

Perancangan Kendali *Multilevel Inverter* Satu Fasa Tiga Tingkat dengan *PI+feedforward* pada Beban Nonlinier

MOCHAMAD ARI BAGUS NUGROHO, NOVIE AYUB WINDARKO,
BAMBANG SUMANTRI

Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Email: aribagusunugroho@gmail.com

Received 8 Mei 2019 | *Revised* 7 Juli 2019 | *Accepted* 17 Juli 2019

ABSTRAK

Sebuah konverter daya multilevel inverter diharapkan mampu untuk menyuplai tegangan AC ideal pada kondisi beban linier maupun nonlinier. Diharapkan metode kendali mampu cepat tanggap dan mampu mempertahankan bentuk tegangan AC keluaran inverter. Pengendali PI+feedforward diajukan dalam makalah ini. Pengendali ini akan diuji dengan beban linier maupun nonlinier. Beban nonlinier berupa rangkaian penyearah dengan filter kapasitor. Berdasarkan pengujian simulasi didapatkan bahwa pengendali PI+feedforward lebih cepat tanggap terhadap gangguan yang dibuktikan dengan nilai kesalahan rata-rata absolut sekitar 73% lebih kecil dari pengendali PI. Hasil Simulasi menunjukkan bahwa multilevel inverter dengan kendali PI menghasilkan THDv sebesar 0,669% pada beban linier dan sebesar 1,263% pada kondisi beban nonlinier. Sedangkan dengan kendali PI+feedforward menghasilkan THDv sebesar 0,292% pada beban linier dan sebesar 1,044% pada kondisi beban nonlinier.

Kata kunci: *mutilevel inverter, pengendali PI, feedforward, beban non-linier*

ABSTRACT

A multilevel inverter power converter is expected to be able to supply ideal AC voltage in linear and nonlinear load conditions. It is expected that the control method is be able to respond quickly and be able to maintain the waveform of the inverter output AC voltage. PI + feedforward controller is proposed in this paper. This controller will be tested with linear and nonlinear loads. Nonlinear load is a rectifier circuit with a filter capacitor. Based on simulation it was found that PI + feedforward controllers were more responsive to interference as evidenced by the mean absolute error (MAE) value of about 73% less than the PI controller. Simulation results show that multilevel inverter with PI control produces THDv of 0.669% in linear load and 1.263% in nonlinear load conditions. Whereas with PI + feedforward control produces THDv of 0.292% in linear loads and of 1.044% in nonlinear load conditions.

Keywords: *multilevel inverter, PI controller, feedforward, non-linear load*

1. PENDAHULUAN

Inverter adalah konverter daya yang berfungsi untuk mengkonversi tegangan DC menjadi AC. Saat ini *inverter* banyak diteliti karena oleh penggunaan energi terbarukan yang sebagian besarnya dalam bentuk tegangan DC sedangkan beban sebagian besar membutuhkan tegangan AC (**Reddy & Borghate, 2017**). Salah satu permasalahan utama dalam *inverter* adalah tegangan AC yang dihasilkan terdistorsi. Distorsi akan lebih besar saat *inverter* dibebani dengan beban nonlinier. Sebab itu peran kendali menjadi penting untuk menghasilkan tegangan AC yang minim distorsi (**Jiang, Cao, Li, Liu, & Peng, 2012**).

Topologi *inverter* berpengaruh terhadap kualitas tegangan keluaran. *Inverter* yang paling kecil distorsinya adalah tipe *multilevel inverter*. Meskipun tanpa menggunakan filter, *inverter* ini dapat menghasilkan tegangan AC dengan distorsi minimal dibandingkan dengan *inverter* konvensional. Dengan keunggulan ini, *inverter* tipe *multilevel* sesuai untuk dikembangkan dalam penggunaan beban yang menuntut tegangan AC dengan distorsi minimal. Lebih jauh, *multilevel inverter* dikembangkan untuk menghasilkan distorsi harmonisa yang lebih kecil serta menghindari tingkat interferensi elektro magnetik (EMI) dan perubahan tegangan terhadap waktu (dv/dt) yang tinggi (**Rodríguez & Lai, 2002**)(**Daniel W.Hart, 2011**). Dari sebuah studi menyatakan *inverter* konvensional menghasilkan total distorsi harmonisa sebesar 115%, sedangkan *multilevel inverter* dengan topologi *Neutral Point Clamped* (NPC) menghasilkan total distorsi harmonisa sebesar 32% (**Nordvall, 2011**).

Kendali pada *inverter* diharapkan pula dapat merespon kestabilan tegangan akibat perubahan beban atau adanya beban nonlinier yang terhubung pada *inverter*. Perubahan beban akan mengakibatkan *undervoltage* atau *overvoltage* dalam beberapa waktu. Sedangkan beban nonlinier akan mengakibatkan perubahan bentuk tegangan keluaran *inverter*. Perubahan bentuk tegangan akan memperbesar nilai distorsi harmonisa pada sistem (**Miveh, Rahmat, Ghadimi, & Mustafa, 2016**).

Beban nonlinier adalah beban yang menggunakan komponen elektronika daya. Beban ini semakin banyak karena penggunaan beban ini dapat menghemat energi dan digunakan untuk *power supply* pada peralatan elektronik seperti PC, TV, *Air Conditioner*, dan lain-lain (**Ye, Nijhuis, Cuk, & Cobben, 2017**). Pada umumnya beban nonlinier ini dalam bentuk rangkaian penyearah (**Gupta, Ranjan, Bhatnagar, Sahu, & Jain, 2016**). Beban nonlinier merupakan beban yang memiliki karakteristik impedansinya berubah secara periodik. Sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Hal ini ditandai dengan bentuk arus yang tidak sinus (non-sinusoidal). Dengan adanya arus harmonik yang disebabkan oleh pemasangan beban nonlinier, akan berdampak pada tegangan keluaran *inverter*.

Standardisasi harmonisa tegangan pada sistem kelistrikan nasional diatur pada standardisasi SPLN D5.004-1: 2012, mengenai *Power Quality* meliputi Regulasi Harmonisa, Kedip Tegangan dan Ketidakseimbangan Tegangan. Pada sub bab harmonisa, terdapat regulasi batasan distorsi harmonisa pada sistem kelistrikan dengan tegangan di bawah 66 kV adalah sebesar 3% untuk harmonisa individu, dan 5% untuk distorsi harmonisa total (THDv) (**PT PLN (Persero), 2012**). Sedangkan salah satu standarisasi internasional IEEE Std 519-2014 lebih mengklasifikasikan harmonisa pada tegangan rendah yaitu regulasi distorsi harmonisa pada sistem kelistrikan dengan tegangan dibawah 1 kV adalah sebesar 5% untuk harmonisa individu, dan 8% untuk distorsi harmonisa total (THDv) (**IEEE Power and Energy, 2014**).

