

Simulasi dan Analisis Inverter 3-Fasa dengan Sumber Referensi Tegangan pada Jala-jala PLN

Faizal Arya Samman¹, Rhiza S. Sadjad²
Jurusan Teknik Elektro, Faklutas Teknik
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
¹faizal@unhas.ac.id, ²rhiza@unhas.ac.id

Muhammad Yasin³
Politeknik ATI - Akademi Teknik Industri
Makassar, Indonesia
³ysn_sv77@yahoo.com

Abstract—Paper ini memperlihatkan hasil simulasi dan analisis inverter tiga-fasa yang akan digunakan pada sistem pembangkitan listrik tenaga surya, yang berfungsi mengubah sumber arus searah dari panel surya menjadi arus bolak-balik. Dalam simulasi, inverter dimodelkan dan didesain dengan menggunakan tegangan referensi dari jala-jala PLN sebagai acuan untuk membangkitkan sinyal kendali PWM (*Pulse Width Modulation*). Sinyal PWM ini dikirimkan ke pintu gate dari komponen saklar transistor daya, yang dalam hal ini digunakan IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Pengaturan irama penyaklaran akan mengubah sumber tegangan DC (*Direct Current*) menjadi tegangan AC (*Alternating Current*). Dengan menggunakan filter pasif LC, maka sinyal keluaran dari inverter dapat diubah menjadi gelombang sinusoidal berfrekuensi 50Hz sebagaimana diharapkan. Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi penurunan tegangan fasa dari keluaran inverter. (*Abstract*)

Index Terms—Inverter 3-Fasa, Elektronika Daya, Aplikasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya. (*key words*)

I. PENDAHULUAN

Pada tahun-tahun terakhir ini, sumber-sumber energi baru dan terbarukan telah dipromosikan dan dikembangkan oleh negara Republik Indonesia. Ketergantungan dan harga bahan bakar fosil yang terus meningkat menjadi faktor pendorong diperlukannya sumber-sumber energi baru dan terbarukan. Di sisi lain, bahan bakar fosil memiliki dampak negatif yang sangat besar terhadap lingkungan [1].

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat berpotensi menghasilkan overloads jaringan distribusi yang menciptakan masalah seperti pemadaman, ketidakstabilan grid, penurunan kualitas daya, keamanan daya dsb. Untuk menyeimbangkan kebutuhan energi, maka diperlukan pembangkit daya baru dan terbarukan seperti Photovoltaic (PV), Angin, dan Biomassa. Energi surya misalnya dianggap sebagai salah satu sumber yang paling berpotensi menyokong sumber energi fosil, karena gratis, berlimpah, bebas polusi dan bebas perawatan.

Piranti-piranti yang menghasilkan energi baru dan terbarukan misalnya saja sel surya menghasilkan tegangan dalam bentuk DC. Sementara itu hampir semua peralatan listrik rumah tangga membutuhkan sumber tegangan AC. Oleh karena itu diperlukan suatu peralatan yang dapat mengubah

sumber listrik DC ke AC [2], yang dalam hal ini biasa kita sebut sebagai Inverter.

Inverter adalah salah satu perangkat yang penting yang diperlukan dalam rangka pemanfaatan sumber energi terbarukan. Metode Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) adalah salah satu teknik yang paling populer untuk pengurangan harmonik inverter. Teknik PWM misalnya juga dapat mengurangi harmonisasi orde rendah dalam gelombang keluaran pada chopper (pemotong arus searah) [2], [3]. Ada tiga gelombang sinusoidal yang digunakan dan diukur dari jala-jala PLN, yang masing-masing memiliki perbedaan fasa sebesar 120° sebagai sinyal referensi untuk tiga tahap inverter.

Inverter dapat dibagi ke dalam jenis Inverter dengan sumber tegangan (*VSI – voltage source inverter*) dan inverter dengan sumber arus (*CSI – current source inverter*). Inverter jenis VSI merupakan jenis inverter yang paling banyak digunakan dalam sistem PV [3], [4]. Dan merupakan jenis inverter yang akan dikaji dalam paper ini.

II. DEFINISI MASALAH

Seperti dijelaskan sebelumnya, tegangan yang dihasilkan dari panel PV adalah tegangan DC. Oleh karena itu diperlukan sebuah inverter yang berfungsi mengkonversi tegangan DC dari PV ke bentuk tegangan AC yang kemudian dapat dihubungkan ke konsumen dan/atau jaringan untuk dijual. Sebelum disambungkan ke Grid, maka magnitudo tegangan output, fase dan frekuensi inverter harus sama dengan magnitudo tegangan, fase dan frekuensi tegangan pada jala-jala (grid). Tegangan grid dapat digunakan sebagai sumber referensi untuk mengontrol sudut penyalan rangkaian elektronika daya yang dikendalikan melalui sinyal pulsa termodulasi (*PWM – pulse width modulation*).

III. TINJAUAN PUSTAKA

A. Jenis-jenis Inverter

Inverter merupakan rangkaian elektronika daya yang digunakan untuk mengkonversikan atau mengubah tegangan searah (DC) ke tegangan bolak-balik (AC). Ada beberapa jenis inverter [5] yang dibagi berdasarkan kriterianya, antara lain adalah:

- Berdasarkan Jumlah fasanya: yaitu inverter satu-fasa dan banyak-fasa, misalnya tiga-fasa yang selama ini merupakan jenis inverter yang digunakan untuk menginterkoneksi keluarannya ke jala-jala sistem tenaga listrik (*grid*).

