



بسمه تعالی

کواهی ارائه مقاله

بدینوسیله کواهی می‌گردد که مقاله:

«ارائه روشی جدید برای جبران‌سازی اثرات افتشادات نامتعادلی و هارمونیک در سیستم حلقه‌ای فصل‌شونده‌ی فان»

(میرمختاری، علی‌اصغرقدیمی)

در بیست و دومین کنفرانس مهندسی برق ایران (ICEE ۲۰۱۴) ارائه گردید.



دیرکنفرانس
محمد عشقی

بیست و دومین کنفرانس مهندسی برق ایران

ارائه ی روشی جدید برای جبرانسازی اثرات اغتشاشات نامتعادلی و هارمونیک در سیستم حلقه ی قفل شونده ی فاز

میثم مختاری^۱ و علی اصغر قدیمی^۲

^۱دانشگاه اراک، m-mokhtary@arshad.araku.ac.ir

^۲دانشگاه اراک، a-ghadimimi@araku.ac.ir

چکیده: SRF-PLL به عنوان فراگیرترین PLL پایه در سنکرون سازی مورد استفاده قرار گیرد. اما در شرایط نامتعادلی ولتاژ و یا اغتشاشات هارمونیک این عملکرد با مشکل نوسانات قابل ملاحظه ای روبرو می شود. در این مقاله جهت رفع این مشکل و حذف نوسانات ایجاد شده توسط اغتشاشات هارمونیک، با استفاده از تبدیل پارک و محاسبه نوسانات خروجی تبدیل، و استفاده از عکس تبدیل پارک، مقدار اغتشاشات شبکه، چه از نوع هارمونیک و چه از نوع نامتعادلی به دست می آید و با کم کردن این اغتشاشات از ورودی سیستم، مقدار توالی مثبت شبکه، بدون هارمونیک و با دقت بسیار خوبی بدست می آید. نتایج شبیه سازی نشان از عملکرد مناسب روش پیشنهادی دارد.

کلید واژه: حلقه قفل شونده فاز - نامتعادلی - هارمونیک - SRF-PLL

۱ مقدمه

سه فاز مورد استفاده قرار گیرد [3] [و [4]. اما با وجود نامتعادلی ولتاژ و یا اغتشاشات هارمونیک، این عملکرد دچار اختلال شده و عملکرد سنکرون مبدل با شبکه به مشکل مواجه می شود. جهت رفع این مشکل و حذف نوسانات ایجاد شده توسط اغتشاشات هارمونیک، PLL های گوناگونی مبتنی بر SRF-PLL طراحی و ساخته شده است که عمدتاً با استخراج مؤلفه جهت استخراج مؤلفه توالی مثبت می توان از سه راهکار بهره برد: ۱- استخراج مؤلفه توالی مثبت سیگنال های ورودی در اولین طبقه با استفاده از معادله تبدیل قضیه ی فورتنسکیو و تغذیه PLL با سیگنال های کاملاً متعادل

۲- استخراج توالی مثبت سیگنال های $\alpha\beta$ با استفاده از معادله ۱

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha}^+ \\ v_{\beta}^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -e^{-j\frac{\pi}{2}} \\ e^{-j\frac{\pi}{2}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

با پیشرفت های اخیر در زمینه سیستم های انرژی نو و نیز اتصالات آنها به شبکه توزیع، مبدل های الکترونیک قدرت نیز به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته اند. با توجه به لزوم استفاده از انورترها برای متصل شدن به شبکه، می بایست جهت تزریق توان دلخواه و عملکرد مناسب، با شبکه هماهنگ یا به اصطلاح سنکرون باشند. سیستم حلقه ی قفل شونده ی فاز یا همان PLL^۱ جهت تشخیص فاز و فرکانس شبکه بکار گرفته می شود که ساختارهای مختلفی از جمله SRF-PLL^۲ برای آن ارائه شده است.

