

Model Penyelakuan Berangkap Dipermudah untuk Penyongsang PWM-VSI Satu Fasa Menggunakan Konsep Rangkap Pensuisan

(Functional Simulation Model for Single Phase Pulse Width Modulation-voltage Source Inverter (PWM-VSI) using Switching Function Concept)

Yushaizad Yusof & Nasrudin Abd. Rahim

ABSTRAK

Kertas ini mencadangkan suatu model penyelakuan berangkap dipermudah bagi penyongsang sumber voltan-pemodulatan lebar denyut (PWM-VSI) satu fasa menggunakan konsep rangkap pensuisan yang berasaskan pelaksanaan model sebenar menggunakan perisian Matlab Simulink. Melalui model berangkap yang dibangunkan ini, sebuah model litar penyongsang sumber voltan titi satu fasa dapat dipermudahkan supaya masalah penumpuan dan masa larian yang panjang dalam proses pengiraan komputer boleh diatasi. Rangkap pensuisan secara am diulas dengan ringkas, rekabentuk model berangkap PWM-VSI satu fasa dan pelaksanaannya menggunakan Matlab Simulink diterangkan dengan terperinci. Menerusi penyelakuan model berangkap ini, voltan dan arus keluaran penyongsang didapati dan jumlah herotan harmonik (THD) bagi arus keluaran dikira menggunakan teknik Penjelmaan Fourier Pantas (FFT). Akhir sekali, beberapa maklumat daripada keputusan penyelakuan, menentusahkan kesahihan model berangkap dipermudah yang direkabentuk.

Kata kunci: Penyongsang sumber voltan-pemodulatan lebar denyut (PWM-VSI); model penyelakuan berangkap; rangkap pensuisan; jumlah herotan harmonik (THD)

ABSTRACT

This paper proposes a functional simulation model for single phase pulse width modulation-voltage source inverter (PWM-VSI) using switching function concept based on actual implementation of the model using Matlab Simulink software. Through this developed functional model, the simplification of a single phase bridge voltage source inverter circuit can be achieved, so that the convergence and long run-time in computer calculating process problems can be solved. The general switching function concept is reviewed briefly, and the designed functional model of single phase PWM-VSI and its implementation using Matlab Simulink are explained in detail. By the simulation of this functional model, the inverter's output voltage and current are obtained and the output current total harmonics distortion (THD) is calculated using Fast Fourier Transform (FFT) technique. Finally, several informative simulation results verify the validity of the simplified functional model design.

Keywords: Pulse width modulation-voltage source inverter (PWM-VSI); functional simulation model; switching function; total harmonic distortion (THD)

PENGENALAN

Perisian penyelakuan berkomputer seperti PSpice, Multisim, Saber dan Matlab Simulink digunakan dalam menganalisis dan merekabentuk sistem penukar kuasa statik. Bagi kes PSpice, Multisim dan Saber, litar penukar kuasa boleh diungkapkan secara sistematik dengan menggunakan model komponen-komponen elektrik dan elektronik sebenar. Oleh kerana ketiga-tiga perisian tersebut berasaskan pencirian skematik, maka ketiga-tiganya hanya sesuai untuk rekabentuk di tahap litar. Kebiasaannya perisian PSpice digunakan dalam pembelajaran untuk menyelakukan litar penukar kuasa. Model PSpice adalah berasaskan

pemodelan fizikal yang menghasilkan keputusan yang baik dan terperinci, namun mempunyai masalah penumpuan dan masa pengiraan yang panjang (Pires & Silva 2002). Model ini dihuraikan sebagai suatu sumber terkawal tak linear berasaskan rangkap-rangkap yang mengandungi terma-terma eksponen, menyebabkan masa pelaksanaan yang perlahan, data yang terjana banyak, dan juga masalah penumpuan (Salazar & Joos 1994).

Berkenaan perisian Matlab, pemodelan dan penyelakuan litar penukar kuasa adalah diasaskan daripada persamaan keadaan (The Mathwork Inc. 2009). Sungguhpun begitu, bagi mendapatkan persamaan keadaan

mengikuti konfigurasi litar tertentu adalah rumit dan memakan masa. Bilamana perubahan kecil berlaku dalam konfigurasi litar, persamaan keadaan yang baru perlu dikira. Justeru itu, suatu kaedah yang ringkas bagi memodelkan litar penukaran kuasa sangat diperlukan tanpa berasaskan kepada persamaan keadaan. Maka, perisian Simulink yang merupakan suatu tingkat upaya kepada Matlab, membolehkan para jurutera memodel sistem dinamik dengan pantas dan tepat menggunakan gambarajah blok secara interaktif, dan melalui Simulink, sistem tak linear yang kompleks dapat dimodelkan dengan mudah (Dabney & Harman 2001).