- b. Berdasarkan sumber masukan DC-nya: yaitu Inverter sumber tegangan (VSI – *Voltage Source Inverter*), dan Inverter sumber arus (CSI – *Current Source Inverter*).
- c. Berdasarkan metode bentuk sinyal pengaturannya: yaitu gelombang persegi, *pulse amplitudo modulation* (PAM) dan *pulse width modulation* (PWM).
- d. Berdasarkan bentuk gelombang keluarannya: yaitu gelombang persegi, persegi berundak dan sinusoidal.

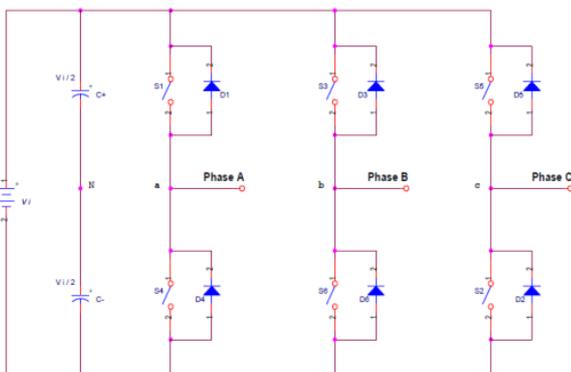
Pemakaian peralatan tersebut dipilih didasarkan pada jenis penerapannya. Inverter biasanya memakai sinyal kontrol modulasi lebar pulsa (PWM) untuk menghasilkan tegangan keluaran bolak-balik. Sebuah Inverter dikategorikan sebagai jenis inverter sumber tegangan (*Voltage fed Inverter*) jika masukannya berupa sumber tegangan, dan dikategorikan sebagai inverter sumber arus (*Current Fed Inverter*) jika sumber dayanya berupa sumber arus. Jika tegangan masukannya merupakan tegangan yang bisa diatur, maka inverter ini bisa disebut *variable dc linked inverter* [4].

B. Komponen Utama Inverter

Untuk merakit sebuah inverter, dibutuhkan semikonduktor daya sebagai komponen *switch*-nya. *Power switch* yang umum digunakan adalah power MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*) dan IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Power MOSFET dapat beroperasi pada frekuensi yang lebih tinggi (kHz), namun terbatas pada daya 1000V, 50A. IGBT merupakan transistor daya yang digunakan saat kebutuhan tegangan meningkat dan juga menawarkan kecepatan yang lebih baik daripada BJT, tetapi tidak secepat kekuatan MOSFET. Untuk frekuensi switching yang lebih tinggi MOSFET lebih unggul daripada IGBT tetapi untuk operasi switching yang lebih tinggi, maka IGBT layak digunakan, karena konversi peralihannya yang lembut. Oleh karena itu, sesuai dengan kebutuhan, IGBT kami pilih untuk merancang inverter [6].

C. Inverter 3-Fasa

Pada umumnya inverter 3 fasa bekerja dengan prinsip switched mode yang rangkaian dasarnya seperti terlihat pada Gambar 1. Saklar-saklar pada Gambar tersebut bekerja sedemikian rupa, sehingga bentuk tegangan keluaran (A, B, & C) dan membentuk tegangan 3 fasa [8], [9].



Gambar 1. Skematika rangkaian Inverter 3-fasa.

Setiap transistor akan aktif (berkonduksi) selama interval 180° terhadap siklus gelombang, dengan masing-masing keluaran dari setiap kakinya dibuat berbeda 120°, artinya terdapat tiga buah fasa dari tegangan yang masing-masing berbeda 120°. Pergeseran fasa ini dihasilkan dari urutan pengaktifan transistor, yaitu pada suatu interval yang teratur sebesar 60°. Pengaktifan transistor tersebut berlangsung secara terus-menerus dan berurutan untuk menyelesaikan satu siklus dari gelombang tegangan keluaran. Urutan dari pengaktifan transistor tersebut adalah S1, S2, S3, S4, S5, dan S6.

Proses konversi tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik tiga fasa adalah sebagai berikut. Pada saat setengah siklus positif dari tegangan suplai, transistor S1, S3 dan S5 akan aktif, sedangkan untuk setengah siklus negatif dari tegangan suplai, transistor S2, S4 dan S6 akan aktif. Untuk model inverter 3-fasa VSI, Tabel I berikut memperlihatkan urutan penyalan saklar daya kondisi tegangan fasa-ke-fasa.

Tabel 1. Mode Saklar Inverter 3 fasa [8].

Switch State	State No.	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}
S1, S2, S6 ON, yg lain OFF	1	v _i	0	-v _i
S2, S3, S1 ON, yg lain OFF	2	0	v _i	-v _i
S3, S4, S2 ON, yg lain OFF	3	-v _i	v _i	0
S4, S5, S3 ON, yg lain OFF	4	-v _i	0	v _i
S5, S6, S4 ON, yg lain OFF	5	0	-v _i	v _i
S6, S1, S5 ON, yg lain OFF	6	v _i	-v _i	0

