



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت نیرو

Ref. No:

Date:

شماره: ۱۱۸۱/۳۴۴۴/۱۰۳۲ تاریخ: ۹۳/۲/۲۸

## کواهی می شود:

جناب آقای دکتر محمد منفرد در بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی برق که از تاریخ ۱۱ لغایت ۱۳ آبانماه ۱۳۹۲ در تهران برگزار گردید حضور داشته اند. ایشان نویسنده دوم مقاله با عنوان: "کنترل تناسبی-رزونانسی فرکانس-تطبیقی جریان مبدل PWM متصل به شبکه بدون سنسور ولتاژ شبکه در سیستم های تولید پراکنده" هستند که با شماره 13-F-PQA-1032 در بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی برق ایران پذیرفته و به صورت شفاهی ارائه شد. این گواهی بنا به درخواست نامبرده صادر و فاقد هرگونه ارزش دیگری می باشد.

محمد پیروز خلیفه شادالدین  
رئیس کمیته اجرایی



# کنترل تناسبی-رزونانسی فرکانس-تطبیقی جریان مبدل PWM متصل به شبکه بدون سنسور ولتاژ شبکه در سیستمهای تولید پراکنده

مهدی علمی بایگی

شرکت برق منطقهای خراسان، دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد، ایران

me\_ooloomi@yahoo.com

حسین غلامی خشت، محمد منفرد

دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد، ایران

gholami.hosien@yahoo.com, m.monfared@um.ac.ir

شبکه و رعایت استانداردهای ارائه شده در این زمینه، نیازمند استفاده از مبدلهای الکترونیک قدرت هستند. یکی از پرکاربردترین آنها مبدل منبع ولتاژی PWM سه فاز دو سطحی است. این مبدلها دارای مزایای توانایی استفاده از روشهای پیشرفته مدولاسیون، انتقال دو جهته توان، قابلیت تنظیم ضریب توان ورودی (حتی دستیابی به ضریب توان واحد)، کاهش ابعاد خازن لینک DC و قابلیت تنظیم و تثبیت ولتاژ لینک DC میباشند. روش های بسیاری برای کنترل مبدلهای منبع ولتاژی متصل به شبکه ارائه شده است، اما در سالهای اخیر ایدهی استفاده از کنترل کنندههای PR برای کنترل مبدلهای منبع ولتاژی تکفاز/سه فاز متصل به شبکه مطرح و بسیار مورد توجه قرار گرفته است. کنترل جریان بر مبنای PR در قاب مرجع ساکن پیادهسازی میشود و برخلاف کنترلر PI، دارای گین بزرگی در فرکانس اصلی شبکه AC (فرکانس رزونانس) است، بنابراین در این روش تعقیب سیگنالهای AC و حذف اغتشاشات پرپودیک به خوبی انجام میشود [۲-۷]. عیب بزرگ این روش حساسیت بالای آن به تغییرات فرکانس شبکه است، در حالی که استانداردهای مرتبط به اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه، این سیستمها را ملزم به حفظ اتصال در زمان وجود اغتشاش در ولتاژ و فرکانس شبکه میکنند. طبق استاندارد های IEEE1547 و IEC6172، سیستمهای فتوولتائیک باید قادر به حفظ اتصال به شبکه در شرایط نوسان فرکانس در محدوده  $\pm 1\text{Hz}$  حول فرکانس نامی باشند. در مورد توربینهای بادی متصل به شبکه هر کشوری قوانین مخصوص به خود را با توجه به تکنولوژی مورد استفاده و وضعیت شبکهی خود دارد. الزامات اتصال به شبکه در زمینهای توربینهای بادی به مراتب سختتر از سیستمهای فتوولتائیک است؛ به عنوان مثال مطابق قوانین بریتانیا، توربینهای بادی باید در محدوده فرکانس ۴۷.۵ تا ۵۲ هرتز قادر به کار پیوسته باشند [۲]. در این زمینه قوانین

چکیده — در این مقاله یک روش کنترل مبدل PWM سه فاز متصل به شبکه بر مبنای کنترل تناسبی-رزونانسی (PR) جریان و بدون استفاده از سنسور ولتاژ شبکه ارائه شده است. در روش پیشنهادی، ولتاژ شبکه با استفاده از روش بهینهسازی نیوتن-رافسون و به صورت برخط تخمین زده میشود. سپس با استفاده از یک حلقهی قفل شده در فرکانس (FLL) که بر ولتاژ تخمینی عمل میکند، فرکانس شبکه تخمین زده شده و برای به روز کردن فرکانس رزونانس کنترلر PR استفاده میشود. مفاهیم و پیادهسازی آسان، عملکرد حالت دائم و دینامیک خوب، حتی با وجود اغتشاشات شبکه و تغییرات فرکانس، به اضافهی مزایای حذف سنسورهای ولتاژ از جمله کاهش ابعاد و هزینه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم از مهمترین مزایای روش پیشنهادی هستند.

