تخمین حالت شبکه توزیع با هدف شناسایی تلفات غیرفنی در بستر شبکه‌های حسگر بی‌سیم

علیرضامحمدعلیزاده‌درخشی/دانشجوی‌کارشناس‌ارشد/Alizadeh.mci@gmail.com

محمدابراهیم حاجی‌آبادی/ استادیار و عضو هیئت علمی دانشکده برق و کامپیوتر/ دانشگاه حکیم سبزواری/ me.hajiabadi@hsu.ac.ir

چکیده

در این مقاله سیستم نظارتی جدیدی در سامانه مدیریت انرژی در شبکه توزیع ارایه می‌گردد. در این روش شبکه حسگر بی‌سیم به اندازه‌گیری ولتاژها و جریان‌های خطوط شبکه توزیع می‌پردازد. در گام اول به ارایه روش مناسب تخمین حالت در شبکه توزیع، مبتنی بر اندازه‌گیری فازی پرداخته می‌شود تا میزان خطاهای اندازه‌گیری به حداقل ممکن برسد. در گام دوم به مکانیابی محل نصب شبکه حسگر بیسیم جهت رویت‌پذیری شبکه توزیع و نظارت مستمر بر توان مصرفی باس‌ها پرداخته می‌شود. در گام سوم روش جدیدی ارایه می‌گردد که در هنگام از دست رفتن رویت پذیری ناحیه‌ای از شبکه به اصلاح مقادیر آن ناحیه اقدام می‌شود. در گام چهارم به شناسایی انرژی مصرفی شبکه و شناسایی تلفات غیرفنی شبکه پرداخته می‌شود. همچنین تمامی موارد فوق روی شبکه ۳۳ باسه IEEE شبیه‌سازی خواهد شد.

کلمات کلیدی: تخمین حالت، شبکه حسگربی‌سیم، تلفات غیرفنی

۱.مقدمه

۱-۱ انگیزه تحقیق

در شبکه توزیع همیشه، همه مقادیر قابل اندازه‌گیری، مانند ولتاژ، جریان و توان به دلایلی همچون فقدان مقادیر همه باس‌ها و خطوط، خرابی بعضی از تجهیزات در دسترس نمی‌باشد. از این‌رو استفاده از تخمین حالت امری اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی بالابودن تلفات غیرفنی و سرقت الکتریکی در شبکه توزیع، توجه ویژه‌ای را برای نظارت بر چنین شبکه‌هایی می‌طلبد.

با توجه به نبود اطلاعات جامع و لحظه‌ای از مقادیر باس‌های شبکه توزیع، به دلیل کمبود دستگاه‌های اندازه‌گیری واحد مدیریت با چالش مشاهده‌ناپذیری شبکه مواجه می‌باشد که با استفاده از تخمین حالت توزیع، واحد مدیریت می‌تواند افت توان تئوری، بهینه‌سازی ولتاژ یا توان، بازسازی شبکه راهنما و جلوگیری از اضافه بار خطوط توزیع و غیره را محاسبه نمایند. بنابراین مدیریت شبکه، با کمک از روش‌های تخمین حالت و بکارگیری آن در اتوماسیون شبکه توزیع، قابلیت نظارت، کنترل و پخش بار اقتصادی سیستم توزیع را بهبود می‌بخشد که در نهایت منتج به بهبود کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم توزیع می‌شود.

۱-۲ مروری بر ادبیات موضوع

تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با تخمین حالت در سیستم‌های قدرت انجام شده است.که در ادامه به بررسی چند مورد از آن‌ها می‌پردازیم. تخمین حالت معمولا به دو روش تقسیم می‌شود. روش اول، روش‌های آماری است که در مرجع‌های [۱] تا [۳] و فرمول‌بندی تخمین حالت درمرجع‌ها [۴] تا [۶] انجام شده است. روش‌های غالب معمولا از روش‌های همگرایی تکراری مانند روش‌های شبه‌نیوتنی استفاده می‌کند. روش دوم روش‌های آنالیز حساسیت می‌باشد. در هردو روش فرض می‌شود که تابع هدف یا معادلات مرتبط با تخمین حالت توزیع، می‌تواند پیوسته و دیفرانسیلی باشد اما با توجه به مشخصات غیرخطی ادوات شبکه توزیع، تابع هدف نمی‌تواند پیوسته