Berdasarkan regulasi harmonisa yang telah ditentukan, maka sebuah *inverter* diharapkan mampu untuk mempertahankan regulasi dan bentuk tegangan keluaran setiap terdapat

perubahan beban maupun akibat beban pembentuk emisi harmonisa (beban nonlinier). Sehingga diperlukan metode kendali yang stabil, cepat, dan *robust* untuk dapat mempertahankan bentuk tegangan sehingga harmonisa tegangan keluaran *inverter* sesuai standarisasi.

Beberapa peneliti telah mengusulkan berbagai macam desain kendali untuk menghasilkan tegangan keluaran *inverter* dengan distorsi minimal. Dalam penelitian yang dilakukan oleh P.A.Dahono, untuk dapat melakukan pengendalian tegangan pada *inverter* konvensional dengan kesalahan pada keadaan tunak mencapai nilai nol, maka diberikan penurunan filter LC yang kemudian ditambahkan LC virtual. Sehingga dapat memperkecil nilai THD ketika diberikan beban nonlinier (**Dahono & Taryana, 2011**). Namun penggunaan LC virtual tidak bisa menjamin pengaturan tegangan (**Han, dkk., 2016**). Penelitian pada *inverter* konvensional mengenai mempertahankan bentuk tegangan keluaran *inverter* dilakukan dengan menggunakan kontrol prediktif (**Park, Lee, Park, Lee, & Won, 2017**). Namun metode kontrol prediktif memiliki kelemahan resiko terjadinya osilasi dan ketidakstabilan akibat parameter yang tidak bisa dikenali (**Rivera, Rodriguez, Wu, Espinoza, & Rojas, 2012**). Penelitian lainnya mengusulkan pengontrol logika Fuzzy untuk *inverter* tiga fasa *standalone*. Kinerja pengendali logika Fuzzy yang diusulkan telah dievaluasi dengan baik dalam kondisi beban linier. Total distorsi harmonisa digunakan sebagai parameter evaluasi kualitas gelombang, yaitu 2% dalam kasus linier dan 9% dalam kasus beban nonlinier (**Zheng, Zaman, Wu, Ali, & Khan, 2017**). Namun Fuzzy membutuhkan komputasi yang rumit untuk tahap fuzzifikasi, *rule base* dan defuzzifikasi (**Seyedmahmoudian & Rahmani, 2015**). Pada penelitian yang dilakukan oleh M. Monfared, *inverter* konvensional satu fase dengan sebuah pengendali umpan balik *dual-loop* sederhana dengan jalur *feedforward* untuk mengatur tegangan keluaran sesaat dari *inverter* UPS satu fasa. Pengontrol umpan balik memastikan stabilitas, redaman aktif, dan memperbaiki tanggapan terhadap gangguan, sementara *feedforward* memperbaiki keadaan *tracking* tegangan (**Monfared, 2014**). Kendali PI telah banyak digunakan pada aplikasi *inverter* satu fasa. Kendali PI mudah untuk diimplementasikan pada sebuah mikrokendali. Jumlah perhitungan yang sedikit menjadikan proses komputasi di dalam sebuah pengendali lebih sederhana jika dibandingkan dengan kendali bersifat prediktif maupun kendali dengan logika Fuzzy. Proses penalaan parameter dari kendali PI juga lebih sederhana dari jenis pengendali yang lain. Di samping dari kesederhanaan kendali PI, kendali PI pada umumnya tidak dapat mengikuti (*tracking*) sebuah sinyal referensi yang berupa sinus dengan baik. Hal ini merupakan dampak dari tanggapan dinamik pengendali integral (**Zammit, Staines, & Apap, 2014**).

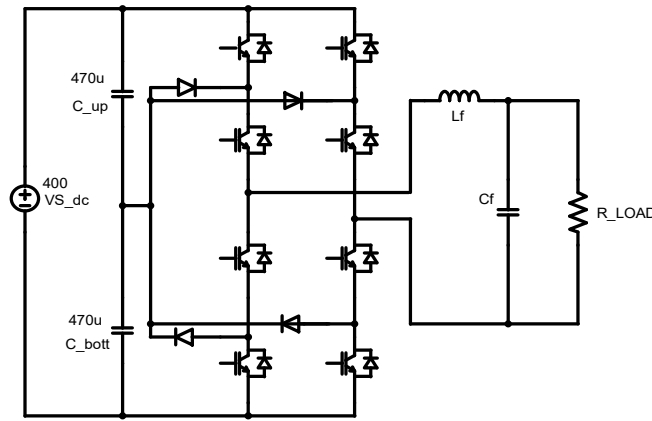
Untuk dapat memperbaiki tanggapan dinamik pengendali integral, perlu diberikan sebuah struktur tambahan dalam pengendali PI pada pengaturan tegangan keluaran *inverter*. Kendali *feedforward* dapat dikombinasikan dalam struktur pengendali PI. Ketika tidak terjadi gangguan maka pengendali *feedforward* yang bekerja, sedangkan ketika terjadi gangguan maka pengendali PI yang akan bekerja untuk mengkompensasi kesalahan. Pengendali PI dilengkapi dengan *feedforward* diharapkan dapat memberikan tanggapan sistem yang lebih baik.

Dalam makalah ini mengajukan sebuah perancangan kendali tegangan dengan kendali *PI+feedforward* untuk aplikasi *multilevel inverter* yang terhubung pada beban nonlinier. Kinerja pengendali dievaluasi dengan penentuan nilai THD tegangan keluaran *inverter* dan nilai rata-rata kesalahan absolut (*Mean Absolute Error* disingkat MAE). Nilai THD dan MAE tersebut dibandingkan dengan kinerja pengendali PI yang standar. Serta kemudian digunakan untuk mengetahui kesesuaian dengan standarisasi THD yang berlaku.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Pemodelan Sistem

Topologi yang paling sering digunakan pada *multilevel inverter* adalah topologi *Neutral Point Clamped* atau disingkat NPC. Topologi ini termasuk dalam kategori *multilevel inverter* dengan suplai tegangan DC tunggal. Topologi NPC memanfaatkan diode sebagai *clamber* tegangan. Sebuah suplai tegangan DC tunggal dibagi dalam jumlah yang genap sesuai dengan tingkat level yang diinginkan. Jika tingkat level yang diinginkan adalah m level, maka suplai tegangan DC dibagi menjadi $(m-1)(m-2)$ bagian. Sejumlah $(m-1)(m-2)$ kapasitor terhubung seri dan dipasangkan pada suplai DC untuk membagi tegangan DC. Titik tengah dari hubungan seri kapasitor disebut dengan titik area netral (*neutral point area*). Gambar 1 menunjukkan model *multilevel inverter* yang digunakan.



Gambar 1. Rangkaian *Multilevel Inverter* Tiga Tingkat Jembatan Penuh

Dari Gambar 1 didapat bahwa *multilevel inverter* yang digunakan adalah *multilevel inverter* satu fasa tiga tingkat dengan topologi NPC 2 lengan atau biasa disebut topologi NPC jembatan penuh. Frekuensi pensaklaran yang digunakan sebesar 10 kHz. Frekuensi pensaklaran *inverter* yang efektif sebesar 2-15 kHz (**Ahirrao, Gaware, Kakade, Kharade, & Chawda, 2014**).