در شرایط ایده آل با سیگنال ورودی کاملاً سینوسی، SRF-PLL عملکرد سریع و دقیقی دارد که موجب شده است به عنوان فراگیرترین PLL پایه در سنکرون سازی

^۱ Phase-Locked Loop

^۲ Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a \sin(t + \varphi_a) \\ v_b \sin(t + \varphi_b) \\ v_c \sin(t + \varphi_c) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = P * \begin{bmatrix} v_a \sin(t + \varphi_a) \\ v_b \sin(t + \varphi_b) \\ v_c \sin(t + \varphi_c) \end{bmatrix} \quad (4)$$

اگر ولتاژهای ورودی رابطه ی (۱) متعادل باشند و θ در (۲) با شیب ω زیاد شود، هر سه عنصر تبدیل، مقدار مشخصی را بدون نوسان خواهند داشت. اما در صورتی که نامتعادلی در ورودی باشد، حاصل نوسانی خواهد بود. زیرا با توجه به شکل 1 و این موضوع که ورودی نامتعادل به معنی این است که ورودی سیستم (θ) نوسانی است، باعث نوسانی شدن سیگنال ها می شود. این موضوع را برای ورودی هارمونیک نیز می عنوان کرد. پس وجود نامتعادلی و هارمونیک در ولتاژ شبکه، باعث نوسانی شدن خروجی های مبدل شده و نتیجتاً باعث نوسان در فرکانس و زاویه ی خروجی می شود.

برای رفع مشکل تأثیر اغتشاشات بر روی رفتار سیستم حلقه ی قفل شونده ی فاز، روشهای مختلفی ارائه شده است. از جمله میتوان به قرار دادن فیلتر در حلقه ی کنترلی برای فیلتر کردن نوسانات مولفه های خروجی مبدل، نام برد. اما این کار باعث کند شدن سیستم و بعضاً با بالا رفتن مرتبه فیلتر، با جا به جایی قطبهای سیستم حلقه بسته، موجب ناپایداری سیستم می شود.

۳ ساختار روش پیشنهادی

در این مقاله برای رفع مشکل تأثیر نامتعادلی و هارمونیک شبکه بر روی رفتار سیستم تشخیص فاز، از رفتار مبدل پارک در نامتعادلی و هارمونیک شبکه استفاده شده است. می دانیم اگر در ولتاژ اعمالی نامتعادلی موجود باشد، با اعمال تبدیل، نوساناتی خروجی مبدل ایجاد می شود که دامنه نوسانات متناسب با مقدار نامتعادلی می باشد.

۳- فیلترینگ نوسانات سیگنال های dq در داخل حلقه و یا در یک طبقه اضافی در خارج از حلقه؛ در اینصورت اثرات نامتعادلی حذف می شود. مفاهیم کاربردی RF^۱، MAF^۲، MCCF^۳، DSC^۴ و VSPF^۵ در ساختارها و راهکارهای ارائه شده در [1]، [2]، [5]، [6] و [7] بکارگرفته شده است.

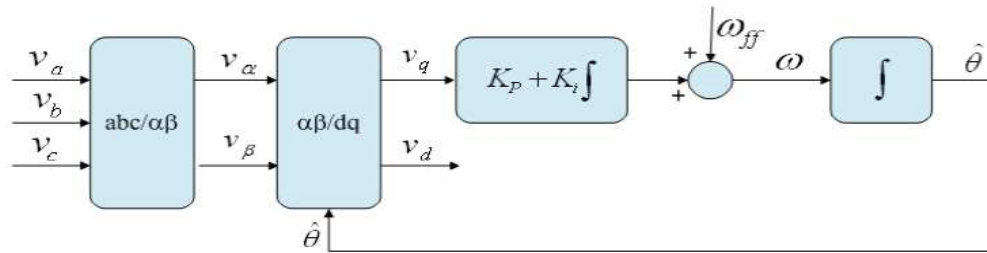
در این مقاله به بررسی ساختار جدیدی برای PLL پرداخته شده که با استفاده از مبدل dqo و بدست آوردن مقدار نوسانات و محاسبه ی دامنه هارمونیک شبکه و نامتعادلی ولتاژ، از روی این نوسانات و کم کردن این اغتشاشات از ولتاژ نمونه گیری شده، ولتاژ متعادل به سیستم اعمال میشود. مزیت روش پیشنهادی در این است که به دلیل قرار نگرفتن فیلتر در سیستم حلقه بسته، تأثیر مخربی در قطب های سیستم نداشته و موجب ناپایداری نمی شود و همچنین سادگی در طراحی و پیاده سازی نیز از دیگر محاسن این ساختار می باشد.

