

یک روش کارآمد برای تخمین حالت مؤلفه اصلی و هارمونیک در شبکه های توزیع شعاعی

مهدی معلم^۱ امیر فرخ پیام^۲ حسین شیروانی^۳ محمد کیوانفرد^۴ بهزاد میرزائیان دهکردی^۵

۱- استاد- دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان اصفهان

moallem@cc.iut.ac.ir

۲- دانش آموخته ی کارشناسی ارشد، دانشگاه برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران و شرکت پژوهنده نیرو، اصفهان

a.farrokhpayam@ece.ut.ac.ir

۳- دانش آموخته ی کارشناسی ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان و شرکت پژوهنده نیرو، اصفهان

keivanfard@gmail.com

۴- دانش آموخته ی کارشناسی ارشد، شرکت پژوهنده نیرو، اصفهان

shirvani80@yahoo.com

۵- استادیار- گروه برق- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه اصفهان

mirzaeian@eng.ui.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی کارآمد به منظور تخمین حالت مؤلفه اصلی و هارمونیک ها در شبکه های توزیع شعاعی ارائه می شود. توسعه و گسترش دامنه کاربرد این روش به تحلیل مشاهده پذیری و رؤیت شوندگی شبکه ها و پردازش داده ها به طور جامع مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. از مهمترین مزیت های این روش قابلیت تشخیص داده های نادرست و پردازش صحیح آنها و قابلیت بکارگیری آن در مبحث تخمین حالت هارمونیک در سیستم های شعاعی واقعی و عملی می باشد. در این مقاله با تست الگوریتم تخمین حالت بر داده های سیستم نمونه و همچنین قسمتی از شبکه توزیع شهرستان اصفهان، قابلیت و صحت عملکرد این روش هم برای مؤلفه اصلی فرکانس و هم مؤلفه هارمونیک سوم و پنجم به طور کامل مورد بررسی قرار می گیرد.

کلمات کلیدی: هارمونیک، تخمین حالت، شبکه های توزیع شعاعی، تشخیص داده نادرست

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۸۷/۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۸۸/۹/۲۸

نام نویسنده ی مسئول : دکتر مهدی معلم

نشانی نویسنده ی مسئول : ایران - اصفهان - دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده ی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

استفاده از تخمین حالت در سیستم های قدرت به اواخر دهه ۶۰ و اوایل دهه ۷۰ میلادی بر می گردد. مدل دقیق [۱] و تقریبی [۲]، تئوری و مباحث پایه مربوط به تخمین [۳]، چگونگی کاربرد تخمین حالت در سیستم های قدرت [۴، ۵ و ۶]، آنالیز و تشخیص داده های بد (نادرست) [۷] و نحوه رؤیت شونددگی سیستم های قدرت [۸] از جمله مسائلی هستند که در طی سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ میلادی درباره مبحث تخمین حالت در سیستم های قدرت مطرح شده اند.

استفاده از بارهای غیرخطی در شبکه های قدرت و به طور کلی بارهای هارمونیک زا، میزان آلودگی هارمونیکی در سیستم های قدرت را به شدت افزایش می دهد [۹ و ۱۰]. عدم شناخت کامل بارهای غیرخطی از نظر ساختمان و مدل آنها و نیز روابط پیچیده ریاضی حاکم بر این بارها، سبب افزایش خطا در آنالیز سیستم های قدرت گردیده است. همچنین عدم شناخت کامل از انواع بارهای هارمونیک زا، سبب عدم اطلاع از موقعیت این نوع بارها در سیستم گردیده است.

لزوم استفاده از تکنیک های تخمین حالت در شرائط واقعی، ایده استفاده از تخمین حالت در تشخیص منابع هارمونیکی در سیستم های قدرت آلوده به هارمونیک را قوت بخشید. پروفیسور هیت (G.T. Heydt) و دستیارانشان از جمله کسانی هستند که در سال ۱۹۸۹ این ایده را مطرح نموده اند [۱۰ و ۱۱]. آنها برای دستیابی به اهداف مورد نظر خود از چهار نوع اندازه گیری اندازه ولتاژ، اندازه جریان، توان اکتیو و توان راکتیو استفاده نموده اند. در همین راستا پروفیسور آریلاگا (J. Arrillaga) و همکارانشان کاربرد تخمین حالت در سیستم های قدرت با بکارگیری اندازه گیری از نوع فازوری (یعنی فازور ولتاژ و فازور جریان) را مورد بررسی قرار داده اند.

در حال حاضر با توجه به افزایش اطلاعات پیرامون انواع بارهای غیرخطی و هارمونیک زا در شبکه و نیز آگاهی از نحوه رفتار این بارها، مبحث تخمین حالت در سیستم های قدرت آلوده به هارمونیک صرفاً برای اطلاع از محل و نوع بارهای هارمونیکی به کار نمی رود بلکه به عنوان ابزاری برای آگاهی از سطوح ولتاژ و جریان در کلیه نقاط سیستم قدرت استفاده می شود. مقایسه این سطوح با استانداردهای وضع شده در شبکه های آلوده به هارمونیک، میزان آلودگی هارمونیکی در قسمت های مختلف شبکه را نشان می دهد.

قابلیت مشاهده پذیری یک شبکه توزیع، تشخیص داده های نادرست و بد، همچنین تکنیک های تخمین حالت، پیش نیازهای لازم برای موفقیت یک سیستم اتوماسیون توزیع کارآمد می باشد. امروزه طراحی و استفاده از سیستم اتوماسیون توزیع به منظور عملکرد پربازده شبکه های توزیع، ضروری می باشد. در موارد استفاده از داده های زمان حقیقی، پروسه تخمین حالت از مدول های متفاوتی تشکیل شده که می توان به توپولوژی پردازشگر، تحلیل رؤیت شونددگی، تخمینگر حالت و پردازش داده های نادرست اشاره کرد. بسیاری از محققین به منظور تخمین حالت در سیستم های توزیع، روش های متفاوتی را پیشنهاد

نموده اند. تکنیک تخمین حالت سیستم توزیع بر اساس مانیتورینگ زمان حقیقی در [۱۲] پیشنهاد شده است. هنگامی که از جریان های اندازه گیری شده استفاده می گردد، رؤیت شونددگی شبکه به تنهایی بر اساس فاکتوریزه کردن DLU از ماتریس ضرایب می تواند مشخص گردد. این نکته به علت امکان وجود راه حل های مختلفی برای یک شبکه مشخص و نحوه اندازه گیری می باشد، در مقاله [۱۳] یک سیستم توزیع با استفاده از تحلیل عددی رؤیت شونددگی بر اساس فاکتوریزه کردن مثلثی ماتریس ضرایب که به یک تخمین حالت سه فاز، اعمال شده، ارائه شده است.

تخمینگر حالت سیستم توزیع بر اساس وزن دهی مجذور مربعات و تکنیک مدلسازی سه فاز در [۱۴] ارائه شده است، پخش توان و تخمین حالت چند فاز در [۱۵] انجام شده است. روش های متداول تخمین حالت که بر اساس تکنیک حداقل مجذور مربعات پایه ریزی شده اند به واسطه مشکلات مربوط به ماتریس ضرایب و ماتریس های ژاکوبین، دارای خطا می باشند.

علاوه بر این، این روش ها قابل اعمال به سیستم هایی با نقاط کم و ضرایب $\frac{X}{R}$ بالا بین خطوط بوده و محاسبات از بازدهی چندانی برخوردار نیست. همچنین اکثر این روش ها نیازمند به داشتن اطلاعات اندازه گیری شده ای از حداقل نصف نقاط شبکه می باشند که در حالت عملی و بویژه با در نظر گرفتن امکانات موجود در کشور چنین امری به سختی امکان پذیر می باشد.