واژه‌های کلیدی — مبدل PWM سه فاز؛ واحد تولید پراکنده متصل

به شبکه؛ کنترل تناسبی-رزونانسی جریان؛ تخمین ولتاژ شبکه؛ کنترل بدون سنسور ولتاژ؛ الگوریتم نیوتن-رافسون

## ۱. مقدمه

در سالهای اخیر، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی به دلیل پاک و رایگان بودن آنها و نقش حیاتی این گونه منابع انرژی در کاهش وابستگی به سوختهای فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانهای مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۱]. سیستمهای فتوولتائیک و بادی برای اتصال به

<sup>1</sup> Pulse Width Modulation

<sup>2</sup> Proportional Resonant (PR)

<sup>3</sup> Frequency Locked Loop

کشور سوئد بیشترین بازهی تغییرات فرکانس را که در آن توربین بادی باید اتصال خود به شبکه را حفظ کند در نظر گرفته است که محدودهی فرکانسی ۴۷ تا ۵۵ هرتز میباشد [۲]. در مراجع [۱-۲] قوانین مشابهی که در دیگر کشورها الزام شده، ارائه شده است. در محدوده تغییرات فرکانسی که برای اتصال سیستم‌های بادی و خورشیدی در نظر گرفته شده است، عملکرد PR به شدت تضعیف شده و حتی ممکن است سبب ناپایداری سیستم شود [۷]. بنابراین برای افزایش مقاومت و بهبود عملکرد کنترلر PR در هنگام تغییرات فرکانس شبکه، مرجع [۷] پیشنهاد داده است که فرکانس شبکه به عنوان یک سیگنال ورودی به کنترلر PR برای منطبق کردن فرکانس رزونانس آن با فرکانس شبکه وارد شود. در روش پیشنهادی این مرجع، پس از اندازه‌گیری ولتاژ شبکه و استفاده از یک حلقهی قفل شده در فاز، اطلاعات فاز و فرکانس شبکه برای بهبود استراژی کنترلی استفاده میشود.

در این مقاله روش کنترل تناسبی-رزوانسی فرکانس-تطبیقی جریان مبدل PWM سه فاز متصل به شبکه بدون سنسور ولتاژ شبکه ارائه میشود که در آن یک الگوریتم جدید تخمین ولتاژ جایگزین سنسورهای ولتاژ شبکه شده است. در روش پیشنهادی، ولتاژ شبکه با استفاده از معادلات سیستم در حوزهی زمان و به وسیلهی روش تکراری نیوتن-رافسون تخمین زده می‌شود. سپس با استفاده از یک حلقهی قفل شده در فرکانس (FLL) که بر روی ولتاژ تخمینی عمل میکند، فرکانس شبکه برای به روز کردن فرکانس رزونانس PR استفاده میشود. در این مقاله، بخش ۲ به مروری کوتاه بر روشهای تخمین ولتاژ مورد استفاده در کاربردهای مبدلهای الکترونیک قدرت میپردازد. در بخشهای ۳ تا ۵ ساختار روش پیشنهادی معرفی می‌شود که شامل بخشهای حلقهی کنترل جریان بر مبنای PR، تخمینگر ولتاژ و FLL است. نتایج شبیه‌سازی که مویید عملکرد صحیح استراژی پیشنهادی میباشد، در بخش ۶ ارائه میشوند.

## ۲. مروری بر روشهای تخمین ولتاژ

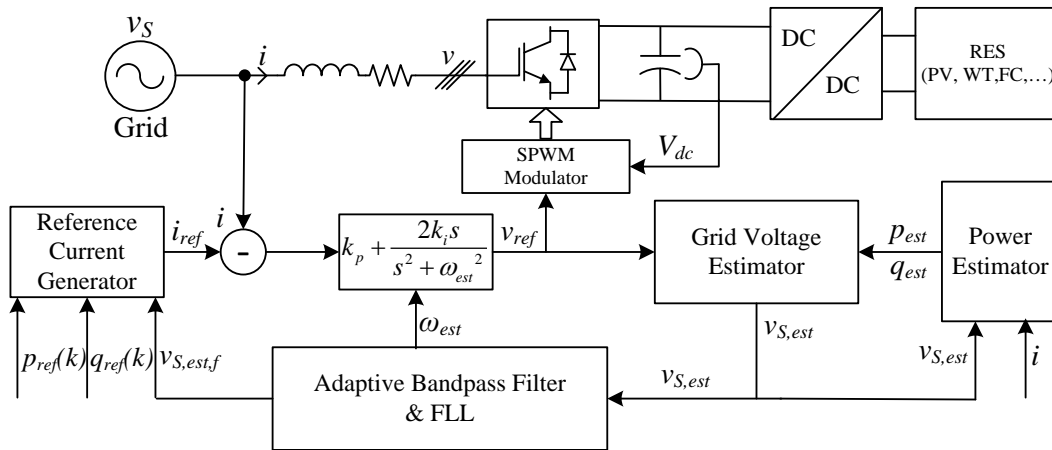
به طور کلی در اکثر روشهای کنترل مبدلهای PWM متصل به شبکه از سه گروه سنسورهای ولتاژ لینک DC، جریان و ولتاژ سمت شبکه استفاده میشود. دو سنسور اول علاوه بر وظایف کنترلی، وظایف حفاظتی هم دارند، بنابراین استفاده از آنها ضروری است. در حالی که برای کاهش هزینه‌ی این مبدل‌ها می‌توان سنسورهای ولتاژ سمت شبکه را حذف کرد و با استفاده از پارامترهای مدل و سالی کم‌پلت اندازه‌گیری شده این ولتاژ را تخمین زد.

