



MODEL VEKTOR TEGANGAN DALAM MODULASI VEKTOR RUANG 3-DIMENSI PADA FILTER AKTIF SISTEM TIGA-FASA

Indriarto Yuniantoro & Ishak Kasim

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti

Jalan Kiai Tapa No. 1 Jakarta Barat 11440

E-mail: indriarto@trisakti.ac.id

ABSTRACT

An electric current flow on the neutral wire give raise to harmonics. It is a problem that must be solved one of which is space vector modulation technique. A few voltage vector models have been developed including by Zhang and Perales. In this paper the models are compared to determine reference voltage vector and duty cycle, developed asymmetric's model based on Akagi theory too. The results show that asymmetric's model can be proposed as a new technique in space vector modulation.

Keywords: *Voltage vector, Reference voltage vector, Duty cycle.*

ABSTRAK

Arus yang mengalir pada kawat netral menimbulkan harmonisa. Hal itu merupakan masalah yang harus diselesaikan salah satunya adalah dengan teknik modulasi vektor ruang. Beberapa model vektor tegangan telah dikembangkan diantaranya oleh Zhang dan Perales. Dalam tulisan ini dibandingkan model-model tersebut dalam menentukan vektor-tegangan referensi dan duty cycle. Dikembangkan pula model asimetri yang berdasarkan pada teori Akagi. Hasilnya menunjukkan bahwa model asimetri dapat diusulkan sebagai satu teknik baru dalam modulasi vektor ruang.

Kata Kunci: *Vektor tegangan, Vektor-tegangan referensi, Duty cycle.*

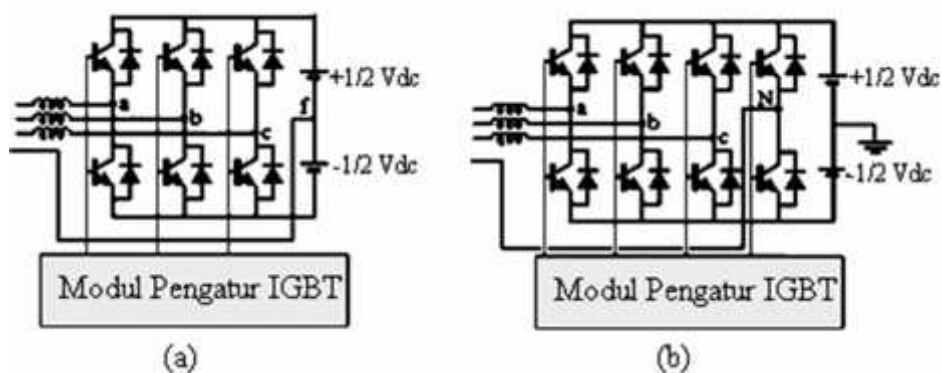
1. PENDAHULUAN

Vektor tegangan adalah vektor-ruang 3-dimensi dalam koordinat- $\alpha\beta 0$ berbentuk tetrahedron dimana vektor tersebut merupakan sinyal hasil kombinasi pensaklaran hidup-mati pasangan konduktor-IGBT (*insulated gate bipolar transistors*). Kombinasi pensaklaran dalam modulasi vektor-ruang pada filter aktif sistem tiga-fasa empat-kawat (empat-lengan) menghasilkan 16 buah vektor-tegangan [1-2]. Parameter modulasi seperti vektor-tegangan referensi dan *duty cycle* dapat ditentukan dari ke-16 buah vektor tegangan tersebut. Untuk mendapatkan sinyal kombinasi dilakukan analisis vektor-tegangan referensi dan *duty cycle*. Beberapa model vektor tegangan dalam modulasi vektor ruang 3-dimensi yang telah dikembangkan diantaranya adalah model Zhang dan model Perales.

Penelitian ini bertujuan melakukan perbandingan vektor tegangan dalam pengaturan arus kompensasi pada filter aktif sistem tiga-fasa empat-kawat (empat-lengan) untuk eliminasi harmonisa. Dikembangkan pula model vektor tegangan berbentuk tetrahedron asimetri yang berasal dari tinjauan ulang teori Akagi [3-4].

2. MODEL VEKTOR TEGANGAN

Pada Gambar 1(a) diberikan pasangan IGBT konduktor-a, b, c dan konduktor-f pada filter aktif sistem tiga-fasa empat-kawat dimana konduktor-f tersambung dengan kawat netral. Sedangkan pada Gambar 1(b) filter aktif sistem tiga-fasa empat-lengan, diberikan pasangan IGBT konduktor-a, b, c dan konduktor-netral.



Gambar 1. Filter aktif sistem tiga-fasa (a) empat kawat dan (b) empat-lengan

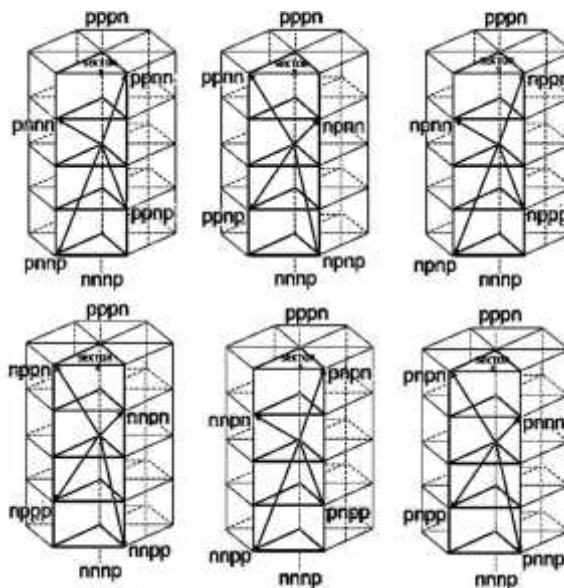


2.1. Model Zhang [1]

Kombinasi pensaklaran pada filter aktif sistem tiga-fasa empat-lengan seperti Gambar 1(b) menghasilkan 16 buah vektor tegangan. Zhang menggunakan transformasi *non-invariant* Clarke pada persamaan (1) untuk mendapatkan ke-16 kombinasi pensaklaran hidup-mati pasangan IGBT konduktor-a, b, c dan konduktor-netral sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Secara vertikal (dilihat dari samping) dapat diketahui bahwa ke-16 kombinasi pensaklaran yang menghasilkan masing-masing vektor-tegangan tersebut menempati ruang 3-dimensi seperti tampak Gambar 2.