۲ عملکرد SRF-PLL در شرایط اغتشاشی

شبکه

ساختار کلی PLL در [۹] به طور مفصل به ساختار کلی سیستم حلقه ی قفل شونده ی فاز پرداخته شده است. در شکل ۱ ساختار کلی SRF-PLL آورده شده است. مهمترین بخش این PLL بلوک تبدیل پارک است که قاب مرجع را از قاب مرجع ساکن α - β به قاب مرجع سنکرون گردشی d-q تغییر می دهد [8]. بلوک تبدیل پارک در واقع وظیفه ی مقایسه کننده را بازی می کند. در واقع سیستم مولفه ی عمودی ولتاژ (v_q) را به سمت صفر هدایت می کند. هر گاه زاویه ی اعمالی به مبدل، به زاویه ی v_α هم فاز باشد، خروجی مبدل، یعنی v_q صفر می شود. پس با توجه به حلقه ی کنترلی، این امر میسر می شود. با استفاده از ماتریس تبدیل dqo، در حالتی که ورودی نامتعادل باشد، داریم:

1. Resonant Filter
2. Moving Average Filter
3. Multiple Complex-Coefficient Filters
4. Delayed Signal Cancellation
5. Variable Sampling Period Filter

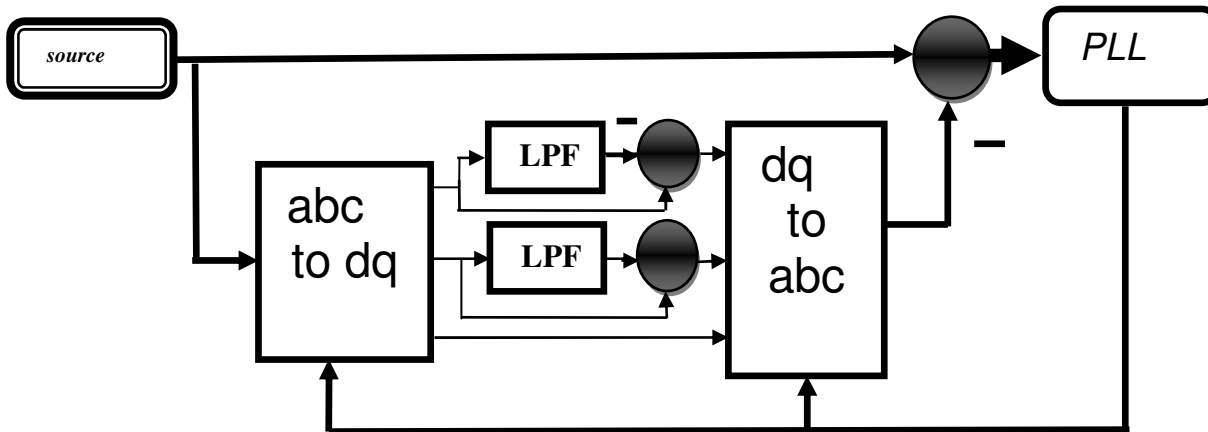


شکل ۱: ساختار کلی PLL

محاسبه شده شیفیت فازی ایجاد کند. زیرا این موضوع باعث می شود جبرانگر با تأخیر مقدار نامتعادلی یا هارمونیک شبکه را محاسبه کرده و نتیجتاً نتوان خروجی مطلوب را بدست آورد. در این مقاله با استفاده از فیلتر پایین گذر مقدار متوسط سیگنال بدست می آید و نتیجه از ورودی کم می شود باعث می شود نتایج بسیار مطلوب باشد.

پس از کم کردن اغتشاشات از ولتاژ ورودی، با استفاده از یک SRF-PLL ساده می توان به راحتی فاز شبکه را تخمین زد.

