

# جداسازی سهم مشترک و شبکه در اغتشاشات هارمونیکی بر مبنای یک مدل بهبودیافته

رضا باقری<sup>i</sup>، جواد شکرالهی مغانی<sup>ii</sup>، گئورگ قره‌پتیان<sup>iii</sup>

## چکیده

هارمونیکی بودن ولتاژ تغذیه، موجبات افزایش تلفات و مصرف انرژی بار را فراهم می‌آورد که این نکته به منزله‌ی ایجاد مضرات اقتصادی برای مشترک است. در این شرایط تعیین سهم مشارکت مشترک و شبکه در جریان‌های هارمونیکی و هارمونیکی شدن ولتاژ اهمیت می‌یابد. در مقاله حاضر، برای تعیین این سهم، مدلی بهبود یافته برای مدل‌سازی بارهای مختلط پیشنهاد می‌شود. ویژگی بارز این مدل آن است که پارامترهای آن در شرایط واقعی و به کمک یک روش عملیاتی و در دسترس، مانند ورود پله‌های بانک خازنی و یا تغییر بارهایی که قبل از بار مورد بررسی، در مدار قرار دارند، شناسایی می‌شود و بر مبنای آن، سهم مشترک و شبکه در ایجاد اغتشاشات هارمونیکی مشخص می‌شود.

## کلمات کلیدی

اغتشاشات هارمونیکی، جداسازی هارمونیکی‌های مشترک و شبکه، مدل‌سازی، تخمین پارامترها

## *Harmonic Distortion Separation of the Customer and Utility Using an Improved Load Model*

R. Bagheri, J.S. Moghani, G.B. Gharehpetia

### ABSTRACT

The harmonic distortion of the supply lines increases the energy consumption of the customers and imposes economical loss for both the utility and the customer. Under these circumstances, determination of the load and utility contribution on the harmonic disturbances become very important.

The first objective of this study is proposing an improved model for an aggregate load. The model parameters can easily be identified using a practical method in real circumstances, such as, applying steps from a capacitor bank or varying a dummy load by some steps, before supplying the actual load, and this is the advantage of proposed model.

On the basis of the identified model parameters, the contribution of the harmonic distortion of utility and the customer is determined. The simulation results and practical measurements show a good agreement for a typical load.

### KEYWORDS

Harmonic Disturbance, Separation, Modeling, Parameter Estimation

<sup>i</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>ii</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>iii</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر

جریان است [۷] و [۸]. در این روش با تزریق جریان در یک میان هارمونیک نزدیک به فرکانس هارمونیک و اندازه گیری جریان‌ها و ولتاژ ایجاد شده، امپدانس‌های هارمونیک مشترک و شبکه مشخص می‌گردد. مشکل این روش، ضرورت تزریق جریان و کاربرد یک دستگاه جانبی است که قابلیت تزریق و اندازه گیری در میان هارمونیک‌ها را داشته باشد. این دستگاه باید در هر نقطه که قصد داورری میان مشترک و شبکه مطرح است، در نقطه اتصال نصب شود که مشکلات مخصوص به خود را به دنبال خواهد داشت. مشابه این روش، استفاده از اطلاعات فیلترهای فعال نصب شده در مدار است که می‌توان پارامترهای بار و شبکه را بر پایه‌ی اطلاعات حاصل از کارکرد آن، شناسایی نمود [۹].

در کنار روش‌های فوق، روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی نیز توسعه یافته‌اند [۱۰] و [۱۱] و [۱۲]. در یک تحقیق اخیر، روشی پیشنهاد شده که در آن میزان مسئولیت سهم مشترک و مصرف کننده، از مدل‌سازی بار به وسیله یک مقاومت و اندوکتانس و متغیر گرفتن این مقاومت و اندوکتانس تعیین می‌شود [۱۰]. در تحقیق دیگر، بار مشترک به صورت ترکیبی از چند کلاس بار هارمونیک تعریف شده است که ضرایب توصیف‌کننده‌ای برای آن شناسایی می‌گردد [۱۱]. این روش‌های مدل‌سازی، برای تخمین و جداسازی تاثیرات چندبار، در یک نقطه‌ی تغذیه مناسب هستند اما روشی برای جداسازی سهم مشترک و شبکه ارائه نمی‌دهند.

در یک مطالعه دیگر، بار به صورت ترکیب یک بار خطی و یک بار غیر خطی، حول نقطه‌ی کار خطی شده و ضرایب خطی آن مشخص شده است [۱۲]. این مدل تنها به شبیه‌سازی اکتفا نموده و برای به دست آوردن پارامترهای مدل، از تغییر ولتاژ تغذیه به تعداد دفعات زیاد با ترکیب‌های متفاوت استفاده کرده است. در این مقاله، مشکلات این روش مدل‌سازی برای تطبیق با شرایط عملی بررسی می‌شود و مدل بهبود یافته‌ای پیشنهاد می‌گردد که در شرایط واقعی قابل کاربرد باشد.

## ۲- روش پیشنهادی مدل‌سازی

روش مرسوم برای مدل‌سازی بارهای هارمونیک که در اغلب نرم‌افزارهای شبیه‌سازی نیز از آن استفاده می‌شود، مدل نورتن است که در آن بار هارمونیک به صورت ترکیب یک منبع جریان ثابت و یک امپدانس موازی در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است در این شرایط جریان هارمونیک تنها به ولتاژ در همان هارمونیک وابسته است. اما در عمل، این روش شبیه‌سازی دارای خطایی است که ناشی از صرف نظر نمودن اثر ولتاژهای مرتبه‌های هارمونیک مولفه‌های متفاوت با

هارمونیک بودن ولتاژ موجب افزایش تلفات و تغییر در توان مصرفی می‌گردد. اما نکته‌ی بسیار مهم آن است که شرایط هارمونیک ولتاژ تغذیه، لزوماً در نتیجه‌ی جریان هارمونیک بار ایجاد نمی‌شود و ممکن است نتیجه‌ی هارمونیک بودن ولتاژ شبکه باشد. در این شرایط هر یک از طرفین یعنی مشترک و شبکه، در ایجاد اغتشاشات هارمونیک، سهم نامشخصی را بر عهده دارند.

از سوی دیگر برای طراحی دقیق تجهیزات جبران‌ساز هارمونیک، شناخت منشاء اغتشاش الزامی است. به عنوان مثال در طراحی فیلتر غیرفعال، فرض بر آن است که بار مصرفی عامل برهم زننده کیفیت برق و تولید هارمونیک است. اما اگر هارمونیک موجود در بار مصرفی، در نتیجه جذب هارمونیک از شبکه به وجود آمده باشد، قراردادن فیلتر غیرفعال موازی که امپدانس کمی در فرکانس رزونانس خود دارد، موجب جذب هارمونیک بیشتر از شبکه خواهد شد.

باید توجه داشت که در صورت مشخص شدن سهم مشترک و شبکه در هارمونیک‌ها، می‌توان از لحاظ اقتصادی نیز مساله را ارزیابی نمود. در صورتی که میزان هارمونیک‌های سهم بار، از سطح معمولی بالاتر رود، آنگاه متولی شبکه‌ی توزیع می‌تواند به اخذ جریمه، متناسب با سطح آلودگی ایجاد شده اقدام نماید. در مقابل مشترک نیز با درک هارمونیک بودن شبکه و جذب هارمونیک از آن، می‌تواند با استناد به الزامات رعایت استانداردهای کیفیت برق در برق تحویلی، اصلاح شرایط هارمونیک را از متولی شبکه طلب نماید.