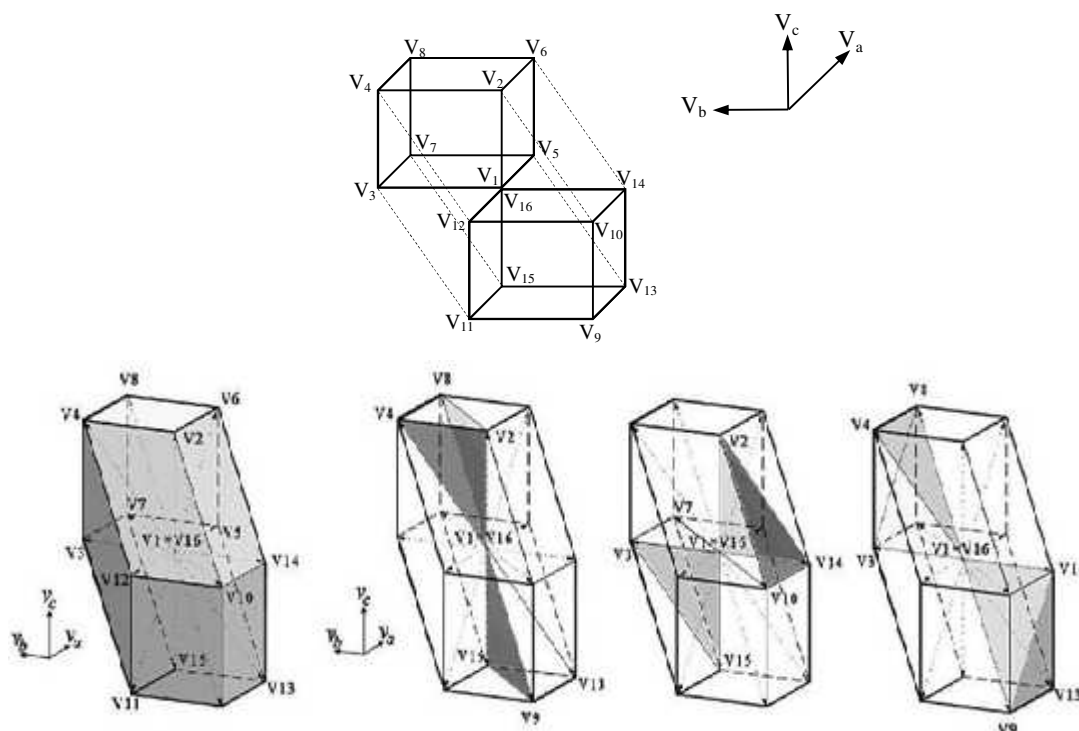
Gambar 2. Posisi vektor-tegangan dalam koordinat- $\alpha\beta\gamma$

Pada satu sektor bentuk prisma dengan sudut $\pi/3$ radian terdapat 4 (empat) buah tetrahedron sehingga secara keseluruhan pada Gambar 2 terdapat 24 buah tetrahedron. Tetrahedron tersebut adalah vektor-tegangan referensi yang dihasilkan dari kombinasi 3 buah vektor-tegangan terdekat. Potongan horisontal (dilihat dari atas) menunjukkan masing-masing posisi vektor-tegangan dalam koordinat $\alpha\beta\gamma$.

Diketahui bahwa batas maksimum modulasi menurut Zhang dari persamaan (1), untuk sumbu- α dan sumbu- β adalah sebesar $\frac{2}{3} = 0,67$ Vdc.

2.2. Model Perales [2]

Tanpa melakukan transformasi koordinat, Perales melakukan hal yang sama seperti yang dilakukan Zhang dan menghasilkan kombinasi 16 buah vektor tegangan dari pasangan IGBT filter aktif sistem tiga-fasa empat-lengan. Vektor-tegangan dalam koordinat-abc tersebut langsung dipetakan dalam ruang 3-dimensi dan menghasilkan bentuk dodekahedron berupa tumpukan melintang 2 (dua) buah kubus dengan panjang sisi 1 Vdc seperti terlihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Bentuk dodekahedron vektor-tegangan dalam koordinat-abc

Dari 16-kombinasi vektor-tegangan dalam bentuk dodekahedron tersebut dapat diuraikan 24 buah tetrahedron. Ke-24 tetrahedron yang oleh Perales disebut sebagai RP (*region pointer*) adalah vektor-tegangan referensi yang diperoleh dari kombinasi 3 vektor tegangan terdekat.