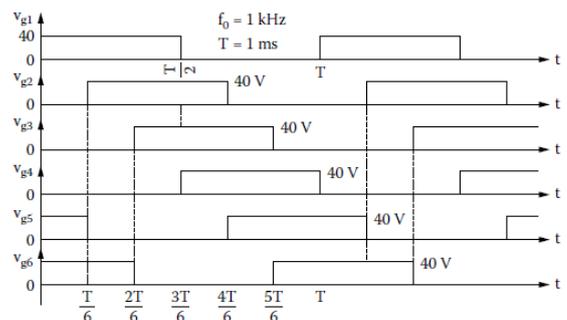
Tegangan antar fasa dari keluaran inverter adalah perbedaan tegangan antara kaki-kaki dari inverter yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \quad (1.a)$$

$$V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \quad (1.b)$$

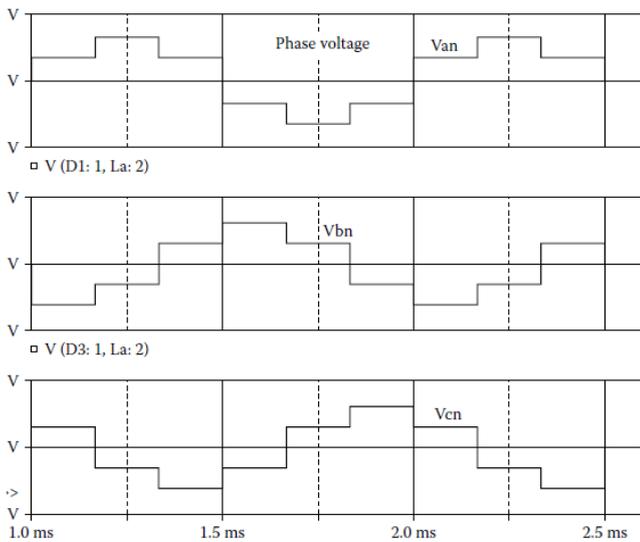
$$V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \quad (1.c)$$

Bentuk gelombang yang masuk pada masing-masing gate (g1, g2, g3, g4, g5, dan g6) dari transistor dan tegangan keluaran antar fasa dari inveter terlihat pada Gambar 2 [8]. [10].



Gambar 2. Tegang masukan gate [10].

Sedangkan bentuk gelombang tegangan keluaran masing-masing fasa dari inverter adalah seperti terlihat pada Gambar 1 [6], [10].



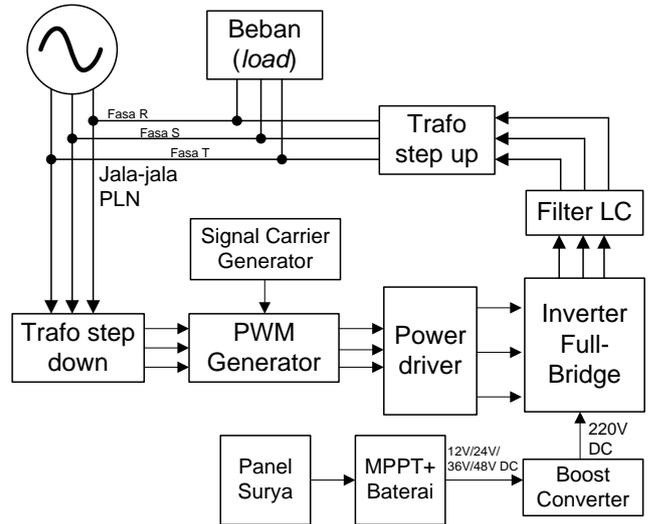
Gambar 1 Tegangan Fasa Keluaran Inverter [10].

Teknik yang disebutkan di atas merupakan teknik umum [10] yang tidak dipaparkan lebih jauh dan digunakan pada paper ini. Ada beberapa cara teknik kendali yang digunakan agar inverter mampu menghasilkan sinyal sinusoidal murni, cara yang paling umum digunakan adalah dengan modulasi lebar pulsa (PWM). Sinyal kontrol penyaklaran diperoleh dengan cara membandingkan sinyal referensi (*sinusoidal*) dengan sinyal pembawa (*carrier*) yang umumnya berbentuk gelombang sinyal segitiga. Dengan cara ini frekuensi dan tegangan fundamental mempunyai frekuensi yang sama dengan sinyal referensi sinusoidal [11], [12], [13]. Teknik ini kemudian digunakan dalam paper ini untuk membangkitkan keluaran inverter 3-fasa.

IV. PEMODELAN DAN SIMULASI SPICE

Untuk menghasilkan kualitas keluaran konverter yang baik yaitu tegangan keluaran terkendali dan kokoh terhadap gangguan maka dikembangkan berbagai metode dalam teknik kendali. Dalam perancangan ini yang menjadi frekuensi referensi adalah frekuensi yang ada pada jala-jala PLN sehingga akan di buat suatu sistem yang akan menyatukan phasa dari PLN dan output dari inverter agar Sama. Phasa dari PLN akan di ubah bentuk menjadi PWM yang akan menjadi input PWM kontrol untuk mengatur Power Switch sehingga di peroleh output keluaran yang baik dan selanjutnya akan di filter agar di peroleh output keluaran berupa sinyal sinusoidal 3 fasa dengan frekuensi dan fasa yang sama dengan jala-jala PLN seperti terlihat pada pada Gambar 5.

Pada hasil penelitian kami ini, keluaran inverter belum dimodelkan terinterkoneksi dengan jala-jala PLN, termasuk menghubungkan beban dengan jala-jala tersebut.



Gambar 5. Diagram kotak sistem.

