

Ứng dụng vòng khóa pha Park cho bộ biến tần một pha nối lưới với phương pháp điều khiển dự đoán dòng

An application of parkPLL to single phase grid-connected inverters with predictive current control method

Nguyễn Hữu Nhân^a, Võ Tuấn^b, Dương Tấn Quốc^b
Huu Nhan Nguyen, Tuan Vo, Tan Quoc Duong

^a*Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Đại học Duy Tân, 03 Quang Trung, Đà Nẵng, Việt Nam*
Institute of Research and Development, Duy Tan University, 03 Quang Trung, Danang, Vietnam

^b*Khoa Điện - Điện Tử, Đại học Duy Tân, 03 Quang Trung, Đà Nẵng, Việt Nam*
Faculty of Electrical & Electronics Engineering, Duy Tan University, 03 Quang Trung, Danang, Vietnam

(Ngày nhận bài: 11/12/2018, ngày phản biện xong: 28/02/2019, ngày chấp nhận đăng: 01/04/2019)

Tóm tắt

Bài báo này trình bày một ứng dụng của vòng khóa pha Park (Park Phase-Locked Loop - parkPLL) để đạt được hệ số công suất đơn vị cho bộ biến tần một pha nối lưới. Bằng cách sử dụng bộ lọc toàn dải (All-pass filter), vòng khóa pha Park tạo được điện áp trễ pha 90 độ đóng vai trò là điện áp V_{β} . Cùng với việc sử dụng phương pháp điều khiển dự đoán dòng (Predictive Current Control Method - PCC Method), bộ biến tần cho đáp ứng tốt dưới 1 chu kỳ dòng điện đầu ra. Bài báo còn khảo sát ảnh hưởng của sai số của các thông số đo lên kết quả, từ đó giúp việc lập mô hình chính xác hơn. Tính chính xác của hệ thống được kiểm chứng bằng các kết quả mô phỏng.

Từ khóa: Bộ biến tần một pha nối lưới, vòng khóa pha Park, phương pháp điều khiển dự đoán dòng.

Abstract

This paper presents an application of Park phase-locked loop (parkPLL) with predictive current control method to achieve a unity power factor for single phase grid connected inverters. By using all-pass filter, the parkPLL can generate a 90-degree delay signal of output voltage as a beta component. In addition, the predictive current control method shows a good performance within a cycle of the output period. Moreover, this paper investigates the effect of parameter mismatch on the output performance which makes the model more accurate. The correctness of the system is confirmed through simulation results.

Keywords: Single phase grid connected inverters, parkPLL, predictive current control method.

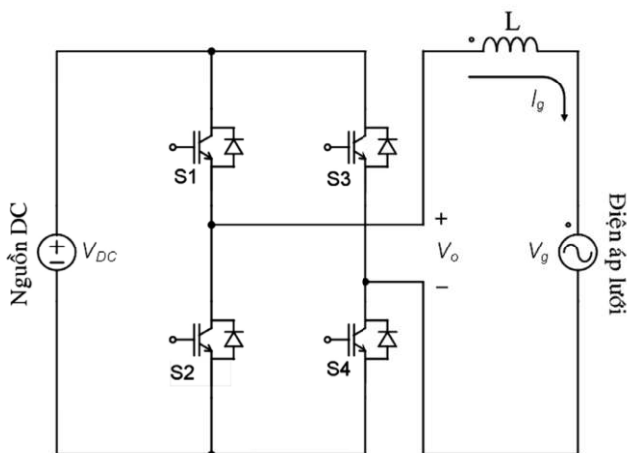
I. Giới thiệu

Vòng khóa pha (Phase-Locked Loop - PLL), cơ bản là một hệ thống dùng để ước lượng góc pha của điện áp, được sử dụng rất rộng rãi trong điện tử công suất cũng như hệ thống điện nhờ tính ổn định và dễ dàng thực thi của nó [1, 2]. Trong các loại vòng khóa pha thì vòng khóa pha

Park (Park Phase-Locked Loop - parkPLL) được sử dụng rộng rãi nhất do đáp ứng nhanh và ổn định [3]. Bài báo này giới thiệu một ứng dụng của vòng khóa pha Park (Park Phase-Locked Loop - parkPLL) cho bộ biến tần một pha nối lưới.

