TEKNIK NATURAL SAMPLING PWM INVERTER TIGA-LEVEL

I Made Wiwit Kastawan

Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung

wiwit.kastawan@gmail.com

Abstrak

Tulisan ini menampilkan bahasan tentang teknik *natural sampling* PWM untuk inverter *diode clamped* tiga-level tiga-fasa. Teknik *natural sampling* PWM dengan komposisi sinyal *carrier* berbeda yaitu disposisi sinyal *carrier* (*level-shifted*) dan disposisi sinyal *carrier* dengan pergeseran fasa (*phase-shifted*) masing-masing untuk sinyal referensi sinusoidal dan sinyal referensi sinusoidal yang diinjeksi dengan gelombang harmonisa ketiga dibahas dan dilihat pengaruhnya terhadap unjuk kerja inverter *diode clamped* tiga-level tiga-fasa ditinjau dari sisi harmonisa gelombang/riak arus keluarannya melalui simulasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa teknik *natural sampling* PWM *level-shifted* menghasilkan unjuk kerja inverter yang lebih baik jika dibandingkan dengan teknik *natural sampling* PWM *phase-shifted*.

Kata kunci: inverter *diode clamped* tiga-level tiga-fasa, teknik *natural sampling* PWM, sinyal referensi sinusoidal, injeksi gelombang harmonisa ketiga, *level-shifted* sinyal *carrier*, *phase shifted* sinyal *carrier*.

PENDAHULUAN

Teknik *natural sampling* PWM merupakan suatu cara untuk membangkitkan deretan pulsa-pulsa penyaklaran inverter dengan membandingkan dua buah sinyal yaitu sinyal referensi berfrekuensi rendah dan sinyal *carrier* berfrekuensi tinggi. Perpotongan antara sinyal referensi dan sinyal *carrier* ini akan menghasilkan deretan pulsa-pulsa yang memiliki frekuensi sama dengan frekuensi sinyal *carrier* dan memiliki lebar pulsa berbeda-beda yang masing-masing mempunyai nilai rata-rata sepanjang satu periode sinyal *carrier* mengikuti nilai sinyal referensi, yang pada umumnya merupakan sinyal sinusoidal. Deretan pulsa-pulsa inilah yang selanjutnya digunakan untuk mengatur operasi *ON-OFF* (operasi penyaklaran) saklar-saklar statis inverter sedemikian hingga sumber tegangan dc pada sisi masukan inverter akan terpotong-potong mengikuti pola *ON-OFF* pulsa-pulsa yang dikenakan dan membangkitkan tegangan keluaran yang juga berbentuk gelombang persegi terpotong-potong dengan nilai rata-rata selama satu periode penyaklaran yang mengikuti nilai gelombang tegangan sinusoidal yang diinginkan. Frekuensi penyaklaran inverter dengan demikian akan sama dengan frekuensi pulsa-pulsa yang dikenakan atau frekuensi sinyal *carrier* sementara frekuensi gelombang tegangan keluarannya akan sama dengan frekuensi sinyal referensi sinusoidal yang digunakan. Karena gelombang tegangan keluaran inverter memiliki bentuk gelombang persegi terpotong-potong (dikenal sebagai gelombang tegangan termodulasi) maka tegangan keluaran ini akan memiliki kandungan harmonisa cukup tinggi.

Selain itu, permasalahan lain yang muncul sebagai akibat penggunaan teknik *natural sampling* PWM ini meliputi pula pelemahan (atenuasi) terhadap magnituda gelombang tegangan fundamental yang dibangkitkan dan peningkatan drastis terhadap frekuensi penyaklaran inverter yang berkontribusi besar pada bertambahnya rugi-rugi konversi daya inverter, terkhusus pada aspek rugi-rugi penyaklaran.