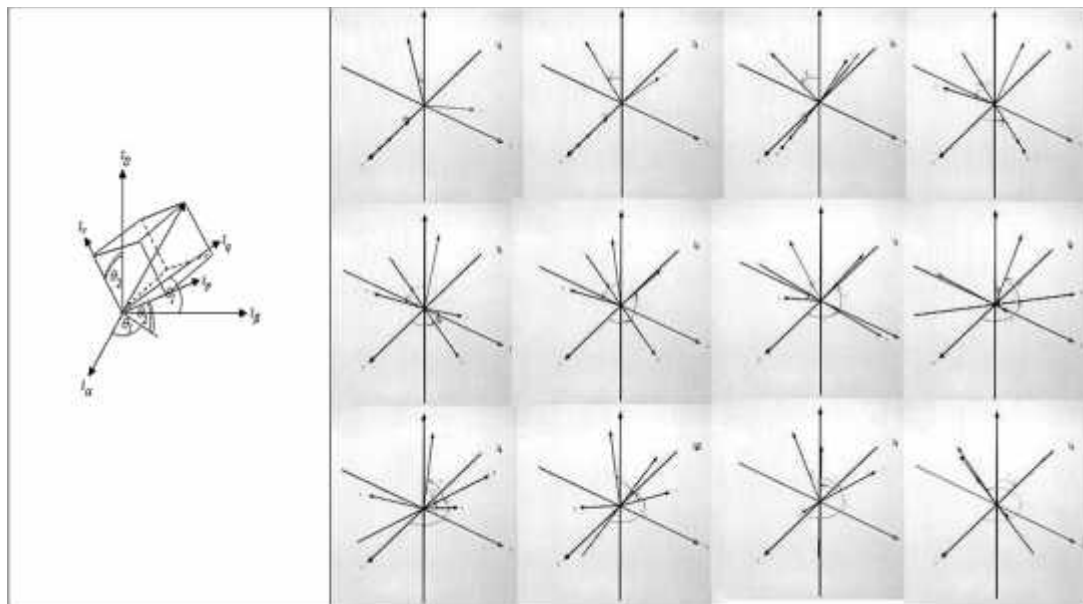
2.3. Model Asimetri.

Rotasi 2 (dua) sudut Euler menghasilkan koordinat- $\alpha\beta$ yang berotasi dalam ruang menjadi koordinat-pqr lebih menyerupai bentuk spiral dibandingkan bentuk silinder. Persamaan rotasi 2 (dua) sudut Euler [5-6] sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_p \\ X_q \\ X_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_1 & \cos \theta_2 \sin \theta_1 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_2 \cos \theta_1 & -\sin \theta_2 \sin \theta_1 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_1 & \cos \theta_2 \sin \theta_1 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_2 \cos \theta_1 & -\sin \theta_2 \sin \theta_1 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

dimana: $X \equiv i, V$ (adalah arus atau tegangan).

Persamaan (2) merupakan tinjauan ulang model matriks pemetaan Kim-Akagi dalam memecahkan masalah yang berkaitan dengan koordinat-pqr seperti dalam [3-4]. Pada Gambar 4 diberikan visualisasi matlab 2010a dari proses rotasi 2 (dua) sudut Euler.



Gambar 4. Rotasi 2 (dua) sudut Euler menyerupai bentuk spiral

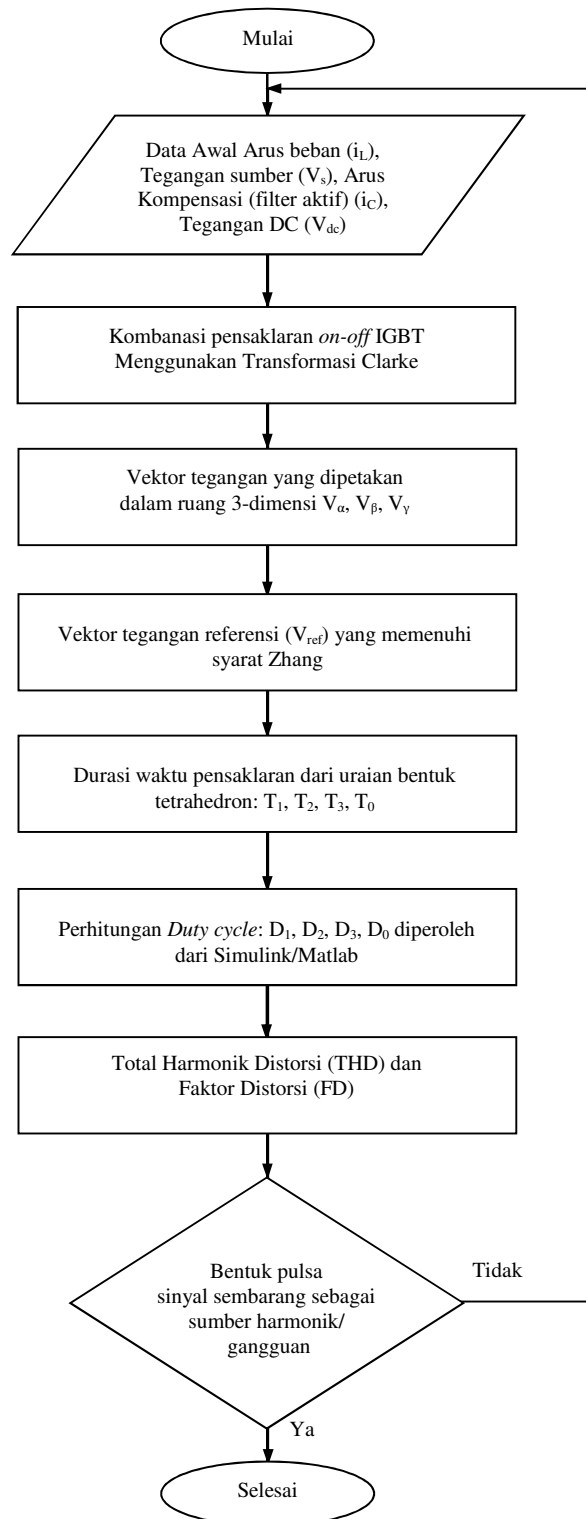
Bentuk spiral Gambar 4 lebih mudah dianalisis bila dianggap sebagai vektor-miring. Vektor ruang 3-dimensi untuk filter aktif sistem tiga-fasa empat-lengan selama ini berbentuk silinder dengan 6 buah prisma sedangkan berdasarkan metoda rotasi sudut Euler Persamaan (2) hasilnya adalah berbentuk vektor miring. Metoda rotasi 2 sudut Euler menghasilkan koordinat-pqr bila dilakukan proyeksi dalam koordinat- $\alpha\beta 0$ menyerupai bentuk tetrahedron asimetri yang terdiri dari tumpukan 2 buah hexagonal.