Có ba kỹ thuật chính được sử dụng để điều khiển dòng điện trong bộ biến tần nối lưới đó

là kỹ thuật dãi trễ (Hysteresis), so sánh độ dốc (Ramp Comparison) và phương pháp điều khiển dự đoán dòng (Predictive Current Control- PCC) [4]. Trong những năm gần đây phương pháp điều khiển dự đoán dòng được đặc biệt quan tâm do những ưu điểm của nó như điều khiển dòng điện chính xác với độ méo dạng và các sóng hài nhỏ. Khuyết điểm duy nhất của phương pháp điều khiển dự đoán dòng là thời gian tính toán lớn. Tuy nhiên cùng với sự phát triển của các vi xử lý tốc độ cao giá rẻ, việc thực thi phương pháp điều khiển dự đoán dòng ngày càng khả thi trong thực tế.



Hình 1. Bộ biến tần một pha nối lưới

Trong [5] và [6], các phương pháp điều khiển dự đoán dòng cho bộ biến tần một pha và ba pha nối lưới. Các phương pháp này có thể bù được sai số do lấy mẫu nhưng bộ điều khiển thiếu ổn định trong hệ thống thực tế. Trong [7], bộ điều khiển mờ được sử dụng cho bộ biến tần một pha nối lưới. Mặc dù bộ điều khiển mờ cho đáp ứng ổn định khi tải thay đổi nhưng đòi hỏi thời gian tính toán lớn. Trong [4], các tác giả đã trình bày một phương pháp điều khiển dự đoán dòng ổn định cho bộ biến tần một pha nối lưới. Tuy nhiên, điện áp đầu ra được ước lượng có sai số lớn.

Bằng cách thay đổi cách ước lượng điện áp đầu ra, bài báo này điều khiển bộ biến tần một pha nối lưới cho kết quả tốt hơn phương pháp được trình bày trong [4] với cùng thời gian tính toán và yêu cầu dữ liệu. Cùng với việc kết hợp với

vòng khóa pha Park (Park Phase-Locked Loop - parkPLL) để ước lượng pha và khóa pha, phương pháp điều khiển dự đoán dòng hệ thống biến tần một pha nối lưới có thể cho đáp ứng dưới 1 chu kỳ sóng ra. Kết quả của ứng dụng được xác minh bằng các kết quả mô phỏng.

II. Phương pháp điều khiển dự đoán dòng cho bộ biến tần một pha nối lưới

Một bộ biến tần một pha nối lưới có cấu hình như Hình 1. Với các ký hiệu như Hình 1, quan hệ giữa điện áp đầu ra của biến tần và điện áp lưới như sau [4]:

$$V_o = V_g + L \frac{dI_g}{dt} \quad (1)$$

trong đó V_o là điện áp đầu ra của biến tần và V_g là điện áp lưới, I_g là điện áp của lưới, và L là độ tự cảm của bộ lọc đầu ra.

Trong [4], điện áp đầu ra trung bình của biến tần được ước lượng như sau:

$$V_{o_av}[k] = V_{g_av}[k] + L \frac{I_g[k+1] - I_g[k]}{T_s} \quad (2)$$

trong đó $V_{o_av}[k]$ và $V_{g_av}[k]$ lần lượt là điện áp đầu ra của biến tần và điện áp lưới trung bình trong một chu kỳ lấy mẫu thứ k ; $I_g[k-1]$ và $I_g[k+1]$ lần lượt là dòng điện lưới tức thời tại thời điểm lấy mẫu thứ $(k-1)$ và $(k+1)$; T_s là chu kỳ lấy mẫu.

Tuy nhiên ước lượng này có độ chính xác thấp hơn biểu thức (3):

$$V_{o_av}[k] = V_{g_av}[k] + L \frac{I_g[k+1] - I_g[k-1]}{2T_s} \quad (3)$$

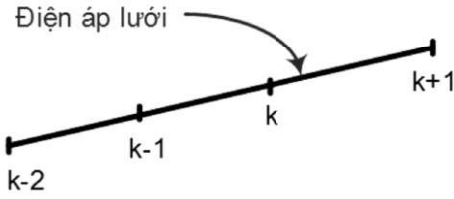
Phần chứng minh được trình bày trong Phụ lục.

