

# استفاده از روش معکوس اجزای اصلی (IPCA) برای تخمین دامنه ولتاژ هارمونیک در شبکه توزیع با داده‌های محدود

مهرداد طرفدار حق<sup>۱</sup>، افشین روشن میلانی<sup>۲</sup>، بهزاد مظفری تازه‌کند<sup>۳</sup>

۱-۲-۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران

tarafdar@tabrizu.ac.ir, milani@azrec.co.ir, mozaaffary@tabrizu.ac.ir

**چکیده:** کاهش کیفیت توان به چالش فی‌مابین مشترکین و تأمین‌کنندگان انرژی تبدیل شده است. این امر در سازمان‌های تجدید ساختار یافته و مبتنی بر قوانین بازار برق ظهور بیشتری دارد. بنابراین بسیاری از شرکت‌های تأمین‌کننده انرژی الکتریکی لزوماً به سمت استفاده از سیستم‌های پایش پرهزینه برای ارزیابی کیفیت خدمات‌رسانی خود کشیده می‌شوند. محدودیت‌های مالی توجیه اقتصادی نصب، بهره‌برداری و نگهداری از تجهیزات مانیتورینگ مورد نیاز برای شبکه‌های توزیع را به چالش می‌کشد. لذا حرکت به سمت روش‌های هوشمند که با تخمین مناسب شرایط سیستم اهداف فنی و مالی را به یک نقطه بهینه برسانند مورد توجه قرار می‌گیرند. در این مقاله روش موثری برای تخمین دامنه ولتاژ (هارمونیک اصلی و سایر هارمونیک‌ها) شبکه‌های توزیع بر پایه روش تحلیل اجزای اصلی<sup>۱</sup> (PCA) ارائه شده است. در این روش با در اختیار داشتن اطلاعات زمان گذشته خصیصه‌های پنهان میان متغیرهای ولتاژ شبکه در قالب روابط خطی میان آن‌ها کشف می‌شود. در قدم بعدی با استفاده از الگوهای فوق و داده‌های زمان واقعی از ولتاژ شبکه با معرفی ایده جدید معکوس تحلیل اجزای اصلی<sup>۲</sup> (IPCA) نسبت به تخمین دامنه ولتاژ نقاط مورد نیاز شبکه با دقت مناسب اقدام شده است. الگوریتم پیشنهادی در یک شبکه توزیع صنعتی به عنوان شبکه نمونه تست و پیاده شده است. نتایج نشان از دقت بالا بین مقادیر تخمین و مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل اجزای اصلی، هارمونیک ولتاژ، معکوس تحلیل اجزای اصلی.

## Harmonic Voltage Estimation of Distribution Networks Using Inverse PCA

Mehrdad Tarafdar Hagh<sup>1</sup>, Afshin Roshan Milani<sup>2</sup>, Behzad Mozaaffari Tazehkand<sup>3</sup>  
1,2,3-Department Electrical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

**Abstract:** This paper presents a new methodology to estimate harmonic distortion in a distribution system, based on measurements of a limited number of given buses. The algorithm utilizes Principal Component Analysis (PCA). First the PCA of buses is detected off-line from their historical data. Next, the interrelations between the voltages are developed using Inverse PCA method. Finally, through incorporation of a certain finite set of real-time data measurements, the voltages of all network buses in real-time are estimated with a desired degree of accuracy via the Inverse PCA method (IPCA). The algorithm is applied to an existing industrial distribution network as a test case. This case study shows good agreement between proposed methods with on site measurements.

**Key Words:** Principle component analysis, Harmonic voltage distortion, Inverse principal component analysis

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۵/۱۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۱/۹/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهرداد طرفدار حق

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده - مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

ارزیابی اعوجاج هارمونیک بر روی عملکرد و بهره‌برداری از سیستم‌های الکتریکی یکی از مباحث مهم و پیچیده در رابطه با تحلیل کیفیت توان می‌باشد. کنترل و هدایت موثر شبکه‌های توزیع لازمه در دسترس بودن اطلاعات زمان واقعی (دامنه ولتاژ، بار، تجهیزات قابل کنترل و کلید زنی، اعوجاج هارمونیک ولتاژ و...) از سیستم می‌باشد. از طرفی محدودیت‌های اقتصادی و الزام گسترش نصب و بهره‌برداری از تجهیزات مورد نیاز جهت مونیتورینگ سیستم و توسعه مراکز کنترل، شبکه‌های توزیع را با مشکل مواجه نموده است. دیدگاه موثر جهت حل مسئله فوق استفاده از تکنیک‌های هوشمند و نرم‌افزارهای مناسب جهت تخمین اطلاعات سیستم با استفاده از اطلاعات محدود زمان واقعی می‌باشد. با این اقدام ضمن به حداقل رساندن نیاز به تجهیزات مونیتورینگ در سیستم توزیع ملاحظات اقتصادی نیز برآورد می‌گردند. تعیین ولتاژ و میزان اعوجاج هارمونیک آن در نقاط مختلف شبکه توزیع در زمان واقعی حالت خاصی از مسئله تخمین حالت و تخمین حالت هارمونیک است. تخمین حالت شبکه مهمترین عامل برای شناسایی نقطه کار شبکه و هدایت موثر آن به منظور رسیدن به هدف بهره‌برداری مناسب است.

تخمین حالت هارمونیک شبکه با وجود تعداد داده محدود و قابل اطمینان از تعداد معدودی سیستم‌های اندازه‌گیری کیفیت توان (PQ) و مدل‌سازی ریاضی سیستم مسئله پیچیده‌ای است. همچنین موارد زیادی ممکن است منجر به اختلاف بین سیستم حقیقی و شبیه‌سازی شده گردد. علاوه بر این کالیبراسیون دستگاه‌های اندازه‌گیری، موضوعات مهمی نظیر مخابرات داده‌ها و درستی آنها در این بین بسیار مهم هستند. چالش اصلی دیگر مسئله همزمان سازی داده‌های بدست آمده از سیستم‌های اندازه‌گیری می‌باشد [۱-۵].

تخمین دامنه هارمونیک ولتاژ در شبکه‌های توزیع یکی از مباحث ویژه در روش‌های تحلیل تخمین حالت به شمار می‌رود [۲-۸]. تخمین حالت اغتشاش هارمونیک (HDSE) معکوس روشها و فرآیند شبیه‌سازی عمل می‌کند. به عبارت دیگر برنامه‌های شبیه‌ساز، پاسخ شبکه به تزریق هارمونیک در یک یا چند مکان مشخص را تعیین می‌نمایند، در حالیکه تخمین گرهای منابع هارمونیک را زمانیکه پاسخ شبکه توسط اندازه‌گیری مشخص است، ارزیابی می‌کنند [۹].