Berbagai usaha dilakukan untuk mengurangi atau menghilangkan permasalahan yang diakibatkan oleh penggunaan teknik *natural sampling* PWM tersebut diatas. Sebagaimana penjelasan diatas, penggunaan teknik *natural sampling* PWM akan menghasilkan gelombang tegangan keluaran persegi terpotong-potong dengan frekuensi cukup tinggi bersesuaian dengan frekuensi penyaklaran inverter dan memiliki kandungan harmonisa cukup tinggi. Untuk inverter dengan struktur dua-level satu-fasa, harmonisa gelombang tegangan keluaran yang dibangkitkan akan tergeser ke nilai-nilai frekuensi tinggi yaitu ke frekuensi *carrier* kelipatan ganjil (disebut sebagai gelombang harmonisa *carrier*) serta ke frekuensi-frekuensi ganjil di sekitar frekuensi *carrier* dan kelipatannya (disebut gelombang harmonisa *sideband*). Sementara gelombang harmonisa frekuensi rendah, yaitu frekuensi yang lebih rendah dari frekuensi *carrier* (disebut gelombang harmonisa *baseband*), tidak akan muncul [Holmes, 2003]. Jika strukturnya adalah inverter dua-level tiga-fasa maka gelombang harmonisa frekuensi ganjil orde tiga dan kelipatannya dari masing-masing lengan fasa inverter akan saling meniadakan satu sama lain.

Lebih lanjut, teknik *natural sampling* PWM untuk inverter dua-level tiga-fasa ini dikembangkan menjadi teknik *natural sampling* PWM dengan injeksi harmonisa ketiga. Pada teknik ini digunakan sinyal referensi yaitu sinyal sinusoidal yang ditambah $\frac{1}{6}$ ($\pm 17\%$) gelombang harmonisa ketiga, alih-alih sinyal referensi sinusoidal semata. Dengan cara ini, penguatan inverter meningkat cukup signifikan sebesar 13,4%, mendekati satu. Selain itu, kandungan harmonisa gelombang tegangan keluarannya juga dapat dikurangi [Boost, 1988]. Kajian lebih jauh menunjukkan bahwa injeksi $\frac{1}{4}$ (25%) gelombang harmonisa ketiga merupakan sinyal injeksi optimum karena dapat meningkatkan penguatan inverter sebesar $\pm 12\%$ dan meminimumkan kandungan harmonisa pada gelombang tegangan/arus keluaran serta kandungan harmonisa pada gelombang tegangan masukan inverter jika faktor daya bebannya sama dengan satu [Dahono, 1995]. Metode injeksi harmonisa ketiga ini juga berlaku pada struktur inverter *diode clamped* tiga-level tiga-fasa (selanjutnya disebut inverter tiga-level). Injeksi $\pm 16\%$ harmonisa ketiga pada sinyal referensi sinusoidal dapat meningkatkan penguatan inverter sekitar 15% dan meminimumkan harmonisa gelombang tegangan/arus keluarannya [Wiwit, 2012]. Pengembangan teknik *natural sampling* PWM yang lain adalah teknik *natural sampling* PWM diskontinyu. Teknik ini berpegang pada ketentuan bahwa arus beban pada inverter dua-level tiga-fasa adalah semata-mata bergantung pada selisih tegangan dan nilai dari parameter-parameter beban yang terhubung diantara dua buah lengan fasa berbeda. Dengan demikian kita dapat memodifikasi sinyal referensi tiga-fasa yang digunakan agar pada suatu interval tertentu terdapat salah satu lengan fasa inverter yang tidak aktif (tidak mengalami proses penyaklaran atau tidak termodulasi) dengan mempertahankan selisih gelombang tegangan diantara dua lengan fasa yang lain tetap seperti semula. Karena terdapat lengan fasa inverter yang tidak aktif maka rugi-rugi penyaklarannya dapat dikurangi.

Dari pemaparan diatas tampak bahwa upaya pengembangan teknik *natural sampling* PWM pada umumnya dilakukan dengan memodifikasi sinyal referensi sementara sinyal *carrier* segitiganya relatif tetap. Teknik *natural sampling* PWM yang diaplikasikan pada struktur inverter tiga-level akan memerlukan dua buah sinyal *carrier* segitiga dan terkait dengan

bagaimana kedua buah sinyal *carrier* segitiga ini diposisikan akan terdapat dua metode *natural sampling* PWM yang berbeda yaitu disposisi sinyal *carrier* (dikenal sebagai *level-shifted*) dan disposisi sinyal *carrier* dengan pergeseran fasa (dikenal sebagai *phase-shifted*). Tulisan ini akan mencoba menampilkan bahasan tentang teknik *natural sampling* PWM *level-shifted* dan *phase-shifted* untuk inverter tiga-level dan membandingkan unjuk kerjanya (ditinjau dari harmonisa gelombang/riak arus keluaran yang dibangkitkan) baik untuk kondisi sinyal referensi sinusoidal ataupun sinusoidal yang diinjeksi dengan gelombang harmonisa ketiganya berdasarkan hasil simulasi.