Mục tiêu điều khiển là dòng điện lưới bằng dòng điện đặt, $I_g = I_{ref}$, do đó: $I_g[k+1] = I_{ref}[k+1]$. Khi đó biểu thức (3) được viết lại:

$$V_{o_av}[k] = V_{g_av}[k] + L \frac{I_{ref}[k+1] - I_g[k-1]}{2T_s} \quad (4)$$

Trong đó $V_{g_av}[k]$ được ước lượng bằng các dữ liệu trước đó như sau:

$$V_{g_av}[k] = \frac{V_g[k] + V_g[k+1]}{2} \quad (5)$$



Hình 2. Sơ đồ điện áp lưới theo thời gian

Giả thiết điện áp lưới biến thiên tuyến tính trong khoảng từ thời điểm lấy mẫu $[k-2]$ đến $[k+1]$ như Hình 2. Từ đó ta có:

$$V_g[k+1] - V_g[k] = V_g[k] - V_g[k-1] \quad (6)$$

Thay (6) vào (5) dẫn đến phương trình sau:

$$V_{g_av}[k] = \frac{3V_g[k] - V_g[k-1]}{2} \quad (7)$$

Tương tự:

$$V_g[k] - V_g[k-1] = V_g[k-1] - V_g[k-2] \quad (8)$$

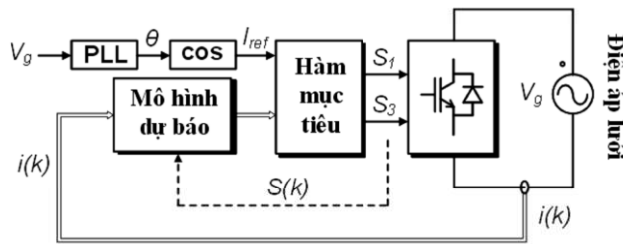
Thay (8) vào (7) cuối cùng ta được:

$$V_{g_av}[k] = \frac{5}{2}V_g[k-1] - \frac{3}{2}V_g[k-2] \quad (9)$$

Thay (9) vào (4) được kết quả để ước lượng giá trị điện áp đầu ra của biến tần tại thời điểm lấy mẫu thứ k như sau:

$$V_{o_av}[k] = \frac{5}{2}V_g[k-1] - \frac{3}{2}V_g[k-2] + L \frac{I_{ref}[k+1] - I_g[k-1]}{2T_s} \quad (10)$$

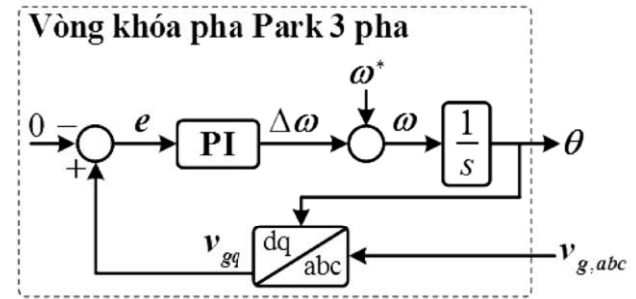
III. Vòng khóa pha Park cho bộ biến tần một pha nối lưới



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống biến tần một pha nối lưới với phương pháp điều khiển dự đoán dòng kết hợp vòng khóa pha Park.

Trong các bộ biến tần nối lưới nói chung, để đảm bảo hệ số công suất lưới cao nhất thì dòng điện lưới cần đồng pha với điện áp lưới. Do đó, việc xác định góc pha của điện áp lưới là cần

thiết. Một trong những phương pháp được sử dụng phổ biến nhất để xác định góc pha của điện áp lưới là dùng vòng khóa pha. Trong đó vòng khóa pha Park được sử dụng rộng rãi nhất [8, 9]. Sơ đồ nguyên lý toàn hệ thống kết hợp với vòng khóa pha Park được mô tả như Hình 3. Trong đó sơ đồ nguyên lý của một vòng khóa pha Park 3 pha được trình bày ở Hình 4. Trong đó điện áp vào phải là điện áp 3 pha. Do đó, để áp dụng vòng khóa pha Park cho bộ biến tần một pha, vốn dĩ chỉ có điện áp một pha, thì việc tạo ra điện áp trễ pha 90 độ đóng vai trò là điện áp V_β là cần thiết.