در حالت کلی تخمین هارمونیک می‌تواند در دو دسته قرار گیرد. در دسته اول هارمونیک‌ها با استفاده از داده‌های ثبت شده در باس‌بارها تخمین زده می‌شوند. در این حالت با استفاده از داده‌هایی که از باس‌های مجهز به پایسگر بدست آمده، به تخمین هارمونیک در باس‌هایی که در آن‌ها عمل پایش صورت نگرفته است، پرداخته می‌شود. برای انجام این کار از ابزارها و روش‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک و تئوری تبدیل موجک استفاده می‌شود [۱۰-۱۲]. در مورد دسته دوم از روش‌های تخمین حالت هارمونیک استفاده شده است.

در این روش از راه‌های مختلف جهت حل معادلات حالت بر اساس توسعه روش‌های کلاسیک استفاده شده است [۲-۵].

همه این روش‌ها از تکنیک‌های سنتی که نیازمند سیستم‌های اندازه‌گیری گسترده یا روش‌های ریاضی مانند حداقل مربعات هستند، استفاده می‌کنند تا پاسخ هارمونیک در فضای حل وسیعی کشف گردند. در شبکه‌های توزیع بدلیل کثرت گره‌های شبکه، تعداد متغیرهای شبکه زیاد است، لذا جهت تخمین حالت شبکه نیاز به داده‌های زمان واقعی زیادی است که با توجه به محدودیت‌های گوناگون فنی و اقتصادی دستیابی به داده‌های مورد نیاز زمان واقعی مقدور نمی‌باشد.

استفاده از روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های استخراج داده در دسته‌بندی، جداسازی و کشف روابط پنهانی میان داده‌های جمع‌آوری شده می‌تواند نقش موثری در بهبود تخمین ولتاژ با داده‌های محدود داشته باشد [۱۳]. روش تحلیل اجزای اصلی (PCA) یکی از روش‌های تحلیل داده با کاربرد فراوان در مباحث استخراج داده است. این روش با کشف روابط و استخراج خصیصه‌های پنهانی میان متغیرهای مختلف در مجموعه‌های بزرگ داده و تعیین روابط خطی میان متغیرهای مختلف سبب کاهش تعداد متغیرها می‌گردد. شناسایی الگوهای حاکم میان متغیرها و استخراج آنها سبب می‌گردد تا با ابعاد کمتر داده و دقت مناسب بتوان اطلاعات مورد نیاز را بدست آورد [۱۳]. در مرجع [۱۴] در مقایسه ۶ روش مختلف به منظور پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار نشان داده شده است که انتخاب روش تحلیل اجزای اصلی نسبت به سایر روش‌ها دارای دقت مناسب‌تری است.

در این مقاله با توجه به ویژگی روش تحلیل اجزای اصلی در تعیین الگوهای میان داده و اکتشاف روابط پنهانی میان داده‌ها، از این روش جهت تخمین ولتاژ کلیه باس‌های شبکه توزیع با توجه به محدود بودن داده‌های زمان واقعی استفاده شده است. روش پیشنهادی در این مقاله در قدم اول بر پایه روش تحلیل اجزای اصلی، الگوهای حاکم میان متغیرهای ولتاژ شبکه را کشف می‌نماید. و در قدم بعدی با استفاده از الگوهای کشف شده و داده‌های محدود زمان واقعی از ولتاژ شبکه با معرفی ایده معکوس تحلیل مولفه‌های اصلی (IPCA) نسبت به تخمین ولتاژ برای کلیه باس‌های سیستم اقدام نموده است. در روش اخیر IPCA بر روی بردار زمان واقعی متغیرهای اندازه‌گیری شده و الگوهای کشف شده در مرحله اول اعمال شده و سپس بر پایه داده‌های زمان واقعی محدود، ولتاژ زمان واقعی کلیه نقاط شبکه تخمین زده می‌شود. در بخش بعدی تئوری روش پیشنهادی تشریح و در بخش انتهایی با کاربرد ایده فوق به بخشی از یک شبکه توزیع منطقه صنعتی شهید سلیمی تبریز کارایی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- روش پیشنهادی برای تخمین ولتاژ گره‌های شبکه

این بخش به تشریح الگوریتم پیشنهادی برای تخمین دامنه ولتاژ هارمونیک با استفاده از تعداد محدودی داده واقعی می‌پردازد. در قدم

ماتریس کوواریانس اجزای اصلی آن ماتریس نامیده می‌شوند و خصایص اصلی این ماتریس در این اجزاء نهفته شده است. با انتخاب بردارهای ویژه یک متناظر با مقادیر ویژه بزرگتر می‌توان ماتریس تبدیل  $T_h$  را به شکل رابطه (۴) تشکیل داد.

$$T_h = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_i \quad \dots \quad \phi_k] \quad (4)$$

در این رابطه،  $\phi_i$  بردار ویژه متناظر با  $i$ امین مقدار ویژه بزرگتر و اندیس "K" تعداد بردارهای ویژه انتخابی است بطوریکه شرط  $K \ll n$  را ارضا نماید [۱۵]. ماتریس  $T_h$  که ماتریس تبدیل PCA نامیده می‌شود، رابطه خطی قوی بین متغیرهای ماتریس داده تعریف می‌کند.

اکنون با استفاده از ماتریس  $T_h$ ، می‌توانیم ماتریس تبدیل شده  $V_{h,A}$  را به یک ماتریس کاهش یافته PCA بصورت زیر تبدیل نماییم:

$$V_{h,PCA} = V_{h,A} T_h \quad (5)$$

رابطه (۵)، بیان نکاشت  $V_{h,A}$  در حوزه PCA است. ذکر این نکته ضروری است که انتخاب تعداد مناسب بردارهای ویژه (K) نقش کلیدی در عملکرد روش پیشنهادی دارد.

ماتریس تبدیل  $T_h$  می‌تواند با استفاده از حداقل تعداد انتخاب شده بردارهای ویژه، بگونه‌ای مرتب شود که نکاشت مناسبی از داده‌های اولیه ارائه نماید. یکی از توصیه‌ها برای انتخاب تعداد بردارهای ویژه منتخب یعنی K استفاده از رابطه زیر است [۱۶]:

$$\frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \geq 0.9 \quad (6)$$

در این رابطه  $\lambda_i$  مقدار ویژه  $i$ ام از مقادیر ویژه مرتب شده از بیشترین مقدار به کمترین مقدار می‌باشد.

