KARAKTERISTIK PENINGKATAN PENGUATAN TEGANGAN INVERTER PWM NATURAL SAMPLED SATU-FASA

I M. W. Kastawan¹, M. R. Suradirja¹.

¹Departemen Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga Kotak Pos 1234, Bandung, Jawa Barat
e-mail: wiwit.kastawan@gmail.com, mrsuradirja@gmail.com

ABSTRAK

Tulisan ini membahas tentang karakteristik peningkatan penguatan (*gain*) tegangan untuk inverter satu-fasa setengah jembatan yang kendali penyalakannya menggunakan teknik PWM natural sampled. Karakteristik gain tegangan inverter ini diperoleh dengan cara mengatur indeks modulasi yang merupakan perbandingan antara amplitudo sinyal referensi sinusoidal dan amplitudo sinyal carrier segitiga dari teknik PWM natural sampled yang digunakan. Hasil pengujian dan simulasi menunjukkan bahwa secara umum gain tegangan inverter dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan indeks modulasi. Gain tegangan inverter meningkat secara linier seiring meningkatnya indeks modulasi dalam rentang 0 – 1. Namun untuk indeks modulasi lebih besar daripada satu, dimana inverter bekerja pada daerah overmodulasi, peningkatan gain tegangan tidak terjadi secara linier. Lebih jauh, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa secara umum peningkatan gain tegangan inverter akan diikuti oleh meningkatnya kandungan harmonisa arus keluaran. Khususnya saat inverter bekerja pada daerah overmodulasi, kandungan harmonisa arus keluarannya meningkat tajam.

Kata kunci: indeks modulasi, inverter satu-fasa, penguatan tegangan, teknik PWM natural sampled.

PENDAHULUAN

Inverter merupakan perangkat daya listrik yang memiliki fungsi dasar untuk mengonversi daya arus searah (dc, *direct current*) menjadi daya arus bolak-balik (ac, *alternating current*) melalui proses penyalakan terhadap saklar-saklar statis semikonduktornya. Umumnya proses penyalakan inverter ini dilakukan melalui teknik yang dikenal sebagai modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation*, disingkat PWM). Secara prinsip, teknik PWM merupakan suatu cara untuk membangkitkan deretan pulsa-pulsa yang akan digunakan untuk mengendalikan proses penyalakan (*ON-OFF*) saklar-saklar statis inverter [2], [3].

Di antara berbagai macam teknik PWM yang telah dikembangkan, teknik PWM natural sampled adalah yang cukup populer penggunaannya. Pada teknik PWM natural sampled ini, pulsa-pulsa penyalakan inverter diperoleh melalui perbandingan/perpotongan langsung dua buah sinyal yaitu sinyal referensi sinusoidal frekuensi rendah dengan sinyal carrier segitiga frekuensi tinggi. Magnitudo dan frekuensi tegangan keluaran serta frekuensi penyalakan

inverter dapat dikendalikan masing-masing melalui pengendalian lebar pulsa penyalakan dan frekuensi sinyal referensi serta frekuensi sinyal carrier [2], [6].

Pengendalian lebar pulsa penyalakan dapat dilakukan dengan mengatur amplitudo sinyal referensi sinusoidal. Semakin besar amplitudo sinyal referensi, semakin lebar pulsa-pulsa penyalakan yang dihasilkan dan semakin besar pula magnitudo tegangan keluaran inverter. Inverter disebut mengalami peningkatan *gain* tegangan. Amplitudo sinyal referensi dapat diatur nilainya dari nol sampai sama dengan atau lebih besar daripada amplitudo sinyal carrier. Apabila amplitudo sinyal referensi lebih besar daripada amplitudo sinyal carrier maka beberapa bagian sinyal carrier tidak akan berpotongan dengan sinyal referensi sehingga beberapa pulsa penyalakan yang dihasilkan merupakan pulsa penyalakan yang tak-termodulasi. Dalam kondisi ini inverter disebut bekerja pada daerah overmodulasi. Lebih lanjut, bila amplitudo sinyal referensi sangat besar sehingga tidak ada bagian sinyal carrier yang berpotongan dengan sinyal referensi kecuali pada titik nol (*zero crossing*) maka

akan dihasilkan pola penyaklaran sinyal persegi (*square wave*). Meskipun inverter yang dioperasikan pada daerah overmodulasi akan memiliki *gain* tegangan yang lebih besar daripada inverter yang dioperasikan pada daerah termodulasi namun kandungan harmonisa arus keluarannya akan lebih tinggi [2], [3].