با استفاده از این حقیقت، نتیجه می گیریم که با اندازه گیری این نوسانات، و استفاده از عکس تبدیل پارک، می توان مقدار نامتعادلی را محاسبه و از ولتاژهای اصلی کم کرد. با این عمل می توان به توالی مثبت ولتاژ شبکه، بدون هیچ نامتعادلی، دست یافت. شکل ۲ طرح بلوکی روش پیشنهادی را نشان می دهد. برای مبدل های پارک موجود در جبرانگر، از یک سیگنال شیب با شیب برابر فرکانس زاویه ای شبکه، به عنوان زاویه استفاده شده است. در این طرح، برای فیلتر کردن بخش dc خروجی مبدل های جبران گر از فیلترهای مختلفی می توان استفاده نمود. اما دقت به این موضوع که فیلتر مورد استفاده نباید در نوسانات



شکل ۲: طرح بلوکی روش پیشنهادی

هارمونیک پنجم در ولتاژ بین دو ساختار، در شکل های ۵ و ۶ انجام شده است.

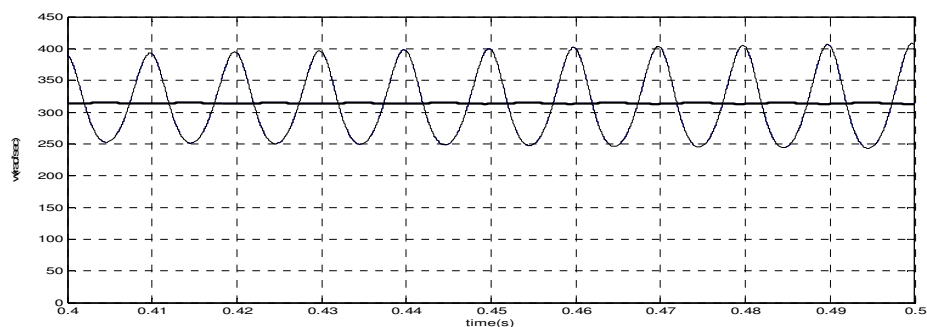
در شکل ۳ تأثیر نامتعادلی بر روی عملکرد SRF-PLL باعث نوسانی شدن سرعت زاویه ای تخمین زده شده می شود. اما ساختار پیشنهادی عملکرد قابل قبولی داشته است.

در شکل ۵، تأثیر مخرب هارمونیک شبکه بر روی خروجی SRF-PLL قابل مشاهده است. اما همچنان

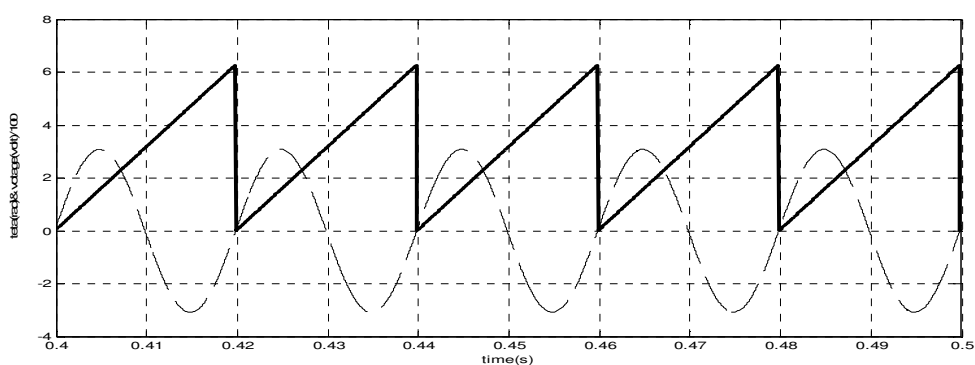
۴ شبیه سازی و مقایسه

در تین بخش نتایج شبیه سازی عملکرد SRF-PLL با روش پیشنهادی این مقاله مقایسه شده است. این شبیه سازی در نرم افزار powersim انجام شده است. این شبیه سازی در شکل ۳ و ۴ نتایج SRF-PLL و نتایج ساختار پیشنهادی در حضور ۳۰ درصد نامتعادلی را با هم مقایسه می کند. همچنین این مقایسه در ۱۰ درصد نامتعادلی و ۲۰ درصد هارمونیک سوم و ۱۰ درصد