اولین روشی که برای تعیین جهت هر مرتبه هارمونیک به کار گرفته شد، روش توان هارمونیک است [۱]، [۲]، و [۳]. در این روش از طریق گرفتن تبدیل فوریه، هارمونیک‌های جریان و ولتاژ به صورت مختلط به دست می‌آید. سپس علامت توان هارمونیک، جهت غالب هارمونیک را از داخل به خارج مشخص می‌نماید. این روش دارای مشکلات فراوانی است که محققانی به آن پرداخته‌اند [۴]، [۵]، [۶]. در حقیقت، توان اکتیو هارمونیک، ملاک مناسبی برای تعیین جهت هارمونیک نمی‌باشد و حتی جریان هارمونیک ورودی به سیستم با توان راکتیو هارمونیک همبستگی بیشتری نسبت به توان اکتیو هارمونیک خواهد داشت [۶]. مشکل دیگر این روش آن است که تنها برآیند جریان‌های هارمونیک ورودی و خروجی را محاسبه نموده و سهم مشترک و شبکه در جریان هارمونیک را مشخص نمی‌کند.

روش دیگر، تعیین امپدانس هارمونیک از طریق تزریق

مولفه‌ی شبیه‌سازی شده است.

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \sin(2\pi h t / T + \theta_h) \quad (1)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(2\pi h t / T + \phi_h)$$

که در این صورت، مقادیر مجازی و حقیقی جریان در هارمونیک‌های مرتبه‌ی  $h$ ، ( $I_{hr}$  و  $I_{hi}$ ) و مقادیر مجازی و حقیقی ولتاژهای هارمونیکی در هارمونیک‌های مرتبه‌ی  $h$ ، ( $V_{hr}$  و  $V_{hi}$ ) به صورت زیر خواهند بود:

$$V_{hr} + jV_{hi} = V_h \angle \theta_h \quad (2)$$

$$I_{hr} + jI_{hi} = I_h \angle \phi_h$$

$$h = 1, 2, 3, \dots, n$$

با فرض در نظر گرفته شده، مدل بار در مرتبه‌ی هارمونیکی مورد نظر، ترکیبی از سه جز می‌باشد، اول یک امپدانس ثابت، دوم یک منبع جریان ثابت و سوم یک منبع جریان وابسته به ولتاژهای هارمونیکی، به عبارت دیگر:

$$I_{Lhr} = I_{0hr} + F_{hr}(V_1, V_2, V_3, \dots) + (Y_{hr}V_{hr} - Y_{hi}V_{hi}) \quad (3)$$

$$I_{Lhi} = I_{0hi} + F_{hi}(V_1, V_2, V_3, \dots) + (Y_{hi}V_{hr} + Y_{hr}V_{hi})$$

همانگونه که مشخص است در این مدل، جریان تولید شده

توسط بار هارمونیکی، شامل یک جریان ثابت و نیز یک جریان وابسته به ولتاژ تغذیه می‌باشد. در مقابل جریان جذب شده توسط بار، ضریبی از ولتاژ هارمونیکی در همان مرتبه‌ی هارمونیکی است. در این مدل، با فرض آنکه تغییرات مقادیر ولتاژ هارمونیکی‌های مختلف زیر ۵ درصد باشد، می‌توان با دقت مناسبی، توابع غیرخطی را خطی نمود و روابط زیر را برای هر جریان هارمونیکی وابسته به ولتاژ بدست آورد:

$$F_{hr}(V_1, V_2, V_3, \dots) = a_1 V_{1r} + a_2 V_{2r} + a_3 V_{2r} + \dots + a_{2k-2} V_{kr} + a_{2k-1} V_{ki} \quad (4)$$

$$F_{hi}(V_1, V_2, V_3, \dots) = b_1 V_{1r} + b_2 V_{2r} + b_3 V_{2r} + \dots + b_{2k-2} V_{kr} + b_{2k-1} V_{ki}$$

با جایگزینی مقادیر فوق در رابطه ۳ بدست خواهد آمد:

$$I_{Lhr} = I_{0hr} + a_1 V_{1r} + \dots + a_{2k-2} V_{kr} + a_{2k-1} V_{ki} + a'_{2h-2} V_{hr} + a'_{2h-1} V_{hi}$$

$$I_{Lhi} = I_{0hi} + b_1 V_{1r} + \dots + b_{2k-2} V_{kr} + b_{2k-1} V_{ki} + b'_{2h-2} V_{hr} + b'_{2h-1} V_{hi}$$

$$a'_{2h-2} = Y_{hr} + a_{2h-2}$$

$$a'_{2h-1} = a_{2h-1} - Y_{hi}$$

$$b'_{2h-2} = Y_{hr} + b_{2h-2}$$

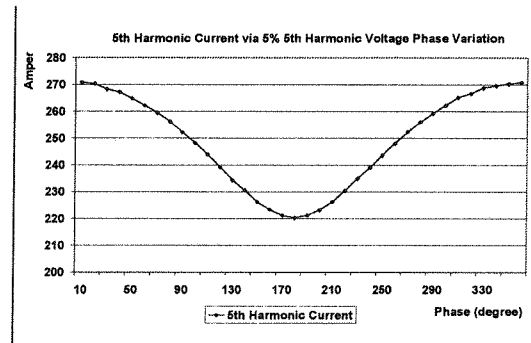
$$b'_{2h-1} = b_{2h-1} + Y_{hi}$$

(5)

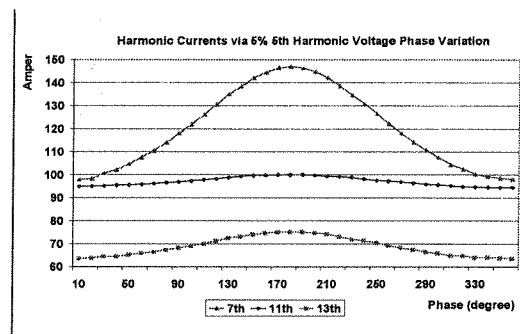
در ضرایب فوق، برای حذف مقدار مجازی ولتاژ اصلی، فاز ولتاژ اصلی به عنوان فاز مرجع در نظر گرفته شده است و فاز سایر هارمونیک‌ها، نسبت به آن محاسبه شده است.

برای بررسی این مدل، یک یکسوکننده‌ی کنترل‌نشده‌ی سه فاز به همراه بار مقاومتی در نظر گرفته می‌شود. به کمک شبیه‌سازی در نرم‌افزار سیمولینک، هارمونیک‌های ولتاژ تغذیه به صورت یکنواخت تغییر داده می‌شود و در هر مرحله از شبیه‌سازی، جریان‌های هارمونیکی به دست می‌آید. با وجود معلوم بودن مقادیر جریان و ولتاژهای هارمونیکی، ضرایب مدل ذکر شده در رابطه‌ی (5) به روش مینیمم مربعات به دست

به عنوان نمونه، یکسوکننده‌ی کنترل‌نشده‌ی سه فاز را همراه بار مقاومتی ۰.۵ اهم در نظر بگیرید. فرض کنید که این یکسوکننده، با ولتاژی تغذیه می‌شود که شامل مولفه‌ی اصلی و مولفه‌ی هارمونیک پنجم با دامنه‌ی ۵ درصدی از مولفه‌ی اصلی است. شکل‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده اندازه‌ی دامنه‌ی جریان در هارمونیک ۵ و هارمونیک‌های ۷، ۱۱ و ۱۳ می‌باشد که توسط این یکسوکننده، با تغییر فاز هارمونیک پنجم ولتاژ تغذیه ایجاد شده است. ملاحظه می‌شود که به غیر از جریان هارمونیک پنجم، جریان هارمونیک‌های هفتم، یازدهم و سیزدهم نیز با تغییر فاز هارمونیک پنجم تغییر می‌کنند. این در حالی است که در مدل نورتن، جریان مولفه‌های ۷، ۱۱ و ۱۳ تنها به ولتاژ در این مولفه‌ها وابسته بوده و نباید با تغییر فاز هارمونیک پنجم، این جریان‌ها تغییر یابند.