ساده‌ترین روش برای تخمین ولتاژ شبکه، از جمع کردن ولتاژ دو سر فیلتر با ولتاژ مبدل بدست می‌آید. در این روش، مشتق‌گیری از جریان شبکه سبب تقویت نویزهای فرکانس بالا میشود. همچنین در این روش تغییرات نقطه خنثی نین با پی در محاسبات ولتاژ شبکه در نظر گرفته شده، چون پتانسیل نقطه‌ی خنثی شبکه مشخص نیست [۸].

در روش تخمین ولتاژ بر مبنای توان‌های اکتیو و راکتیو تخمین، ابتدا با استفاده از ولتاژ لینک DC، جریانهای اندازه‌گیری شده، اندوکتانس فیلتر و وضعیت کلیدها، توان‌های اکتیو و راکتیو تخمین زده میشود، سپس با استفاده از این توان‌های تخمین و جریان‌های اندازه‌گیری شده، ولتاژ شبکه تخمین زده می‌شود. در این روش نین مانند روش قبل، به علت انجام عمل مشتق - گیری، نویزهای فرکانس بالا تقویت می‌شوند؛ بنابراین نین به سلف بزرگ و فرکانس نمونه برداری بالا برای کاهش ریزل جریانی و عملکرد مناسب این روش می‌باشد [۸-۹].

روش شار مجازی به عنوان یکی از کاربردهای روشهای تخمین ولتاژ شبکه در کاربردهای مبدلهای متصل به شبکه محسوب می‌شود. در این روش، شبکه و فیلتر به عنوان یک ماشینی القایی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین انتگرال ولتاژ شبکه برابر با شار فاصله هوا می‌باشد. به علت وجود انتگرال گیری ذاتی موجود در این روش، برخلاف روش قبل اثر نویز کاهش می‌یابد، هر چند خود سبب اندکی کاهش دینامیک سیستم کنترل نین می‌شود [۱۰-۱۳]. پیاده‌سازی انتگرال گیری ایدال مورد استفاده در تخمینگر شار مجازی ممکن نیست. وجود نویز آفست DC در جریان‌های اندازه‌گیری شده میتواند سبب اشباع انتگرال گیری شود و همچنین نامعلوم بودن مقدار اولی انتگرال گیری مورد استفاده در این رابطه نین در روش‌های بدون سنسور سبب ایجاد خطا در تخمین شار مجازی میشود. بنابراین در ادامه محققان روشهایی از جمله فیلترهای پایینگذر [۱۰-۱۱]، فیلترهای میانگذر [۱۱، ۱۲] و فیلترهای میانگذر تطبیقی [۱۳] را برای رفع این مشکلات پیشنهاد داده‌اند که به ترتیب دارای مشکلات خطای حالت دائم در ولتاژ تخمینی، حساسیت به تغییر فرکانس شبکه، ساختار پیچیده و نیاز به استفاده از PLL میباشد.

امروزه توجه محققان به مشاهده‌گرهای تطبیقی مانند فیلتر کالمن و مشاهده‌گر لئونبرگر برای تخمین ولتاژ شبکه و پارامترهای سیستم مانند مقاومت و اندوکتانس فیلتر افزایش پیدا کرده است. دینامیک و دقت خوب از مهم‌ترین مزایای پیچیدگی و حجم بالای محاسبات از مهم‌ترین معایب این روش‌ها میباشد [۱۴].



شکل ۱: ساختار روش کنترلی پیشنهادی

در شکل ۲، مدل تک خطی مبدل PWM متصل به شبکه نشان داده شده است. مطابق این تصویر، توان انتقالی بین مبدل و شبکه را میتوان به صورت (۲) نوشت. در این رابطه  $p$  و  $q$  توانهای اکتیو و راکتیو انتقالی از شبکه به مبدل،  $B$  سوسپتانس فیلتر سلفی،  $V$  و  $V_s$  ولتاژ موثر خط شبکه و خروجی مبدل و  $\delta$  زاویهی توان (اختلاف فاز بین ولتاژ خروجی مبدل و شبکه) است.

$$\begin{cases} p = -BV_s V \sin(\delta) \\ q = BV_s [V_s - V \cos(\delta)] \end{cases} \quad (2)$$