Kemudian dilakukan pemilihan nilai LC *Low Pass Filter*. Frekuensi *cutoff* untuk sebuah *Low Pass Filter* mengacu pada Persamaan (1).

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

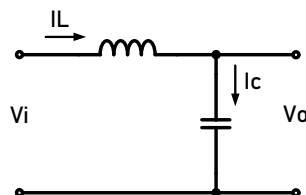
Dengan batasan-batasan dari frekuensi *cutoff* mengacu pada Persamaan (2).

$$f_{fundamental} < f_{cutoff} < f_{switching} \quad (2)$$

Dengan $f_{fundamental}$ merupakan frekuensi sinyal sinus utama yang digunakan yaitu 50 Hz, dan $f_{switching}$ merupakan frekuensi pensaklaran peralatan yang digunakan. Frekuensi pensaklaran yang digunakan adalah 10 kHz. Dengan batasan tersebut, pada penelitian ini menggunakan frekuensi *cutoff* filter sebesar 1500 Hz. Frekuensi 1500 Hz masih dalam batasan yang telah ditentukan pada Persamaan (2).

Dengan mengacu pada Persamaan (1) untuk membuat sebuah filter LC dengan nilai frekuensi *cutoff* tertentu, maka salah satu variabel L atau C ditentukan sehingga dapat

dilakukan kalkulasi untuk nilai variabel yang lain. Pada penelitian ini, nilai C ditentukan terlebih dahulu, kemudian dilakukan kalkulasi dengan Persamaan (1) untuk mendapatkan nilai L. Nilai C ditentukan sebesar 10 uF kemudian di substitusi pada Persamaan (1), sehingga didapatkan nilai L sebesar 1,13 mH. Rangkaian *Low Pass Filter* digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian LC *Low Pass Filter*

Rangkaian LC filter memiliki fungsi alih yang direpresentasikan pada Persamaan (3).

$$G(s) = \frac{1}{LCs^2+1} \quad (3)$$

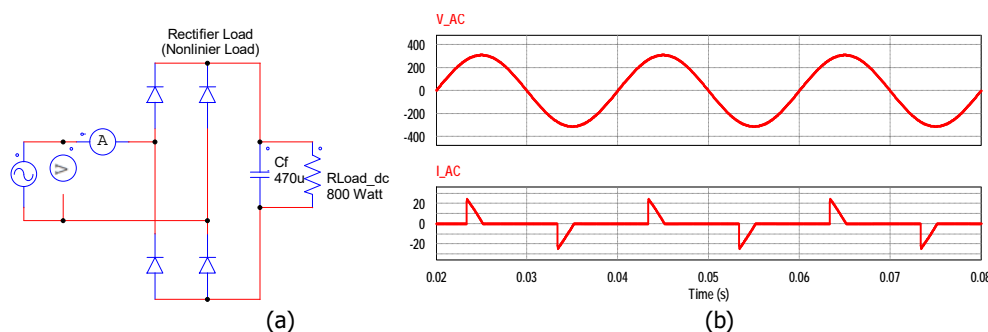
Dengan nilai L dan C yang telah didapatkan kemudian disubstitusikan ke Persamaan (3) sehingga dapat direpresentasi pada Persamaan (4).

$$G(s) = \frac{1}{1,13 \cdot 10^{-8}s^2+1} \quad (4)$$

2.2 Beban Nonlinier

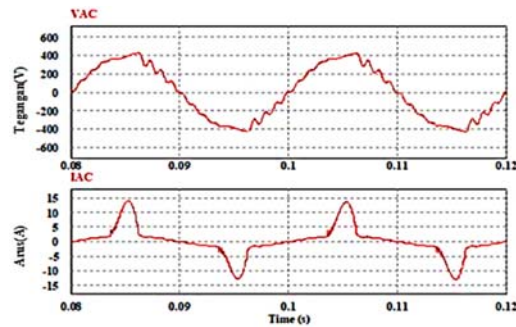
Berdasarkan standar *International Electrotechnical Commission* (IEC) 61000-3-2, beban di klasifikasi menjadi 4 tipe kelas. Klasifikasi ini didasarkan atas emisi harmonisa yang dihasilkan dari beban yang terhubung ke sistem (**IEC, 2004**). Menurut klasifikasi beban IEC 61000-3-2, bentuk arus yang berbeda (*special waveform*) termasuk pada klasifikasi kelas D. Beban *power supply* SMPS, rangkaian penyearahan dengan filter kapasitor atau induktor merupakan bentuk beban dengan *special waveform*.

Kondisi beban nonlinier merupakan beban yang memiliki bentuk arus berbeda (*special waveform*) dengan bentuk gelombang tegangan. Pada penelitian ini, model beban nonlinier yang digunakan adalah model rangkaian penyearah dengan filter kapasitor dan beban resistif. Nilai filter kapasitor yang digunakan sebesar 470 uF dan beban resistif 800 Watt dengan tegangan kerja 320 VDC. Gambar 3 menunjukkan hasil simulasi bentuk gelombang arus yang muncul akibat pembebanan dengan beban penyearah dan filter yang telah ditentukan.



Gambar 3. (a) Rangkaian Simulasi Beban Nonlinier, (b) Tegangan dan Arus Sumber

Pada Gambar 3, terlihat bahwa bentuk gelombang arus tidak sama dengan gelombang tegangan. Hal ini berarti bahwa rangkaian penyearah dengan filter 470 μF dan beban resistif 800 Watt merupakan beban nonlinier. Dengan bentuk arus pada Gambar 3b didapat bahwa nilai THDi sebesar 165,2%. Hal ini berarti bahwa beban memberikan injeksi arus harmonisa ke sistem dengan kandungan frekuensi harmonisa lebih besar daripada kandungan frekuensi fundamental. Dengan beban nonlinier tersebut kemudian diuji pada sebuah keluaran *inverter* tanpa kendali. Gambar 4 menunjukkan gelombang tegangan dan arus pada pada keluaran *inverter* yang terhubung pada beban nonlinier.



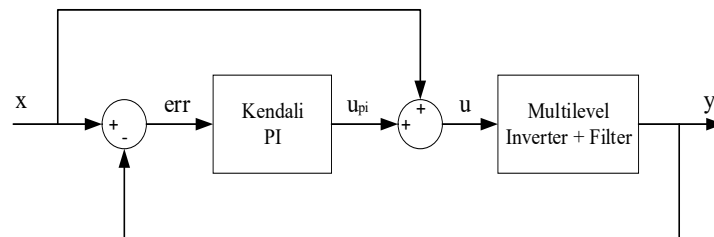
Gambar 4. Gelombang Tegangan dan Arus Keluaran *Inverter* dengan Beban Nonlinier

Pada Gambar 4 terlihat bahwa tegangan keluaran *inverter* berubah ketika diberikan beban nonlinier yang berupa rangkaian penyearah yang telah ditentukan. Akibat adanya injeksi arus harmonisa dari beban, tegangan keluaran *inverter* mengalami distorsi.