شکل (۱): تغییر دامنه‌ی جریان هارمونیک پنجم با تغییر فاز ولتاژ هارمونیک پنجم تغذیه در دامنه‌ی ۵ درصدی



شکل (۲): تغییر دامنه‌ی جریان هارمونیک‌های مختلف با تغییر فاز ولتاژ هارمونیک پنجم تغذیه در دامنه‌ی ۵ درصدی

مشخص است این خطا، باعث خطا در تخمین جریان هارمونیکی ایجاد شده توسط بار می‌شود و برای رفع آن، باید اثر ولتاژهای هارمونیکی متفاوت با مرتبه‌ی شبیه‌سازی شده نیز در ایجاد جریان هارمونیکی در نظر گرفته شود. به این منظور ولتاژ هارمونیکی در هر فاز و جریان هارمونیکی آن فاز را می‌توان به صورت ترکیبی از هارمونیک‌های مختلف نوشت:

می‌آید. در جدول (۱) برای جریان‌های حقیقی و مجازی هارمونیک پنجم ضرایب ولتاژهای هارمونیک مختلف تا هارمونیک سیزدهم آورده شده است، البته با فرض آنکه هارمونیک‌های زوج و نیز مرتبه‌ی سوم در ولتاژ تغذیه وجود ندارند، ضرایب این هارمونیک‌ها صفر در نظر گرفته شده است. در کنار این یکسوکننده‌ی سه فاز، یک بار خطی سه فاز با ظرفیت توان مصرفی ۶۰۰ کیلووات و توان راکتیو مصرفی ۴۰۰

کیلووار اضافه می‌شود که مجدداً به روش مشابه، ضرایب این بار مختلط محاسبه می‌گردد. همانگونه که در جدول (۱) مشخص است، به غیر از ضرایب ولتاژ هارمونیک پنجم، سایر ضرایب با یکدیگر مشابه هستند، چرا که بار اضافه شده یک بار خطی است که تنها امکان جذب جریان هارمونیک را دارد نه تزریق آن، لذا تنها در ضرایب ولتاژ هارمونیک پنجم تاثیر می‌گذارد.

جدول (۱): ضرایب مدل خطی شده یکسوکننده‌ی شش‌پالسه و ترکیب یکسوکننده شش‌پالسه و بار خطی

یکسوکننده و بار خطی	یکسوکننده	ضرایب جریان مجازی هارمونیک پنجم	یکسوکننده و بار خطی	یکسوکننده	ضرایب جریان حقیقی هارمونیک پنجم
113.46	113.46	$I_{50r}$	215.82	215.82	$I_{50r}$
0.23	0.23	$b_{51}$	0.41	0.41	$a_{51}$
1.44	0.57	$b_{52}$	2.82	0.78	$a_{52}$
4.72	2.68	$b_{53}$	-2.32	-1.45	$a_{53}$
-0.37	-0.37	$b_{54}$	-0.78	-0.78	$a_{54}$
0.79	0.79	$b_{55}$	-0.35	-0.35	$a_{55}$
0.13	0.13	$b_{56}$	-0.10	-0.10	$a_{56}$
1.67	1.67	$b_{57}$	-0.87	-0.87	$a_{57}$
0.12	0.12	$b_{58}$	-0.23	-0.23	$a_{58}$
1.30	1.30	$b_{59}$	-0.67	-0.67	$a_{59}$
0.04	0.04	خطا	0.02	0.02	خطا

اگر تفاضل این ضرایب در دو حالت محاسبه شود، مقادیر جدول (۲) به دست خواهد آمد که همان ماتریس ادمیتانس مربوط به بار خطی اضافه شده است.

جدول (۲): تفاوت ضرایب دو مدل

$a_{52RL} - a_{52R}$	$a_{53RL} - a_{53R}$
2.04	-0.87
$b_{52RL} - b_{52R}$	$b_{53RL} - b_{53R}$
0.87	2.04

به این ترتیب مدل بار به صورتی یک مقدار ثابت و ترکیبی از ضرایب خطی از ولتاژهای هارمونیک مختلف به دست می‌آید. در تحقیقی دیگر فرض شده است که ضرایب  $a_{2h-2}$ ،  $b_{2h-1}$  و  $b_{2h-2}$  در مقابل  $Y_{hr}$  و  $Y_{hi}$  ناچیز هستند و همواره می‌توان از این ضرایب صرف‌نظر نمود [۱۲]. برای بررسی صحت این فرض، باید ضرایب مذکور پس از محاسبه دقیق، با یکدیگر مقایسه شوند، اما برای تخمین دقیق ادمیتانس ورودی ( $Y_{hi}$  و  $Y_{hr}$ ) در هارمونیک مورد نظر و جداسازی این ضریب از ضریب خطی‌سازی، راه‌حل کاملاً دقیق، تغذیه‌ی سیستم بار در دو میان هارمونیک با فرکانسی بیشتر و کمتر از هارمونیک مورد نظر و به دست آوردن ادمیتانس ورودی سیستم در این دو میان هارمونیک و متوسط گیری از آنها است.

به عنوان مثال برای یکسوکننده سه فاز با بار مقاومتی، برای به دست آوردن دقیق ادمیتانس ورودی، سیستم بار با ترکیبی از ولتاژ مولفه‌ی اصلی و میان‌هارمونیک‌هایی از

فرکانس  $25+25$  هرتز و  $25-25$  هرتز، تغذیه می‌شود. ادمیتانس‌های به دست آمده مطابق جدول (۳) خواهد بود که با میانگین‌گیری، ادمیتانس ورودی این سیستم بار در هارمونیک پنجم محاسبه می‌گردد. از آنجا که برای شناسایی از فرکانسی متفاوت با فرکانس  $250$  هرتز استفاده شده است، بدیهی است جریان‌های به دست آمده در میان‌هارمونیک‌های به دست آمده، ارتباطی با ولتاژ هارمونیک پنجم تغذیه نداشته و اثر خطی‌سازی در آن وجود ندارد و تنها ناشی از وجود ولتاژ میان‌هارمونیک مورد نظر، در تغذیه‌ی بار می‌باشد.

جدول (۳): ضرایب ادمیتانس ورودی

$f$ (Hz)	$Y_{hr}$	$Y_{hi}$
275	1.755	1.027
225	1.759	1.008
250	1.757	1.018

به این ترتیب با توجه به مقادیر جدول (۲)، ضرایب ناشی از خطی‌سازی، مطابق با مقادیر مندرج در جدول (۴) خواهد بود.

جدول (۴): ضرایب خطی‌سازی

$a_{2h-1}$	$a_{2h-2}$	$b_{2h-1}$	$b_{2h-2}$
-0.98	-0.43	0.45	0.92

بدین ترتیب، ضرایب ناشی از خطی‌سازی در مقایسه با ضرایب ناشی از جذب هارمونیک قابل مقایسه بوده و نمی‌توان به سادگی از آنها صرف‌نظر نمود.

البته در یکسوکننده‌ی کنترل نشده‌ی سه فاز با بار مقاومتی، هیچ فیلتر خازنی و یا سلفی در سمت AC و یا DC وجود ندارد.

بدیهی است که به دلیل تاثیر قابل توجه ضرایب خطی‌سازی هارمونیک‌های ولتاژ ورودی، مقادیر آن قابل توجه می‌باشد. در اغلب بارهای غیرخطی که توسط سلف و خازن‌های فیلتر کننده، از اعوجاجات ولتاژ تغذیه کاسته می‌شود، ضرایب خطی‌سازی در مقابل ضرایب جذب هارمونیک ناچیز می‌باشند. ضمن آنکه در اکثر موارد، بارهای خطی نیز در کنار بار غیرخطی، بخشی از سیستم بار را تشکیل می‌دهند که موجب افزایش ضرایب ادمیتانس ورودی در مقایسه با ضرایب خطی‌سازی خواهند بود. در نهایت برای بررسی صحت این فرض و ناچیز بودن ضرایب خطی‌سازی، باید رابطه‌ی (۶) مابین ضرایب برقرار باشد:

$$\begin{cases} |a_{2h-2}| |b_{2h-2}| \ll |Y_{hr}| \\ |a_{2h-1}| |b_{2h-1}| \ll |Y_{hl}| \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a'_{2h-2} \approx b'_{2h-2} \\ a'_{2h-1} \approx -b'_{2h-1} \end{cases} \quad (۶)$$

جدول (۵) ضرایب ترکیب یک بار خطی ۴۰۰ کیلووات و ۶۰۰ کیلوواتی و یک UPS و نیز ضرایب ترکیب بار خطی مذکور و یک سیستم تغذیه‌ی موتور DC را نمایش می‌دهد که فرض مذکور در این ضرایب برقرار است.