با معلوم بودن  $V$ ،  $B$ ،  $p$  و  $q$  و حل ۲، میتوان مقادیر  $V_s$  و  $\delta$  را در هر پریود نمونهبرداری بدست آورد. بعلاوه، فاز ولتاژ شبکه به راحتی با دانستن فاز ولتاژ تولیدی مبدل ( $\varphi_c$ ) و اختلاف فاز بین ولتاژ شبکه و مبدل ( $\delta$ ) بدست میآید:

$$\varphi_g = \varphi_c - \delta \quad (3)$$

همانگونه که اشاره شد، در رابطهی فوق  $\varphi_c$  فاز ولتاژ خروجی مبدل است که در هر لحظه از روی مقادیر مرجع محاسبه شده برای ولتاژ خروجی مبدل و از رابطهی زیر بدست میآید:

$$\varphi_c = \arctan\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right) \quad (4)$$

اکنون با داشتن دامنهی ولتاژ موثر خط شبکه ( $V_s$ ) از (۲) و فاز ولتاژ شبکه ( $\varphi_g$ ) از (۳) و با استفاده از (۵) میتوان ولتاژ شبکه را در قاب مرجع ساکن بدست آورد.

$$\begin{cases} v_{S\alpha,est} = V_s \sin(\varphi_g) \\ v_{S\beta,est} = -V_s \cos(\varphi_g) \end{cases} \quad (5)$$

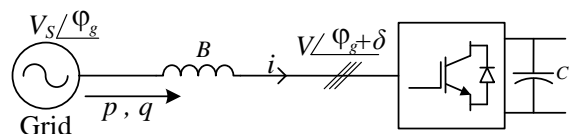
### ۳. ساختار روش کنترلی پیشنهادی

بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل سه بخش حلقهی کنترل PR جریان، تخمینگر ولتاژ و FLL است. در روش پیشنهادی هدف از تخمین ولتاژ شبکه، (۱) بدست آوردن مقادیر مرجع جریان برای حلقهی داخلی کنترل جریان و (۲) تخمین فرکانس شبکه برای به روز کردن فرکانس رزونانس PR میباشد. حلقه کنترل جریان از کنترلر PR برای تنظیم جریان تزریقی به شبکه در مقدار مرجع استفاده میکند و مطابق بلوک دیاگرام شکل ۱، جریان مرجع برای حلقهی کنترل جریان با استفاده از ولتاژ تخمینی فیلتر شده (مولفه اصلی ولتاژ) و توانهای اکتیو و راکتیو مرجع مطابق (۱) به دست میآید:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha,ref} \\ i_{\beta,ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_{S\alpha,est,f}^2 + v_{S\beta,est,f}^2)} \begin{bmatrix} v_{S\alpha,est,f} & v_{S\beta,est,f} \\ v_{S\beta,est,f} & -v_{S\alpha,est,f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ q_{ref} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه  $i_{\alpha,ref}$  و  $i_{\beta,ref}$  مقادیر مرجع جریان مبدل و  $v_{S\alpha,est,f}$  و  $v_{S\beta,est,f}$  مقادیر ولتاژ تخمینی فیلتر شده شبکه میباشد. در ادامه الگوریتم تخمین ولتاژ با استفاده از روش نیوتن-رافسون شرح داده میشود.

### ۴. الگوریتم پیشنهادی تخمین ولتاژ شبکه



شکل ۲: دیاگرام تک خطی مبدل متصل به شبکه

#### ۴.۱. حل عددی رابطی (۲) با استفاده از روش نیوتن-رافسون

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial \delta} = -BV_s V \cos(\delta) \\ \frac{\partial f}{\partial V_s} = -BV \sin(\delta) \\ \frac{\partial g}{\partial \delta} = BV_s V \sin(\delta) \\ \frac{\partial g}{\partial V_s} = -BV \cos(\delta) + 2BV_s \end{cases} \quad (9)$$

با داشتن مقادیر اولیه  $\delta_0$  و  $V_{s,0}$  تکرارها در روش نیوتن-رافسون با حل معادلات خطی زیر انجام میشود.

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_k \\ \Delta V_{s,k} \end{bmatrix} = J_{est,k}^{-1} \begin{bmatrix} f(\delta_k, V_{s,k}) \\ g(\delta_k, V_{s,k}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \delta_{k+1} = \delta_k - \Delta \delta_k \\ V_{s,k+1} = V_{s,k} - \Delta V_s \end{cases} \quad (11)$$

در بیشتر مسائل مهندسی، روش نیوتن-رافسون به دلیل همگرایی سریع آن شناخته میشود. ولی به هر حال، اگر مساله داده شده دارای ریشههای مکرر و زینی باشد، الگوریتم ممکن است به جواب درست همگرا نشود و حتی ناپایدار شود. بنابراین قبل از پیادهسازی عملی، شرایط همگرایی آن باید بررسی شود. معادله (۹) نشان میدهد که هر چهار عنصر ماتریس ژاکوبین یکنواخت هستند و ریشههای مکرر و زینی ندارند. بنابراین الگوریتم به جواب درست همگرا خواهد شد و این روش جواب تقریباً دقیق  $\delta$  و  $V_s$  را در ۲ الی ۵ تکرار محاسبه میکند.

