

# ارائه استراتژی کنترلی سیستم تزریق توان منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در راستای بهبود توأم اعوجاج هارمونیک و نامتعادلی جریان، مبتنی بر الگوریتم EMO-RLS

فرامرز فقیهی، سودابه سلیمانی و محمدرضا ملازاده شاهرودی

برق نظیر سیستم ذخیره انرژی باطری (BESS)<sup>۷</sup> [۲] و ذخیره‌ساز مغناطیسی انرژی الکتریکی ابرسانا (SMES)<sup>۸</sup> [۳] و [۴] به شبکه الکتریکی از طریق واسط‌های مبتنی بر تجهیزات الکترونیک قدرت [۵] و به منظور تطبیق مشخصه‌های ولتاژ و فرکانس خروجی و نیز کنترل توان اکتیو تزریقی از واحدهای تولید پراکنده به شبکه انجام می‌شود [۶] تا [۸]. از سوی دیگر با گسترش روند خصوصی‌سازی و تجدید ساختار [۹] در صنعت برق، پایش و بهبود شاخص‌های کیفیت توان (PQ)<sup>۹</sup> [۱۰] بیش از پیش مورد توجه مشتریان قرار گرفته که در این راستا می‌توان از واسط‌های اینورتری مورد اشاره، علاوه بر مدیریت توان تزریقی به منظور بهبود کیفیت توان نیز استفاده نمود [۱۱] و به این ترتیب، نیاز به نصب ادوات به‌ساز کیفیت توان<sup>۱۰</sup> [۱۲] رفع می‌شود.

جریان‌ها و ولتاژهای هارمونیک، نامتعادل و راکتیو و جریان سیم نوترال از جمله مشکلات کیفیت توان در سیستم‌های قدرت هستند. جریان‌های اعوجاجی یکی از تهدیدات نسبتاً جدید و مهم در سیستم‌های قدرت هستند که از جمله اثرات مخرب آنها می‌توان به افزایش تلفات در شبکه‌های برق و تجهیزات، کاهش عمر مفید و ظرفیت قابل بهره‌برداری ماشین‌های الکتریکی، احتمال ایجاد تشدید بین سیم‌پیچ ترانس‌ها و خازن‌های شبکه، ایجاد اضافه ولتاژ و آسیب‌دیدن عایق تجهیزات، عملکرد نادرست سیستم‌های حفاظت، کنترل و اندازه‌گیری و ایجاد تداخل در عملکرد سیستم‌های مخابراتی اشاره نمود. همچنین نامتعادلی جریان و ولتاژ نیز اثرات نامطلوبی از قبیل افزایش تلفات و کاهش بازدهی تجهیزات الکتریکی در پی دارد. لذا تحلیل دامنه و زاویه فاز هارمونیک‌ها و مؤلفه‌های متقارن [۱۳] سیگنال‌های سه‌فاز، کاربردهای مهمی در پایش کیفیت توان [۱۴] و [۱۵]، تولید سیگنال مرجع جبران‌سازی [۱۶] و [۱۷] و رله‌های حفاظتی [۱۸] دارد و در نتیجه روش‌های مختلفی به این منظور ارائه شده است. تبدیل فوریه سریع به عنوان معروف‌ترین ابزار پردازش سیگنال<sup>۱۱</sup> در سیستم‌های قدرت شناخته می‌شود که ضعف اصلی آن پدیده‌های تداخل نمونه‌برداری، نشتی، وابستگی نتایج به پهنای پنجره داده‌ها و پاسخ نادرست در شرایط تغییرات دینامیکی است [۱۹]. اگرچه فیلتر کالمن<sup>۱۲</sup> [۲۰] روش دیگری است که دارای قابلیت پردازش سیگنال‌های اندازه‌گیری شده نویزدار می‌باشد، تعیین ماتریس کوارینانس حالت مناسب برای آن دشوار می‌باشد. به منظور تحلیل شکل موج‌های

چکیده: در این مطالعه، یک روش کنترلی سیستم واسط تزریق توان منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به شبکه بر مبنای الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی- چندخروجی توسعه یافته و با در نظر گرفتن ملاحظات مدیریت توان اکتیو و کاهش مؤلفه‌های هارمونیک، نامتعادلی و راکتیو جریان ارائه می‌شود. روش پیشنهادی با شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابتدا یک سیگنال سه‌فاز هارمونیک نامتعادل مصنوعی تولید و به چند تخمین‌گر مختلف ارسال و خروجی آنها با هم مقایسه می‌شود. نتایج به دست آمده، بیان‌کننده کارایی مناسب ساختار پیشنهادی در استخراج مؤلفه‌های متقارن هارمونیک اکتیو در مقایسه با سایر روش‌های متداول است. همچنین عملکرد دینامیکی آن در دنبال کردن تغییرات جریان بار با به کارگیری آن در سیستم کنترلی یک سیستم واسط انرژی منبع تولید پراکنده نشان می‌دهد که علاوه بر مدیریت توان اکتیو تزریقی به شبکه، کاهش هم‌زمان مؤلفه‌های هارمونیک، نامتعادلی و راکتیو جریان به خوبی انجام می‌شود.

کلیدواژه: روش EMO-RLS، کنترل توان اکتیو تزریقی، کیفیت توان، مؤلفه‌های متقارن هارمونیک، واسط منابع انرژی‌های تجدیدپذیر.

## ۱- مقدمه

با توجه به اهمیت جنبه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی تولید برق، نصب و بهره‌برداری از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر<sup>۱</sup> به شکل تولید پراکنده<sup>۲</sup> (DG)، طی سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران و سرمایه‌گذاران قرار گرفته است [۱]. در این شرایط، مسایل جدیدی از قبیل نحوه اتصال، قابلیت اطمینان، حفاظت و بهره‌برداری از این منابع مطرح شده است. اتصال بسیاری از این منابع از جمله سیستم‌های فتوولتائیک<sup>۳</sup>، مولدهای توربین بادی<sup>۴</sup>، پیل‌های سوختی<sup>۵</sup>، میکروتوربین<sup>۶</sup> و نیز ذخیره‌کننده‌های

این مقاله در تاریخ ۸ آذر ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۱۱ خرداد ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

فرامرز فقیهی، گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، (email: faramarz\_faghihi@hotmail.com).

سودابه سلیمانی، گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، (email: s.soleymani@srbiau.ac.ir).

محمدرضا ملازاده شاهرودی، گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، (email: mh.mollazadeh@srbiau.ac.ir).

7. Battery Energy Storage System

8. Superconducting Magnetic Energy Storage

9. Power Quality

10. Custom Power Devices

11. Signal Processing

12. Kalman Filter

1. Renewable Energy Sources

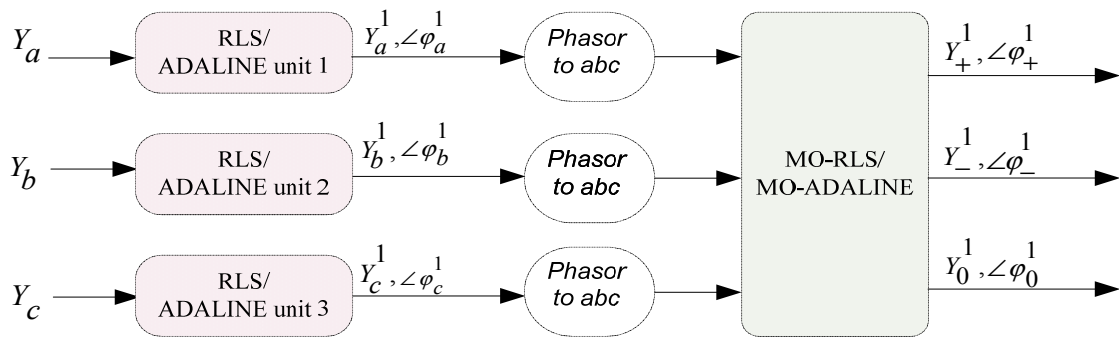
2. Distributed Generation

3. Photovoltaic System

4. Wind Turbine Generator

5. Fuel Cell

6. Micro Turbine



شکل ۱: ساختار استخراج مؤلفه‌های توالی هارمونیک‌ها توسط آدالاین و آدالاین- چندخروجی.