INVERTER TIGA-LEVEL

Struktur dari sebuah inverter tiga-level ditunjukkan oleh Gambar 1. Tiga buah lengan inverter masing-masing dilabeli sebagai u , v , dan w , terhubung secara paralel satu sama lain untuk membentuk struktur lengan tiga-fasa. Setiap lengan fasa terbentuk dari hubungan seri empat buah saklar statis. Rel tegangan dc sumber inverter, V_d , dibagi menjadi dua buah tegangan yang sama besar, $E_d = \frac{1}{2}V_d$, oleh hubungan seri dua buah kapasitor, C_d , sebagai elemen pembagi tegangan. Dua buah dioda *clamping* D_{1x} dan D'_{1x} berfungsi untuk menghubungkan masing-masing titik hubungan seri dari dua buah saklar statis pada sisi atas (S_{x1} dan S_{x2} , dengan x menyatakan indeks lengan fasa inverter yaitu u , v , dan w) dan dua buah saklar statis pada sisi bawah (S_{x3} dan S_{x4}) dari setiap lengan fasa inverter dengan titik tengah di antara dua kapasitor pembagi tegangan ini, N (dikenal sebagai titik netral inverter). Dioda *clamping* akan mempertahankan atau menjaga agar stres tegangan yang dirasakan oleh setiap saklar statis senantiasa sama dengan tegangan kapasitor yaitu $E_d = \frac{1}{2}V_d$. Titik tengah diantara kedua buah kapasitor, N , merupakan titik acuan untuk tegangan keluaran setiap lengan fasa inverter yaitu v_{uN} , v_{vN} and v_{wN} .

Pola operasi saklar-saklar statis pada setiap lengan fasa inverter tiga-level ini dapat dijelaskan sebagai berikut (diambil lengan fasa u sebagai contoh):

1. Jika dua saklar pada lengan atas fasa u yaitu S_{u1} dan S_{u2} ON, dan dua saklar pada lengan bawahnya yaitu S_{u3} dan S_{u4} OFF, maka tegangan keluaran inverter v_{uN} akan bernilai E_d .

2. Jika dua buah saklar pada lengan bawah fasa u yaitu S_{u3} dan S_{u4} *ON* sementara dua saklar pada lengan atasnya yaitu S_{u1} dan S_{u2} *OFF* maka tegangan v_{uN} akan bernilai $-E_d$.
3. Jika saklar S_{u2} dan S_{u3} *ON*, sedangkan S_{u1} dan S_{u4} *OFF*, maka tegangan v_{uN} akan sama dengan 0.

Uraian pola operasi saklar-saklar statis inverter tiga-level tersebut di atas terangkum dalam Tabel 1 di bawah. Dengan mencermati pola penyalakannya terlihat bahwa pada saat inverter tiga-level bekerja akan terdapat dua buah saklar statis yang konduksi (*ON*) dan dua buah saklar yang padam (*OFF*). Lebih lanjut, terlihat pula bahwa saklar-saklar statis pada setiap lengan fasa inverter tiga-level saling berpasangan secara komplementer yaitu S_{x1} dan S_{x3} serta S_{x2} dan S_{x4} . Pola penyalakan inverter tiga-level inilah yang direalisasikan salah satunya melalui teknik *natural sampling* PWM.

Gambar 1. Inverter Tiga-Level

Tabel 1. Pola Penyalakan dan Tegangan Keluaran yang Dibangkitkan oleh Setiap Lengan Fasa Inverter Tiga-Level

	Kode saklar statis				Tegangan keluaran
	S_{u1}	S_{u2}	S_{u3}	S_{u4}	
Kondisi saklar statis	<i>ON</i>	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	E_d
	<i>OFF</i>	<i>ON</i>	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	0
	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>ON</i>	<i>ON</i>	$-E_d$

TEKNIK NATURAL SAMPLING PWM UNTUK INVERTER TIGA-LEVEL

Pada dasarnya teknik modulasi lebar pulsa (PWM), dalam hal ini termasuk teknik *natural sampling* PWM, merupakan cara untuk membangkitkan pulsa-pulsa yang kemudian digunakan untuk mengendalikan operasi *ON-*

