



تعیین سریع دامنه و فرکانس ولتاژ و جریان در محیطهای هارمونیک و فرکانس متغیر جهت کنترل و حفاظت مناسب

مهدي چوپاني حسین عسکریان ابیانه سید حمید فتحی رضا محمدی
Mahdi.choopani@gmail.com Askarian@aut.ac.ir fathi@aut.ac.ir reza_rmch@yahoo.com
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده - امروزه با افزایش واحدهای تولید پراکنده و استفاده از ادوات الکترونیک قدرت، مسائل و نیازهای مختلفی در طراحی، کنترل و حفاظت از شبکه‌های صنعتی و قدرت بوجود آمده است. یکی از این موضوعات و مسائل مهم می‌توان به تخمین مولفه‌های ولتاژ و جریان (مولفه مثبت دامنه، فرکانس و فاز لحظه‌ای) با دقت بالا و همچنین دینامیک سریع در تشخیص مناسب و دقیق تغییرات این مولفه‌ها اشاره کرد. در این مقاله ابتدا به بررسی لزوم تخمین دقیق مولفه‌های ولتاژ و جریان پرداخته می‌شود، در ادامه روشی بر مبنای حلقه قفل فاز معرفی می‌شود، که دارای دینامیک سریع و مناسب برای محیطهای هارمونیک است. سپس معادلات زمان گسسته، برای پیاده‌سازی عملی و دیجیتالی آورده شده است، و نتایج شبیه‌سازی بر مبنای معادلات زمان گسسته در MATLAB و PSCAD ارائه شده است.
کلید واژه- تخمین فرکانس، PLL، منابع تولید پراکنده، هارمونیک

جزیره‌ای^۱ یا مجزا^۲ عمل می‌کند، اجازه تغییرات فرکانس به سیستم داده می‌شود. که حتی در مواردی فرکانس تا ۵ هرتز می‌تواند تغییر کند [۱]. بعلاوه بدلیل قطع برق، کارخانه‌های صنعتی انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را بصورت محلی و از نیروگاههای داخلی تامین می‌کنند، مسئله تغییر و تشخیص فرکانس در این حالت اهمیت خاصی دارد. مخصوصاً زمانی که اتصال کوتاه رخ دهد، که در این صورت علاوه بر تغییر فرکانس، موضوع تغییر ناگهانی دامنه و پرش زاویه فاز مطرح می‌شود.

۲- روش‌های معمول تخمین فاز، فرکانس و دامنه

در سیستمهای قدرت به دو دلیل تشخیص و تخمین شکل موج، با مشکل روبرو می‌شود:
(۱) وجود مولفه‌های هارمونیک: معمولاً در سیستمهای صنعتی که از عناصر الکترونیک قدرت استفاده می‌کنند، و در بیشتر محیطهای صنعتی دیگر نظیر کوره‌های القایی این مسئله وجود دارد.

۱- مقدمه

امروزه با افزایش استفاده از واحدهای تولید پراکنده و همچنین استفاده از ادوات الکترونیک قدرت در سیستمها و مجتمع‌های صنعتی، خطوط تولیدی و کنترل سرعت موتورهای تخمین فرکانس، پیک دامنه و زاویه لحظه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است، به عنوان نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- (۱) در سیستمهای ASD و کنترل دور مجتمع‌های صنعتی و پتروشیمی، باید با اطلاع دقیق از دامنه مولفه کنترل (ولتاژ یا جریان) به کنترل زاویه آتش پرداخت.
- (۲) برای اعمال پالس آتش باید زاویه فاز سیستم و لحظه دقیق عبور توالی مثبت از صفر مشخص باشد.
- (۳) در اتصال شبکه‌ها به همدیگر و همچنین اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه اطلاع دقیق از وضعیت ولتاژ و جریان موضوعی غیر قابل اجتناب است، هر چند که شاید تغییرات فرکانس در شبکه قدرت ناچیز باشد، اما باید توجه داشت در حالتی که سیستم بصورت

¹ Islanding

² Stand-alone

شکل (۱): بلوک دیاگرام هسته مرکزی EPLL

سرعت دینامیکی EPLL به ضرایب کنترلی آن بستگی دارد، در شکل (۱)، این ضرایب با K, K_i, K_p آورده شده است [۴].