جدول (۵): ضرایب مدل توصیف‌کننده موتور DC و UPS

HS	منبع تغذیه بدون وقفه				موتور DC			
	a <sub>52</sub>	4.46	b <sub>52</sub>	1.82	a <sub>52</sub>	2.18	b <sub>52</sub>	0.79
	a <sub>53</sub>	-2.02	b <sub>53</sub>	5.27	a <sub>53</sub>	-0.83	b <sub>53</sub>	2.19

### ۳- ساده‌سازی مدل برای شرایط واقعی

اولین فرض در [۱۲] آن است که باید خطی‌سازی و به دست آوردن مدل، حول نقطه‌ی کارکرد ولتاژ نرمال و شرایط صفر مقادیر مجازی و حقیقی ولتاژهای هارمونیک انجام شود. در حالیکه در زمان تغییر در سیستم و ورود پله‌های بانک خازنی و تغییر شرایط ولتاژ تغذیه، احتمال تغییر شرایط حول نقطه‌ی صفر بسیار اندک است. برای حل این مشکل، خطی‌سازی حول متوسط مقادیر مجازی و حقیقی ولتاژ هارمونیک‌ها صورت می‌پذیرد که داده‌های موجود، توزیع یکنواختی حول آن خواهند داشت.

در [۱۲] برای به دست آوردن ضرایب مدل فرض گردیده که می‌توان شرایط تغذیه را به صورت یکنواخت در ولتاژهای هارمونیک مختلف تغییر داد. با تعداد بسیار زیادی تغییر و محاسبه‌ی جریان‌های هارمونیک‌های مختلف، از طریق روش مینیمم مربعات، می‌توان این ضرایب را محاسبه نمود. بی‌تردید در شرایط واقعی این امکان فراهم نمی‌باشد و نمی‌توان تعداد دفعات تغییر شرایط تغذیه را به میزان زیادی افزایش داد، تنها موردی که در اغلب سیستم‌های قدرت اجازه‌ی تغییر در شرایط تغذیه‌ی سیستم را می‌دهد، ورود پله‌های بانک خازنی و یا تغییر

در باری است که پیش از تغذیه‌ی بار مورد بررسی در مدار قرار دارد و در واقعیت، حداکثر تعداد پله‌های بانک خازنی بیشتر از ۲۰ پله نخواهد بود. به این ترتیب تعداد پارامترهای توصیف‌کننده‌ی مدل، باید از تعداد معادلات کمتر باشد. در مدل ذکر شده، محدودیتی برای تعداد پارامترها وجود نداشت و بنابر فرض، با در نظر گرفتن مدل تا هارمونیک ۳۲، تعداد پارامترهایی که مدل را توصیف می‌کنند به ۶۴ عدد می‌رسد که به طور یقین، در زمانی که تعداد معادلات در دسترس، به عنوان مثال ۱۶ عدد باشد، باید برای به دست آوردن ضرایب مدل، تعداد پارامترها تقلیل یابد. برای تقلیل تعداد پارامترها، در سه مرحله پارامترهای قابل جایگزینی شناسایی شده و از تعداد پارامترهای مدل کاسته می‌شود.

برای مثال یک سیستم تغذیه موتور DC به همراه بار خطی ۶۰۰ کیلووات و ۴۰۰ کیلووات در نظر گرفته می‌شود که در مجاورت آن، یک بانک خازنی موازی و دارای ۱۵ پله‌ی ۵۰ کیلوواتی وجود دارد، محل اندازه‌گیری، پس از بانک خازنی و پیش از بار است که با وارد شدن هر پله از بانک خازنی، به دلیل جذب جریان هارمونیک و راکتیو توسط آن، ولتاژ تغذیه‌ی بار تغییر می‌کند. این تغییر ولتاژ، تغییر در پارامترهای جریان را به دنبال دارد.

### ۳-۱- اولین گام ساده‌سازی

در اولین گام، این نکته‌ی اصلی در نظر گرفته می‌شود که در شرایط شبیه‌سازی، پارامترهای مختلف با دامنه‌ها و حدود تغییرات مشابه حول نقطه‌ی خطی‌سازی تغییر کرده و مدل شناسایی می‌شود. در صورتی که در شرایط واقعی، لزوماً دامنه‌ی تغییرات ولتاژهای حقیقی و مجازی هارمونیک‌های مختلف، به یک میزان نخواهد بود.

جدول (۶) نشانگر واریانس تغییرات پارامترهای ولتاژ مختلف، حاصل از ورود ۱۵ پله‌ی بانک خازنی است. همان‌گونه که مشخص است، حدود تغییرات برخی از پارامترها، به میزان قابل توجهی از پارامترهای دیگر کمتر است.

جدول (۶): واریانس تغییرات پارامترهای مختلف

V <sub>1r</sub>	V <sub>2r</sub>	V <sub>3r</sub>	V <sub>5r</sub>	V <sub>7r</sub>	V <sub>11r</sub>	V <sub>13r</sub>
42.0	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1
V <sub>5r</sub>	V <sub>7r</sub>	V <sub>11r</sub>	V <sub>13r</sub>	V <sub>17r</sub>	V <sub>19r</sub>	V <sub>23r</sub>
118.0	75.0	0.9	0.2	44.0	98.0	0.4
V <sub>8r</sub>	V <sub>9r</sub>	V <sub>10r</sub>	V <sub>14r</sub>	V <sub>16r</sub>	V <sub>18r</sub>	V <sub>21r</sub>
0.2	0.4	0.4	0.1	0.1	38.0	25.0
V <sub>12r</sub>	V <sub>14r</sub>	V <sub>15r</sub>	V <sub>16r</sub>	V <sub>17r</sub>	V <sub>18r</sub>	V <sub>19r</sub>
0.1	0.1	14.0	15.1	2.7	0.1	0.5
V <sub>15r</sub>	V <sub>16r</sub>	V <sub>17r</sub>	V <sub>18r</sub>	V <sub>19r</sub>	V <sub>20r</sub>	V <sub>21r</sub>
0.5	0.4	0.4	3.0	4.4	0.1	0.1

در این شرایط پارامترهایی که حدود تغییرات بیشتر و دامنه‌ی بزرگتری دارند، بی‌تردید در مدل تاثیر بیشتری نسبت

به پارامترهایی که حدود تغییرات آنها به میزان قابل توجهی کوچکتر است، خواهند داشت. با توجه به واریانس تغییرات پارامترهای مختلف که در جدول (۶) آمده است، هارمونیک‌های زوج و مضرب سه و نیز هارمونیک‌های فرد بالاتر از مرتبه‌ی ۱۳ که در مقایسه با سایر پارامترها، مقادیر بسیار کمتری دارند، به عنوان پارامترهای کم ارزش‌تر کنار گذاشته می‌شوند.