Ada dua mode simulasi yang dilakukan yaitu :

- Simulasi inveter tiga fasa tanpa filter
- Simulasi inveter dengan filter.

Pada simulasi inveter tiga fasa tanpa filter digunakan parameter-parameter seperti terlihat dalam Tabel 1.

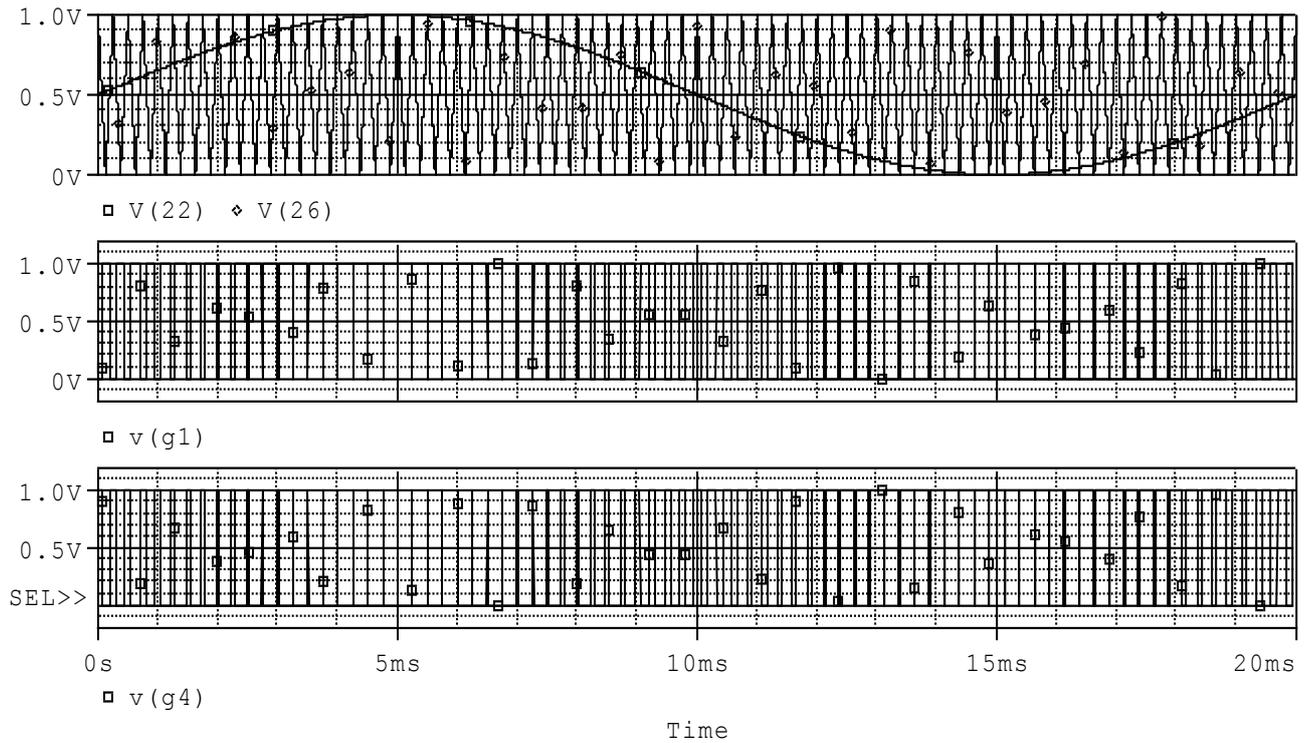
Tabel 1. Parameter simulasi.

Nama Parameter	Status
V input	220 volt DC
V jala-jala (grid)	380 volt AC
Ra, Rb, Rc (beban Rload)	50 ohm
La, Lb, Lc (beban Lload)	5 mH
Switch	IGBT