خروجی‌های EPLL دامنه، فاز و فرکانس است، تابع تبدیل هر کدام از این خروجی‌ها می‌تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$H_c(s) = \frac{num(s)}{den(s)} \quad (1)$$

$$den(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (2)$$

که در آن:

$$\xi\omega_n = \frac{3}{4} K_p \quad (3)$$

$$\tau = \frac{K_p}{K_i} = \frac{2\xi}{\omega_n} \quad (4)$$

دو ترم $\xi\omega_n$ و τ (ثابت زمانی) سرعت دینامیکی EPLL را مشخص می‌کنند، طبیعی است که برای داشتن پاسخ دینامیکی سریع، $\xi\omega_n$ باید افزایش یابد و ثابت زمانی τ باید کاهش یابد، برای این منظور باید K_p, K_i را افزایش داد.

اما با افزایش ضرایب، پهنای باند سیستم هم افزایش می‌یابد که سبب می‌شود EPLL در محیطهای هارمونیک عملکرد ضعیفی داشته باشد.

در [۵] استفاده از فیلتر پایین گذر در درون هسته مرکزی EPLL پیشنهاد شده است. در این شرایط هر چند سیستم در حالت مانا عملکرد مطلوبی دارد، اما زمانی که فرکانس یا دامنه تغییر ناگهانی دارد عملکرد سیستم بسیار کند است.

۳-۱ حذف هارمونیکها در EPLL

در این مقاله استفاده از فیلتر در حلقه خارجی مطابق شکل (۲) پیشنهاد شده است.

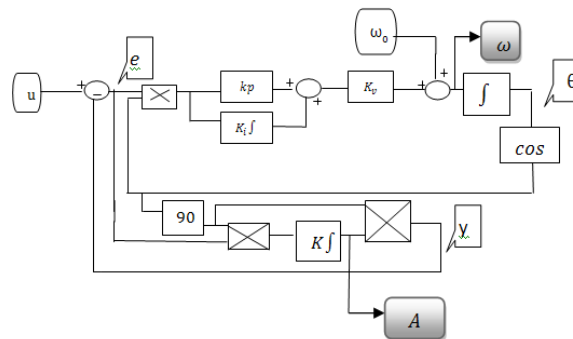
(۲) پرش فاز سیستم در اتصال کوتاههای نامتقارن: در اتصال کوتاههای نامتقارن، بدلیل عملکرد مولفه‌های توالی مثبت و منفی، پرش فاز لحظه‌ای بوجود می‌آید [۲]. بعنوان مثال در اتصال کوتاه تکفاز به زمین، ممکن است تا ۳۰ درجه پرش زاویه فاز بوجود آید. در صورتی که سیستم کنترلی قادر به تشخیص این موضوع نباشد، می‌تواند عملکرد تجهیزات را تحت تاثیر قرار دهد و حتی موجب اضافه جریان^۳ و خروج سیستم شود.

یکی از روشهای متداول تخمین مولفه‌های ولتاژ و جریان استفاده از تبدیل فوریه است. اما در محیطهای هارمونیک این روش نمی‌تواند فرکانس را با سرعت و دقت مناسب تشخیص دهد. و در نتیجه محاسبه ضرایب مولفه‌های اصلی ولتاژ و جریان با خطا همراه می‌شود. و هر ۳ مولفه دامنه، فرکانس و فاز سیستم با خطا تخمین زده می‌شود.

۳- تخمین فرکانس مبتنی بر EPLL

حلقه‌های قفل فاز (PLL) در سنکرونیزاسیون ادوات الکترونیک قدرت بسیار گسترش پیدا کرده است. ساختارهای مختلفی برای حلقه‌های قفل فاز پیشنهاد شده است، که معمولا براساس انتقال به قاب dq عمل می‌کنند.

روشی که در اینجا معرفی می‌شود، روشی مبتنی بر EPLL است [۳]. که در شکل (۱) بلوک دیاگرام ساختار اصلی آن آورده شده است. می‌توان EPLL را یک فیلتر تطبیقی غیر خطی دانست، که با شکل ساده خود قابلیت‌های بالایی در سنکرونیزاسیون و استخراج دامنه، فرکانس و فاز سیستم دارد [۳].