و دیفرانسیلی باشد [۷]. این مسأله اعمال روش‌های سنتی را به مسأله تخمین حالت سیستم توزیع مشکل کرده است. [۷] به ارایه روشی مبتنی بر بهینه‌سازی اجتماع ذرات پرداخته است تا بتواند مشکل حضور اجزای غیرخطی سیستم توزیع را مرتفع نماید.
در مرجع [۸] به بررسی در سیستم‌های مدیریت توزیع به عنوان عملکرد پیشرفت‌های که مبتنی بر، اطلاعات صحیح و سیگنال‌های ارتباطی سریع هستند پرداخته شده است. در آن به ارزیابی طراحی صحیح DMS با در نظرگرفتن اثرات عدم قطعیت در تخمین حالت و تأخیرات سیستم مخابراتی پرداخته شده است که در این مقاله با استفاده از یک بسته نرم‌افزاری شبیه‌ساز سایبر فیزیکی، به بررسی شبکه روستایی در ایتالیا پرداخته شده است که در آن به بررسی اثرات سیستم ارتباطی بیسیم Wi-Maxبه عنوان ابزار سیستم مدیریت شبکه استفاده شده است. طی این پروژه تحقیقاتی مشخص شده است که Wi-Max دارای تأخیرات زمانی قابل توجه در ارتباط بین مرکز کنترل و منابع انرژی توزیع می‌باشد و حتی در برخی از روزهای بارانی ،کل ارتباط از دست رفته است که با ارایه شبیه‌ساز سایبر فیزیکی می‌توان به مقابله با این اثرات پرداخت.
در مرجع [۹] با توجه به اطلاعات گذشته بار، ابزار موجود به پیش‌بینی بار در فیدر می‌پردازد که در اینجا از طریق توسعه روش تخمین حالت به پیش‌بینی فیدر سه فاز پرداخته شده است. که در آن از روش حداقل مربعات وزندار به تخمین حالت می‌پردازد. در مرجع [۱۰] یک الگوریتم تخمین حالت برای یک سیستم توزیع سه فاز ارایه شده است که از روش معادله نرمال برای محاسبه وضعیت زمان واقعی سیستم‌های توزیع ، استفاده شده است که بر مبنای سه فاز واقعی A,B,C عمل می‌کند. در مرجع [۱۱] به بررسی شبکه حسگر بیسیم در شبکه هوشمند پرداخته شده است. در [۱۲] به ارایه یک فرمول جدید تخمین حالت برای یک فیدر، با استفاده از ماتریس شبه متقارن امپدانس پرداخته شده است که در بردارنده ساختار شبکه می‌باشد. به‌عنوان نتیجه این مقاله، اندازه مساله بهینه شده به‌طور قابل‌توجهی کم شده است اما مشکل عمده این مقاله استفاده از روابط غیرخطی جهت تخمین حالت می‌باشد.
در [۱۳] یک چهارچوب برای مدیریت کل شبکه توزیع انرژی از ولتاژ متوسط به ولتاژ پائین، از جمله صدور صورتحساب در مراکز تحویل، تلفات توان، محاسبه و طرح پیشنهادی برای حل با استفاده از یک مدل تصمیم‌گیری فازی ارایه شده است. در[۱۴] بر اساس شبکه عصبی با استفاده از دانش کشف در فرایند پایگاه داده به بررسی یک آزمایش در شبکه برق برزیل اشاره شده است که باعث بهبود ۵۰درصدی، در کشف موارد تلفات غیر فنی منجر شده است. در [۱۵] به ارایه اصول اولیه شبکه حسگر بیسیم از جمله ویژگی‌های گره‌های این شبکه اشاره شده است.

۱-۳ هدف، روش، نوآوری

برای مدیریت شبکه توزیع لازم است اطلاعاتی از شبکه در دسترس باشد، طبیعتا اطلاعات توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری که در نقاطی از شبکه نصب شده‌اند جمع‌آوری می‌گردد. یکی از چالش‌های اساسی در شبکه توزیع نحوه ارسال اطلاعات اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل می‌باشد. با توجه به ساختار شبکه توزیع عملا ارسال اطلاعات به صورت مستقیم امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا بایستی ساختار و بستری مناسب و قابل اطمینان جهت ارسال اطلاعات به مرکز کنترل محیا نمود.
یکی دیگر از چالش‌ها اساسی در این حوزه تعداد پست‌ها می‌باشد، به عبارتی جهت مدیریت شبکه لازم است اطلاعات هر پست در اختیار باشد که مستلزم نصب و راه‌اندازی دستگاه اندازه‌گیر در آن پست است که هزینه سنگینی را به شبکه تحمیل می‌کند. ثانیا حجم بالای اطلاعات بایستی به مرکز کنترل ارسال گردد که نیاز به زیر ساخت مناسب دارد. ثالثا در صورت بروز مشکل در هر اندازه‌گیر و یا قطع ارتباط، اطلاعات آن پست به مرکز ارسال نمی‌گردد و تصمیم‌گیری را مشکل می‌کند.
پس از دریافت اطلاعات از شبکه ممکن است دستگاه‌های اندازه‌گیر مقادیر را با خطا اندازه‌گیری کرده و به مرکز ارسال نمایند لذا اگر این اندازه‌گیری تصحیح نشود و از طرفی افزایش این خطاها در پست‌های مختلف تصمیم‌گیری در مورد شبکه را دچار خطا می‌کند. نیاز است اطلاعات در مرکز کنترل پالایش شوند و هرگونه خطای آن‌ها تصحیح شود و بنا به کاربرد مورد استفاده قرار گیرند برای مثال می‌توان با استفاده از آن‌ها انرژی مصرفی را رویت‌پذیر نمود بطوریکه میزان انرژی دریافتی از پست فوق توزیع، میزان انرژی تلف شده در شبکه و میزان انرژی مصرفی غیر فنی (مشترکین غیر مجاز) را شناسایی و محاسبه کنیم.
از نوآوری‌های ما در این مقاله می‌توان به استفاده از شبکه حسگر بیسیم در شبکه توزیع به دلیل در دسترس بودن گسترده این نوع حسگرها و قابلیت اطمینان بالای آن‌ها اشاره نمود. از طرفی ارایه یک تخمینگر قدرتمند خطی سازگار با شبکه حسگر بیسیم ارایه شده است و همچنین ارایه روش جدیدی در محاسبات تخمین حالت در شرایطی که رویت‌پذیری ناحیه‌ای از شبکه به دلایل مختلف از دست رفته است مورد نظر این مقاله می‌باشد.

۱-۴ ساختار پژوهش

در بخش دوم مروری بر مفاهیم شبکه‌های حسگر بی‌سیم و رویت‌پذیری کردن شبکه را با استفاده از آن مورد بررسی قرار خواهیم داد. در بخش سوم مفاهیم و روابط تخمین حالت خطی سازگار با شبکه حسگر بی‌سیم را ارایه می‌دهیم. در بخش چهارم به چگونگی مشاهده‌پذیرکردن شبکه در زمانی که قسمتی از شبکه رویت‌پذیری خود را از دست داده است می‌پردازیم. در بخش پنجم به رویت‌پذیری انرژی شبکه توزیع پرداخته می‌شود و در بخش ششم به شناسایی تلفات فنی و غیرفنی شبکه پرداخته می‌شود و در بخش هفتم به ارایه مثالی برای مطالب گفته شده خواهیم پرداخت.

۲. سامانه نظارت شبکه توزیع

جهت مدیریت و کنترل شبکه بایستی اطلاعات به مرکز ارسال گردد. استفاده از سنسورهای بیسیم معمول با مشکلات متعددی روبرو است. با توجه به ساختار شبکه توزیع لازم است اطلاعات هر پست و یا خط توسط مسیر ارتباطی مجزا با سرور در ارتباط باشد که طبیعتا تعداد این مسیرها بسیار زیاد است و باعث ایجاد مشکلاتی در اجرا می‌گردد همچنین اگر ارتباط یک سنسور با مرکز قطع گردد اطلاعات آن بخش از شبکه در دسترس نیست و می‌توان این‌گونه برداشت کرد که آن قسمت رویت‌پذیر نمی‌باشد.