در این مقاله الگوریتمی کارآمد و مقاوم به منظور تخمین حالت سه فاز که در شبکه های توزیع شعاعی استفاده می شود و قابلیت توسعه و بکارگیری در مبحث تخمین حالت هارمونیکی دارد، ارائه می گردد. بسط و گسترش دامنه کاربرد این روش به تحلیل مشاهده پذیری و رؤیت شونددگی شبکه ها و پردازش داده ها به طور جامع مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. این روش از طبیعت و ویژگی ذاتی یک شبکه شعاعی استفاده کرده و از روش پخش بار هارمونیکی پیش رونده و پخش بار هارمونیکی پس رونده به منظور تخمین جریان و توان جاری در خطوط و ولتاژ گره و بارها بر اساس مقادیر اندازه گیری شده استفاده می نماید.

از مهمترین مزایای این الگوریتم می توان به قابلیت بکارگیری آن در مبحث تخمین حالت هارمونیکی در سیستم های شعاعی واقعی و عملی، همچنین قابلیت تصحیح خطاهای مربوط به داده های اندازه گیری شده در حین انجام عملیات تخمین اشاره نمود. در این مقاله ابتدا به بررسی روش پخش بار شعاعی پرداخته و سپس الگوریتم تخمین حالت هارمونیکی مورد بررسی قرار می گیرد. در ادامه با تست الگوریتم تخمین حالت بر داده های سیستم نمونه و همچنین قسمتی از شبکه توزیع شهرستان اصفهان، قابلیت و صحت عملکرد این روش هم برای مؤلفه اصلی فرکانس و هم مؤلفه هارمونیکی سوم و پنجم به طور کامل مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- روش پخش بار شبکه های شعاعی

روش های پخش بار بیشتر برای شبکه های ولتاژ بالا تدوین شده اند. در این روش ها با کاهش نسبت $\frac{X}{R}$ خطوط، سرعت همگرایی به شدت کاهش می یابد و حتی ممکن است بعضی روش ها قادر به حل شبکه هایی که در آنها مقادیر X و R خطوط نزدیک به هم هستند نباشد. البته تجهیزاتی برای افزایش سرعت رسیدن به جواب در نظر گرفته شده است و روش های خاصی تدوین شده اند. این مشکل وقتی که شبکه های بزرگ شعاعی با تعداد زیاد خط و پست مورد مطالعه قرار می گیرند بیشتر آشکار می شود و نیاز به یک روش جهت حل این قبیل شبکه ها احساس می شود. در این مقاله از یک روش مؤثر برای پخش بار شبکه های توزیع شعاعی استفاده می شود این روش خاص شبکه های شعاعی است. در این روش حل شبکه از یک خط به خط دیگر به طور سیستماتیک ادامه پیدا می کند تا تمام خطوط در شبکه به حساب آیند. لازم بذکر است که ولتاژ اولیه در تمام پست ها به جز پست مرجع که اندازه و فاز ولتاژ آن معلوم است مساوی یک پرونیت در نظر گرفته می شود [۱۶].

بر مبنای این ولتاژها توان اکتیو و راکتیو بار پست ها و جریان خطوط محاسبه و ذخیره می شوند. البته این کار نیاز به یک روش منطقی برای تعقیب پست های شبکه دارد. به این منظور یک ماتریس مشخصه برای خطوط شبکه مورد نیاز است. جریان خطوط محاسبه شده برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو تلف شده در هر خط به کار می رود و تلفات کل سیستم محاسبه می گردد. جریان در پست مرجع به صورت زیر محاسبه می شود:

$$I = \frac{(\sum P + \sum P_{loss}) - j(\sum Q + \sum Q_{loss})}{E_S^*} \quad (1)$$

مقادیر $\sum P$ و $\sum Q$ بار کل سیستم و مقادیر $\sum P_{loss}$ و $\sum Q_{loss}$ تلفات کل سیستم می باشند. E_S^* مقدار مزدوج ولتاژ پست مرجع است. محاسبات سپس ادامه پیدا می کند و آفت ولتاژ، جریان و تلفات در هر خط شبکه به صورت سیستماتیک از پست مرجع تا انتهای خطوط شبکه محاسبه می شوند. جدول مشخصه خطوط دوباره برای دنبال کردن مسیر صحیح خطوط مورد استفاده قرار می گیرد. وقتی که یکبار این سیکل کامل شد، کل تلفات محاسبه و با تلفات محاسبه شده در سیکل قبل مقایسه می شود اگر تفاوت به دست آمده از تلفات در دو حل متوالی کمتر از مقدار تلورانس قابل قبول نباشد، عملیات تکرار می شود. این سیکل ها ادامه پیدا می کند تا وقتی که تفاوت تلفات محاسبه شده در دو سیکل متوالی کمتر از مقدار تلورانس قابل قبول باشد [۱۶].

۳- شرح روش تخمین

در این قسمت مراحل مختلف مربوط به روش تخمین شرح داده می شود. بدین منظور ابتدا رویت شونددگی شبکه مورد بحث قرار گرفته و

نحوه انجام تخمین در حالتی که شبکه رویت شونده نباشد مطرح می گردد. در ادامه الگوریتم تخمینگر پیشنهادی ارائه شده و سپس هر کدام از مراحل آن به همراه مشکلات احتمالی و راه حل های ارائه شده مورد بررسی قرار می گیرند.

۳-۱- رویت شونددگی شبکه و دقت اندازه گیری ها

یک سیستم قدرت، رویت شونده خواهد بود اگر اندازه گیری های انجام شده روی آن به محاسبه اندازه و زاویه ولتاژهای باس های آن شبکه به صورت نسبتاً دقیق کمک کند. بنابراین اگر یک شبکه رویت شونده باشد، تخمین حالت استاتیک در آن قابل اجرا خواهد بود. در غیر این صورت می توان چنین نتیجه گیری کرد که شبکه مربوطه رویت شونده نیست. به طور کلی عدم رویت پذیری یک شبکه می تواند ناشی از دو عامل زیر باشد:

۱- کم بودن یا کافی نبودن اطلاعات (مخصوصاً اندازه گیری ها) درباره شبکه، که در این خصوص بررسی های لازم انجام شد.

۲- عدم رویت پذیری شبکه به خاطر توپولوژی خاص آن شبکه. تشخیص رویت شونددگی یک شبکه قدرت و یا قسمتی از آن، با استفاده از الگوریتم های گرافیکی خاص قابل انجام است [۱۷]، لیکن اگر تخمین حالت در یک شبکه قدرت به ازای یک دسته اندازه گیری مستقل به جواب رسید، می توان چنین نتیجه گیری که شبکه قدرت مذکور رویت پذیر است.

مسئله تخمین در حالت زیر معین از جمله حالت هایی است که عدم رویت شونددگی در آن مشاهده می شود. علت اصلی این عدم رویت شونددگی، کم بودن تعداد اندازه گیری ها از تعداد متغیرهای حالت است.