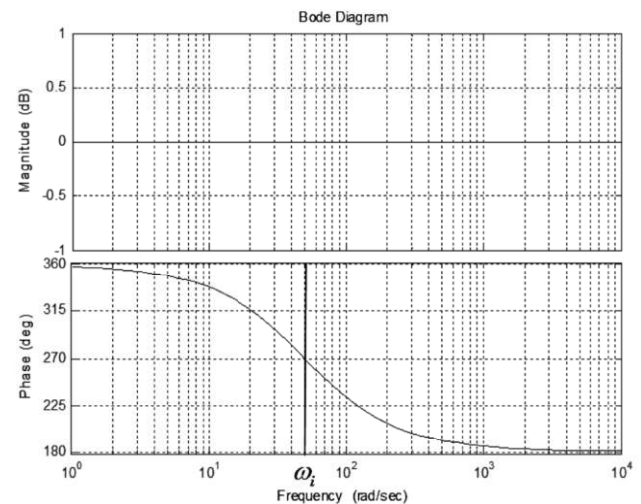


Hình 4. Vòng khóa pha Park 3 pha

Hàm truyền tổng quát của bộ lọc toàn dải là [10]:

$$G(s) = -\frac{s - \omega_c}{s + \omega_c} \quad (10)$$

trong đó ω_c là tần số góc cắt.

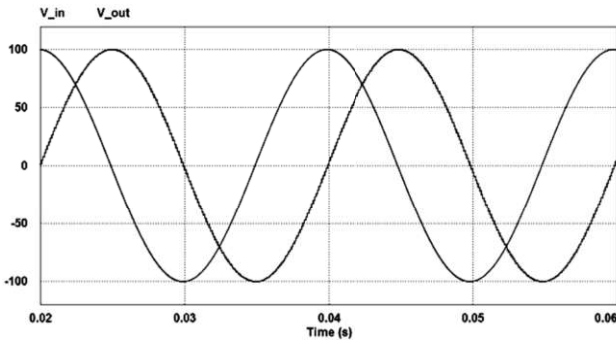


Hình 5. Biểu đồ Bode của bộ lọc toàn dải

Từ (10), biểu đồ Bode của bộ lọc toàn dải được biểu diễn như Hình 5. Từ biểu đồ Bode ta

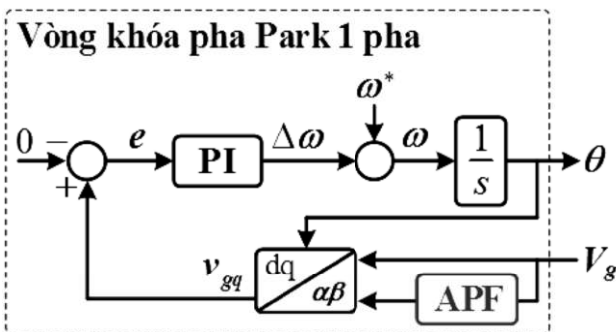
bộ lọc toàn dải không biến đổi biên độ tín hiệu và pha của tín hiệu bị trễ 90^0 tại vị trí $\omega_c = \omega_i$, với ω_i là tần số góc điện áp lưới. Do đó hàm truyền bộ lọc toàn dải cần thiết kế là:

$$G(s) = -\frac{s - \omega_i}{s + \omega_i} \quad (11)$$



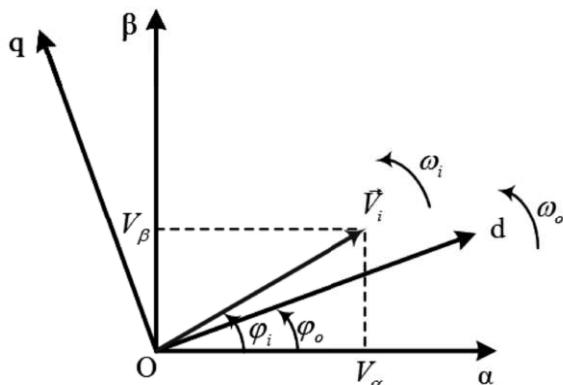
Hình 6. Đáp ứng của bộ lọc toàn dải

Đáp ứng của bộ lọc toàn dải được thể hiện như Hình 6. Như có thể thấy tín hiệu ra (đường màu xanh) cùng biên độ và trễ pha hơn tín hiệu vào (đường màu đỏ) một góc 90^0 .



