainnya. Perbedaan antara keduanya yaitu terletak pada nilai *duty cycle* terbesar. Jika pada gambar 4.1 *duty cycle* terbesarnya adalah 90%, maka pada gambar 4.10 *duty cycle* terbesar mencapai 100%, seperti ditampilkan oleh gambar 4.11.



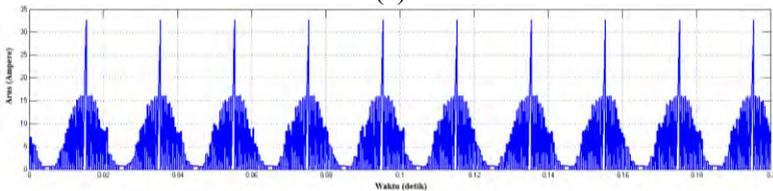
**Gambar 4.11** *Duty cycle* SPWM *closed loop*

Sesuai dengan gambar 4.11, terdapat 2 siklus *duty cycle* dengan nilai mendekati 100% dalam 1 periode. Artinya pada *duty cycle* tersebut, posisi *on* atau yang bernilai 1, besarnya sekitar 99,9%. Sedangkan posisi *off* atau yang bernilai 0, nilainya hanya 0,1%. Oleh karena posisi *off* yang sangat singkat, maka tampak pada gambar 4.11, bentuk sinyal dari *duty cycle* yang dihasilkan seolah-olah tidak memiliki waktu *off*, dengan durasi waktu *on* serupa dengan *duty cycle* 200%. Kondisi dari *duty cycle* SPWM IBBSF *closed loop* ini menyebabkan durasi *switch* pada IBBSF berada dalam posisi *on* yang lebih lama, sehingga muatan yang dapat disimpan oleh komponen induktor dari DC *source* lebih besar. Ketika *switch* tersebut berada pada kondisi *off*, muatan yang mampu dilucuti dari induktor ke kapasitor lebih banyak, sehingga beda potensial yang dihasilkan pada hambatan beban sebagai keluaran IBBSF juga lebih besar. Oleh karena itu, penambahan waktu *on* pada *duty cycle* mampu meningkatkan tegangan keluaran pada IBBSF.

Adanya penambahan *duty cycle* pada sinyal keluaran SPWM mengakibatkan penambahan penyimpanan muatan dari DC *source* ke induktor, dengan bentuk grafik sinyal arus terhadap waktu seperti yang ditampilkan gambar 4.12.



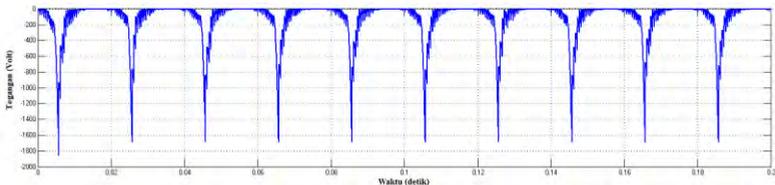
(a)



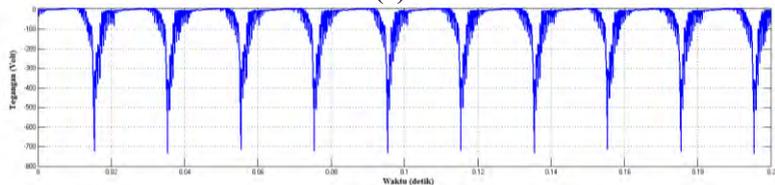
(b)

**Gambar 4.12** Grafik arus pada induktor IBBSF *closed loop*:  
(a) arus di  $L_a$  dan (b) arus di  $L_b$

Kedua grafik pada gambar 4.12 tersebut menunjukkan adanya *peak* atau arus maksimum sebagai penyimpanan muatan tertinggi pada induktor. *Peak* ini disebabkan oleh *duty cycle* terbesar hasil dari SPWM yang telah dijelaskan sebelumnya. Gambar 4.12 (a) adalah besar arus pada induktor a ( $L_a$ ), dimana *maximum peak*-nya mencapai nilai 50A. Berbeda halnya dengan gambar 4.12 (b) yang merupakan besar arus pada induktor b ( $L_b$ ), dimana *maximum peak*-nya hanya mampu mencapai tidak lebih dari 35A. Adanya perbedaan *peak* pada kedua induktor ini dikarenakan proses penyimpanan muatan pada induktor itu sendiri. Kinerja IBBSF ketika pertama kali berjalan adalah pengisian muatan dari DC *source* pada  $L_a$ , yang kemudian dalam selang waktu milisekon (ms), baru dilakukan penyimpanan pada  $L_b$ . Sehingga pengisian muatan pada  $L_b$  dipengaruhi oleh pengisian muatan pada  $L_a$ . Bentuk grafik yang dihasilkan induktor pada IBBSF *closed loop* berbeda dengan bentuk grafik yang dihasilkan induktor pada *open loop*. Jika pada grafik induktor *closed loop* terdapat *peak* dengan amplitudo sekitar 35A-50A sebagai indikator penyimpanan muatan terbesar, maka pada grafik induktor *open loop* tidak ada *peak* yang muncul. Amplitudo maksimum pada grafik arus di induktor IBBSF *open loop* hanya sebesar 16A.



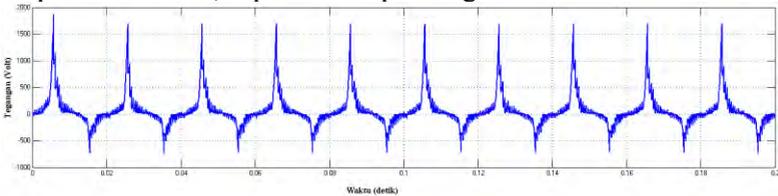
(a)



(b)

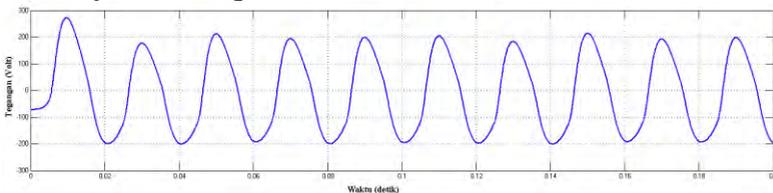
**Gambar 4.13** Grafik tegangan pada kapasitor IBBSF *closed loop*: (a) tegangan di  $C_a$  dan (b) tegangan di  $C_b$

Gambar 4.13 (a) merupakan grafik tegangan pada kapasitor a (Ca), sedangkan gambar 4.13 (b) merupakan grafik tegangan pada kapasitor b (Cb). Oleh karena besar muatan yang mampu dilucuti ke kapasitor dipengaruhi besar muatan yang disimpan di induktor, maka beda potensial yang terjadi di Ca juga lebih besar dari beda potensial Cb. Pada gambar 4.13, tegangan di Ca dua kali lebih besar daripada tegangan di Cb. Perbedaan ini mengakibatkan bentuk gelombang sinus keluaran yang asimetris, dengan nilai amplitudo puncak lebih besar daripada nilai amplitudo lembah, seperti ditampilkan gambar 4.14.



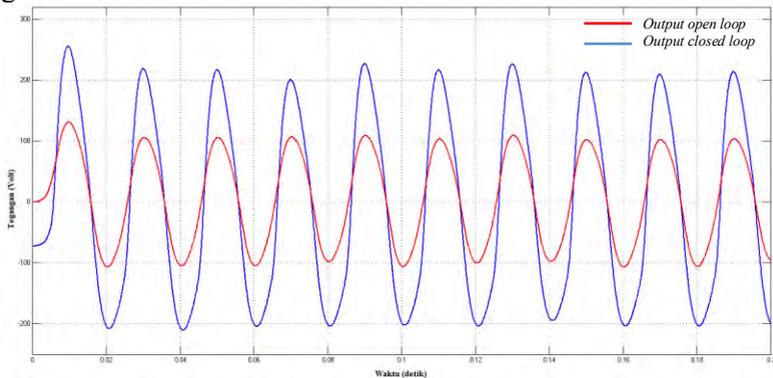
**Gambar 4.14** Grafik sinyal tegangan *output* IBBSF *closed loop* di Simulink Matlab

Gambar 4.14 menunjukkan adanya perbedaan antara *positive* dengan *negative peak*. Bentuk sinyal keluaran IBBSF *closed loop* yang didapat dari persamaan (3.3), membalikkan grafik  $V_{ca}$  pada gambar 4.13 (a) ke arah sumbu-y positif, sedangkan grafik  $V_{cb}$  pada gambar 4.13 (b) tetap di sumbu-y negatif. Jika dibandingkan antara gambar 4.14 dengan gambar 4.3, terjadi kenaikan tegangan dari 300V menjadi 1600V. Akan tetapi, sinyal keluaran ini masih mengandung riak, sehingga dilakukan *filter* dengan hasil grafik ditampilkan oleh gambar 4.15.