## ۲-۲- روش معکوس تحلیل اجزای اصلی پیشنهادی

در قسمت قبل با استفاده از کاربرد روش تحلیل اجزای اصلی، الگوهای حاکم بر داده‌ها کشف و نتیجه آن در ماتریس انتقال  $T_h$  تجمیع گردید. به منظور تخمین ولتاژ شبکه در لحظه زمان واقعی "t<sub>0</sub>" لازم است n متغیر ولتاژ شبکه به صورت دقیق تخمین زده شود. بنابراین می‌توان متغیر ولتاژ نقاط مختلف شبکه در زمان t<sub>0</sub> را به صورت رابطه زیر نشان داد:

$$\begin{aligned} Q_h(t_0) &= [Z_h(t_0) \quad X_h(t_0)] \\ Z_h(t_0) &= [z_1(t_0) \quad z_2(t_0) \quad \dots \quad z_m(t_0)] \\ X_h(t_0) &= [x_1(t_0) \quad x_2(t_0) \quad \dots \quad x_{n-m}(t_0)] \end{aligned} \quad (7)$$

در این رابطه:

$$Q_h(t_0): \text{ بردار ولتاژ نقاط مختلف شبکه در زمان } t_0,$$

$$Z_h(t_0): \text{ بردار ولتاژ گره‌های معلوم (اندازه‌گیری شده) در زمان } t_0,$$

اول با داشتن اطلاعات زمان گذشته سیستم و استفاده از روش تحلیل اجزای اصلی (PCA) الگوهای حاکم میان اطلاعات مذکور کشف می‌گردد. در مرحله بعدی با استفاده از داده‌های زمان واقعی محدود، الگوهای کشف شده (میان متغیرهای قابل اندازه‌گیری و غیر قابل اندازه‌گیری در زمان واقعی) در مرحله قبل و روش معکوس تحلیل اجزای اصلی (IPCA) دامنه ولتاژ همه باس‌ها در هر هارمونیک مورد نظر با دقت مناسب و با بهره‌گیری از مقادیر اندازه‌گیری شده بدست می‌آید.

## ۱-۲- مدل‌سازی ریاضی

با فرض در اختیار بودن داده‌های زمان گذشته ولتاژ نقاط مختلف شبکه، برای هر مرتبه، ماتریس داده مطابق رابطه (۱) تعریف شده است [۱۵]:

$$V_h = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \dots & v_{1,n} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \dots & v_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{r,1} & v_{r,2} & \dots & v_{r,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این ماتریس:

$V_h$ : ماتریس داده اولیه هارمونیک مرتبه hام،

n: تعداد نقاط گره شبکه،

r: تعداد نمونه ولتاژ هارمونیک مرتبه hام هر گره شبکه

$v_{i,j}$ : دامنه ولتاژ نمونه  $i$ ام از باس  $j$ ام هارمونیک مرتبه hام.

ماتریس اصلاح شده داده‌های اولیه با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\bar{v}_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r v_{i,j}, \quad j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

$$\text{Row}_i(V_{h,A}) = \left\{ \text{Row}_{i,j}(V_h) \quad \bar{v}_j \right\}, \quad i \in \{1, 2, \dots\}$$

در این رابطه  $\bar{v}_j$  میانگین مقادیر داده‌های دامنه ولتاژ گره  $j$ ام (متوسط مقادیر ستون  $j$ ام ماتریس داده اولیه) و  $\text{Row}_{i,j}(V_h)$  نشان‌دهنده سطر  $i$ ام ماتریس اطلاعات اولیه و  $\text{Row}_{i,j}(V_{h,A})$  سطر  $i$ ام ماتریس اطلاعات اصلاح شده است. با این اقدام اطلاعات اولیه حول مبدا مختصات متقارن می‌شود. حال با استفاده از رابطه (۳) ماتریس کوواریانس برای ماتریس اصلاح شده محاسبه می‌شود [۱۲].

$$C_h = \frac{1}{r} (V_{h,A}^T V_{h,A}) \quad (3)$$

ماتریس  $C_h$  یک ماتریس مربعی است که بصورت معمول ماتریس مثبت شبه معین بوده و دارای n بردار ویژه یک متناظر با n مقدار ویژه (حقیقی و مثبت) است [۱۷]. بنابراین مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس قابل مرتب کردن به صورت نزولی خواهند بود. مقادیر ویژه بزرگتر

مجهول است که خصیصه های پنهانی میان متغیرها را با استفاده از تبدیل تحلیل اجزای اصلی با خود به همراه آورده است. با صرفه نظر کردن از اختلاف جزئی میان مقادیر بردار  $Q'_h(t_0)$  و  $Q_h(t_0)$  و با مساوی قرار دادن این دو بردار می توان نتیجه گرفت:

$$Q_{h,j}(t_0) = \sum_{i=1}^k ( \sum_{j=1}^m z_{ij} T_{k,io} + \sum_{j=1}^n x_j T_{k,io} ) T_{k,io}^T + v_j^- \quad (13)$$

تعداد  $n$  معادله همچون رابطه (۱۳) با توجه به تعداد گره های شبکه (n) بدست می آید. در مجموعه معادلات فوق تعداد  $m$  متغیر معلوم و  $(n-m)$  متغیر مجهول وجود دارد. که پس از مرتب سازی معادلات بدست آمده براساس مجهولات فوق معادلات حاصل به شکل معادله ماتریسی (۱۴) مرتب و قابل نمایش می باشد.

$$\begin{bmatrix} f_1(z) \\ f_2(z) \\ \vdots \\ f_n(z) \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1,n-m} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2,n-m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{n,n-m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-m} \end{bmatrix} \quad (14)$$

که به اختصار می توان روابط زیر را نوشت:

$$f_h(Z) = UX = h(X) \quad (15)$$

$$f_h(Z)_i = \sum_{j=1}^n a_{i,j} Z_j$$

در این رابطه:

$h(X)$ : تابع اندازه گیری (متغیرهای مجهول معادلات حاصل از رابطه (۱۳) که در یک طرف معادله مرتب شده اند)،  
 $f_h(z)$ : مدل اندازه گیری (مقادیر ثابت حاصل از رابطه (۱۳) که در یک طرف معادله مرتب شده اند)،

$a_{i,j}$ : ضریب  $Z_j$  از مدل اندازه گیری  $i$ ام،

$u_{i,j}$ : ضریب  $Z_j$  از تابع اندازه گیری  $i$ ام،

حال با استفاده از روش شبه معکوس<sup>۳</sup> مطابق رابطه (۱۶) می توان تخمین مناسبی برای مقادیر ولتاژ نقاط مجهول بدست آورد.

$$X_h(t_0) = U^+ \cdot f(t_0) \quad (16)$$

در رابطه فوق  $U^+$  شبه معکوس ماتریس  $U$  است. بنابراین با استفاده از روش پیشنهادی می توان تخمین مناسبی از ولتاژ در هر نقطه از شبکه را بدست آورد. شکل (۱) فلوجارت روش پیشنهادی را نشان می دهد.