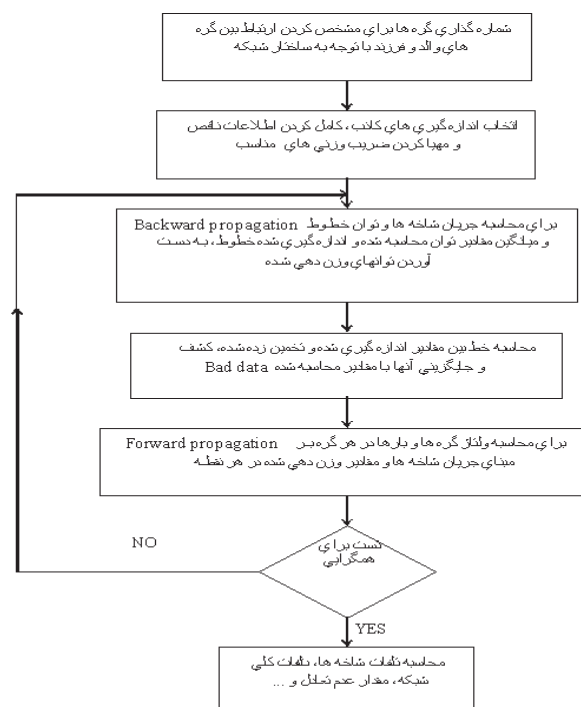
به منظور حل مسئله تخمین در سیستم های قدرت در حالت زیر معین، از جمله رایج ترین روش ها، استفاده از اندازه گیری های کاذب است. لفظ اندازه گیری های کاذب به داده هایی اطلاق می شود که مستقیماً با اندازه گیری به دست نمی آیند. این داده ها به عنوان نمونه می توانند از تخمین حالت مرحله پیش، اطلاعات به دست آمده از اپراتورها، پیش بینی بار، پخش بار حالت پایه و ... استخراج شوند. اندازه گیری های کاذب همراه با اندازه گیری های واقعی به تخمین گر حالت اعمال می شوند. با توجه به این موضوع که اندازه گیری های کاذب به حد کافی دقیق نیستند، انحراف معیار بزرگی را به آنها نسبت می دهیم. انجام این کار سبب می شود که اندازه گیری های کاذب از دید تخمین گر حالت، به صورت اندازه گیری از یک دستگاه اندازه گیر با کیفیت خیلی پائین به حساب آیند.

۳-۲- الگوریتم روش تخمین

شکل (۱) مراحل محاسباتی این روش را نشان می دهد.

تلفات شاخه ها، تلفات کل، میزان عدم تعادل ولتاژ و جریان نیز در انتهای کار انجام می پذیرد.

به منظور انجام تخمین صحیح، داشتن اطلاعات مربوط به مقادیر می نیمم داده های زمان حقیقی ضروری می باشد. در شبکه های توزیع شعاعی، ولتاژ باس اصلی به عنوان مرجع انتخاب می گردد و تخمین گر حالت $(n-1)$ دامنه ولتاژ و $(n-1)$ زاویه ولتاژ را در شبکه n نقطه ای محاسبه می کند. اگر اندازه گیری از توان های اکتیو و راکتیو بارها در $(n-1)$ نقطه دیگر انجام گرفته باشد، شبکه رؤیت پذیر می باشد. در حالت کلی چنین امری میسر نبوده و اطلاعات پخش توان اکتیو و راکتیو در بعضی باس ها و شاخه ها از شبکه موجود می باشد. به واسطه طبیعت شعاعی شبکه، از روی مقادیر اندازه گیری شده در شاخه های متصل به یک گر، پیش بینی توان بار در آن نقطه امکان پذیر می باشد. شکل (۲) مراحل اصلی در تحلیل رؤیت شونده ای مقاله را نشان می دهد.



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم

چنانچه مشاهده می شود، در ابتدا تعداد نقاط (گره ها) به منظور ایجاد رابطه والد-فرزندی بر اساس توپولوژی شبکه مشخص می گردد [۶] و در ادامه مقادیر اندازه گیری شده مورد بررسی قرار می گیرند، اگر تعداد اندازه گیری ها کافی نبود، بقیه مقادیر و داده های مورد نیاز هر گره بر اساس اندازه گیری های انجام شده در گره های دیگر، محاسبه می شوند و یا از اندازه گیری های کاذب، جایگزین می شوند. بر این اساس شاخص هایی برای مقادیر اندازه گیری شده تعریف می گردند. انتخاب اندازه گیری های کاذب، جایگزینی اطلاعات از دست رفته، ایجاد ضرایب وزنی مناسب، مراحل و اولویت های الگوریتم تحلیل رؤیت شونده ای می باشد. در ادامه از پخش بار هارمونیک پس رونده به منظور محاسبه جریان های شاخه ها و توان شاخه ها استفاده می شود. در خلال عملیات تکرار پردازش، داده های نادرست تشخیص داده شده و توسط مقادیر محاسبه شده یا کاذب جایگزین می گردد. محاسبه خطاهای بین مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده، تشخیص اندازه گیری های نادرست و جایگزینی مقادیر محاسبه شده یا مقادیر کاذب به جای اندازه گیری های نادرست، مراحل کار در الگوریتم تشخیص اطلاعات نادرست می باشد. ولتاژهای نقاط و بار در هر گره، توسط پخش بار هارمونیک پیش رونده محاسبه شده و لذا جریان های شاخه ها و بارها محاسبه می گردد. در ادامه ولتاژ هر گره مورد محاسبه قرار گرفته و تست همگرایی انجام می شود. خطاهای میان مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده پخش توان اکتیو و راکتیو و تزیقی نیز مورد بررسی و مطالعه قرار می گیرد. محاسبه

۳-۳- تشخیص اطلاعات و داده های نادرست

۴-۳- تخمین حالت هارمونیک - فرآیند تکرار

لازم به ذکر است که در قسمت تخمین هارمونیک ابتدا امپدانس هارمونیک شبکه محاسبه گردیده [۱۸] و با توجه به مقادیر اندازه گیری شده ولتاژ و توان هارمونیک، پخش بار هارمونیک اولیه را انجام داده و با توجه به داده های پخش بار هارمونیک از رابطه زیر جریانه های هارمونیک محاسبه می گردد.

$$\begin{bmatrix} I_{Lah}(i) \\ I_{Lbh}(i) \\ I_{Lch}(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ah}(i) / Z_{Lah}(i) \\ V_{bh}(i) / Z_{Lbh}(i) \\ V_{ch}(i) / Z_{Lch}(i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ولتاژهای گره ها بر اساس رابطه (۸) با شروع از فیدر مرجع و تداوم در مسیرهای شبکه، محاسبه می گردد.

$$\begin{bmatrix} V_{ah}(j) \\ V_{bh}(j) \\ V_{ch}(j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ah}(i) \\ V_{bh}(i) \\ V_{ch}(i) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aamh} & Z_{abmh} & Z_{acmh} \\ Z_{abmh} & Z_{bbmh} & Z_{bcmh} \\ Z_{acmh} & Z_{bcmh} & Z_{ccmh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ah}(m) \\ I_{bh}(m) \\ I_{ch}(m) \end{bmatrix} \quad (۸)$$

۳-۶- همگرایی فرآیند تکرار در محاسبات هارمونیک

مراحل ذکر شده در پخش هارمونیک پس رونده و پخش هارمونیک پیش رونده در خلال هر تکرار، منجر به محاسبات ولتاژ می شود. در مرحله بررسی همگرایی، دامنه ولتاژ هر گره با مقدار تکرار قبلی خود مقایسه می گردد، لذا اختلاف ولتاژ در گره (i) بر اساس تکرار k ام هارمونیک با روابط (۹) تا (۱۵) بررسی می گردد.

$$\Delta V^k(j) = V^k(j) - V^{k-1}(j) \quad (۹)$$

$$\text{Re al}|\Delta V(j)| < \text{eps} \quad (۱۰)$$

$$\text{Im ag}|\Delta V(j)| < \text{eps} \quad (۱۱)$$

$$\text{Re alPowerFlow}(PIC - PIM) < \text{eps} \quad (۱۲)$$

$$\text{Re activePowerFlow}(QIC - QIM) < \text{eps} \quad (۱۳)$$

$$\text{Re alPowerInjection}(PIJC - PIJM) < \text{eps} \quad (۱۴)$$

$$\text{Re activePowerFlow}(QIJC - QIJM) < \text{eps} \quad (۱۵)$$

اگر هر دو رابطه (۱۰) و (۱۱) برآورده گردد، الگوریتم تکرار متوقف می شود، علاوه بر اختلاف ولتاژ اختلاف میان توان های حقیقی و راکتیو، همچنین توان های حقیقی و راکتیو تزریق شده به شاخه ها نیز مد نظر قرار می گیرد [۱۹].