**Gambar 4.15** Grafik sinyal tegangan *filter* IBBSF *closed loop* di Simulink Matlab

Serupa dengan grafik tanpa *filter*, grafik sinyal keluaran *filter* IBBSF *closed loop* sesuai gambar 4.15 apabila dibandingkan dengan gambar 4.4 menunjukkan adanya peningkatan tegangan. Tegangan keluaran yang mampu dihasilkan dari sistem IBBSF *open loop* hanya sebesar 100V, sedangkan tegangan keluaran yang mampu dihasilkan dari sistem IBBSF *closed loop* sebesar 200V. Perbandingan antara tegangan keluaran IBBSF *open loop* dengan *closed loop* ditampilkan oleh gambar 4.16.



**Gambar 4.16** Grafik perbandingan tegangan keluaran IBBSF *open* dan *closed loop*

Pada gambar 4.16, gelombang sinus berwarna merah merupakan grafik tegangan keluaran IBBSF *open loop*, sedangkan gelombang sinus berwarna biru merupakan grafik tegangan keluaran IBBSF *closed loop*. Perbandingan kedua gelombang sinus pada gambar grafik tersebut menunjukkan bahwa, dengan menggunakan *neuro-fuzzy* sebagai pengendali tegangan IBBSF, tegangan keluaran yang mampu dihasilkan dua kali lebih besar daripada tegangan keluaran IBBSF tanpa pengendali. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa, pemodelan IBBSF dengan pengendali menggunakan Simulink Matlab sudah tercapai, dengan tegangan DC sumber 12V mampu dinaikkan menjadi tegangan AC sebesar 200V.

*Set point* yang diberikan pada metode *neuro-fuzzy controller* ini adalah 220V, sehingga dengan pencapaian keluaran sebesar 200V, *error* yang dihasilkan adalah 9%. Besar *error* pengendalian ini didapat dari persamaan (4.1),

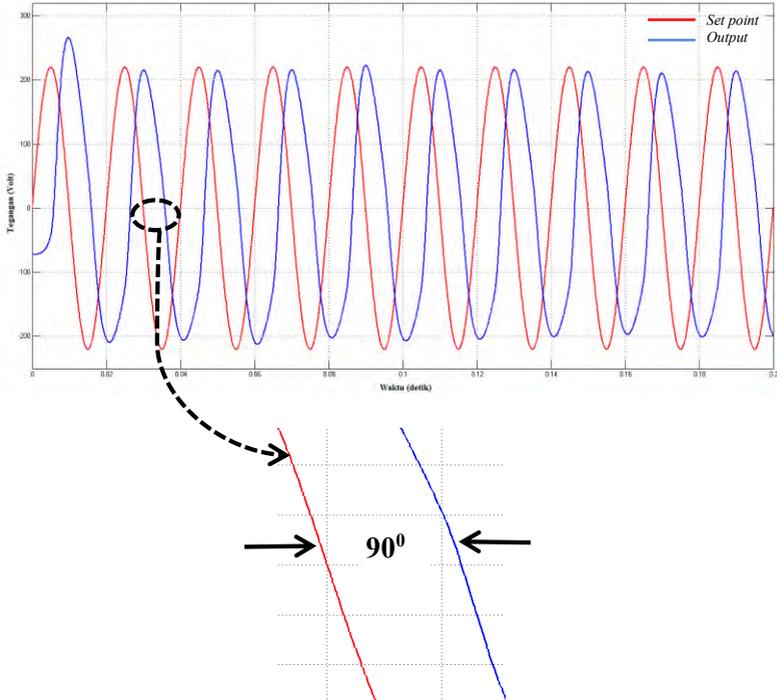
$$e = \frac{SP-P}{SP} \quad (4.1)$$

dengan  $e$  : *error*

SP : *set point*

P : pengukuran.

Grafik perbandingan antara *set point* dengan *output* yang dihasilkan ditampilkan oleh gambar 4.17.

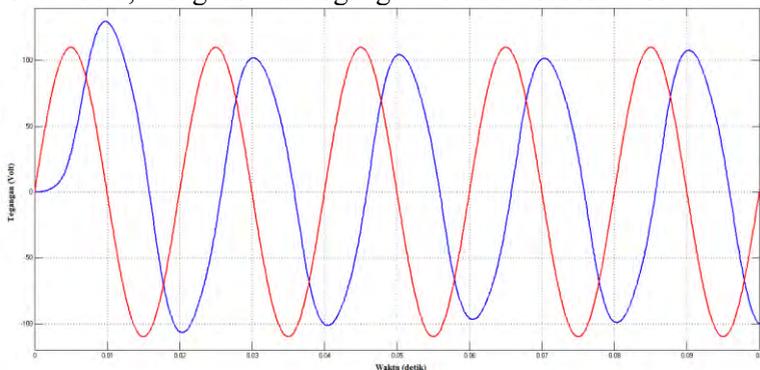


**Gambar 4.17** Grafik perbandingan antara *set point* dengan *output* IBBSF

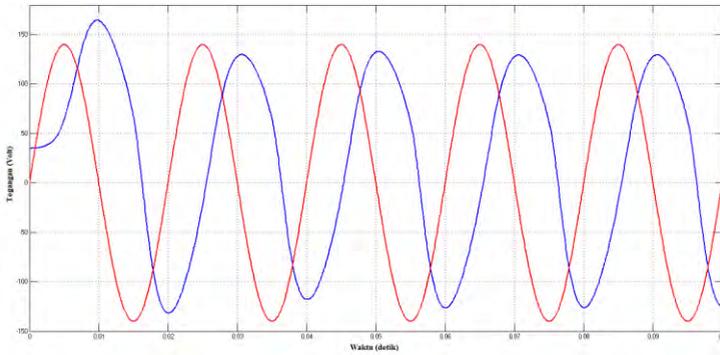
Grafik gelombang sinus warna merah merupakan grafik *set point* yang diberikan, yaitu 220V. Grafik gelombang sinus warna

biru merupakan grafik tegangan keluaran IBBSF *closed loop* yang dihasilkan, yaitu 200V. Tampak bahwa ada perbedaan fasa antara kedua gelombang, meskipun kedua gelombang memiliki frekuensi yang sama. Tegangan keluaran yang dihasilkan IBBSF berbeda fasa  $90^0$  dengan tegangan *set point* yang diberikan. Adanya beda fasa ini disebabkan oleh proses pengisian dan pelucutan muatan pada induktor dan kapasitor IBBSF. Beda fasa inilah yang menyebabkan *error* yang dihasilkan dari sistem pengendalian cukup besar. Namun, jika dianalisis dari hasil validasi pada *neuro-fuzzy controller*, maka sistem pengendali tegangan berbasis *neuro-fuzzy* dapat diterapkan pada IBBSF. Hal ini dikarenakan keluaran maksimum yang mampu dicapai oleh ANFIS berupa penambahan *duty cycle* hanya sebesar 2 kali dari *duty cycle* sebelumnya. Artinya, dengan menggunakan desain IBBSF *single-stage* dan parameter nilai komponen RLC dari penelitian yang sudah ada, tegangan maksimal yang mampu dicapai oleh sistem pengendali tegangan hanya 200V.

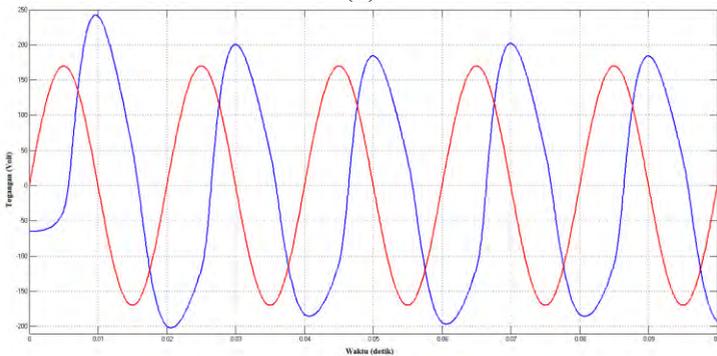
Agar dapat diketahui performansi dari *neuro-fuzzy controller*, maka dilakukan variasi *set point* sebagai pembandingan dari hasil yang telah didapatkan. Grafik keluaran dengan variasi *set point* tersebut ditampilkan oleh gambar 4.18. Pada gambar 4.18 (a) dengan *set point* 110V, tegangan yang dihasilkan adalah 102V. Gambar 4.18 (b) dengan *set point* 140V menunjukkan tegangan keluaran sebesar 130V. Pada gambar 4.18 (c) dengan *set point* 170V, menghasilkan tegangan keluaran sebesar 185V.