پدازش سیگنال در درصد اعوجاج هارمونیک و نامتعادلی‌های مختلف را می‌توان از جمله مزایای این روش برشمرد. در بخش بعدی، محاسبه مؤلفه‌های توالی هارمونیک مورد اشاره قرار می‌گیرد. سپس ساختار کنترلی پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی آن مورد بحث قرار گرفته و در پایان، نتیجه‌گیری مطالب بیان می‌شود.

## ۲- استخراج مؤلفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر هارمونیک

یک سیستم سه‌فاز سینوسی نامتعادل به صورت جمع برداری سه سیستم سه‌فاز متقارن توالی مثبت، منفی و صفر و طبق (۱) قابل بیان است

$$\begin{bmatrix} Y_a(t) \\ Y_b(t) \\ Y_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta & \sin \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \cos \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \cos \theta & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \cos \phi \\ Y \sin \phi \\ Y_+ \cos \phi_+ \\ Y_+ \sin \phi_+ \\ Y_- \cos \phi_- \\ Y_- \sin \phi_- \end{bmatrix} \quad (1)$$

که  $Y_a(t)$ ،  $Y_b(t)$  و  $Y_c(t)$  سیگنال‌های سه‌فاز در حوزه زمان، دامنه توالی‌های مثبت، منفی و صفر سیستم سه‌فاز و  $\phi_+$ ،  $\phi_-$  و  $\phi$  زاویه فاز آنها می‌باشد. با توجه به کاربرد مورد نظر این مقاله و برای کاهش حجم محاسبات، وجود توالی صفر در سیستم سه‌فاز در نظر گرفته می‌شود ولی استخراج دامنه و فاز مؤلفه‌های آن انجام نمی‌شود. لذا یک سیستم سه‌فاز شامل توالی‌های مثبت، منفی و صفر هارمونیک مرتبه  $h$  ام که استخراج مؤلفه‌های توالی صفر آن مورد نظر نباشد، با تعمیم رابطه بالا به صورت (۲) بیان می‌شود

$$\begin{bmatrix} Y_a^h(t) - Y^h(t) \\ Y_b^h(t) - Y^h(t) \\ Y_c^h(t) - Y^h(t) \end{bmatrix} = C^h \times X^h \quad (2)$$

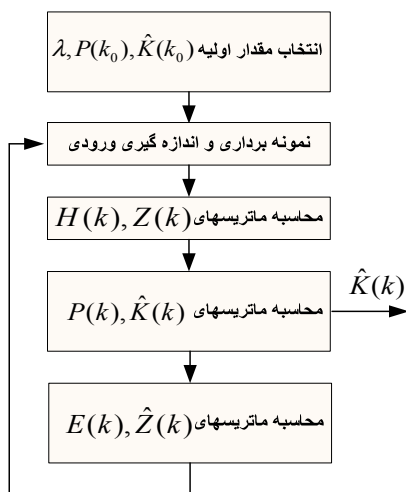
که در آن  $X^h$  و  $C^h$  از (۳) به دست می‌آید

غیر ساکن، موجک<sup>۱</sup> [۲۱] معرفی شده است. کارایی این تخمین‌گر به انتخاب موجک اصلی وابسته است و همچنین اجرای آن مستلزم محاسبات سنگین است که کاربرد بلادرنگ آن را محدود می‌سازد. روش‌های کنترلی ارائه‌شده بر اساس تئوری توان راکتیو آئی (IRPT) به طور گسترده‌ای در فیلترهای اکتیو مورد استفاده قرار می‌گیرند. مرجع [۲۲] نشان می‌دهد این فیلتر دارای حجم محاسبات زیاد و سرعت پاسخ کمتری نسبت به الگوریتم آدالاین<sup>۴</sup> (ADALINE) می‌باشد. واحد آدالاین به عنوان یک شبکه عصبی ساده [۲۳] و [۲۴] و نیز تکنیک کمترین مربعات بازگشتی<sup>۵</sup> (RLS) [۲۵] و [۲۶] به منظور تخمین محتوای هارمونیک و فرکانس سیگنال‌های الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین فیلترهای آدالاین- چندخروجی<sup>۶</sup> (MO-ADALINE) و کمترین مربعات بازگشتی- چندخروجی<sup>۷</sup> (MO-RLS) به منظور تخمین مؤلفه‌های توالی معرفی شده است [۲۷] و [۲۸]. استخراج مؤلفه‌های متقارن هارمونیک اصلی در این تکنیک‌ها در دو مرحله انجام می‌شود. طبق بلوک دیاگرام شکل ۱ سه واحد آدالاین یا RLS به صورت موازی در مرحله اول، مؤلفه‌های فرکانس اصلی سه‌فاز را تخمین می‌زند که به صورت ورودی برای یک واحد MO-ADALINE یا MO-RLS در مرحله دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرایند، افزایش حجم محاسبات و کاهش سرعت همگرایی کلی را در پی دارد.

در شکل ۱  $Y_a$ ،  $Y_b$  و  $Y_c$  سیستم سه‌فاز ورودی،  $Y_a^1$  و  $Y_b^1$  و  $Y_c^1$  و  $\phi_a^1$ ،  $\phi_b^1$  و  $\phi_c^1$  به ترتیب دامنه و زاویه فاز هارمونیک اصلی سه‌فاز و  $Y_+^1$  و  $Y_-^1$  و  $Y_0^1$  و  $\phi_+^1$  و  $\phi_-^1$  و  $\phi_0^1$  به ترتیب دامنه و زاویه فاز مؤلفه‌های توالی هارمونیک<sup>۸</sup> اصلی هستند.

این مقاله، یک استراتژی را برای کنترل واسط اینورتری منابع انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه می‌دهد. در این ساختار، تولید سیگنال مرجع جبران‌سازی بر مبنای تکنیک کمترین مربعات بازگشتی- چندخروجی توسعه یافته و توسعه روابط ریاضی متداول مؤلفه‌های متقارن انجام می‌شود. سادگی الگوریتم، سرعت زیاد و نوسان کم در همگرایی خروجی تخمین‌گر پیشنهادی در شرایط تغییرات دینامیکی بار، عملکرد مناسب آن در مدهای کاری مستقیم و معکوس تزریق توان به شبکه و نیز قابلیت

1. Wavelet
2. Real Time
3. Instantaneous Reactive Power Theory
4. ADAPtive Linear NEuron
5. Recursive Least Square
6. Multi Output-ADALINE
7. Multi Output-RLS
8. Sequence Components of Harmonics



شکل ۲: تخمین گر کمترین مربعات بازگشتی- چندخروجی توسعه یافته (EMO-RLS).

معادلات تخمین و به روز رسانی به ترتیب طبق (۷) و (۸) تعریف می‌شود

$$\hat{K}(k) = \hat{K}(k-1) + P(k) \times H^T(k) \times E(k) \quad (7)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \{ P(k-1) - [P(k-1) \times H^T(k) \times [\lambda I + H(k) \times P(k-1) \times H^T(k)]^{-1} \times H(k) \times P(k-1)] \} \quad (8)$$

که  $I$  ماتریس واحد و  $\lambda$  عددی حقیقی است که ضریب فراموشی الگوریتم نامیده می‌شود. با افزایش مقدار  $\lambda$ ، این فیلتر با نرخ کمتری از نمونه‌های قبلی صرف نظر می‌کند. اگرچه مقدار  $\lambda$  دلخواه و بین ۰ تا ۱ می‌باشد، معمولاً انتخاب مقداری در حدود ۰/۹۹ همگرایی سریع و با کمترین نوسان را در خروجی می‌دهد. مقدار اولیه  $P$  به صورت  $P(k) = p \cdot I$  است که  $p \leq 1$  در نظر گرفته می‌شود. پارامتر  $p$ ، یک عدد حقیقی مثبت است که تنها در همگرایی اولیه الگوریتم نقش دارد به طوری که کاهش آن موجب کاهش سرعت همگرایی اولیه می‌گردد و انتخاب مقادیر بزرگ، افزایش سرعت همگرایی اولیه ولی به ازای نوسانی شدن پاسخ تخمین گر را در پی خواهد داشت. دیاگرام این روش در شکل ۲ نشان داده شده است.