۴- حل شبکه نمونه و نتایج آن

بر اساس الگوریتم ارائه شده، یک برنامه کامپیوتری به منظور بررسی صحت این روش نوشته شد. این الگوریتم برای یک سیستم توزیع که اطلاعات آن در ادامه ذکر می گردد، پیاده سازی گردید.

۴-۱- پخش بار برای یک شبکه شعاعی تست واقعی

به منظور بررسی و مطالعه بیشتر، این روش برای یک شبکه شعاعی متقارن که نمودار ساده شده آن در شکل (۳) نشان داده شده است و اطلاعات مداری آن در جداول (۱) و (۲) آمده است، پیاده سازی گردیده است.

بعد از اینکه جریان هارمونیک بارها محاسبه گردید، مقادیر مربوط به هارمونیک شاخه ها با استفاده از معادلات (۳) و (۴) محاسبه می شوند و با توجه به مقادیر اندازه گیری شده، وزن دهی می گردند. سپس بر اساس ضرایب وزنی، جریان و توان هارمونیک شاخه ها بر اساس معادلات (۶) و (۷) به نو می شوند. جریان هارمونیک شاخه m بر اساس بارها و شاخه هایی که به آن متصل می شوند از رابطه (۲) محاسبه می گردد.

$$\begin{bmatrix} I_{Lah}(m) \\ I_{Lbh}(m) \\ I_{Lch}(m) \end{bmatrix} = \sum_{p \neq m} \begin{bmatrix} I_{ah}(p) \\ I_{bh}(p) \\ I_{ch}(p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{Lah}(i) \\ I_{Lbh}(i) \\ I_{Lch}(i) \end{bmatrix} \quad (۳)$$

که شاخه m به شاخه P متصل می گردد. پخش توان در شاخه m بر اساس روابط زیر محاسبه می گردد:

$$\begin{bmatrix} PIJC_{ah}(m) \\ PIJC_{bh}(m) \\ PIJC_{ch}(m) \end{bmatrix} = \text{Re al} \begin{bmatrix} V_{ah}(j)i_{ah}(m)^* \\ V_{bh}(j)i_{bh}(m)^* \\ V_{ch}(j)i_{ch}(m)^* \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$\begin{bmatrix} QIJC_{ah}(m) \\ QIJC_{bh}(m) \\ QIJC_{ch}(m) \end{bmatrix} = \text{Im ag} \begin{bmatrix} V_{ah}(j)i_{ah}(m)^* \\ V_{bh}(j)i_{bh}(m)^* \\ V_{ch}(j)i_{ch}(m)^* \end{bmatrix} \quad (۵)$$

اگر اندازه گیری های مربوط به شاخه ای موجود نبود، آنگاه مقادیر محاسبه شده در تکرار قبلی به جای آن جایگزین می شود سپس اختلاف میان مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده، به دست می آید. اگر این خطا از حد آستانه بیشتر بود، به عنوان داده نادرست در نظر گرفته می شود و این داده نادرست با مقدار محاسبه شده جایگزین می شود.

ضرایب وزنی W مربوط به اندازه گیری ها به صورتی که در الگوریتم مشخص می شوند محاسبه می گردند. در نهایت توان های هارمونیک شاخه ها بر اساس ضرایب وزنی و محاسبات و اندازه گیری های انجام شده از روابط زیر به دست می آیند:

$$\begin{bmatrix} PIJW_{ah}(m) \\ PIJW_{bh}(m) \\ PIJW_{ch}(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{(1-W)PIJC_{ah} + (W)PIJM_{ah}\} \\ \{(1-W)PIJC_{bh} + (W)PIJM_{bh}\} \\ \{(1-W)PIJC_{ch} + (W)PIJM_{ch}\} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$\begin{bmatrix} QIJW_{ah}(m) \\ QIJW_{bh}(m) \\ QIJW_{ch}(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{(1-W)QIJC_{ah} + (W)QIJM_{ah}\} \\ \{(1-W)QIJC_{bh} + (W)QIJM_{bh}\} \\ \{(1-W)QIJC_{ch} + (W)QIJM_{ch}\} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

۳-۵- پخش هارمونیک پیش رونده

هدف از پخش هارمونیک پیش رونده محاسبه ولتاژ و بار هر گره با شروع از گره مرجع است. ولتاژ مرجع برابر با مقدار اندازه گیری شده تنظیم می شود. در خلال Forward Propagation، جریان های شاخه ها بر اساس توان های وزن دهی شده محاسبه شده و سپس ولتاژهای گره ها محاسبه می شوند.

۵- تخمین فیدر توزیع در شبکه اصفهان

۵-۱- تخمین هارمونیک فیدر شماره ۵ جاده نائین

در ادامه الگوریتم و روش تخمین ارائه شده برای مؤلفه اصلی و هارمونیک های سوم و پنجم در شبکه برق اصفهان که دیاگرام تک خطی ساده شده آن در شکل (۴) آمده است، پیاده سازی شده و نتایج آن در ادامه نشان داده شده است.

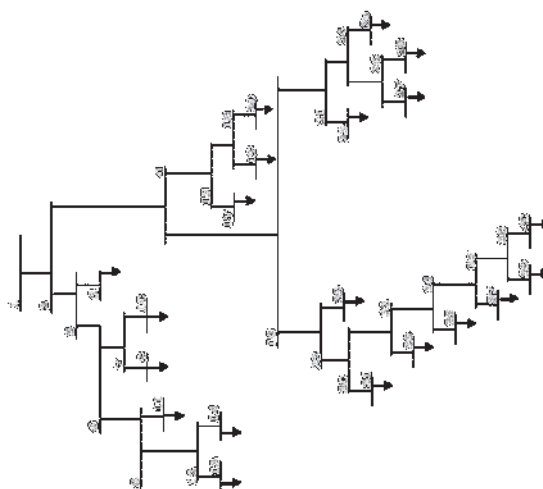
در این مقاله قسمتی از شبکه که دارای پست زمینی نبوده است ساده شده و امپدانس معادل محاسبه شده، به جای آن قرار داده می شود. نقاطی که با علامت ضربدر (*) نشان داده شده است مکان های اندازه گیری می باشند.

۵-۱-۱- پخش بار مؤلفه اصلی

لازم به ذکر است که پست 63/20kV جاده نائین در محاسبات مؤلفه اصلی به عنوان باس مرجع (۱) در نظر گرفته شده است. امپدانس بارها

بر اساس تقریباً $\frac{1}{8}$ توان دیماند و با ضریب توان ۰/۸۵ و با توجه به

خازن گذاری در باس های مختلف و امپدانس ترانس بر اساس استاندارد ترانس های شرکت ایران ترانسفو محاسبه گردیده است که امپدانس معادل متصل به هر باس در جدول (۵) آمده است. امپدانس خطوط با توجه به مشخصات خط هوایی و زمینی محاسبه گردیده که در جدول (۶) بر حسب پریونیت ذکر شده است. ($S_{base}=1000kVA$ و $V_{base}=20kV$).



شکل (۳): دیاگرام ساده شده سیستم نمونه

نتیجه بخش بار شبکه شکل (۳) با روش ارائه شده در این مقاله در جدول (۳) آمده است. به منظور بررسی روش ارائه شده در مورد هارمونیک ها نیز، برنامه پخش بار هارمونیک مربوط به هارمونیک ۳ این شبکه نیز انجام گردید که نتایج آن در جدول (۴) آمده است. با توجه به اینکه منطق شماره گذاری در این پروژه و گزارش متفاوت می باشد، شماره گذاری باس ها و خطوط دوباره انجام گرفته است و جدول ماتریس مشخصه این مدار هم به دست می آید. با اجرای برنامه این گزارش و نتایج به دست آمده از الگوریتم در نرم افزار Matlab تفاوت اندازه های ولتاژ با اندازه های ولتاژ در پروژه در حد ۰/۰۰۶ و اختلاف زاویه ها در حد ۰/۰۲ درجه است که تقریب قابل قبولی است.