OFF saklar-saklar statis (operasi penyalakan) inverter. Untuk teknik *natural sampling* PWM, rangkaian pulsa-pulsa penyalakan inverter tersebut diperoleh dengan cara membandingkan dua buah sinyal yaitu sinyal referensi sinusoidal dengan frekuensi, f_r , dan amplituda, A_r , dengan sinyal *carrier* segitiga yang memiliki frekuensi, f_c , dan amplituda, A_c . Pulsa-pulsa penyalakan inverter dihasilkan melalui perpotongan langsung antara sinyal referensi dan sinyal *carrier* dimana pada saat sinyal referensi bernilai lebih besar daripada sinyal *carrier* maka pulsa penyalakan bernilai positif dan bernilai nol untuk kondisi kebalikannya. Perbandingan antara amplitudo sinyal referensi, A_r , dan amplitudo sinyal *carrier*, A_c , disebut sebagai indeks modulasi k yaitu $k = \frac{A_r}{A_c}$. Pada saat A_r sama dengan A_c diperoleh nilai indeks modulasi maksimum yaitu $k_{maks} = 1$. Rentang antara indeks modulasi minimum ($k_{min} = 0$) dan indeks modulasi maksimum merupakan rentang besarnya keluaran yang dapat diatur oleh inverter. Dalam rentang ini, hubungan antara besarnya keluaran inverter dengan nilai indeks modulasi bersifat linier. Jika indeks modulasinya lebih besar daripada satu maka inverter berada pada daerah *over-modulation* dimana relasi antara keluaran inverter terhadap indeks modulasinya tidak lagi bersifat linier. Jika indeks modulasinya sangat besar sehingga sinyal referensi berpotongan dengan sinyal *carrier* pada titik *zero crossing* maka terbentuklah pola penyalakan sinyal persegi yang menghasilkan gelombang keluaran persegi (tak-termulasi). PWM inverter disebut bekerja pada daerah saturasi (jenuh) dimana nilai indeks modulasi tidak lagi mempengaruhi gelombang tegangan keluarannya.

Teknik *natural sampling* PWM untuk inverter dua-level tiga-fasa (disingkat inverter dua-level) akan menggunakan sinyal referensi berupa sinyal sinusoidal tiga-fasa (atau sinyal sinusoidal tiga-fasa yang diinjeksi dengan harmonisa ketiga) dan sebuah sinyal *carrier* segitiga. Sementara untuk inverter multilevel, digunakan teknik *natural sampling* PWM *multicarrier* yang merupakan pengembangan dari teknik *natural sampling* PWM inverter dua-level. Sebagai contoh, teknik *natural sampling* PWM untuk operasi penyalakan inverter tiga-level dalam Gambar 1 akan memerlukan dua buah sinyal *carrier* segitiga (V_{T1} dan V_{T2}) karena setiap lengan fasa inverter memiliki dua pasang saklar statis komplementer dimana setiap saat terdapat

masing-masing dua buah saklar statis yang *ON* dan *OFF*. Sinyal *carrier* V_{T1} memiliki level nilai positif (0 sampai dengan V_T) sementara sinyal *carrier* V_{T2} memiliki level nilai negatif (0 sampai dengan $-V_T$). Apabila tidak terdapat beda fasa diantara kedua sinyal *carrier* ini maka tekniknya dikenal sebagai teknik *natural sampling* PWM disposisi sinyal *carrier* atau *level-shifted* (lihat Gambar 2(a)). Sementara jika terdapat beda fasa diantara kedua sinyal *carrier* maka tekniknya dikenal sebagai teknik *natural sampling* PWM disposisi sinyal *carrier* dengan pergeseran fasa atau *phase-shifted* (lihat Gambar 2(b)). Adapun sinyal referensi, atau kerap diistilahkan pula sebagai sinyal modulasi, yang digunakan dapat merupakan sinyal sinusoidal tiga-fasa yaitu v_u , v_v , dan v_w atau sinyal sinusoidal tiga-fasa yang diinjeksi gelombang harmonisa ketiga dengan maksud untuk mengurangi kandungan harmonisa gelombang arus/riak arus keluaran inverter seperti dijelaskan sebelumnya.

(a)

(b)

Gambar 2. Sinyal referensi dan sinyal *carrier* untuk teknik *natural sampling* PWM inverter tiga-level (a) *level-shifted* dan (b) *phase-shifted* 180°.