در روش پیشنهادی از یک تخمین گر EMO-RLS و در یک مرحله استفاده می‌شود. در جدول ۱ ابعاد ماتریس‌های اجزا در تکنیک‌های MO-RLS، RLS و EMO-RLS درج شده است.

برای استخراج مؤلفه‌های توالی هارمونیک، ماتریس‌های  $C$  و  $X$  مربوط به سیستم سه‌فاز به ترتیب در ماتریس‌های  $H$  و  $K$  الگوریتم پیشنهادی جایگزین می‌شود. عناصر بردار  $X$  شامل  $X_{(1,1)}$  تا  $X_{(1,3n)}$  در هر گام زمانی  $k$  به صورت (۹) به دست می‌آید (توان عملگر ترانسپوز است)

$$X(k) = \hat{K}(k) = [Y_+^1 \cos \phi_+^1, Y_+^1 \sin \phi_+^1, Y_-^1 \cos \phi_-^1, Y_-^1 \sin \phi_-^1, \dots, Y_+^N \cos \phi_+^N, Y_+^N \sin \phi_+^N, Y_-^N \cos \phi_-^N, Y_-^N \sin \phi_-^N]^T \quad (9)$$

زاویه فاز و اندازه مؤلفه توالی مثبت هارمونیک اصلی و نیز بخش اکتیو این مؤلفه از (۱۰) به دست می‌آید

$$\phi_+^1 = \tan^{-1} \frac{X_{(1,2)}}{X_{(1,1)}}, \quad Y_+^1 = \frac{X_{(1,1)}}{\cos \phi_+^1}, \quad Y_+^{1,Active} = X_{(1,1)} \quad (10)$$

$$C^h = \begin{bmatrix} \sin(h\theta) & \cos(h\theta) \\ \sin(h\theta - \frac{2\pi h}{3}) & \cos(h\theta - \frac{2\pi h}{3}) \\ \sin(h\theta + \frac{2\pi h}{3}) & \cos(h\theta + \frac{2\pi h}{3}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$X^h = \begin{bmatrix} Y_+^h \cos \phi_+^h \\ Y_+^h \sin \phi_+^h \\ Y_-^h \cos \phi_-^h \\ Y_-^h \sin \phi_-^h \end{bmatrix}$$

در این روابط  $h$  شماره مرتبه هارمونیک ( $1 < h < N$ )،  $N$  مرتبه بالاترین هارمونیک و  $n$  تعداد کل هارمونیک‌های موجود در سیستم می‌باشد. بنابراین به طور کلی یک سیستم سه‌فاز نامتعادل [۲۹] شامل هارمونیک‌های مرتبه ۱ تا  $N$  بر اساس مؤلفه‌های توالی هارمونیک مثبت و منفی از (۴) به دست می‌آید

$$\begin{bmatrix} Y_a(t) - Y(t) \\ Y_b(t) - Y(t) \\ Y_c(t) - Y(t) \end{bmatrix}_{r \times 1} = [C^1, C^2, \dots, C^h, \dots, C^N]_{r \times n} \times \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^h \\ \vdots \\ X^N \end{bmatrix}_{n \times 1} = C_{r \times n} \times X_{n \times 1} \quad (4)$$

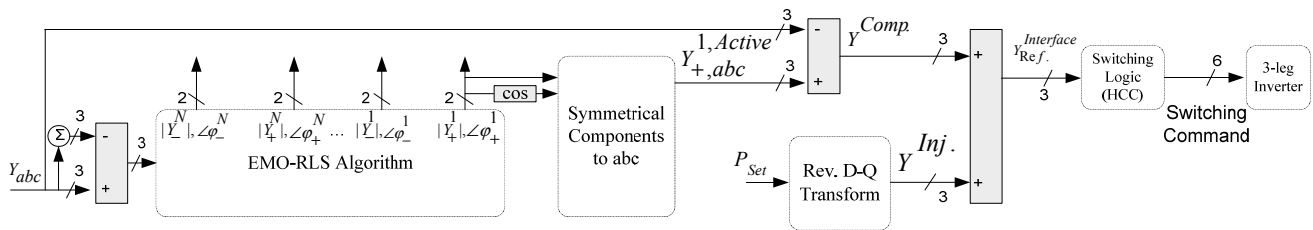
از آنجا که نمونه‌برداری و تخمین سیگنال‌ها به صورت گسسته زمانی<sup>۱</sup> و در فاصله زمانی مشخص  $\Delta t$  انجام می‌شود، سیگنال‌های سه‌فاز مورد اشاره با در نظر گرفتن  $t = k\Delta t$  (شماره گام زمانی نمونه‌برداری است) به فرم گسسته درمی‌آیند.

## ۲-۱ الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی- چندخروجی توسعه یافته

به منظور پیاده‌سازی روابط مؤلفه‌های توالی هارمونیک ارائه شده در بخش ۲-۴، الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی- چندخروجی مورد اشاره در [۲۷] برای محاسبه مؤلفه‌های توالی تعداد  $n$  هارمونیک توسعه می‌یابد. برای یک سیستم در فضای حالت زمان گسسته و با تشکیل ماتریس ورودی‌ها (اتصال)  $H(k)$ ، ماتریس مقادیر مجهول  $\hat{K}(k)$  و بردار سیگنال اندازه‌گیری شده  $Z(k)$ ، بردار سیگنال تخمین زده شده  $\hat{Z}(k)$  و خطای تخمین  $E(k)$  در هر گام زمانی  $k$  از (۵) و (۶) به دست می‌آید

$$\hat{Z}(k) = H(k) \times \hat{K}(k) \quad (5)$$

$$E(k) = Z(k) - \hat{Z}(k-1) \quad (6)$$



شکل ۳: دیاگرام استراتژی کنترلی پیشنهادی.

جدول ۱: ابعاد ماتریس‌ها در تکنیک‌های مختلف.

	H	K	Z	E	P	I
RLS	$1 \times 2n$	$2n \times 1$	$1 \times 1$	$1 \times 1$	$2n \times 2n$	$1 \times 1$
MO-RLS	$3 \times 4$	$4 \times 1$	$3 \times 1$	$3 \times 1$	$4 \times 4$	$3 \times 3$
EMO-RLS	$3 \times 4n$	$4n \times 1$	$3 \times 1$	$3 \times 1$	$4n \times 4n$	$3 \times 3$

در این مطالعه، حذف مؤلفه توالی صفر جاری شده در سیم نوترال که در شرایط وجود بارهای نامتعادل در سیستم‌های چهارسیم ایجاد می‌شود، با استفاده از پیکربندی اینورتر منبع ولتاژ (VSI) DC با دو منبع تغذیه انجام می‌شود [۳۰] و [۳۱].