(a)



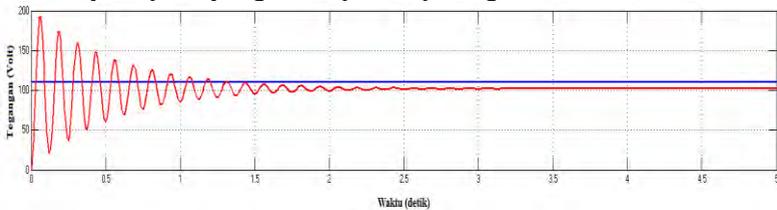
(b)



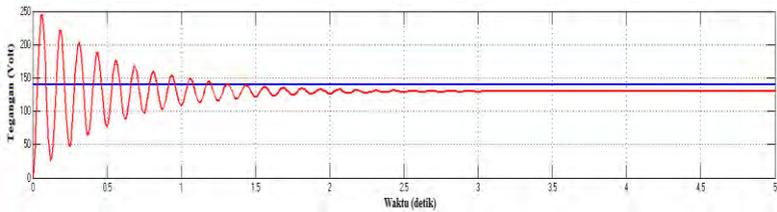
(c)

**Gambar 4.18** Grafik sinyal tegangan *filter IBBSF closed loop* di Simulink Matlab: (a) *set point* 110V, (b) *set point* 140V dan (c) *set point* 170V

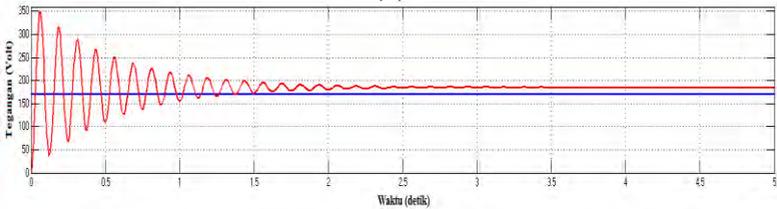
Variasi *set point* pada IBBSF selanjutnya dibuat respon sistemnya seperti yang ditampilkan pada gambar 4.19.



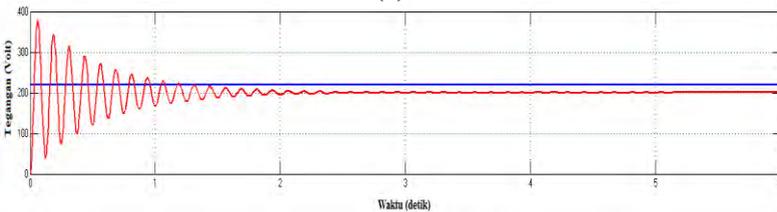
(a)



(b)



(c)



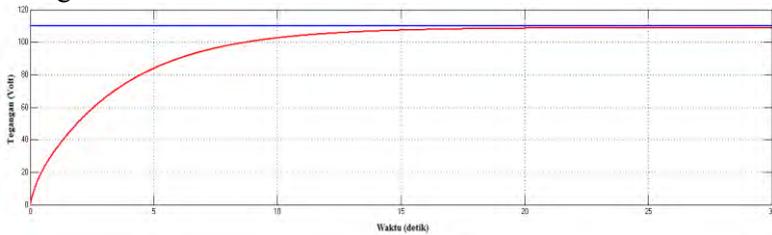
(d)

**Gambar 4.19** Grafik respon sistem IBBSF berbasis *neuro-fuzzy*:  
 (a) *set point* 110V, (b) *set point* 140V, (c) *set point* 170V dan (d) *set point* 220V

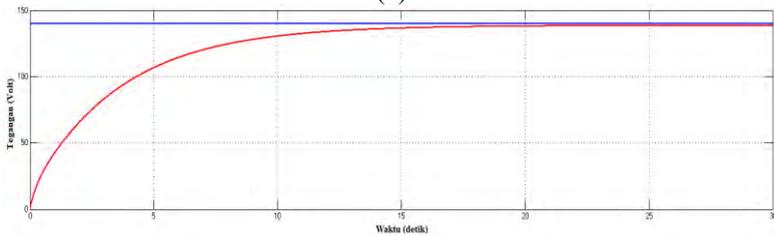
Gambar 4.19 (a) yang merupakan grafik respon sistem dengan *set point* 110V menghasilkan *error* sebesar 7,27% dengan *settling time* ( $t_s$ ) 3,15 detik. Gambar 4.19 (b) dengan *set point* 140V, menghasilkan *error* terkecil, yaitu 7,14% dengan  $t_s$  3 detik. Gambar 4.19 (c) dengan *set point* 170V, menghasilkan *error* 8,82% dan  $t_s$  2,9 detik. Gambar 4.19 (d) menghasilkan *error* terbesar, yaitu 9,09% dengan  $t_s$  5,1 detik.

*Neuro-fuzzy controller* selain mudah dimengerti karena sistem pengendaliannya menggunakan bahasa linguistik, juga mampu menghasilkan grafik respon sistem dengan waktu *steady* yang lebih cepat jika dibandingkan dengan pengendali lainnya,

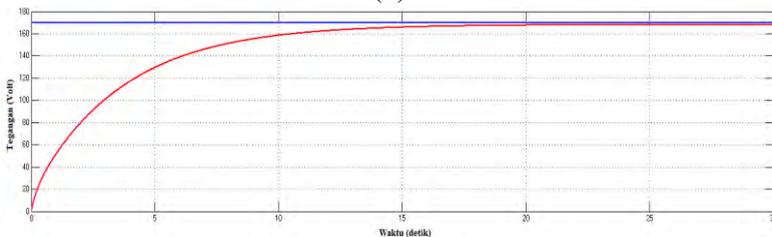
seperti *proportional, integral, derivative* (PID) *controller*. Penggunaan PID *controller* mengacu pada diagram blok gambar 3.10, akan tetapi blok *neuro-fuzzy controller* diganti oleh PID *controller*. Rancang pengendali PID dengan fungsi transfer IBBSF yaitu dengan menentukan *gain* proporsional ( $K_p$ ), waktu integral ( $\tau_i$ ) dan waktu diferensial ( $\tau_d$ ). Penentuan ketiga parameter tersebut didasarkan dari perhitungan yang ditampilkan pada lampiran E. Nilai-nilai yang diberikan yaitu  $K_p=0,16$ ,  $\tau_i=0,03$  dan  $\tau_d=0,25$ . Parameter-parameter PID tersebut diaplikasikan pada IBBSF dengan variasi *set point* yang diberikan. Grafik respon sistem dengan kendali PID ditampilkan oleh gambar 4.20.



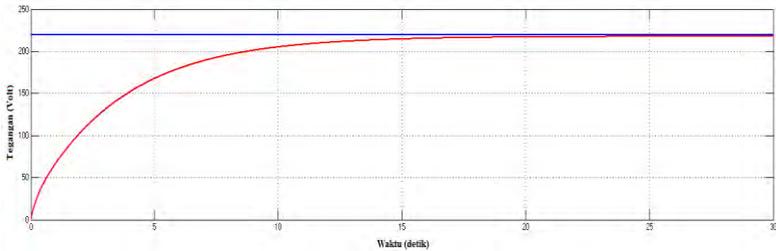
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 4.20** Grafik respon sistem IBBSF berbasis PID controller: (a) set point 110V, (b) set point 140V, (c) set point 170V dan (d) set point 220V

Grafik respon sistem dengan kendali PID dan SP 110V yang ditampilkan gambar 4.20 (a), menghasilkan *error* 1% dengan  $t_s$  23 detik. Grafik respon pada gambar 4.20 (b) dengan *set point* 140V menghasilkan *error* 1% dengan  $t_s$  28,3 detik. Gambar 4.20 (c) dengan *set point* 170V menampilkan grafik respon dengan *error* 1,05% dan  $t_s$  21 detik. Gambar 4.20 (d) dengan *set point* 220V menghasilkan *error* 1,04% dengan  $t_s$  23,5 detik. Hubungan antara *set point*, *output*, *error* dan *settling time* pada kendali *neuro-fuzzy* dan PID secara ringkas ditampilkan pada tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Variasi *set point*

No	Set Point	Neuro-Fuzzy			PID		
		Output	Error	Settling Time	Output	Error	Settling Time
1	110V	102V	7,27%	3,15 dtk	108,9V	1,00%	23,0 dtk
2	140V	130V	7,14%	3,00 dtk	138,6V	1,00%	28,3 dtk
3	170V	185V	8,82%	2,90 dtk	168,2V	1,04%	21,0 dtk
5	220V	200V	9,09%	5,10 dtk	217,0V	1,05%	23,5 dtk

Pada tabel 4.4, nilai tegangan keluaran dari IBBSF mengikuti nilai SP yang diberikan. Penentuan *set point* 220V dengan kendali *neuro-fuzzy* menghasilkan *error* terbesar jika dibandingkan dengan variasi *set point* yang lain, yaitu sebesar 9,09%. Meskipun

menghasilkan nilai *error* yang cukup besar, namun *neuro-fuzzy controller* terbukti mampu mengikuti *set point* yang diberikan. Jika dibandingkan antara respon sistem antara kendali *neuro-fuzzy* pada gambar 4.19 dengan respon sistem dengan kendali PID pada gambar 4.20, dapat disimpulkan bahwa kendali *neuro-fuzzy* meskipun menghasilkan *error* yang cukup besar, namun mampu mencapai kondisi *steady* ( $t_s$ ) dalam waktu yang singkat. Sedangkan kendali PID pada IBBSF mampu menghasilkan *error* yang kecil, dimana nilai *error* tersebut masih berada dalam rentang *error tolerance*. Akan tetapi, untuk mencapai kondisi *steady*, PID *controller* membutuhkan waktu yang lebih lama.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Perancangan sistem pengendalian IBBSF berbasis *neuro-fuzzy* dengan simulasi *software* PSIM 9.0.3 dan Matlab 2013b lisensi ITS telah berhasil dilakukan. Kesimpulan dari tugas akhir ini antara lain sebagai berikut.