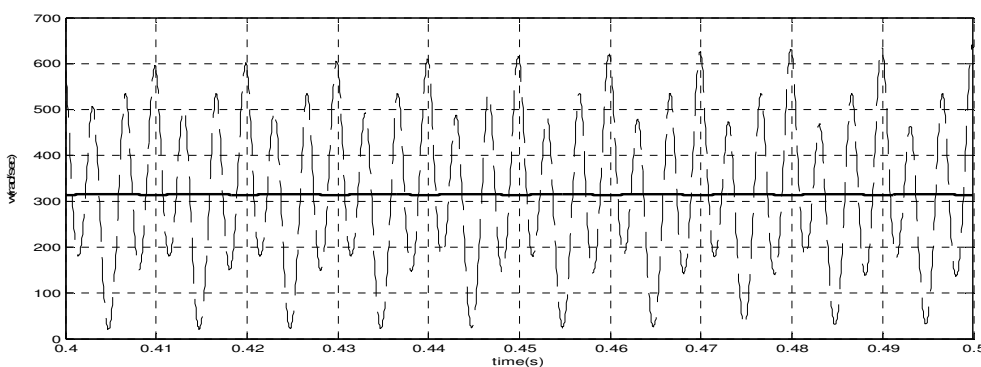
عملکرد ساختار پیشنهادی در این شرایط نیز بسیار مناسب به نظر می رسد.



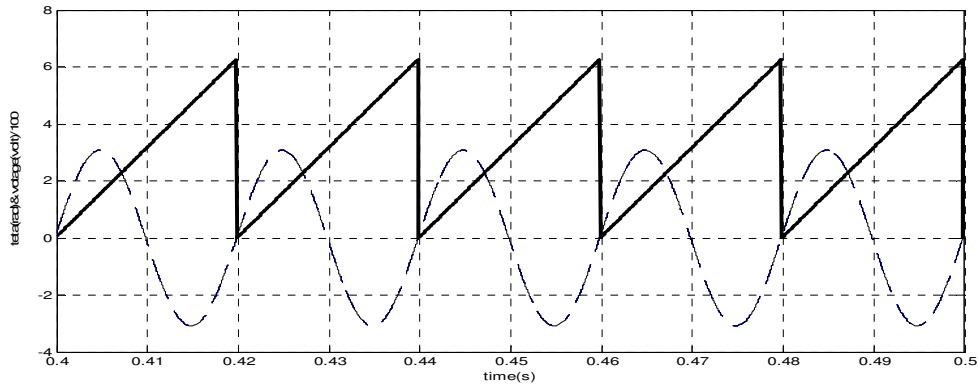
شکل ۳: مقایسه سرعت زاویه ای تخمین زده شده با SRF-PLL (کم رنگ) و ساختار پیشنهادی (پر رنگ) در ۳۰ درصد نامتعادلی و بودن هارمونیک در ولتاژ شبکه



شکل ۴: مقایسه زاویه ای تخمین زده شده با ساختار پیشنهادی (خط ممتد) و توالی مثبت ولتاژ شبکه (خط چین) ، در حضور ۳۰ درصد نامتعادلی



شکل ۵: مقایسه سرعت زاویه ای تخمین زده شده با SRF-PLL (خط چین) و ساختار پیشنهادی (خط متدد پررنگ) در ۱۰ درصد نامتعادلی و ۲۰ درصد هارمونیک سوم و ۱۰ درصد هارمونیک پنجم در ولتاژ شبکه



شکل ۶: مقایسه زاویه ای تخمین زده شده با ساختار پیشنهادی (خط پر رنگ) و توالی مثبت ولتاژ شبکه، در ۱۰ درصد نامتعادلی و ۲۰ درصد هارمونیک سوم و ۱۰ درصد هارمونیک پنجم در ولتاژ شبکه به همراه ولتاژ هارمونیک اول شبکه