Relasi antara sinyal referensi sinusoidal, v_r dengan r adalah fasa u , v , atau w , dan sinyal *carrier* segitiga, V_{T1} dan V_{T2} , untuk menghasilkan pola penyaklaran inverter tiga-level yang tercantum dalam Tabel 1 di atas adalah sebagai berikut:

1. Untuk kondisi $v_r > V_{T1}$ dan $v_r > V_{T2}$ akan dibangkitkan pulsa-pulsa penyaklaran untuk dua buah saklar statis teratas dari setiap lengan fasa inverter yaitu S_{x1} dan S_{x2} sehingga

keduanya akan *ON* sementara dua buah saklar statis terbawah sebagai pasangan komplementernya yaitu S_{x3} dan S_{x4} akan *OFF* dan tegangan keluaran yang dibangkitkan oleh setiap lengan fasa inverter relatif terhadap titik netralnya, v_{xN} , akan bernilai E_d .

2. Untuk kondisi $V_{T2} < v_r < V_{T1}$ akan dibangkitkan pulsa-pulsa penyaklaran untuk dua buah saklar statis yang berada di tengah-tengah setiap lengan fasa inverter yaitu S_{x2} dan S_{x3} sehingga keduanya akan *ON* sementara dua buah saklar statis teratas dan terbawah yaitu S_{x1} dan S_{x4} akan *OFF* dan tegangan keluaran yang dibangkitkan oleh setiap lengan fasa inverter relatif terhadap titik netralnya, v_{xN} , adalah sama dengan 0.
3. Untuk kondisi $v_r < V_{T1}$ dan $v_r < V_{T2}$ akan dibangkitkan pulsa-pulsa penyaklaran untuk dua buah saklar statis terbawah dari setiap lengan fasa inverter yaitu S_{x3} dan S_{x4} sehingga keduanya akan *ON* sementara dua saklar statis teratas yaitu S_{x1} dan S_{x2} akan *OFF* dan tegangan keluaran yang dibangkitkan oleh setiap lengan fasa inverter relatif terhadap titik netralnya, v_{xN} , akan bernilai $-E_d$.

Ilustrasi prinsip teknik *natural sampling* PWM untuk inverter tiga-level tersebut dalam poin 1 – 3 diatas dapat dilihat pada Gambar 3 di bawah ini.

Gambar 3. Perpotongan sinyal referensi dan sinyal *carrier* teknik *natural sampling* PWM *level-shifted* untuk inverter tiga-level dan profil tegangan keluaran yang dibangkitkan untuk lengan fasa u , v_{uN} .

RIAK ARUS KELUARAN INVERTER TIGA-LEVEL UNTUK BERBAGAI TEKNIK *NATURAL SAMPLING* PWM

Telah diuraikan dalam tiga bagian awal dari tulisan ini bahwa teknik *natural sampling* PWM untuk inverter tiga-level dapat dikembangkan menjadi beberapa metode yang berbeda ditinjau dari sinyal referensi ataupun sinyal *carrier* yang digunakan. Dari pengembangan teknik *natural sampling* PWM ini diharapkan agar masalah-

masalah yang muncul terkait penggunaannya untuk operasi penyaklaran inverter tiga-level dapat dikurangi/ditiadakan. Disini akan coba dikaji unjuk kerja inverter tiga-level yang dioperasikan melalui teknik *natural sampling* PWM *level-shifted* dan *phase-shifted* 180° yang masing-masing menggunakan sinyal referensi sinusoidal tiga-fasa dan sinusoidal tiga-fasa yang diinjeksi harmonisa ketiga. Kajiannya didasarkan pada hasil simulasi rangkaian inverter tiga-level dengan melihat aspek unjuk kerja di sisi riak arus keluaran yang dibangkitkan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak PSIM versi 6.0 yang telah sangat lazim digunakan. Hasil simulasi akan menunjukkan relasi antara nilai efektif riak arus keluaran inverter ($\tilde{I}_h$) dengan indeks modulasi, (k), untuk berbagai teknik *natural sampling* PWM yang berbeda tadi. Secara umum, rangkaian simulasi inverter tiga-level yang digunakan adalah seperti ditunjukkan oleh Gambar 4. Sementara rincian nilai dari parameter-parameter rangkaian yang digunakan dalam simulasi diberikan oleh Tabel 2. Dalam Tabel 2, yang dimaksud teknik *natural sampling* PWM 1 dan 2 masing-masing adalah teknik *natural sampling* PWM dengan sinyal *carrier level-shifted* yang menggunakan sinyal referensi sinusoidal dan sinusoidal yang diinjeksi dengan $1/6$ gelombang harmonisa ketiga. Penggunaan sinyal injeksi $1/6$ gelombang harmonisa ketiga pada teknik *natural sampling* PWM dengan sinyal *carrier level-shifted* ini didasarkan pada kajian sebelumnya [7] yang menunjukkan bahwa metode ini akan menghasilkan riak arus keluaran inverter minimum. Sementara teknik *natural sampling* PWM 3, 4 dan 5 masing-masing adalah teknik *natural sampling* PWM dengan sinyal *carrier phase-shifted* 180° yang menggunakan sinyal referensi sinusoidal, sinusoidal yang diinjeksi dengan $1/6$ gelombang harmonisa ketiga, dan sinusoidal yang diinjeksi dengan $1/4$ gelombang harmonisa ketiga. Untuk teknik *natural sampling* PWM dengan sinyal *carrier phase-shifted* 180° ini dilakukan juga kajian untuk sinyal injeksi $1/4$ dan $1/6$ gelombang harmonisa ketiga untuk melihat pengaruhnya terhadap riak arus keluaran inverter mengingat belum ada kajian metode mana yang akan menghasilkan riak arus keluaran minimum. Nilai parameter-parameter rangkaian yang lainnya adalah sama untuk semua teknik *natural sampling* PWM yang dikaji. Hasil-hasil yang