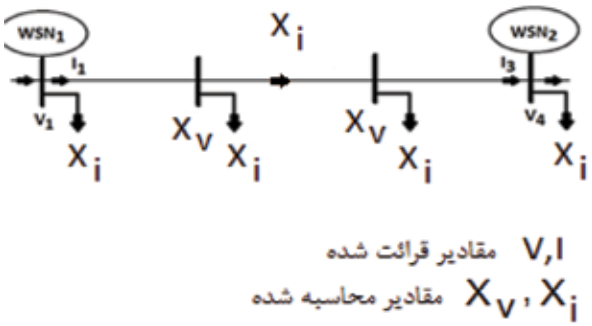
۲-۱ شبکه حسگر بی‌سیم

شبکه‌های حسگر بی‌سیم از هزاران حسگر هوشمند کوچک ارزان قیمت تشکیل شده است. این حسگرها قادر به انجام محاسبات، پردازش و ارتباط با یکدیگر هستند. علت استفاده از آنها در این مقاله قابلیت ارتباط چند سویه هر یک از این سنسورها می‌باشد یعنی

هر سنسور می‌تواند اطلاعات خود و سایر سنسورهای مجاور خود را از چند مسیر مختلف به مرکز کنترل ارسال کند به گونه‌ای که در صورت قطع هر یک از مسیرهای ارتباطی، سنسور قادر باشد تا مسیر جدیدی را برای انتقال اطلاعات در اختیار داشته باشد. شبکه‌های حسگر بیسیم دارای کاربردهای مختلفی در زمینه‌های صنعت، حمل و نقل، امنیت، پزشکی، مدیریت بحران و غیره را دارا می‌باشند. می‌توان گفت این شبکه‌ها به صورت پلی بین فضای مجازی و فیزیکی عمل می‌کند و امکان مشاهده عناصری که قبلا غیر قابل مشاهده بودند را در طیف بزرگ و باکیفیت مطلوب را فراهم می‌کنند [۱۵].
ازجمله مزایای این سیستم می‌توان به صرفه جویی انرژی، پاسخ دهی مناسب، پایداری، انطباق و بروزسانی خودکار اشاره کرد. این حسگرها از شش بخش اصلی تشکیل شده‌اند که عبارتند از: واحد پردازش، حافظه جهت ذخیره اطلاعات، منبع تغذیه، رادیو ماژول که انتقال و دریافت اطلاعات را انجام می‌دهد، آنتن و سنسور که اندازه‌گیری را انجام می‌دهد.

۲-۲ رویت پذیری شبکه توزیع با استفاده از شبکه حسگر بی‌سیم

با توجه به ماهیت و کاربرد شبکه توزیع، این شبکه به صورت شعاعی بهره برداری می‌گردید یا به عبارتی دیگر خروجی پست فوق‌توزیع به‌عنوان باس مبنی لحاظ می‌گردید و به‌صورت شعاعی شبکه گسترش می‌یابد. در شبکه توزیع جهت کاهش خاموشی و یا در مواقع اضطراری اقدام به تغییر آرایش شبکه (مانور) می‌کنند که این عمل توسط تغییر وضعیت کلیدها در نقاط خاص شبکه صورت می‌پذیرد. در نهایت آرایش شبکه توزیع به صورت شعاعی باقی خواهد ماند.
هدف ما در شبکه توزیع اندازه‌گیری پارامترهای کلیه پست‌های توزیع می‌باشد، برای رسیدن به این هدف با صرف کمترین هزینه و بالاترین راندمان اقدام به شناسایی نقاط خاصی از شبکه می‌کنیم. با دارا بودن اطلاعات این نقاط می‌توان با بکارگیری روابط مداری کلیه شبکه را رویت‌پذیر نمود.
مشاهده‌پذیری در شبکه توزیع جهت تخمین حالت بسیار مهم می‌باشد و برای رسیدن به نتیجه مطلوب لازم است تعداد اندازه‌گیری‌ها از تعداد مجهولات مساله بیشتر باشد. از این‌رو در این بخش به ارایه روشی جهت مشاهده‌پذیرکردن شبکه با استفاده از واحد اندازه‌گیری WSN می‌پردازیم. با فرض اینکه هر واحد WSN قادر به اندازه‌گیری ولتاژ باس و جریان شاخه‌های متصل به آن باشد به ارایه مثالی جهت محاسبه ولتاژ و جریان گره‌ها و شاخه‌های مجاور آن‌ها در شکل (۱) می‌پردازیم.



شکل (۱): مکان یابی WSN

با نصب سنسور حسگر بی‌سیم در هر باس اطلاعات زیر به مرکز ارسال می‌گردید:

- ولتاژ باس
- جریان ورودی به باس
- جریان خروجی از باس
- انرژی مصرفی باس

با استفاده از اطلاعات فوق می‌توان کل شبکه را با حداقل اندازه‌گیر رویت‌پذیر نمود. همان‌طورکه در شبکه شعاعی شکل (۱) به‌جای نصب سنسور در هر باس تنها با نصب دو عدد سنسور حسگر بی‌سیم در باس‌های شماره ۱ و ۴ می‌توان کلیه شبکه را رویت‌پذیر نمود. با استفاده از باس‌هایی که ولتاژ و جریان‌های آن‌ها توسط WSN قرائت شده است ولتاژ کلیه باس‌ها را یافت. که برای «شکل ۱» مطابق روابط زیر عمل می‌کنیم.