همانطور که گفته شد،  $V_s$  ولتاژ موثر خط شبکه و  $\delta$  اختلاف فاز بین ولتاژ خروجی مبدل و شبکه است و تا شرایط سیستم تغییر نکند (ولتاژ شبکه یا توان انتقالی)، این مقادیر بدون تغییر خواهند بود.

همچنین برای پیادهسازی عملی روش پیشنهادی در DSP و ذخیره‌ی زمان، میتوان ماتریس ژاکوبین در (۸) و معکوس ماتریس ژاکوبین (۱۰) را از قبل محاسبه کرد تا در هر پررود کنترل نیاز به مشتقگیری و محاسبه ماتریس معکوس نباشد و حجم محاسبات کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

#### ۵. حلقه‌ی قفل شده در فرکانس (FLL)

در این مقاله برای محاسبه فرکانس شبکه و به روز کردن فرکانس رزونانس PR از روش ارائه شده در مرجع [۱۶] استفاده میشود. که دارای مزایای فراوانی است، از جمله: (۱) پیادهسازی آسان، (۲) حجم کم محاسبات،

همانطور که گفته شد، برای بدست آوردن  $V_s$  و  $\delta$  باید رابطه (۲) در هر پررود نمونهبرداری محاسبه شود. این معادله با فرض مجهول بودن این متغیرها یک جفت معادله‌ی غیرخطی است و حل تحلیلی این دستگاه معادلات غیرخطی ممکن نمیشود. بنابراین باید از روشهای عددی و تکراری برای حل این معادلات استفاده کرد که موضوع این بخش میباشد. در این مقاله از روش نیوتن-رافسون برای حل این معادله و دستیابی به مقادیر دقیق  $V_s$  و  $\delta$  استفاده میشود. روش نیوتن-رافسون در بین روشهای مختلف حل عددی، بهینه‌سازی و ریشه‌یابی به دلیل همگرایی سریع آن شناخته میشود. این روش بیشتر برای حل بعضی مسائل ویژه ریاضی مانند پخش بار در سیستمهای قدرت و به صورت آفلاین استفاده میشود. امروزه به دلیل وجود پردازندهها با توان محاسباتی بالا مانند DSP، توجه محققان به این ابزار قدرتمند ریاضی در حل مسائل بهینه‌سازی برخط و تخمین‌گرها افزایش پیدا کرده است [۱۵].

معادله (۲) را برای استفاده از الگوریتم نیوتن-رافسون میتوان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} f(\delta, V_s) = -BV_s V \sin(\delta) - p = 0 \\ g(\delta, V_s) = BV_s [V_s - V \cos(\delta)] - q = 0 \end{cases} \quad (6)$$

که در این رابطه  $f(\delta, V_s)$  و  $g(\delta, V_s)$  عدم تطابق بین توانهای اکتیو و راکتیو محاسبه شده و انتقالی را نشان میدهد. برای محاسبه (۶)،  $p$  و  $q$  را میتوان با استفاده از ولتاژ تخمینی و جریان اندازه‌گیری شده شبکه به صورت (۷) تخمین زد و یا برای سادگی برابر مقادیر مرجع توانهای اکتیو و راکتیو ( $p_{ref}$  و  $q_{ref}$ ) قرار داد.

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{est}(k) \\ q_{est}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{s\alpha,est}(k) & v_{s\beta,est}(k) \\ v_{s\beta,est}(k) & -v_{s\alpha,est}(k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha}(k) \\ i_{\beta}(k) \end{pmatrix} \quad (7)$$

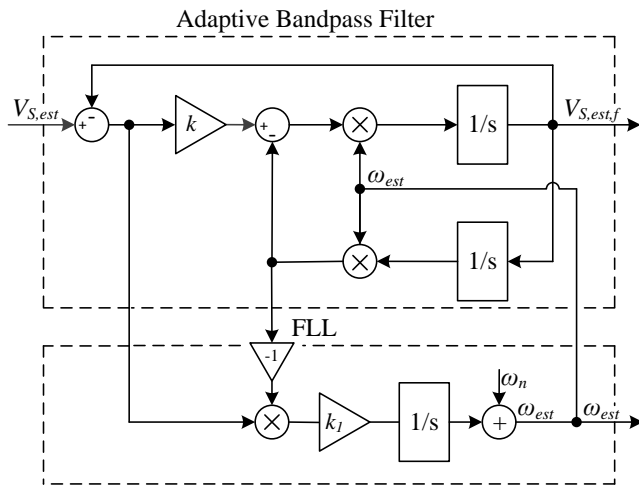
ماتریس ژاکوبین برای حل عددی (۶) به صورت زیر است:

$$J_{est} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \delta} & \frac{\partial f}{\partial V_s} \\ \frac{\partial g}{\partial \delta} & \frac{\partial g}{\partial V_s} \end{bmatrix} \quad (8)$$