### ۳-۲- دومین گام ساده‌سازی

در گام دوم، میزان اهمیت پارامترهای مختلف در مدل اصلی مشخص و با توجه به آن، برخی از پارامترها قابل صرف‌نظر خواهند بود. مدل ذکر شده مجموعه‌ای از تعداد قابل توجهی پارامترها را دربر می‌گیرد که بطور یقین تمام پارامترها در یک درجه از اهمیت نبوده و خطای ناشی از صرف نظر نمودن از برخی از این پارامترها، قابل پذیرش است. بهترین تخمین‌های یک پارامتری، دو پارامتری و به همین ترتیب تخمین‌های بالاتر با انتخاب انواع ترکیب‌های ممکن از پارامترها، تعیین میزان خطای مینیمم مربعات و شناخت کمترین خطا در هر تخمین  $n$  پارامتری، قابل دستیابی است.

برای این موضوع با تغییر هارمونیک‌های مختلف ولتاژ به صورت یکنواخت از منفی پنج درصد تا مثبت پنج درصد، مدل در نرم‌افزار سیمولینک شبیه‌سازی می‌شود و مقادیر حقیقی و مجازی جریان هارمونیک پنجم، به دست می‌آیند. برای کاستن از تعداد پارامترها، ابتدا با تمام معادلات جریان، با انتخاب یک

پارامتر، به روش مینیمم مربعات ضرایب به دست می‌آید، این پارامتر برای تمام پارامترهای موجود انتخاب می‌شود و آن پارامتری که کمترین خطای باقیمانده‌ی مینیمم مربعات را در مقایسه با سایرین داشته باشد، به عنوان بهترین تخمین یک پارامتری انتخاب می‌گردد. به همین ترتیب تمام ترکیب‌های دو پارامتری از بین پارامترهای موجود انتخاب شده و آن ترکیبی که کمترین خطای مینیمم مربعات را خواهد داشت، به عنوان بهترین تخمین دو پارامتری انتخاب می‌گردد و این روند تا انتخاب تمام پارامترها ادامه خواهد داشت. جدول (۷) و (۸) اولویت‌بندی پارامترها و ضرایب به دست آمده و شکل‌های (۳) و (۴)، چگونگی کاهش میزان خطا با افزایش تعداد پارامترها را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۳) و (۴) دیده می‌شود تقریباً افزوده شدن پارامترهای ۴ به بعد، تاثیر چندانی بر روی کاهش میزان خطا ندارند، بنابراین پارامترهای فوق را می‌توان در زمره‌ی پارامترهای کم‌تاثیر دسته‌بندی نموده و آنها را در ساده‌سازی مدل، لحاظ نکرد.

لازم به ذکر است اگر هدف از مدل‌سازی، به دست آوردن میزان مشارکت تغذیه و بار در جریان هارمونیک باشد، باید پارامترهای ولتاژ حقیقی و مجازی در مرتبه‌ی هارمونیک مرتبط در نظر گرفته شوند، در غیر این صورت، ترکیب پارامترهای دیگر نیز با توجه به خطای آن قابل قبول است.

جدول (۷): ضرایب مدل‌های ساده شده بر حسب پارامترهای مختلف برای جریان حقیقی هارمونیک پنجم

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Error
$a_0$	$V_{5r}$	$V_{5i}$	$V_1$	$V_{13r}$	$V_{7r}$	$V_{13i}$	$V_{7i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	
-44.24	2.18	-0.83	-0.09	0.03	0.03	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	0.0194
-44.24	2.18	-0.83	-0.09	0.03	0.03	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.0195
-44.24	2.18	-0.83	-0.09	0.03	0.03	-0.02	-0.02	0.00	0.00	0.0196
-44.24	2.18	-0.83	-0.09	0.03	0.03	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.0198
-44.23	2.18	-0.83	-0.09	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0201
-44.22	2.18	-0.83	-0.09	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0205
-44.21	2.19	-0.83	-0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0354
-44.27	2.19	-0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.1067
-45.59	2.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.3125
-45.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0194

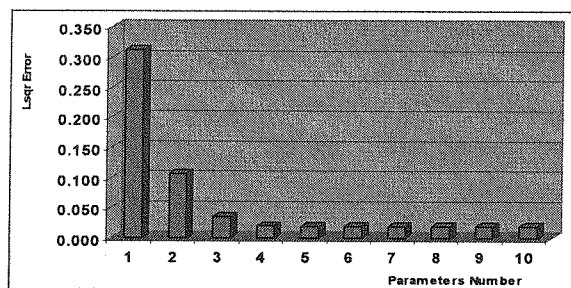
جدول (۸): ضرایب مدل‌های ساده شده بر حسب پارامترهای مختلف برای جریان مجازی هارمونیک پنجم

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Error
$a_0$	$V_{5i}$	$V_1$	$V_{5r}$	$V_{7i}$	$V_{13r}$	$V_{7r}$	$V_{11i}$	$V_{11r}$	$V_{13i}$	
1.31	2.19	0.48	0.79	0.04	-0.04	0.03	-0.03	0.01	0.01	0.0415
1.31	2.19	0.48	0.79	0.04	-0.04	0.03	-0.03	0.01	0.00	0.0421
1.31	2.19	0.48	0.79	0.04	-0.04	0.03	-0.03	0.00	0.00	0.0429
1.32	2.19	0.48	0.79	0.04	-0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.0478
1.34	2.19	0.48	0.79	0.05	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0578
1.35	2.19	0.47	0.79	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0669
1.35	2.18	0.47	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0804
1.23	2.23	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.1082
1.57	2.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.1435
5.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.2090

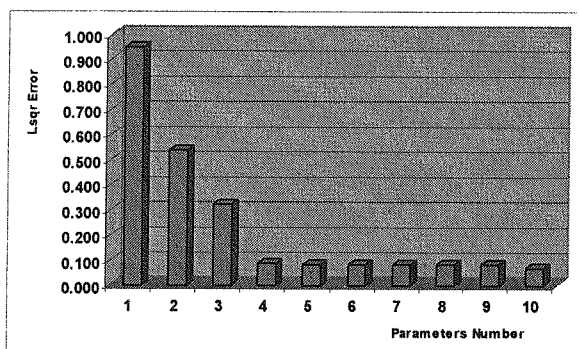
از چند پارامتر کمتر تاثیرگذار دیگر مانند  $V_{11i}$  و  $V_{11r}$  صرف نظر می شود و دامنه‌ی پارامترهای تاثیرگذار محدودتر می گردد. اما اگر این تقریب از مدل بار وجود نداشته باشد، می توان بدون فیلتر کردن پارامترها، به مرحله‌ی بعد رفت.

### ۳-۳- سومین گام ساده سازی

اما شرایط شبیه سازی با شرایط واقعی یک تفاوت کلیدی دیگر نیز دارد که در گام سوم به آن پرداخته می شود. در شرایط شبیه سازی، داده هایی که برای شناسایی مدل به کار رفته اند، دارای توزیع یکنواخت می باشند و بین پارامترهای مختلف ولتاژ بکار رفته برای شناسایی سیستم بار، همبستگی آماری وجود ندارد. درحالی که در شرایط واقعی و با ایجاد تغییر به کمک بانک های خازنی، داده های به دست آمده مستقل از یکدیگر نخواهند بود و نسبت به یکدیگر از الگوهای پیروی خواهند کرد. جدول (۹) نشانگر ضرایب همبستگی بین پارامترهای ولتاژی به کاررفته برای شناسایی با توزیع یکنواخت می باشد. جدول (۱۰) نشانگر ضرایب همبستگی بین داده هایی که از ورود ۱۵ پله بانک خازنی به دست آمده، می باشد. پیدا است که در داده هایی که از ورود پله های بانک خازنی به دست می آید، بین برخی از داده ها، همبستگی قابل توجهی وجود دارد.