Selain itu, alat penyelakuan SimPowerSystems banyak digunakan dalam memodel dan menyelakuan sistem kuasa dengan pantas dan mudah menggunakan persekitaran Simulink. Yushaizad & Nasrudin (2010) mengaplikasikan SimPowerSystems untuk memodel dan menyelakuan penukar kuasa *Buck* untuk tujuan pengajaran dan pembelajaran subjek Eletronik Kuasa. Bagaimanapun, SymPowerSystems adalah berasaskan pemodelan fizikal, maka masa pengiraan adalah dijangkakan lebih panjang berbanding Simulink. Lee & Ehsani (2001) melaporkan tentang kelebihan menggunakan Simulink untuk model penyelakuan berangkap dipermudah, antaranya ialah masalah penumpuan dapat dihindari dan masa larian penyelakuan menjadi lebih pendek.

Kajian telah menunjukkan bahawa konsep rangkap pensuisan adalah suatu teknik yang berkesan dalam mengoptimumkan prestasi penukar kuasa statik (Salazar & Joos 1994). Dengan menggunakan konsep rangkap pensuisan, litar penukar kuasa boleh dimodelkan dengan lebih baik berbanding model tatarajah litar (Ziogas et al. 1985). Justeru itu, rangkap penukaran kuasa dapat dipermudahkan, serta membenarkan pembangunan konsep beranalisis yang boleh digunakan kepada semua penukar kuasa tidak hanya terhad kepada satu penukar kuasa tertentu sahaja (Weichmann et al. 1987). Salazar & Joos (1994) mencadangkan model penyelakuan penukar kuasa berasaskan konsep rangkap pensuisan menggunakan perisian Pspice. Selain itu, Cui (2007) menggunakan Matlab Simulink untuk penyelakuan penyongsang dengan kerosakan suis buka berdasarkan rangkap pensuisan, manakala Lee & Ehsani (2001) mencadangkan model penyelakuan berangkap dipermudah untuk VSI tiga fasa menggunakan konsep rangkap pensuisan, juga menggunakan Matlab Simulink. Selain daripada itu, perisian PSCAD juga boleh diaplikasikan untuk memodel penukar kuasa berdasarkan konsep rangkap pensuisan dengan pantas, dan tidak menghadapi masalah penumpuan (Van T. L. & Lee D. C. 2011).

Dalam kertas kerja ini, model penyelakuan berangkap untuk VSI satu fasa dikaji berdasarkan konsep rangkap pensuisan. Seterusnya, model ini dilaksanakan menggunakan blok berangkap Matlab Simulink. Rangka kertas kerja ini bermula dengan ulasan ringkas konsep rangkap pensuisan secara am. Selanjutnya, penerangan secara mendalam tentang cadangan model berangkap untuk PWM-VSI satu fasa dan pelaksanaannya dalam Matlab Simulink. Seterusnya, beberapa hasil keputusan

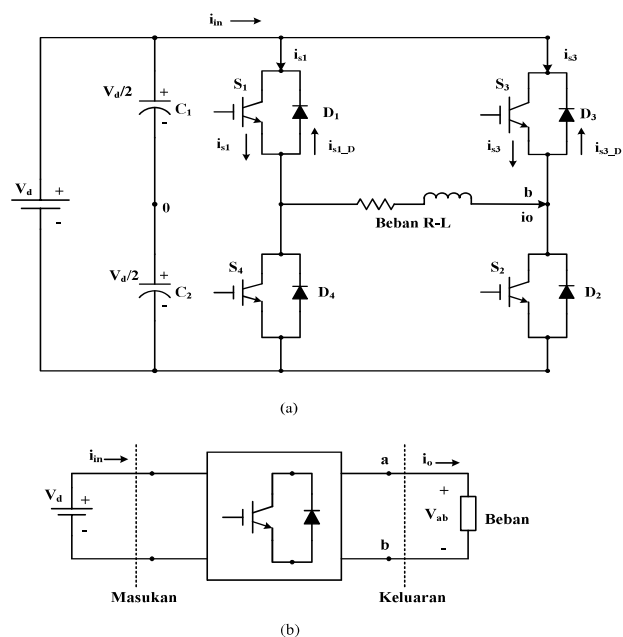
penyelakuan seperti pembolehubah-pembolehubah voltan dan arus serta jumlah herotan harmonik (THD_v) arus keluaran, dipersembahkan bagi menentusahkan kesahihan model yang dicadangkan. Salah satu parameter prestasi penyongsang ialah dengan mengukur THDnya (Rashid M. H. 2003). Akhir sekali, rumusan dan kesimpulan daripada konsep rangkap pensuisan dibincangkan.

TEORI AM RANGKAP PENSUISAN

Penukar kuasa kebiasaannya dimodelkan sebagai sebuah kotak hitam dengan liang masukan dan keluaran. Pembolehubah AU (arus ulang-alik) atau AT (arus terus) dijadikan sebagai masukan atau keluaran menurut mod operasi yang telah ditentukan (Enjeti & Ziogas 1990). Rangkap pindah sesuatu sistem ditakrifkan sebagai nisbah keluaran terhadap masukan. Maka, ia boleh dikembangkan bagi mengira suatu pembolehubah bersandar daripada pembolehubah tak bersandar. Secara amnya, untuk konsep rangkap pensuisan, rangkap pindah boleh ditakrifkan seperti persamaan di bawah (Weichmann et al. 1987).

$$\begin{aligned} \text{Rangkap pindah} &= \text{Pembolehubah bersandar} \div \text{Pembolehubah tak bersandar} \\ &= \text{Gelombang tanpa modulat} \div \text{Gelombang termodulat} \end{aligned}$$

Menerusi teori rangkap pensuisan, hubungan antara pembolehubah-pembolehubah masukan dan keluaran diperolehi. Justeru itu, pengiraan rangkap pensuisan yang tepat adalah sangat penting untuk menerangkan tentang peranan penukar kuasa statik seperti penyongsang. Sehubungan dengan itu, teori berkenaan rangkap pensuisan telah dikemukakan dengan panjang lebar dalam rujukan (Ziogas et al. 1985).