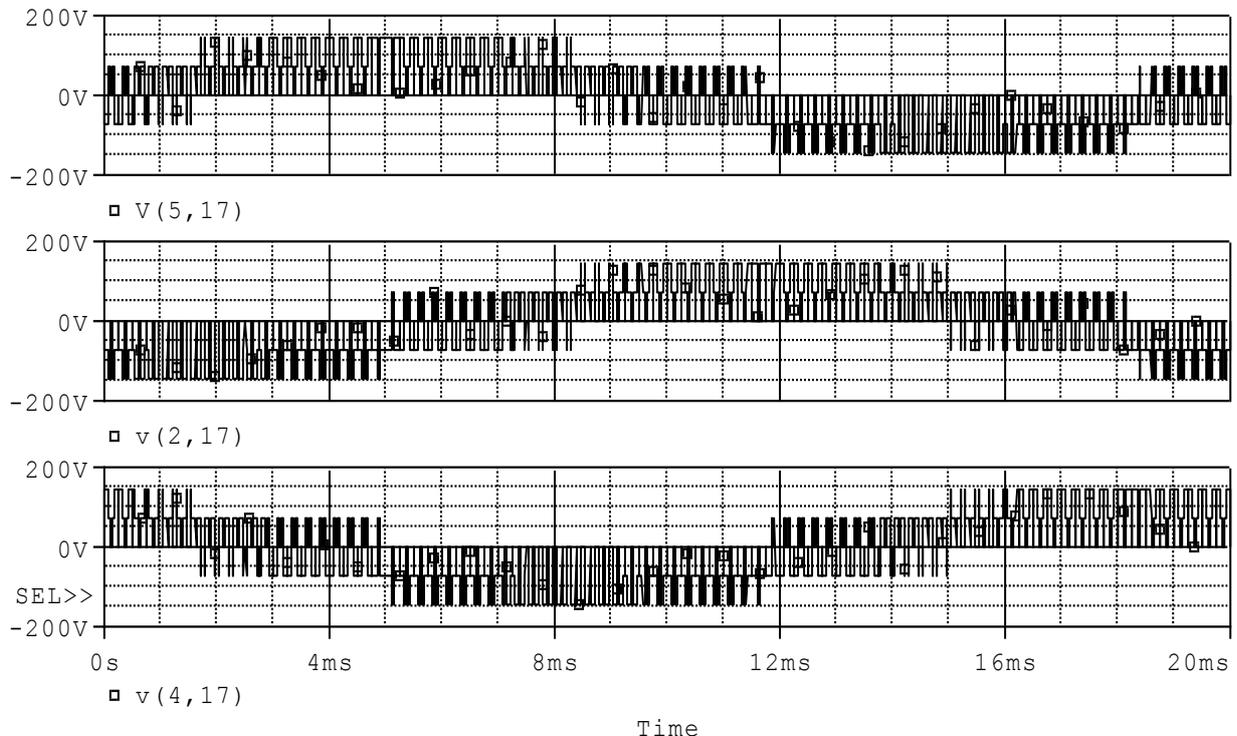
A. Simulasi Tanpa Filter

Error! Reference source not found. 7 merupakan hasil simulasi dari rangkaian inverter tanpa filter dimana gambar plot pada baris pertama menggambarkan input sinusoidal dari jala-jala PLN tiga fasa. Gambar Plot pada baris kedua menggambarkan hasil keluaran dari inverter tanpa filter untuk fasa A. Gambar Plot baris ketiga untuk fasa B dan untuk yang ke empat merupakan fasa C dari output inverter. Hasil simulasi memperlihatkan output keluaran mengikuti fasa input dari PLN tiap fase keluaran dari inveter.

Hasil simulasi dari rangkaian inverter dengan menggunakan filter dapat dilihat pada Gambar 8. Dalam simulasi digunakan filter LC dengan nilai komponen L sebesar 5mH dan nilai C adalah 1 uF untuk masing-masing beban yang terhubung setiap fase ke ground. Hasil simulasi memperlihatkan pergeseran fasa sesuai dengan referensi input dari jala-jala PLN tetapi terdapat beberapa ketidak stabilan pada tegangan dengan penurunan tegangan input dari 50 volt tegangan input DC menjadi kurang lebih 30 volt tegangan output AC pada keluaran inveter yang telah di beri filter LC.



Gambar 6. Sinyal PWM yang dibangkitkan untuk gate 1 dan gate 4.

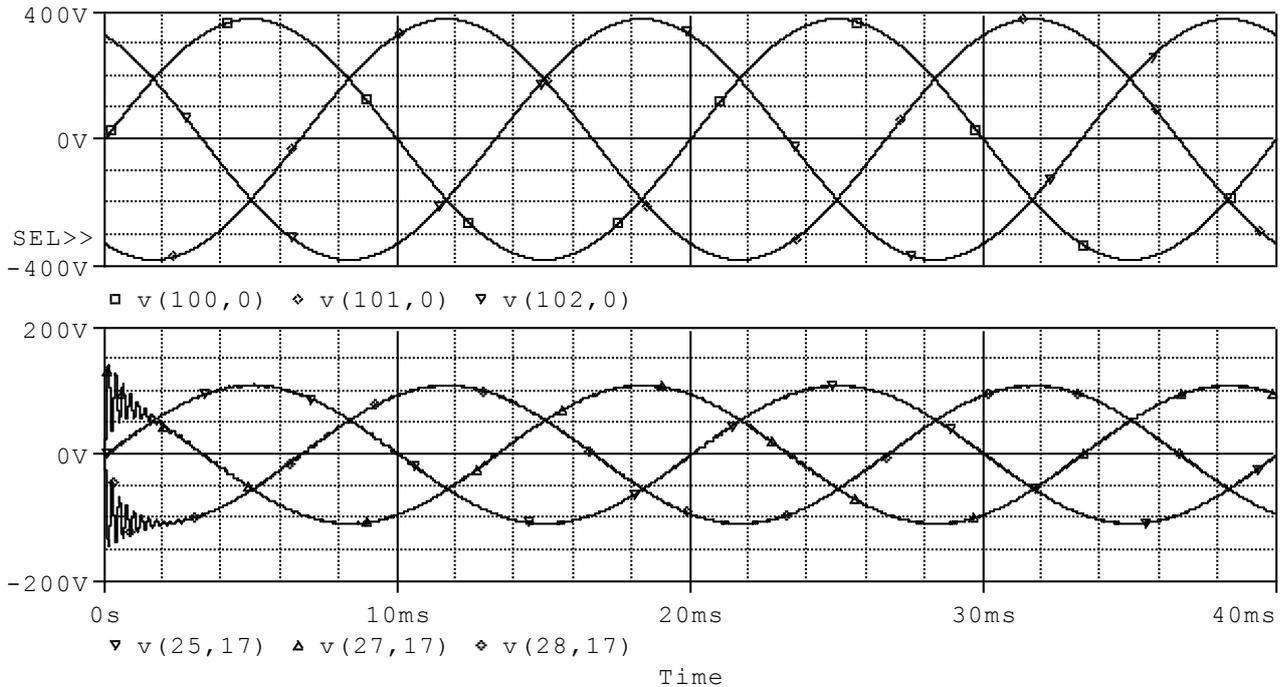


Gambar 7. Tegangan keluaran masing-masing untuk fasa R, S, dan T tanpa filter pasif.