Langkah paling mudah untuk dapat menentukan suatu beban dikatakan sebagai beban nonlinier atau tidak adalah dengan mengamati bentuk gelombang tegangan dan arus. Jika bentuk gelombang tegangan dan arus berbeda, maka dapat dipastikan bahwa beban tersebut merupakan beban nonlinier yang menginjeksikan arus harmonisa dalam sistem.

2.3. Sistem dengan Kendali *PI+feedforward*

Fungsi alih yang telah direpresentasikan pada Persamaan (4) merupakan fungsi alih dari LC *Low Pass Filter* tanpa kendali. Perancangan kendali *PI+feedforward* bertujuan untuk mempertahankan bentuk tegangan keluaran *inverter* sesuai dengan sinyal referensi. Struktur sistem kendali yang diajukan dalam makalah ini digambarkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur Kendali *PI+feedforward*

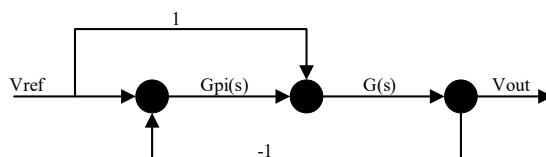
Jika diamati sesuai blok diagram dari pengendali *PI+feedforward*, maka dapat dilihat bahwa pengendali PI akan bekerja dan melakukan kompensasi pada sinyal kendali ketika terjadi kesalahan pada keluaran sistem. Jika tidak terjadi kesalahan, maka sinyal kendali berasal

dari sinyal referensi *setpoint*. Jika sinyal kendali dinyatakan dengan u , maka sinyal kendali dapat dinyatakan dengan Persamaan (5).

$$u = x + u_{PI} \quad (5)$$

Dengan x merupakan sinyal masukan (referensi) dan u_{PI} merupakan sinyal kompensasi keluaran dari pengendali proporsional integral.

Untuk dapat dilakukan analisis kestabilan sistem dengan mengetahui letak *pole* dan *zero* sistem, maka perlu dilakukan penyederhanaan blok diagram. Penyederhanaan blok diagram menggunakan *signal flow graph* dan *Mason's rule*. Bentuk blok diagram pada Gambar 5 diubah menjadi bentuk *signal flow graph* yang digambarkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Signal Flow Graph Pengendali *PI+feedforward*

Dari Gambar 6 maka dapat diketahui parameter-parameter yang dibutuhkan untuk dapat menyusun fungsi alih sistem menggunakan *Mason's Rule*. Parameter sistem untuk menyusun fungsi alih menggunakan *Mason's Rule* adalah sebagai berikut:

Input : V_{ref} Output : V_{out}

Dengan terdapat 2 buah jalur maju (*forward path*) sepanjang $V_{ref} \rightarrow V_{out}$ yaitu:

$$P_1 = G \quad \text{dan} \quad P_2 = G_{pi}G$$

Dan memiliki 1 buah individual *loop* yaitu: $L_1 = -G_{pi}G$

Persamaan fungsi alih menggunakan *Mason's Rule* direpresentasikan pada Persamaan (6).

$$TF = \frac{V_{out}}{V_{ref}} = \frac{1}{\Delta} \left(\sum_{i=1}^{\# \text{forward path}} P_i \Delta_i \right) \quad (6)$$

Dengan : $\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + \dots + L_i)$
 $\Delta_i =$ individual *loop* ke-i
 $P_i =$ jalur maju ke-i

Kemudian parameter-parameter yang telah diketahui disubstitusikan ke dalam *Mason's Rule* sedemikian hingga didapatkan fungsi alih sistem yang dinyatakan dalam Persamaan (7). Dengan $G_{pi}(s)$ adalah fungsi alih kendali PI dan $G(s)$ adalah fungsi alih dari sistem.

$$TF = \frac{G_{pi}G + G}{1 + G_{pi}G} \quad (7)$$

Dengan $G_{pi}(s)$ merupakan fungsi alih kendali PI yang dinyatakan dalam Persamaan (8).

$$G_{pi}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (8)$$

Kemudian dilakukan substitusi dari Persamaan (4) dan Persamaan (8) ke dalam Persamaan (7) sehingga dapat dinyatakan dalam Persamaan (9).

$$H(s) = TF = \frac{K_p s + K_i + s}{1,13 \cdot 10^{-8} s^3 + s + K_p s + K_i} \quad (9)$$

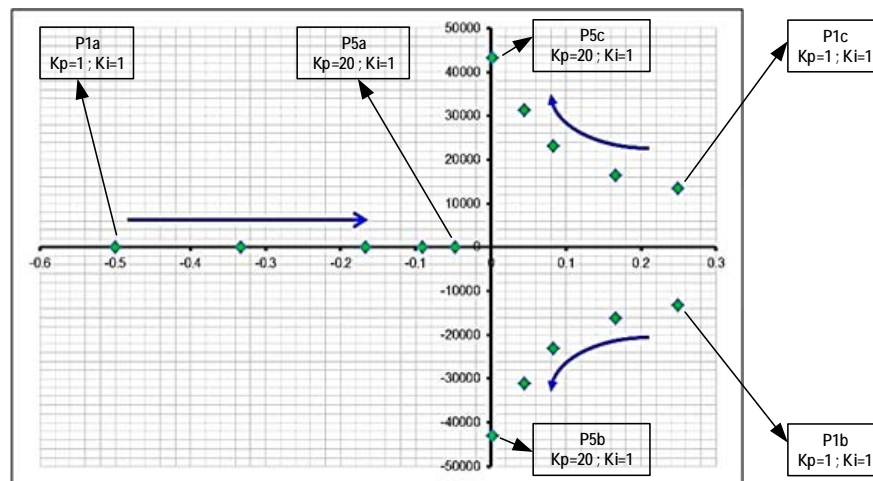
Kemudian dilakukan penalaan variabel K_p dan K_i sedemikian hingga didapatkan sistem yang stabil dengan pengamatan pada akar-akar karakteristik.

3. PENGUJIAN DAN ANALISIS

3.1 Penalaan Variabel Pengendali

Penalaan variabel pengendali menggunakan metode penentuan letak akar-akar persamaan karakteristik. Letak akar-akar karakteristik dapat direpresentasikan dalam bentuk analisis *root locus*. Analisis *root locus* menggunakan letak *pole* pada persamaan karakteristik sistem sebagai acuan atas kestabilan sistem. Sistem dikatakan stabil jika seluruh *pole* dari sistem berada di sebelah kiri sumbu kestabilan. Kemudian dari Persamaan (9) dilakukan pengujian beberapa nilai K_p dan K_i untuk mengetahui pengaruh penentuan nilai K_p dan K_i terhadap letak *pole* sistem pada diagram *root locus*. Persamaan (9) merupakan fungsi alih sistem *multilevel inverter* dengan pengendali *PI+feedforward*. Kemudian dilakukan beberapa pengujian perubahan nilai K_p dengan K_i tetap, perubahan nilai K_i dengan K_p tetap, dan perubahan nilai K_p dan K_i .