که عناصر ماتریس ژاکوبین به شرح زیر هستند:

سرعت و دقت بالا، ۳) عدم نیاز به تبدیل قاب مرجع ۴) عملکرد مقاوم در گذارها (چون بر خلاف PLL<sup>۴</sup> ها از فرکانس شبکه استفاده میکند و فرکانس از فاز ولتاژ پایدارتر است). شکل ۳ بلوک دیاگرام FLL را برای بدست آوردن فرکانس شبکه نشان میدهد. در این شکل  $V_{s,est}$  ولتاژ تخمینی شبکه،  $V_{s,est,f}$  ولتاژ تخمینی فیلتر شده و  $\omega_{est}$  فرکانس زاویه‌ای تخمینی شبکه میباشد.  $\omega_n$  نیز مقدار نامی فرکانس زاویه‌ای است. بلوک دیاگرام شکل ۳ شامل دو بخش اصلی فیلتر میان گذر تطبیقی بر مبنای SOGI-<sup>۵</sup> و QSG و FLL میباشد. فیلتر میانگذر علاوه بر تامین سیگنالهای مورد نیاز برای FLL، با تضعیف هارمونیکهای ولتاژ شبکه و حذف نویز و اغتشاشات ولتاژ تخمینی، یک ولتاژ سینوسی خالص (مولفه اصلی) برای محاسبه جریان مرجع ایجاد میکند. بخش دوم، حلقه‌ی قفل شده در فرکانس (FLL) است که فرکانس مورد نیاز برای عملکرد مناسب فیلتر تطبیقی و کنترلر PR را فراهم میکند و نقش مهمی در عملکرد مناسب و افزایش مقاومت سیستم در برابر تغییرات فرکانس شبکه دارد. در این بخش، انتخاب گین  $k_I$  باید به نحوی باشد که FLL طراحی شده حداقل فرجهش را نسبت به تغییر فرکانس داشته باشد، چون ممکن است فرکانس تخمینی از محدودهی مجاز تغییرات آن که برای عملکرد متصل به شبکه تعیین شده، خارج شود و سبب عمل دستگاههای حفاظتی و قطع منبع تولید پراکنده از شبکه شود.

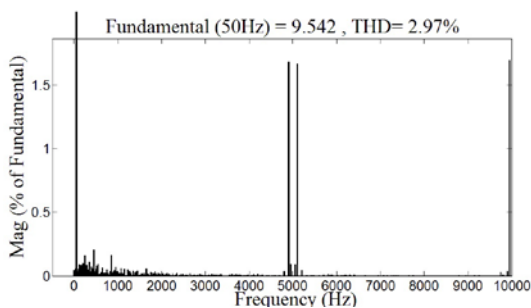
در اینجا ذکر این نکته قابل توجه است که در روش پیشنهادی فرکانس شبکه به طور مستقیم در تخمین ولتاژ تاثیر گذار نیست و به همین دلیل عملکرد مستقل تخمینگر ولتاژ و تخمینگر فرکانس حاصل شده و سبب افزایش پایداری سیستم میشود.



شکل ۳: بلوک دیاگرام FLL پیشنهادی مرجع [۱۶]

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی

ولتاژ شبکه	۵۰ (Vrms)
ولتاژ لینک DC	۲۰۰ (V)
فرکانس شبکه	۵۰ (Hz)
اندوکتانس و مقاومت فیلتر	۰.۰۲ (Ω) و ۳.۵ (mH)
فرکانس نمونه‌برداری و کلیدزنی	۵ (kHz)