diperoleh dari simulasi dirangkum dalam Tabel 3.

Gambar 4. Rangkaian simulasi inverter tiga-level

Tabel 2. Nilai Parameter Rangkaian Inverter Tiga-Level Untuk Simulasi

Parameter	Teknik <i>natural sampling</i> PWM				
	1	2	3	4	5
Tegangan dc, E_d (V)	100	100	100	100	100
Resistansi beban per-fasa, R (Ω)	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
Induktansi beban per-fasa, L (mH)	5	5	5	5	5
Sinyal carrier	Segitiga <i>level-shifted</i>	Segitiga <i>level-shifted</i>	Segitiga <i>phase-shifted</i> 180°	Segitiga <i>phase-shifted</i> 180°	Segitiga <i>phase-shifted</i> 180°
Frekuensi f_s (Hz)	5000	5000	5000	5000	5000
Sinyal referensi	Sinusoidal	Sinusoidal injeksi $1/6$ harmonisa ke-3	Sinusoidal	Sinusoidal injeksi $1/6$ harmonisa ke-3	Sinusoidal injeksi $1/4$ harmonisa ke-3
Frekuensi, f_r (Hz)	50	50	50	50	50
Indeks modulasi, k	0 – 1	0 – 1	0 – 1	0 – 1	0 – 1

Tabel 3. Riak Arus Keluaran Inverter Tiga-Level Pada Berbagai Nilai Indeks Modulasi Berdasarkan Hasil Simulasi

No	Nilai indeks modulasi	Teknik <i>natural sampling</i> PWM				
		1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0	0
2	0,1	0,083	0,072	0,129	0,130	0,130
3	0,2	0,134	0,121	0,234	0,237	0,238
4	0,3	0,164	0,149	0,315	0,321	0,323
5	0,4	0,174	0,158	0,371	0,383	0,385
6	0,5	0,166	0,149	0,403	0,421	0,425
7	0,6	0,150	0,134	0,412	0,437	0,443
8	0,7	0,142	0,128	0,396	0,431	0,440
9	0,8	0,146	0,129	0,358	0,404	0,416
10	0,9	0,161	0,132	0,299	0,356	0,373
11	1	0,190	0,139	0,233	0,292	0,317