³ Overcurrent

$$\begin{cases} A[n+1] = A[n] + \mu_1 e[n] \sin(\phi[n]) \\ \phi[n+1] = \phi[n] + T_s \omega[n] + \mu_2 e[n] \cos(\phi[n]) \\ \omega[n+1] = \omega[n](1 + \mu_4) + \mu_2 e[n] \cos(\phi[n]) - \mu_4 \omega[n-1] \\ e[n+1] = u[n+1] - A[n+1] \sin(\phi[n+1]) \end{cases} \quad (7)$$

که در آن:

$$\begin{cases} \mu_1 = KT \\ \mu_2 = K_i T_s \\ \mu_3 = K_p K_v T_s \\ \mu_4 = K_v T_s \end{cases} \quad (8)$$

و T_s ، زمان نمونه برداری است.

برای فیلتر پایین گذر نیز باید معادلات گسسته آن را نوشت، همانطور که در رابطه (۶) بیان شد، فیلتر پایین-گذر را می توان به ۲ فیلتر پایین گذر مرتبه اول تجزیه کرد، به همین دلیل کافی است معادلات گسسته را تنها برای یکی از فیلترهای مرتبه اول بدست آورد و خروجی این فیلتر را ورودی فیلتر دوم در نظر گرفت:

$$C_1(s) = \frac{\omega_1}{s + \omega_1} B(s) \quad (9)$$

در این رابطه B و C بترتیب ورودی و خروجی فیلتر پایین گذر هستند. اگر معادله بالا را به روش دوزنقه ای گسسته کنیم خواهیم داشت:

$$C[n+1] = a_1 C[n] + a_2 B[n+1] \quad (10)$$

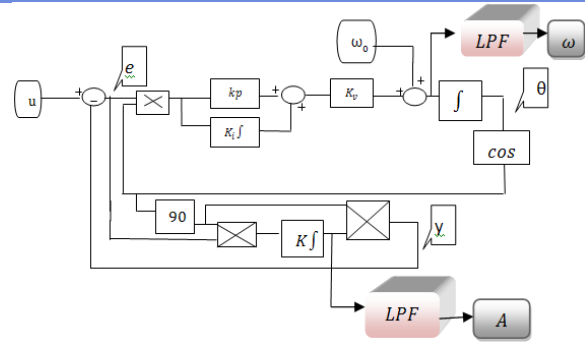
$$\begin{cases} a_1 = \frac{2 - T_s \times \omega}{2 + T_s \times \omega} \\ a_2 = \frac{2 T_s \times \omega}{2 + T_s \times \omega} \end{cases} \quad (11)$$

۴- شبیه سازی

بمنظور بررسی روش پیشنهادی، شبیه سازی در ۲ نرم افزار PSCAD و MATLAB انجام شده است. ولتاژ ورودی با $THD=10\%$ بصورت زیر در نظر گرفته شده است (بر حسب pu):

$$V_{in} = \sin(2\pi ft) + .1 \sin(3 \times 2\pi ft) \quad (12)$$

پارامترها و مقادیر مورد استفاده، در جدول (۱) آمده است.



شکل (۲): EPLL پیشنهادی به همراه فیلترهای خروجی

معادله فیلتر پایین گذر بصورت زیر پیشنهاد شده است:

$$H_f(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\lambda s + \omega_f^2} \quad (5)$$

اگر $\lambda \geq \omega_f$ انتخاب شود در اینصورت می توان فیلتر بالا را به دو فیلتر ساده مرتبه اول تجزیه کرد:

$$H_f(s) = \frac{\omega_1}{s + \omega_1} \times \frac{\omega_2}{s + \omega_2} \quad (6)$$

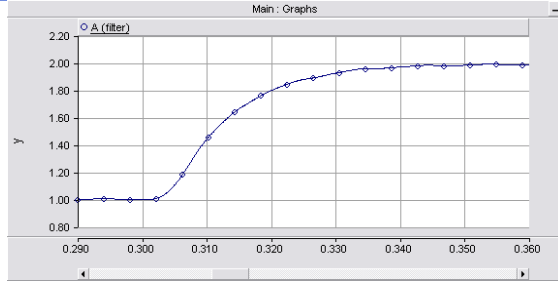
که ω_1, ω_2 فرکانسهای قطع فیلترهای تجزیه شده هستند.