RAJAH. 1(a) Konfigurasi litar VSI titi satu fasa
(b) Pembolehubah masukan dan keluaran VSI

MODEL RANGKAP PENSUISAN UNTUK PWM-VSI SATU FASA

Rajah 1(a) menunjukkan konfigurasi litar penyongsang sumber voltan (VSI) titi satu fasa, manakala Rajah 1(b) pula menggambarkan pembolehubah-pembolehubah masukan dan keluaran yang dipertimbangkan dalam merekabentuk dan menganalisis litar tersebut. Berdasarkan pada teori rangkap pindah, arus masukan I_{in} dan voltan keluaran V_{ab} adalah dua pembolehubah bersandar, sedangkan voltan masukan V_d dan arus keluaran I_o adalah dua pembolehubah tak bersandar. Maka, hubungkait antara pembolehubah-pembolehubah masukan dan keluaran dapat diungkapkan sebagai,

$$V_{ab} = TF \cdot V_d \quad (1)$$

$$i_{in} = TF \cdot i_o \quad (2)$$

di mana TF adalah rangkap pindah untuk VSI satu fasa. Justeru itu, TF boleh diwakili atau dibahagikan kepada dua rangkap pensuisan iaitu,

$$TF = [SF_1, SF_2] \quad (3)$$

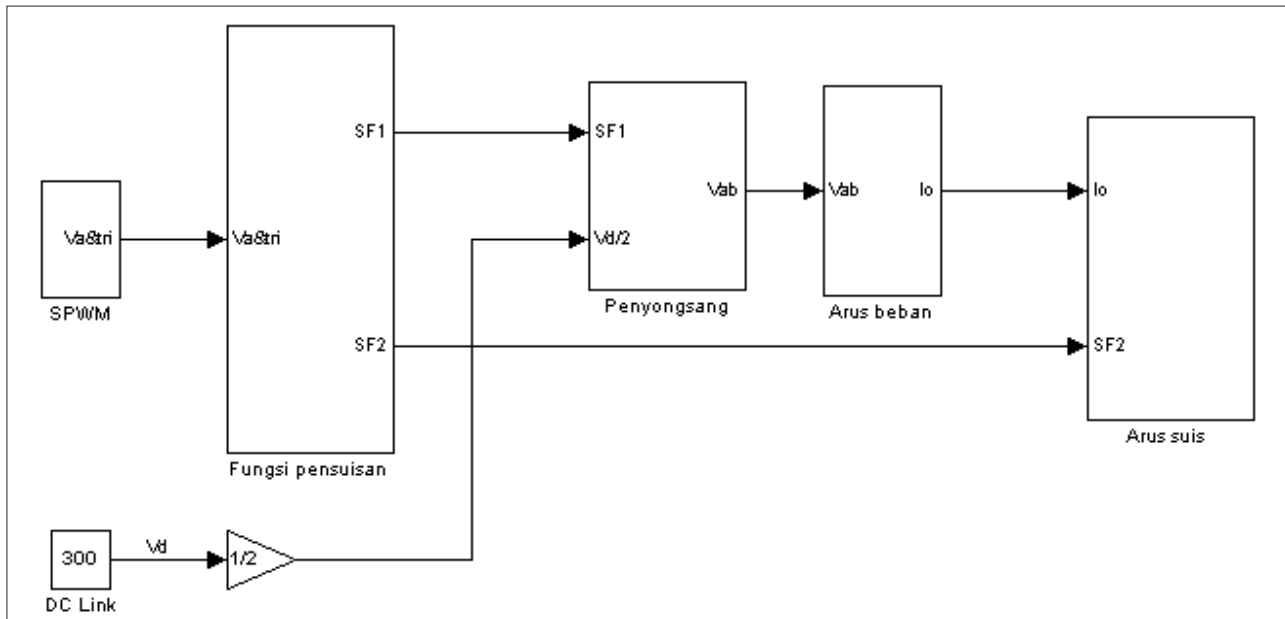
Teknik pemodulan lebar denyut bentuk sinus (SPWM) dipertimbangkan sebagai strategi kawalan. Antara