1. Sistem IBBSF dalam kondisi *open loop* dengan sumber tegangan 12V DC, mampu menghasilkan keluaran tegangan keluaran AC dengan amplitudo maksimum 100V (penguatan 8 kali).
2. Sistem IBBSF dalam kondisi *closed loop* dengan sumber tegangan 12V DC dan sistem kendali ANFIS, mampu menghasilkan tegangan keluaran AC dengan amplitudo maksimum 200V (penguatan 16 kali).
3. Besar *error* dari keluaran tegangan kontrol terhadap *set point* yang diberikan adalah 9% dengan *settling time* 5,1 detik.

#### **5.2 Saran**

Saran yang perlu disampaikan pada tugas akhir ini adalah dilakukan implementasi dari pengendalian tegangan IBBSF, baik sebagai pembangkit listrik rumah tangga maupun transportasi seperti mobil listrik.

**Halaman ini memang dikosongkan**

## LAMPIRAN A

### Data I/O ANFIS dengan Variasi Set Point

Tabel 1. Data I/O ANFIS set point 110V

No	Vout	Vref	Error	Delta Error	Incremental Duty Cycle
1	0	0	0	0.000208	0
2	8.22E-21	2.08E-04	0.000208	0.001042	2.08E-08
3	1.07E-17	1.25E-03	0.00125	0.005208	1.25E-07
4	7.59E-15	6.46E-03	0.006458	0.026041	6.46E-07
5	4.87E-12	3.25E-02	0.0325	0.130207	3.25E-06
6	3.06E-09	1.63E-01	0.162706	0.651024	1.63E-05
7	1.91E-06	8.14E-01	0.813731	2.809937	8.14E-05
8	0.000747	3.624414	3.623668	2.81243	0.000362
9	0.007418	6.443516	6.436098	0.521132	0.000644
10	0.010055	6.967285	6.95723	0.520684	0.000697
11	0.012982	7.490896	7.477914	0.685345	0.000749
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
4704	-105.989	-15.1367	90.85229	1.732081	-0.00151
4705	-106.315	-13.7301	92.58438	2.217754	-0.00137
4706	-106.702	-11.8998	94.80213	1.177543	-0.00119
4707	-106.893	-10.9138	95.97967	1.167535	-0.00109
4708	-107.074	-9.92696	97.14721	1.518234	-0.00099
4709	-107.296	-8.6305	98.66544	2.101194	-0.00086
4710	-107.58	-6.81304	100.7666	2.758785	-0.00068
4711	-107.916	-4.39058	103.5254	3.553241	-0.00044
4712	-108.305	-1.22588	107.0787	0.856943	-0.00012
4713	-108.393	-0.45757	107.9356	0.508516	-4.6E-05
4714	-108.444	5.12E-13	1.08E+02	5.09E-01	5.12E-17

**Tabel 2.** Data I/O ANFIS *set point* 140V

<b>No</b>	<b>Vout</b>	<b>Vref</b>	<b>Error</b>	<b>Delta Error</b>	<b>Incremental Duty Cycle</b>
1	0	0	0	0.000265	0
2	8.22E-21	2.65E-04	0.000265	0.001326	2.65E-08
3	1.07E-17	1.59E-03	0.001591	0.006629	1.59E-07
4	7.59E-15	8.22E-03	0.00822	0.033144	8.22E-07
5	4.87E-12	4.14E-02	0.041363	0.165718	4.14E-06
6	3.06E-09	2.07E-01	0.207081	0.828577	2.07E-05
7	1.91E-06	1.04E+00	1.035658	3.576486	0.000104
8	0.000747	4.612891	4.612144	3.581276	0.000461
9	0.007418	8.200839	8.193421	0.663978	0.00082
10	0.010055	8.867454	8.857398	0.663487	0.000887
11	0.012982	9.533867	9.520885	0.873353	0.000953
12	0.017002	10.41124	10.39424	0.570397	0.001041
13	0.019638	10.98427	10.96464	1.209945	0.001098
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
4703	-105.719	-20.6614	85.05725	1.666842	-0.00207
4704	-105.989	-19.2649	86.7241	2.115694	-0.00193
4705	-106.315	-17.4747	88.83979	2.716941	-0.00175
4706	-106.702	-15.1452	91.55673	1.446444	-0.00151
4707	-106.893	-13.8903	93.00318	1.436678	-0.00139
4708	-107.074	-12.6343	94.43985	1.871814	-0.00126
4709	-107.296	-10.9843	96.31167	2.596865	-0.0011
4710	-107.58	-8.67114	98.90853	3.419456	-0.00087
4711	-107.916	-5.58801	102.328	4.41634	-0.00056
4712	-108.305	-1.56021	106.7443	1.066481	-0.00016
4713	-108.393	-0.58237	107.8108	0.633309	-5.8E-05
4714	-108.444	6.52E-13	1.08E+02	6.33E-01	6.52E-17

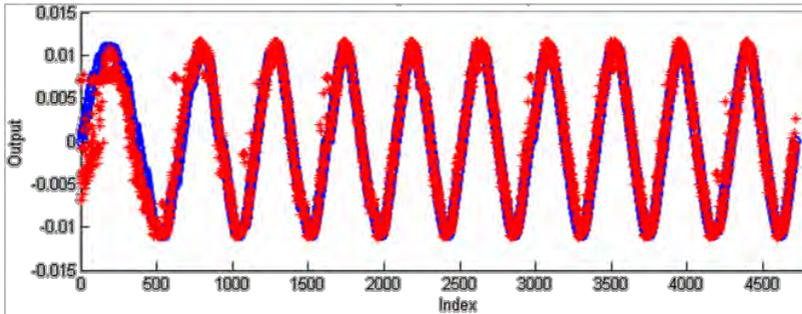
**Tabel 3.** Data I/O ANFIS *set point* 170V

<b>No</b>	<b>Vout</b>	<b>Vref</b>	<b>Error</b>	<b>Delta Error</b>	<b>Incremental Duty Cycle</b>
1	0	0	0	0.000322	0
2	8.22E-21	3.22E-04	0.000322	0.00161	3.22E-08
3	1.07E-17	1.93E-03	0.001932	0.008049	1.93E-07
4	7.59E-15	9.98E-03	0.009981	0.040246	9.98E-07
5	4.87E-12	5.02E-02	0.050227	0.201229	5.02E-06
6	3.06E-09	2.51E-01	0.251455	1.00613	2.51E-05
7	1.91E-06	1.26E+00	1.257585	4.343036	0.000126
8	0.000747	5.601368	5.600621	4.350122	0.00056
9	0.007418	9.958161	9.950743	0.806824	0.000996
10	0.010055	10.76762	10.75757	0.80629	0.001077
11	0.012982	11.57684	11.56386	1.061362	0.001158
12	0.017002	12.64222	12.62522	0.69319	0.001264
13	0.019638	13.33805	13.31841	1.470379	0.001334
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
4703	-105.719	-25.0888	80.62982	1.966083	-0.00251
4704	-105.989	-23.3931	82.5959	2.499306	-0.00234
4705	-106.315	-21.2193	85.09521	3.216127	-0.00212
4706	-106.702	-18.3906	88.31133	1.715346	-0.00184
4707	-106.893	-16.8668	90.02668	1.705822	-0.00169
4708	-107.074	-15.3417	91.7325	2.225395	-0.00153
4709	-107.296	-13.338	93.95789	3.092537	-0.00133
4710	-107.58	-10.5292	97.05043	4.080127	-0.00105
4711	-107.916	-6.78544	101.1306	5.279439	-0.00068
4712	-108.305	-1.89454	106.41	1.27602	-0.00019
4713	-108.393	-0.70716	107.686	0.758102	-7.1E-05
4714	-108.444	7.92E-13	1.08E+02	7.58E-01	7.92E-17