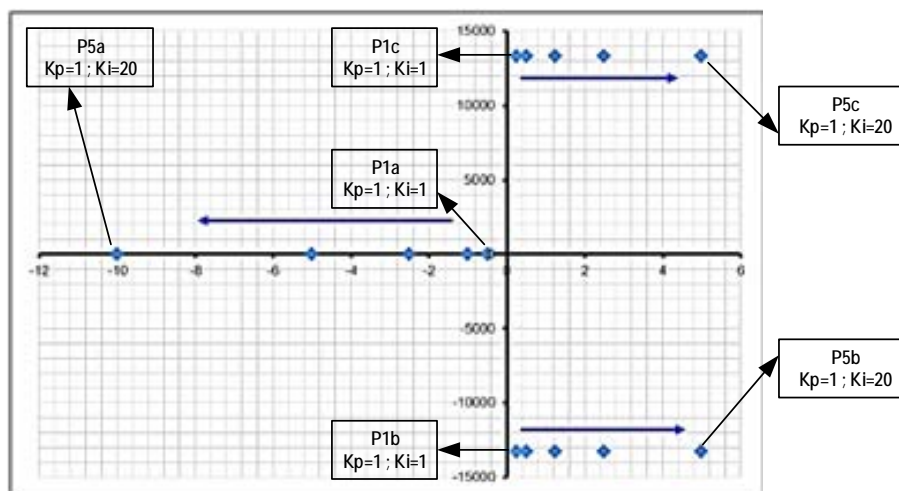
Persamaan (9) merupakan persamaan dengan orde 3, sehingga akan didapatkan 3 *pole* setiap perubahan K_p dan K_i . Pengujian pertama dilakukan dengan K_p berubah dan K_i tetap, Gambar 7 menunjukkan hasil *pole* sistem pada pengujian beberapa nilai K_p dengan nilai K_i tetap. Gambar 7 menggambarkan letak *pole* sistem yang direpresentasikan dalam diagram *root locus*. Setiap pasangan nilai K_p dan K_i menghasilkan 3 buah *pole* yang terdiri dari 1 *pole* pada sumbu riil dan 1 pasang *pole* pada sumbu imajiner.



Gambar 7. Grafik Perubahan Letak *Pole* terhadap Perubahan Nilai K_p

Dari Gambar 7, terlihat bahwa dengan perubahan nilai K_p mengubah letak *pole-pole* dalam sumbu kestabilan. Semakin besar nilai K_p maka letak *pole* yang ada pada sumbu riil semakin bergeser ke kanan menuju titik nol dan 1 pasang *pole* pada sumbu imajiner semakin bergeser mendekati sumbu kestabilan.

Pengujian kedua dilakukan dengan K_i berubah dan K_p tetap, Gambar 8 menunjukkan hasil letak *pole* sistem pada pengujian beberapa nilai K_i dengan nilai K_p tetap. Perubahan nilai K_i mengubah letak *pole-pole* dalam diagram *root locus*. Semakin besar nilai K_i maka letak *pole* yang ada pada sumbu riil semakin bergeser ke kiri menuju titik kestabilan tertentu dan 1 pasang *pole* pada sumbu imajiner semakin bergeser menjauhi sumbu kestabilan.



Gambar 8. Grafik Perubahan Letak *Pole* terhadap Perubahan Nilai K_i

Dari grafik pada Gambar 8, didapat bahwa semakin besar nilai K_i akan menggeser *pole-pole* yang berada pada area ketidakstabilan semakin menjauhi sumbu kestabilan. *Pole* yang berada pada sumbu riil semakin bergeser ke kiri menjauhi sumbu kestabilan. Dari Gambar 8 dapat diketahui bahwa semakin besar nilai K_i maka akan membuat sistem lebih tidak stabil, dengan ditandai oleh bergesernya *pole-pole* yang berada dari area ketidakstabilan menjauhi sumbu imajiner (sumbu kestabilan).

Dari dua pengujian yang telah dilakukan, variasi nilai K_p dengan K_i tetap dan variasi nilai K_i dengan K_p tetap, maka dapat dilakukan pengujian *multilevel inverter* dengan variasi nilai K_p diperbesar dan nilai K_i diperkecil untuk mendapatkan tanggapan sistem yang lebih baik. Tabel 1 menunjukkan hasil letak *pole* dengan perubahan nilai K_p dan K_i .

Tabel 1. Letak *Pole* Sistem dengan Pengujian Perubahan Nilai K_p dan K_i

K_p	K_i	<i>Pole</i>		
		p1	p2	p3
2	0.1	-0.0333	$0.01 - j16293$	$0.01 + j16293$
3	0.01	-0.0025	$-j18814$	$+j18814$
15.5	0.515	-0.009	$-j38212$	$+j38212$

Dari Tabel 1, didapat *pole* yang paling menjauhi area ketidakstabilan ketika $K_p=15,5$ dan $K_i=0,515$. Sehingga untuk pengujian *multilevel inverter* menggunakan parameter K_p dan K_i yang telah didapatkan untuk diset sebagai parameter pada kendali *PI+feedforward*.

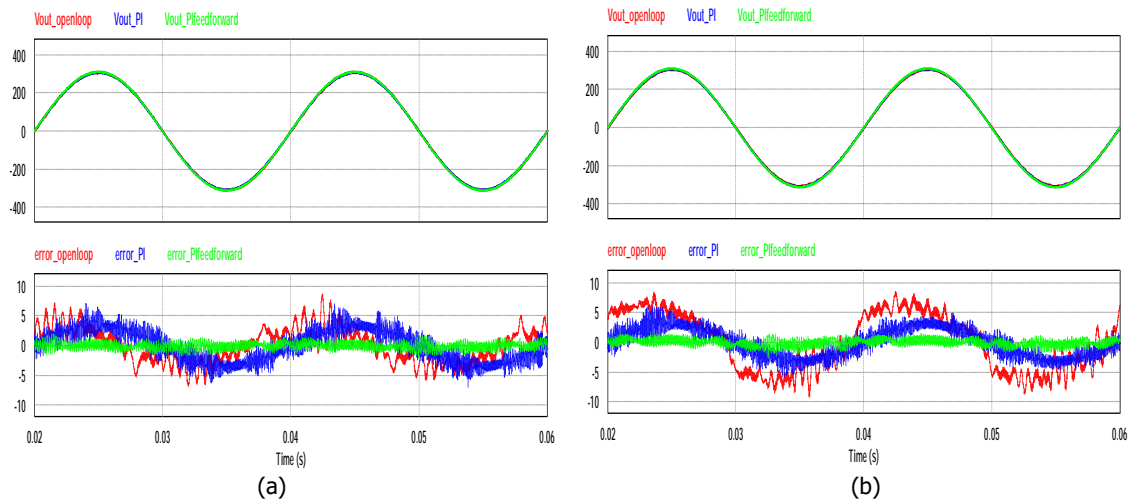
3.2 Pengujian Pengendali Pada *Multilevel Inverter*

Pengujian dilakukan secara simulasi menggunakan perangkat lunak *Power Simulator* (PSIM). Simulasi yang dilakukan yaitu simulasi *inverter* dengan beban linier (resistif dan induktif), dan simulasi *inverter* dengan beban nonlinier. Kinerja pengendali sistem diamati berdasarkan nilai distorsi harmonisa total (THDv) dan nilai rata-rata kesalahan absolut. Tabel 2 menunjukkan nilai parameter yang digunakan untuk pengujian sistem.