جدول (۱): اطلاعات خطوط شبکه شکل (۴)

شماره خط	R(ohm)	X(ohm)
۱۶ و ۴ و ۲	۰/۱۹۶	۰/۶۵۵
۲۲ و ۲۱	۰/۲۷۹	۰/۰۱۵
۲۴ و ۳۲ و ۳۰ و ۱۵ و ۲۳	۰/۴۴۴	۰/۴۳۹
۲۶ و ۳۸ و ۳۶ و ۳۴ و ۱۸ و ۱۲ و ۱۰ و ۷ و ۳	۰/۸۶۴	۰/۷۵۱
۲۸ و ۲۷ و ۲۵ و ۳۹ و ۴۰ و ۳۷ و ۳۵ و ۳۳ و ۳۱ و ۲۹ و ۲۰ و ۱۷ و ۱۹ و ۱۴ و ۱۳ و ۱۱ و ۱۰ و ۹ و ۵	۱/۳۷۴	۰/۷۷۴

جدول (۲): مقادیر بارهای شبکه شکل (۴)

$V_{base}=23k$, $S_{base}=15MVA$, Load factor=0.95			
شماره گره بار	توان راکتیو (p.u)	شماره گره بار	توان راکتیو (p.u)
۵	۰/۰۱۱۶	۳۱	۰/۰۱۲
۹	۰/۰۰۸	۳۳	۰/۰۱۴
۱۰	۰/۰۱۴	۳۵	۰/۰۱۷
۱۱	۰/۰۰۱	۳۷	۰/۰۱۲
۱۳	۰/۰۱۵	۴۰	۰/۰۱۵
۱۴	۰/۰۱۴	۳۹	۰/۰۱۱۶
۱۷	۰/۰۲۴	۲۵	۰/۰۱۹
۱۹	۰/۰۱۲	۲۷	۰/۰۱۲
۲۰	۰/۰۱۵	۲۸	۰/۰۱۶
۲۹	۰/۰۰۱	۲۳	۰/۰۰۴



جدول (۳): نتایج پخش بار مؤلفه اصلی شبکه توزیع شعاعی نمونه

مرتبۀ هارمونیک $h=1$				
شماره باس	ولتاژ (p.u)		توان (p.u)	
	دامنه	زاویه	راکتیو (Q)	اکتیو (P)
۱	۱	۰	۰	۰
۲	۰/۹۸۸۵	-۰/۹۰۱۴	۰	۰
۳	۰/۹۸۱۳	-۱/۰۷۴۳	۰	۰
۴	۰/۹۷۹۸	-۱/۵۹۹۶	۰	۰
۵	۰/۹۷۹۶	-۱/۰۹۳۶	۰/۰۱۱۶	۰/۰۳۵۳
۶	۰/۹۷۵۲	-۱/۲۲۱۶	۰	۰
۷	۰/۹۷۳۱	-۱/۲۷۵۲	۰	۰
۸	۰/۹۷۱۴	-۱/۳۱۶۸	۰	۰
۹	۰/۹۷۱۹	-۱/۲۸۸۷	۰/۰۰۸۰	۰/۰۲۴۳
۱۰	۰/۹۷۱۰	-۱/۲۹۸۸	۰/۰۱۴۰	۰/۰۴۲۶
۱۱	۰/۹۶۹۹	-۱/۳۳۳۷	۰/۰۱۰۰	۰/۰۳۰۴
۱۲	۰/۹۶۸۵	-۱/۳۸۸۰	۰	۰
۱۳	۰/۹۶۶۳	-۱/۴۱۳۶	۰/۰۱۵۰	۰/۰۴۵۶
۱۴	۰/۹۶۶۵	-۱/۴۱۱۸	۰/۰۱۴۰	۰/۰۴۲۶
۱۵	۰/۹۷۷۱	-۱/۶۷۶۹	۰	۰
۱۶	۰/۹۷۳۱	-۲/۱۵۱۸	۰	۰
۱۷	۰/۹۷۳۷	-۱/۷۱۷۱	۰/۰۲۴۰	۰/۰۷۳۰
۱۸	۰/۹۷۴۵	-۱/۷۴۲۴	۰	۰
۱۹	۰/۹۷۲۸	-۱/۷۶۲۶	۰/۰۱۲۰	۰/۰۳۶۵
۲۰	۰/۹۷۲۳	-۱/۷۶۷۶	۰/۰۱۵۰	۰/۰۴۵۶
۲۱	۰/۹۷۰۹	-۲/۱۱۶۵	۰	۰
۲۲	۰/۹۷۰۸	-۲/۱۱۳۶	۰	۰
۲۳	۰/۹۶۸۸	-۲/۱۷۸۱	۰/۰۴۰۰	۰/۱۲۱۷
۲۴	۰/۹۶۸۵	-۲/۱۸۹۰	۰	۰
۲۵	۰/۹۶۵۷	-۲/۲۲۱۴	۰/۰۱۹۰	۰/۰۵۷۸

ادامه جدول (۳): نتایج پخش بار مؤلفه اصلی شبکه توزیع شعاعی نمونه

مرتبه هارمونیک $h=1$				
شماره باس	ولتاژ (p.u)		توان (p.u)	
	دامنه	زاویه	راکتیو (Q)	اکتیو (P)
۲۶	۰/۹۶۵۷	-۲/۲۵۸۲	۰	۰
۲۷	۰/۹۶۳۹	-۲/۲۷۸۸	۰/۰۱۲۰	۰/۰۳۶۵
۲۸	۰/۹۶۳۳	-۲/۲۸۵۶	۰/۰۱۶۰	۰/۰۴۸۷
۲۹	۰/۹۶۹۳	-۲/۱۳۰۵	۰/۰۱۰۰	۰/۰۳۰۴
۳۰	۰/۹۶۶۴	-۲/۲۳۹۹	۰	۰
۳۱	۰/۹۶۴۷	-۲/۲۶۰۴	۰/۰۱۲۰	۰/۰۳۶۵
۳۲	۰/۹۶۲۷	-۲/۳۴۸۵	۰	۰
۳۳	۰/۹۶۰۷	-۲/۳۷۲۷	۰/۰۱۴۰	۰/۰۴۲۶
۳۴	۰/۹۵۷۱	-۲/۴۸۸۰	۰	۰
۳۵	۰/۹۵۴۶	-۲/۵۱۷۶	۰/۰۱۷۰	۰/۰۵۱۷
۳۶	۰/۹۵۳۲	-۲/۵۸۵۸	۰	۰
۳۷	۰/۹۵۱۴	-۲/۶۰۶۸	۰/۰۱۲۰	۰/۰۳۶۵
۳۸	۰/۹۵۰۵	-۲/۶۵۳۶	۰	۰
۳۹	۰/۹۴۸۸	-۲/۶۷۴۱	۰/۰۱۱۶	۰/۰۳۵۳
۴۰	۰/۹۴۸۳	-۲/۶۸۰۱	۰/۰۱۵۰	۰/۰۴۵۶