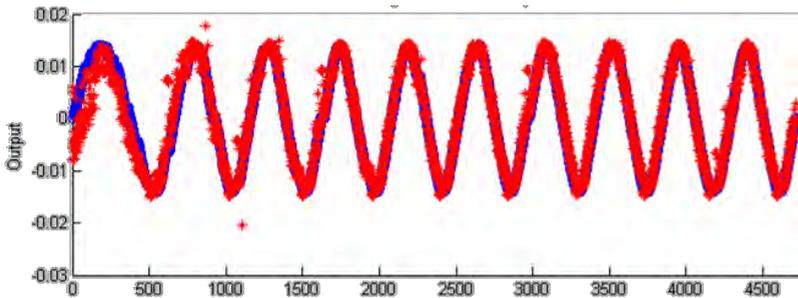


## LAMPIRAN B

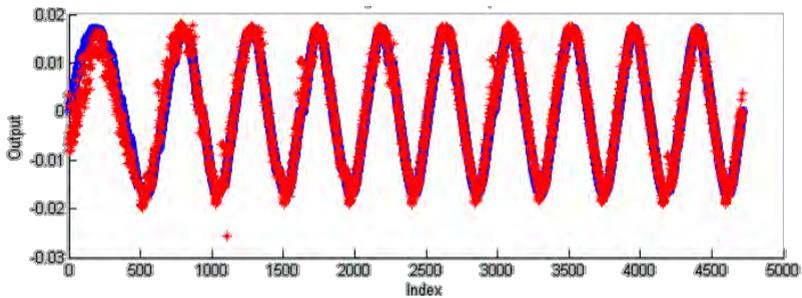
### Grafik Plot Training Data dengan Variasi Set Point



Gambar 1. Hasil plot training data set point 110V



Gambar 2. Hasil plot training data set point 140V

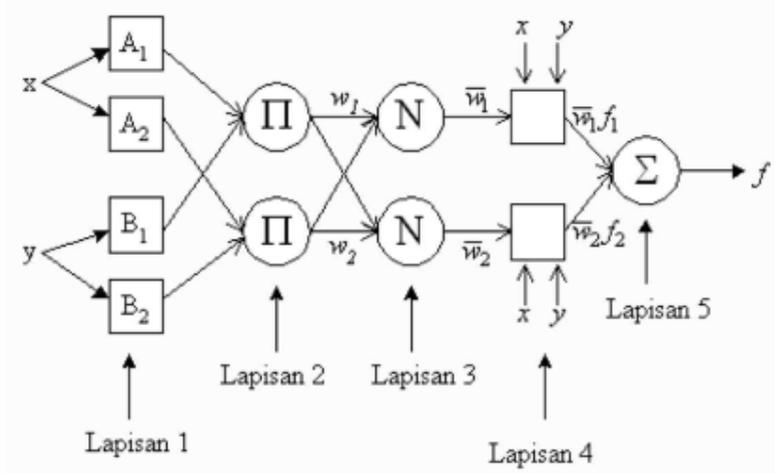


Gambar 3. Hasil plot training data set point 170V



## LAMPIRAN C

### Konsep ANFIS



**Gambar 4.** Struktur ANFIS dengan dua masukan

#### 1 Layer 1

Semua simpul pada lapisan ini adalah simpul adaptif (parameter dapat berubah) dengan fungsi simpul:

$$O_{1,i} = \mu A_i(x) \quad \text{untuk } i = 1,2, \text{ atau}$$

$$O_{1,i} = \mu B_{i-2}(x) \quad \text{untuk } i = 3,4$$

dengan  $x$  dan  $y$  adalah masukan pada simpul  $i$ ,  $A_i$  (atau  $B_{i-2}$ ) adalah fungsi keanggotaan masing-masing simpul. Simpul  $O_{1,i}$  berfungsi untuk menyatakan derajat keanggotaan tiap masukan terhadap himpunan *fuzzy* A dan B. Parameter  $a, b, c$ , pada fungsi keanggotaan dinamakan parameter premis yang adaptif.

#### 2 Layer 2

Semua simpul pada lapisan ini adalah nonadaptif (parameter tetap). Fungsi simpul ini adalah mengalikan setiap sinyal masukan yang datang. Fungsi simpulnya:

$$O_{2,i} = w_i = \mu A_i(x) \cdot \mu B_{i-2}(y) \quad i = 1,2$$

Tiap keluaran simpul menyatakan derajat pengaktifan (*firing strength*) tiap aturan *fuzzy*. Fungsi ini dapat diperluas apabila bagian premis memiliki lebih dari dua himpunan *fuzzy*. Banyaknya simpul pada lapisan ini menunjukkan banyaknya aturan yang dibentuk. Fungsi perkalian yang digunakan adalah interpretasi kata hubung AND dengan menggunakan operator t-norm.

### 3 Layer 3

Setiap simpul pada lapisan ini adalah simpul nonadaptif yang menampilkan fungsi derajat pengaktifan ternormalisasi (*normalized firing strength*) yaitu rasio keluaran simpul ke-*i* pada lapisan sebelumnya terhadap seluruh keluaran lapisan sebelumnya, dengan bentuk fungsi simpul:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2$$

Apabila dibentuk lebih dari dua aturan, fungsi dapat diperluas dengan membagi  $w_i$  dengan jumlah total  $w$  untuk semua aturan.

### 4 Layer 4

Setiap simpul pada lapisan ini adalah simpul adaptif dengan fungsi simpul:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i x + r_i) \quad i = 1, 2$$

dengan  $f_i$  adalah derajat pengaktifan ternormalisasi dari lapisan 3 dan parameter  $p$ ,  $q$ ,  $r$  menyatakan parameter konsekuen yang adaptif.

### 5 Layer 5

Pada lapisan ini hanya ada satu simpul tetap yang fungsinya untuk menjumlahkan semua masukan. Fungsi simpul:

$$\text{Overall output} = O_{5,i} = \frac{\sum \bar{w}_i f_i}{\sum w_i}$$

Jaringan adaptif dengan lima lapisan tersebut ekuivalen dengan sistem inferensi fuzzy Sugeno.

## LAMPIRAN D

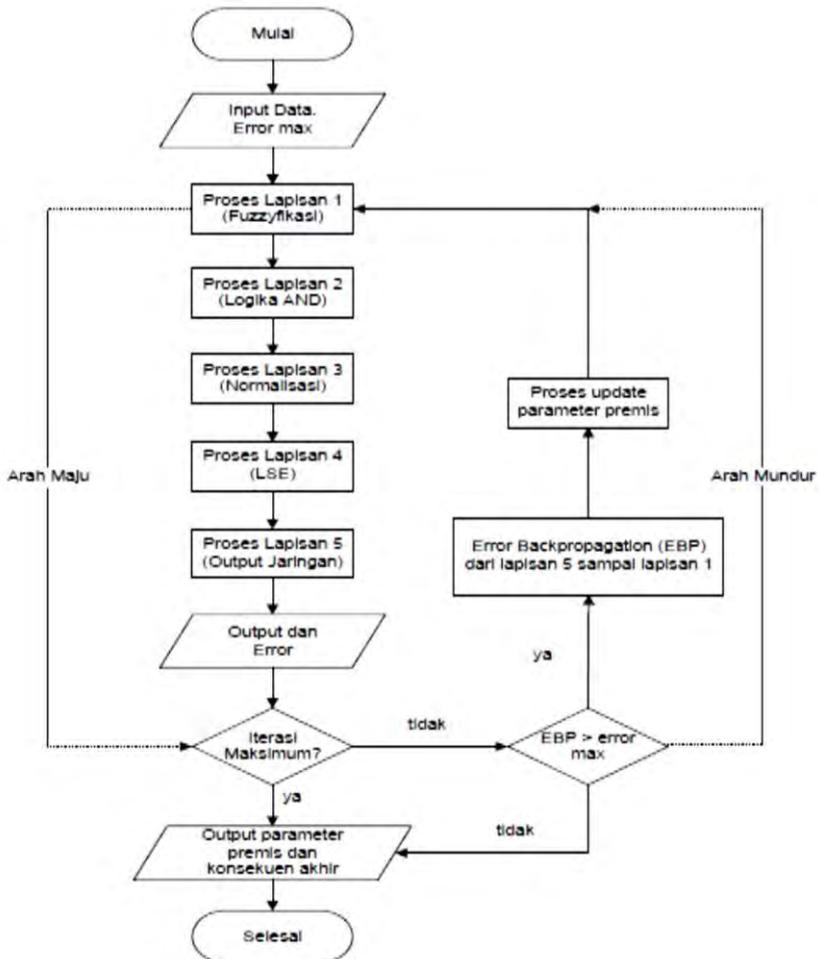
### Proses Pembelajaran ANFIS

Pada struktur ANFIS, simpul adaptif terdapat pada lapisan pertama dan keempat. Simpul pada lapisan pertama mengandung parameter premis yang nonlinier sedangkan pada lapisan keempat mengandung parameter konsekuen yang linier. Untuk memperbaharui parameter-parameter tersebut atau dalam kata lain agar jaringan syaraf itu belajar, maka perlu metoda atau algoritma untuk itu. Metoda pembelajaran jaringan syaraf tiruan banyak macamnya, dan masing-masing punya kelebihan dan kekurangan. Selanjutnya dijelaskan pembelajaran hibrid untuk ANFIS. Artinya penggunaan atau penyatuan dua metoda pembelajaran pada ANFIS. Pembelajaran hibrid terdiri atas dua bagian yaitu arah maju (*forward pass*) dan arah mundur (*backward pass*).