از آنجا که ارزیابی استراتژی پیشنهادی مستلزم داشتن معیار مناسبی برای ارزیابی اعوجاج هارمونیک و نامتعادلی شکل موج است، درصد اعوجاج کل هارمونیک (THD) [۱۰] و درصد نامتعادلی جریان‌ها ( $U = I^- / I^+$ )، برای مقایسه وضعیت جریان سه‌فاز بار محلی (بدون جبران‌سازی) و جریان کشیده‌شده از شبکه (بعد از جبران‌سازی) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۲-۲ استراتژی کنترلی پیشنهادی

ساختار پیشنهادی از سه جزء اصلی استخراج مؤلفه جبران‌سازی، تعیین مؤلفه تزریق توان و الگوریتم کلیدزنی کلیدهای قدرت تشکیل می‌گردد که در شکل ۳ مشاهده می‌شود و در آن  $|Y_+^N|$  اندازه توالی مثبت هارمونیک  $N$  ام سیگنال و  $\angle \phi_+^N$  زاویه فاز توالی مثبت هارمونیک  $N$  ام سیگنال می‌باشد.

### ۳- نتایج شبیه‌سازی

ابتدا یک شکل موج سه‌فاز مصنوعی نامتعادل و هارمونیک با پارامترهای مشخص، هم‌زمان به الگوریتم مورد نظر و فیلترهای دیگر ارسال و عملکرد آنها مقایسه می‌شود. سپس عملکرد استراتژی کنترل مورد نظر با مدل‌سازی یک سیستم توزیع ساده، در مدیریت توان اکتیو تزریقی از یک منبع انرژی تجدیدپذیر و نیز بهبود کیفیت توان ارزیابی می‌شود. هر دو شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود. مقدار لحظه‌ای زاویه فاز  $\omega$  در ماتریس  $H$  و نیز در تبدیل D-Q معکوس و محاسبه توان اکتیو مورد نیاز می‌باشد. در شبیه‌سازی اول، این مقدار در تولید سیگنال مصنوعی مشخص است و در مدل سیستم توزیع نمونه، زاویه فاز با استفاده از یک حلقه قفل‌شده فاز (PLL) سه‌فاز به دست می‌آید.

اکنون با داشتن مؤلفه اکتیو توالی مثبت هارمونیک اصلی و فرکانس زاویه‌ای  $\omega$ ، سیگنال مرجع جبران‌سازی محتویات نامطلوب سیگنال سه‌فاز (هارمونیک‌ها، نامتعادلی و راکتیو) در گام زمانی  $k$  از (۱۱) به دست می‌آید

$$Y^{Comp.}(k) = \begin{bmatrix} Y_a^{Comp.}(k) - Y(k) \\ Y_b^{Comp.}(k) - Y(k) \\ Y_c^{Comp.}(k) - Y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega k \Delta t \\ \sin(\omega k \Delta t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega k \Delta t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \omega k \Delta t \\ \cos(\omega k \Delta t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega k \Delta t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y^+ \cos \phi^+ \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_a(k) \\ Y_b(k) \\ Y_c(k) \end{bmatrix}$$

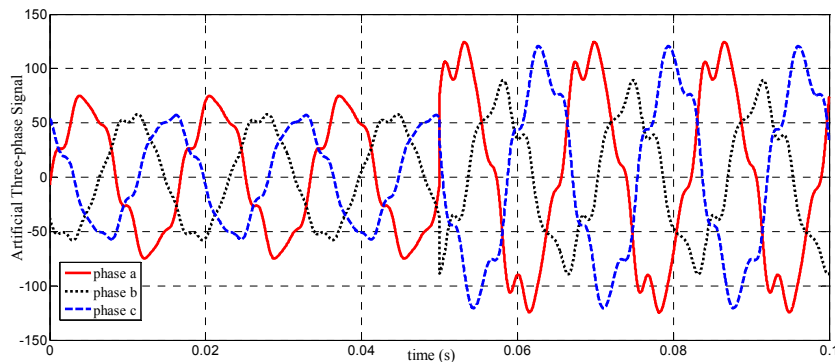
از آنجا که کاربرد روش پیشنهادی در این مقاله، جبران‌سازی جریان‌های سه‌فاز است، سیگنال مرجع جبران‌سازی در (۱۱) به صورت جریان  $I^{Comp.}(k)$  در نظر گرفته می‌شود. توان تزریقی از منبع انرژی تجدیدپذیر با توجه به مقدار تنظیم‌شده ( $P_{set}$ ) و این که فقط تزریق توان اکتیو مورد نظر است ( $I_D = P_{set} / V_{PCC}, I_Q = 0$ ) با استفاده از تبدیل D-Q معکوس و از (۱۲) محاسبه می‌شود. برای منابع با توان خروجی متغیر از قبیل مولدهای بادی، امکان انتخاب  $P_{set}$  توسط بهره‌بردار یا انتخاب آن به صورت خودکار، متناسب با توان خروجی منبع وجود دارد

$$I^{Inj.}(k) = \begin{bmatrix} I_a^{Inj.}(k) \\ I_b^{Inj.}(k) \\ I_c^{Inj.}(k) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos \omega k \Delta t & -\sin \omega k \Delta t \\ \cos(\omega k \Delta t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega k \Delta t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega k \Delta t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega k \Delta t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_D \sqrt{2} \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (12)$$

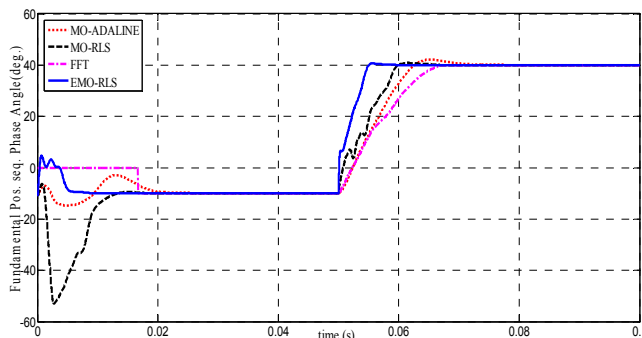
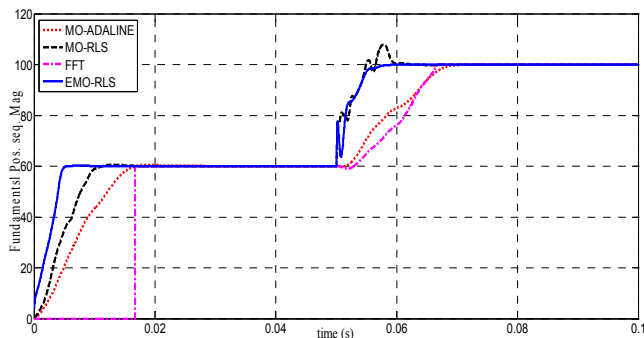
بنابراین جریان مرجع نهایی سه‌فاز از مجموع جریان جبران‌سازی و جریان تزریق توان اکتیو، طبق (۱۳) به دست می‌آید

$$I_{Ref.}^{Inteface}(k) = I^{Comp.}(k) + I^{Inj.}(k) \quad (13)$$

1. Voltage Source Inverter
2. Total Harmonic Distortion
3. Direct-Quadratic Transform
4. Phase Locked Loop



شکل ۴: سیگنال سه‌فاز مصنوعی تولیدشده.



شکل ۵: استخراج دامنه و فاز مؤلفه توالی مثبت هارمونیک اصلی شکل موج.

جدول ۲: مؤلفه‌های سیگنال سه‌فاز تولیدشده و تغییرات آن.

هارمونیک هفتم (۴۲۰ Hz)		هارمونیک پنجم (۳۰۰ Hz)		هارمونیک اصلی (۶۰ Hz)		
دامنه	فاز (درجه)	دامنه	فاز (درجه)	دامنه	فاز (درجه)	
-۴۵	۳	۲۰	۵	-۱۰	۶۰	$0 < t < 0.055 \text{ sec}$
۱۰	۵	۴۵	۱۵	۴۰	۱۰۰	$0.055 \text{ sec} < t$
۰	۱	۱۰	۲	۰	۱۰	$0 < t < 0.055 \text{ sec}$
۲۰	۲	-۵۰	۲	-۲۰	۲۰	$0.055 \text{ sec} < t$
۶۰	۱	۶۰	۲	۶۰	۱	$0 < t < 0.055 \text{ sec}$
۶۰	۱	۴۵	۱	۶۰	۵	$0.055 \text{ sec} < t$

جدول ۳: تنظیمات فیلترها.

