

# ارائه‌ی یک مدل بهبود یافته و چگونگی تعیین ضرایب آن برای تخمین اثرات ولتاژ غیر سینوسی بر توان مصرفی بار

رضا باقری (دانشجوی دکتری)

جواد شکرالهی مغانی (استادیار)

گنورگ قره‌پنجان (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

هارمونیک بودن ولتاژ تغذیه سبب افزایش توان و انرژی مصرفی بار می‌شود که این خود به منزله‌ی ایجاد اثرات سوء اقتصادی برای مشترک است، در حالی که میزان این اثرات اقتصادی و نقش تجهیزات بهبوددهنده‌ی کیفیت برق در کاهش توان و انرژی مصرفی بار نامشخص است. در این نوشتار مدلی بهبودیافته برای مدل‌سازی بارهای ترکیبی پیشنهاد می‌شود که بر مبنای آن، اثرات تغییر شرایط هارمونیک ولتاژ بر مصرف مشترک و اثرات اقتصادی آن مشخص می‌شود. در عین حال، پارامترهای این مدل در شرایط واقعی و به کمک یک روش عملیاتی و در دسترس مانند ورود پله‌های بانک خازنی یا تغییر بارهایی که قبل از بار مورد بررسی در مدار قرار دارند، قابل شناسایی است. در این نوشتار، صحت این مدل بر مبنای نتایج شبیه‌سازی و عملی مورد تأیید قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: هارمونیک‌های ولتاژ، توان، انرژی، تلفات، مدل‌سازی، تخمین پارامترها.

Reza\_baghery@yahoo.com  
moghani@aut.ac.ir  
grptian@aut.ac.ir

## مقدمه

اغلب تجهیزات مصرف‌کننده‌ی انرژی، به گونه‌ی طراحی می‌شوند که در شرایط کارکرد ولتاژ اسمی و با فرض سینوسی بودن، بهترین کارایی را داشته باشند. هارمونیک بودن ولتاژ و انحراف ولتاژ از مقدار اسمی موجب ایجاد تغییر در توان و انرژی مصرفی تجهیزات می‌شود. تخمین میزان تأثیر هارمونیک‌های ولتاژ بر توان مصرفی بار از موضوعات مهمی است که ابعاد اقتصادی وجود هارمونیک‌های ولتاژ را تشریح می‌کند.

از سوی دیگر برای امکان‌سنجی به کارگیری تجهیزات جبران‌ساز (مانند فیلترهای غیرفعال یا ادوات بهبود دهنده کیفیت توان<sup>۱</sup>) با تخمین میزان کاهش تلفات و مصرف انرژی، مشخص می‌شود که این تجهیزات فراتر از برآوردن استانداردهای کیفیت برق، چه نقشی در کاهش هزینه‌های انرژی مشترک خواهند داشت. به این ترتیب می‌توان در باره‌ی ملاحظات اقتصادی به کارگیری تجهیزات بهبوددهنده‌ی کیفیت برق و بازگشت سرمایه‌ی ناشی از به کارگیری آنها قضاوت کرد.

موتورهای الکتریکی یکی از بارهای رایج مشترکین است که کارایی آن به شدت متأثر از میزان هارمونیک‌ها است. اغتشاش هارمونیکی ولتاژ در پایانه‌های موتورها به فوران مغناطیسی هارمونیک در داخل موتور منجر خواهد شد. فوران‌های مغناطیسی هارمونیک اثر مهمی بر گشتاور موتور ندارد، اما گردش میدان گردان موتور با سرعتی

متفاوت از سرعت سنکرون رتور باعث تولید جریان‌هایی با فرکانس بالا در رتور می‌شود که اثر آن بر موتورها شبیه به اثر جریان توالی صفر در فرکانس اصلی است. فوران اضافی باعث افزایش تلفات می‌شود و در نتیجه کاهش کارایی همراه با حرارت، لرزش و سروصدا را به همراه خواهد داشت.

در سال ۱۹۹۸، اثر هارمونیک‌های مختلف به همراه مؤلفه‌ی اصلی بر افزایش دما و کاهش بازده موتورها بررسی شد.<sup>[۱]</sup> پس از آن در سال ۲۰۰۰، فازهای هارمونیک ولتاژ نسبت به مؤلفه‌ی اصلی بررسی شد<sup>[۲]</sup> و طی آزمایش‌هایی به این نتیجه رسیدند که علاوه بر مرتبه و اندازه‌ی هارمونیک، فاز هارمونیک نیز در جریان، ضریب توان و بازدهی موتور مؤثر است، به طوری که در بعضی از هارمونیک‌ها و فازهای مربوط، جریان ورودی موتور کم‌تر از شرایط ایده‌آل سینوسی است و حتی کارایی موتور، نسبت به شرایط نامی بهبود می‌یابد. آنها همچنین مشخص کرده‌اند که برخی از هارمونیک‌ها با بعضی فازها تأثیر کمی بر بازدهی، ضریب توان یا افزایش دمای موتور دارند. بر اساس استاندارد NEMA<sup>۲</sup> ضریب ولتاژ هارمونیک<sup>۳</sup> (HVF) مطابق رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{V_n^2}{n}} \quad (1)$$

که در آن  $V_n$  اندازه‌ی هارمونیک ولتاژ مرتبه‌ی  $n$  است. پارامتر  $n$  نیز مرتبه‌ی هارمونیک را نشان می‌دهد. محققین نشان داده‌اند که ظرفیت موتور با افزایش HVF کاهش

می‌یابد. [۳] به‌طور کلی می‌توان آثار هارمونیک‌های ولتاژ تغذیه بر موتورهای القایی را چنین بیان کرد:

- هارمونیک ولتاژ که باعث ایجاد هارمونیک جریان در موتور می‌شود نوسان و تغییرات را در گشتاور موتور ایجاد می‌کند.
- تلفات اهمی استاتور افزایش می‌یابد.
- تلفات اهمی روتور افزایش می‌یابد.
- تلفات آهنی افزایش می‌یابد.
- تلفات در شار انتهایی سیم‌پیچ‌ها افزایش می‌یابد.
- تلفات سرگردان در موتور افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۰۰ بازدهی موتور القایی در شرایط هارمونیک بررسی شده است. [۴] در این بررسی، معیار THD<sup>۴</sup> برای اندازه‌گیری تلفات ناکافی ارزیابی شد و در نهایت معیار جدیدی به نام WTHD<sup>۵</sup>، مطابق رابطه ۲ معرفی شد:

$$WTHD = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2 n^{-\alpha}} \quad (2)$$

در معیار جدید مرتبه‌ی هر هارمونیک اضافه شده، و نشان داده شده است که اثر هارمونیک مرتبه‌های پایین‌تر بر افزایش تلفات بیشتر است. همچنین نشان داده شده است که ظرفیت موتورها متناسب با WTHD کاهش می‌یابد و با معیار THD ارتباط چندانی ندارد.

در ترانسفورماتورها نیز طراحی به‌صورتی انجام می‌شود که قدرت مورد نیاز با کم‌ترین تلفات در فرکانس اصلی تأمین کنند. اغتشاش هارمونیک جریان باعث افزایش تلفات در هادی‌های خواهد شد. از سوی دیگر فوران مغناطیسی القاشده از سیم‌پیچی‌ها و هسته عبور کرده، باعث تلفات سرگردان بیشتری خواهد شد. در نهایت، بسته به طراحی هسته‌ی ترانسفورماتور، افزایش اغتشاش ولتاژی ممکن است باعث افزایش جریان‌های سرگردان در ورقه‌های هسته شود. [۵] در عین حال وجود هارمونیک‌های ولتاژ، باعث تغییر در کارایی تجهیزات تک‌فاز، تجهیزات الکترونیک قدرت و نیز تلفات شبکه‌های توزیع برق نیز می‌شود که به معنای تغییر توان مصرفی آنهاست. [۶-۷]

«بار» در اغلب موارد ترکیبی از بارهای مختلف - نظیر موتورهای الکتریکی، تجهیزات الکترونیک قدرت، بارهای خطی و غیرخطی - است که توان مصرفی این مجموعه در کنار یکدیگر اثرپذیری نامشخصی از هارمونیک‌های ولتاژ تغذیه دارد. متداول‌ترین مدلی که ارتباط توان مصرفی بار با ولتاژ تغذیه را مشخص می‌کند، مدل ZIP است که در آن بار مصرفی به سه دسته بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت تقسیم می‌شود. [۸] در این مدل می‌توان توان مصرفی بار را مطابق رابطه ۳ یا ۴ بیان کرد:

$$P = a\left(\frac{V}{V_n}\right)^2 + b\left(\frac{V}{V_n}\right) + cP, \quad (3)$$

$$P = k\left(\frac{V}{V_n}\right)^\alpha \quad (4)$$

که در آن  $V$  ولتاژ تغذیه‌ی بار در هارمونیک اول، و  $V_n$  ولتاژ اسمی است. این مدل رابطه‌ی توان مصرفی بار را با ولتاژ تغذیه مشخص می‌کند و می‌تواند برای مجموعه‌ی بار از بارهای ترکیبی، مدل توان مصرفی را برحسب ولتاژ تغذیه بیان کند. اما نکته‌ی قابل توجه این است که این مدل، شرایط انحراف از استاندارد کیفیت برق و وجود هارمونیک‌های ولتاژ را در نظر نمی‌گیرد.