3. ANALISIS VEKTOR TEGANGAN DALAM MODULASI VEKTOR

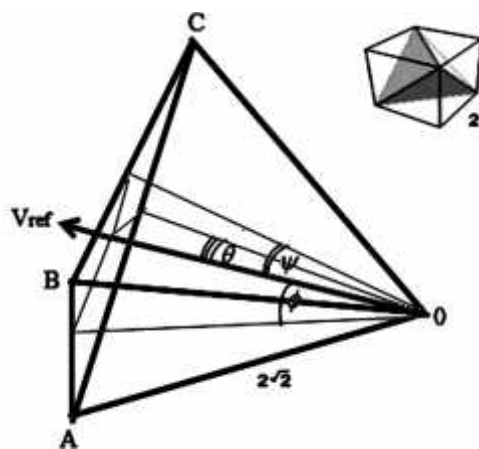
RUANG.

Modulasi vektor-ruang adalah modulasi dengan pengaturan vektor-tegangan atau vektor arus dalam upaya mengkompensasi filter aktif dimana pengaturan tegangan atau arus kompensasi tersebut dilakukan dengan kombinasi pensaklaran modul pengatur IGBT pada filter aktif sistem tiga-fasa. Tahapan dalam modulasi vektor-ruang [7] diuraikan dalam diagram alir seperti Gambar 5 pada halaman berikut.

Vektor tegangan yang dipetakan dalam ruang 3 dimensi dapat diuraikan menghasilkan vektor-tegangan referensi. Dalam melakukan analisis vektor-tegangan referensi maka diperlukan prinsip dasar geometri. Sebuah kubus dengan panjang sisi 2 satuan bila dipotong penampangnya menghasilkan bentuk tetrahedron. Potongan tersebut tampak seperti pada Gambar 6. Panjang garis bujur yang menghubungkan titik pusat dengan titik-tengah bidang segitiga dapat digunakan untuk menentukan panjang vektor-tegangan referensi (V_{ref}). Sudut yang dihasilkan antara garis bujur terhadap bidang datar merupakan sudut- ϕ , sedangkan sudut yang dihasilkan antara garis bujur terhadap bidang tegak merupakan sudut- ψ . Nilai-bobot terhadap sumbu- α , sumbu- β dan sumbu- γ merupakan *duty cycle*.



Gambar 5. Tahapan dalam pengaturan filter aktif sistem tiga-fasa berdasarkan modulasi vektor-ruang

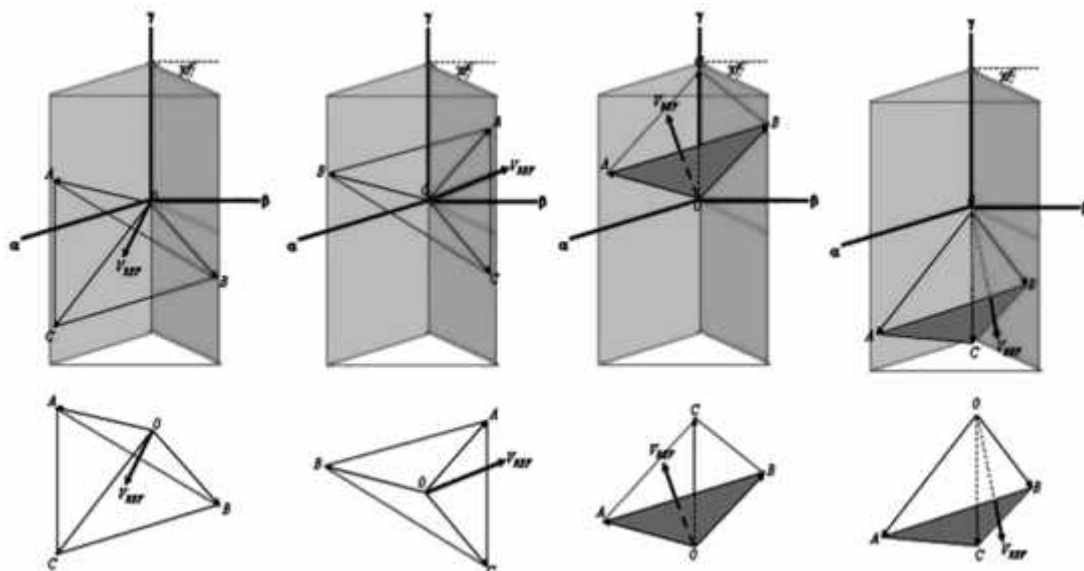


Gambar 6. Geometri tetrahedron yang diperoleh dari potongan kubus

3.1. Analisis Model Zhang

Dalam 1 sektor keadaan (*state*) berbentuk prisma dengan sudut $\pi/3$ radian dalam model Zhang terdapat 4 buah tetrahedron sehingga untuk silinder yang terdiri 6 sektor seluruhnya menghasilkan 24 buah tetrahedron. Masing-masing tetrahedron tersebut memiliki karakteristik berbeda-beda sehingga analisis terhadap masing-masing tetrahedron harus dilakukan berbeda pula.

Pada Gambar 7 berikut ini diberikan masing-masing tetrahedron yang menempati 1 sektor keadaan (*state*) dari model Zhang.



Gambar 7. Empat buah tetrahedron dalam 1 sektor pada model Zhang



Bila masing-masing tetrahedron tersebut diuraikan titik-A, titik-B dan titik-C maka dapat dibuat pasangan koordinat pembentuk tetrahedron. Tabel1 berikut ini adalah perhitungan yang diperoleh dalam menentukan parameter tetrahedron berdasarkan simulasi matlab 2010a.