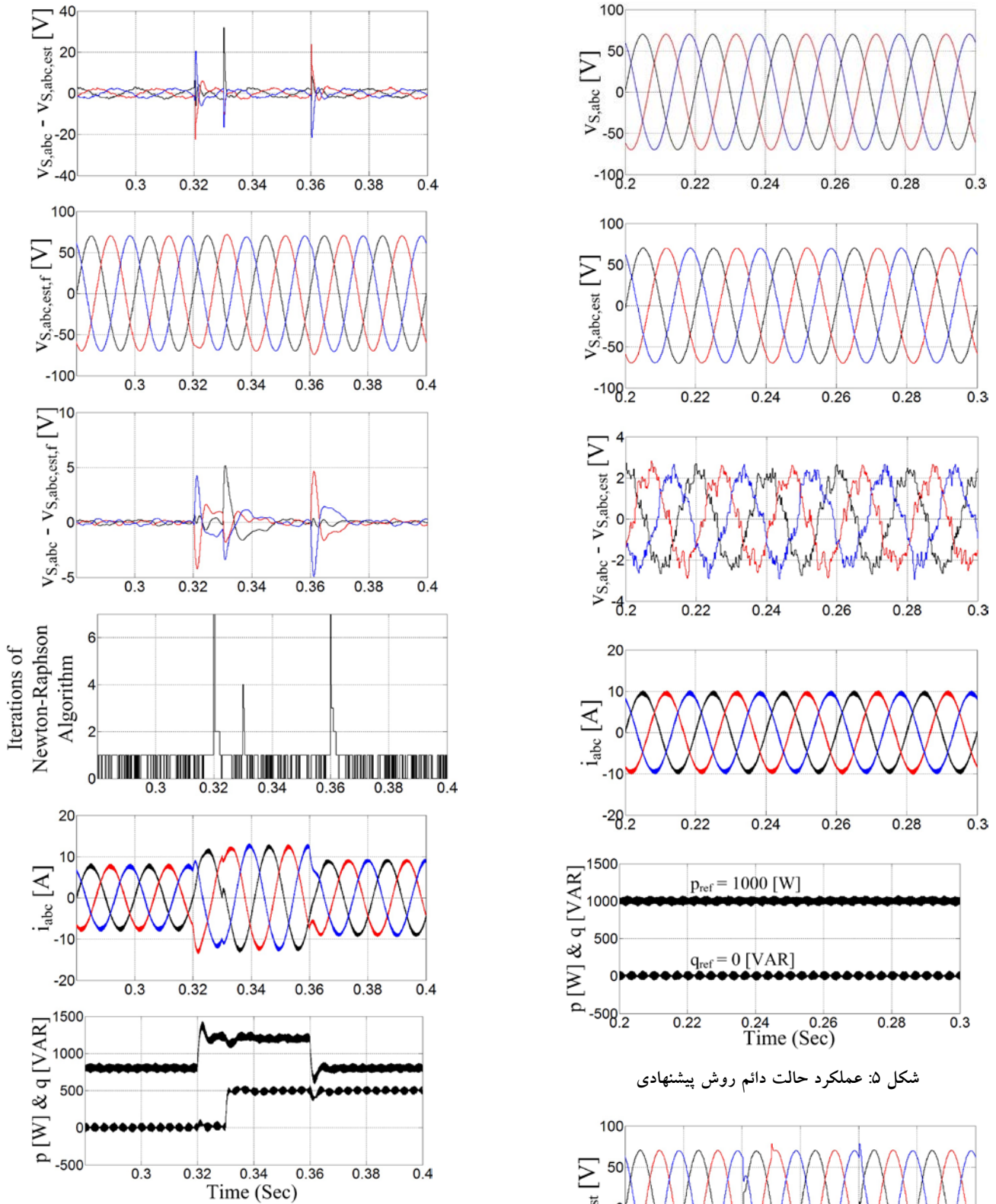
شکل ۴: طیف هارمونیکی جریان شبکه در عملکرد حالت دائم

## ۶. نتایج شبیه‌سازی

به منظور تایید و بررسی عملکرد روش پیشنهادی یک مدل سیمولینک در نرم افزار متلب آماده شده است. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی متلب در جدول ۱ آورده شده است. پاسخ حالت دائم و دینامیکی روش پیشنهادی بدون سنسور ولتاژ تحت آزمایشات مختلفی بررسی شده است. شکل‌های ۴ تا ۶ عملکرد روش پیشنهادی را در حالت دائم و دینامیکی نشان میدهند، همانطور که از این شکلها مشخص است، روش پیشنهادی به خوبی قادر به تخمین ولتاژ شبکه تحت هر دو حالت میباشد. شکل ۴ طیف هارمونیکی جریان شبکه را نشان میدهد. از این شکل مشخص است که جریان شبکه با

<sup>4</sup> Phase Locked Loop

<sup>5</sup> Second Order Generalized Integrator-Quadrature Signals Generator



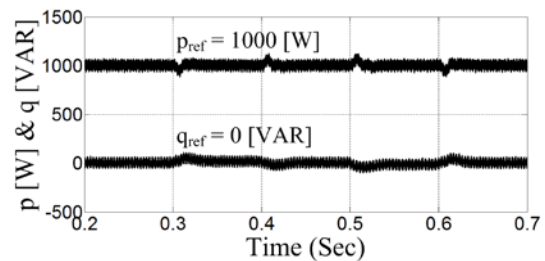
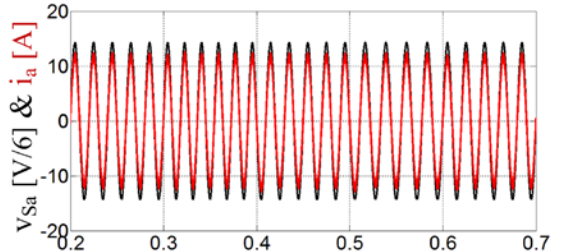
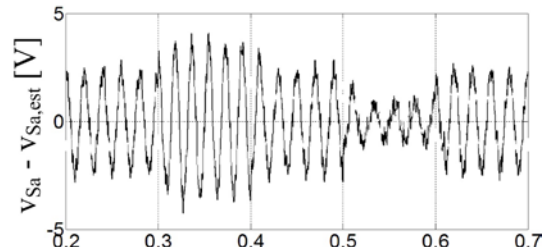
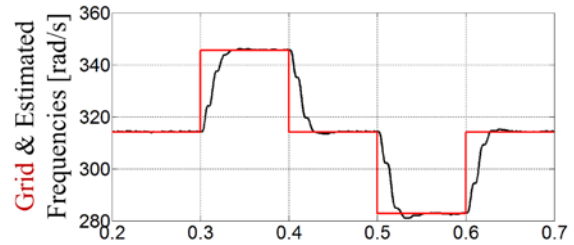
شکل ۵: عملکرد حالت دائم روش پیشنهادی