$X_h(t_0)$ : بردار ولتاژ گره های مجهول در زمان  $t_0$

$z_i(t_0)$ : مقدار معلوم ولتاژ نقطه  $i$ ام در زمان  $t_0$ .

$x_j(t_0)$ : مقدار مجهول ولتاژ نقطه  $j$ ام در زمان  $t_0$ ، می باشند.

مطابق رابطه (۷) مقدار اصلاح شده بردار  $Q_h(t_0)$  محاسبه و سپس بر اساس روابط (۸) و (۹) تبدیل  $T_h$  را که از قسمت قبل بدست آمده بر روی آن اعمال می نماییم.

$$Q_{h,A}(t_0) = Q_h(t_0) - v \quad (8)$$

$$Q_{h,PCA}(t_0) = Q_{h,A}(t_0) T_h \quad (9)$$

در روابط فوق، بردار متغیرهای ولتاژ در لحظه  $t_0$  و  $Q_{h,PCA}(t_0)$  نگاشت آن است.

هر عنصر بردار  $Q_{h,PCA}(t_0)$  را می توان به صورت رابطه زیر بیان نمود.

$$Q_{h,PCA}(i,i)(t_0) = \sum_{j=1}^m z_j T_{h(j,i)} + \sum_{j=1}^{n-m} x_j T_{h(j+m,i)} \quad (10)$$

$$i = \{1, 2, \dots, k\}$$

بردارهای تشکیل دهنده ماتریس  $T_h$  بر یکدیگر عمود و یکه هستند. تعریف معکوس یک ماتریس غیرمربعی تحت عنوان شبه معکوس در مراجع [۱۶] و [۱۷] آمده است. و با توجه به خواص بیان شده شبه معکوس ماتریس  $T_h$  برابر ترانهاده آن است [۱۷]. لذا از این ویژگی می توان برای دستیابی به اطلاعات اولیه استفاده نمود. با توجه به اینکه تنها بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه بزرگتر انتخاب می شوند لذا ماتریس  $T_h$  مربع نبوده و برای بدست آوردن مقادیر اولیه داده ها از ترانهاده آن استفاده می شود. با توجه به توضیحات فوق می توان بردار اولیه متغیرهای ولتاژ را به صورت زیر بدست آورد. با توجه به اینکه ماتریس ترانهاده هر ماتریس منحصراً به فرد است، جواب بدست آمده نیز منحصراً به فرد خواهد بود. و بنابراین خواهیم داشت:

$$Q'_h(t_0) = Q_{h,PCA}(I^*k)(t_0) \cdot T_{h(k*n)}^T + v^- \quad (11)$$

با بسط رابطه (۱۱) و جایگزینی رابطه (۱۰) در آن عناصر بردار  $Q'_h(t_0)_{(i,n)}$  بدست می آیند. بنابراین عنصر  $Z_j$  بردار مذکور عبارت است از:

$$Q'_{h,j}(t_0) = \sum_{i=1}^k Q_{h,PCA}(i,i)(t_0) T_{h(i,n)}^T + h_j^-$$

$$Q'_{h,j}(t_0) = \sum_{i=1}^k ( \sum_{j=1}^m z_{ij} T_{k,io} + \sum_{j=1}^n x_j T_{k,io} ) T_{k,io}^T + v_j^- \quad (12)$$

$Q'_{h,j}(t_0)$  تخمین دامنه ولتاژ گره  $Z_j$  شبکه در زمان  $t_0$  است. همانگونه که ملاحظه می گردد هر عنصر بردار  $Q'_h(t_0)$  تابعی خطی از متغیرهای

با توجه به چالش سنکرون بودن مقادیر اندازه‌گیری ایده بکار رفته در این مقاله برای تطبیق زمانی دستگاه‌های اندازه‌گیری و مقادیر آنها تنظیم یکسان زمان تمامی دستگاه‌های اندازه‌گیری کیفیت توان است در این روش طول شبانه روز به بازه‌های مساوی (مثلا ۱ دقیقه‌ای) تقسیم شده و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌های فوق در هر کدام از بازه‌های زمانی بصورت سنکرون با هم فرض شده‌اند. بدیهی است در زمان راه‌اندازی نسبت به تنظیم و کنترل زمان داخلی دستگاه‌های اندازه‌گیری اقدام شده است. برای سیستم نمونه مورد مطالعه بازه‌های زمانی سنکرون بودن اطلاعات و اندازه‌گیری و ذخیره‌سازی یک دقیقه فرض شده است. بنابراین در شبانه روز تعداد ۱۴۴۰ نمونه از تغییرات سیستم ثبت می‌شود. این بازه زمانی مشخص کننده رفتار بار و پروفیل ولتاژ برای دوره مذکور می‌باشد. با اندازه‌گیری جدید آنها وارد الگوریتم گردیده و آخرین مقادیر زمان گذشته از الگوریتم خارج می‌گردند بنابراین پیوسته آخرین داده‌های سیستم (۱۴۴۰ داده) برای اجرای پروسه تخمین در دسترس قرار دارند.