Inverter ditinjau dari struktur dasarnya dapat digolongkan menjadi inverter satu-fasa setengah jembatan (*half bridge*) dan inverter satu-fasa jembatan penuh (*full bridge*). Inverter satu-fasa setengah jembatan menggunakan dua buah saklar statis untuk menghasilkan tegangan keluaran dengan dua level nilai yaitu positif dan negatif. Sementara itu, inverter satu-fasa jembatan penuh menggunakan empat buah saklar statis untuk menghasilkan tegangan keluaran dengan tiga level nilai yaitu positif, nol dan negatif. Jika ditinjau dari kandungan harmonisa arus keluarannya, inverter yang memiliki tiga level nilai tegangan keluaran akan memiliki kualitas yang lebih baik. Namun, penggunaan saklar statis yang lebih banyak akan membuat kendali penyaklarannya menjadi lebih susah terlebih jika strukturnya dikembangkan lebih lanjut menjadi inverter multifasa atau multilevel [2], [7].

Dalam tulisan ini akan dibahas karakteristik peningkatan *gain* tegangan untuk inverter satu-fasa setengah jembatan yang penyaklarannya menggunakan teknik PWM *natural sampled*. Perubahan *gain* tegangan inverter diamati berdasarkan perubahan indeks modulasi (dengan mengatur amplitudo sinyal referensi) untuk daerah kerja linier/termodulasi serta daerah kerja overmodulasi. Selain itu diamati pula perubahan kandungan harmonisa arus keluaran inverter berdasarkan perubahan indeks modulasi tersebut. Selanjutnya, untuk memberikan uraian yang terstruktur dan sistematis maka setelah uraian dalam seksi pendahuluan ini akan diikuti oleh uraian singkat namun jelas mengenai inverter PWM *natural sampled* satu-fasa pada

seksi kedua, uraian tentang hasil pengujian dan simulasi inverter PWM *natural sampled* satu-fasa berikut pembahasannya pada seksi ketiga serta kesimpulan yang diberikan pada seksi keempat dari tulisan ini.

INVERTER PWM NATURAL SAMPLED SATU-FASA

Terdapat dua struktur dasar inverter yaitu inverter satu-fasa setengah jembatan dan inverter satu-fasa jembatan penuh. Inverter satu-fasa setengah jembatan memiliki struktur seperti ditunjukkan oleh Gambar II.1 (a).

Gambar 1. (a) Inverter satu-fasa setengah jembatan (b) Inverter tiga-fasa setengah jembatan [4], [5].

Inverter ini memiliki pola penyaklaran sebagai berikut:

- Jika saklar S_1 dalam kondisi ON dan saklar S_2 OFF maka inverter akan menghasilkan tegangan keluaran $V_{a0} = \frac{E_d}{2}$.
- Jika saklar S_1 dalam kondisi OFF dan saklar S_2 ON maka inverter akan menghasilkan tegangan keluaran $V_{a0} = -\frac{E_d}{2}$.

Jadi, inverter satu-fasa setengah jembatan hanya akan menghasilkan tegangan keluaran dengan dua level nilai yaitu $\frac{E_d}{2}$ dan $-\frac{E_d}{2}$. Struktur dasar inverter satu-fasa

setengah jembatan ini dapat dikembangkan lebih lanjut, misalnya menjadi inverter tiga-fasa setengah jembatan seperti ditunjukkan oleh Gambar 1 (b). Gambar 2 di bawah menampilkan ilustrasi gelombang tegangan keluaran inverter satu-fasa setengah jembatan untuk kondisi setengah periode ON dan setengah periode OFF, yang lazim dikenal sebagai gelombang tegangan keluaran persegi.