Hình 7. Vòng khóa pha Park một pha

Cuối cùng, sơ đồ nguyên lý của vòng khóa pha Park cho hệ thống một pha được trình bày như trên Hình 7.



Hình 8. Giải đồ vector cho vòng khóa pha Park một pha

Giả sử góc pha được vòng khóa pha Park ước lượng là φ_o với tốc độ góc là ω_o , khi đó giản đồ vector cho vòng khóa pha Park được mô tả như Hình 8. Khi đó điện áp trên phương q là:

$$V_q = -V_\alpha \sin \varphi_o + V_\beta \cos \varphi_o = V_i \sin(\varphi_i - \varphi_o) \quad (12)$$

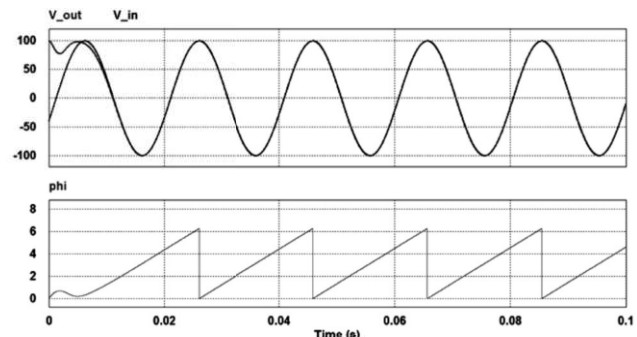
Phương trình (12) thể hiện sự sai số giữa góc đầu vào và góc ước lượng. Do đó đại lượng V_q trong phương trình (12) dùng để phát hiện pha (Phase Detector - PD).

IV. Kết quả mô phỏng

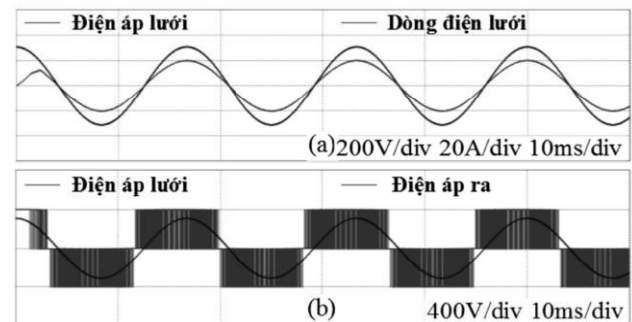
Kết quả mô phỏng được thực thi trên phần mềm mô phỏng Psim 9.0. Thông số của hệ thống được tóm tắt trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số mô phỏng

Nguồn DC	Điện áp lưới	Bộ lọc
$V_{DC} = 400 \text{ V}$	$V_g = 220 \text{ V(RMS)}$ $f = 60 \text{ Hz}$	$L = 15 \text{ mH}$



Hình 9. Đáp ứng của vòng khóa pha Park một pha

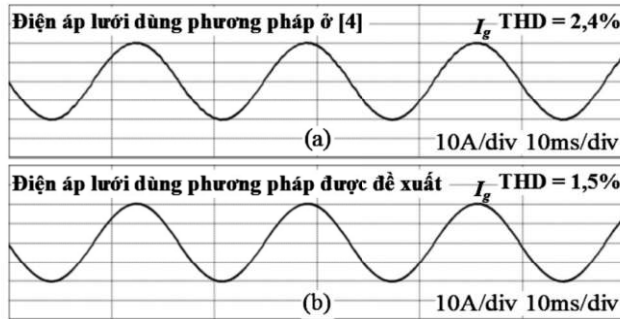


Hình 10. Đáp ứng hệ thống biến tần một pha nói lưới

Đáp ứng của vòng khóa pha Park cho hệ thống một pha được thể hiện như trên Hình 9. Như có thể thấy vòng khóa pha Park có thể phát hiện pha trong vòng nửa chu kỳ sóng và sóng đầu ra (màu đỏ) có trùng với sóng đầu vào (màu xanh) trong vòng nửa chu kỳ.

Đáp ứng của hệ thống biến tần một pha nối lưới sử dụng vòng khóa pha Park kết hợp với phương pháp điều khiển dự đoán dòng như Hình 10. Dòng điện lưới cùng pha với điện áp lưới như Hình 10(a). Do tính chất của bộ lọc tính cảm, điện áp lưới trễ pha hơn điện áp đầu ra của bộ biến tần một góc nhất định.