kelebihan strategi kawalan SPWM ialah kemampuan untuk menenggelamkan tertib harmonik yang lebih rendah daripada tertib harmonik frekuensi pensuisan (Wajiha Shireen et. al. 2006). Oleh itu, saiz komponen penapis yang lebih kecil boleh diaplikasikan. Dengan merujuk kepada SPWM, rangkap pensuisan SF_1 mengungkapkannya pembolehubah voltan V_{a0} dan V_{b0} masing-masing adalah voltan pada kaki- a dan kaki- b yang merujuk kepada titik 0. Manakala rangkap pensuisan SF_2 mengungkapkannya pembolehubah arus. Perwakilan matematik bagi SF_1 dan SF_2 diberikan seperti berikut (Ziogas et al. 1985), di mana masing-masing A_n dan B_n adalah amplitud SF_1 dan SF_2 , manakala B_0 adalah nilai komponen AT. Rajah

$$SF_1 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t) \quad (4)$$

$$SF_2 = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) \quad (5)$$

2 memperlihatkan keseluruhan model berangkap yang digunakan bagi mengira parameter PWM-VSI. Ia terdiri daripada blok penjana SPWM, blok rangkap pensuisan, blok penyongsang, blok arus beban, blok arus suis kuasa.



RAJAH 2. Tatarajah blok keseluruhan model PWM-VSI yang dicadangkan

Di dalam blok SPWM (ditunjukkan pada Rajah 3), V_{tri} dibandingkan dengan V_{con} dan keluarannya dimasukkan ke dalam blok rangkap pensuisan untuk menjana dua set isyarat rangkap pensuisan SF_1 dan SF_2 seperti ditunjukkan pada Rajah 4. Hasil darab antara $\frac{1}{2} V_d$ atau lebih dikenali dengan nama voltan penghubung AT (voltan yang merentasi kapasitor C_1 dan C_2) dan SF_1 , masing-masing menghasilkan nilai V_{a0} dan V_{b0} . Merujuk kepada Rajah 5, persamaan (6) hingga (8) merumuskan tentang voltan keluaran V_{ab} .

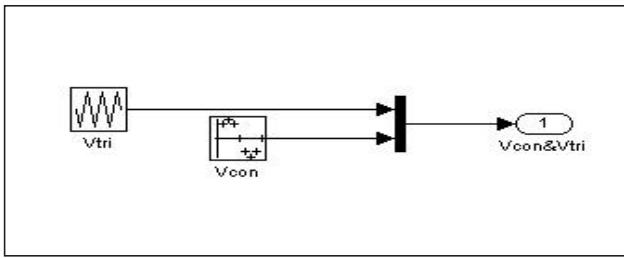
$$V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \quad (6)$$

di mana ,

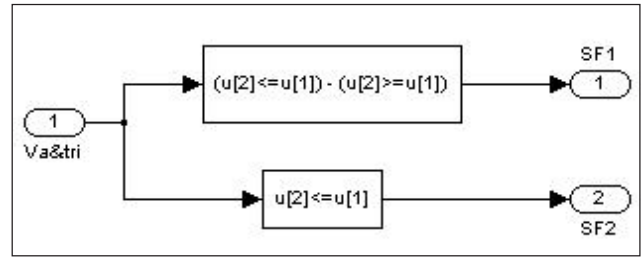
$$V_{a0} = \frac{V_d}{2} \cdot SF_1 = \frac{V_d}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t) = -V_{b0} \quad (7)$$

maka,

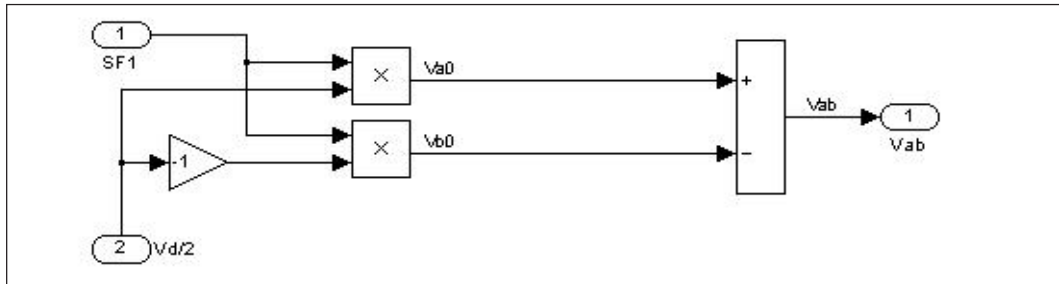
$$V_{ab} = V_d \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t) \quad (8)$$



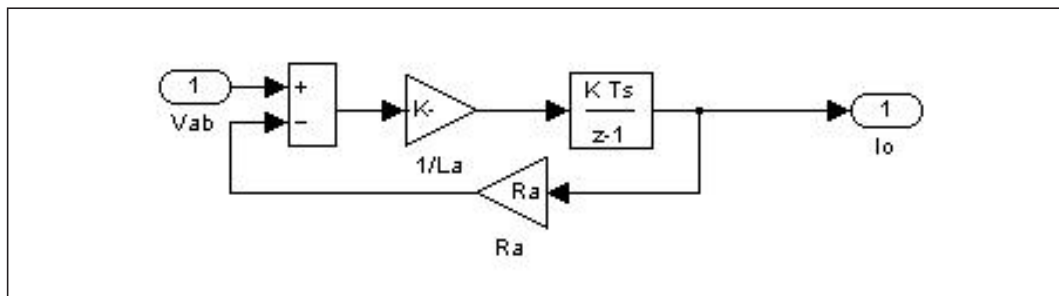
RAJAH 3. Tatarajah blok janaan V_{con} dan V_{tri}