مزایای این روش عبارتند از:

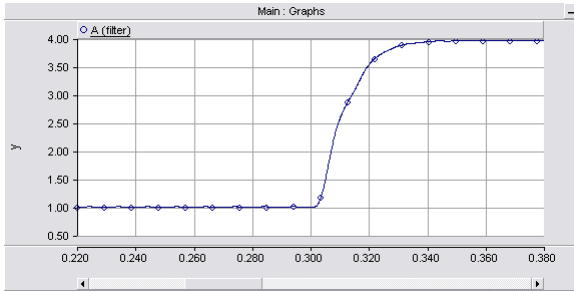
- ۱) برای افزایش سرعت دینامیکی می توان K, K_i, K_p را افزایش داد.
- ۲) هارمونیکها و اغتشاشات خروجی توسط فیلتر حذف می شوند. و فیلتر تأثیری در سرعت EPLL ندارد.

برای اینکه بلوک دیاگرام معرفی شده در شکل (۲) برای کاربرد عملی قابل استفاده باشد، باید بتوان آن را در سیستمهای پردازشگر دیجیتالی پیاده نمود، برای این منظور معادلات گسسته بلوک دیاگرام پیشنهادی EPLL باید نوشته شود.

معادلات هسته اصلی EPLL را می توان بصورت زیر نوشت [۳]:



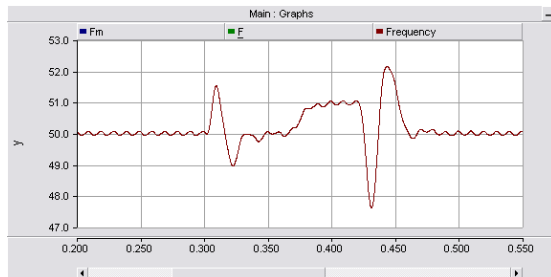
الف) دامنه



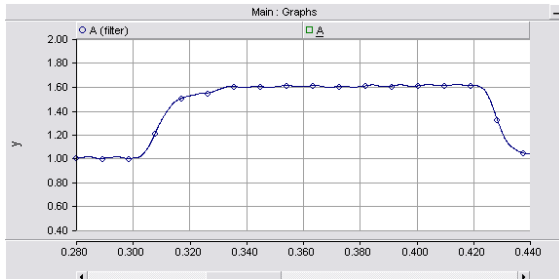
ب) دامنه

شکل (۴): تشخیص دامنه در پرش دامنه الف) ۱ pu ب) ۳ pu

در شکل (۵) فرض شده است، در لحظه $t=0.3$ sec دامنه شکل موج جریان به ۱.۶ pu می‌رسد، در لحظه $t=0.36$ sec ، فرکانس به $f=51$ Hz می‌رسد، و در $t=0.42$ sec فرکانس و دامنه به مقدار اولیه خود باز می‌گردند.



الف) بررسی دینامیکی تشخیص فرکانس



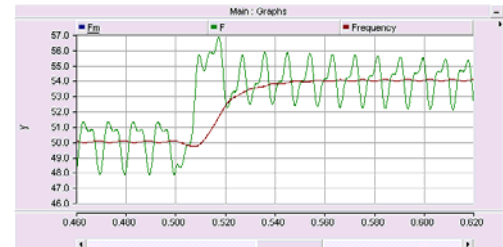
ب) بررسی دینامیکی تشخیص دامنه

شکل (۵): عملکرد EPLL در پرشهای فرکانس و دامنه متوالی، الف) فرکانس، ب) دامنه

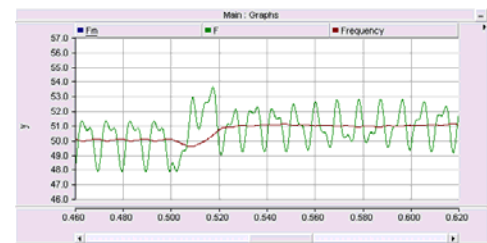
$\omega_1 = \omega_2$	$2 \times \pi \times 25$
K_p	600
K_i	90000
K	
K_v	1
$\tau = \frac{K_p}{K_i}$.0066 (s)