Pada arah maju, parameter premis dibuat tetap. Dengan menggunakan metode *Recursive Least Square Estimator* (RLSE), parameter konsekuen diperbaiki berdasarkan pasangan data masukan-keluaran. Metode RLSE dapat diterapkan karena parameter konsekuen yang diperbaiki adalah parameter linier. Metode RLSE akan mempercepat proses belajar hibrid. Kemudian setelah parameter konsekuen didapatkan, data masukan dilewatkan jaringan adaptif kembali dan hasil keluaran jaringan adaptif ini dibandingkan dengan keluaran yang sebenarnya. Pada arah mundur, parameter konsekuen dibuat tetap. Kesalahan yang terjadi antara keluaran jaringan adaptif dan keluaran sebenarnya dipropagasikan balik dengan menggunakan *gradient descent* untuk memperbaiki parameter premis. Pembelajaran ini dikenal sebagai *Algoritma Error Back Propagation* (EBP). Satu tahap arah pembelajaran maju-mundur dinamakan satu *epoch*. Tabel 4 menerangkan proses pembelajaran hibrid ANFIS.

**Tabel 4.** Proses pembelajaran hibrid ANFIS

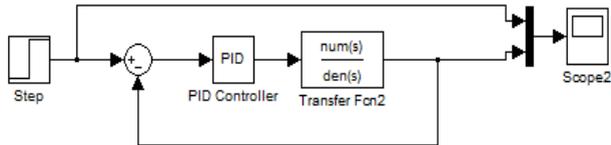
	<b>Arah maju</b>	<b>Arah mundur</b>
<b>Parameter premis</b>	Tetap	Gradient descent
<b>Parameter konsekuen</b>	RSLE	Tetap
<b>Sinyal</b>	Keluaran simpul	Laju kesalahan



**Gambar 5.** Diagram alir tahap pembelajaran metode ANFIS

## LAMPIRAN E

### Rancangan Pengendalian PID pada IBBSF



**Gambar 6.** Rancangan PID pada IBBSF di Simulink Matlab

Perhitungan parameter PID dengan  $\omega_n$  sebesar 11,23 dan  $\zeta$  sebesar 0,18, ditampilkan oleh persamaan berikut,

- $$K_p = \frac{2\zeta}{\omega_n K}$$
$$K_p = \frac{2(0,18)}{(11,23)(0,2)}$$
$$K_p = \frac{0,36}{2,246}$$
$$K_p = 0,16$$
- $$\tau_i = \frac{2\zeta}{\omega_n}$$
$$\tau_i = \frac{2(0,18)}{11,23}$$
$$\tau_i = \frac{0,36}{11,23}$$
$$\tau_i = 0,03$$
- $$\tau_d = \frac{1}{2\zeta\omega_n}$$
$$\tau_d = \frac{1}{2(0,18)(11,23)}$$
$$\tau_d = \frac{1}{4,0428}$$
$$\tau_d = 0,25$$

dengan  $K_p$  : gain proporsional

$\tau_i$  : waktu integral

$\tau_d$  : waktu diferensial.

Penentuan nilai dari parameter PID *controller* tersebut sudah sesuai dengan tabel karakteristik yang didasarkan oleh McMillan pada tahun 1994. Tabel karakteristik tersebut ditampilkan oleh tabel 5 berikut.

**Tabel 5.** Karakteristik PID *controller*

<i>Controller Feature</i>	<i>Controller Parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Units</i>	<i>Typical Range</i>
<i>Proportional mode</i>	<i>Controller gain</i>	$K_p$	Dimensionless [ $\frac{\%}{\%}, \frac{mA}{mA}$ ]	0,1-100
	<i>Proportional band</i>	$\frac{PB}{-100\% K_p}$	%	1-1000%
<i>Integral mode</i>	<i>Integral time (or reset time)</i>	$\tau_i$	Time [s, min]	0,02-20 min 1-1000 s
	<i>Reset rate</i>	$\frac{1}{\tau_i}$	Repeats/time [s <sup>-1</sup> , min <sup>-1</sup> ]	0,001-1 repeats/s 0,06-60 repeats/min
	<i>Integral mode "gain"</i>	$K_i$	Time <sup>-1</sup> [s <sup>-1</sup> , min <sup>-1</sup> ]	0,1-100
<i>Derivative mode</i>	<i>Derivative time</i>	$T_d$	Time [s, min]	0,1-10 min 5-500 s
	<i>Derivative mode "gain"</i>	$K_d$		0,1-100
	<i>Derivative filter parameter</i>	$\alpha$	Dimensionless	0,05-0,1
Control interval (Digital controllers)		$\Delta t$	Time [s, min]	0,1 s – 10 min

## LAMPIRAN F

### Tutorial PSIM

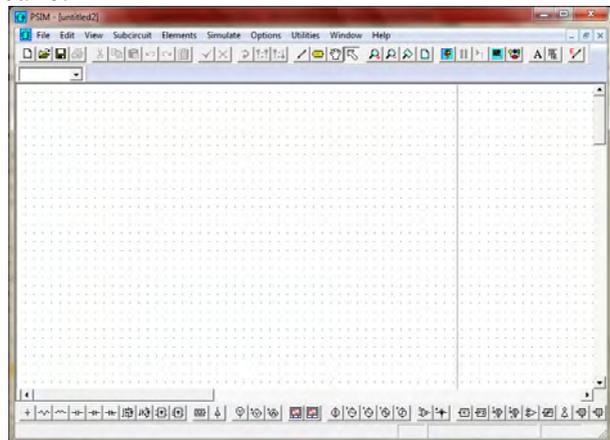
Langkah-langkah untuk memulai program pada PSIM adalah sebagai berikut.

1. Membuka program PSIM yang sudah terinstal, sehingga muncul tampilan awal PSIM pada gambar 7.



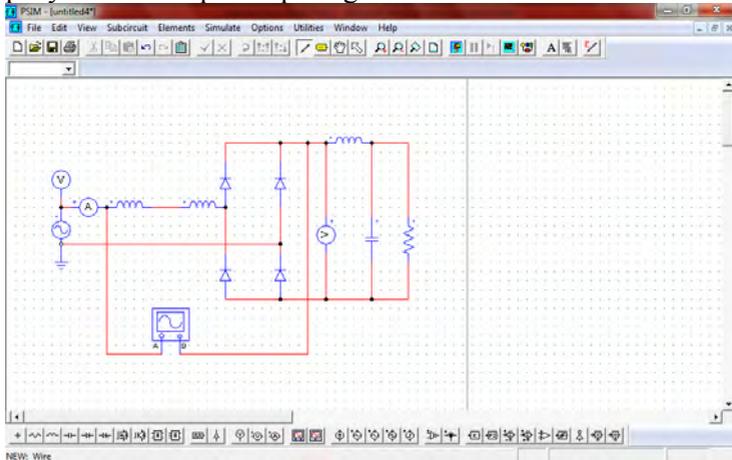
**Gambar 7.** Tampilan awal PSIM

2. Untuk menampilkan halaman kerja PSIM, [File] → [New] pada *menu bar* PSIM. Halaman kerja PSIM ditampilkan oleh gambar 8.



**Gambar 8.** Halaman kerja PSIM

3. PSIM umumnya digunakan untuk menggambarkan suatu sistem rangkaian elektronika atau tenaga listrik, sehingga untuk membuatnya, hanya perlu melakukan *drag & drop* komponen elektrik yang tersedia ke halaman kerja PSIM.
4. Contoh dari penggunaan PSIM untuk membuat rangkaian penyearah ditampilkan pada gambar 9.