Lebih lanjut, Gambar 5 di bawah menampilkan grafik nilai efektif (rms, *root mean square*) riak arus keluaran inverter tiga-level sebagai fungsi dari indeks modulasi untuk kelima jenis teknik *natural sampling* PWM yang dikaji. Grafik dalam gambar ini merupakan pemetaan dari nilai-nilai yang tertera dalam Tabel 3. Dari Tabel 3 dan Gambar 5 dapat dilihat bahwa secara umum teknik *natural sampling* PWM *level-shifted* menghasilkan unjuk kerja inverter tiga-level yang lebih baik jika dibandingkan dengan teknik *natural sampling* PWM *phase shifted* 180° dipandang dari sisi riak arus keluaran yang dihasilkannya. Terlihat pula bahwa riak arus keluaran yang dibangkitkan oleh inverter tiga-level yang dioperasikan melalui teknik *natural sampling* PWM *level-shifted* ini memiliki pola tertentu. Untuk indeks modulasi 0 – 0,4 riak arus keluaran yang dibangkitkan akan semakin besar jika indeks modulasinya bertambah besar. Lalu, untuk indeks modulasi 0,4 – 0,7 riak arus keluaran inverter akan semakin kecil jika indeks modulasinya bertambah besar. Dan dalam rentang indeks modulasi 0,7 – 1 riak arus keluaran inverter kembali bertambah besar jika indeks modulanya semakin besar. Selain itu terlihat bahwa untuk teknik *natural sampling* PWM *level-shifted*, penginjeksian 1/6 gelombang harmonisa ketiga terhadap sinyal referensi sinusoidal tiga-fasa akan menghasilkan riak arus keluaran yang lebih rendah. Sementara itu penggunaan sinyal *carrier* segitiga yang digeser fasanya sebesar 180° dalam teknik *natural sampling* PWM ternyata menghasilkan riak arus keluaran inverter tiga-level yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan teknik *natural sampling* PWM *level-shifted*. Disamping

itu, relasi antara riak arus keluaran dan indeks modulanya juga berbeda dimana untuk indeks modulasi 0 – 0,6 riak arus keluaran inverter akan semakin besar jika indeks modulanya bertambah besar dan sebaliknya riak arus keluaran inverter akan semakin kecil jika indeks modulanya bertambah besar dalam interval indeks modulasi 0,6 – 1. Lebih jauh, penggunaan sinyal referensi sinusoidal yang diinjeksi dengan gelombang harmonisa ketiga, baik dengan amplitudo 1/6 ataupun 1/4, ternyata tidak berdampak baik terhadap riak arus keluaran yang dibangkitkan inverter. Alih-alih berkurang, riak arus keluaran yang dibangkitkan justru semakin bertambah besar.

Gambar 5. Riak arus keluaran inverter tiga-level pada berbagai macam teknik *natural sampling* PWM

KESIMPULAN

Dalam tulisan ini telah dilakukan kajian terhadap pengembangan teknik *natural sampling* PWM yang digunakan untuk mengendalikan operasi penyaklaran inverter tiga-level. Teknik *natural sampling* PWM yang dibahas dan dikaji adalah teknik *natural sampling* PWM *level-shifted* (sinyal *carrier* terdisposisi) dan teknik *natural sampling* PWM *phase-shifted* (sinyal *carrier* terdisposisi dengan pergeseran fasa 180°) masing-masing untuk sinyal referensi sinusoidal dan sinyal referensi sinusoidal yang diinjeksi dengan gelombang harmonisa ketiga. Lalu, berdasarkan hasil simulasi unjuk kerja inverter tiga-level yang dilihat dari aspek riak arus keluarannya dikaji dan dibandingkan satu sama lainnya untuk berbagai teknik *natural sampling* tersebut diatas. Hasil kajian menunjukkan bahwa teknik *natural sampling* PWM *level-shifted* akan menghasilkan unjuk kerja inverter tiga-level yang lebih baik dibandingkan teknik *natural sampling* PWM *phase-shifted*.

DAFTAR PUSTAKA

- D. G. Holmes, T. A. Lipo, "*Pulse Width Modulation for Power Converters. Principles and Practice*", IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-Interscience, 2003.
- I Made Wiwit K, "*Minimisasi Riak Arus Keluaran Inverter Modulasi Lebar Pulsa (PWM) Tiga-Level Tiga-Fasa*", 2012.
- J. Holtz, "*Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion*", Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 8, Aug. 1994.
- J. Rodriguez, J. Sheng Lai, F. Z. Peng, "*Multilevel Inverter: A Survey of Topologies, Controls and Applications*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, N0.4, August 2002.
- M. A. Boost, P. D. Ziogas, "*State of The Art Carrier PWM Techniques: A Critical Evaluation*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 2, March/April 1988.
- Nopiansyah, P. A. Dahono, "*Analysis and Minimization of Output Current Harmonic of a Three Level PWM Inverter*", 2009.
- P. A. Dahono, Y. Sato, T. Kataoka, "*Analysis and Minimization of Harmonics in The AC and DC Sides of PWM Inverters*", IEE Japan Trans. Ind. Appl., May 1995.