روش مرسوم برای مدل‌سازی بارهای هارمونیک، که از روی آن می‌توان مدل توان مصرفی برحسب ولتاژهای هارمونیک را به‌دست آورد مدل نورتن است که در آن بار هارمونیک به‌صورت ترکیب یک منبع جریان ثابت و یک امپدانس موازی در نظر گرفته می‌شود. در این روش مدل‌سازی، توان‌های هارمونیک نیز در توان مصرفی مد نظر قرار می‌گیرد اما بدیهی است جریان هارمونیک در هر مرتبه، فقط به ولتاژ در همان مرتبه‌ی هارمونیک وابسته است. این روش شبیه‌سازی عملاً با خطایی همراه است که محققین ضمن تشریح آن، روش دیگری پیشنهاد کرده‌اند که در آن، بار به‌صورت ترکیب یک بار خطی و یک بار غیر خطی مدل می‌شود. [۹] در بار خطی جریان در هر مرتبه‌ی هارمونیک فقط به ولتاژ هارمونیک در همان مرتبه وابسته است، اما در بار غیرخطی جریان هارمونیک در هر مرتبه تابعی از ولتاژهای هارمونیک در تمام مرتبه‌های هارمونیک است. در این روش پیشنهادی، به‌فرض تغییرات اندک ولتاژ دامنه‌ی اصلی و هارمونیک‌های ولتاژ، معادلات غیرخطی حول نقاط کار خطی شده و در نهایت برای جریان بار یک رابطه‌ی خطی با ولتاژهای هارمونیک برقرار شده است. از روی این مدل، می‌توان توان مصرفی بار را برحسب پارامترهای ولتاژ هارمونیک توصیف کرد. در نوشتار حاضر ضمن تشریح بیشتر این مدل، به بررسی مشکلات آن برای کاربرد در شرایط عملی خواهیم پرداخت و برای اساس، مدل بهبود یافته‌ی پیشنهاد می‌شود که در شرایط واقعی قابل کاربرد باشد.

## تشریح روش مدل‌سازی براساس ترکیب بار خطی و بار غیر خطی

در این روش مدل‌سازی می‌توان ولتاژ هارمونیک در هر فاز و نیز جریان هارمونیک آن فاز را به‌صورت ترکیبی از هارمونیک‌های مختلف نوشت: [۹]

$$\begin{aligned} v(t) &= \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \sin(2\pi ht/T + \theta_h) \\ i(t) &= \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(2\pi ht/T + \phi_h) \end{aligned} \quad (5)$$

که در این صورت، مقادیر حقیقی و مجازی جریان‌ها و ولتاژهای هارمونیک عبارت خواهند بود از:

$$\begin{aligned} V_{hr} + jV_{hi} &= V_h \angle \theta_h \\ I_{hr} + jI_{hi} &= I_h \angle \phi_h, \\ h &= 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} I_{Lhr} &= I_{hr} + F_{hr}(V_1, V_2, V_3, \dots) + (Y_{hr}V_{hr} - Y_{hi}V_{hi}) \\ I_{Lhi} &= I_{hi} + F_{hi}(V_1, V_2, V_3, \dots) + (Y_{hi}V_{hr} + Y_{hr}V_{hi}) \end{aligned} \quad (7)$$

در این مدل، با فرض کم‌تر از ۵ بودن تغییرات مقادیر ولتاژ هارمونیک‌های مختلف، می‌توان با دقت مناسبی توابع غیرخطی را خطی کرد. در این صورت برای هر جریان

هارمونیککی وابسته به ولتاژ داریم:

$$F_{hr}(V_1, V_r, V_r, \dots) = a_1 V_{1r} + a_2 V_{2r} + a_3 V_{3r} + \dots + a_{\tau k - \tau} V_{kr} + a_{\tau k - 1} V_{ki}$$

$$F_{hi}(V_1, V_r, V_r, \dots) = b_1 V_{1r} + b_2 V_{2r} + b_3 V_{3r} + \dots + b_{\tau k - \tau} V_{kr} + b_{\tau k - 1} V_{ki} \quad (8)$$

که در آن  $a_{\tau k - \tau}$  و  $b_{\tau k - \tau}$  ضرایب خطی سازی تابع غیرخطی هستند. با وارد کردن این مقادیر در رابطه ی ۷ خواهیم داشت:

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

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

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

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

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

$$b'_{\tau h - 1} = b_{\tau h - 1} + Y_{hi} \quad (9)$$

چنان که مشخص است  $a'_{\tau h - 1}$ ،  $a'_{\tau h - 2}$ ،  $b'_{\tau h - 1}$  و  $b'_{\tau h - 2}$  مجموع ضرایب خطی سازی تابع غیرخطی و ادمیتانس های  $Y_{hr}$  و  $Y_{hi}$  هستند. در ضرایب فوق به منظور حذف مقدار مجازی ولتاژ اصلی، فاز ولتاژ اصلی به عنوان فاز مرجع در نظر گرفته شده و فاز سایر هارمونیک ها نسبت به آن سنجیده شده است.

در این مدل برای به دست آوردن ضرایب رابطه ی ۹ فرض می شود که می توان با تغییر پارامترهای ولتاژ هارمونیک به صورت یکنواخت از -۵ درصد تا +۵ درصد برای تمام ترکیب های ممکن از پارامترهای ولتاژ هارمونیک، مقادیر جریان را به ازای هر ترکیب ولتاژ تغذیه محاسبه کرد و با روش کمترین مربعات، ضرایب رابطه ی ۹ را استخراج کرد. نقص اصلی این روش در چگونگی تعیین ضرایب مدل و گستردگی پارامترهای مورد استفاده است. این مدل تنها به شبیه سازی اکتفا می کند و برای به دست آوردن پارامترهای مدل، از تغییر ولتاژ تغذیه به تعداد دفعات زیاد با ترکیب های متفاوت و شبیه سازی آن استفاده کرده است. بدیهی است در شرایط عملی، تغییر مداوم

و بسیار زیاد شرایط تغذیه ی ولتاژ برای شناسایی ضرایب مدل در هارمونیک های مختلف غیرعملی است. علاوه بر این، مدل سازی مورد نظر در این نوشتار با هدف تفکیک اغتشاشات هارمونیککی شبکه و مشترک صورت گرفته است. در این نوشتار ضمن ارائه ی کاربرد جدید مدل تعیین توان مصرفی بار، این مدل چنان بهبود می یابد که در شرایط عملی کاربرد داشته باشد. به کمک همین مدل بهبود یافته، اثر پذیری توان مصرفی بار از هارمونیک های ولتاژ تغذیه در شرایط عملی، و به کمک تعداد محدودی داده ی در دسترس تخمین زده می شود.