جدول (۱): پارمترهای EPLL مورد استفاده

با انتخاب $\xi\omega_n = 450$ و $\tau = 6$ ms در روابط (۳) و (۴)، ضرایب جدول فوق محاسبه شده‌اند. در شکل (۳) پاسخ EPLL در تشخیص فرکانس آورده شده است. در لحظه $t=0.5$ sec ، پرش فرکانسی به اندازه ۴ هرتز بصورت پله‌ای اعمال شده است. مشاهده می‌شود، سیستم با سرعت این تغییر فرکانس را مشخص می‌کند. در شکل (۳) همچنین فرکانسی که فیلتر نشده (ورودی فیلتر) نشان داده شده است که دارای نوسانات بسیار بالا می‌باشد، و توسط فیلتر خوبی حذف شده است.



الف) بررسی دینامیکی تشخیص فرکانس



ب)

شکل (۳): تشخیص فرکانس در پرش فرکانس الف) ۴ هرتز، ب) ۱ هرتز

در شکل (۴) پاسخ EPLL در تشخیص دامنه آورده شده است.

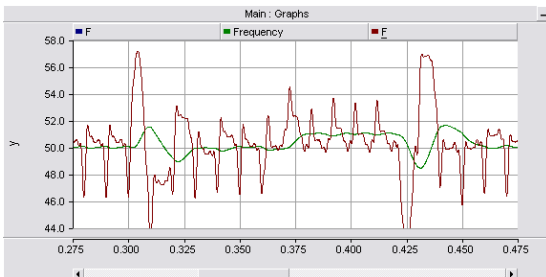
۵- بررسی رفتار دینامیکی، در محیطهایی با آلودگی

هارمونیکی شدید

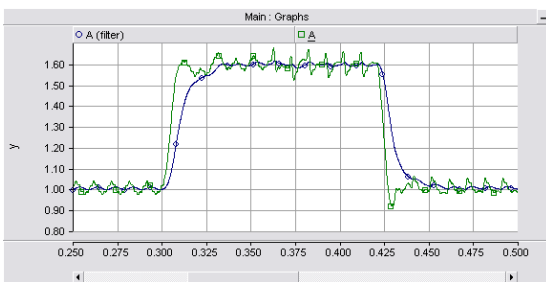
برای بررسی رفتار روش پیشنهادی در محیطهایی شدیداً آلوده و هارمونیکی شکل موج ورودی با مولفه های هارمونیکی سوم، پنجم، هفتم و نهم در موج ورودی اعمال می شود (THD=20%).

$$V_{in} = \sin(2\pi ft) + .1 \sin(3 \times 2\pi ft) + .1 \sin(5 \times 2\pi ft) + .1 \sin(7 \times 2\pi ft) + .1 \sin(9 \times 2\pi ft)$$

در شکل (۸) فرض شده است، در لحظه $t=3$ sec دامنه شکل موج جریان به ۱.۶ pu می رسد، در لحظه $t=0.36$ sec ، فرکانس به $f=51$ Hz می رسد، و در $t=0.42$ sec فرکانس و دامنه به مقدار اولیه خود باز می گردند. نوساناتی که توسط فیلتر حذف شده است، در این شکلها مشخص است.



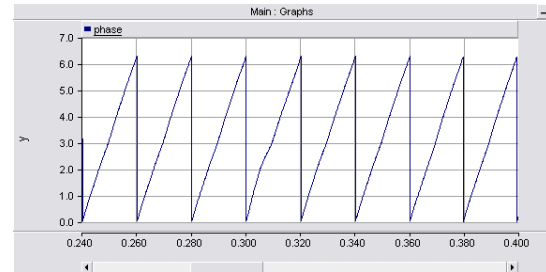
الف) تعیین فرکانس در محیطهای شدیداً آلوده، نوسانات و فراجهش^۴ بخوبی توسط فیلتر حذف شده است.