الگوریتم	بهترین مقدار تنظیم
EMO-RLS	$p = 0.05, \lambda = 0.95$
MO-RLS	RLS units : $p = 0.15, \lambda = 0.97$ , MO-RLS units : $p = 0.05, \lambda = 0.9$
MO-ADALINE	ADALINE units : $\alpha = 0.16$ , MO-ADALINE units : $\alpha = 0.2$
FFT	$\text{fundamental freq.} = 60 \text{ Hz}$ , $\text{Harmonic } n = 1$ , $\text{Sequence} = \text{Pos Neg}$ , $\text{sampletime} = 10^{-7} \text{ sec}$

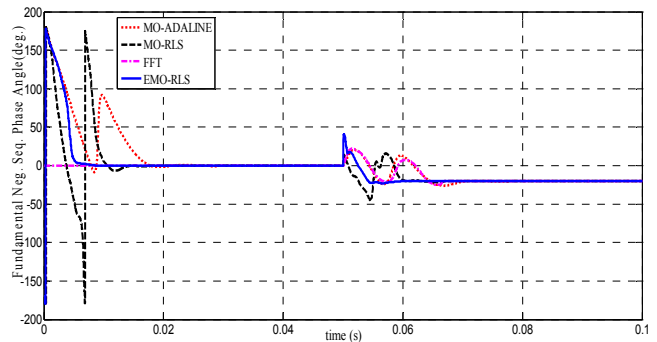
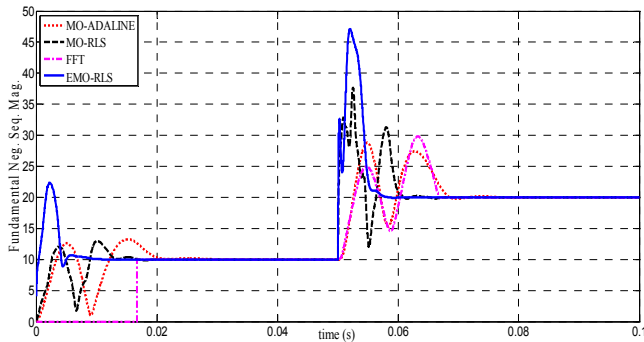
پنجم و هفتم در نظر گرفته شده و تنظیم هر یک به صورت سعی و خطا و به منظور به دست آوردن بهترین خروجی انجام می‌شود که مقادیر آن در جدول ۳ درج شده است.

دامنه و زاویه فاز توالی‌های مثبت و منفی هارمونیک اصلی که توسط روش پیشنهادی تخمین زده شده در شکل ۵ و ۶ نمایش داده شده است. از نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که تخمین و دنبال کردن تغییرات توالی‌های هارمونیک توسط هر چهار فیلتر انجام می‌شود اما آنچه که تکنیک پیشنهادی را متمایز می‌نماید، سرعت همگرایی زیادتر و نوسان کمتر حول نقطه همگرایی پس از تغییر دینامیکی سیگنال است که بیان‌کننده برتری نسبی آن در کاربردهای بلادرنگ نظیر تولید سیگنال جبران‌سازی می‌باشد. تخمین مؤلفه‌های توالی‌های هارمونیک با استفاده از الگوریتم‌های کمترین مربعات بازگشتی- چندخروجی و آدالاین-

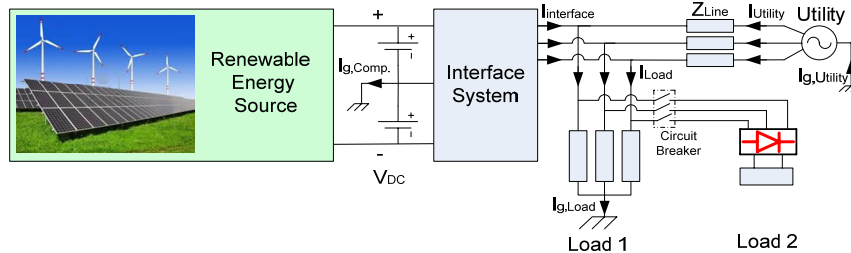
### ۳-۱ تخمین مؤلفه‌های یک سیستم سه‌فاز مصنوعی

یک شکل موج سه‌فاز مصنوعی نامتعادل و موج، هم‌زمان به الگوریتم پیشنهادی و سه فیلتر تبدیل فوریه سریع (FFT)<sup>۱</sup>، کمترین مربعات بازگشتی- چندخروجی و آدالاین- چندخروجی ارسال شده و عملکرد آنها با هم مقایسه و سنجیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ و جدول ۲ نشان داده شده است سیگنال مورد نظر ۶۰ Hz و شامل توالی‌های هارمونیک‌های اصلی، پنجم و هفتم است که در زمان  $t = 0.055 \text{ sec}$  تغییر دینامیکی در اندازه و زاویه فازهای آن رخ می‌دهد. ساختار هر یک از الگوریتم‌ها برای استخراج هارمونیک‌های اصلی،

1. Fast Fourier Transform



شکل ۶: استخراج دامنه و فاز مؤلفه توالی منفی هارمونیک اصلی شکل موج.



شکل ۷: سیستم توزیع نمونه شبیه‌سازی شده.

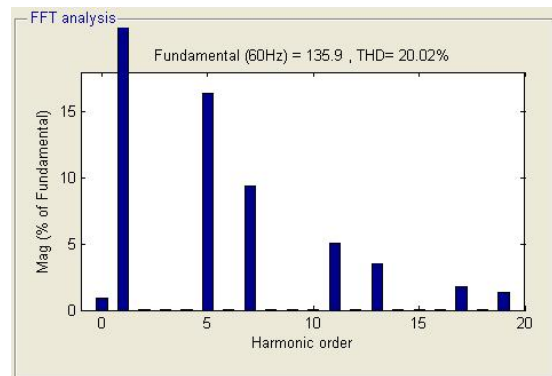
معکوس، توان اکتیو تزریقی از واسط، بیش از توان مصرفی بار محلی بوده و توان اضافی به شبکه انتقال می‌یابد.

واسط، شامل یک اینورتر سه‌فاز- سه‌ساق مبتنی بر منبع ولتاژ کنترل شده و ترانزیستورهای دوقطبی با درگاه عایق شده می‌باشد. تولید دقیق جریان جبران‌سازی با استفاده از منطق تولید پالس‌های کلیدزنی هیستریسیس<sup>۱</sup> [۲] و [۱۱] و باند هیستریسیس ۳٪ انجام می‌شود. طبق نتایج آنالیز فوریه جریان‌ها که برای فاز *a* جریان بار در شکل ۸ مشاهده می‌شود، هارمونیک‌های عمده موجود، هارمونیک اصلی، پنجم، هفتم، یازدهم، سیزدهم و نوزدهم است که در ساختار تخمین‌گر در نظر گرفته می‌شود.

بهترین تنظیم این تخمین‌گر به ازای ضریب فراموشی  $\lambda = 0.98$  به دست می‌آید. لازم به ذکر است در به کارگیری این گونه الگوریتم‌ها، در صورت اضافه‌شدن بار با مشخصه هارمونیکی جدید و جهت جلوگیری از ایجاد خطا در تخمین، بایستی الگوریتم محاسباتی و تجهیزات (در صورت نیاز) نیز متناسباً توسعه یابد و یا این که کل مؤلفه‌های هارمونیکی که احتمال ایجاد آن در آینده می‌رود از ابتدا در طراحی و تأمین سخت‌افزار در نظر گرفته شود.