### استفاده از مدل در تعیین توان مصرفی بار

با مشخص بودن رابطه ی مقادیر مجازی و حقیقی جریان در هر هارمونیک، توان مصرفی بار طبق رابطه ی ۱۰ قابل توصیف است:

$$P = \sum_{h=1}^n P_h = \sum_{h=1}^n (V_{hr} \cdot I_{hr} + V_{hi} \cdot I_{hi})$$

$$= \sum_{h=1}^n ((V_{hr} + v_{hr}) \cdot (I_{hr} + a_{hr} v_{1r} + \dots + a_{hrn} v_{nr} + a_{hin} v_{ni}) + (V_{hi} + v_{hi}) \cdot (I_{hi} + b_{hr} v_{1r} + \dots + b_{hrn} v_{nr} + b_{hin} v_{ni})) = P_0 + \sum_{h=1}^n (c_{hr} \cdot v_{hr} + c_{hi} \cdot v_{hi})$$

$$+ \sum_{h=1}^n \sum_{t=1}^n (d_{ht} v_{hr} v_{tr} + d_{ht} v_{hr} v_{ti} + d_{ht} v_{hi} v_{tr} + d_{ht} v_{hi} v_{ti}) + \sum_{h=1}^n (g_{hr} \cdot v_{hr} + g_{hi} \cdot v_{hi}) \quad (10)$$

به عنوان مثال بار ترکیبی را مجموعه یی از یک یکسوکننده ی کنترل نشده ی سه فاز با بار مقاومتی و یک بار خطی در نظر می گیرند. با تغییر مکرر و یکنواخت هارمونیک های ولتاژ تغذیه و شبیه سازی در نرم افزار سیمولینک، ضرایب مدل یاد شده در رابطه ی ۱۰ به روش کمترین مربعات به دست می آید. در جدول ۱ ضرایب پارامترهای رابطه ی ۱۰ آورده شده است. البته با این فرض که هارمونیک های زوج و نیز مرتبه ی سوم در ولتاژ تغذیه وجود ندارند، ضرایب این هارمونیک ها صفر در نظر گرفته شده است. همچنین سایر پارامترهایی که ضرایب بسیار کمتری در مقایسه با سایر ضرایب دارند، آورده نشده است.

چنان که پیش تر گفته شد، این مدل ارتباط توان مصرفی بار را با ولتاژهای هارمونیککی تغذیه ی آن مشخص می کند و گویای شرایط هارمونیککی و سطح ولتاژ

جدول ۱. ضرایب مدل توان مصرفی ترکیب یک سوکننده ی کنترل نشده ی سه فاز با بار مقاومتی و بار خطی.

$P_0$ (W)	۷۹۴٫۶	$V_{1r}^t$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۳	$V_{1r} V_{5r}$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۱
$V_{1r}$ (W/V)	۲٫۹۶۰	$V_{5r}^t$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۲	$V_{5r} V_{7r}$ (W/V <sup>t</sup> )	-۰٫۰۰۱
$V_{5r}$ (W/V)	۰٫۴۲۳	$V_{5i}^t$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۴	$V_{5i} V_{7i}$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۲
$V_{5i}$ (W/V)	۰٫۰۰۰	$V_{7r}^t$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۲	$V_{5i} V_{11i}$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۳
$V_{7r}$ (W/V)	۰٫۲۱۰	$V_{7i}^t$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۳	$V_{5i} V_{13i}$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۲
$V_{7i}$ (W/V)	۰٫۰۰۰	$V_{11r}^t$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۲	$V_{7r} V_{11i}$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۱
$V_{11r}$ (W/V)	۰٫۱۶۳	$V_{11i}^t$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۴	$V_{7i} V_{11i}$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۴
$V_{11i}$ (W/V)	۰٫۰۰۰	$V_{13r}^t$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۲	$V_{7i} V_{13i}$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۳
$V_{13r}$ (W/V)	۰٫۱۱۴	$V_{13i}^t$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۳	$V_{11r} V_{13r}$ (W/V <sup>t</sup> )	-۰٫۰۰۱
$V_{13i}$ (W/V)	۰٫۰۰۱			$V_{11i} V_{13i}$ (W/V <sup>t</sup> )	۰٫۰۰۱

مسئله با در نظر گرفتن سایر مزابای اقتصادی مانند حذف خرابی تجهیزات و افزایش طول عمر آنها، بهسازی کیفیت برق از توجیه اقتصادی قابل توجه تری برخوردار می شود.

### بهبود مدل برای شرایط عملی

برای به دست آوردن ضرایب این مدل فرض می شود که می توان شرایط تغذیه را به صورت یکنواخت در ولتاژهای هارمونیک مختلف تغییر داد و با تعداد بسیار زیادی تغییر محاسبه جریان های هارمونیک های مختلف، از طریق روش کم ترین مربعات این ضرایب را محاسبه کرد.<sup>[۱۲]</sup> مسلماً در شرایط واقعی این امکان فراهم نیست و نمی توان تعداد دفعات تغییر شرایط تغذیه را چندان افزایش داد، تنها موردی که در اغلب سیستم های قدرت تغییر در شرایط ولتاژ تغذیه سیستم را مجاز می سازد، ورود پله های بانک خازنی یا تغییر در باری است که پیش از بار مورد بررسی در مدار قرار دارد. در عمل، تعداد پله های بانک خازنی بیشتر از ۲۰ عدد نخواهد بود؛ به این ترتیب تعداد پارامترهایی که مدل را توصیف می کنند باید از تعداد معادلات کم تر باشد. در مدل یاد شده محدودیتی برای تعداد پارامترها وجود نداشت و بنا به فرض با در نظر گرفتن مدل تا هارمونیک ۳۲، تعداد پارامترهایی که مدل را توصیف می کنند به  $(۳۲ + ۶۴)$  عدد می رسد. مسلماً هنگامی که تعداد معادلات در دسترس مثلاً ۱۶ عدد باشد، برای به دست آوردن ضرایب مدل، باید تعداد پارامترهای مدل تقلیل یابد. به همین منظور در دو مرحله پارامترهای قابل جایگزینی شناسایی، و از تعداد پارامترهای مدل کاسته می شود.

برای بررسی مدل بهبود یافته و شناسایی مدل در شرایط واقعی و به کمک ورود پله های بانک خازنی، از شبیه سازی این موضوع برای شناسایی مدل بار سیستم کنترل سرعت یک موتور DC به همراه یک بار خطی استفاده می شود. معادل شبیه سازی این سیستم در نرم افزار سیمولینک در شکل ۲ نشان داده شده است.

بانک خازنی مورد نظر دارای ۱۵ پله ۵ کیلوواری است. محل اندازه گیری پس از بانک خازنی و از جریان بار است که با وارد شدن هر پله بانک خازنی، به دلیل جذب جریان هارمونیک و راکتیو توسط آن، ولتاژ تغذیه بار تغییر می کند. این تغییر ولتاژ به تغییر در پارامترهای جریان سیستم بار می انجامد.

در اولین گام این نکته اصلی در نظر گرفته می شود که در شرایط شبیه سازی، پارامترهای مختلف با دامنه ها و حدود تغییرات مشابه، حول نقطه ی خطی سازی تغییر می کند و مدل شناسایی می شود. این در حالی است که در شرایط واقعی، لزوماً دامنه ی تغییرات ولتاژهای حقیقی و مجازی هارمونیک های مختلف یکسان نیست و ممکن است فرضاً ولتاژ حقیقی هارمونیک پنجم تغییرات بسیار بیشتری نسبت به ولتاژ مجازی هارمونیک سیزدهم داشته باشد. در جدول ۲ واریانس تغییرات پارامترهای مختلف هارمونیک های ولتاژ که از ورود ۱۵ پله بانک خازنی در مدل شکل ۲ به دست می آید، ارائه شده است. چنان که مشاهده می شود حدود تغییرات برخی از پارامترها از پارامترهای دیگر به میزان قابل توجهی کم تر است.