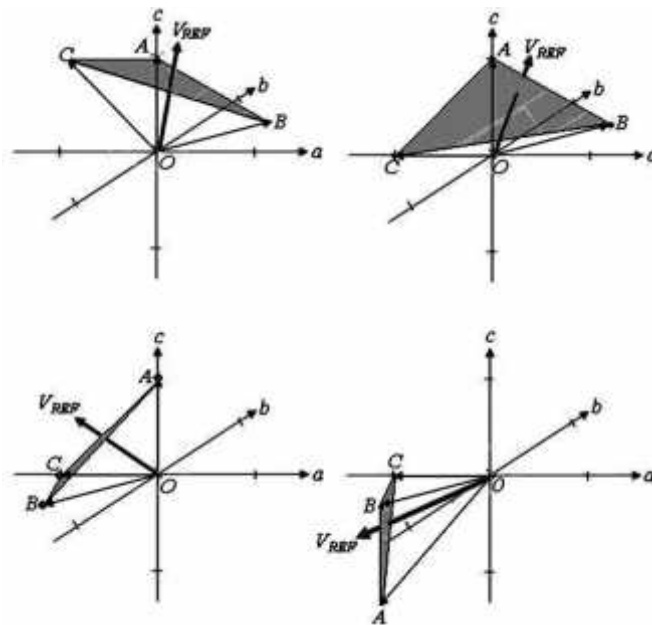
Tabel1. Uraian titik koordinat dan V_{ref} berdasarkan model Zhang

No	Titik O			Titik A			Titik B			Titik C			Centroid ABC (V_{ref})			pV_{ref}
1	0	0	0	0,67	0	0,33	0,67	0	-0,67	0,33	0,58	-0,33	0,5566667	0,1933333	-0,2233333	0,630185
2	0	0	0	0,67	0	0,33	0,33	0,58	0,67	0,33	0,58	-0,33	0,4433333	0,3866667	0,2233333	0,6292323
3	0	0	0	0,67	0	0,33	0,33	0,58	0,67	0	0	1	0,3333333	0,1933333	0,6666667	0,7700216
4	0	0	0	0,67	0	0,33	0,33	0,58	0,67	0	0	-1	0,3333333	0,1933333	0	0,3853426
5	0	0	0	0,33	0,58	0,67	0,33	0,58	-0,33	-0,33	0,58	0,33	0,11	0,58	0,2233333	0,6311717
6	0	0	0	0,33	0,58	-0,33	-0,33	0,58	0,33	-0,33	0,58	-0,67	-0,11	0,58	-0,2233333	0,6311717
7	0	0	0	0,33	0,58	0,67	-0,33	0,58	0,33	0	0	1	0	0,3866667	0,6666667	0,7706851
8	0	0	0	0,33	0,58	-0,33	-0,33	0,58	0,33	0	0	-1	0	0,3866667	-0,3333333	0,5105117
9	0	0	0	-0,33	0,58	0,33	-0,33	0,58	0,33	-0,67	0	-0,33	-0,4433333	0,3866667	0,11	0,598461
10	0	0	0	-0,33	0,58	0,33	-0,67	0	0,67	-0,67	0	-0,33	-0,5566667	0,1933333	0,2233333	0,6301852
11	0	0	0	-0,33	0,58	0,33	-0,67	0	0,67	0	0	1	-0,3333333	0,1933333	0,6666667	0,7700216
12	0	0	0	-0,33	0,58	-0,67	-0,67	0	-0,33	0	0	-1	-0,3333333	0,1933333	-0,6666667	0,7700216
13	0	0	0	-0,67	0	0,67	-0,67	0	-0,33	-0,67	0	-0,33	-0,67	0	0,0033333	0,6700083
14	0	0	0	-0,67	0	-0,33	-0,67	0	-0,33	-0,33	-0,58	-0,67	-0,5566667	-0,1933333	-0,4433333	0,737428
15	0	0	0	-0,67	0	0,67	-0,67	0	-0,33	0	0	1	-0,4466667	0	0,4466667	0,6316821
16	0	0	0	-0,67	0	-0,33	-0,33	-0,58	-0,67	0	0	-1	-0,3333333	-0,1933333	-0,6666667	0,7700216
17	0	0	0	-0,33	-0,58	0,33	-0,33	-0,58	-0,67	0,33	-0,58	-0,33	-0,11	-0,58	-0,2233333	0,6311717
18	0	0	0	-0,67	0	-0,33	0,33	-0,58	0,67	0,33	-0,58	-0,33	-0,0033333	-0,3866667	0,0033333	0,3866954
19	0	0	0	-0,67	0	-0,33	0,33	-0,58	0,67	0	0	1	-0,1133333	-0,1933333	0,4466667	0,4997333
20	0	0	0	-0,33	-0,58	-0,67	0,33	-0,58	-0,33	0	0	-1	0	-0,3866667	-0,6666667	0,7706851
21	0	0	0	0,33	-0,58	0,67	0,33	-0,58	-0,33	0,67	0	0,33	0,4433333	-0,3866667	0,2233333	0,6292323
22	0	0	0	0,33	-0,58	-0,33	0,67	0	0,33	0,67	0	-0,67	0,5566667	-0,1933333	-0,2233333	0,6301852
23	0	0	0	0,33	-0,58	0,67	0,67	0	0,33	0	0	1	0,3333333	-0,1933333	0,6666667	0,7700216
24	0	0	0	0,33	-0,58	-0,33	0,67	0	-0,67	0	0	-1	0,3333333	-0,1933333	-0,6666667	0,7700216

3.2. Analisis Model Perales

Uraian tetrahedron dalam koordinat-abc menurut Perales cukup banyak ada 64 tetrahedron (*RP region pointer*) yang dapat diperoleh. Namun dari ke-64 tetrahedron tersebut, dengan mengambil 24 buah tetrahedron maka sudah cukup untuk menentukan vektor-tegangan referensi (V_{ref}) dan *duty cycle*. Masing-masing tetrahedron tersebut berbeda-beda sehingga harus satu per satu diteliti. Yang menarik dari model Perales bila parameter dari 4 buah tetrahedron keadaan awal telah diketahui maka nilainya berulang untuk tetrahedron lainnya.

Pada Gambar 8 berikut ini diberikan ke-4 buah tetrahedron untuk keadaan awal menurut model Perales.