شکل (۳): کاهش خطا در مدل های ساده شده در تقریب جریان حقیقی هارمونیک پنجم



شکل (۴): کاهش خطا در مدل های ساده شده در تقریب جریان مجازی هارمونیک پنجم

در مورد مدل کنترل سرعت موتور DC و بار خطی، اگر معلومات داده شده مشابه این مورد، تقریبی از بارهای غیرخطی موجود را دربرگیرد و بتوان بر مبنای آن اولویت اثرگذاری پارامترهای مختلف را شناسایی نمود، در این مرحله

جدول (۹): ضرایب همبستگی بین داده های مختلف به دست آمده از تغییر داده های نرمال

	$V_{1r}$	$V_{5r}$	$V_{5i}$	$V_{7r}$	$V_{7i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{13r}$	$V_{13i}$
$V_{1r}$	1	0.00	0.00	-0.09	-0.06	-0.07	0.11	0.02	-0.08
$V_{5r}$	0.00	1	-0.05	0.04	0.03	0.07	-0.13	-0.04	-0.05
$V_{5i}$	0.00	-0.05	1	-0.08	0.09	0.11	-0.01	0.03	-0.10
$V_{7r}$	-0.09	0.04	-0.08	1	-0.10	-0.01	-0.02	-0.04	-0.07
$V_{7i}$	-0.06	0.03	0.09	-0.10	1	0.12	0.00	-0.17	-0.06
$V_{11r}$	-0.07	0.07	0.11	-0.01	0.12	1	0.00	-0.04	0.07
$V_{11i}$	0.11	-0.13	-0.01	-0.02	0.00	0.00	1	0.04	0.12
$V_{13r}$	0.02	-0.04	0.03	-0.04	-0.17	-0.04	0.04	1	-0.01
$V_{13i}$	-0.08	-0.05	-0.10	-0.07	-0.06	0.07	0.12	-0.01	1

جدول (۱۰): ضرایب همبستگی بین داده های مختلف به دست آمده از تغییر پله های بانک خازنی

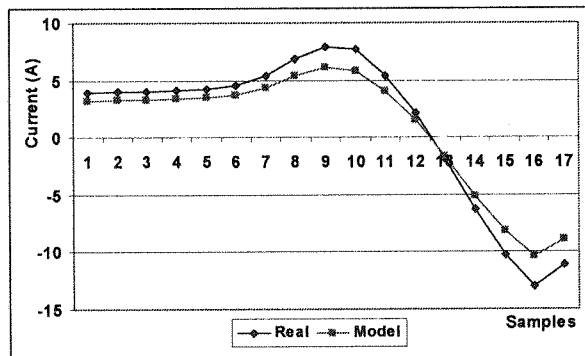
	$V_{1r}$	$V_{5r}$	$V_{5i}$	$V_{7r}$	$V_{7i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{13r}$	$V_{13i}$
$V_{1r}$	1	0.82	-0.87	-0.83	0.44	0.02	-0.76	-0.29	0.68
$V_{5r}$	0.82	1	-0.54	-0.92	0.28	0.01	-0.75	-0.28	0.68
$V_{5i}$	-0.87	-0.54	1	0.55	-0.75	0.21	0.45	-0.02	-0.44
$V_{7r}$	-0.83	-0.92	0.55	1	-0.25	0.15	0.77	0.16	-0.73
$V_{7i}$	0.44	0.28	-0.75	-0.25	1	-0.49	0.07	0.43	0.02
$V_{11r}$	0.02	0.01	0.21	0.15	-0.49	1	-0.14	-0.93	0.00
$V_{11i}$	-0.76	-0.75	0.45	0.77	0.07	-0.14	1	0.38	-0.95
$V_{13r}$	-0.29	-0.28	-0.02	0.16	0.43	-0.93	0.38	1	-0.22
$V_{13i}$	0.68	0.68	-0.44	-0.73	0.02	0.00	-0.95	-0.22	1

جدول (۱۱): مقادیر پارامترهای برای به دست آمده برای مدل

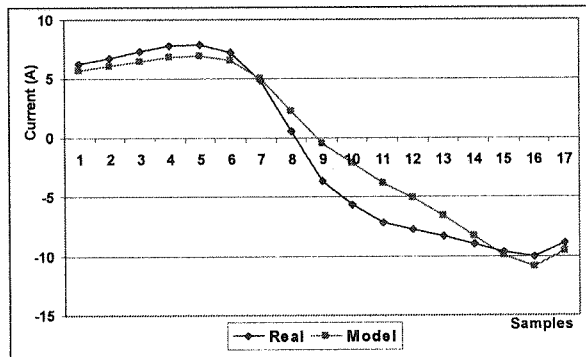
جریان حقیقی هارمونیک پنجم بر مبنای ۱۶ داده

Model	$I_{05}$	$V_{1r}$	$V_{5r}$	$V_{5i}$
$I_{5r}$	-38.66	0.00	1.72	-0.95
$I_{5i}$	3.28	0.36	1.17	1.59

با توجه به مقادیر دقیق مندرج در جدول‌های (۷) و (۸)، شکل‌های (۵) و (۶) مقایسه جریان جذب شده‌ی هارمونیک در این مدل تخمینی و مقدار واقعی آن را نمایش می‌دهد. جریان جذب شده‌ی هارمونیک پنجم، در هر مقدار ولتاژ، از مقادیر جریان تولید شده توسط بار، از تفاضل جریان جذب شده و جریان اندازه‌گیری شده به دست می‌آید.



شکل (۵): مقایسه مقادیر واقعی و تخمینی جریان حقیقی هارمونیک پنجم که به بار وارد می‌شود



شکل (۶): مقایسه مقادیر واقعی و تخمینی جریان مجازی هارمونیک پنجم که به بار وارد می‌شود

همانگونه که مشخص است خطای تخمین قابل قبول می‌باشد. در مقایسه‌ی مقادیر ثابت نیز مشاهده می‌شود که خطا قابل قبول است.

جدول (۱۲): مقایسه مقادیر ثابت واقعی و تخمینی

Model	$I_{05r}$	$I_{05i}$	$I_{05}$
Model	-38.66	3.28	39.8
Real	-44.24	1.31	44.25

## ۴- نمونه‌ی عملیاتی

برای آزمون این روش مدل‌سازی در عمل، یک دستگاه کنترل‌کننده‌ی دور موتور با توان ۵۰۰ کیلووات مورد آزمایش

زمانی که تعدادی از پارامترهایی که برای شناسایی به کار می‌روند، به یکدیگر وابسته باشند، ضرایبی که برای مدل به دست خواهد آمد، کاملاً متفاوت با ضرایب به دست آمده برای مدلی است که با پارامترهای مستقل از هم شناسایی شود، به عنوان مثال برای تخمین منحنی  $Z=4X^3+3X+Y^3+Y+1$  حول نقطه‌ی  $X=-0.1$  و  $Y=-0.1$ ، با در نظر گرفتن توزیع نرمال  $X$  و  $Y$  و فرض استقلال داده‌هایی که برای شناسایی به کار می‌روند، بین ضرایب مدل شناسایی شده از روش مینیم مربعات، رابطه‌ی (۷) برقرار می‌باشد، در حالی که اگر داده‌های پارامترهای  $X$  و  $Y$  که برای شناسایی مدل به کار می‌روند، با یکدیگر همبستگی زیادی داشته و برای نمونه بتوان آنها را با رابطه‌ی خطی  $Y=X$  با یکدیگر مرتبط نمود، در این صورت مدل شناسایی شده از روش مینیم مربعات، رابطه‌ی (۸) می‌باشد.

$$Z=0.59+3.14(X+0.1)+1.04(Y+0.1) \quad (7)$$

$$Z=0.59+2.09(X+0.1)+2.09(Y+0.1) \quad (8)$$

به طور خلاصه اگر بین داده‌های دو پارامتر که در توصیف مدل به کار رفته‌اند، همبستگی قابل توجهی وجود داشته باشد، ضرایبی که برای این پارامترها در مدل به دست می‌آید، کاملاً متفاوت با ضرایب مدل اصلی خواهد بود. برای حل این مشکل بهتر است با توجه به اهمیت دو پارامتر، از یکی از دو پارامتر در مقایسه با پارامتر دیگر صرف‌نظر شود.