ولتاژ سه‌فاز سیستم در نقطه اتصال مشترک<sup>۲</sup> (PCC) در شکل ۹ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود بسته‌شدن کلید و افزایش جریان بار در  $t = 0.055 \text{ sec}$ ، افت ولتاژ و کاهش دامنه ولتاژ در این نقطه را در پی دارد.

جریان سه‌فاز بار محلی و جریان کشیده‌شده از سمت شبکه به ترتیب در شکل ۱۰ و ۱۱ و منحنی توان‌های اکتیو و راکتیو شبکه، اینورتر و بار در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. در زمان  $t < 0.055 \text{ sec}$  سیستم در مُد معکوس می‌باشد به طوری که توان اکتیو تزریقی از منبع تجدیدپذیر با توجه به مقدار تنظیم‌شده حدود ۳۰ kW توان بار محلی در حدود ۹ kW و توان تزریقی به شبکه حدود ۲۱ kW می‌باشد. در زمان



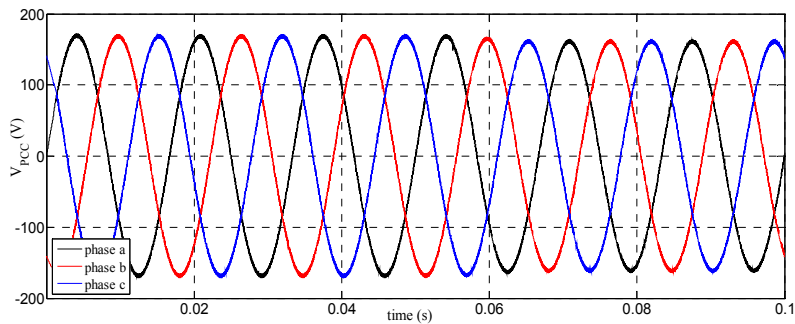
شکل ۸: آنالیز فوریه فاز *c* جریان بار.

چندخروجی به دلیل دومرحله‌ای بودن کُند و دارای نوسان زیاد حول مقدار نهایی است. همچنین استخراج مؤلفه‌ها با استفاده از تبدیل فوریه سریع حداقل به یک سیکل زمان (۱۶۷ میلی‌ثانیه) نیاز دارد که در شکل ۵ و ۶ مشاهده می‌شود.

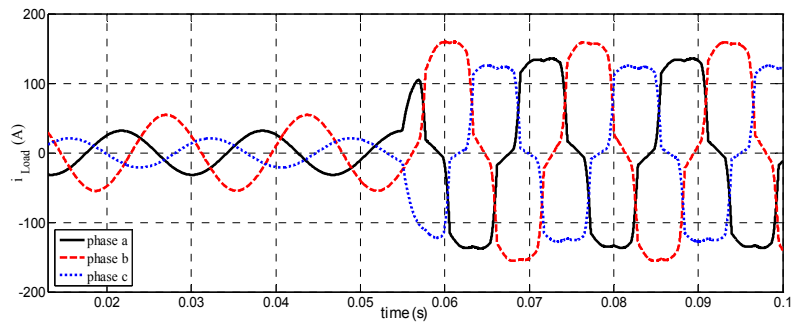
### ۳-۲ شبیه‌سازی یک شبکه توزیع نمونه

عملکرد مدل پیشنهادی به عنوان استراتژی کنترلی یک واسط اینورتری منبع تولید پراکنده در یک شبکه توزیع نمونه سه‌فاز و چهارسیم مورد بررسی قرار می‌گیرد که دیاگرام آن در شکل ۷ و مشخصات سیستم و بارهای محلی متصل در پیوست درج شده است. بارهای محلی شامل بار ثابت خطی نامتعادل ثابت و بار متعادل غیر خطی کلیدشونده شامل یک یک‌سوساز سه‌فاز است که در زمان  $t = 0.055 \text{ sec}$  به مدار وارد می‌شود. منبع تولید پراکنده به صورت دو منبع ولتاژ DC با تقسیم ولتاژ یکنواخت مدل شده که می‌تواند سیستم‌هایی از قبیل فتوولتائیک، میکروتوربین، پیل سوختی و یا سیستم ذخیره انرژی باطری [۲] و ذخیره‌ساز مغناطیسی انرژی الکتریکی ابرسانا باشد. دو حالت اتصال منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه با توجه به میزان توان بار محلی وجود دارد. در حالت مستقیم، توان اکتیو تزریقی از منبع تجدیدپذیر کمتر از تقاضای بار است و بنابراین منبع تجدیدپذیر و شبکه، هر دو بار محلی را تغذیه می‌کنند. در حالت اتصال

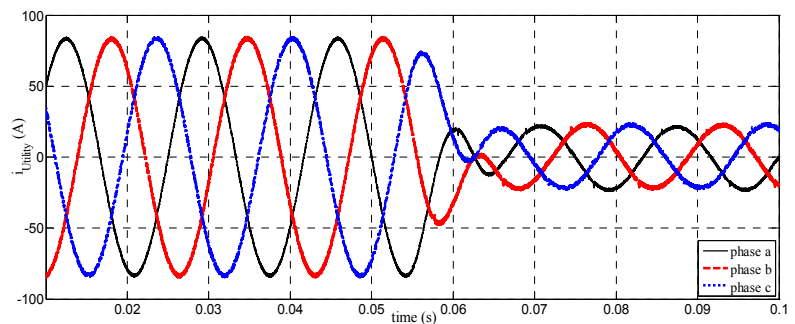
1. Hysteresis  
2. Point of Common Coupling



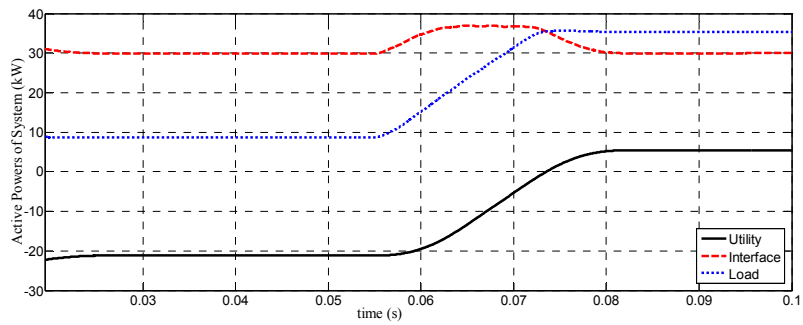
شکل ۹: ولتاژ سه‌فاز در نقطه اتصال مشترک.



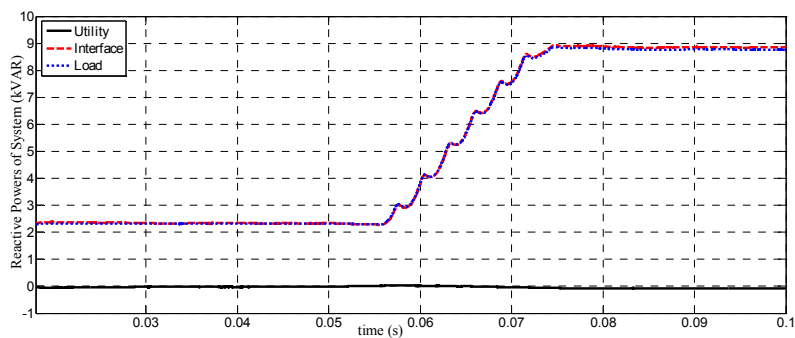
شکل ۱۰: جریان سه‌فاز بار.



شکل ۱۱: جریان سه‌فاز کشیده‌شده از شبکه.