Gambar 2. Gelombang tegangan keluaran persegi inverter satu-fasa setengah jembatan .

Struktur dasar satu-fasa jembatan penuh memiliki dua buah lengan dengan empat buah saklar statis, dua saklar statis pada masing-masing lengan, seperti ditunjukkan oleh Gambar 3 (a). Pola penyaklarannya adalah sebagai berikut:

- Pada saat saklar S_1 dan S_4 ON sementara S_2 dan S_3 OFF maka inverter akan menghasilkan tegangan keluaran $V_{ab} = E_d$.
- Sebaliknya, pada saat saklar S_2 dan S_3 ON sementara S_1 dan S_4 OFF maka inverter akan menghasilkan tegangan keluaran $V_{ab} = -E_d$.
- Pada saat S_1 dan S_3 ON sementara S_2 dan S_4 OFF atau S_1 dan S_3 OFF sementara S_2 dan S_4 ON maka dihasilkan tegangan keluaran $V_{ab} = 0$.

Jadi, inverter satu-fasa jembatan penuh akan menghasilkan tiga level nilai tegangan keluaran yaitu $-E_d$, 0, dan E_d . Struktur dasar inverter satu-fasa jembatan penuh ini juga dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi inverter tiga-fasa jembatan penuh seperti ditunjukkan oleh Gambar 3 (b). Dapat dilihat bahwa inverter tiga-fasa jembatan penuh ini memiliki total dua belas saklar statis, dua kali lipat jumlah saklar statis inverter tiga-fasa setengah jembatan. Adapun Gambar 4 menampilkan

gelombang tegangan keluaran persegi dari inverter satu-fasa jembatan penuh ini.

(a)

(b)

Gambar 3. (a) Inverter satu-fasa jembatan penuh (b) Inverter tiga-fasa jembatan penuh [4], [5].

Gambar 4. Gelombang tegangan keluaran persegi inverter satu-fasa jembatan penuh.

Berdasarkan uraian di atas dapat dilihat bahwa masing-masing struktur inverter memiliki kelebihan dan kekurangan. Pada struktur inverter setengah jembatan, untuk memperoleh tegangan keluaran satu-fasa hanya dibutuhkan satu lengan dengan dua buah saklar statis saja. Akan tetapi struktur ini hanya mampu menghasilkan dua level nilai tegangan keluaran saja. Adapun pada struktur inverter jembatan penuh, untuk memperoleh tegangan keluaran satu-fasa dibutuhkan dua buah lengan dengan empat buah saklar statis. Namun tegangan keluaran yang dihasilkan memiliki tiga level nilai. Lebih lanjut, jika dilakukan perbandingan dari sisi penyaklarannya maka inverter jembatan penuh akan memerlukan rangkaian penyaklaran yang

lebih kompleks daripada inverter setengah jembatan. Terlebih untuk inverter jembatan penuh multifasa ataupun multilevel.

Gelombang tegangan keluaran persegi yang ditunjukkan oleh Gambar 2 dan Gambar 4 diperoleh dengan cara mengoperasikan saklar-saklar statis inverter ON dan OFF masing-masing sekali selama setengah periode. Gelombang tegangan keluaran yang dihasilkan dikenal sebagai gelombang yang tak-termodulasi. Secara prinsip, saklar statis inverter dapat dioperasikan ON dan OFF beberapa kali selama setengah periode pertama dan setengah periode berikutnya sehingga menghasilkan gelombang tegangan keluaran termodulasi seperti ditunjukkan oleh Gambar 5. Teknik yang lazim digunakan untuk menghasilkan tegangan keluaran inverter termodulasi ini dikenal sebagai teknik modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation*, disingkat PWM). Terdapat berbagai macam teknik PWM yang telah dikembangkan, salah satu diantaranya yang cukup populer adalah teknik PWM *natural sampled*.