$$V_2 = V_1 - Z_2 I_{b2} \quad (۱)$$

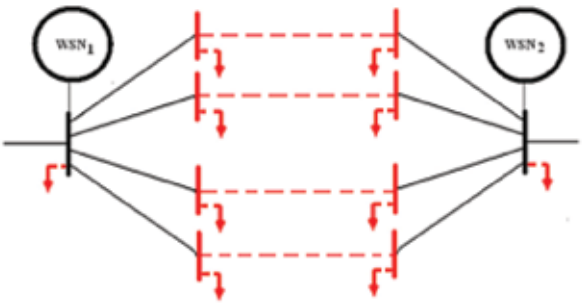
$$V_3 = V_4 + Z_3 I_{b3} \quad (۲)$$

$$I_{b2} = \frac{V_2 - V_3}{Z_2} \quad (۳)$$

$$I_2 = I_{b1} - I_{b2} \quad (۴)$$

$$I_3 = I_{b2} - I_{b3} \quad (۵)$$

در روابط بالا V بیانگر ولتاژ باس، Z بیانگر امپدانس شاخه، I بیانگر جریان خروجی باس به طرف مصرف‌کننده، Ib بیانگر جریان شاخه می‌باشند. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود براساس قوانین کیرشهف به راحتی شبکه را بر مبنای WSN می‌توان رویت‌پذیرکرد. برای اینکه سودمند بودن این نظریه را بهتر متوجه شویم به شبکه شکل (۲) توجه نمایید.



شکل (۲): قابلیت ارتقای رویت‌پذیری شبکه با WSN

با نصب دو WSN در دو نقطه یک شبکه می‌توان به تمام کمیت‌های این برش از یک شبکه بزرگ‌تر دست یافت. خطوط و باس‌های سیاه معرف این است که WSN مقادیر جریان و ولتاژ آنها را قرائت کرده است. خطوط و باس‌های خط‌چین معرف باس‌هایی هستند که می‌توانیم با داشتن مقادیر قرائت شده به محاسبه کمیت‌های آن پرداخت. پس با نصب دو WSN در شکل بالا می‌توانیم تمام ولتاژ ۱۰ باس شبکه و ۴ شاخه و جریان مصرفی ۱۰ باس را به‌راحتی بدست آورد.

۳. تخمین حالت خطی با استفاده از حداقل مربعات وزن‌دار

معیار حداقل مربعات وزن‌دار که هدف آن حداقل کردن مجموع مربعات اختلاف بین اندازه‌گیری‌های تخمینی از اندازه‌گیری‌های واقعی است.

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{(z_i - f_i(x))}{\sigma_i^2} \quad (۶)$$

J(x) تابع هدف، N_m تعداد اندازه‌گیری‌های مستقل، کمیت اندازه‌گیری شده $i.f_i$ تابعی است که جهت محاسبه مقدار اندازه‌گیری شده از اندازه‌گیری شماره i استفاده می‌کند و واریانس اندازه‌گیری i است. در رابطه بالا هدف کم کردن نهایی مقدار J(x) می‌باشد که با توجه به مساله بهینه‌سازی در نهایت به رابطه زیر می‌رسیم.

$$[x] = [(B^T W^{-1} B)^{-1} B^T W^{-1}][Z] \qquad (۷)$$

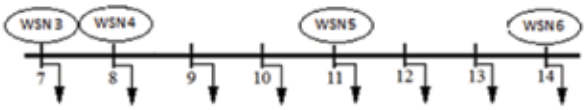
که در رابطه بالا x بردار مقادیر تخمین‌زده ولتاژ می‌باشد. که در این مقاله شامل ولتاژ باس‌ها می‌شود. ماتریس B برگرفته از مقادیر ادمیتانس‌های شبکه و محل نصب WSN و شامل توپولوژی شبکه می‌باشد. ماتریس W همان ماتریس مقادیر واریانس معکوس (خطاهای دستگاه‌های اندازه‌گیری) که یک ماتریس قطری می‌باشد. بردار Z شامل مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان برخی از باس‌ها و شاخه‌ها می‌باشد، که طبق مبحث مشاهده‌پذیری واحدهای WSN در محل‌های مورد نظر نصب می‌شوند تا به قرائت کمیت‌های مورد نظر بپردازند. حال به بررسی ماتریس B می‌پردازیم.

$$B = \begin{bmatrix} II \\ yA + y_s \end{bmatrix} \qquad (۸)$$

ماتریس II یک ماتریس n×m که در واقع مربوط به دستگاه‌های اندازه‌گیری ولتاژ است. که n تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری ولتاژ است و m تعداد باس‌های شبکه می‌باشد که در واقع ردیف‌های این ماتریس معرف دستگاه اندازه‌گیری متناظرش است و هر ستون ماتریس معرف باس متناظرش است. برای تعیین درایه‌های این ماتریس به این‌گونه عمل می‌شود، هرگاه در باس(ستون) مورد نظر دستگاه اندازه‌گیری ولتاژ وجود داشته باشد در ردیف مربوط به آن دستگاه عدد یک می‌گذاریم در غیر اینصورت عدد صفر قرار می‌گیرد. ماتریس A یک ماتریس n×m که n متناظر با تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان است و m متناظر با باس‌های شبکه می‌باشد. ماتریس y یک ماتریس m×m که m برابر تعداد باس‌ها شبکه می‌باشد.که در واقع ماتریس ادمیتانس بین باس‌ها می‌باشد. ماتریس y_s ماتریس ادمیتانس موازی سیستم می‌باشد. این ماتریس محل قرار گرفتن هر دستگاه اندازه‌گیری جریان را برای ادمیتانس موازی شاخه‌ای که دستگاه اندازه‌گیری جریان روی آن قرار گرفته است را نشان می‌دهد. ماتریس ادمیتانس موازی m×b است که m برابر تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان و b برابر باس‌هایی است که جریان اندازه‌گیری شده از آن خارج می‌شود. با تشکیل ماتریس‌های فوق و جایگذاری در (۷) می‌توان به یک دستگاه معادله خطی رسید که به راحتی قابل حل می‌باشد.