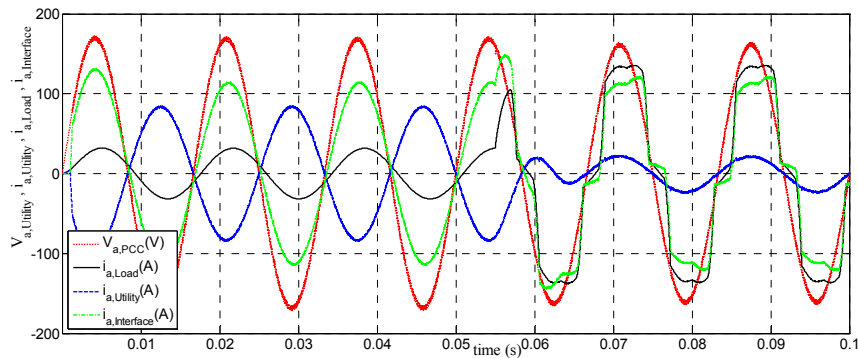
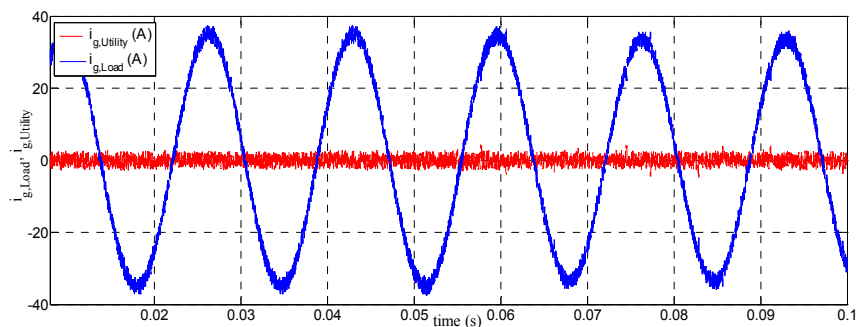


شکل ۱۲: توان‌های اکتیو شبکه، اینورتر و بار.



شکل ۱۳: توان‌های راکتیو شبکه، اینورتر و بار.



شکل ۱۴: فاز  $a$  از سیگنال‌های ولتاژ، جریان بار، جریان شبکه و جریان منبع تجدیدپذیر.

شکل ۱۵: جریان‌های نوترال در سمت بار و شبکه.

جدول ۴: بررسی وضعیت اعوجاج هارمونیک و نامتعادلی جریان‌ها.

		$t < 0.055 \text{ sec}$			$t > 0.055 \text{ sec}$		
		$a$	$b$	$c$	$a$	$B$	$c$
THD (%)	$I_{Load}$	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۱۸.۶۳	۱۶.۱۷	۲۰.۰۲
	$I_{Utility}$	۰.۹۸	۰.۹۸	۰.۹۸	۴.۴۱	۴.۸۹	۴.۴۴
U (%)	$I_{Load}$		۳۲.۵			۷.۵	
	$I_{Utility}$		۰.۰۳			۰.۱	

حالت وجود آید. پس از بسته شدن کلید و به مدار آمدن بار غیر خطی در زمان  $t > 0.055 \text{ sec}$ ، مقدار THD جریان‌های سه فاز بار به ترتیب برابر  $18.63\%$ ،  $16.17\%$  و  $20.02\%$  می‌باشد که با استفاده از مکانیزم جبران‌سازی پیشنهادی به ترتیب به  $4.41\%$ ،  $4.89\%$  و  $4.44\%$  در جریان سمت شبکه کاهش یافته که کمتر از مقادیر مجاز توصیه شده در استاندارد IEEE 519 [۳۲] می‌باشد. همچنین بهبود وضعیت نامتعادلی جریان بار از  $32.5\%$  به  $7.5\%$  در شکل موج جریان سمت شبکه (در زمان  $t < 0.055 \text{ sec}$ ) و کاهش نامتعادلی جریان از  $7.5\%$  به  $0.1\%$  در جریان شبکه ( $t > 0.055 \text{ sec}$ ) نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی است.

چنان که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود با توجه به وجود بار نامتعادل ثابت در سیستم، جریان مؤلفه صفر در سیم نوترال جاری می‌شود که حذف آن توسط جریان  $I_{g,Comp}$  به خوبی انجام شده و در سیم نوترال سمت شبکه وجود ندارد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، یک استراتژی کنترل سیستم تزریق توان اینورتری منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بر اساس الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی-چندخروجی توسعه یافته (EMO-RLS) ارائه و کارایی آن با دو مورد

$t > 0.055 \text{ sec}$  و با وارد شدن بار غیر خطی به مدار، سیستم وارد مد مستقیم شده و بار کل محلی حدود  $35 \text{ kW}$  می‌شود که توان  $30 \text{ kW}$  از بار توسط اینورتر و  $5 \text{ kW}$  از طریق شبکه تأمین می‌شود.

همچنین از شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که تقریباً کل توان راکتیو بار در هر دو مد معکوس و مستقیم توسط واسط تأمین می‌شود. شکل موج‌های فاز  $a$  ولتاژ نقطه اتصال مشترک، جریان بار، جریان کشیده شده از شبکه و جریان تزریقی از اینورتر در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن جهت جریان‌ها طبق شکل ۷، در زمان عملکرد سیستم در مد معکوس، ولتاژ و جریان شبکه دارای اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه هستند در حالی که در مد مستقیم با هم هم‌فازند. همچنین به علت وجود بار سلفی در مدار، ولتاژ و جریان بار در هر دو مد کاری دارای اختلاف فازند، در حالی که برآیند حاصل از جمع جریان بار با جریان جبران‌سازی اینورتر موجب اصلاح ضریب توان و کشیده شدن جریان هم‌فاز با ولتاژ از شبکه در هر دو مد می‌شود.

مقدار THD با استفاده از ابزار آنالیز فوریه برای هر فاز جریان‌های بار و نیز هر فاز جریان‌های شبکه در جدول ۴ درج شده است. اعوجاج هارمونیک جریان بار قبل از وارد شدن بار غیر خطی به مدار تقریباً صفر است. کلیدزنی سوئیچ‌های قدرت برای جبران نامتعادلی جریان بار  $U$ ، باعث می‌شود مقدار کمی THD در جریان کشیده شده از شبکه در این