Gambar 5. Gelombang tegangan keluaran termodulasi (a) inverter satu-fasa setengah jembatan (b) inverter satu-fasa jembatan penuh [4], [5].

Teknik PWM *natural sampled* pada dasarnya merupakan suatu cara untuk menghasilkan pulsa-pulsa penyaklaran inverter melalui perbandingan/perpotongan langsung dua

buah sinyal yang disebut sebagai sinyal referensi dan sinyal *carrier*. Umumnya sinyal *carrier* merupakan sinyal segitiga frekuensi tinggi sementara sinyal referensi merupakan sinyal sinusoidal frekuensi rendah, seperti ditunjukkan oleh Gambar 6. Frekuensi dari sinyal referensi sinusoidal yang digunakan akan menentukan frekuensi dasar/fundamental dari tegangan keluaran inverter sementara frekuensi dari sinyal *carrier* segitiga akan menentukan frekuensi penyaklaran inverter. Lebar dari pulsa-pulsa penyaklaran yang dihasilkan dapat diatur melalui pengaturan amplitudo sinyal referensi sinusoidal yang digunakan. Semakin besar amplitudo sinyal referensi akan menghasilkan pulsa penyaklaran yang semakin lebar. Perbandingan antara amplitudo sinyal referensi sinusoidal, A_{ref} , dengan amplitudo sinyal *carrier* segitiga, A_{car} , dikenal sebagai indeks modulasi yang disimbolkan dengan k dan dirumuskan oleh persamaan berikut ini:

$$k = \frac{A_{ref}}{A_{car}} \dots \dots \dots (1)$$

Gambar 6. Teknik PWM *Natural Sampled*

Dengan mengatur nilai amplitudo sinyal referensi dari nol hingga sama dengan amplitudo sinyal *carrier* akan diperoleh nilai indeks modulasi dari 0 (minimum) sampai dengan 1. Indeks modulasi dari 0 – 1 merupakan daerah kerja linier dimana tegangan keluaran yang dihasilkan inverter

adalah berbanding lurus terhadap indeks modulasi. Jika amplitudo sinyal referensi lebih besar daripada amplitudo sinyal *carrier* maka indeks modulasi lebih besar daripada 1 dan inverter disebut bekerja pada daerah overmodulasi. Pada kondisi ini akan terdapat sinyal *carrier* yang tidak berpotongan dengan sinyal referensi atau dengan kata lain terdapat sinyal-sinyal yang tak-termodulasi sehingga hubungan antara tegangan keluaran inverter dan indeks modulasi tidak lagi bersifat linier. Jika amplitudo sinyal referensi jauh lebih besar dari amplitudo sinyal *carrier* sedemikian hingga tidak ada sinyal *carrier* berpotongan dengan sinyal referensi sinusoidal selain pada titik nol (*zero crossing*) maka hanya akan dihasilkan sebuah pulsa yang bernilai positif untuk setengah periode referensi pertama dan nol untuk setengah periode referensi berikutnya dan inverter bekerja pada pola penyaklaran sinyal persegi yang menghasilkan tegangan keluaran persegi/tak-termodulasi. Pada kondisi ini, tegangan keluaran inverter akan lebih besar daripada tegangan keluaran inverter saat bekerja pada daerah termodulasi atau overmodulasi. Tetapi pada kondisi ini inverter akan menghasilkan arus keluaran dengan kandungan harmonisa lebih tinggi.

Perangkat inverter sangat lazim dijumpai penggunaannya di sektor industri. Perangkat inverter ini diharapkan mampu untuk menghasilkan daya ac dengan tegangan keluaran yang memiliki magnitudo dan frekuensi konstan atau variabel sesuai kebutuhan. Upaya untuk mewujudkannya dapat dilakukan melalui dua cara yaitu menggunakan sumber dc variabel dengan *gain* konstan atau sebaliknya menggunakan sumber dc konstan dengan *gain* variabel. *Gain*

tegangan merupakan salah satu parameter penting inverter yang didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan keluaran fundamental (ac) terhadap tegangan masukan (dc) berdasarkan persamaan berikut ini [1]:

$$Gain = \frac{V_{1out(rms)}}{V_{in}} \dots\dots\dots(2)$$

Gain maksimum dapat diperoleh pada saat inverter bekerja dalam pola penyaklaran sinyal persegi yang menghasilkan tegangan keluaran persegi/tak-termodulasi.