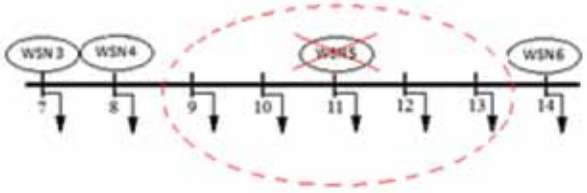
۴- مشاهده‌پذیر کردن شبکه در زمان از بین رفتن اطلاعات WSN

گاهی ممکن است در شبکه اطلاعات یکی یا چند WSN از دست برود. این امر ممکن است باعث عدم رویت پذیری شبکه بشود. لذا لازم است تدابیر لازم اتخاذ شود. برای فهم توجه شما را به برشی از شبکه در شکل (۳) جلب می‌کنیم.



شکل (۳): بررسی رویتپذیری شبکه با WSN

طبق روابط گفته شده در بخش قبل زمانی که اطلاعات WSN٤ در شبکه از بین برود اطلاعات باس ۸ از بین می‌رود ولی با توجه به داشتن اندازه‌گیری‌های باس مجاور که توسط WSN٣ اندازه گرفته شده است اطلاعات باس ۸ براحتی قابل محاسبه است. حال شرایطی را در نظر بگیرید که اطلاعات WSN٥ از بین رود مطابق شکل (۴). در این صورت دیگر دسترسی به اطلاعات باس‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲ به طور کل از بین می‌رود. برای رفع این مشکل در این پایان‌نامه راهکار جدیدی ارایه شده است که به تخمین داده‌های از دست رفته می‌پردازد و باعث رویت‌پذیر شدن شبکه می‌شود.

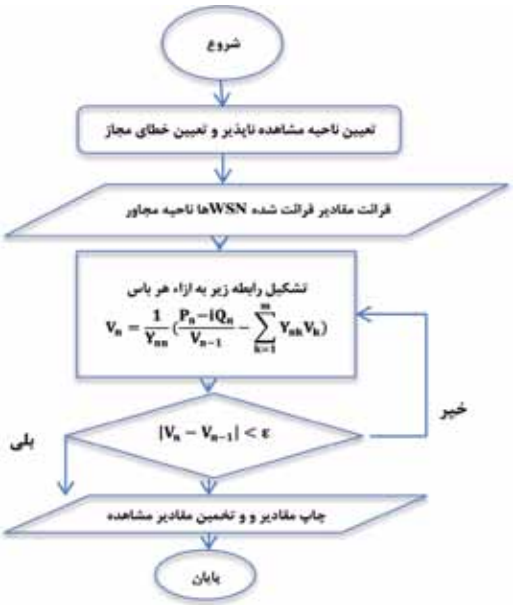


شکل (۴): تعیین ناحیه مشاهده ناپذیر

از آنجایی که ما اطلاعات تاریخی از توان مصرفی باس‌ها در اختیار داریم، و از سوی دیگر اندازه‌گیری‌های باس‌های ۸ و ۱۴ را در اختیار داریم می‌توانیم با استفاده از یک روش شبه گوسسایدلی که خود ایجاد کرده‌ایم به تخمین مقادیر ولتاژ باس‌های ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲و ۱۳ می‌پردازیم. همانطور که می‌دانیم روش گوسسایدل مبتنی بر تکرار عددی می‌باشد. اما ما در اینجا در تکرارهایمان فقط مقادیر قرائت نشده را به روزرسانی می‌کنیم. یعنی مقادیر قرائت شده باس‌هاس ۸ و ۱۴ در تکرار محاسبات ثابت می‌مانند. فرمول اصلی در (۹) عنوان شده است.

$$V_n = \frac{1}{Y_{nn}}\left(\frac{P_n - iQ_n}{V_{n-1}} - \sum_{k=1}^{m} Y_{nk} V_k\right) \qquad (۹)$$

در رابطه فوق V_n ولتاژ باس قرائت نشده است. Y_{nn} مجموع ادمیتانس‌های متصل به باس n ، P_n ، Q_n توان‌های اکتیو و راکتیو بارهای متصل به باس n ، Y_{nk} ادمیتانس متصل به باس n و V_n .k-۱ ولتاژ قبلی باس n . V_k ولتاژ باس k مجاور باس n . m تعداد باس‌های متصل به باس n می‌باشد. به ازاء هر باس در ناحیه مشاهده‌ناپذیر این رابطه را می‌نویسیم. سپس مطابق الگوریتم شکل (۵) عمل می‌کنیم.



شکل (۵): الگوریتم تخمین مقادیر تاحیه مشاهده ناپذیر

۵- رویت‌پذیری انرژی با شبکه حسگر بی‌سیم

رویت انرژی مصرفی باس‌ها در شبکه توزیع از اهداف اساسی این مقاله می‌باشد. پس از جایابی و نصب سنسورهای حسگر بیسیم و همچنین تحلیل و اجرای برنامه رویت‌پذیری اطلاعات شبکه و مصرف‌کننده‌ها به صورت کامل در دسترس و با احتساب خطاهای اندازه‌گیری و همچنین احتمال از دست رفتن اطلاعات برخی از WSNها ، پس از انجام تخمین حالت می‌توان اطلاعات زیر را بدست آورد:

- میزان انرژی تزریقی به کل شبکه توزیع.
- میزان انرژی مصرفی توسط مشترکین.
- میزان انرژی تلف شده در شبکه به‌صورت فنی و غیرفنی.
- میزان انرژی مصرفی در هر حوزه حائز اهمیت است زیرا با بررسی هر کدام می‌توان آن حوزه را بهینه‌سازی نمود و آن قسمت را مدیریت نمود. با بهره‌گیری از مدیریت انرژی، هر مشترک در هر دوره به صورت مستمر مانیتور می‌گردد و می‌توان میزان انرژی غیرمجاز مصرفی را به سادگی محاسبه نمود. برای بدست آوردن توان مصرفی لحظه‌ای یک باس از (۱۰) استفاده می‌کنیم.

$$P_B = V_B \times I_B \qquad (۱۰)$$

در رابطه فوق P_B توان باس، V_B ولتاژ باس و I_B جریان باس می‌باشد. برای بدست آوردن انرژی مصرفی کل یک باس برای تمام ساعات یک ماه از (۱۱) استفاده می‌کنیم.

$$W_n = \sum_{t=1}^{720} V_{n_t} \times I_{n_t} \qquad (۱۱)$$

در رابطه بالا W_n انرژی مصرفی یک باس برای یک دوره یک ماه می‌باشد. V_{nt} ولتاژ باس در یک ساعت مشخص می‌باشد. I_{nt} جریان مصرفی باس در یک ساعت مشخص می‌باشد. t ساعت نمونه‌گیری می‌باشد. برای بدست آوردن انرژی مصرفی کل باس‌ها برای تمام ساعات یک ماه از (۱۲) استفاده می‌کنیم.