- [11] P. Garanayak, K. R. Pravat, P. S. Puhon, and S. K. Dash, "Novel schemes used for estimation of power system harmonics and their elimination in a three-phase distribution system," *Electric Power and Energy Systems*, vol. 53, pp. 842-856, Dec. 2013.
- [12] N. G. Hingorani, "Introducing custom power," *IEEE Spectrum*, vol. 32, no. 6, pp. 41-48, Jun. 1995.
- [13] F. L. Yousfi, D. O. Abdeslam, T. Bouthiba, and N. -K. Nguyen, "Adaline for online symmetrical components and phase-angles identification in transmission lines," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1134-1143, Jul. 2012.
- [14] IEEE Standard 1459, *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*, 2010.
- [15] IEEE Standard 1159, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, 2009.
- [16] R. Zahira and A. Peer Fathima, "Technical survey on control strategies of active filter for harmonic suppression," *Procedia Engineering*, vol. 30, pp. 686-693, 2012.
- [17] G. W. Chang, R. C. Hong, and H. J. Su, "An efficient reference compensation current strategy of three-phase shunt active power filter implemented with processor-in-the-loop simulation," *International Trans. on Electrical Energy Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 125-140, Jan 2013.
- [18] Siemens, *SIPROTEC Numerical Protection Relays*, Siemens Protection Systems Catalog SIP, 2014.
- [19] S. V. Vaseghi, *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*, John Wiley & Sons, 2008.
- [20] S. A. Soliman and M. E. El-Hawary, "Application of kalman filtering for online estimation of symmetrical components for power system protection," *Electric Power System Research*, vol. 38, no. 2, pp. 113-123, Aug. 1997.
- [21] W. G. Morsia and M. E. El-Hawary, "On the application of wavelet transform for symmetrical components computations in the presence of stationary and non-stationary power quality disturbances," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1373-1380, Jul. 2011.
- [22] K. Vardar and E. Akpınar, "Comparing ADALINE and IRPT methods based on shunt active power filters," *European Trans. on Electrical Power*, vol. 21, no. 1, pp. 924-936, Jan. 2011.
- [23] M. Qasim and V. Khadkikar, "ADALINE based control strategy for three-phase three-wire UPQC system," in *Proc. IEEE 16th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power, ICHQP'14*, pp. 586-590, 25-28 May 2014.
- [24] S. Nanda, M. Biswal, and P. K. Dash, "Estimation of time varying signal parameters using an improved Adaline learning algorithm," *AEU-International J. of Electronics and Communications*, vol. 68, no. 2, pp. 115-129, Feb. 2014.
- [25] B. Maamar and Q. Uvais, "Recursive estimation of power system harmonics," *Electric Power Systems Research*, vol. 47, pp. 143-152, Oct. 1998.
- [26] P. Garanayak, G. Panda, and R. P. Kumar, "Harmonic estimation using RLS algorithm and elimination with improved current control technique based SAPF in a distribution network," *Electric Power and Energy Systems*, vol. 73, pp. 209-217, Dec. 2015.
- [27] M. I. Marei, E. F. El-Saadany, and M. M. A. Salama, "A flexible DG interface based on a new RLS algorithm for power quality improvement," *IEEE Systems J.*, vol. 6, no. 1, pp. 68-75, Mar. 2012.
- [28] M. I. Marei, E. F. El-Saadany, and M. M. A. Salama, "A novel control algorithm for the DG interface to mitigate power quality problems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1384-1392, Jul. 2004.
- [29] L. H. Costa, P. J. A. Serni, and F. P. Marafao, "An analysis of generalized symmetrical components in non sinusoidal three phase systems," in *Proc. Brazilian Power Electronics Conf. COBEP'11*, pp. 502-507, 11-15 Sept. 2011.
- [30] P. Salmeron and S. P. Litran, "A control strategy for hybrid power filter to compensate four-wires three-phase systems," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 25, no. 7, pp. 1923-1931, Jul. 2010.
- [31] M. Dai, M. N. Marwali, J. W. Jung, and A. Keyhani, "Three-phase four-wire inverter control technique for a single distributed generation unit in island mode," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 322-331, Jan. 2008.
- [32] IEEE Standard 519, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, 2014.

شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB ارزیابی شد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی اول، نشان‌دهنده کارایی مناسب الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر در دنبال کردن مؤلفه‌های توالی هارمونیک‌ها است. سپس با به کارگیری تکنیک پیشنهادی به عنوان استراتژی کنترلی یک واسط اینورتری، علاوه بر مدیریت توان اکتیو تزریقی که وظیفه اصلی آن می‌باشد، حذف هارمونیک‌های جریان، جبران توان راکتیو و متعادل‌سازی جریان‌های سه‌فاز در یک شبکه توزیع نمونه مدل‌سازی شده به طور هم‌زمان و به خوبی انجام می‌شود، به طوری که مقدار THD جریان‌های سه‌فاز بار از  $18.63\%$ ،  $16.17\%$  و  $20.02\%$  به مقادیر کمتر از  $5\%$ ، یعنی حدود مجاز توصیه‌شده در استاندارد IEEE 519 در جریان سمت شبکه کاهش می‌یابد. همچنین در بدترین شرایط نامتعادلی بار که فقط بار نامتعادل در مدار است، درصد نامتعادلی جریان بار برابر  $33.5\%$  می‌باشد که در شکل موج جریان سمت شبکه به  $0.03\%$  کاهش یافته است. در شرایط وجود بارهای بزرگ و یا ضعف شبکه، اثر نامتعادلی و هارمونیک‌های ولتاژی بار بر عملکرد روش کنترلی EMO-RLS قابل بررسی است و برای ادامه این مطالعه پیشنهاد می‌شود.

## پیوست

مشخصات شبکه نمونه و بارهای محلی در روابط زیر آمده است

$$V_{Utility} = 200 \text{ (V) rms/line}, f = 60 \text{ (Hz)},$$

$$Z_{Line} = 0.07 + j0.754 \text{ } (\Omega)$$

$$V_{Renewable Energy Source} : V_{DC1} = V_{DC2} = 500 \text{ (V)}$$

$$\text{Load 1} : Z_a = 5 + j1.88 \text{ } (\Omega), Z_b = 3 + j0.754 \text{ } (\Omega), Z_c = 8 + j1.33 \text{ } (\Omega)$$

$$\text{Load 2} : \text{Three-phase, three-leg full-bridge diode rectifier}, Z_{DC} = 3 + j1.33 \text{ } (\Omega)$$

## مراجع

- [1] M. M. Rezaei and J. Soltani, "A robust control strategy for a grid-connected multi-bus microgrid under unbalanced load conditions," *Science Direct, Electrical Power, and Energy Systems*, vol. 71, pp. 68-76, Oct. 2015.
- [2] M. Singh, L. A. C. Lopes, and N. A. Ninad, "Grid forming battery energy storage system (BESS) for a highly unbalanced hybrid mini-grid," *Electric Power Systems Research*, vol. 127, pp. 126-133, Oct. 2015.
- [3] S. T. Kim, B. K. Kang, S. H. Bae, and J. W. Park, "Application of SMES and grid code compliance to wind/photovoltaic generation system," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 5000804-5000804, Jun 2013.
- [4] ح. حیدری و ر. شریفی، کاربرد ابررسانا در سیستم‌های الکتریکی، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۸.
- [5] J. He, Y. W. Li, and M. S. Munir, "A flexible harmonic control approach through voltage-controlled DG-grid interfacing converters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 1, pp. 444-455, Jan. 2012.
- [6] Y. Shi, R. Li, and H. Li, "High-frequency-link based grid-tied PV system with small DC-link capacitor and low-frequency ripple-free maximum power point tracking," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 31, no. 99, pp. 1-12, Jan. 2015.
- [7] A. Kahrobaei, I. Mohamed, and Y. Abdel-Rady, "Interactive distributed generation interface for flexible micro-grid operation in smart distribution systems," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 295-305, Apr. 2012.
- [8] IEEE Standard 1547, *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, 2003.
- [9] D. Gan, D. Feng, and J. Xie, *Electricity Markets and Power System Economics*, CRC Press, 2013.
- [10] E. F. Fuchs and M. Masoum, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Elsevier, 2008.

**محمد رضا ملازاده شاهرودی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۷ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه و واحد علوم و تحقیقات تهران دانشگاه آزاد اسلامی به پایان رسانده است. در حال حاضر، ایشان دانشجوی مقطع دکتری واحد علوم و تحقیقات تهران دانشگاه آزاد اسلامی و در شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی مشغول به کار می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارت است از: تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی و فشارقوی، کیفیت توان و انرژی‌های تجدیدپذیر. کیفیت توان، پردازش سیگنال در سیستم‌های قدرت و ریزشبکه‌ها.

**فرامرز فقیهی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۷ در دانشگاه‌های تهران، امام حسین (ع) و علم و صنعت ایران به پایان رسانده است. ایشان هم‌اکنون عضو هیأت علمی و استادیار دانشکده برق و کامپیوتر واحد علوم و تحقیقات تهران دانشگاه آزاد اسلامی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارت است از: تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی و فشارقوی، کیفیت توان و انرژی‌های تجدیدپذیر.

**سودابه سلیمانی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۸۲ و ۱۳۸۶ از دانشگاه صنعتی شریف به پایان رسانده است. در حال حاضر، ایشان عضو هیأت علمی و دانشیار دانشکده برق و کامپیوتر واحد علوم و تحقیقات تهران دانشگاه آزاد اسلامی می‌باشد. موضوعات تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل: انرژی‌های نو، ماشین‌های الکتریکی، برنامه‌ریزی سیستم قدرت، تئوری بازی و بازار برق می‌باشد.