Tabel 2. Parameter Pengujian Sistem

Parameter Kendali		Parameter <i>Inverter</i>		Parameter Beban	
Setpoint tegangan	220Volt	Tegangan suplai DC	400V _{dc}	Beban A (Resistif)	100Watt
Pengendali PI	K _p = 90,5 K _i = 1	M - level <i>inverter</i>	3 Level	Beban B (Resistif)	1000Watt
		Frekuensi modulasi	10kHz	Beban C (Induktif)	100Watt
Pengendali <i>PI+feedforward</i>	K _p = 15,5 K _i = 0,515	Filter L	1,13mH	Beban D (Induktif)	1000Watt
		Filter C	10uF	Beban E (Nonlinier/Penyearah)	220uF + (Resistor) 200Watt
				Beban F (Nonlinier/Penyearah)	470uF + (Resistor) 200Watt
				Beban G (Nonlinier/Penyearah)	470uF + (Resistor) 800Watt

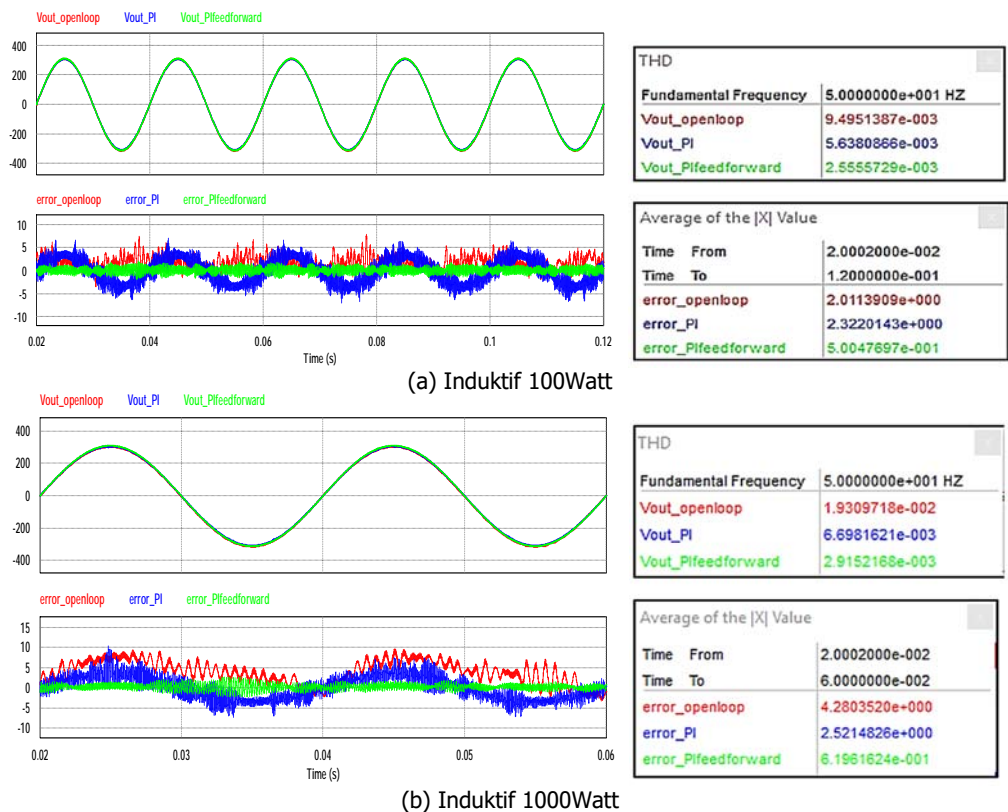
Simulasi dilakukan dengan dua tahap, yaitu simulasi dengan pembebanan beban linier dan beban nonlinier. Pengujian dengan beban linier dimaksudkan untuk memastikan bahwa rancangan kendali *PI+feedforward* dan kendali PI yang akan dibandingkan memiliki kinerja yang baik melalui pengamatan pada nilai distorsi tegangan dan nilai rata-rata kesalahan absolut. Konstanta K_p dan K_i pada pengendali PI didapatkan dari metode penalaan *trial and error* sedemikian hingga didapatkan tanggapan terbaik yang digunakan dengan nilai K_p=90,5 dan K_i=1. Sedangkan konstanta K_p dan K_i pada pengendali *PI+feedforward* didapatkan dari hasil analisis *root locus* yang telah dibahas pada subbab 3.1 sehingga didapatkan tanggapan terbaik dengan K_p=15,5 dan K_i=0,515. Gambar 9 menunjukkan tanggapan tegangan keluaran *multilevel inverter* tanpa pengendali, dengan pengendali PI, dan dengan pengendali *PI+feedforward* pada beban linier resistif.



Gambar 9. Tanggapan Tegangan Keluaran *Inverter* tanpa Pengendali, dengan Pengendali PI, dan dengan Pengendali *PI+feedforward* pada Beban Resistif 100 Watt dan 1000 Watt