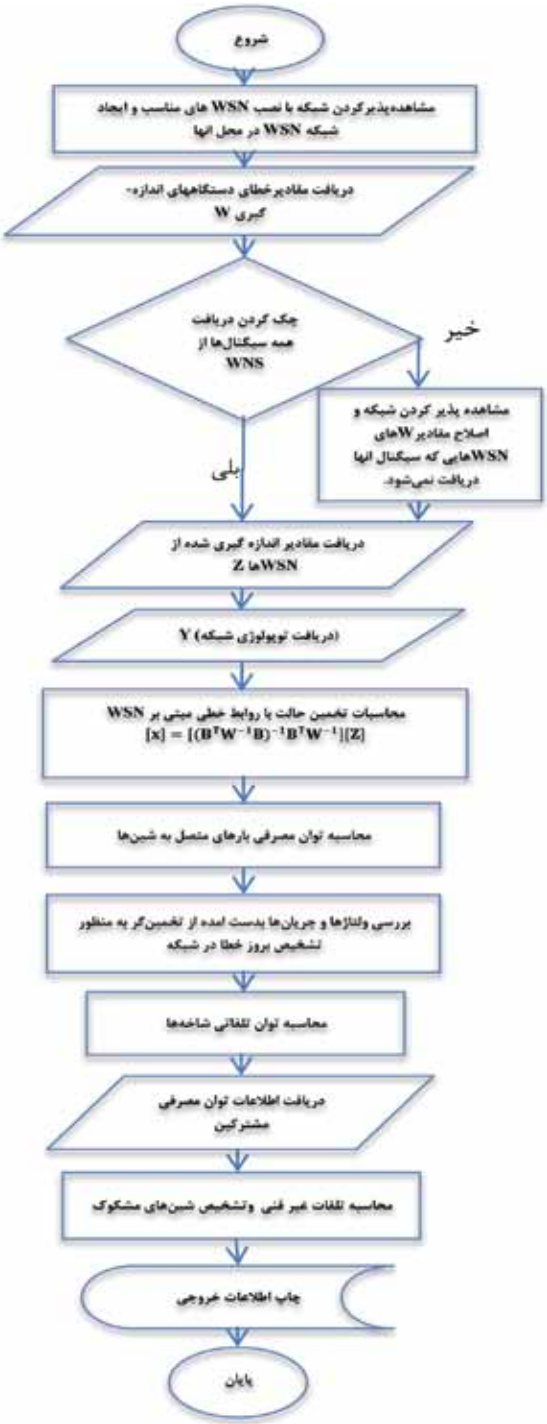
$$W_{total} = \sum_{n=1}^{m} W_n \qquad (۱۲)$$

در رابطه بالا انرژی مصرفی کل باس‌های شبکه برای یک دوره یک‌ماه می‌باشد. m تعداد باس‌های شبکه می‌باشد.

۶- شناسایی تلفات غیرفنی شبکه توزیع با استفاده از شبکه حسگر بی‌سیم

تلفات غیرفنی به تلفاتی اطلاق می‌شود که نتوان جزو تلفات فنی طبقه‌بندی کرد و به‌طور کل این نوع از تلفات ناشی از برق دزدی است و در موارد دیگر می‌تواند به علت بارهای مصرفی باشد که توسط سیستم تشخیص داده نشده‌اند. از آنجایی که به علت عوامل اقتصادی در تمام ترانسفورماتورها دستگاه‌های اندازه‌گیر نصب نشده است، هدف اصلی مقاله بر تخمین انرژی بار می‌باشد. تلفات غیرفنی شبکه توزیع سهم زیادی از تلفات شبکه را به خود اختصاص داده است از این‌رو یکی از چالش‌های اساسی در شبکه توزیع شناسایی اشتراکات غیر مجاز و همچنین محاسبه میزان انرژی مصرفی توسط این مشترکین است.

یکی از اقداماتی که جهت شناسایی مشترکینی که اقدام به تغییر و دستکاری سیستم اندازه‌گیری انرژی می‌نمایند، مطالعه سابقه مصرف مشترک در دوره‌های مشابه در سال‌های قبل است یا به عبارتی اگر مصرف مشترک نسبت به دوره مشابه تغییر چشمگیری کرده باشد و به میزان زیادی کاهش یابد، مشترک فوق را مورد بررسی قرار داده و دستگاه اندازه‌گیری فوق را بازدید می‌نمایند. این روش همواره با مشکلات زیادی ازجمله تشخیص سهوی یا عمدی بودن خرابی دستگاه اندازه‌گیری، میزان انرژی مصرفی به‌صورت غیرمجاز توسط مشترک و اعمال جریمه متناسب با آن و همچنین اعتراضات مشترکین روبرو است. معضل فوق به یکی از دغدغه‌های اصلی شرکت‌های توزیع انرژی برق تبدیل شده است و با توجه به رشد روزافزون تعداد مشترکین این مطالعه و پیگیری مستمر همراه با مشکل روبرو است.