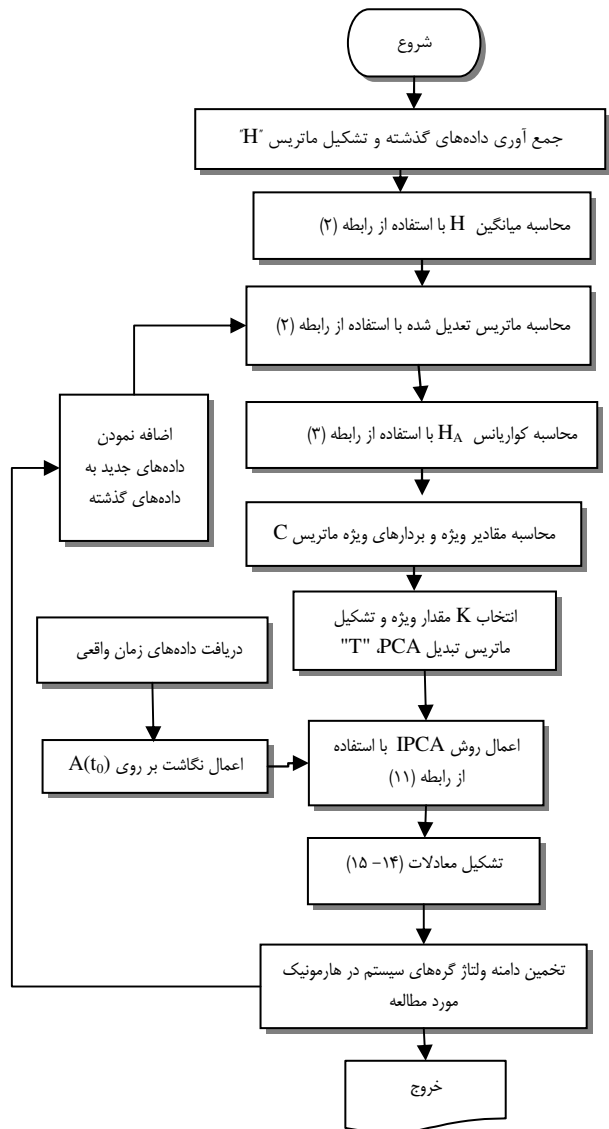
شکل (۴) نشان دهنده پروفیل ولتاژ هارمونیک مرتبه ۵ام در بازه اندازه‌گیری یک هفته و شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب طیف هارمونیک ولتاژ اندازه‌گیری و اعوجاج کلی ولتاژ در گره شماره ۵ را نشان می‌دهند. متوسط دامنه هارمونیک ولتاژهای اندازه‌گیری شده در بازه یک هفته‌ای در ۹۵ درصد زمان در جدول شماره (۱) آورده شده است. به کمک داده‌های اولیه و استفاده از روابط بیان شده در بخش قبل الگوهای میان متغیرهای ولتاژ شبکه شناسایی می‌شود. با الگوهای بدست آمده از داده‌های زمان گذشته نسبت به تخمین دامنه ولتاژ دیگر گره‌های شبکه اقدام می‌گردد.

جدول (۱): نتایج اندازه‌گیری دامنه هارمونیک ولتاژ برای شاخص ۹۵٪

نتایج اندازه‌گیری	شاخص اندازه‌گیری شده ۹۵٪
هارمونیک پنجم	۹.۱۲٪
هارمونیک هفتم	۱.۰۵٪
اعوجاج کلی ولتاژ (THD)	۹.۲۳٪

انتخاب مناسب تعداد بردارهای ویژه (K) بگونه‌ای که با حجم داده‌های محدود دقت قابل قبول برای تخمین حاصل گردد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا ضمن رعایت شرط رابطه (۶) در جدول (۲) نقش انتخاب تعداد بردارهای ویژه در محاسبه متوسط مجموع مربعات خطا برای شبکه مورد مطالعه آمده است.

در مطالعه حاضر تعداد بردارهای ویژه برابر ۱۰ انتخاب شده است. در کار حاضر با توجه به محدودیت دستگاه‌های اندازه‌گیری کیفیت توان و بررسی میدانی از شرایط و امکان نصب فیزیکی آنها در گره‌های شبکه مورد مطالعه تجهیزات مذکور در گره‌های ۱-۱۰ و ۱۱-۱۴ نصب گردیدند. با استفاده از اطلاعات ثبت شده در دستگاه‌های اندازه‌گیری و الگوریتم پیشنهادی مقادیر ولتاژ هیجده گره دیگر در هر



شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهادی

### ۳- مطالعه موردی

دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شبکه، دستگاه‌های اندازه‌گیری زمان حقیقی هارمونیک در باس‌های ۵، ۹ و ۱۲ نصب شده‌اند. این شبکه بخشی از سیستم توزیع منطقه صنعتی شهرک سلیمی تبریز می‌باشد. تغذیه این ناحیه توسط یک ترانسفورماتور ۱۳۲/۲۰kV با گروه برداری YNd11 و از طریق چهار فیدر ۲۰kV صورت می‌گیرد. یکی از فیدرها (شماره ۱) از ۲۴ باس و ۲۱ خط تشکیل شده است. بار پیک این ناحیه ۲۵MW می‌باشد. داده‌های ولتاژ مربوط به گذشته در طی یک دوره مشخص از سمت ولتاژ پائین پست‌های مصرف کنندگان توزیع بدست آمده است. از آنجاییکه الگوریتم توضیح داده شده تابع اطلاعات اولیه تعریف شده به آن می‌باشد لذا گسترش ایده مذکور مستقل از متعادل بودن بار شبکه می‌باشد. شکل (۳) تغییرات بار ناحیه را برای دوره یک هفته نشان می‌دهد.

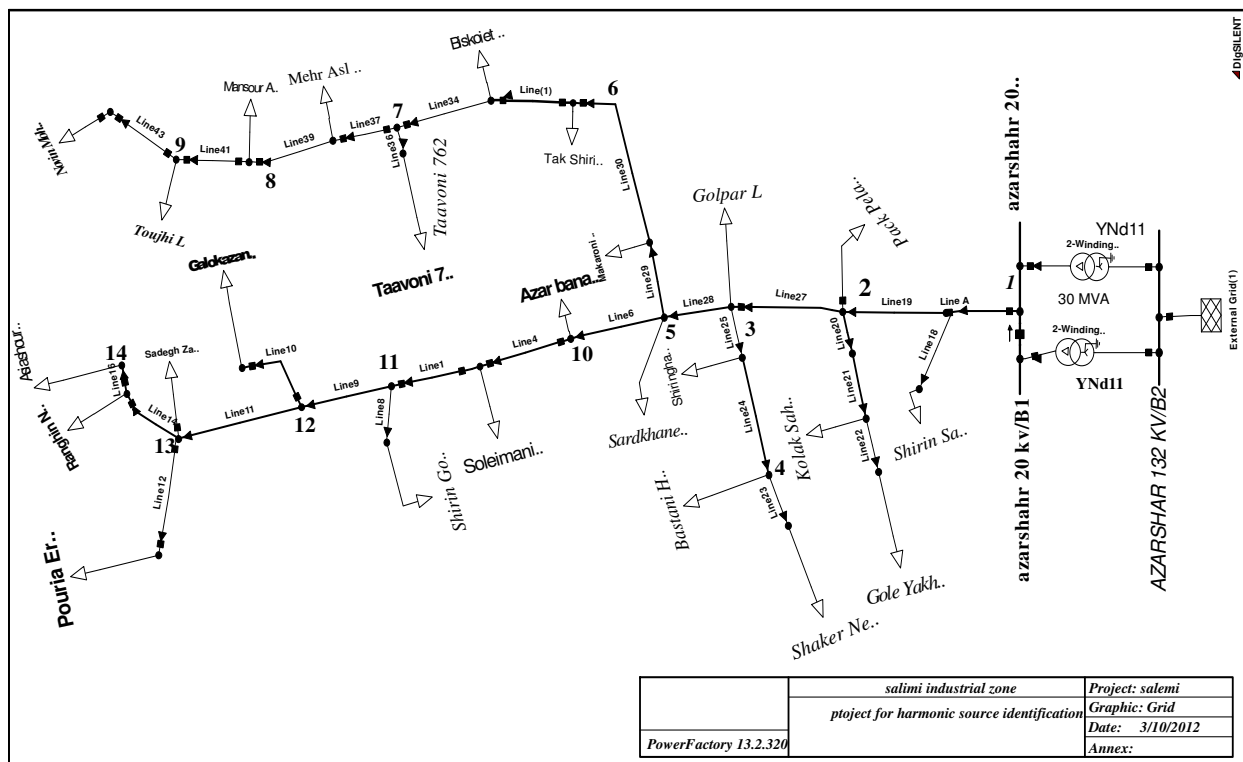
جدول (۲): نقش انتخاب مقدار شاخص (K) در خطای تخمین