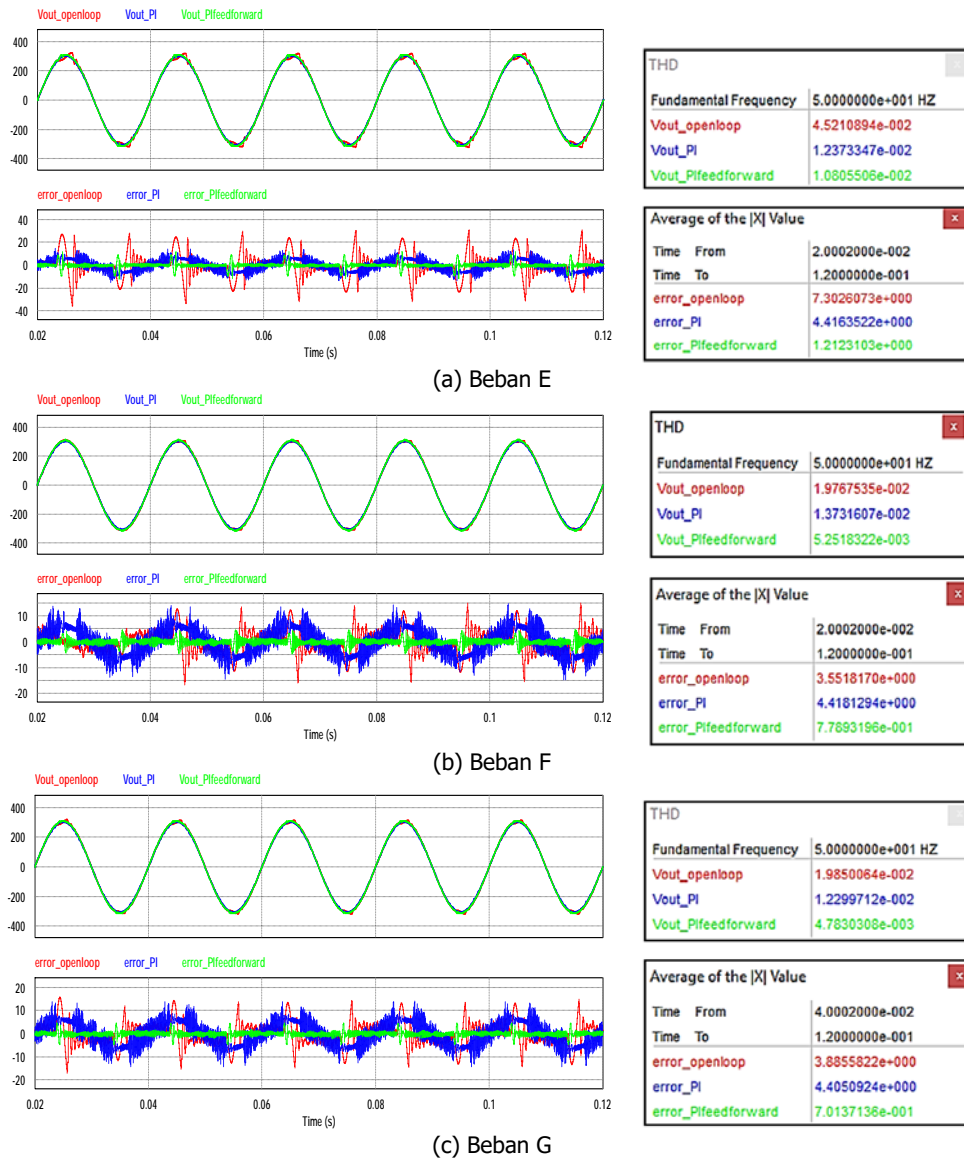
Perancangan Kendali *Multilevel Inverter* Satu Fasa Tiga Tingkat dengan *PI+feedforward* pada Beban Nonlinier

Pada simulasi pembebanan linier resistif yang telah dilakukan menghasilkan bentuk gelombang tegangan dan nilai kesalahan pada Gambar 9. Ketika keluaran *multilevel inverter* diberikan kendali PI didapatkan nilai THDv sebesar 0,457% dengan nilai rata-rata kesalahan absolut sebesar 2,09 V, sedangkan ketika diberikan kendali *PI+feedforward* didapatkan nilai THDv sebesar 0,263% dengan nilai rata-rata kesalahan absolut sebesar 0,49 V. Nilai THDv dan nilai rata-rata kesalahan absolut yang didapatkan semakin naik seiring dengan kenaikan daya beban. Namun dengan pengendali *PI+feedforward*, perubahan nilai THDv dan rata-rata kesalahan absolut yang terjadi cukup kecil atau tidak signifikan. Kemudian dilakukan pengujian pembebanan beban linier induktif. Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi pembebanan beban induktif.



Gambar 10. Tanggapan Tegangan Keluaran *Inverter* tanpa Pengendali, dengan Pengendali PI, dan dengan Pengendali *PI+feedforward* pada Beban Induktif

Pada simulasi pembebanan linier induktif yang telah dilakukan menghasilkan bentuk gelombang tegangan dan nilai kesalahan pada Gambar 10. Pada pembebanan induktif 100 Watt Ketika keluaran *multilevel inverter* diberikan kendali PI didapatkan nilai THDv sebesar 0,563% dengan nilai rata-rata kesalahan absolut sebesar 2,32 V, sedangkan ketika diberikan kendali *PI+feedforward* didapatkan nilai THDv sebesar 0,255% dengan nilai rata-rata kesalahan absolut sebesar 0,50 V. Nilai THDv dan nilai rata-rata kesalahan absolut yang didapatkan semakin naik seiring dengan kenaikan daya beban induktif. Namun dengan pengendali *PI+feedforward*, perubahan nilai THDv dan rata-rata kesalahan absolut yang terjadi cukup kecil atau tidak signifikan. Kemudian dilakukan pengujian pembebanan beban nonlinier. Gambar 11 menunjukkan hasil simulasi pembebanan beban nonlinier.



Gambar 11. Tanggapan Tegangan Keluaran *Inverter* tanpa Pengendali, dengan Pengendali PI, dan dengan Pengendali *PI+feedforward* pada Beban Nonlinier

Dari hasil simulasi yang digambarkan pada Gambar 11 didapatkan bahwa nilai THDv pada pembebanan Beban E, keluaran *inverter* tanpa pengendali mengandung THDv sebesar 4,52%, dengan pengendali PI sebesar 1,237%, dan dengan pengendali *PI+feedforward* sebesar 1,08%. Nilai rata-rata kesalahan absolut untuk keluaran *inverter* tanpa pengendali sebesar 7,3 V, dengan pengendali PI sebesar 4,42 V, dan dengan pengendali *PI+feedforward* sebesar 1,21 V. Nilai THDv dan nilai rata-rata kesalahan absolut berubah-ubah disetiap karakteristik pembebanan beban nonlinier yang dihubungkan pada keluaran *inverter*. Namun dari ketiga percobaan pembebanan beban nonlinier, dengan pengendali *PI+feedforward* memiliki tingkat tanggapan yang lebih baik dari pengendali PI. Hal ini diamati dari komparasi nilai THDv dan nilai rata-rata kesalahan absolut yang terjadi. Kemudian untuk dapat membandingkan tanggapan pengendali lebih jauh, maka Tabel 3 menunjukkan ringkasan kinerja pengendali pada setiap kondisi pembebanan dan daya yang variatif.