**Gambar 9.** Contoh penggunaan PSIM

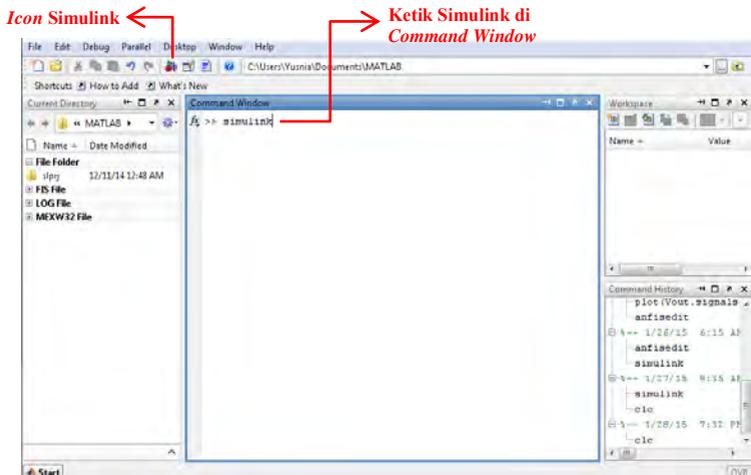
5. Selanjutnya nilai-nilai dari rangkaian diatur sesuai dengan yang dikehendaki.
6. Untuk melakukan simulasi terhadap rangkaian yang telah dibuat, pilih menu [Simulate] → [Run Simulation].

## LAMPIRAN G

### Tutorial Simulink Matlab

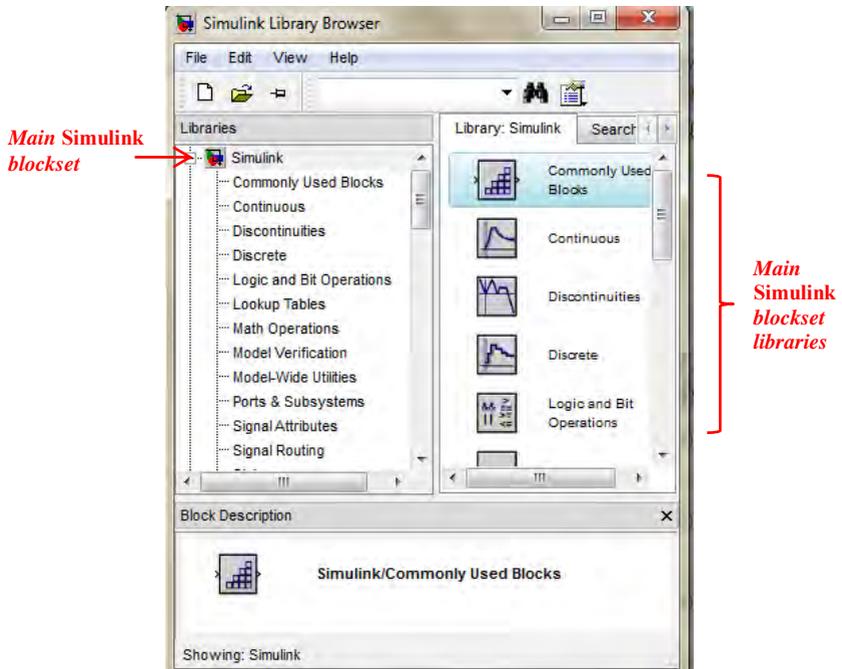
Langkah-langkah untuk memulai program Simulink Matlab adalah sebagai berikut.

7. Membuka program Matlab yang sudah terinstal.
8. Simulink merupakan *toolbox* tambahan pada Matlab. Agar dapat memulainya, maka ketikkan “simulink” pada *Command Window* atau klik *icon* Simulink. Halaman awal Matlab ditampilkan oleh gambar 10.

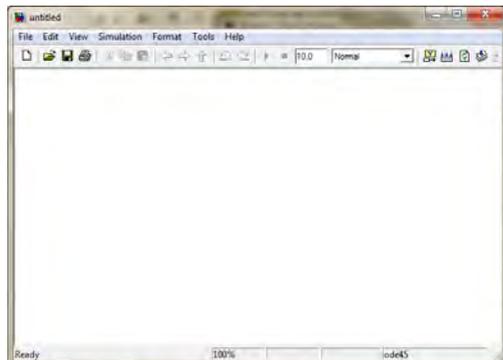


**Gambar 10.** Memulai Simulink menggunakan *icon* atau *Command Window*

9. *Interface* Simulink yang terdiri dari berbagai macam blok ditampilkan pada gambar 11.
10. Model Simulink baru dapat dilakukan dengan memilih menu [File] → [New] → [Model], sehingga muncul lembar kerja model Simulink seperti ditampilkan gambar 12.
11. Penggunaan Simulink umumnya digunakan untuk melihat suatu respon sistem berupa grafik dengan memanfaatkan persamaan atau fungsi transfer dari sistem.



**Gambar 11.** *Interface Simulink*



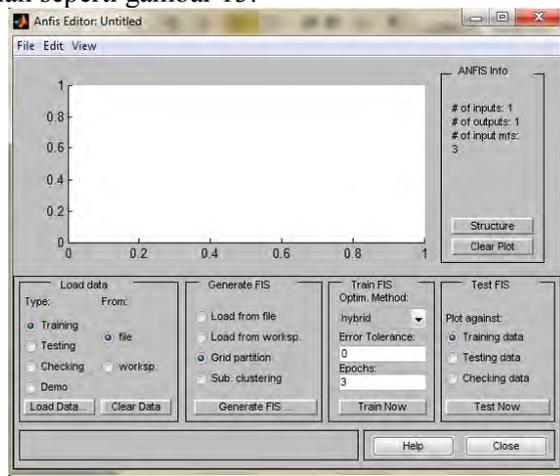
**Gambar 12.** *Lembar kerja model Simulink*

## LAMPIRAN H

### Tutorial ANFIS

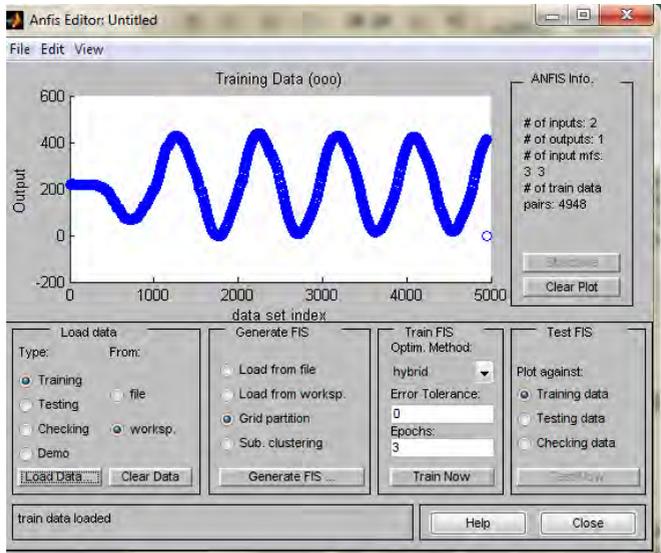
Langkah-langkah untuk memulai program ANFIS pada Matlab adalah sebagai berikut.

1. Membuka program Matlab yang sudah terinstal.
2. Untuk ANFIS non-GUI, ketikkan “anfis” pada *Command Window*. Sedangkan untuk ANFIS Editor GUI, ketikkan “anfisedit” pada *Command Window*, sehingga muncul tampilan seperti gambar 13.



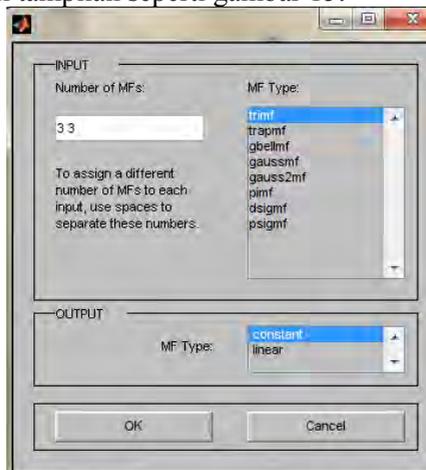
**Gambar 13.** ANFIS Editor

3. Sebelum melakukan simulasi pada ANFIS, data harus disiapkan terlebih dahulu. Data yang akan digunakan bisa disimpan dalam bentuk *file* “.fis” atau *workspace* dengan format “.mat”.
4. Pada kolom Load data di gambar 13, untuk melakukan *training data*, pilih data yang akan digunakan dengan *check* salah satu dari [file] atau [workspace], selanjutnya klik *button* [Load Data]. Sehingga akan muncul tampilan grafik dari data yang di-*plot* seperti gambar 14.