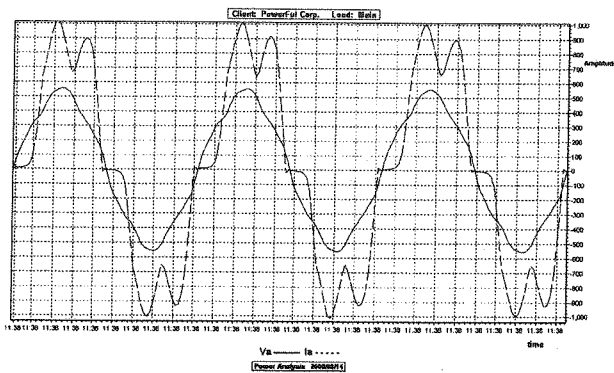
در مدل مورد نظر، اگر منظور، بکارگیری مدل تخمینی برای تخمین جریان هارمونیک جذب‌شونده توسط بار در هارمونیک پنجم باشد، باید پارامترهای  $V_{5r}$  و  $V_{5i}$  در این مدل حضور داشته باشند و برای به دست آمدن ضرایب صحیح در این ولتاژها، باید از پارامتر  $V_{7r}$  که داده‌های آنها با داده‌های  $V_{5i}$  همبستگی قابل توجهی دارد، صرف‌نظر نمود. در غیر این صورت ضرایب دقیقی از مدل به دست نخواهد آمد.

در انتها با در نظر گرفتن فرض ذکر شده در رابطه‌ی (۶) که در اغلب سیستم‌های بار برقرار است، خطای  $e$  مطابق رابطه‌ی ذیل تعریف می‌شود:

$$e=|a'_{2h-2}-b'_{2h-2}|+|a'_{2h-1}+b'_{2h-1}| \quad (9)$$

با در نظر گرفتن تمام ترکیب‌های ممکن از پارامترهای تاثیرگذار برای توصیف  $I_{5r}$  و  $I_{5i}$ ، بهترین ترکیب که این خطا به کمترین حد خود برسد، به عنوان مدل توصیفی انتخاب می‌شود. با چنین تخمین اولیه از مدل، با توجه به پارامترهای جریان موجود، ضرایب ذکر شده در جدول (۱۱) برای تخمین جریان‌های حقیقی و مجازی هارمونیک پنجم به دست می‌آید.





شکل (۷): جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده‌ی کنترل‌کننده سرعت

موتور بدون حضور بانک خازنی

جداول (۱۲) و (۱۴) چگونگی تغییر ولتاژ سر بار و چگونگی

تغییر جریان بار با ورود پله‌های خازنی مختلف را نمایش

می‌دهد.

جدول (۱۳): مقادیر ولتاژ با ورود پله‌های بانک خازنی

$V_{1r}$	$V_{5r}$	$V_{5i}$	$V_{7r}$	$V_{7i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{13r}$	$V_{13i}$
543.91	26.39	0.17	-11.90	-3.83	-9.84	-5.26	5.92	0.84
546.08	27.58	0.12	-12.99	-3.52	-10.88	-3.38	5.56	-0.12
544.21	29.41	-1.72	-15.23	-1.43	-10.80	1.41	3.82	-1.88
548.20	30.24	-0.69	-15.30	-1.43	-10.39	2.11	3.13	-1.65
546.24	31.42	-3.29	-17.12	0.52	-8.48	4.49	2.98	-1.86
551.39	34.04	-4.39	-18.34	3.42	-5.94	4.94	2.60	-1.66
552.39	36.76	-8.43	-20.01	10.37	-3.00	3.89	1.74	-1.65
556.41	39.09	-10.01	-20.07	14.86	-2.02	2.76	1.56	-0.97

جدول (۱۴): مقادیر جریان با ورود پله‌های بانک خازنی

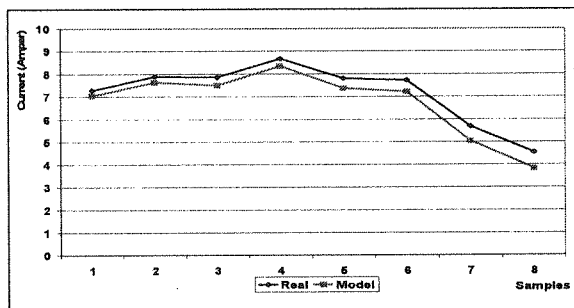
$I_{1r}$	$I_{1i}$	$I_{5r}$	$I_{5i}$	$I_{7r}$	$I_{7i}$	$I_{11r}$	$I_{11i}$	$I_{13r}$	$I_{13i}$
909.73	-233.13	-14.22	243.58	52.27	-42.76	34.55	11.43	-26.42	-8.43
895.09	-227.74	-15.39	240.94	54.16	-44.35	35.41	13.30	-29.09	-9.14
913.21	-238.81	-13.06	246.96	46.20	-45.16	39.76	13.74	-26.22	-3.69
852.07	-221.05	-15.12	238.31	48.25	-37.62	40.70	16.93	-22.36	-6.67
881.81	-231.96	-13.44	245.13	44.26	-41.35	42.43	12.61	-26.12	-4.86
861.40	-231.44	-7.57	242.21	42.57	-34.23	40.34	6.19	-21.35	-7.30
876.16	-231.17	-5.50	245.62	51.51	-29.73	34.35	1.06	-23.07	-10.04
835.02	-207.91	-7.22	233.31	68.81	-24.83	26.18	5.74	-20.75	-11.92

مدل و جریان اندازه‌گیری شده را در زمانی که بانک خازنی در مدار وجود ندارد و ولتاژی مشابه ولتاژ واقعی، مدل را تغذیه می‌کند، مشاهده می‌شود.

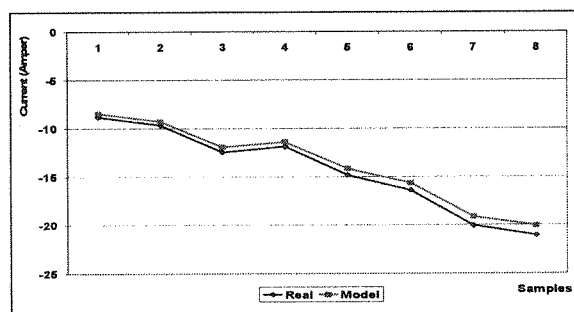
قرار گرفت، شکل (۷) جریان و ولتاژ بار را نشان می‌دهد. پیش از بار، یک بانک خازنی با هفت پله‌ی پنجاه کیلوواری وجود داشت که توان راکتیو مصرفی این بار و بارهای دیگر را تامین می‌نمود. این مجموعه در شبکه‌ی صنعتی از یک ترانسفورماتور ۱۲۰۰ کیلوولت آمپری تغذیه می‌شود. با ورود هر یک از پله‌های بانک خازنی جریان کشیده شده از ترانسفورماتور تغییر نموده و متعاقب آن ولتاژ سر این بار نیز تغییر می‌کند.

کنترل دور مورد نظر، شامل دو واحد ۲۵۰ کیلوواتی است. هر واحد ۲۵۰ کیلوواتی دارای سه واحد یکسوکننده‌ی مادولار است که در هر واحد نیز ۴ خازن به ظرفیت ۳۳۰۰ میکروفاراد به صورت موازی و سری، ظرفیت ۳۳۰۰ میکروفاراد را ایجاد نموده‌اند. برای کاهش هارمونیک‌های این تجهیز، یک راکتور سری ۳ درصد (۲ درصد افت ولتاژ به ازای جریان نامی) نصب شده است. با توجه به این مشخصات، مدل شبیه‌سازی شده‌ی این سیستم به دست آمد که در شکل (۸) مقایسه‌ی جریان این

برای بررسی صحت مدل تخمینی، جریان‌های هارمونیک جذب شونده، در داده‌های به دست آمده از ۸ پله بانک خازنی، با مقادیر به دست آمده از مدل مقایسه می‌شوند. جریان‌های جذب شونده توسط بار از ضرب ضرایب مربوط به ولتاژ حقیقی و مجازی هارمونیک پنجم، در این ولتاژها به دست می‌آید. شکل‌های (۹) و (۱۰) این مقایسه را نمایش می‌دهد.