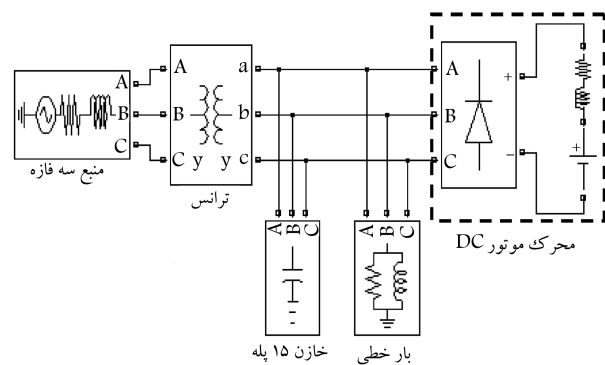
برای پارامترهای درجه دوم نیز همین شرایط برقرار خواهد بود. در این شرایط پارامترهایی که حدود تغییرات شان بیشتر است و دامنه ی واریانس تغییرات بزرگ تری دارند، تأثیرشان در مدل نسبت به پارامترهایی که حدود تغییرات شان به میزان قابل توجهی کوچک تر است مسلماً بیشتر خواهد بود. به عنوان مثال هارمونیک های زوج یا مرتبه ی سوم، نسبت به هارمونیک مرتبه ی ۵ تأثیر کم تری در مدل خواهند داشت. با توجه به واریانس تغییرات پارامترهای مختلف برای مدل مفروض، هارمونیک های زوج

لازم برای کمیته کردن مقدار توان مصرفی خواهد بود. شکل ۱ نشان گر چگونگی تغییر توان واقعی اندازه گیری شده و تخمینی توسط مدل برای بار ترکیبی یاد شده است، هنگامی که تنها هارمونیک موجود در ولتاژ، هارمونیک پنجم است و مقدار ولتاژ هارمونیک اول نیز اسمی است. در این منحنی فاز ولتاژ هارمونیک پنجم با مقداری معادل ۵٪ دامنه، از صفر تا ۳۶۰ درجه تغییر می یابد و با توجه به صفر بودن سایر مقادیر پارامترهای هارمونیک ولتاژ، توان مصرفی با تغییر فاز هارمونیک پنجم تغییر می کند. چنان که در شکل ۲ مشاهده می شود، با تغییر فاز هارمونیک ولتاژ تغذیه، توان مصرفی بین ۷۸۴ الی ۸۰۷ کیلووات تغییر می یابد.

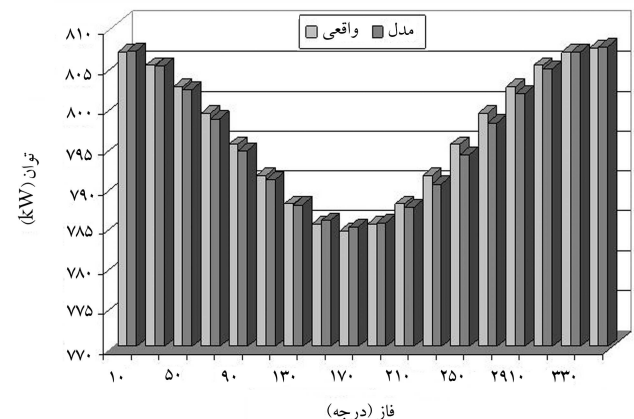
یکی از مهم ترین کاربردهای این روش تخمین آثار تجهیزات جبران کننده ی کیفیت برق بر مصرف انرژی است. اگر به کمک فیلتر غیرفعال، ولتاژهای هارمونیک مرتبه ی پنجم از تغذیه ی بار مورد نظر حذف شوند براساس مقادیر ذکر شده در جدول ۱، توان مصرفی به ۷۹۴٫۶ کیلووات می رسد. فرضاً اگر پیش از کاربرد فیلتر توان مصرفی ۸۰۷ کیلووات بوده باشد و نیز این بار به صورت متوسط در شبانه روز ۲۰ ساعت در مدار باشد طبق رابطه ی ۱۱، هزینه ی انرژی صرفه جویی شده ی سالانه معادل ۳۶۱۲ دلار است که با قیمت تقریبی ۱۵۰۰۰ دلار فیلتر غیرفعال، بازگشت سرمایه ی حاصل از محل صرفه جویی انرژی ۴٫۱ سال خواهد بود.

$$E_t = (807 - 794.6) \times 20 \times 365 = 90.5 MWh$$

$$C_t = 90.5 \times 1000 \times 0.4 = 3621 \$ \quad (11)$$



شکل ۱. مدل سیستم کنترل دور موتور DC و بار خطی در نرم افزار سیمولینک.



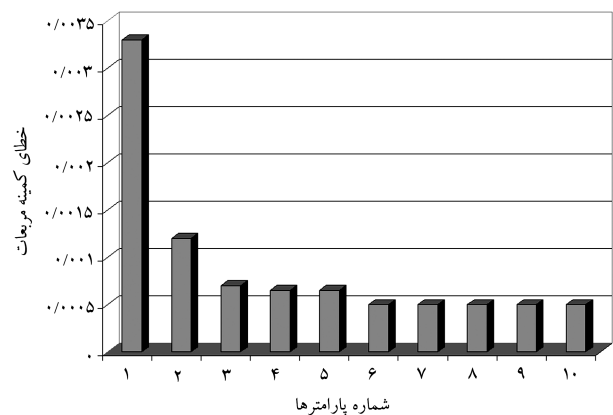
شکل ۲. تغییر توان مصرفی یک سوکننده ی کنترل نشده ی سه فاز و بار خطی با تغییر فاز ۵ هارمونیک پنجم.

جدول ۲. واریانس تغییرات پارامترهای مختلف.

$V_{1r}$	$V_{2r}$	$V_{2I}$	$V_{3r}$	$V_{3I}$	$V_{4r}$	$V_{4I}$
۴۲٫۰	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۱	۰٫۱
$V_{5r}$	$V_{5I}$	$V_{6r}$	$V_{6I}$	$V_{7r}$	$V_{7i}$	$V_{8r}$
۷٫۵	۷۱٫۸	۰٫۱	۰٫۱	۴۴٫	۲۸٫۹	۰٫۱
$V_{8i}$	$V_{9r}$	$V_{9i}$	$V_{10r}$	$V_{10i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$
۰٫۲	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۱	۰٫۱	۱٫۸	۱٫۸
$V_{12r}$	$V_{12i}$	$V_{13r}$	$V_{13i}$	$V_{14r}$	$V_{14i}$	$V_{15r}$
۰٫۱	۰٫۱	۱	۱	۰	۰٫۱	۰٫۵
$V_{15i}$	$V_{16r}$	$V_{16i}$	$V_{17r}$	$V_{17i}$	$V_{18r}$	$V_{18i}$
۰٫۵	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۳	۴٫۴	۰٫۱	۰٫۱

و مضرب سه و نیز هارمونیک‌های فرد بالاتر از مرتبه ۷ در مقایسه با سایر پارامترها، مقادیر بسیار کم‌تری دارند و به‌عنوان پارامترهای کم‌ارزش ترک‌کنار گذاشته می‌شوند. در گام دوم، اگر یک مدل تقریبی از بار وجود داشته باشد، اهمیت و اولویت پارامترها و البته نه ضرایب مدل، از طریق شبیه‌سازی مشخص می‌شود و لذا از برخی پارامترها می‌توان صرف‌نظر کرد. بهترین تخمین‌های یک پارامتری، دو پارامتری و به‌همین ترتیب تخمین‌های بالاتر با انتخاب انواع ترکیب‌های ممکن از پارامترها، تعیین میزان خطای روش کم‌ترین مربعات و شناخت کم‌ترین خطای باقی‌مانده‌ی کم‌ترین مربعات در هر تخمین  $n$  پارامتری، قابل دست‌یابی است. مثلاً ضرایب مدل توصیف‌کننده‌ی توان مصرفی برای مدل ذکرشده در شکل ۲ به دست می‌آید.

برای این موضوع با تغییر هارمونیک‌های مختلف ولتاژ به‌صورت یک‌نواخت از ۵- درصد تا ۵+ درصد، مدل در نرم‌افزار سیمولینک شبیه‌سازی می‌شود و توان مصرفی معادل آن به دست می‌آید. برای کاستن از تعداد پارامترها، ابتدا با تمام مقادیر توان به دست آمده، با انتخاب یک پارامتر، به‌روش کم‌ترین مربعات ضرایب مدل به دست می‌آید. این پارامتر برای تمام پارامترهای موجود انتخاب می‌شود و آن پارامتری که کم‌ترین خطای باقی‌مانده‌ی کم‌ترین مربعات را در مقایسه با سایرین داشته باشد، به‌عنوان بهترین تخمین یک پارامتری انتخاب می‌شود. به‌همین ترتیب تمام ترکیب‌های دو پارامتری از بین پارامترهای موجود انتخاب می‌شود و آن ترکیبی که کم‌ترین خطای کم‌ترین مربعات را داشته باشد، به‌عنوان بهترین تخمین دو پارامتری انتخاب می‌شود. این روند تا انتخاب تمام پارامترها ادامه خواهد داشت. در جدول ۳ اولویت‌بندی پارامترها و ضرایب به دست آمده ارائه شده است، و شکل ۳ چگونگی کاهش میزان



شکل ۳. کاهش خطا در مدل‌های ساده‌شده در تقریب توان.