شکل(۸): الف) مولفه اول دامنه، نوسانات بخوبی توسط فیلتر حذف شده است.

فاز لحظه ای مولفه اول و تشخیص عبور از صفر در شکل (۹) آمده است.

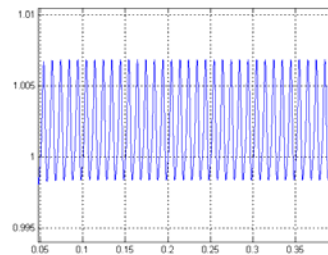
در شکل (۶) فاز سیستم مربوط به شکل (۵) نمایش داده شده است.



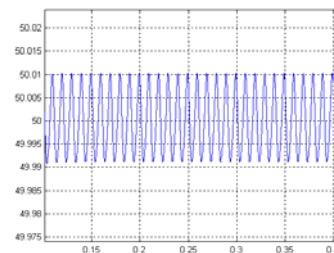
شکل (۶): فاز لحظه ای شکل (۵)

مشاهده می شود که سیستم لحظه عبور از صفر را در تمامی حالات بدرستی تشخیص می دهد. باید توجه شود که در تمامی شکلها THD=10% بود، که مقدار هارمونیکی بالایی است.

در شکل (۷) عملکرد حالت مانای EPLL پیشنهادی (در نرم افزار MATLAB) آورده شده است. مشاهده می شود، خطای تشخیص سیستم در محیط هارمونیکی (THD=10%) ناچیز است.



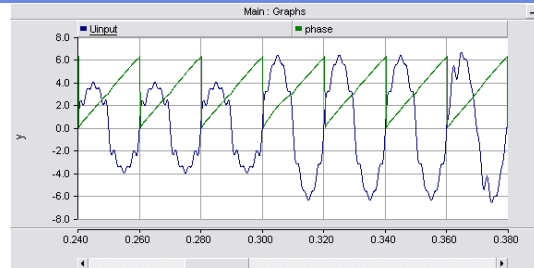
الف) دامنه



ب) فرکانس

شکل(۷): خطای بسیار ناچیز تشخیص در حالت مانا الف) دامنه ب) فرکانس

⁴ Overshoot



شکل (۹): فاز لحظه‌ای مولفه اول و لحظه عبور از صفر مولفه اول (برای مقایسه بهتر ولتاژ ورودی در این شکل با ضریب ۴ نرمالیزه شده است)

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشی مبتنی بر EPLL جهت تعیین و تخمین فرکانس، دامنه، فاز پیشنهاد شد، جهت بالا رفتن سرعت دینامیکی، افزایش ضرایب EPLL مطرح شد، و به منظور مقابله با هارمونیکها و اغتشاشات استفاده از یک فیلتر مرتبه دوم پایین‌گذر پیشنهاد گردید. EPLL توسط معادلات زمان گسسته مدل‌سازی شد و عملکرد آن در محیط هارمونیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه-سازها عملکرد مناسب این روش و سرعت بالای آن (کمتر از ۲ سیکل) را مورد تایید قرار داد.

۷- مراجع

- [1] P. Rodríguez, J. Pou, J. Bergas, J. I. Candela, R. P. Burgos, and D. Boroyevich, "Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 584–592, Mar. 2007.
- [2] I. Etxebarria-otadui, U. Viscarret, M. Caballero, A. Rufer, S. Bacha, "New Optimized PWM VSC Control Structures and Strategies Under Unbalanced Voltage Transients," *IEEE Trans on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 5, October 2007.
- [3] M. Karimi-Ghartemani and M. R. Iravani, "A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1263–1270, Aug. 2004.
- [4] M. Karimi-Ghartemani, "A method Novel Three-Phase Magnitude-Phase-Locked Loop System," *IEEE Trans. Circuits and System.*, vol. 53, no. 8, pp. 1792–1802, Aug. 2006.
- [5] M. Karimi-Ghartemani and M. R. Iravani, "Measurement of Harmonics/Inter-harmonics of Time-Varying Frequencies," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 1, pp. 23–31, January. 2005.