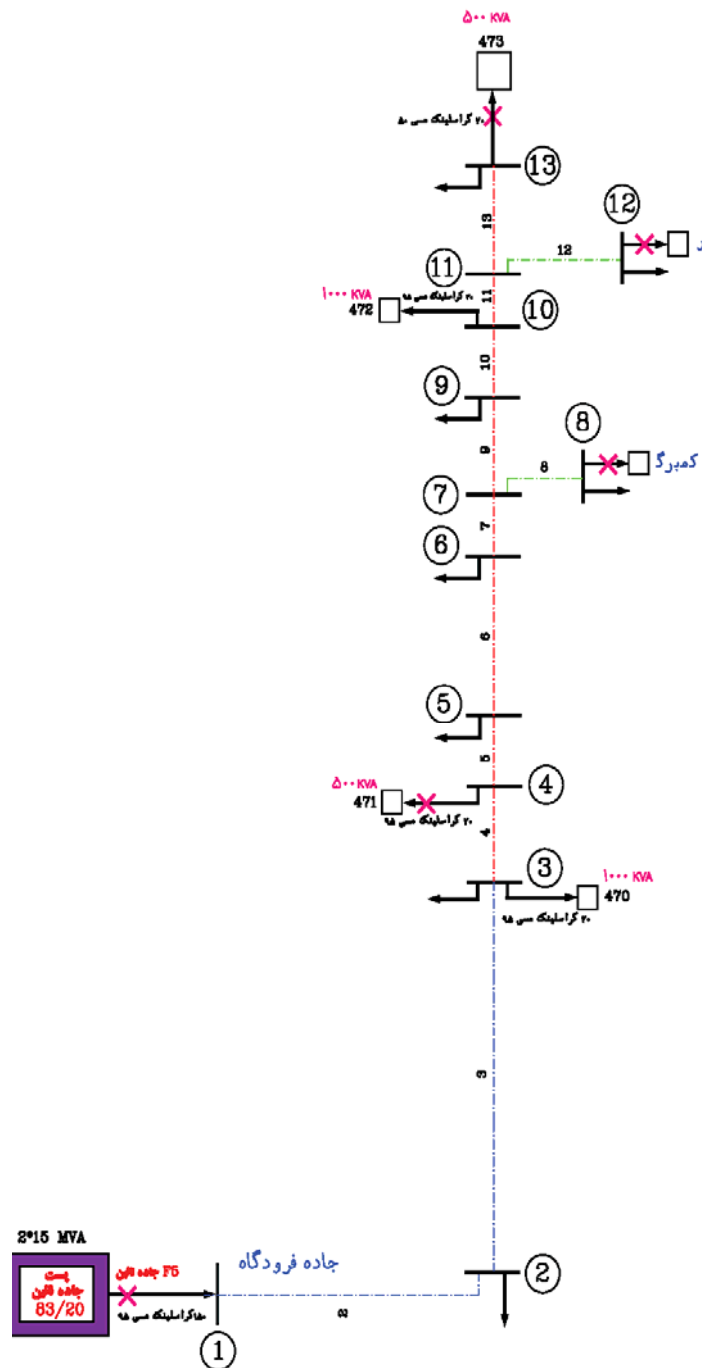
جدول (۴): نتایج پخش بار هارمونیک سوم شبکه توزیع شعاعی نمونه

مرتبه هارمونیک $h=3$				
شماره باس	ولتاژ (p.u)		توان (p.u)	
	دامنه	زاویه	راکتیو (Q)	اکتیو (P)
۱	۰/۰۳	۰	۰	۰
۲	۰/۰۲۹	-۱/۵۲۴۷	۰	۰
۳	۰/۰۲۸۷	-۱/۸۳۱۶	۰	۰
۴	۰/۰۲۸۳	-۲/۷۵۰۲	۰	۰
۵	۰/۰۲۸۶	-۱/۸۶۶۶	۰/۰۵۰۷	۰/۰۵۲۸
۶	۰/۰۲۸۴	-۲/۰۹۵۱	۰	۰
۷	۰/۰۲۸۳	-۲/۱۹۱۴	۰	۰
۸	۰/۰۲۸۲	-۲/۲۶۶۴	۰	۰
۹	۰/۰۲۸۳	-۲/۲۱۶۳	۰/۰۳۴۷	۰/۰۳۶۳
۱۰	۰/۰۲۸۲	-۲/۲۳۵	۰/۰۶۰۷	۰/۰۶۳۶
۱۱	۰/۰۲۸۲	-۲/۲۹۷۷	۰/۰۴۳۳	۰/۰۴۵۴
۱۲	۰/۰۲۸۱	-۲/۳۹۵۲	۰	۰
۱۳	۰/۰۲۸	-۲/۴۴۲۸	۰/۰۶۴۷	۰/۰۶۸۰
۱۴	۰/۰۲۸	-۲/۴۳۹۶	۰/۰۶۰۴	۰/۰۶۳۵
۱۵	۰/۰۲۸۱	-۲/۸۹۱۳	۰	۰
۱۶	۰/۰۲۷۷	-۳/۷۴۸۴	۰	۰
۱۷	۰/۰۲۸	-۲/۹۶۷۷	۰/۱۰۲۴	۰/۱۰۸۵
۱۸	۰/۰۲۸	-۳/۰۱۲	۰	۰
۱۹	۰/۰۲۸	-۳/۰۵۰۵	۰/۰۵۱۱	۰/۰۵۴۲
۲۰	۰/۰۲۷۹	-۳/۰۶۰۱	۰/۰۶۳۹	۰/۰۶۷۸
۲۱	۰/۰۲۷۷	-۳/۶۸۸۴	۰	۰
۲۲	۰/۰۲۷۷	-۳/۶۸۴۱	۰	۰
۲۳	۰/۰۲۷۶	-۳/۸۰۳۸	۰/۱۶۷۵	۰/۱۷۹۸
۲۴	۰/۰۲۷۵	-۳/۸۲۴۴	۰	۰
۲۵	۰/۰۲۷۴	-۳/۸۸۸۳	۰/۰۷۹۴	۰/۰۸۵۴

ادامه جدول (۴): نتایج پخش بار هارمونیک سوم شبکه توزیع شعاعی نمونه

مرتبه هارمونیک $h=3$				
شماره باس	ولتاژ (p.u)		توان (p.u)	
	دامنه	زاویه	راکتیو (Q)	اکتیو (P)
۲۶	۰/۰۲۷۴	-۳/۹۵۵۴	۰	۰
۲۷	۰/۰۲۷۳	-۳/۹۹۶۱	۰/۰۵۰۰	۰/۰۵۳۹
۲۸	۰/۰۲۷۳	-۴/۰۰۹۸	۰/۰۶۶۷	۰/۰۷۱۸
۲۹	۰/۰۲۷۶	-۳/۷۱۷۳	۰/۰۴۲۰	۰/۰۴۵۰
۳۰	۰/۰۲۷۴	-۳/۹۲۱۴	۰	۰
۳۱	۰/۰۲۷۴	-۳/۹۶۲۰	۰/۰۵۰۱	۰/۰۵۳۹
۳۲	۰/۰۲۷۳	-۴/۱۲۶۸	۰	۰
۳۳	۰/۰۲۷۲	-۴/۱۷۴۹	۰/۰۵۸۱	۰/۰۶۲۸
۳۴	۰/۰۲۷	-۴/۳۹۴۱	۰	۰
۳۵	۰/۰۲۶۹	-۴/۴۵۴۰	۰/۰۷۰۲	۰/۰۷۶۱
۳۶	۰/۰۲۶۸	-۴/۵۸۲۷	۰	۰
۳۷	۰/۰۲۶۸	-۴/۶۲۵۷	۰/۰۴۹۳	۰/۰۵۳۷
۳۸	۰/۰۲۶۷	-۴/۷۱۴۳	۰	۰
۳۹	۰/۰۲۶۶	-۴/۷۵۶۲	۰/۰۴۷۵	۰/۰۵۱۹
۴۰	۰/۰۲۶۶	-۴/۷۶۸۵	۰/۰۶۱۵	۰/۰۶۷۰





شکل (۴) دیاگرام تک خطی ساده شده شبکه توزیع نائین از شهرستان اصفهان

جدول (۵): امپدانس بار باس های شبکه

Bus No.	Impedance (p.u)
1	inf
2	24.754-66.667j
3	6.219+2.748j
4	Inf
5	10.239-2.254j
6	43.632-58.226j
7	Inf
8	11.592-0.426j
9	27.295-13.44j
10	5.449+4.878j
11	Inf
12	49.087-52.521j
13	18.877-55.746j

متصل به باس مورد محاسبه قرار گرفته و در جداول ذکر شده، آمده است.