خطا با افزایش تعداد پارامترها را برای مدل مفروض نشان می‌دهد. چنان که در شکل ۳ مشاهده می‌شود افزایش تعداد پارامتر از ۴ به بعد، تأثیر چندانی بر کاهش میزان خطا ندارد؛ لذا این پارامترها را می‌توان در زمره‌ی پارامترهای کم‌تأثیر دسته‌بندی کرد و در ساده‌سازی مدل آنها را در نظر نگرفت.

در مدل مفروض، در بین پارامترهای باقی‌مانده می‌توان از پارامترهای ولتاژ حقیقی و مجازی هارمونیک هفتم به‌دلیل اثرگذاری اندک آنها صرف‌نظر کرد. بنابراین اگر مدل تقریبی سیستم بار مشخص باشد، می‌توان پارامترهای دارای اولویت را در گام دوم و از طریق شبیه‌سازی شناسایی کرد. به‌کمک روش‌های یادشده، می‌توان تعداد پارامترهای شبیه‌سازی را به کم‌تر از تعداد مقادیر معلوم کاهش داد اما شرایط شبیه‌سازی با شرایط واقعی یک تفاوت کلیدی دیگر نیز دارد. در شرایط شبیه‌سازی، داده‌هایی که برای شناسایی مدل به کار رفته‌اند توزیع یکنواخت دارند و بین پارامترهای ولتاژ مختلف که برای شناسایی بار به کار رفته است، همبستگی آماری وجود ندارد. اما در شرایط واقعی و با ایجاد تغییر به‌کمک بانک‌های خازنی، داده‌های به‌دست آمده مستقل از یکدیگر نخواهند بود و نسبت به یکدیگر از الگوی خاصی پیروی خواهند کرد. جدول ۴ ضرایب همبستگی بین پارامترهای ولتاژ که برای شناسایی به کار رفته و توزیع یکنواخت دارند، نمایش می‌دهد. جدول ۵ ضرایب همبستگی بین داده‌هایی که از ورود ۱۵ پله‌ی بانک خازنی در مدل مفروض به دست آمده است، نمایش می‌دهد. چنان که مشخص است در داده‌های حاصل از ورود پله‌های بانک خازنی، بین برخی از داده‌ها همبستگی قابل توجهی وجود دارد.

مثلاً، روند تغییرات ولتاژ مجازی هارمونیک پنجم، مشابه تغییرات ولتاژ حقیقی هارمونیک اول است. اگر تعدادی از پارامترها که برای شناسایی به کار می‌روند به یکدیگر وابسته باشند، ضرایب به‌دست‌آمده برای مدل با ضرایب به‌دست‌آمده برای مدلی که با پارامترهای مستقل شناسایی شود کاملاً متفاوت است. به‌عنوان مثال، برای تخمین منحنی  $Z = 4X^2 + 3X + Y^2 + Y + 1$  حول نقطه‌ی  $Y = -0.1$  و  $X = -0.1$ ، اگر توزیع  $X$  و  $Y$  نرمال در نظر گرفته شوند و داده‌های مورد استفاده برای شناسایی از هم مستقل باشند، ضرایب مدل شناسایی شده از روش کم‌ترین مربعات (رابطه‌ی ۱۲) محاسبه می‌شوند، اما اگر داده‌های مورد استفاده همبستگی زیادی داشته باشند و فرضاً بتوان آنها را با رابطه‌ی خطی  $Y = X$  به یکدیگر مرتبط کرد، ضرایب مدل به همان روش کم‌ترین مربعات و مطابق رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شوند.

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

$$Z = 0.59 + 2.09(X + 0.1) + 2.09(Y + 0.1) \quad (12)$$

بنابراین نکته‌ی بسیار مهم آن است که ضرایب حاصله در داده‌های وابسته به یکدیگر با ضرایب داده‌های مستقل از هم کاملاً متفاوت است. اگر چه این مدل دوم در داده‌های وابسته به یکدیگر تخمین مناسبی ارائه می‌دهد، قابل تعمیم به سایر نقاط خارج از داده‌های به‌کارگرفته‌شده برای شناسایی نیست.

به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان گفت که اگر بین داده‌های دو پارامتر به‌کارگرفته شده برای توصیف مدل همبستگی قابل توجهی وجود داشته باشد، ضرایب به‌دست‌آمده برای این پارامترها با ضرایب مدل اصلی کاملاً متفاوت خواهد بود. برای حل این موضوع بهتر است از یکی از دو پارامتر با توجه به اهمیت دو پارامتر صرف‌نظر شود. در مدل مفروض، چنان که در جدول ۵ مشخص شده، با توجه به آن که پارامتر  $V_{5i}$  همبستگی قابل توجهی با پارامتر  $V_{1r}$  دارد، از این پارامتر در مقایسه با  $V_{1r}$  صرف‌نظر می‌شود. از سوی دیگر با توجه به آن که واریانس تغییرات پارامتر  $V_{5r}$  در مقایسه با  $V_{1r}$  کم‌تر است، دو مدل تخمینی - یکی با در نظر گرفتن این پارامتر

جدول ۳. ضرایب مدل‌های ساده شده بر حسب پارامترهای مختلف برای توان کنترل دور موتور DC به همراه بار خطی.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
$P_0$	$V_1$	$V_{\Delta i}$	$V_{11r}$	$V_{\Delta r}$	$V_{12r}$	$V_{12i}$	$V_{11i}$	$V_{Vi}$	$V_{Vr}$
۹۴۸٫۸۸	۲٫۷۹	۰٫۱۶	۰٫۰۴	-۰٫۰۳	۰٫۰۳	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱
۹۴۸٫۸۸	۲٫۷۹	۰٫۱۶	۰٫۰۴	-۰٫۰۳	۰٫۰۳	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰
۹۴۸٫۸۸	۲٫۷۹	۰٫۱۶	۰٫۰۴	-۰٫۰۳	۰٫۰۳	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	۰	۰
۹۴۸٫۸۸	۲٫۷۹	۰٫۱۶	۰٫۰۴	-۰٫۰۳	۰٫۰۳	-۰٫۰۱	۰	۰	۰
۹۴۸٫۸۹	۲٫۷۹	۰٫۱۶	۰٫۰۴	-۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰	۰	۰	۰
۹۴۸٫۸۹	۲٫۷۹	۰٫۱۶	۰٫۰۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹۴۸٫۹۰	۲٫۷۹	۰٫۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹۴۸٫۹۹	۲٫۷۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹۵۰٫۹۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۴. ضرایب همبستگی بین داده‌های مختلف حاصل از تغییر داده‌های نرمال.

	$V_{1r}$	$V_{\Delta r}$	$V_{\Delta i}$	$V_{Vr}$	$V_{Vi}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{12r}$	$V_{12i}$	$V_{17r}$	$V_{17i}$	$V_{19r}$	$V_{19i}$
$V_{1r}$	۱	۰٫۰	۰٫۰	-۰٫۱	-۰٫۱	-۰٫۱	۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۱
$V_{\Delta r}$	۰٫۰	۱	-۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۱	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	-۰٫۱
$V_{\Delta i}$	۰٫۰	-۰٫۱	۱	-۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰
$V_{Vr}$	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۱	-۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰
$V_{Vi}$	-۰٫۱	۰٫۰	۰٫۱	-۰٫۱	۱	۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۲	-۰٫۱	۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۱
$V_{11r}$	-۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۱	۱	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۱	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	-۰٫۱
$V_{11i}$	۰٫۱	-۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۱	۰٫۰	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰	-۰٫۱	-۰٫۱
$V_{12r}$	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	-۰٫۲	۰٫۰	۰٫۰	۱	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	-۰٫۱	-۰٫۱
$V_{12i}$	-۰٫۱	-۰٫۱	-۰٫۱	-۰٫۱	-۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۰	۱	-۰٫۵	-۰٫۹	-۰٫۱	-۰٫۱
$V_{17r}$	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۱	۰٫۲	-۰٫۱	-۰٫۱
$V_{17i}$	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	-۰٫۱	۱	-۰٫۱	-۰٫۱
$V_{19r}$	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰	-۰٫۱	۱	-۰٫۱
$V_{19i}$	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	-۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰	۱

جدول ۵. ضرایب همبستگی بین داده‌های مختلف حاصل از تغییر پله‌های بانک خازنی.