مقدار شاخص K	۱	۳	۵	۱۰	۱۵	۲۰
مقدار رابطه (۶)	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۷
متوسط مجموع مربعات خطا	٪۱۰/۴	٪۸/۶	٪۶/۳	٪۲/۴	٪۱/۸	٪۱/۲

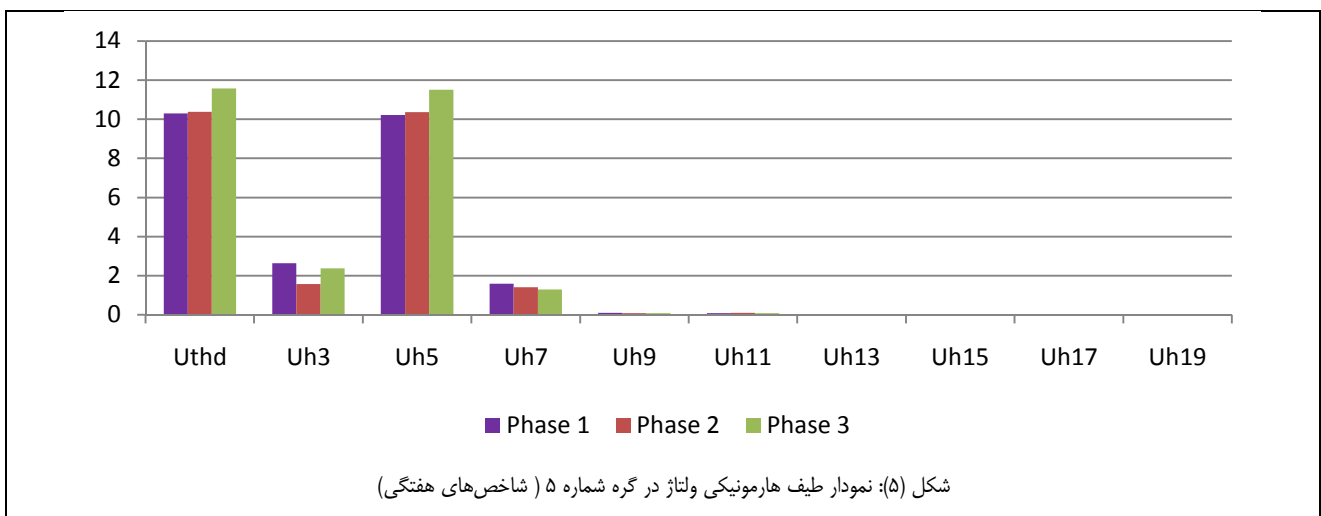
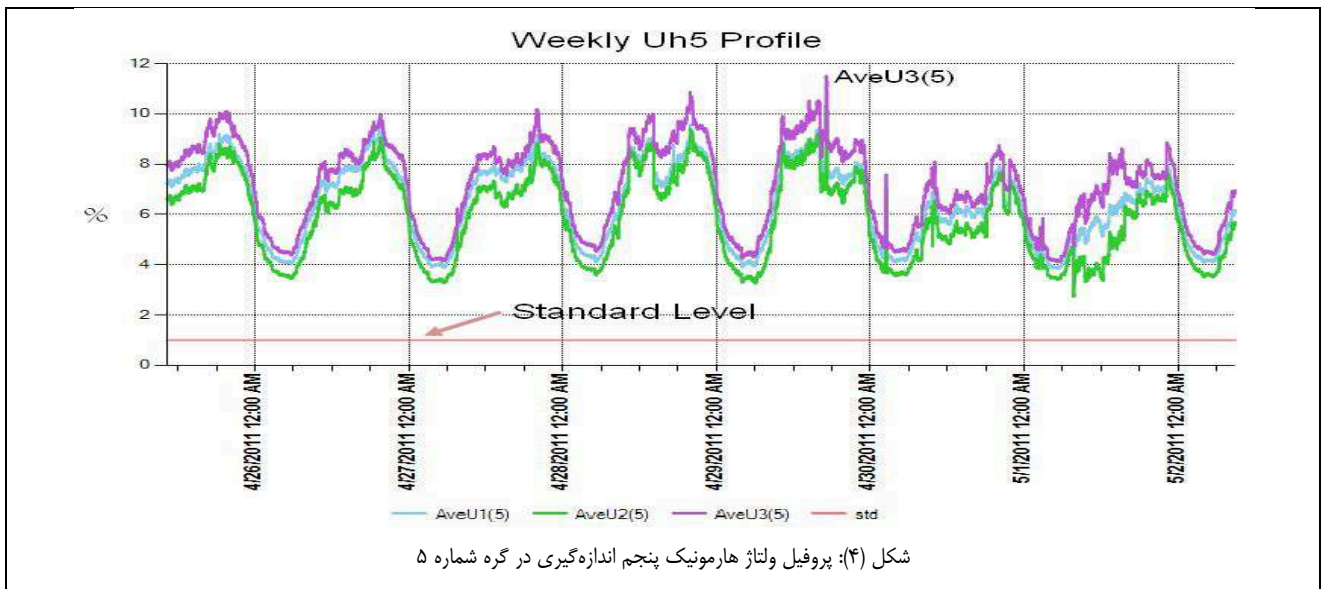
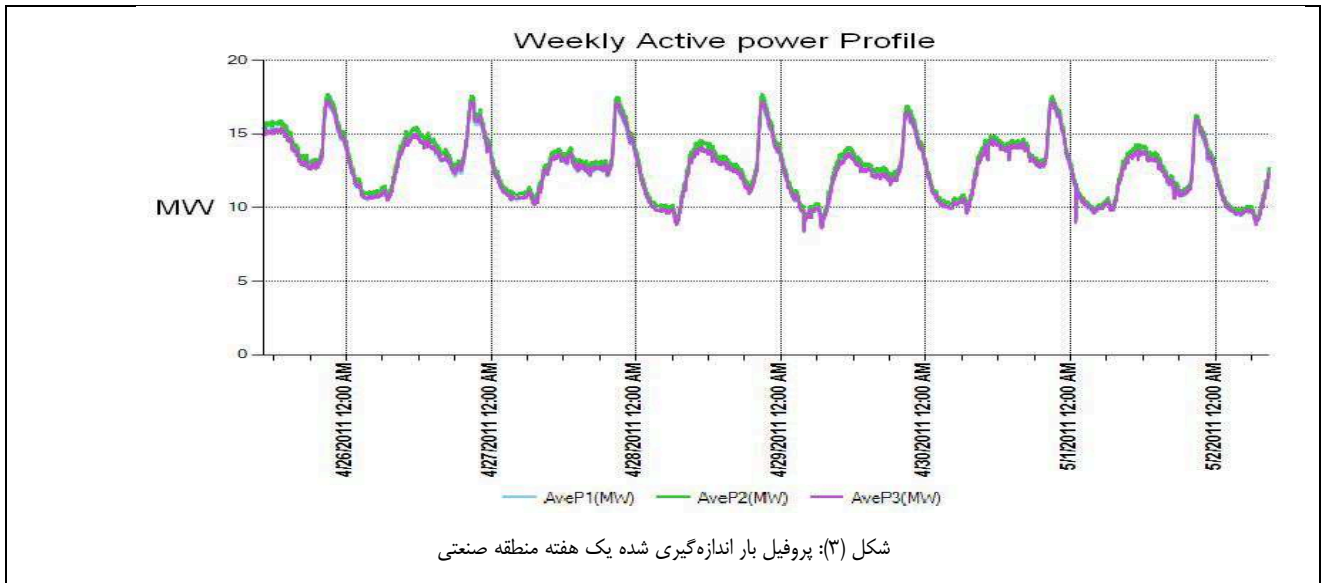
جدول (۳): نتایج مقایسه داده‌های زمان واقعی و تخمین زده شده