همانطور که از نتایج جدول (۸) مشاهده می شود مقادیر مربوط به ولتاژ و توان های اکتیو و راکتیو اندازه گیری شده، تخمین زده شده و محاسبه شده از طریق برنامه پخش بار در اکثر موارد یکسان بوده و در موارد اندکی نیز اختلاف بسیار کم و قابل صرفنظری با یکدیگر دارند که از این رو صحت الگوریتم تخمین تأیید می شود.

۵-۱-۲- پخش بار مؤلفه های هارمونیکی

با توجه به اطلاعات و اندازه گیری های موجود و احتمال وجود بیشترین منبع تولید توان هارمونیکی در باس شماره ۱۳، این باس به عنوان باس مرجع در نظر گرفته می شود. در ابتدا با استفاده از جداول (۵) و (۶) مقادیر امپدانس های شبکه (بارها و شاخه ها) را برای هارمونیک های ۳ و ۵ محاسبه می کنیم. اندازه گیری های صورت گرفته در برخی از باس ها در تاریخ ۸۵/۰۹/۰۱ در ساعت ۱۰:۰۰ برای مؤلفه های ۳ و ۵ هارمونیکی در جدول (۹) ذکر شده است.

نتایج برنامه تخمین برای هارمونیک سوم و پنجم در فاز a در جداول (۹) تا (۱۲) آمده است.

با مقایسه نتایج به دست آمده با مقادیر اندازه گیری شده که در جداول فوق آمده است، بخصوص در مورد باس چهارم که به منظور تست برنامه انتخاب شده است صحت روش و نتایج تخمین و همگرایی الگوریتم تأیید می گردد.

در باس های ۸، ۱۲ و ۱۳ با استفاده از رابطه (۱۶) می توان توان محاسباتی مکان های اندازه گیری را به دست آورد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشی کارآمد و با قابلیت بالا به منظور پیاده سازی در شبکه های توزیع شعاعی واقعی جهت تخمین حالت مؤلفه اصلی و هارمونیکی ارائه گردید. از مهمترین مزیت های این روش می توان به قابلیت تشخیص داده های نادرست و پردازش صحیح آنها و قابلیت بکارگیری آن در مبحث تخمین حالت هارمونیکی در سیستم های شعاعی واقعی و عملی اشاره نمود. تست الگوریتم تخمین حالت پیشنهادی بر داده های سیستم نمونه و همچنین قسمتی از شبکه توزیع شهرستان اصفهان، قابلیت و صحت عملکرد این روش هم برای مؤلفه اصلی فرکانس و هم مؤلفه های هارمونیکی تایید گردید.

جدول (۶): امپدانس شاخه های شبکه

Branch No.	Impedance (p.u)
2	0.0007+0.0009j
3	0.0001+0.0002j
4	0.0001+0.0001j
5	0.00001+0.0001j
6	0.0001+0.00001j
7	0.00001+0.00001j
8	0.0002+0.0001j
9	0.0001+0.0001j
10	0.0001+0.0001j
11	0.00001+0.00001j
12	0.0003+0.0001j
13	0.0002+0.0001j

همانطور که می دانیم میزان بار مصرفی و طبعاً ولتاژ باس ها در شبکه توزیع در ساعات مختلف شبانه روز در حال تغییر است به این دلیل در این مقاله از مقادیر اندازه گیری شده در ساعت ۱۰:۰۰ روز ۸۵/۰۹/۰۱ برای تخمین استفاده شده است. این مقادیر در جدول (۷) ذکر شده است. نتایج به دست آمده در برنامه تخمین ولتاژها برای فاز a در جدول (۷) آمده است. نتایج پخش بار مؤلفه اصلی برای فازهای b و c مشابه فاز a بودند. لازم بذکر است که باس های متناظر با نقاط اندازه گیری شده با علامت ستاره مشخص می باشد.

در باس های ۸، ۱۲ و ۱۳ با استفاده از رابطه زیر می توان توان محاسباتی مکان های اندازه گیری را به دست آورد.

$$P_{\text{ولتاژ باس متناظر}} = \frac{P_{\text{توان باس متناظر}}}{\text{امپدانس بار باس متناظر}} - \frac{P_{\text{توان باس متناظر}}}{\text{امپدانس بار باس متناظر}} \quad (16)$$

قابل توجه است که در این مقاله، منظور از مکان های اندازه گیری، محل هایی هستند که دقیقاً دستگاه در آنجا نصب شده است. در مورد باس های ۸، ۱۲ و ۱۳ علاوه بر مکان های اندازه گیری، بارهای دیگری نیز وجود دارند که از این باس ها تغذیه شده و لذا در مورد توان های اکتیو و راکتیو در جداول (۸)، (۹)، (۱۱) و (۱۲) مجموع توان های

جدول (۷): مقادیر اندازه گیری شده برای مؤلفه اصلی (مورخ ۸۵/۰۹/۰۱ ساعت ۱۰:۰۰)

شماره مکان اندازه گیری	مقادیر اندازه گیری شده فاز a (p.u)		
	V1	P1	Q1
۱	۱/۰۲۲	۰/۷۱	۰/۰۴۶۶
۲	۱/۰۲۲	۰/۰۸۵	-۰/۰۰۸۲
۳	۱/۰۲	۰/۰۰۰۶	-۰/۰۴۴
۴	۱/۰۲۱	۰/۰۵	۰/۰۰۹۷
۵	۱/۰۱۷	۰/۰۸۴	۰/۰۲۵

جدول (۸): مقایسه مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر محاسبه شده برای مکان های اندازه گیری (مؤلفه اصلی فاز a)

شماره مکان اندازه گیری	مقدار اندازه گیری شده (p.u)			مقدار محاسبه شده در برنامه تخمین (p.u)			مقدار محاسبه شده در برنامه پخش بار (p.u)		
	V	P	Q	V	P	Q	V	P	Q
۱	۱/۰۲۲	۰/۷۱	۰/۰۴۶۶	۱/۰۲۲۰	۰/۷۱۳۱	۰/۰۴۷۲	۱/۰۲۲۰	۰/۷۱۳۲	۰/۰۴۷۱
۲	۱/۰۲۲	۰/۰۸۵	-۰/۰۰۸۲	۱/۰۲۱۱	۰/۰۸۵	-۰/۰۰۸۲	۱/۰۲۱۳	۰/۰۸۵۰	-۰/۰۰۰۸
۳	۱/۰۲	۰/۰۰۰۶	-۰/۰۴۴	۱/۰۲۱۱	۰/۰۰۰۶	-۰/۰۴۴	۱/۰۲۱۲	۰/۰۰۰۶	-۰/۰۴۴
۴	۱/۰۲۱	۰/۰۵	۰/۰۰۹۷	۱/۰۲۱۰	۰/۰۵	۰/۰۰۹۷	۱/۰۲۱۱	۰/۰۵۰	۰/۰۰۹۷
۵	۱/۰۱۷	۰/۰۸۴	۰/۰۲۵	۱/۰۲۱۰	۰/۰۸۴	۰/۰۲۵	۱/۰۲۱۱	۰/۰۸۴	۰/۰۲۵

جدول (۹): مقادیر اندازه گیری شده برای مؤلفه ۳ و ۵ هارمونیک (مورخ ۸۵/۰۹/۰۱ ساعت ۱۰:۰۰)