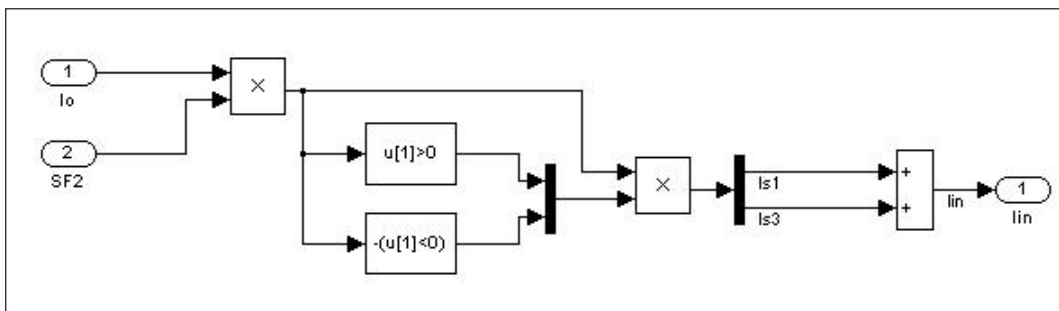
RAJAH 4. Tatarajah blok rangkap pensuisan, SF_1 dan SF_2



RAJAH 5. Tatarajah blok voltan keluaran V_{ab}



RAJAH 6. Tatarajah blok arus keluaran I_o



RAJAH 7. Tatarajah blok arus suis dan arus masukan penyongsang

Seterusnya, pembolehubah arus pula terbahagi kepada arus beban, I_o , arus suis, I_s dan arus masukan penyongsang, I_{in} . Arus beban I_o adalah nisbah voltan keluaran V_{ab} terhadap galangan R - L seimbang seperti yang dipaparkan pada Rajah 6. Arus suis, I_s adalah hasil darab I_o dengan rangkap pensuisan SF_2 , dengan itu persamaan untuk kedua-dua arus tersebut ialah,

$$I_o = \frac{V_{ab}}{R + j\omega L} \quad (9)$$

$$I_{sn} = I_o \cdot SF_2 \quad (10)$$

Arus masukan penyongsang I_{in} merupakan hasil tambah I_{s1} dan I_{s3} seperti yang ditunjukkan pada Rajah 7. THD_i yang terhasil daripada arus keluaran I_o dihitung mengikut persamaan di bawah,

$$\text{THD}_i = \frac{1}{I_{o,1}} \sqrt{\sum_{n=2,3,..}^{\infty} I_{o,n}^2} \quad (11)$$

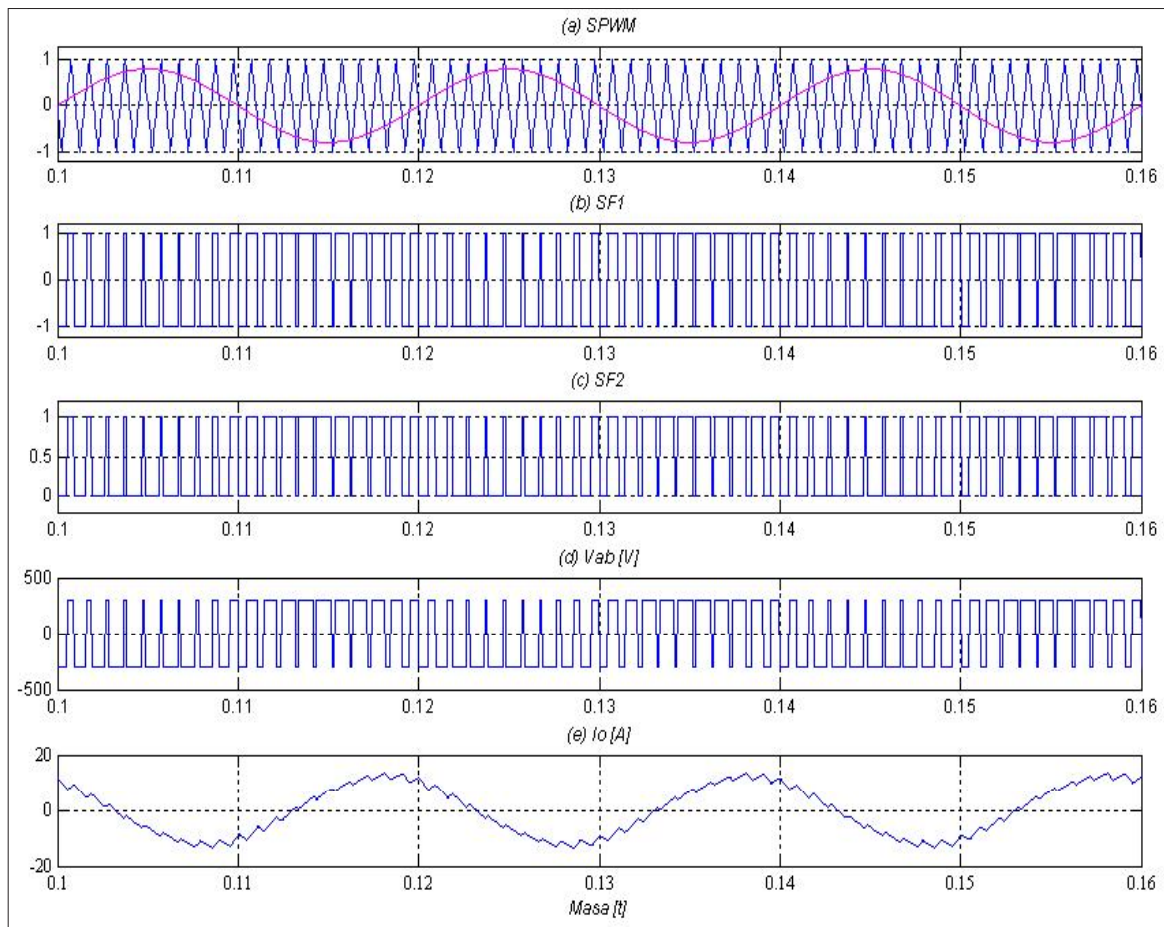
Model penyelakuan yang dilaksanakan dalam Matlab Simulink versi 2006a, dan dilarikan mengikut mod penyelesaian diskret boleh ubah. Parameter litar PWM-VSI satu fasa yang digunakan dalam penyelakuan ditunjukkan pada Jadual 1.