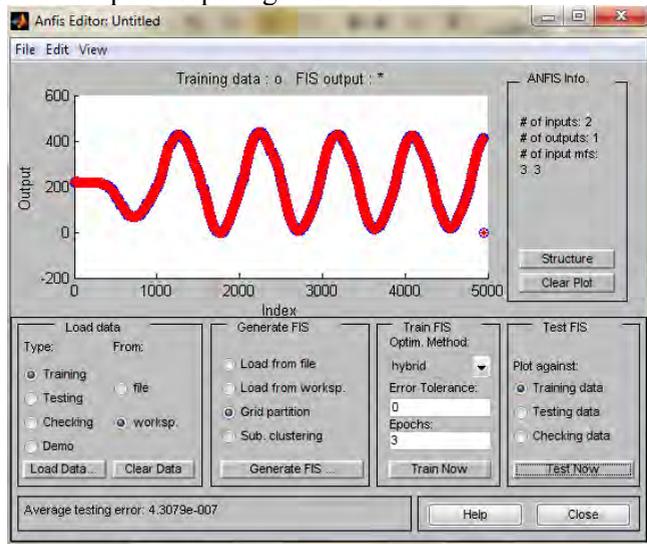
**Gambar 14.** Tampilan grafik hasil load data

5. Pada kolom *Generate Fis*, pilih [Grid partition] atau [Sub clustering]. Jika yang dipilih adalah *Grid partition*, maka akan muncul tampilan seperti gambar 15.



**Gambar 15.** Grid partition window

6. Tentukan jumlah dan tipe *membership function* sebagai proses fuzzifikasi. Jumlah *membership function* juga menentukan jumlah aturan yang dihasilkan dari proses *neural-network*.
7. Pada kolom *Train FIS*, tentukan metode optimasi yang digunakan. Pada ANFIS Editor, tersedia 2 metode optimasi, yaitu *backpropagation* dan *hybrid*.
8. Pada kolom *Test FIS*, pilih *plot against* sebagai hasil prediksi pada ANFIS. Jika tipe data yang digunakan sebelumnya adalah *training*, maka pada *test FIS* juga dipilih *training*. Selanjutnya klik *button* [Test Now], sehingga muncul tampilan seperti gambar 16.



**Gambar 16.** Tampilan grafik hasil *test training data*



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat, kesehatan, ilmu, dan karunianya kepada penulis hingga mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Sistem Pengendalian Inverter *Buck-Boost* Satu Fasa (IBBSF) berbasis *Neuro-Fuzzy*”**. Banyak pihak yang terlibat dan membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA, selaku ketua Jurusan Teknik Fisika ITS, dan Bapak Ir. Agung Budiono, M.Eng, selaku dosen wali penulis yang telah sabar memberikan dukungan, bimbingan, serta ilmu yang sangat bermanfaat.
2. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, yang senantiasa memberikan pengarahan sekaligus motivasi selama Tugas Akhir dilakukan.
3. Ayah dan ibu tercinta, orang tua terbaik sepanjang masa, dan kakakku tersayang, Fitri Rahmah. Terima kasih banyak atas doa, perhatian, dukungan, nasihat dan semangat yang telah diberikan selama ini.
4. Almas Fachrullah dan Mega Arintika Yuliana, selaku teman dan *partner* Tugas Akhir, yang sangat luar biasa memberikan dorongan dan semangat, serta tidak kenal lelah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
5. Teman-teman Labkom e205 sebagai keluarga kedua, yang telah memberikan dukungan, perhatian dan hiburan selama penulis mengemban ilmu.
6. Keluarga besar Teknik Fisika angkatan 2011, yang telah menjadi sahabat terbaik. Terimakasih atas semua kenangan yang telah terukir bersama.

Adanya ketidaksempurnaan penulisan dalam laporan Tugas Akhir ini, maka kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan dari semua pihak. Penulis juga berharap, semoga laporan ini dapat menambah wawasan bagi pembaca dan

bermanfaat sebagai rujukan pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 12 Januari 2015

Penulis

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Republika Online. (2014). *Krisis energi Indonesia Masuk Kategori Darurat!* Depok.
- [2] Suryoatmojo, H., & Ashari, M. (2005). Desain Buck-Boost Inverter Satu Fasa. *IES*, 20-25.
- [3] Almazan, J., Vazquez, N., Hernandez, C., Alvarez, J., & Arau, J. (2000, Oktober 15-19). A Comparison between the Buck, Boost and Buck-Boost Inverters. *IEEE*, 341-346.
- [4] Jawhar, S. J., Marimuthu, N. S., Pillai, S. K., & Singh, N. A. (2007, Agustus). Neuro-Fuzzy Controller for a Non Linear Power Electronic Buck & Boost Converters. *Asian Power Electronics, I*, 111-115.
- [5] Universitas Negeri Yogyakarta. (2003). *Teknik Dasar Rectifier dan Inverter*. Yogyakarta.
- [6] Nafiri. (2013, September). *Pembelajaran Induktor*. Retrieved Desember 27, 2014, from Pembelajaran Mekatronika SMK: <http://nafiri-mekatronika.blogspot.in/2013/09/pembelajaran-induktor.html>
- [7] Kusuma, D. (n.d.). *Bab II Induktor*. Retrieved Desember 27, 2014, from academia.edu: [https://www.academia.edu/7154303/BAB\\_II\\_Induktor](https://www.academia.edu/7154303/BAB_II_Induktor)
- [8] Suhailiyah, S., Bayunanda, I., & Nurida, I. (2013, Oktober 30). *Laporan Praktikum "Rangkaian Kapasitor"*. Retrieved Desember 27, 2014, from academia.edu: [https://www.academia.edu/8834346/Laporan\\_Praktikum\\_Rangkaian\\_Kapasitor](https://www.academia.edu/8834346/Laporan_Praktikum_Rangkaian_Kapasitor)
- [9] Indoware. (2014, Desember). *Kategori: Capasitor, Variabel*. Retrieved Desember 27, 2014, from Indo-ware: <http://indo-ware.com/produk-202-paket-kapasitor-digital.html>
- [10] Indoware. (2014, Desember). *Kategori: Resistor, Variabel*. Retrieved Desember 28, 2014, from Indo-ware: <http://indo-ware.com/halkategori-45-3.html>
- [11] Hariri, A., Ashari, M., & Anam, S. (n.d.). Simulasi dan Analisis Konverter Kaskade Buck-Boost Dua Arah sebagai

- Pencatu Tegangan Inverter Motor Induksi pada Mobil Listrik. *ITS paper*, 1-6.
- [12] Caceres, R., & Barbi, I. (1995). A Boost DC-AC Converter: Operation, Analysis, Control and Experimentation. *IEEE*, 546-551.
- [13] Kusumadewi, S., & Hartati, S. (2010). Neuro-Fuzzy. 312-314.
- [14] Universitas Komputer. (n.d.). *File : Pertemuan 09 Sistem Neuro Fuzzy.doc - Elib UNIKOM*. Retrieved Desember 28, 2014, from elib.unikom: [elib.unikom.ac.id/download.php?id=107544](http://elib.unikom.ac.id/download.php?id=107544)
- [15] Handayani, D. T., & Abadi, A. M. (2012). Penggunaan Model Neuro Fuzzy untuk Peramalan Nilai Tukar Rupiah terhadap Yen Jepang. *Universitas Negeri Yogyakarta*.
- [16] Bose, B. K. (1997). *Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications*. *IEEE Press*.
- [17] Alias, A. B. (2007). *Modelling and Simulation of Single Phase Inverter with PWM using Matlab/Simulink*. Pahang: Universiti Malaysia Pahang.
- [18] Fadhli. (2010). *Rancang Bangun Inverter 12V DC ke 220V AC dengan Frekuensi 50Hz dan Gelombang Keluaran Sinusoidal*. Depok: Universitas Indonesia.
- [19] Darwito, P. A., Soebagio, & Purnomo, M. H. (2012). A Comparison between Buck-Boost Inverter with and without Buffer Inductor. *IPTEK, The Journal for Technology and Science*, 77-81.
- [20] Vazquez, N., Almazan, J., Alvarez, J., Aguilar, C., & Arau, J. (1999). Analysis and Experimental Study of the Buck, Boost and Buck-Boost Inverters. *IEEE*, 801-806.

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya 21 tahun yang lalu pada tanggal 1 September. Pada tahun 2005, penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN Suwaluh III. Tahun 2008 penulis berhasil menyelesaikan pendidikan tingkat menengah pertama di SMPN 1 Krian, yang disusul 3 tahun kemudian tepatnya pada tahun 2011, penulis menyelesaikan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 1 Krian. Pada tahun yang sama, penulis berhasil melanjutkan studi di Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS melalui jalur SNMPTN Undangan. Penulis pernah melaksanakan Kerja Praktek di PT Semen Padang Biro Tenaga Bidang WHRPG. Judul Tugas Akhir yang diusulkan oleh penulis yaitu **“Sistem Pengendalian Inverter *Buck-Boost* Satu Fasa (IBBSF) berbasis *Neuro-Fuzzy*”**. Bagi pembaca yang ingin menyampaikan kritik, saran dan pertanyaan mengenai Tugas Akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui *email*: [yus.hamidah@gmail.com](mailto:yus.hamidah@gmail.com).