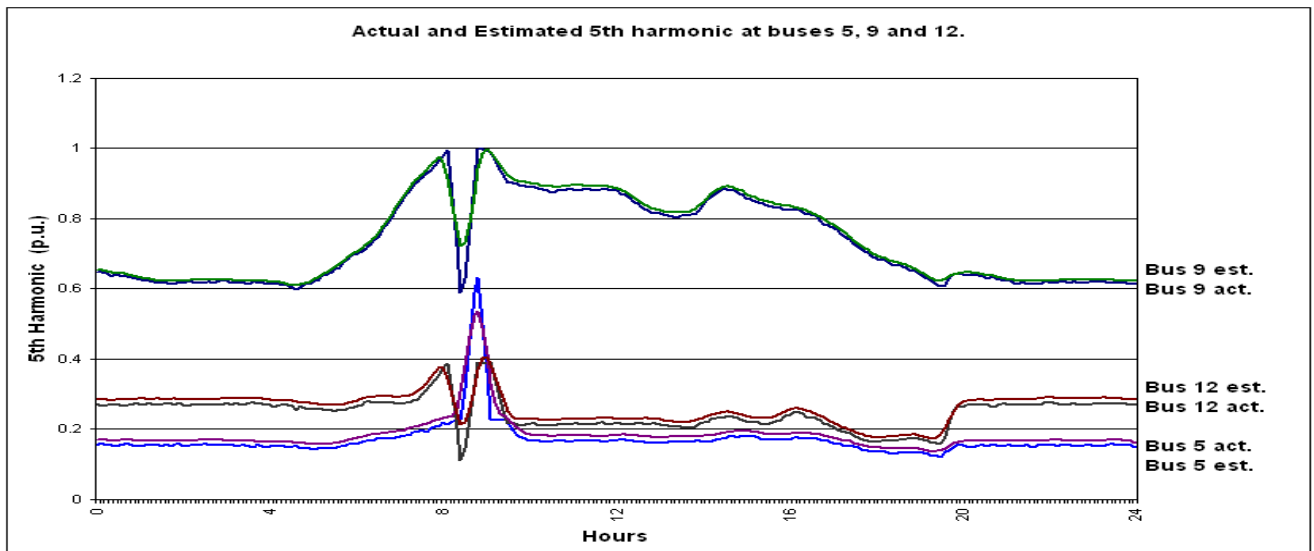
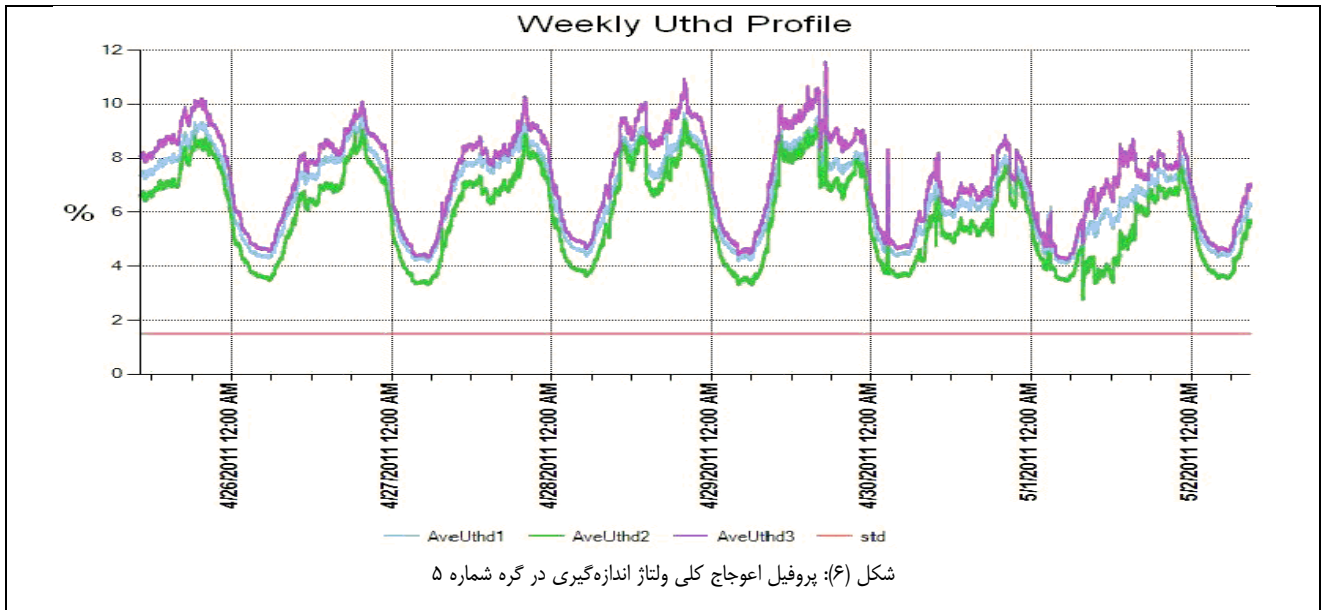
مرتبه ۱۱	مرتبه ۷	مرتبه ۵	مرتبه هارمونیک
۰/۹۷۹۱	۰/۹۷۱۲	۰/۹۷۳۷	مرتبه هارمونیک
۰/۹۷۸۸	۰/۹۷۰۱	۰/۹۵۴۱	ضریب همبستگی
۰/۹۶۳۶	۰/۹۶۶۹	۰/۹۵۶۷	۵ باس
			۹ باس
			۱۲ باس
۰/۶۶	۰/۷۸	۰/۶۶	درصد میانگین خطای مطلق
۱/۰۴	۱/۱۱	۱/۱۵	۵ باس
			۹ باس
۰/۵۸	۱/۲۱	۰/۸۴	۱۲ باس