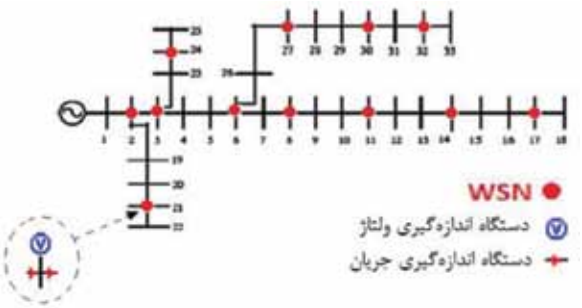


شکل (۶): الگوریتم برنامه تخمین حالت با استفاده از WSN به منظور شناسایی مقادیر تلفات شبکه

در این مقاله هدف نهایی تعیین میزان تلفات غیرفنی می‌باشد که با بهره‌گیری از مدیریت انرژی، هر مشترک در هر دوره به صورت مستمر مورد نظارت قرار می‌گردید و می‌توان میزان انرژی غیرمجاز مصرفی را محاسبه نمود. در نهایت با مقایسه صورت حساب مشترکین با مقادیر قرائت شده یک ماه انرژی توسط WSN به شناسایی تلفات غیرفنی شبکه دست پیدا کرد. حتی محل و ساعت برداشت را با این روش بدست می‌آوریم. الگوریتم مورد نظر در شکل (۶) آمده است.

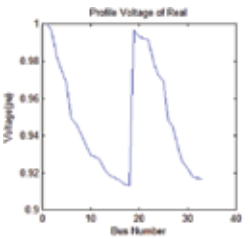
۷- مورد مطالعاتی

در این بخش به بررسی موارد بخش‌های گذشته در شبکه ۳۳ باسه IEEE شکل (۷) می‌پردازیم.در گام اول بررسی محل نصب شبکه حسگر بی‌سیم به منظور مشاهده‌پذیر کردن شبکه توزیع پرداخته می‌شود. در گام دوم به انجام تخمین حالت با استفاده از اندازه‌گیری‌های WSN پرداخته می‌شود. در گام سوم به بررسی اثر حذف اطلاعات WSN۱ و WSN۵ بر روی تخمینگر پرداخته می‌شود. در گام چهارم به محاسبه انرژی فروخته شده و انرژی تحویلی به شبکه پرداخته می‌شود و در گام آخر اقدام به شناسایی تلفات غیر فنی شبکه می‌کنیم. بررسی تلفات غیرفنی پرداخته می‌شود.

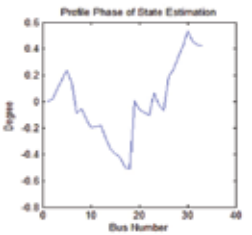


شکل (۷): محل نصب WSN ها در شبکه ۳۳ باسه

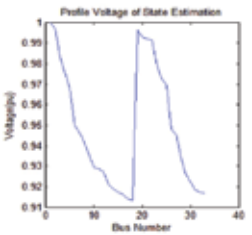
شکل (۸): زاویه واقعی باس‌ها



شکل (۹): ولتاژ واقعی باس‌ها



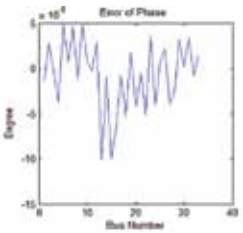
شکل (۱۰): زاویه تخمینی باس‌ها



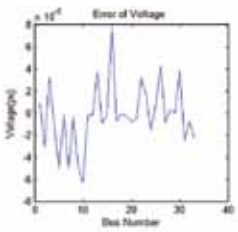
شکل (۱۱): ولتاژ تخمینی باس‌ها

از آنجایی که اطلاعات واقعی سیستم را در این مقاله در دسترس نداریم با اعمال پخش بار روی شبکه به مقادیر ولتاژ و زاویه فازها دست پیدا می‌کنیم که آن را مبنای مقایسه قرار می‌دهیم. با ایجاد خطای تصادفی روی این مقادیر آن‌ها را به عنوان مقادیر قرائت شده ولتاژ و زاویه در باس‌هایی که WSN روی آن‌ها نصب است فرض می‌کنیم. نتایج به دست آمده از پخش بار و تخمین حالت را در نمودارهای شکل‌های (۸) تا (۱۱) نشان داده شده‌اند.

سپس اختلاف مقادیر به دست آمده را در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهیم. که بیانگر خطای تخمین حالت در میزان زاویه و ولتاژ می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار آن بسیار ناچیز می‌باشد. که گویای این مطلب است که تخمین حالت از دقت بالایی برخوردار است.

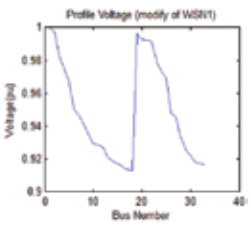


شکل (۱۲): خطای زاویه

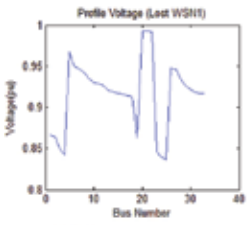


شکل (۱۳): خطای ولتاژ

در این مرحله ابتدا به بررسی اثر حذف داده ارسالی از WSN۱ که روی باس دو نصب می‌باشد و اختلالی در رویت‌پذیری ایجاد نمی‌کند و سپس به بررسی اثر حذف WSN۵ که روی باس ۱۱ می‌باشد و باعث از بین رفتن رویت‌پذیری روی یک ناحیه می‌شود را مورد بررسی قرار می‌دهیم که در شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) نشان داده شده‌اند.

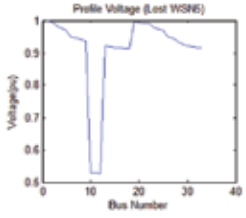


شکل (۱۴): بعد از اصلاح WSN۱



شکل (۱۵): بعد از حذف WSN۱

شکل (۱۶): بعد از اصلاح WSN۵

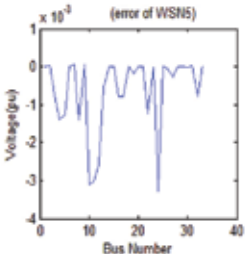


شکل (۱۷): بعد از حذف WSN۵

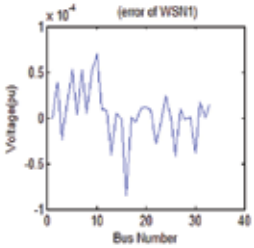
همان‌طور که مشخص است خروجی ولتاژ باس‌ها پس از اصلاح و رویت‌پذیرکردن شبکه بسیار به واقعیت نزدیک می‌باشد. اندک اختلاف بوجود آمده در ولتاژ باس‌ها در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نشان داده شده است.