JADUAL 1. Parameter litar PWM-VSI satu fasa

Parameter	Nilai
Voltan masukan	$V_d = 300$ [V]
Beban perintang	$R = 10$ [Ω]
Beban induktor	$L = 50$ [mH]
Frekuensi fundamental	$f = 50$ [Hz]
Indeks pemodulat	$m = 0.80$
Frekuensi pensuisan	$f_s = 1$ [kHz]

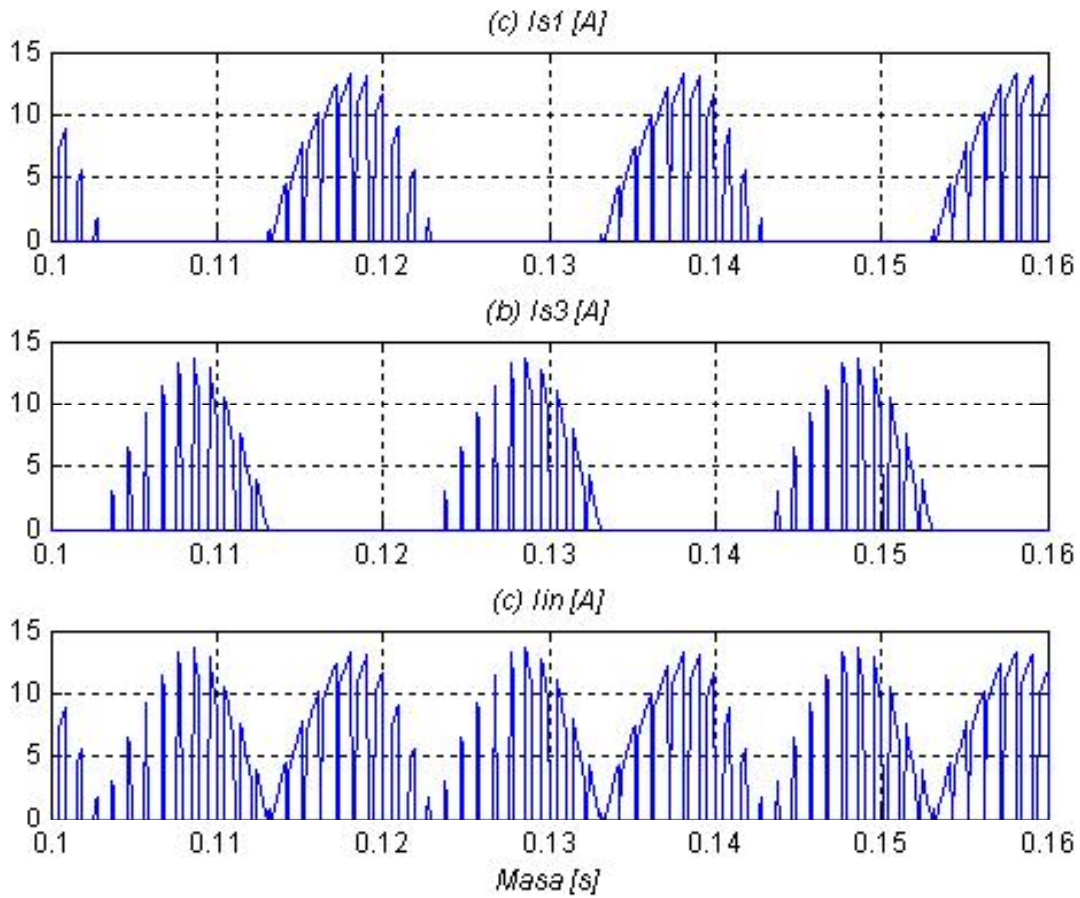
KEPUTUSAN DAN KESIMPULAN

Rajah 8(a), menunjukkan strategi kawalan SPWM yang dijana daripada perbandingan antara isyarat voltan kawalan bentuk sinusoid, V_{con} dengan isyarat pembawa berbentuk segitiga V_{tri} yang berfrekuensi tinggi, iaitu pada frekuensi pensuisan, f_s . Sedangkan Rajah 8(b) dan 8(c) memaparkan isyarat rangkap pensuisan berbentuk dedenyut, SF_1 dan SF_2 yang dihasilkan dari strategi kawalan SPWM ini. Dari janaan isyarat SF_1 ini voltan keluaran V_{ab} dan arus keluaran I_o diterbitkan seperti yang ditunjukkan pada Rajah 8(d) dan 8(e). Dapat diperhatikan bahawa nilai puncak untuk V_{ab} ialah 300 V dan nilai puncak untuk I_o ialah 12.3 A.

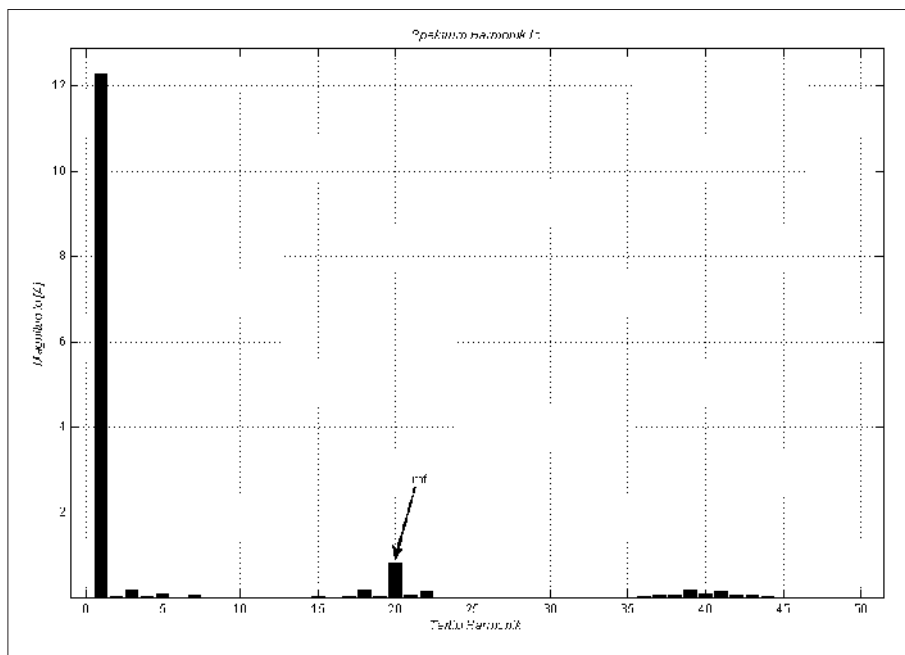


RAJAH 8. Bentuk gelombang (a) SPWM, (b) SF_1 , (c) SF_2 , (d) V_{ab} dan (e) I_o