HASIL PENGUJIAN, SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Untuk mengkaji karakteristik peningkatan *gain* tegangan inverter PWM *natural sampled* satu-fasa dengan struktur setengah jembatan maka dilakukan langkah pembuatan, pengujian dan simulasi inverter dimaksud. Seperti ditunjukkan oleh Gambar 7, inverter PWM *natural sampled* yang dibuat terdiri atas dua blok rangkaian utama yaitu blok rangkaian daya inverter setengah jembatan dan blok rangkaian PWM *natural sampled* yang akan menghasilkan pulsa-pulsa pengendali penyaklaran inverter. Inverter memperoleh tegangan masukan dc yang dihasilkan melalui proses penyearahan sumber ac sinusoidal dengan penyearah dioda satu-fasa gelombang penuh. Untuk menghasilkan pulsa-pulsa penyaklaran melalui teknik PWM *natural sampled* maka diperlukan masing-masing sebuah rangkaian pembangkit sinyal referensi sinusoidal dan rangkaian pembangkit sinyal *carrier* segitiga yang memiliki kemampuan untuk membangkitkan sinyal-sinyal yang amplitudo dan frekuensinya dapat diatur.

Gambar 7. Blok diagram inverter PWM *natural sampled* satu-fasa yang dibuat dan diuji.

Unit inverter PWM *natural sampled* satu-fasa ini selanjutnya diuji untuk memperoleh karakteristik peningkatan *gain* tegangannya. Pengujian dilakukan dengan cara mengubah amplitudo sinyal referensi untuk mengubah nilai indeks modulasi dan mengukur tegangan keluaran yang dibangkitkan inverter dengan alat ukur *Power Analyzer*. Selain itu, untuk memverifikasi hasil pengujian terhadap unit inverter PWM *natural sampled* satu-fasa yang telah dibuat maka dijalankan juga langkah simulasi dengan perangkat lunak PSIM yang telah sangat umum digunakan untuk mensimulasikan rangkaian-rangkaian listrik dan elektronika daya. Rangkaian simulasinya ditunjukkan oleh Gambar 8 di bawah, sementara nilai dari komponen-komponen rangkaian yang digunakan dalam simulasi ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Nilai-nilai komponen rangkaian yang digunakan dalam simulasi.

Parameter	Nilai
Sinyal <i>carrier</i>	$V_{pp} = 2 \text{ V}$; $f_{car} = 600 \text{ Hz}$
Sinyal referensi	$f_{ref} = 50 \text{ Hz}$
Suplai tegangan	$V_{dc} = 15,19 \text{ V}$

Gambar 8. Rangkaian simulasi inverter PWM *natural sampled* satu-fasa.

Grafik hasil pengujian dan simulasi pada Gambar 9 menunjukkan bahwa secara umum tegangan keluaran yang dibangkitkan inverter meningkat seiring dengan bertambah besarnya nilai indeks modulasi. Tegangan keluaran inverter meningkat secara linier dalam rentang indeks modulasi $0 \leq k \leq 1$, yaitu saat inverter bekerja pada daerah termodulasi. Setelah melampaui indeks modulasi satu ($k > 1$), dimana inverter bekerja pada daerah overmodulasi, tegangan keluaran inverter tetap mengalami peningkatan namun tidak berbanding lurus dengan peningkatan nilai indeks modulasi.

Berdasarkan pengukuran tegangan keluaran inverter dari langkah pengujian dan simulasi dapat juga diturunkan besarnya *gain* tegangan inverter sesuai persamaan (2) sebagaimana ditampilkan oleh Tabel 2. Dapat diduga bahwa nilai *gain* tegangan dalam tabel ini akan menunjukkan peningkatan yang terjadi secara linier dalam rentang indeks modulasi 0 – 1 serta peningkatan *gain* tegangan yang tidak linier untuk indeks modulasi lebih besar daripada 1 seperti ditunjukkan oleh Gambar 10 yang identik dengan Gambar 9.