Tabel 3. Perbandingan Kinerja Pengendali dengan Beban Linier

Kondisi Beban	Openloop			PI			PI + <i>feedforward</i>		
	V (rms)	THDv (%)	Kesalahan rata-rata absolute	V (rms)	THDv (%)	Kesalahan rata-rata absolute	V (rms)	THDv (%)	Kesalahan rata-rata absolute
Beban A	218,72	0,509	2,34	217,49	0,457	2,09	219,88	0,263	0,49
Beban B	215,83	0,672	2,38	217,41	0,555	2,34	219,68	0,266	0,50
Beban C	219,91	0,949	2,01	217,48	0,563	2,32	219,95	0,255	0,50
Beban D	218,25	1,930	4,28	217,33	0,669	2,52	219,85	0,292	0,62
Beban E	217,79	4,521	7,30	215,41	1,237	4,41	219,87	1,081	1,21
Beban F	218,81	1,976	3,55	215,48	1,373	4,42	219,93	0,525	0,78
Beban G	218,96	1,985	3,88	215,52	1,229	4,41	219,92	0,478	0,70

Dari pengamatan pada Tabel 3, diketahui bahwa untuk pembebanan beban resistif, semakin besar nilai daya maka nilai THDv yang terjadi pada *inverter* di setiap metode kendali semakin besar. Begitu pula nilai rata-rata kesalahan absolut yang terjadi, semakin besar daya yang terhubung ke *inverter*, maka nilai rata-rata kesalahan absolut juga semakin besar pula. Hal ini juga berlaku pada saat pembebanan beban induktif. Jika dilakukan pengamatan maka tegangan keluaran *multilevel inverter* dengan kendali *PI+feedforward* dan kendali PI memiliki nilai THDv yang relatif kecil pada kondisi beban linier dengan variasi daya dan sifat beban linier.

Dari Tabel 3 juga menampilkan kinerja pengendali pada kondisi beban nonlinier, maka dapat diketahui bahwa pengendali *PI+feedforward* yang telah didesain telah mampu untuk mempertahankan bentuk sinus yang dibuktikan dengan nilai rata-rata kesalahan absolut dan nilai deviasi kesalahan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan pengendali PI. Ketika dihubungkan pada beban nonlinier, keluaran *multilevel inverter* dengan pengendali *PI+feedforward* menghasilkan THDv yang lebih kecil dari pengendali PI.

4. KESIMPULAN

Struktur sistem kendali yang dirancang merupakan sistem kendali tegangan pada *multilevel inverter* satu fasa untuk beban nonlinier. Struktur sistem kendali yang diajukan telah mampu untuk mempertahankan bentuk tegangan terhadap beban nonlinier. Beban nonlinier memberikan injeksi harmonisa ke sistem *inverter* sehingga menyebabkan tegangan keluaran *inverter* terdistorsi.

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa struktur sistem kendali *PI+feedforward* memiliki tingkat tanggapan yang lebih baik terhadap gangguan yang dibuktikan dengan nilai rata-rata kesalahan absolut yang lebih kecil sekitar 73% dari pengendali PI. Distorsi harmonisa yang terjadi pada keluaran filter *inverter* dapat lebih direduksi dengan struktur kendali *PI+feedforward*. Sehingga nilai THD tegangan keluaran *inverter* semakin kecil jika dibandingkan dengan pengendali PI.

Dari keseluruhan pengujian *multilevel inverter* dengan kendali *PI+feedforward* pada beban nonlinier menghasilkan nilai THDv sebesar 1,08%. Nilai THDv tersebut masih di bawah

standardisasi IEEE Std 519-2014, mengenai kandungan harmonisa dalam sistem kelistrikan. Kandungan harmonisa untuk tegangan dibawah 1 kV yang diperbolehkan adalah kurang dari 8% untuk harmonisa tegangan total (THDv).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Politeknik Elektronika Negeri Surabaya yang telah memberikan penulis beasiswa *freshgraduate* untuk program Pascasarjana Terapan. Terima kasih kepada Member Lab. *Renewable Energy*, Rekan Member Lab. *Factory Automation*, dan Teman-teman Teknik Elektro Industri yang selalu memberikan dorongan, do'a, dan dukungan kepada penulis untuk dapat menyelesaikan penulisan makalah ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Ahirrao, D., Gaware, B., Kakade, P., Kharade, P., & Chawda, S. (2014). Analysis Of Single Phase Matrix Converter. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(3), 856–861.
- Dahono, P. A., & Taryana, E. (2011). A New Voltage Control Method for Single-Phase PWM Inverters. *ITB Journal of Engineering Science*, 43(2), 139–152.
- Daniel W.Hart. (2011). *Power Electronics (I)*. New York: McGraw-Hill Inc.
- Gupta, K. K., Ranjan, A., Bhatnagar, P., Sahu, L. K., & Jain, S. (2016). Multilevel Inverter Topologies With Reduced Device Count: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(1), 135–151.
- Han, H., Hou, X., Yang, J., Wu, J., Su, M., & Guerrero, J. M. (2016). Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 200–215.
- IEC. (2004). *International Standard 61000-3-2 Electromagnetic compatibility (EMC). Ed. 2*.
- IEEE Power and Energy. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society Std 519-2014*.
- Jiang, S., Cao, D., Li, Y., Liu, J., & Peng, F. Z. (2012). Low-THD, Fast-Transient, and Cost-Effective Synchronous-Frame Repetitive Controller for Three-Phase UPS Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(6), 2994–3005.
- Miveh, M. R., Rahmat, M. F., Ghadimi, A. A., & Mustafa, M. W. (2016). Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1592–1610.
- Monfared, M. (2014). A simplified control strategy for single-phase UPS inverters. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 62(2), 367–373.

- Nordvall, A. (2011). *Multilevel Inverter Topology Survey Master of Science Thesis in Electric Power Engineering Division of Electric Power Engineering Multilevel Inverter Topology Survey*. Chalmers University.
- Park, J. M., Lee, K. H., Park, Y. J., Lee, J. H., & Won, C. Y. (2017). Predictive control for single-phase multi-module UPS inverters with output LC filter modeling. *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2017*, 1–6.
- PT PLN (Persero). (2012). *SPLN D5.004-1: 2012 Power Quality (Regulasi Harmonisa, Flicker dan Ketidakseimbangan Tegangan)*.
- Reddy, K. R., & Borghate, V. B. (2017). A Three-Phase Hybrid Cascaded Modular Multilevel Inverter for Renewable Energy Environment. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *32*(2), 1070–1087.
- Rivera, M., Rodriguez, J., Wu, B., Espinoza, J. R., & Rojas, C. A. (2012). Current Control for an Indirect Matrix Converter With Filter Resonance Mitigation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *59*(1), 71–79.
- Rodríguez, J., & Lai, J. (2002). Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *49*(4), 724–738.
- Seyedmahmoudian, M., & Rahmani, R. (2015). Simulation and Hardware Implementation of New Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded PV System Using Hybrid DEPSO Method. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *6*(3), 850–862.
- Ye, G., Nijhuis, M., Cuk, V., & Cobben, J. F. G. (2017). Appliance-based residential harmonic load modelling. *2017 IEEE Manchester PowerTech*, 1–6.
- Zammit, D., Staines, C. S., & Apap, M. (2014). Comparison between PI and PR Current Controllers in Grid Connected PV Inverters. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, *8*(11), 221–226.
- Zheng, X., Zaman, H., Wu, X., Ali, H., & Khan, S. (2017). *Direct Fuzzy Logic Controller for Voltage Control of Standalone Three Phase Inverter*, 8–10.