Seterusnya, merujuk kepada Rajah 9(a), 9(b) dan 9(c), isyarat SF_2 digunakan dalam mendapatkan arus suis, I_{s1} dan I_{s3} dan arus masukan penyongsang, I_m dengan cara mendarabkan SF_2 dan I_o . Dapat disaksikan yang I_m adalah berbentuk AT.



RAJAH 9. Bentuk gelombang (a) I_{s1} , (b) I_{s3} dan (c) I_{in}



RAJAH 10. Spektrum THD_i untuk I_o ($m_f = 20$)

Kandungan THD_i bagi I_o adalah sekitar 7.7% berdasarkan spektrum harmonik I_o , diukur menggunakan teknik FFT, seperti yang dipaparkan pada Rajah 10. Harmonik tertinggi diukur pada tertib ke-20, iaitu pada indeks pemodulat frekuensi, m_f . Merujuk kepada (Mohan N. et al. 2004), dengan menggunakan strategi kawalan SPWM, magnitud spektrum THD_i tertinggi diukur pada m_f , berikutnya ($m_f \pm 2$), dan seterusnya, di mana magnitud THD_i akan semakin berkurangan. Oleh yang demikian, arus harmonik tertib rendah (sehingga tertib ke-17) telah ditenggelamkan oleh strategi kawalan SPWM. Oleh yang demikian, sekiranya nilai frekuensi f_s ditinggikan lagi, nilai induktans lebih kecil yang berfungsi sebagai penapis kandungan harmonik arus dapat digunakan, di mana saiz yang lebih kecil menjimatkan ruang binaan dan berat penyongsang.