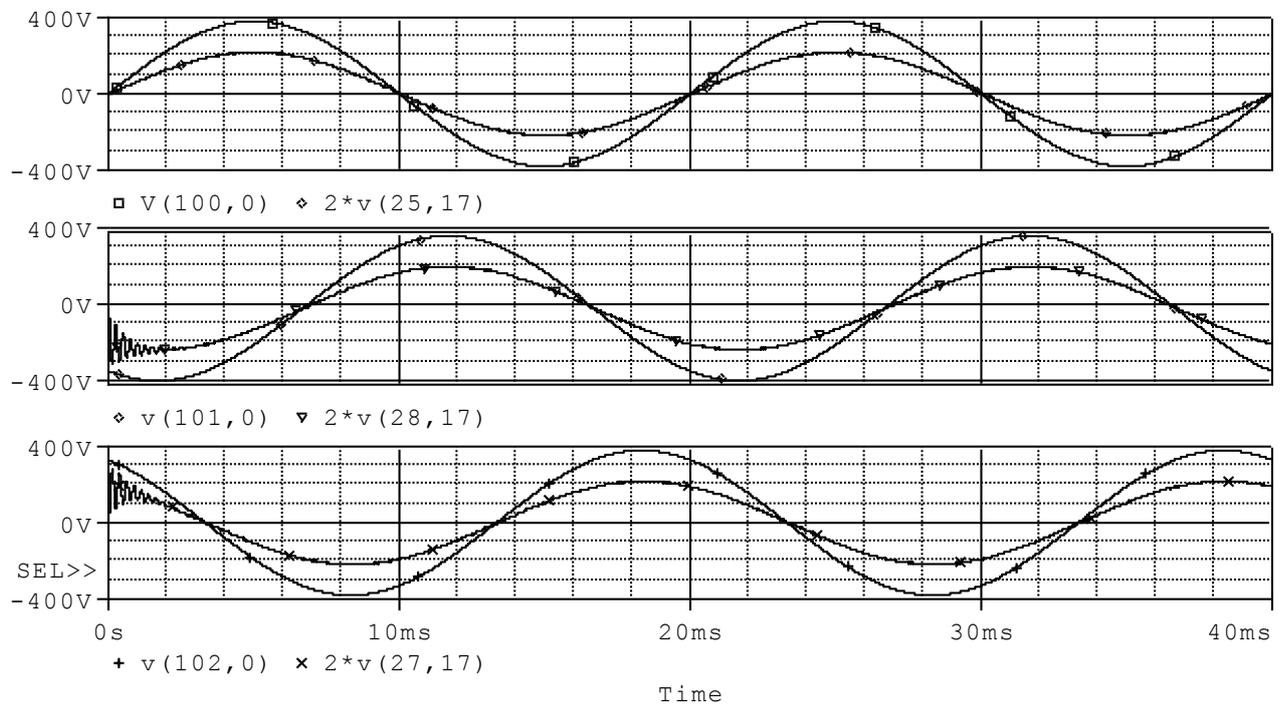
B. Simulasi dengan menggunakan Filter

Pada bagian ini kami akan memaparkan hasil simulasi rangkaian dengan menambahkan filter LC ke dalam rangkaian. Filter yang digunakan adalah filter jenis LC. Komponen L

ditambahkan pada tiap-tiap terminal fasa keluaran untuk mengoreksi nilai induktif pada beban RL yang sudah terpasang sebelumnya. Komponen kapasitor digunakan untuk memfilter riak yang dihasilkan dari tegangan keluaran.



Gambar 8. Tegangan keluaran masing-masing untuk fasa R, S, dan T dengan menggunakan filter pasif LC.



Gambar 9. Perbandingan tegangan jala-jala (grid) dengan tegangan keluaran inverter untuk setiap fasa R, S, dan T dengan menggunakan filter pasif LC.

Gambar 8 memperlihatkan hasil simulasi rangkaian dengan menggunakan filter LC. Gambar baris atas memperlihatkan tegangan untuk setiap 3 fasa dari jala-jala (grid). Pada bagian bawah, terlihat tegangan keluaran inverter untuk masing-masing ketiga fasanya. Pada saat awal, nampak terlihat kondisi peralihan tegangan keluaran yang berlangsung kira-kira 2 millidetik.

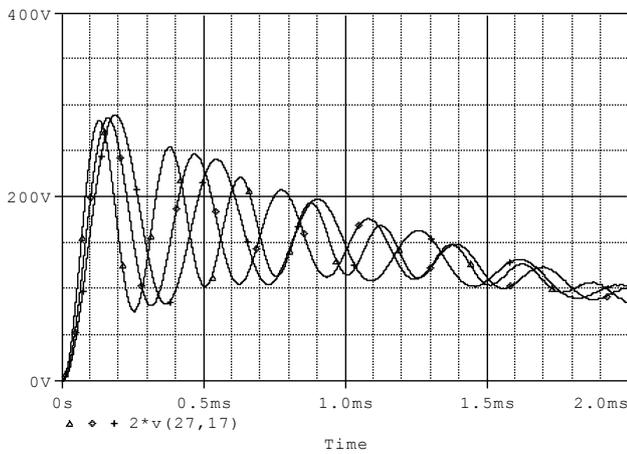
Gambar 9 memperlihatkan grafik perbandingan langsung antara tegangan jala-jala dengan keluaran inverter untuk setiap fasanya. Nampak terlihat bahwa tegangan keluaran inverter mengalami degradasi sehingga keluarannya hanya berkisar lebih besar sedikit dari 100V. Grafik keluaran inverter pada Gambar 9 diperbesar dua kali untuk melihat lebih jelas perbedaan fasa antara kedua tegangan tadi. Keluaran inverter

dapat diperbesar dengan menggunakan misalnya trafo penaik tegangan.