یک از نمونه‌ها تخمین زده می‌شوند. شکل (۷) دامنه ولتاژ هارمونیک اندازه‌گیری و تخمینی را برای هارمونیک مرتبه ۵ در یک بازه ۲۴ ساعته بعنوان نمونه نمایش می‌دهد. پروفیل ولتاژ با اعمال الگوریتم IPCA تخمین و با مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ در باس مشخص مقایسه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده دامنه ولتاژ هارمونیک‌های مرتبه ۵، ۷ و ۱۱، شاخص درصد خطای میانگین مطلق<sup>۴</sup> و ضریب همبستگی<sup>۵</sup> میان داده‌های تخمین زده شده و اندازه‌گیری با تعداد مشاهده ۱۴۴۰ داده برای گره‌های ۵، ۹ و ۱۲ در جدول شماره (۳) آورده شده است.



شکل (۲): دیاگرام تک خطی فیدر شماره یک ناحیه صنعتی سلیمی تبریز





شکل (۷): مقایسه دامنه ولتاژ هارمونیک پنجم مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله از ایده کاربرد تکنیک PCA در استخراج خصیصه‌های اصلی میان داده‌های موجود استفاده شده است. توسعه تکنیک فوق به ایده روش IPCA در این مقاله تشریح شده است. روش مذکور توانایی حل دسته‌بزرگی از مسایل را که با کمبود داده‌های زمان واقعی مواجه می‌باشند را داراست. در این مقاله با استفاده از قابلیت فوق و داده‌های محدود در دسترس سیستم، تخمین مناسبی از دامنه ولتاژ گره‌های شبکه استخراج شده است. روش مذکور تحلیلی بوده و می‌توان از نتایج بدست آمده در هر گام جهت حل و تحلیل شبکه در گام بعدی استفاده نمود. به منظور بهبود روش مذکور مطالعات لازم در ارتباط با جایابی بهینه تجهیزات اندازه‌گیری می‌تواند موثر و مکمل دقت نتایج روش مذکور پیگیری گردد.

#### مراجع

- [1] E. F. de Arruda, N. Kagan, P. F. Ribeiro, "Harmonic Distortion State Estimation Using an Evolutionary Strategy", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 25, No. 2, April 2010, pp. 831-842.
- [2] N. Kanao, M. Yamashita, H. Yanagida, M. Mizukami, "Power System Harmonic Analysis Using State-Estimation Method for Japanese Field Data", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, NO. 2, 2005, pp. 970-978.
- [3] A. Kumar, B. Das, J. Sharma, "Robust Dynamic State-Estimation of Power System Harmonics", ELSEVIER Electrical Power & Energy Systems, Vol. 28, 2006, pp.65-74.
- [4] G.T. Heydt, "Identification of Harmonic Sources by a State-Estimation Technique.", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, 1989, pp. 569-576.
- [5] D.T. Chessmore, Wei-Jen Lee, W.E. Muston, T. Anthony, F. Kohrmann, "Voltage-Profile Estimation and Control



- 45, Issue. 4, July-Aug. 2009, pp. 1467 – 1474.
- [6] R. B. Godoy, J. O. Pereira Pinto, L. G. Junior, "Voltage Estimation in Electrical Distribution Systems ", 9th International Conf. on Elect. Power Quality and Utilization, Barcelona, Oct. 2007.
- [7] K. Y. Chua, C. C. Siew, B. H. Li, T. L. Tan, "Network and Plant and Power Quality Solutions", International Power Quality Conf. 2002, 21-25 Oct. 2002, Singapore
- [8] A Kumar, B. Das, J. Sharma, "Determination of Location of Multiple Harmonic Sources in a Power System.", ELSEVIER Electrical Power & Energy Systems, Vol. 26, 2004, pp.73-78.
- [9] S. Naka, T. Genji, T. Yura, Y. Fukuyama, "A Hybrid Particle Swarm Optimization for Distribution State Estimation.", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, NO.1, Feb. 2003.
- [10] A Kumar, B. Das, J. Sharma, "Genetic Algorithm-Based Meter Placement for Static Estimation of Harmonic Sources.", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.20, No.2, April, 2005, pp. 1088-1096.
- [11] W. Trongpanich and C. Wachirapan , " Wavelet-based Voltage Magnitude Calculation to Automatically Classify Power Quality Problems," 19 th Int. Con. on Electricity Distribution , CIRED, Vinna, pp. 0500, May 2007.
- [12] A. A. Yaghoti, M.P. Moghadam, M.R. Haghifam, V.J. Majd, "Load estimation of distribution networks by means of Inverse PCA", Technical Journal of Amirkabir University, Vol.67, Feb 2008.
- [13] H. Liao, D. Niebur, "Load Profile Estimation in Electric Transmission Networks Using Independent Component Analysis.", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, NO.2, May 2003, pp. 707-715.
- [14] E. Gursoy, D. Niebur, "Harmonic Load Identification Using Complex Independent Component Analysis", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.24, No. 1, Jan 2009, pp. 285-292.
- [15] A. Mary Tropper "Matrix Theory for Electrical Engineering Students" Queen Mary college, University of London , April 2004.
- [16] A. Cichocki, S. Amari, "Blind Signal and Image Processing learning algorithms and applications" John Wiley & Sons, 2002.
- [17] Aapo Hyvtirinen, Juha Karhunen, Erkki Oja, "Independent Component Analysis" John Wiley & Sons, 2001.
- [18] A. Mary Tropper "Matrix Theory for Electrical Engineering Students" Queen Mary college, University of London, 1996.

## زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Principal component analysis  
<sup>2</sup> Inverse principal component analysis  
<sup>3</sup> Pseudo inverse  
<sup>4</sup> Mean absolute percentage error  
<sup>5</sup> Correlation factor