Gambar 9. Tegangan keluaran inverter.

Tabel 2. *Gain* tegangan inverter PWM *natural sampled* satu-fasa.

Indeks modulasi (k)	Gain tegangan inverter	
	Pengujian	Simulasi
0.6	0.34	0.38
0.7	0.38	0.44
0.8	0.45	0.50
0.9	0.48	0.56
1	0.60	0.63
1.1	0.61	0.67
1.2	0.70	0.69
1.3	0.72	0.71
1.4	0.74	0.73
1.5	0.72	0.74
1.6	0.78	0.74
1.7	0.74	0.75
1.8	0.79	0.75
1.9	0.80	0.76
2	0.80	0.77

Gambar 10. Peningkatan *gain* tegangan inverter.

Lebih jauh, berdasarkan hasil pengukuran terhadap kandungan harmonisa arus keluaran inverter yang diperoleh melalui simulasi terlihat bahwa dalam rentang indeks modulasi 0 sampai dengan kurang lebih 0,7 harmonisa arus keluaran inverter akan semakin kecil jika indeks modulasinya semakin besar. Setelahnya kandungan harmonisa arus keluaran inverter akan semakin besar jika indeks modulasinya semakin besar. Dan untuk indeks lebih besar daripada 1, yaitu saat inverter bekerja pada daerah overmodulasi, kandungan harmonisa arus keluarannya akan bertambah dengan laju yang cukup besar atau meningkat dengan tajam. Karakteristik harmonisa arus keluaran ini ditunjukkan oleh Gambar 11 di bawah ini.

Gambar 11. Harmonisa arus keluaran inverter

KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa peningkatan *gain* tegangan inverter untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dapat dilakukan dengan meningkatkan indeks modulasi teknik PWM *natural sampled* yang digunakan. *Gain* tegangan inverter meningkat secara linier untuk daerah kerja termodulasi ($0 \leq k \leq 1$). *Gain* tegangan yang lebih besar masih dapat diperoleh dengan mengoperasikan inverter pada daerah kerja overmodulasi ($k > 1$) akan tetapi peningkatan *gain* tegangan ini akan diikuti oleh tajamnya peningkatan kandungan harmonisa arus keluaran inverter. Dengan demikian, keinginan untuk memperoleh *gain* tegangan inverter PWM *natural sampled* satu-fasa yang lebih besar harus diiringi dengan pertimbangan meningkatnya kandungan harmonisa arus keluaran.

DAFTAR PUSTAKA

1. Boost, M. A., dan Ziogas, P. D. (1988): *State of The Art Carrier PWM Techniques: A Critical Evaluation*, IEEE Transactions on Industry Applications, 24 (2), 271 – 288.
2. Holmes, D. G., dan Lipo, T. A. (2003): *Pulse Width Modulation for Power Converters – Principles and Practice*, IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-Interscience.
3. Holtz, J. (1994): *Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion*, Proceedings of the IEEE, 82 (8), 1194 – 1214.
4. Patel, H. S., dan Hoft, R. G. (1973): *Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverter: Part I – Harmonic Elimination*, IEEE Transactions on Industry Applications, 1A-9 (3), 310 – 317.
5. Patel, H. S., dan Hoft, R. G. (1974): *Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverter: Part II – Voltage Control Techniques*, IEEE Transactions on Industry Applications, 1A-10 (5), 666 – 673.
6. Patel, M. A., Patel, A. R., Vyas, D. R., dan Patel, K. M. (2009): *Use of PWM Techniques for Power Quality Improvement*, International Journal of Recent Trends in Engineering, 1 (4), 99 – 102.
7. Pattnaik, B. S., Dash, D. K., Mukherjee, J. (2008): *Implementation of PWM Based Firing Scheme for Multilevel Inverter Using Microcontroller*, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India.