Gambar 8. Empat buah tetrahedron keadaan awal dari model Perales

Bila ke 4 tetrahedron keadaan awal tersebut diuraikan sebagai titik-A, titik-B dan titik-C maka dapat diperoleh pasangan koordinat pembentuk tetrahedron. Tabel 2 adalah perhitungan dalam menentukan parameter tetrahedron berdasarkan simulasi.

Tabel 2. Uraian titik koordinat dan V_{ref} berdasarkan model Perales

No	Titik O			Titik A			Titik B			Titik C			Centroid ABC (V_{ref})			pV_{ref}
1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	0	-1	-0,6666667	-0,3333333	1,2472191
2	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	-1	0	0	-0,6666667	-0,3333333	0,3333333	0,8164966
3	0	0	0	0	0	1	0	1	1	-1	0	0	-0,3333333	0,3333333	0,6666667	0,8164966
4	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0,3333333	0,6666667	1	1,2472191
5	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	0	-0,6666667	-1	-0,3333333	1,2472191
6	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	-1	0	-0,3333333	-0,6666667	0,3333333	0,8164966
7	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	-1	0	0,3333333	-0,3333333	0,6666667	0,8164966
8	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0,6666667	0,3333333	1	1,2472191
9	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	0	-1	-0,3333333	-0,6666667	1,2472191
10	0	0	0	0	1	0	-1	0	-1	-1	0	0	-0,6666667	0,3333333	-0,3333333	0,8164966
11	0	0	0	0	1	0	0	1	1	-1	0	0	-0,3333333	0,6666667	0,3333333	0,8164966
12	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0,3333333	1	0,6666667	1,2472191
13	0	0	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	-1	0	-0,3333333	-1	-0,6666667	1,2472191
14	0	0	0	1	0	0	0	-1	-1	0	-1	0	0,3333333	-0,6666667	-0,3333333	0,8164966
15	0	0	0	1	0	0	0	-1	-1	0	-1	0	0,3333333	-0,6666667	-0,3333333	0,8164966
16	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0,3333333	0,6666667	1,2472191
17	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	0	-1	-0,6666667	-0,3333333	-1	1,2472191
18	0	0	0	0	1	0	-1	0	-1	0	0	-1	-0,3333333	0,3333333	-0,6666667	0,8164966
19	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	-1	0,3333333	0,6666667	-0,3333333	0,8164966
20	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0,6666667	1	0,3333333	1,2472191
21	0	0	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	0	-1	-0,3333333	-0,6666667	-1	1,2472191
22	0	0	0	1	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	0,3333333	-0,3333333	-0,6666667	0,8164966
23	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	-1	0,6666667	0,3333333	-0,3333333	0,8164966
24	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0,6666667	0,3333333	1,2472191



3.3. Analisis Model Asimetri

Enam buah sektor yang berada di pasangan atas dan di pasangan bawah vektor-miring masing-masing menghasilkan *duty cycle* yang sama harganya pada selang perioda $(0-2\pi)$ radian, titik pusat pasangan atas berada pada vektor- V_{15} dan titik pusat pasangan bawah berada pada vektor- V_0 . Pasangan titik-titik koordinat membentuk tetrahedron terletak di titik-A, titik-B dan titik-C seperti Tabel 3 berikut.

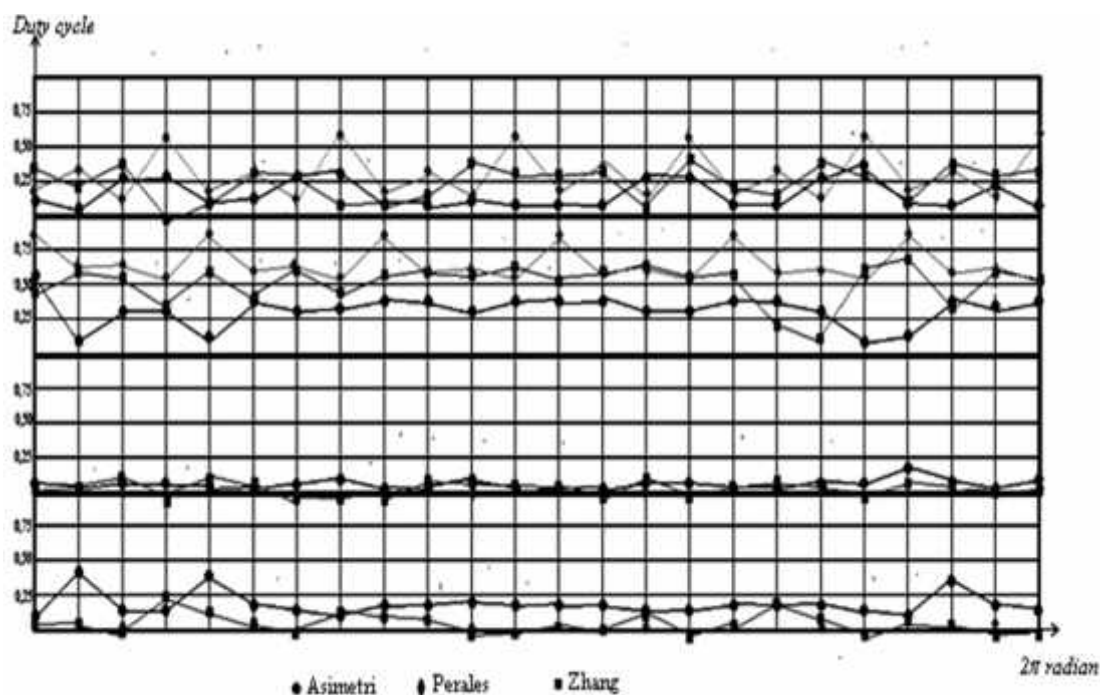
Tabel 3. Uraian titik koordinat dan V_{ref} berdasarkan model asimetri