شکل ۶: پاسخ گذرای روش پیشنهادی برای چند تغییر پله در توان اکتیو مرجع (افزایش توان از ۸۰۰ به ۱۲۰۰ وات و کاهش آن از ۱۲۰۰ به ۸۰۰ وات) و توان راکتیو مرجع (افزایش توان از صفر به ۵۰۰ وار)

فرکانس شبکه، کاهش هزینه و ابعاد مبدل و افزایش قابلیت اطمینان سیستم که از مزایای حذف سنسورهای ولتاژ میباشد از مهمترین مزایای روش پیشنهادی هستند که توسط نتایج شبیهسازی تایید شدند.

## منابع

- [1] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*. Wiley, 2005,
- [2] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Wiley/IEEE, 2011.
- [3] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. IEEE/Wiley, 2010.
- [4] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006.
- [5] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P. Chiang Loh, "Proportional-resonant controllers and filters for grid connected voltage sourced converters," in *IEE Proceedings - Electric Power Applications.*, vol. 153, no. 5, pp. 750-762, Sep. 2006.
- [6] H. Cha, T. K. Vu, J. E. Kim, "Design and control of proportional resonant controller based photovoltaic power conditioning system," in *Proc. Energy Conversion Congress and Exposition. (ECCE)*, Sep. 2009, pp. 2198-2205.
- [7] A. Timbus, M. Ciobotaru, R. Teodorescu and F. Blaabjerg "Adaptive Resonant Controller for Grid-Connected Converters in Distributed Power Generation Systems," in *Proc Applied Power Electronics. (APEC)*, 2006.
- [8] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo and I. Takahashi, "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 3, pp. 473-479, May/June. 1998.
- [9] S. Hansen, M. Malinowski, F. Blaabjerg and M. P. Kazmierkowski, "Sensorless control strategies for PWM rectifier," in *Proc Applied Power Electronics. (APEC)*, New Orleans, 2000, vol. 2, pp. 832-838.
- [10] P. Antoniewicz, M. P. Kazmierkowski, "Virtual flux based predictive direct power control of ac/dc converters with on-line inductance estimation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4381-4390, Dec. 2008.
- [11] A. Kulka, "Sensorless digital control of grid connected three phase converters for renewable sources," Ph.D. dissertation, Norwegian Univ. Sci. Technol., Trondheim, Norway, 2009.
- [12] J. L. Duarte, A. V. ZWam, C. Wijnands and A. Vandenput, "Reference frames fit for controlling PWM rectifiers," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, pp. 628-630, Jun. 1999.
- [13] J. A. Suul, A. Luna, P. Rodríguez, T. Undeland, "Voltage-Sensor-Less Synchronization to Unbalanced Grids by Frequency-Adaptive Virtual Flux Estimation" *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 7, pp. 747, Jul. 2012.
- [14] Y. A. I. Mohamed, and E. F. El-Saadany, "An Improved deadbeat current control scheme with a novel adaptive self-tuning load model for a three phase PWM voltage-source inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 747, Apr. 2007.
- [15] M. Dai, M. N. Marwali, J. W. Jung, and A. Keyhani, "Power flow control of a single distributed generation unit," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 1, pp 322-331, Jan. 2008.
- [16] P. Rodríguez, A. Luna, M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions," in *Proc. 32nd IEEE IECON*, Paris, France, 2006, pp. 5173-5178.



شکل ۷: عملکرد روش پیشنهادی به اغتشاش در فرکانس شبکه

## ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید تخمین ولتاژ شبکه در کاربردهای مبدل های PWM متصل به شبکه ارائه شد. ولتاژ لحظه‌ای شبکه با استفاده از معادلات سیستم در حوزهی زمان و الگوریتم بهینه‌سازی نیوتن-رافسون در هر پریود نمونه برداری محاسبه میشود. در روش پیشنهادی هدف از تخمین ولتاژ، محاسبهی جریان مرجع برای حلقهی کنترل جریان (بر مبنای PR) و منطبق کردن فرکانس رزونانس کنترلر PR بر فرکانس شبکه میباشد. مفاهیم و پیاده‌سازی آسان، عدم نیاز به تبدیل قاب مرجع، عملکرد حالت دائم و دینامیک خوب، عملکرد مناسب و افزایش مقاومت در برابر اغتشاشات در