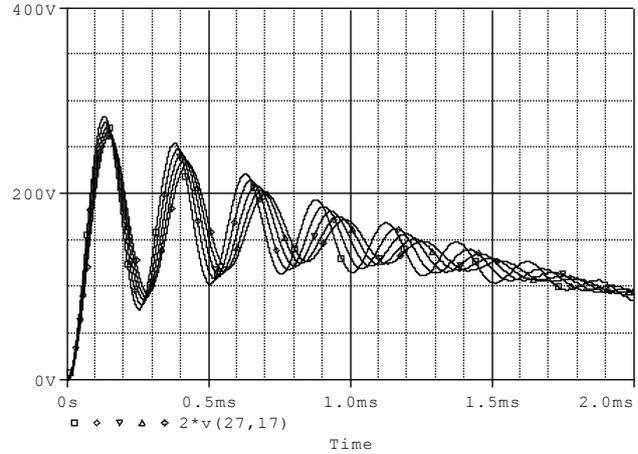
C. Simulasi dengan Variasi nilai Kapasitansi dan Induktansi Filter LC

Gambar 10 memperlihatkan grafik peralihan tegangan keluaran dari salah satu fasa tegangan keluaran inverter untuk selang waktu pengamatan selama 2 millidetik. Pengamatan

dalam rentang waktu hingga 20 millidetik (tidak terlihat dalam Gambar) menunjukkan bahwa tegangan keluaran tidak menunjukkan perubahan magnitudo yang cukup berarti. Pada perubahan nilai kapasitansi, simulasi dilakukan dengan mengubah nilai C dari 1 μ F hingga 2 μ F. Pada perubahan nilai induktansi, simulasi dilakukan dengan mengubah nilai L dari 2.2mH hingga 3.0mH.

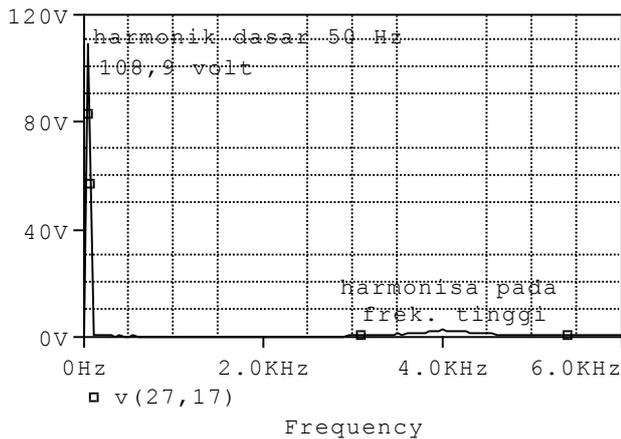


(a)



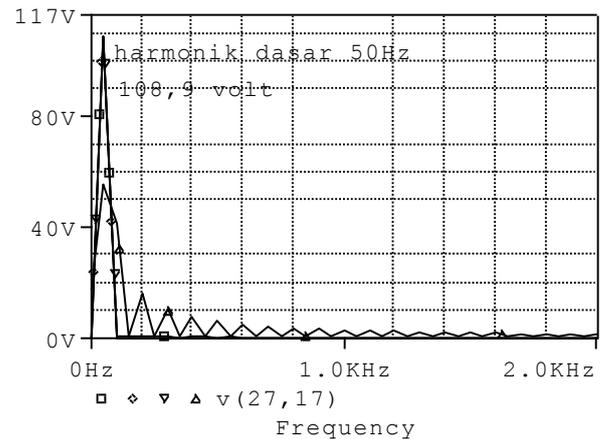
(b)

Gambar 10. Hasil simulasi tegangan keluaran salah satu fasa tegangan dengan mengubah nilai kapasitansi filter (a), dan mengubah nilai induktansi (b).



Gambar 11. Pengukuran harmonisa

tersebut beberapa harmonisa dengan magntiudo yang sangat kecil atau tidak begitu signifikan.



Gambar 12. Simulasi Pengukuran harmonisa dengan beban nilai bebab resistif yang diubah dari 50 s.d. 200 Ohm.

D. Pengukuran Harmonisa

Hasil analisis harmonisa dari salah satu tegangan keluaran fasa inverter menunjukkan bahwa tegangan keluaran memiliki harmonisa yang cukup baik dengan THD (*total harmonic distorsion*) sebesar 0,133% pada frekuensi dasar 50Hz dengan sejumlah 40 nilai frekuensi harmonisa.