	$V_{1r}$	$V_{\Delta r}$	$V_{\Delta i}$	$V_{Vr}$	$V_{Vi}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{12r}$	$V_{12i}$	$V_{17r}$	$V_{17i}$	$V_{19r}$	$V_{19i}$
$V_{1r}$	۱	-۰٫۲	۱٫۰	۰٫۹	۰٫۶	-۰٫۶	۰٫۰	-۰٫۵	-۰٫۵	۰٫۶	۰٫۵	۰٫۶	۰٫۴
$V_{\Delta r}$	-۰٫۲	۱	۰٫۰	۰٫۱	-۰٫۹	۰٫۶	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۵	-۰٫۳	-۰٫۵	-۰٫۳	-۰٫۵
$V_{\Delta i}$	۱٫۰	۰٫۰	۱	۰٫۹	۰٫۵	-۰٫۵	۰٫۱	-۰٫۵	-۰٫۴	۰٫۶	۰٫۳	۰٫۶	۰٫۳
$V_{Vr}$	۰٫۹	۰٫۱	۰٫۹	۱	۰٫۳	-۰٫۳	۰٫۴	-۰٫۴	-۰٫۱	۰٫۵	۰٫۱	۰٫۵	۰٫۰
$V_{Vi}$	۰٫۶	-۰٫۹	۰٫۵	۰٫۳	۱	-۰٫۸	-۰٫۲	-۰٫۶	-۰٫۶	۰٫۶	۰٫۵	۰٫۶	۰٫۵
$V_{11r}$	-۰٫۶	۰٫۶	-۰٫۵	-۰٫۳	-۰٫۸	۱	۰٫۲	۰٫۹	۰٫۴	-۰٫۷	-۰٫۲	-۰٫۶	-۰٫۱
$V_{11i}$	۰٫۰	۰٫۴	۰٫۱	۰٫۴	-۰٫۲	۰٫۲	۱	۰٫۰	۰٫۸	-۰٫۲	-۰٫۷	-۰٫۳	-۰٫۶
$V_{12r}$	-۰٫۵	۰٫۳	-۰٫۵	-۰٫۴	-۰٫۶	۰٫۹	۰٫۰	۱	۰٫۲	-۰٫۸	۰٫۱	-۰٫۷	۰٫۳
$V_{12i}$	-۰٫۵	۰٫۵	-۰٫۴	-۰٫۱	-۰٫۶	۰٫۴	۰٫۸	۰٫۲	۱	-۰٫۵	-۰٫۹	-۰٫۶	-۰٫۸
$V_{17r}$	۰٫۶	-۰٫۳	۰٫۶	۰٫۵	۰٫۶	-۰٫۷	-۰٫۲	-۰٫۸	-۰٫۵	۱	۰٫۲	۰٫۹	۰٫۰
$V_{17i}$	۰٫۵	-۰٫۵	۰٫۳	۰٫۱	۰٫۵	-۰٫۲	-۰٫۷	۰٫۱	-۰٫۹	۰٫۲	۱	۰٫۴	۱٫۰
$V_{19r}$	۰٫۶	-۰٫۳	۰٫۶	۰٫۵	۰٫۶	-۰٫۶	-۰٫۳	-۰٫۷	-۰٫۶	۰٫۹	۰٫۴	۱	۰٫۲
$V_{19i}$	۰٫۴	-۰٫۵	۰٫۳	۰٫۰	۰٫۵	-۰٫۱	-۰٫۶	۰٫۳	-۰٫۸	۰٫۰	۱٫۰	۰٫۲	۱

با توجه به ابزارهایی که برای ایجاد تغییر در ولتاژ تغذیه وجود دارد، برای هر سیستم داده‌هایی به دست خواهد آمد که هرچه این داده‌ها چهار شرط ذکر شده را بهتر ارضاء کنند، مدل دقیق‌تری برای تخمین توان مصرفی بار به دست می‌آید.

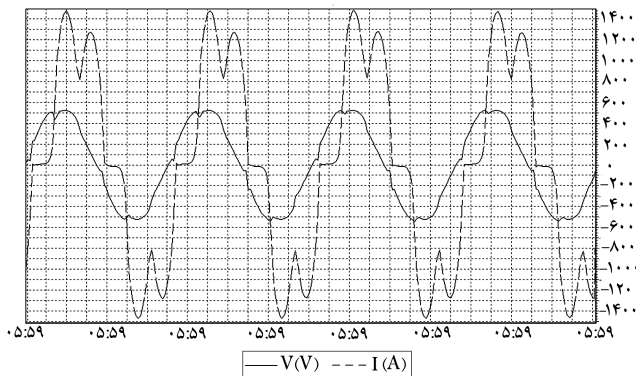
### نمونه‌ی عملی

برای بررسی صحت این روش مدل‌سازی در عمل، یک دستگاه الکترولیز آب با توان ۴۲۰ کیلووات مورد آزمایش قرار گرفت. در شکل ۴ جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده‌ی این بار نشان داده شده است.

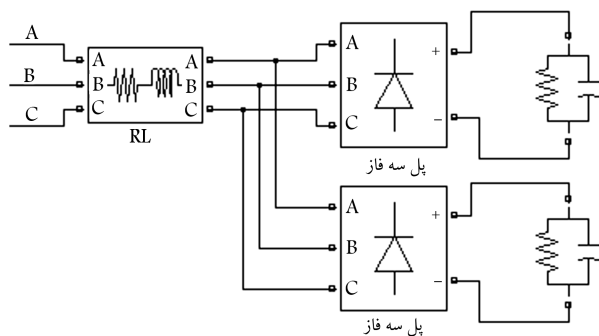
دستگاه الکترولیز آب به همراه چند بار دیگر، توسط یک ترانسفورماتور ۱۲۵۰ kVA تغذیه می‌شود و برای جبران‌سازی توان راکتیو مجموع آنها، یک بانک خازنی با ۱۲ پله‌ی خازنی وجود دارد که توان راکتیو مصرفی این بار را تأمین می‌کند. با ورود هر یک از پله‌های بانک خازنی جریان کشیده شده از ترانسفورماتور در هارمونیک‌های مختلف تغییر کرده و متعاقب آن ولتاژ سر این بار نیز تغییر می‌کند.

سیستم الکترولیز شامل دو واحد یک سوکننده است که هر واحد دارای یک خازن ۲۲۰۰ میکروفاراد برای یک‌سوسازی است، برای کاهش هارمونیک‌های این تجهیز، یک راکتور سری ۳ درصد (۳ درصد افت ولتاژ به‌ازای جریان نامی) نصب شده است. با توجه به این مشخصات، مدل شبیه‌سازی شده‌ی این سیستم در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۸ مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی تغییرات ولتاژ سر بار با ورود پله‌های خازنی مختلف و تغییر توان مصرفی بار را نمایش می‌دهد، این مقادیر به‌کمک دستگاه



شکل ۴. جریان و ولتاژ یک سوکننده بدون حضور بانک خازنی.



شکل ۵. مدل مدار معادل سیستم الکترولیز.

جدول ۶. مقادیر پارامترهای برای به دست آمده برای مدل توان.

	$P_o$	$V_{1r}$	$V_{5r}$
مدل ۱	۹۳۱٫۹	۲٫۳	-۰٫۸۶
مدل ۲	۹۳۸٫۷	۲٫۲	۰

جدول ۷. مقایسه‌ی مقادیر ثابت واقعی و تخمینی.

	$P_o$	خطا (%)
مدل ۱	۹۳۱٫۹	۱٫۷
مدل ۲	۹۳۸٫۷	۱
Real	۹۴۸٫۸۸	۰

و دیگری بدون در نظر گرفتن آن - پیشنهاد می‌شود. در جدول ۶ این مدل‌ها آمده است.