۶ مراجع

- [1] Lisheng Shi; Crow, M.L., "A novel PLL system based on adaptive resonant filter," *Power Symposium, 2008. NAPS '08. 40th North American*, vol., no., pp.1,8, 28-30 Sept. 2008
- [2] Carugati, I.; Maestri, S.; Donato, P.G.; Carrica, D.; Benedetti, M., "Variable Sampling Period Filter PLL for Distorted Three-Phase Systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.27, no.1, pp.321,330, Jan. 2012
- [3] G. Escobar, M. F. Martinez-Montejano, A. A. Valdez, P. R. Martinez, and M. Hernandez-Gomez, "Fixed-reference-frame phase-locked loop for grid synchronization under unbalanced operation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1943–1951, May 2011.
- [4] Liccardo, F.; Marino, P.; Raimondo, G., "Robust and Fast Three-Phase PLL Tracking System," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.58, no.1, pp.221,231, Jan. 2011
- [5] Robles, E.; Ceballos, S.; Pou, J.; Martín, J.L.; Zaragoza, J.;

همان طور که مشخص است این ساختار توانسته به خوبی نامتعادلی و هارمونیک شبکه را حذف کند و به خوبی روی توالی مثبت شبکه قفل شود.

۵ نتیجه گیری

با وارد شدن مبدل های الکترونیک قدرت در عرصه ی سیستم های قدرت تشخیص فاز و فرکانس شبکه اهمیت بالایی پیدا کرده است. سیستم حلقه ی قفل شونده ی فاز بهترین سیستم برای این کاربردها می باشد که ساختارهای مختلفی برای آن ارائه شده است. در شرایط ایده آل با سیگنال ورودی کاملاً سینوسی، SRF-PLL عملکرد سریع و دقیقی را با پهنای باند بالا دارد که این امر موجب شده است به عنوان فراگیرترین PLL پایه در سنکرون سازی سه فاز مورد استفاده قرار گیرد [3] و [4]. اما زمانی که شبکه در نامتعادلی ولتاژ و یا اغتشاشات هارمونیکی قرارگیرد این عملکرد مناسب با مشکل خطای ماندگار قابل ملاحظه ای روبرو می شود. در این مقاله جهت رفع این مشکل و حذف نوسانات ایجاد شده توسط اغتشاشات هارمونیکی، با استفاده از تبدیل پارک و محاسبه توسانات خروجی تبدیل، و استفاده از عکس تبدیل پارک، مقدار اغتشاشات شبکه، چه از نوع هارمونیک و چه از نوع نامتعادلی ب دست می آید و با کم کردن این اغتشاشات از ورودی سیستم، مقدار توالی مثبت شبکه، بدون هارمونیک و با دقت بسیار خوبی بدست می آید. از مزیت های این سیستم می توان به سادگی پیاده سازی و عملکرد در اغتشاشات زیاد شبکه اشاره کرد.

Ibañez, P., "Variable-Frequency Grid-Sequence Detector Based on a Quasi-Ideal Low-Pass Filter Stage and a Phase-Locked Loop," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.25, no.10, pp.2552,2563, Oct. 2010

[6] Xiaoqiang Guo; Weiyang Wu; Zhe Chen, "Multiple-Complex Coefficient-Filter-Based Phase-Locked Loop and Synchronization Technique for Three-Phase Grid-Interfaced Converters in Distributed Utility Networks," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.58, no.4, pp.1194,1204, April 2011

[7] Yi Fei Wang; Yun Wei Li, "Grid Synchronization PLL Based on Cascaded Delayed Signal Cancellation," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.26, no.7, pp.1987,1997, July 2011

[8] Rodriguez, P.; Luna, A.; Teodorescu, R.; Blaabjerg, F., "Grid Synchronization of Wind Turbine Converters under Transient Grid Faults using a Double Synchronous Reference Frame PLL," *Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE*, vol., no., pp.1,8, 17-18 Nov. 2008

[9] H.Mahdian, M.Hashemi, A. A. Ghadimi "Improvement in the Synchronization Process of the Voltage-Sourced Converters Connected to the Grid by PLL in order to Detect and Block the Double Frequency Disturbance Term" *Indian Journal of Science and Technology*, Jul. 2013, vol. 6, no.7,pp. 4940-4952