No	Titik O			Titik A			Titik B			Titik C			Centroid ABC (V_{ref})			pV_{ref}	
1	-0,25	0,433	0	0,25	0,433	1	0	0,866	0	0,5	0	0	0,25	0,433	0,33333333	0,6009252	
2	-0,25	0,433	0	-0,5	0	0	0	-0,5	0,866	0	0	0,866	0	-0,33333333	0,57733333	0	0,1666663
3	-0,25	0,433	0	0,25	0,433	0	0	0	0	0	0	-0,5	0,08333333	0,14433333	-0,16666667	0,4713993	
4	-0,25	0,433	0	0	0,866	0	0,25	0,433	0	0,25	0,433	-0,5	0,16666667	0,57733333	-0,16666667	0,4714032	
5	-0,25	0,433	0	0	0,866	0	-0,5	0,433	0	-0,25	0,433	-0,5	-0,25	0,57733333	-0,16666667	0,2204765	
6	-0,25	0,433	0	0,25	0,433	0,5	0	0	0	0,25	0,433	0	0,16666667	0,28866667	0,16666667	0,4714032	
7	-0,25	0,433	0	-0,75	0,433	0	-0,5	0	0	-0,5	0	-0,5	-0,58333333	0,14433333	-0,16666667	0,4713993	
8	-0,25	0,433	0	-0,5	0	0	0	0	0	-0,5	0	-0,5	-0,33333333	0	-0,16666667	0,4713929	
9	-0,25	0,433	0	-0,5	0,866	0,5	-0,75	0,433	0,5	-0,75	0,433	0	-0,66666667	0,57733333	0,33333333	0,5527697	
10	-0,25	0,433	0	-0,75	0,433	0,5	-0,75	0,433	0	-0,5	0	0	-0,66666667	0,28866667	0,16666667	0,4714032	
11	-0,25	0,433	0	0	0	0,5	0	0	0	-0,5	0	0	-0,16666667	0	0,16666667	0,4713929	
12	-0,25	0,433	0	-0,5	0,866	0	-0,75	0,433	0	-0,25	0,433	-0,5	-0,5	0,57733333	-0,16666667	0,3333315	
13	0	0	0	-0,5	0	0,5	-0,5	0	0	-0,25	-0,433	0	-0,41666667	-0,14433333	0,16666667	0,4714032	
14	0	0	0	-0,25	0,433	0,5	-0,25	0,433	0	-0,5	0	0	-0,33333333	0,28866667	0,16666667	0,4713993	
15	0	0	0	-0,25	0,433	0	-0,5	0	0	-0,5	0	-0,5	-0,41666667	0,14433333	-0,16666667	0,4714032	
16	0	0	0	-0,5	0	0	-0,25	-0,433	0	-0,25	-0,433	-0,5	-0,33333333	-0,28866667	-0,16666667	0,4713993	
17	0	0	0	0,25	0,433	0,5	0,25	0,433	0	-0,25	0,433	0	0,08333333	0,433	0,16666667	0,4713929	
18	0	0	0	-0,25	0,433	0,5	-0,25	0,433	0	-0,5	0	0	-0,33333333	0,28866667	0,16666667	0,4713993	
19	0	0	0	0,25	0,433	0	0,5	0	0	0,5	0	-0,5	0,41666667	0,14433333	-0,16666667	0,4714032	
20	0	0	0	0,25	0,433	0	0	0	0	-0,25	0,433	-0,5	0	0,28866667	-0,16666667	0,333326	
21	0	0	0	0	0	0,25	0,5	0	0	0,25	-0,433	0	0,25	-0,14433333	0,08333333	0,3004606	
22	0	0	0	0,25	0,433	0,5	0,25	0,433	0	0,5	0	0	0,33333333	0,28866667	0,16666667	0,4713993	
23	0	0	0	-0,25	-0,433	0	0,25	-0,433	0	-0,25	-0,433	-0,5	-0,08333333	-0,433	-0,16666667	0,4713929	
24	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0	-0,5	0,25	-0,433	0,5	0,41666667	-0,14433333	0	0,4409572	

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil simulasi masing-masing model vektor tegangan seperti uraian diatas maka dapat dibuat perbandingan terhadap *duty cycle* seperti dalam lampiran di belakang. Harga *duty cycle* D_3 (konduktor-c) dan D_z (konduktor netral) model Perales adalah nol, hal ini menunjukkan bahwa dalam model Perales untuk mengatur arus kompensasi tidak diperlukan pensaklaran konduktor-c dan konduktor-netral pada modul pengatur IGBT. Untuk model Zhang, terlihat bahwa harga *duty cycle* D_z (konduktor-netral) lebih kecil dibandingkan model asimetri. Hal ini menunjukkan bahwa untuk model Zhang, waktu untuk pensaklaran konduktor-netral lebih singkat (cepat) bila dibandingkan dengan model asimetri.

Pada grafik garis Gambar 9 diberikan perbandingan *duty cycle* antara model Perales-Zhang-asimetri. Khusus untuk model Perales dimana harga $D_3 = D_z = 0$ untuk konduktor-c dan konduktor-netral maka grafik garis tidak dapat digambarkan.



Gambar 9. Perbandingan *duty cycle* model Zhang-Perales-Asimetri

5. KESIMPULAN

Model vektor-tegangan dalam modulasi vektor ruang dapat digunakan untuk menentukan V_{ref} dan *duty cycle* demikian pula model asimetri dari vektor tegangan dapat digunakan untuk mengatur arus kompensasi pada filter aktif sistem tiga-fasa empat-lengan seperti model Zhang maupun model Perales.

Analisis *duty cycle* menghasilkan bahwa dalam melakukan pengendalian arus kompensasi model Perales dapat dilakukan dengan konduktor-a, b saja. Model asimetri memberi harga D_z lebih besar dibandingkan dengan model Zhang, hal ini menunjukkan bahwa waktu pensaklaran untuk konduktor-netral modul pengatur IGBT filter aktif sistem tiga-fasa empat-lengan model asimetri harus lebih lama dibandingkan model Zhang.



TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada ibu Binti Solihah dosen Teknik Informatika FTI Universitas Trisakti atas bantuannya membuat program komputasi dan simulasi matlab 2010a dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. R. Zhang, V.H. Prasad, D. Boroyevich, F.C. Lee. "Three-Dimensional Space vector Modulation for Four-Leg Voltage-Source Converter". *IEEE Trans on Power Electronics*, vol. 17, no. 3, May 2002, hlm. 314-326.
- [2]. M.A.Perales, M.M. Prats, R. Portilo, J.L. Mora, J.I. Leon, L.G. Franquelo. "Three-Dimensional Space Vector Modulation in abc Coordinate for Four-Leg Voltage Source Converters". *IEEE Power. Electronics Letters*, vol. 1, no. 4, Dec 2003, hlm. 104-109.
- [3]. H. Kim dan H. Akagi. "The instantaneous Power Theory Based on Mapping Matrices in Three-phase Four-wire Systems". *1997 IEEE International Conference. on PCC*, 1997, hlm. 361-366.
- [4]. H. Kim dan H. Akagi. "The Instantaneous Power Theory on the Rotating p-q-r Reference Frames", dalam Prosiding *IEEE International Conference on PEDS'99*, 1999.
- [5]. I.Yuniantoro, R.Gunawan dan R.Setiabudy. "The pqr-coordinate in the Mapping Matrices Model of Kim-Akagi on Power Transformation based on Euler Angle Rotation Method", dalam Prosiding *IEEE Xplore International Conference on Quality in Research (QiR)*, 2013, hlm. 121-126.
- [6]. I.Yuniantoro, R. Setiabudy dan R. Gunawan. "Voltage-vector in three-dimensional space-vector-modulation based on $\alpha\beta r$ -coordinate for four-leg active filter". *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, Vol.7, Issue1, Feb-Mar 2015, hlm. 129-136.
- [7]. A. Mohd, E. Ortjohann, N. Hamsic, W. Sinsukthavorn, M. Lingemann, A. Schmelter, D. Morton. "Control strategy and space vector modulation for three-

leg four-wire voltage source inverters under unbalanced load conditions”. *IET Power Electronics*, Vol. 3, Iss. 3, 2010, hlm. 323–333.

LAMPIRAN: Perbandingan *duty cycle* model Zhang-Perales-Asimetri.

No	D ₁	D ₂	D ₃	D _{Z/2}
1	0.37	0.48	0.03	0.1
2	0.23	0.56	0.03	0.09
3	0.39	0.53	0.06	0.01
4	0.01	0.39	0.04	0.25
5	0.18	0.55	0.01	0.12
6	0.36	0.4	0.07	0.09
7	0.33	0.57	0.05	0.02
8	0.11	0.48	0.02	0.18
9	0.14	0.55	0.02	0.13
10	0.2	0.56	0.02	0.1
11	0.4	0.53	0.06	0.01
12	0.33	0.58	0.05	0.02
13	0.29	0.51	0.04	0.08
14	0.32	0.56	0.04	0.04
15	0.06	0.59	0.02	0.15
16	0.39	0.53	0.06	0.01
17	0.24	0.55	0.01	0.09
18	0.19	0.24	0.05	0.23
19	0.45	0.14	0.11	0.15
20	0.33	0.57	0.05	0.02
21	0.18	0.69	0.01	0.11
22	0.43	0.4	0.07	0.09
23	0.33	0.57	0.05	0.02
24	0.4	0.53	0.06	0.01

D ₁	D ₂	D ₃	D _{Z/2}
0.22	0.88	0	0
0.41	0.6	0	0
0.16	0.67	0.07	0.09
0.58	0.54	0	0
0.22	0.88	0	0
0.41	0.6	0	0
0.16	0.67	0.07	0.09
0.58	0.54	0	0
0.22	0.88	0	0
0.41	0.6	0	0
0.16	0.67	0.07	0.09
0.58	0.54	0	0
0.22	0.88	0	0
0.41	0.6	0	0
0.16	0.67	0.07	0.09
0.58	0.54	0	0
0.22	0.88	0	0
0.41	0.6	0	0
0.16	0.67	0.07	0.09
0.58	0.54	0	0

D ₁	D ₂	D ₃	D _{Z/2}
0.12	0.55	0.04	0.15
0.06	0.11	0.01	0.4
0.26	0.32	0.04	0.19
0.26	0.32	0.04	0.19
0.1	0.18	0.02	0.35
0.16	0.4	0.01	0.21
0.26	0.31	0.03	0.19
0.28	0.36	0.06	0.15
0.12	0.43	0.01	0.21
0.1	0.44	0.01	0.21
0.16	0.32	0.07	0.22
0.12	0.43	0.01	0.21
0.1	0.44	0.01	0.21
0.1	0.44	0.01	0.21
0.26	0.32	0.04	0.19
0.26	0.32	0.04	0.19
0.1	0.44	0.01	0.21
0.1	0.44	0.01	0.21
0.26	0.32	0.04	0.19
0.36	0.11	0.23	0.15
0.14	0.17	0.05	0.32
0.1	0.44	0.01	0.21
0.24	0.3	0.06	0.19
0.09	0.41	0.02	0.23

MODEL ZHANG					MODEL PERALES				MODEL ASIMETRI			
-------------	--	--	--	--	---------------	--	--	--	----------------	--	--	--

Filename: 25.21 (hal 1-14) Model vektor. Indriarto_10E99ED
Directory: C:\Users\FTI-USAKTI\AppData\Local\Temp
Template: C:\Users\FTI-USAKTI\AppData\Roaming\Microsoft\Templates\Normal.dotm
Title:
Subject:
Author: KOMP-10
Keywords:
Comments:
Creation Date: 14/01/2016 9:28:00
Change Number: 4
Last Saved On: 29/01/2016 8:51:00
Last Saved By: 062 FTI-USAKTI
Total Editing Time: 4 Minutes
Last Printed On: 01/02/2016 12:59:00
As of Last Complete Printing
Number of Pages: 14
Number of Words: 3.590 (approx.)
Number of Characters: 18.780 (approx.)