با توجه به مقادیر دقیق که در جدول ۳ آمده بود، مدل‌های به دست آمده تقریب مناسبی به دست می‌دهد. در مقایسه‌ی مقادیر ثابت نیز مشاهده می‌شود که خطای هر دو مدل قابل قبول است (جدول ۷).

در مجموع می‌توان موارد کلی ذیل را درباره‌ی ملاحظات شناسایی مدل توان مصرفی بارهای ترکیبی ذکر کرد:

الف) هرچه «دامنه‌ی تغییرات داده‌ها» (حدود تغییرات پارامترهای گوناگون) در هارمونیک‌های مختلف گسترده‌تر باشد، مدل به دست آمده دقیق‌تر خواهد بود.

ب) هرچه اندازه‌ی دامنه‌ی تغییرات و چگونگی پراکندگی داده‌ها در دامنه‌ی تغییرات (واریانس تغییرات)، برای هارمونیک‌های مختلف مشابه یکدیگر باشد، مدل شناسایی شده دقیق‌تر خواهد بود. در این شرایط اگر برای به دست آوردن ضرایب از روش کم‌ترین مربعات استفاده شود، بدون حذف پارامترهای با واریانس کم، ضرایب به دست آمده برای مدل در آن پارامترها ممکن است بسیار بزرگ و غیردقیق باشد.

ج) هرچه داده‌های به دست آمده در هارمونیک‌های مختلف ضریب همبستگی دو به دوی کم‌تری داشته باشند، مدل به دست آمده دقیق‌تر خواهد بود.

د) با حفظ شرایط بالا، هرچه تعداد داده‌ها بیشتر باشد مدل به دست آمده دقیق‌تر خواهد بود.

مدلی که با حفظ شرایط بالا به دست می‌آید، در محدوده‌ی مجاور با متوسط مقادیر هارمونیک‌ی داده‌های تخمین، بیشترین دقت را خواهد داشت و هرچه از این محدوده انحراف یابد از صحت تخمین آن کاسته می‌شود. ابزارهایی که برای ایجاد تغییر عملی در ولتاژ تغذیه‌ی سیستم بار وجود دارد، عبارت‌اند از:

- ورود پله‌های بانک خازنی یا فیلتر؛
- تغییر در بار مصرفی که پیش از بار مورد بررسی قرار دارد؛
- تغییر در تپ ترانس تغذیه،
- تغییر در امپدانس سری؛
- ایجاد تغییر به‌کمک تجهیزات بهبود دهنده کیفیت توان.

در روش آخر، به دلیل قابل کنترل بودن جریان تزریقی، می‌توان چهار شرط ذکر شده برای داده‌های شناسایی سیستم بار را به بهترین نحو رعایت کرد. در نهایت،

جدول ۸. مقادیر ولتاژ و توان بار با ورود پله‌های بانک خازنی.

مرحله	$V_{1r}$	$V_{5r}$	$V_{5i}$	$V_{7r}$	$V_{7i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{13r}$	$V_{13i}$	$V_{17r}$	$V_{17i}$	$V_{19r}$	$V_{19i}$	P(kW)
۰	۵۱۹٫۸	-۱۱٫۰	۸٫۱	-۵٫۸	۳٫۵	۴٫۰	۰٫۳	۳٫۹	۰٫۴	-۲٫۹	۰٫۰	-۲٫۳	-۰٫۲	۳۳۹٫۵
۱	۵۲۱٫۶	-۱۱٫۵	۸٫۷	-۷٫۰	۳٫۸	۷٫۶	-۰٫۵	۹٫۰	-۲٫۰	-۱۰٫۶	۱۱٫۹	۲٫۸	۲٫۶	۳۴۳٫۸
۲	۵۲۳٫۲	-۱۳٫۴	۱۰٫۰	-۹٫۹	۶٫۸	۹٫۵	-۱۲٫۷	-۲۵٫۲	-۳۵٫۷	۰٫۰	۰٫۶	۰٫۶	۱٫۲	۳۴۶٫۰
۳	۵۲۴٫۹	-۱۳٫۵	۱۴٫۳	-۷٫۸	۱۱٫۸	-۲۱٫۶	-۱۰٫۲	-۳٫۷	-۰٫۳	۱٫۴	۰٫۳	۰٫۹	۰٫۲	۳۴۲٫۲
۴	۵۲۶٫۷	-۱۴٫۱	۱۵٫۹	-۹٫۳	۱۵٫۲	-۶٫۶	۱٫۴	-۲٫۷	۰٫۱	۱٫۱	-۰٫۱	۰٫۷	-۰٫۱	۳۴۶٫۲
۵	۵۲۸٫۴	-۱۵٫۱	۱۹٫۱	-۹٫۳	۲۵٫۲	-۳٫۱	۱٫۸	-۱٫۶	۰٫۳	۰٫۷	-۰٫۱	۰٫۵	-۰٫۱	۳۴۸٫۷
۶	۵۳۰٫۴	-۱۵٫۲	۲۳٫۰	۱٫۷	۴۳٫۹	-۱٫۳	۱٫۳	-۰٫۸	۰٫۱	۰٫۵	۰٫۰	۰٫۴	۰٫۰	۳۵۳٫۸
۷	۵۳۲٫۱	-۱۳٫۰	۲۳٫۶	۳۵٫۶	۲۸٫۶	-۰٫۶	-۰٫۸	-۰٫۶	-۰٫۸	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۲	۳۶۲٫۵
۸	۵۳۳٫۷	-۱۳٫۵	۲۶٫۲	۲۷٫۹	-۰٫۹	-۱٫۳	-۰٫۸	-۱٫۰	-۰٫۶	۰٫۴	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۱	۳۶۴٫۹
۹	۵۳۵٫۴	-۱۳٫۵	۳۳٫۰	۱۷٫۴	-۶٫۸	-۱٫۲	-۰٫۴	-۰٫۹	-۰٫۳	۰٫۴	۰٫۰	۰٫۲	۰٫۰	۳۶۶٫۸
۱۰	۵۳۷٫۱	-۱۰٫۸	۴۲٫۴	۱۱٫۳	-۷٫۴	-۱٫۰	-۰٫۲	-۰٫۸	-۰٫۲	۰٫۳	۰٫۰	۰٫۲	۰٫۰	۳۷۰٫۱
۱۱	۵۳۸٫۸	-۲٫۷	۵۳٫۱	۷٫۳	-۶٫۵	-۰٫۷	-۰٫۳	-۰٫۶	-۰٫۲	۰٫۳	۰٫۰	۰٫۲	۰٫۰	۳۷۵٫۰

جدول ۹. مقادیر متوسط تغییرات.

$V_{1r}$	$V_{5r}$	$V_{5i}$	$V_{7r}$	$V_{7i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{13r}$	$V_{13i}$	$V_{17r}$	$V_{17i}$	$V_{19r}$	$V_{19i}$
۵۲۸٫۶	-۱۲٫۱۸	۲۲	۳٫۵۶	۹٫۲۸	-۰٫۹۵	-۱٫۶۰	-۱٫۶۲	-۲٫۹۸	-۰٫۸۴	۱٫۰۰	۱٫۶۴	۰٫۲۸

جدول ۱۰. مدل تخمینی به وسیله‌ی مدل شبیه‌سازی.

P <sub>۰</sub>	$V_{1r}$	$V_{5r}$	$V_{5i}$	$V_{7r}$	$V_{7i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{13r}$	$V_{13i}$	$V_{17r}$	$V_{17i}$	$V_{19r}$	$V_{19i}$
۳۶۶٫۳	۱٫۳۷	۰٫۱۸	۰٫۱۶	۰٫۱۸	-۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۱

جدول ۱۱. واریانس تغییرات پارامترهای مختلف.