Gambar 11 memperlihatkan grafik spektrum harmonisa untuk keluaran pada salah satu fasa tegangan inverter. Pada frekuensi tinggi yaitu pada kisaran frekuensi 4.0KHz, melebar sekitar 1kHz ke kiri dan ke kanan, terlihat dalam grafik

Gambar 12 menampilkan hasil simulasi pengukuran harmonisa dimana nilai resistif (R_{load}) beban diubah dari 50, 100, 150 dan 200Ohm. Nampak terlihat bahwa harmonisa pada frekuensi rendah menjadi signifikan ketika beban R_{load} menjadi 200Ohm. THD keluaran inverter juga meningkat menjadi 4.36% pada beban R_{load} 200Ohm tersebut.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa sebuah inverter dapat dibentuk dengan menggunakan komponen aktif berupa Power MOSFET atau IGBT, dan komponen pasif. Kemudian, dengan membangkitkan sinyal kontrol PWM secara simultan, yang dapat dibangkitkan menggunakan mikrokontroler, *digital signal processor* (DSP), atau piranti digital lainnya seperti *programmable logic devices*, maka keluaran inverter yang berbentuk sinyal sinusoidal murni dapat diperoleh dengan menambahkan filter pasif jenis LC pada tiap-tiap fasa keluaran dari inverter tersebut.

Pengukuran harmonisa menunjukkan bahwa THD tegangan keluaran inverter adalah berkisar 0,133% pada pengukuran 40 nilai frekuensi harmonisa, yang merupakan nilai yang dapat diterima. Harmonisa pada kisaran frekuensi 3kHz hingga 5kHz muncul dalam pengamatan, dengan nilai puncak pada frekuensi 4kHz dengan besaran yang tidak begitu signifikan. Penggunaan filter khusus untuk menapis harmonisa-harmonisa tersebut dapat dilakukan lebih jauh, agar diperoleh tegangan keluaran inverter yang lebih berkualitas.

Pada simulasi ini digunakan tegangan referensi dari jala-jala PLN sebesar 380 volt yang digunakan untuk mengatur sinyal PWM sedemikian hingga diperoleh fasa yang sama antara keluaran inverter dengan jala-jala PLN. Tegangan keluaran inverter mengalami penurunan, yang pada dasarnya dapat dinaikkan kembali menggunakan trafo penaik tegangan, hingga mampu mencapai 380V, sehingga tegangan keluaran inverter tersebut dapat diinterkoneksi ke jala-jala (grid) PLN.

Hasil penelitian yang kami paparkan dalam paper ini juga belum sampai pada tahap menginterkoneksi keluaran inverter dengan jala-jala PLN. Hasil kajian terhadap pengaruh interkoneksi tersebut, termasuk pengaruh perubahan beban interkoneksi dan aliran daya akan kami bahas sebagai hasil penelitian lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Lontoh, K. Clarke dan C. Beaton, "Tinjauan Subsidi Energi di Indonesia," *International Institute for Sustainable Development*, Maret 2014.
- [2] R. Karliutama dan L. H. Pratomo, "Paralel Dua Inverter Sumber Tegangan Berbasis Mikrokontroler ATmega 8535," dalam *Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering*, Semarang, 2013.
- [3] M. A. Latif, M. Alam, M. Rashid, A. Karim, N. Ramly dan I. Daut, "Microcontroller Based PWM Inverter for Speed Control of a Three Phase Induction Motor," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, p. 624, 2013.
- [4] S. S. Kumari dan A. Srinivasulu, "Modelling and Simulation of Novel Three Phase Inverter for Grid Connected System Using PV Source," *International Journal of Power System Operation and Energy Management*, vol. 4, no. 1, p. 31, 2013.
- [5] A. Aurasopon dan W. Khamsen, "Improvement of Input Power Factor in PWM AC Chopper by Selecting the Optimal Parameter," Mahasarakham University, Thailand.
- [6] N. I. Raju, M. S. Islam dan A. A. Uddin, "Sinusoidal PWM Signal Generation Technique for Three Phase Voltage Source Inverter with Analog Circuit & Simualtion of PWM Inveter for Standalone Load & Micro-Grid System," *International Journal of Renewable Enrgy Research*, vol. 3, no. 3.
- [7] O. Ursaru, M. Lucanu, C. Aghion dan L. Tigaeru, "Three-Phase AC Chopper Wlth IGBT," *International Conference on Development And Applications Systems*, 2004.
- [8] M. A. Hamid dan T. L. Wibowo, "Pengehematan Eneregi Pada Penggunaan Inverter Sebagai Pengendali Kecepatan Motor Induksi," *Jurnal Elektro*, vol. 1, no. 1, 2010.
- [9] J. Faiz dan G. Shangholian, "Modeling And Simulation of A Three-Phase Inverter With Rectifier-Type Non Linear Loads," *Armenian Journal of Physics*, vol. 2, no. 4, pp. 307-316, 2009.
- [10] M. H. Rashid dan H. M. Rashid, *Spice For Power Electronics And Electric Power*, USA: University of Florida, 2006.
- [11] T. Sutikno, B. Sutopo dan T. S. Widodo, "Pembangkit Sinyal PWM Sinusoida Dua Fasa Berbasis FPGA," Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2013.
- [12] R. A. Sagar dan B. V. Reddy, "Comparative Analysis of SPWM and APWM Techniques for Three Phase AC Chopper," *International Journal of Emerging trends in Engineering and Development*, vol. 4, no. 2, p. 230, 2012.
- [13] A. N. Kadam, "Simulation And Implementation of Multilevel Inverter Based Induction Motor Driver Based on PWM Techniques," *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, vol. 2, no. 1, p. 67, 2014.