Untuk ujian tempoh masa penyelakuan yang dilaksanakan pada komputer dengan pemproses 1.8 GHz dan RAM 512 MB, model berangkap yang dibangunkan telah dibandingkan dengan suatu model PWM-VSI yang berasaskan pemodelan fizikal menggunakan SymPowerSystems. Diperolehi, masa penyelakuan untuk model berangkap ialah 0.5608s manakala masa penyelakuan untuk model SymPowerSystems ialah 0.5708s bagi dua kitaran penuh 50 Hz. Dengan itu, model berangkap lebih pantas 10 ms daripada model SymPowerSystems. Keputusan ini adalah dijangka kerana model berangkap tidak memerlukan model fizikal penyongsang seperti komponen suis, snubber dan lain-lain semasa penyelakuan, menyebabkan masa pengiraan dapat dipendekkan.

Sesungguhnya model penyelakuan berangkap bagi PWM-VSI satu fasa menggunakan konsep pensuisan berangkap telah dikaji. Teori am rangkap pensuisan telah dikupas dan penerangan yang jitu telah diberikan. Juga, model penyelakuan berangkap tersebut ditentusahkan melalui beberapa keputusan penyelakuan yang berjaya dilakukan. Berdasarkan kepada keputusan penyelakuan yang dilaksanakan, model berangkap ini mampu dikembangkan kepada aplikasi penyongsang yang lain seperti penuras aktif, HVDC, DVR dan lain-lain. Justeru itu, adalah dijangkakan model yang diusulkan dalam kertas kerja ini boleh diaplikasikan dengan secara berkesan dalam merekabentuk dan menganalisis sistem penukar kuasa yang lain, seperti sistem penyongsang tiga fasa atau strategi kawalan PWM yang lain.

RUJUKAN

- Cui, B. 2007. Simulation of Inverter with Switch Open Faults Based on Switching Function. Proc. IEEE International Conference on Automation and Logistics, Jinan, China, 296 – 306.
- Dabney, J. B. & Harman, T. L. 2001. *Mastering Simulink 4*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Enjeti, P. N. & Ziogas, P. D. 1990. Analysis of a Static Converter Under Unbalance: A Novel Approach. *IEEE Trans. Ind. Electron* 37(1): 91-93.
- Mohan, N., Undeland T. M. & Robbins W. P. 2003. *Power Electronics, Converters, Applications and Design*.

- New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Rashid M. H. 2004. *Power Electronics Circuits, Devices, and Applications*. 3rd edition. New Jersey: Pearson Prentice Hall Inc.
- Salazar, L. & Joos, G. 1994. PSPICE Simulation of Three-Phase Inverters by Means of Switching Functions. *IEEE Trans. Power Electron* 9: 35-42.
- The Mathworks Inc. 2009. *Simulink 7 Getting Started Guide*. 3 Apple Hill Drive. Natick, MA. 01760-2098.
- Lee, B. K. & Ehsani, M. 2001. A Simplified Functional Simulation Model for Three-Phase Voltage-Source Inverter Using Switching Function Concept. *IEEE Trans. Ind. Electron* 48(2): 309-321.
- Van T. L. & Lee D. C. 2011. Developing Function Models of Back-to-Back PWM Converters for Simplified Simulation. *Journal of Power Electronics* 11(1): 51-58.
- Vitor Fernão Pires & Josê Fernando A. Silva. 2002. Teaching Nonlinear Modeling, Simulation, and Control of Electronic Power Converters Using MATLAB/SIMULINK. *IEEE Trans. Educ.* 45(3): 253-261.
- Wajiha Shireen, Kulkarni R. A. & Arefeen M. 2006. Analysis and Minimization of Input Ripple in PWM Inverters for Designing Reliable Fuel Cell Power System. *Journal Power Sources* 156: 448-454.
- Weichmann, E. P., Ziogas, P. D. & Stefanovic, V. R. 1987. Generalized Functional Model for Three-Phase PWM Inverter/Rectifier Converters. *IEEE Trans. Ind. Appl.* IA-23(2): 236-246.
- Ziogas, P. D., Weichmann, E. P. & Stefanovic, V. R. 1985. A Computer-Aided Analysis and Design Approach for Static Voltage Source Inverters. *IEEE Trans. Ind. Appl.* IA-21(5): 1234-1241.
- Yushaizad Yusof & Nasrudin Abd. Rahim. 2010. Penggunaan Matlab Simulink Dalam Pengajaran dan Pembelajaran Penukar Kuasa Mod Pensuisan Untuk Para Pelajar Pra-siswazah. *Asean Journal of Teaching and Learning in Higher Education* 2(1): 41-51.

Yushaizad Yusof *

Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Elektronik & Sistem,
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina,
Universiti Kebangsaan Malaysia.
43600 UKM, Bangi, Selangor.

Pusat Pengkhususan Tenaga Kuasa Termaju UM
(UMPEDAC)
Fakulti Kejuruteraan,
Universiti Malaya
50603 UM, Kuala Lumpur.

Nasrudin Abd. Rahim
Pusat Pengkhususan Tenaga Kuasa Termaju UM
(UMPEDAC)
Fakulti Kejuruteraan,
Universiti Malaya
50603 UM, Kuala Lumpur.

*Corresponding author: yushaiza@vlsi.eng.ukm.my