$V_{1r}$	$V_{5r}$	$V_{5i}$	$V_{7r}$	$V_{7i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{13r}$	$V_{13i}$	$V_{17r}$	$V_{17i}$	$V_{19r}$	$V_{19i}$
۴۲٫۹	۱۰٫۳	۱۹۴٫۸	۲۳۴٫۶	۲۳۸٫۳	۵۷٫۹	۲۰٫۱	۶۱٫۶	۹۷٫۰	۱۰٫۴	۱۰٫۸	۳۷٫۸	۰٫۶

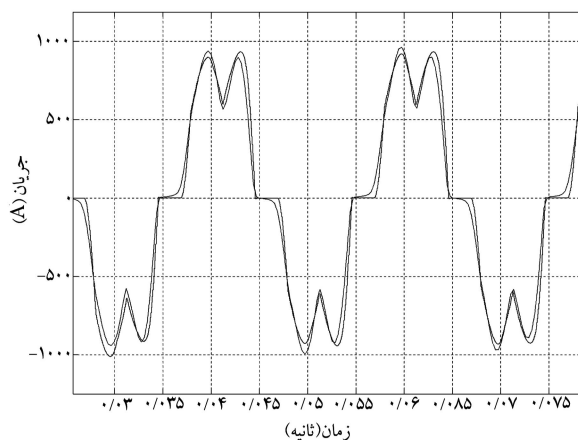
جدول ۱۲. مدل تخمینی به وسیله‌ی داده‌های واقعی.

P <sub>۰</sub>	$V_{1r}$	$V_{5r}$	$V_{5i}$	$V_{7r}$	$V_{7i}$	$V_{11r}$	$V_{11i}$	$V_{13r}$	$V_{13i}$	$V_{17r}$	$V_{17i}$	$V_{19r}$	$V_{19i}$
۳۶۵٫۸۹	۱٫۴۴	۰٫۲۱	۰٫۱۲	۰٫۱۵	-۰٫۰۴	۰٫۱۲	-۰٫۰۳	۰٫۲۰	-۰٫۲۱	۰	۰	۰	۰

اندازه‌گیری تحلیل‌گر توان اندازه‌گیری و ثبت شده، و در ضمن مقادیر ولتاژ برحسب بیشینه‌ی دامنه است.

در شکل ۶ جریان مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار سیمولینک با جریان اندازه‌گیری شده در زمانی که بانک خازنی در مدار وجود ندارد و ولتاژی مشابه ولتاژ واقعی مدل را تغذیه می‌کند، مقایسه شده است. چنان‌که مشخص است، مدل یادشده تطبیق مناسبی با شرایط واقعی دارد. برای تخمین ضرایب از روی مدل، مقادیر متوسط پارامترها که تغییرات حول آن صورت می‌گیرد، در جدول ۹ آمده است. به کمک نرم‌افزار سیمولینک و شبیه‌سازی بهای متعدد با مقادیر مختلف هارمونیک‌های ولتاژ تغذیه، رابطه‌ی توان مصرفی با پارامترهای ولتاژ برای تغییرات حول مقادیر متوسط به دست می‌آید. این مدل در جدول ۱۰ نمایش داده شده است.

برای تخمین مدل از داده‌های واقعی، به این ترتیب عمل می‌شود، جدول ۱۱ واریانس تغییرات پارامترهای مختلف را نمایش می‌دهد، البته پارامترهای هارمونیک‌های



شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی مدل تقریبی و مقادیر واقعی.



حول مقادیر متوسط خود با درصد مشخصی به صورت یکنواخت تغییر می‌کنند، خطای تخمین مدل به دست آمده از داده‌های واقعی و مدل اصلی در تمام حالات مختلف پارامترهای ولتاژ به دست می‌آید. در جدول ۱۳ متوسط قدر مطلق خطا و واریانس خطا، برای تغییرات پارامترها در محدوده‌ی اطراف مقادیر متوسط ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، مدل تخمینی در مقادیر نزدیک به مقادیر متوسط به دست آمده از پله‌های بانک خازنی، دارای تقریب بسیار مناسبی است اما هرچه انحراف از مقادیر متوسط بیشتر شود، دقت مدل تخمینی کاهش خواهد یافت.

### نتیجه‌گیری

توان مصرفی اغلب تجهیزات مصرف‌کننده‌ی انرژی، با وجود هارمونیک‌های ولتاژ در تغذیه، تغییر می‌یابد. اگر در سیستم قدرت، ولتاژ تغذیه هارمونیک‌کی باشد به معنای تغییر در توان مصرفی مشترکین است که برای آنها اثرات اقتصادی به همراه دارد. در این نوشتار، بر مبنای یک روش مدل‌سازی بهبود یافته و تخمین پارامترهای مدل در شرایط واقعی، اثرات هارمونیک‌های ولتاژ بر توان مصرفی بار محاسبه شد. 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 اثبات کرد. به این ترتیب مدل ساده‌شده‌ی پیشنهادی، کارکردی نوین و قابل تحقق برای شناسایی سهم تلفات ناشی از اغتشاشات هارمونیک‌کی در بار خواهد داشت و پارامترهای آن با تعداد محدودی داده و با تقریب قابل قبول، در شرایط واقعی قابل محاسبه‌اند.

### پانویس

1. custom power
2. national electrical manufacturers association (NEMA)
3. harmonic voltage factor (HVF)
4. total harmonic distortion (THD)
5. weighted total harmonic distortion (WTHD)

### منابع

1. Ching-Yin Lee "Effects of voltage harmonics on the electrical and mechanical performance of a three-phase induction motor", Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1998 IEEE, Year: 3-8 (1998).
2. Ching-Yin Lee "The effect of harmonic phase angle on the operation performance of a three-phase induction motor", *IEEE PES 2000 summer meeting, in Seattle*, pp. 2499 -2505 (2000).
3. www.NEMA.org, Electro Industry-Sept (2004).
4. Jalilian, A., Gosbell, V.J. and Perera, B.S.P., "Performance of a 7.5 kW induction motor under harmonically distorted supply conditions", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2000 **1**, pp.355-359 (7-10 March 2000).
5. Yildirim, D., and Fuchs, E.F. "Measured transformer derating and comparison with harmonic loss factor (FHL)

جدول ۱۳. مقایسه خطای مدل تخمینی به وسیله‌ی داده‌های واقعی با مدل اصلی در حدود تغییرات مختلف.

درصد تغییرات حول مقدار متوسط	واریانس خطا (درصد)	متوسط قدر مطلق خطا (درصد)
۱	۰٫۰۲	۰٫۵۲
۲	۰٫۰۷	۰٫۵۲
۳	۰٫۱۲	۰٫۵۵
۴	۰٫۱۹	۰٫۶۱
۵	۰٫۲۵	۰٫۶۹
۶	۰٫۳۲	۰٫۸۰
۷	۰٫۴۱	۰٫۸۷
۸	۰٫۵۰	۰٫۹۸
۹	۰٫۶۱	۱٫۰۷
۱۰	۰٫۷۵	۱٫۱۷

زوج و مرتبه‌ی سوم به دلیل اندک بودن مقادیر پیش از این حذف شده‌اند. همان‌گونه که در جدول ۱۱ مشخص است واریانس تغییرات هارمونیک‌های هفدهم و نوزدهم، نسبت به سایر پارامترها پایین‌تر است و می‌توان از آنها صرف‌نظر کرد. مدل به دست آمده از پارامترهای باقی‌مانده در جدول ۱۲ آمده است. برای بررسی دقت این مدل و مقایسه‌ی آن با مدل جدول ۱۰، پارامترهای ولتاژ

approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15**, issue 1, pp.186-191 (January 2000).

6. L. Peretto, R. Sasdelli, G. Serra, "Measurement of harmonic losses in transformers supplying nonsinusoidal load current," *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, **49**, (2), pp.315-319, (April 2000).
7. Kalinowsky, S.A.; Martello, J.J.; Yee, A.K., and Forte, M. "Harmonic content and illumination characteristics versus voltage for energy saving fluorescent lighting systems", *IEEE Conference on Energy Saving* (1991).
8. Gerlando, A.D., and Perini, R. "Evaluation of the effect of voltage harmonics on the extra iron losses in the inverter fed electromagnetic devices", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, **14**(1) (1999).
9. Lin, D.; Batan, T., and Fuchs, E.F. "Harmonic losses of single phase induction motors under nonsinusoidal voltages", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, **12**(2) (1997).
10. Thunberg, E., and Soder, L. "On the estimation of harmonic power losses in distribution systems", *IEEE Conferences on Power Quality* (2000).
11. Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill (1994).
12. Yong, Zhao; Jianhua, Li, and Daozhi, Xia "Harmonic source identification and current separation in distribution systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **26**, Issue 1, pp. 1-7 (2004).