So sánh với kết quả được thực thi bằng ước lượng được sử dụng trong [4], phương pháp được đề xuất cho kết quả chất lượng dòng điện lưới tốt hơn. Cụ thể độ tổng độ méo dạng sóng hài giảm từ 2,4% xuống 1,5% như được trình bày trong Hình 11.



Hình 11. So sánh đáp ứng dòng điện lưới giữa (a) phương pháp trong [4] và (b) phương pháp được đề xuất

V. Kết luận

Bài báo đã trình bày một ứng dụng của vòng khóa pha Park cho hệ thống biến tần một pha nối lưới. Bằng cách kết hợp với phương pháp điều khiển dự đoán dòng, bộ biến tần cho đáp ứng tốt dưới 1 chu kỳ dòng điện đầu ra. Dòng điện lưới cùng pha với điện áp lưới. Đáp ứng của hệ thống được kiểm chứng bằng các kết quả mô phỏng.

Phụ lục

Khai triển chuỗi Taylor cho biểu thức cường độ dòng điện phía lưới tại thời điểm $(k+1)$ và $(k-1)$:

$$I_g(k+1) = I_g(k) + I'_g(k)T_s + \frac{I''_g(k)}{2}T_s^2 + O((T_s)^2) \quad (A1)$$

$$I_g(k-1) = I_g(k) - I'_g(k)T_s + \frac{I''_g(k)}{2}T_s^2 + O((T_s)^2) \quad (A2)$$

Từ (A1) ta có:

$$\frac{dI_g}{dt} = I'_g = \frac{I_g[k+1] - I_g[k]}{T_s} - \frac{I''_g(k)}{2}T_s + O(T_s) \quad (A3)$$

Từ (A1) và (A2) ta thu được:

$$\frac{dI_g}{dt} = I'_g = \frac{I_g[k+1] - I_g[k-1]}{2T_s} + O(T_s) \quad (A4)$$

So sánh (A3) và (A4) ta thấy (A4) cho ước lượng tốt hơn, do đó ước lượng điện áp đầu ra trung bình theo biểu thức (3) cho kết quả tốt hơn biểu thức (2).

Tài liệu tham khảo

- [1] F. D. Freijedo, J. Doval-Gandoy, O. Lopez, and E. Acha, "Tuning of phase-locked loops for power converters under distorted utility conditions," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 6, pp. 2039-2047, Nov./Dec. 2009.
- [2] S. Golestan, M. Ramezani, J. M. Guerrero, F. D. Freijedo, and M. Mon-fared, "Moving average filter based phase-locked loops: Performance analysis and design guidelines," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 2750-2763, Jun. 2014.
- [3] S. Golestan, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "A PLL-based controller for three-phase grid-connected power converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 2, pp. 911-916, Feb. 2018.
- [4] Kojabadi, H.M., Bin Yu, Gadoura, I.A., Liuchen Chang, Ghribi, M., "A Novel DSP-Based Current-Controlled PWM Strategy for Single Phase Grid Connected Inverters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, July 2006.
- [5] J. Holtz and S. Stadtfeld, "A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source," in *Proc. Annu. Meeting Int. Power Electron. Conf.*, 1983, pp. 1665-1675.
- [6] D. G. Holmes and D. A. Martin, "Implementation of a direct digital predictive current controller for single and three phase voltage source inverter," in *Proc. Annu. Meeting IEEE Ind. Appl.*, 1996, pp. 906-913.
- [7] S. Premrudeepreechacharn and T. Poapornsawan, "Fuzzy logic control of predictive current control for grid connected single phase inverter," in *Proc. 28th IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, Sep. 15-22, 2000, pp. 1715-1718.
- [8] Jos Rodriguez, Jorge Pontt, Cesar A. Silva, Pablo Correa, Pablo Lezana, Patricio Cortes, Ulrich Ammann, "Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, February 2007.
- [9] Keun-Young Kim, Sang-Hoon Park, Seung-Kyung Lee, Taeck-Kie Lee, Chung-Yuen Won, "Battery charging system for PHEV and EV using single phase AC-DC PWM buck converter", *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010 IEEE.
- [10] Ahmed Abu-Hajar, Ph.D, "Introduction to Phase Locked Loop".