شماره باس	مقادیر اندازه گیری شده فاز a (p.u)					
	V3	V5	P3	P5	Q3	Q5
۱	-	-	-	-	-	-
۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۳	-۰/۹e-۲	۰	۰/۰۰۸	۵/۳e-۵
۸	۰/۰۰۱۴	۰/۰۱	۷/۳e-۵	۰	-۷/۴e-۵	۰
۱۲	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۶	۰/۰۰۱e-۲	۰	۱/۸e-۵	۰
۱۳	۰/۰۰۳۷	۰/۰۳۳	-۱/۲e-۵	۰	۲/۳e-۵	۰

جدول (۱۰): نتایج تخمین هارمونیک سوم فاز a بر اساس مقادیر اندازه گیری شده

مرتبه هارمونیک h=3				
شماره باس	ولتاژ (p.u)		مجموع توان بار متصل به هر باس (p.u)	
	دامنه	زاویه	راکتیو (Q)	اکتیو (P)
۱	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۸۳	۰	۰
۲	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۸۳	-۰/۰۰۰۰۰۰۶۷	۰/۰۰۰۰۰۰۰۸۳
۳	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۰۰۰۰۰۱۰۵	۰/۰۰۰۰۰۰۷۹۷
۴*	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۸	-۰/۰۰۰۹
۵	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۶۹	-۰/۰۰۰۰۰۰۶۱	۰/۰۰۰۰۰۰۹۳
۶	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۷۲	-۰/۰۰۰۰۰۰۷۳	۰/۰۰۰۰۰۰۱۸
۷	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۷	۰	۰
۸*	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۰۰۰۰۷۲۷	۰/۰۰۰۰۰۰۸۴۶
۹	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۴۷	-۰/۰۰۰۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۰۰۰۱۵
۱۰	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۰۰۰۸۲۱	۰/۰۰۰۰۰۰۳۰۵
۱۱	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۱۸	۰	۰
۱۲*	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰۰۱۷۲	۰/۰۰۰۰۰۰۵۰۲
۱۳*	۰/۰۰۳۷	-۰/۰۰۰۰۱۹	-۰/۰۰۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۰۰۰۹



جدول (۱۱): نتایج تخمین هارمونیک پنجم فاز a بر اساس مقادیر اندازه گیری شده

برقیه هارمونیک $k=5$				
شماره	ولتاژ (p.u)		مجموع توان بار متصل به هر بار (p.u)	
	دولت	زولت	راکتیو (Q)	انکتیو (P)
۱	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	۰	۰
۲	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳
۳	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳
۴	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳	۰
۵	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳
۶	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳
۷	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	۰	۰
۸	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳
۹	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳
۱۰	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳
۱۱	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	۰	۰
۱۲	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳
۱۳	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳۳

جدول (۱۲): مقایسه مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر محاسبه شده برای مکان های اندازه گیری (هارمونیک های ۳ و ۵ فاز a)

اندازه مکان	هارمونیک شماره	مقدار محاسبه شده در برنامه بخش بار (p.u)			مقدار محاسبه شده در برنامه تخمین (p.u)			مقدار اندازه گیری شده (p.u)		
		V	P	Q	V	P	Q	V	P	Q
۲	۳	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳۳	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۸
	۵	۰/۰۰۳۲۹	۰	۵/۲۹×e-۵	۰/۰۰۳۲۹	۰	۵/۲۹×e-۵	۰/۰۰۳	۰	۵/۳×e-۵
۳	۳	۰/۰۰۳۶	۷/۳×e-۵	-۷/۴×e-۵	۰/۰۰۳۶	۷/۳×e-۵	-۷/۴×e-۵	۰/۰۰۱۴	۷/۳×e-۵	-۷/۴×e-۵
	۵	۰/۰۰۳۲۹	۰	۰	۰/۰۰۳۲۹	۰	۰	۰/۰۰۱	۰	۰
۴	۳	۰/۰۰۳۶	e-۵	۱/۸×e-۵	۰/۰۰۳۶	e-۵	۱/۸×e-۵	۰/۰۰۲۵	e-۵	۱/۸×e-۵
	۵	۰/۰۰۳۲۹	۰	۸/۴×e-۲۲	۰/۰۰۳۲۹	۰	۰	۰/۰۰۱۶	۰	۰
۵	۳	۰/۰۰۳۷	-۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۳۷	-۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳۷	-۱/۲×e-۵	۲/۳×e-۵
	۵	۰/۰۰۳۳	۱/۸۵×e-۳	۱/۵۲×e-۴	۰/۰۰۳۳	۱/۸۵×e-۳	۱/۵۲×e-۴	۰/۰۰۳۳	۰	۰

- [11] M. Najjar, G. T. Heydt, "A Hybrid Nonlinear-Least Squares Estimation of Harmonic Signal Levels in Power Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, pp. 282-288, Jan. 1991.
- [12] Merut E. Baran and Arthur W. Kelly, "State Estimation for Real-time Monitoring of Distribution Systems", IEEE Trans. Vol. 9, No. 3, pp 1601-1609, Aug. 1994.
- [13] C. N. Lu, J. H. Teng and W. H. E. Liu, "Distribution System State Estimation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 1, pp 229-240, Feb. 1995.
- [14] Ke Li, "State Estimation for Power Distribution System and Measurement Impact", IEEE Trans. Vol. 11, No. 2, pp 911-916, May 1996.
- [15] A. P. Sakis Meliopoulos and Fan Zhang, "Multiphase Power Flow and State Estimation for Power Distribution Systems", IEEE Trans. Vol. 11, No. 2, pp 939-946, May 1996.
- [۱۶] دکتر علی اکبر گلکار، مسعود، "طراحی و بهره برداری از سیستم های توزیع انرژی الکتریکی"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۰.
- [17] D. Thukaram, Jovitha Jerome and H. M. Wijekoon Banda, "A Robust Three Phase Power Flow Algorithm for Radial Distribution Systems", Electric Power Systems Research, Vol. 50, No. 3, pp 227-236, June 1999.
- [18] W.Xu, Y.Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, April 2000.
- [19] Jovitha Jerome, "Network Observability and Bad Data Processing Algorithm for Distribution Networks", IEEE Conference 2001.
- [۲۰] علیرضا جلیلیان، امیر اصلانی، "مقایسه مدل های بار در محیط های هارمونیک و شبیه سازی بر روی شبکه الکتریکی یک واحد صنعتی"، مجله انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران، سال اول، شماره اول، بهار ۱۳۸۳
- [1] F. C. Schweppe, J. wildes, "Power System Static State Estimation, Part I: Exact Model", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 1, pp. 120-125. Jan. 1970.
- [2] F. C. Schweppe, D. B. Rom, "Power System Static State Estimation, Part II: Approximate Model", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 1, pp. 125-130, Jan. 1970.
- [3] R. E. Larson, W. F. Tinney, J. Peschon, "State Estimation in Power Systems, Part I: Theory and Feasibility". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 3, pp 345-352, March 1970.
- [4] F. C. Scheueppe, "Power System Static State Estimation, Part III: Implementation", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 1, pp. 130-135, Jan. 1970.
- [5] O. J. M. Smith, "Power System Static State Estimation", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 3, pp. 363-379, March 1970.
- [6] R. E. Larson, W. F. Tinney, L. P. Hajdu, D. S. Piercy, "State Estimation in Power Systems, Part II: Implementation and Applications", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 3, pp. 353-362, March 1970.
- [7] E. Handschin, F. C. Scheueppe, J. Kohlas, A. Fiechter, "Bad Data Analysis for Power System State Estimation", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, No. 2, pp. 329-337, March/April 1975.
- [8] G. R. Krumpholz, K. A. Clements, P. W. Davis, "Power System Observability: A Partical Algorithm Using Network Topology", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1534-1542, July/Aug. 1980.
- [9] J. Arrillaga, D. B. Bradley, P. S. Bodger, Power System Harmonics, John Wiley & Sons, 1985.
- [10] G. T. Heydt, "Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 569-575, Jan. 1989.