شکل (۹): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی مدل تقریبی و مقادیر واقعی در جریان حقیقی جذب شده در هارمونیک پنجم

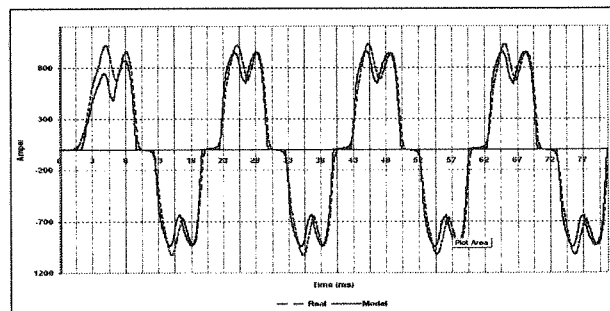


شکل (۱۰): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی مدل تقریبی و مقادیر واقعی در جریان مجازی جذب شده در هارمونیک پنجم

همانگونه که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود، مدل‌ها تقریب مناسبی برای جریان هارمونیک پنجم ورودی به سیستم بار است و تخمین جریان‌های حقیقی و مجازی هارمونیک پنجم ورودی، با مقادیر واقعی تفاوت قابل قبولی دارد که دلیل بر صحت مدل تخمینی است. لازم به ذکر است با وجود مشخص شدن ضرایب ولتاژهای حقیقی و مجازی در هارمونیک پنجم، جریان هارمونیک جذب شده توسط بار مشخص می‌گردد. با مشخص شدن این جریان و تفاضل آن از جریان اندازه‌گیری شده، جریان هارمونیک تولید شده توسط بار تعیین و بدین ترتیب، سهم هر یک از بار و شبکه در اغتشاشات هارمونیک مشخص می‌گردد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بر مبنای یک روش مدل‌سازی بهبود یافته، کاربردهای در تشخیص سهم مشترک و شبکه در اغتشاشات



شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی مدل تقریبی و مقادیر واقعی

همانگونه که مشخص است مدل یاد شده، تطابق مناسبی با شرایط واقعی دارد. از روی مدل شبیه‌سازی، پارامترهایی که تاثیر کمتری بر روی هارمونیک پنجم دارند و نیز میزان ادمیتانس ورودی و جذب جریان هارمونیک مشخص می‌شود. ادمیتانس مدل در جدول (۱۵) آمده است:

جدول (۱۵): ادمیتانس ورودی مدل بار در هارمونیک پنجم

$a_{5r}$	$a_{5i}$
0.75	-0.6
$b_{5r}$	$b_{5i}$
0.6	0.75

مشابه روش ذکر شده در قسمت قبل، مدل تخمینی از داده‌های عملیاتی و اطلاعات ۸ پله‌ی بانک خازنی به دست می‌آید. مقادیر مدل توصیفی برای جریان حقیقی و مجازی هارمونیک پنجم، که از الگوریتم ذکر شده حاصل می‌شود در جدول (۱۶) آمده است. ضرایب ولتاژهای حقیقی و مجازی هارمونیک پنجم، تخمین مدل از ادمیتانس ورودی در هارمونیک پنجم را نمایش می‌دهد که در مقایسه با مقادیر جدول (۱۵)، تخمین قابل قبولی است. جدول (۱۷) مقادیر مقایسه‌ای را نشان می‌دهد.

جدول (۱۶): مدل تخمینی به وسیله‌ی داده‌های واقعی

	$I_{05}$	$V_{1r}$	$V_{5r}$	$V_{5i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{13r}$	$V_{13i}$
جریان حقیقی هارمونیک پنجم	-45.07	0.00	0.78	-0.58	0.00	0.00	1.68	-0.88
جریان مجازی هارمونیک پنجم	271.32	-2.33	0.56	0.72	2.10	0.53	0.00	0.00

جدول (۱۷): مقایسه‌ی ضرایب ادمیتانس ورودی مدل تخمینی

به وسیله‌ی داده‌های واقعی و مدل بار

ضرایب	مدل بار	مدل تخمینی	خطا (%)
$a_{5r}$	0.75	0.78	4.0
$a_{5i}$	-0.6	-0.58	3.3
$b_{5r}$	0.6	0.56	6.7
$b_{5i}$	0.75	0.72	4.0

Yong Zhao, Jianhua Li and Daozhi Xia, "Harmonic source identification and current separation in distribution systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 26, Issue 1, January 2004, Pages 1-7 [۱۲]

## ۷- زیر نویس

<sup>1</sup> Modular Rectifier

هارمونیکی معرفی گردید. برای شناسایی پارامترهای این مدل، در شرایط واقعی و با وجود تعداد محدودی داده‌ی در دسترس، تخمین پارامتری و ساده‌سازی مدل پیشنهاد شد که بر مبنای آن، هم نتایج شبیه‌سازی و هم نتایج اندازه‌گیری عملی، صحت این تخمین‌ها را ثابت نمود. به این ترتیب مدل ساده شده‌ی پیشنهادی، کارکردی نوین و قابل تحقق، برای شناسایی سهم شبکه و مشترک در اغتشاشات هارمونیکی خواهد داشت و پارامترهای آن، با تعداد محدودی داده و با تقریب قابل قبول، در شرایط منطبق بر واقعیت قابل محاسبه می‌باشند.

## ۶- مراجع

- [۱] P. H. Swart, M. J. Case, and J. D. Van Wyk, "On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks," Eur. Trans. Elect. Power Eng., vol. 6, no. 6, Nov./Dec. 1996.
- [۲] L. Cristaldi and A. Ferrero, "Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 44, pp. 683-685, June 1995.
- [۳] H. Yang, P. Porotte, and A. Robert, "Assessing the harmonic emission level from one particular customer," in Proc., 194.
- [۴] Wilsun Xu; Xian Liu; Yilu Liu, "An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination", Jan 2003 IEEE Transactions on Power Delivery, vol.18, Issue 1, pp 214-219.
- [۵] Xu, W., "Power direction method cannot be used for harmonic source detection", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, vol.2, pp 873-876.
- [۶] Chun Li; Wilsun Xu, "On defining harmonic contributions at the point of common coupling", IEEE Power Engineering Review, July 2002, vol.22, issue 7, pp 44-45.
- [۷] Tsukamoto, M.; Ogawa, S.; Natsuda, Y.; Minowa, Y.; Nishimura, S., "Advanced technology to identify harmonics characteristics and results of measuring", Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, pp 341-346, vol.1.
- [۸] Tsukamoto, M.; Kouda, I.; Nasuda, Y.; Minowa, Y.; Nishimura, S., "Advanced method to identify harmonics characteristic between utility grid and harmonic current sources", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998, vol.1, pp 419-425.
- [۹] Nishimoto, H.; Doki, S.; Ishida, M.; Fujita, H., "New approach to estimate harmonic source of power system utilizing operation data of active filter", Proceedings of the Power Conversion Conference, PCC-Osaka 2002, vol.2, pp 421-427.
- [۱۰] Moustafa, A.A.; Moussa, A.M.; El-Gammal, M.A., "Separation of customer and supply harmonics in electrical power distribution systems", Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, vol.3, pp 1035-1040.
- [۱۱] Ashwani Kumar, Biswarup Das and Jaydev Sharma, "Determination of location of multiple harmonic sources in a power system", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 26, Issue 1, January 2004, Pages 7378