با توجه به مفاهیم اشاره شده محاسبه انرژی مصرفی برای یک دوره یک ماهه برای باس‌های شبکه در شکل (۲۰) نشان داده شده است.

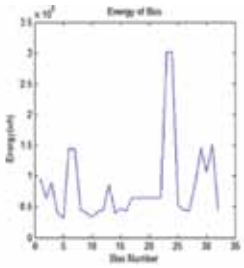
همچنین با مقایسه انرژی بدست آمده از WSNها و تخمین حالت با صورت حساب مشترکین می‌توان به شناسایی تلفات غیر فنی شبکه دست پیدا کرد که در شکل (۲۱) نشان داده شده است.



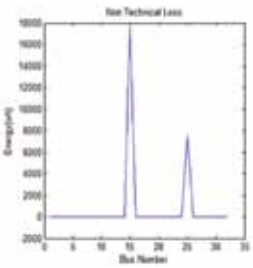
شکل (۱۸): خطای WSN۵



شکل (۱۹): خطای WSN۱



شکل (۲۰): انرژی باس‌ها



شکل (۲۱): تلفات غیر فنی

با توجه به شکل (۲۱) مشخص می‌شود بر روی باس‌های ۱۵ و ۲۵ برداشت غیر مجاز اتفاق افتاده است. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): انرژی دوره یکماهه

2835130 kwh انرژی کل ورودی به شبکه برای یک دوره یکماهه
136610 kwh انرژی تلف شده فنی شبکه برای یک دوره یکماهه
52218 kwh انرژی تلف شده غیرفنی شبکه برای یک دوره یکماهه
2698520 kwh انرژی تخمین زده فروخته شده به مشترکین برای یک دوره یکماهه
2646302 kwh انرژی فروخته شده به مشترکین بر پایه صورت حساب برای یک دوره یکماهه

۸- نتیجه گیری

در این مقاله با کمک شبکه حسگر بیسیم به رویت‌پذیر کردن شبکه توزیع با حداقل نیاز به تجهیزات نظارتی پرداختیم. سپس به ارایه روش جدیدی برای مشاهده‌پذیر کردن شبکه در مواقع بحرانی پرداختیم. با ایجاد تغییرات در روابط تخمین حالت خطی به شناسایی داده‌های بد و کم کردن اثر آن در خروجی تخمینگر پرداخته شد که منجر به ایجاد ابزار دقیق و قدرتمندی جهت رویت‌پذیری و تخمین شبکه توزیع شد.

با این سامانه به رویت انرژی برای یک دوره یکماهه پرداختیم و توانستیم در هر لحظه روی تمام پارامترهای شبکه نظارت دقیق داشته باشیم. با مقایسه صورت حساب مشترکین و مقادیر اندازه‌گیری توسط سامانه پیشنهادی موفق به شناسایی تلفات غیرفنی شبکه شدیم. این تلفات در باس‌های ۱۵ و ۲۵ مجموعا به اندازه ۵۲۲۱۸ کیلووات ساعت اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است که در این باس‌ها هیچ دستگاه اندازه‌گیری وجود نداشت. همچنین این ابزار قادر به نظارت بر اختلالاتی که هر لحظه می‌تواند در باس‌ها و شاخه‌ها اتفاق بیفتد داشته باشد.

***

مراجع

[1] F. F.Wu and A. F. Neyer, “Asynchronous distributed state estimation for power distribution systems,” in Proc. 10th Power Syst. Comput. Conf.,Aug. 1990.

[2] I. Roytelman and S. M. Shahidehpour, “State estimation for electric power distribution systems in quasi real-time conditions,” IEEE Trans.Power Delivery, vol. 8, pp. 2009– 2015, Oct. 1993.

[3] M. E. Baran and A. W. Kelley, “State estimation for real-time monitoringof distribution systems,” IEEE Trans.Power Syst., vol. 9, pp. 1601–1609, Aug. 1994.

[4] K. Li, “State estimation for power distribution system and measurement impacts,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, pp. 911–916, May 1996.

[5] A. P. S. Meliopoulos and F. Zhang, “Multiphase power flow and state estimation for power distribution systems,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, pp. 939–946,May 1996

[6] C.N.Lu, J.H.Teng, “ Distribution System State Estimation ”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. I, February 1995,pp.229-240

[7] Sh.Naka,Y.FukuyamaT.Genji, T. Yura, “ Practical Distribution State Estimation Using Hybrid Particle Swarm Optimization, ” Proc. of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting January 28 - February 1st, 2001.

[8] G. celli, P. A. Pegoraro,F. Pilo ,G. Pisano,S. Sulis, “DMS Cyber-Physical Simulation for Assessing the Impact of State Estimation and Communication Media in Smart Grid Operation, ” IEEE Trans. Power Syst,vol. 29,no. 5,pp. 2436-2446,Feb. 2014.

[9] G. Vieira, R. Barbosa,G. Putnik, “ Electrical Energy Losses Determination In Low Voltage – A Case Study, ” Revista Eletronica temas & Gestão, pp 91-116,2011.

[10] C. N. Lu,j. H.Teng,W. H. E.Liu, “Distribution System State Estimation, ”IEEE Trans.Power Syst,vol. 10,no. 1,pp. 0885-8905,August 2002.

[11] Y. Zhang, “Wireless Sensor Networks in the Smart Power Grid, ”WICT,pp. 1204-1208,Nov 2012.

[12] P. M. De Oliveira-De Jesus,“Distribution System State Estimation Model Using aReduced Quasi-Symmetric Impedance Matrix, ”IEEE Trans.Vol. 30, No. 6,pp. 2856 – 2866, August 2015.

[13] M. E. Baran,A. W.Kelley, “State Estimation for Reagtime Monitoring of Distribution Systems, ” IEEE Trans. Power Syst,vol. 9,no. 3,pp. 1601-1609,August 1994.

[14] Breno C. Costa, Bruno. L. A. Alberto, Andre M. Portela, W. Maduro, Esdras O. Eler, “ Fraud Detection in Electric Power Distribution Networks Using an ANN-Based Knowledge-Discovery Prosses, ” International Journal of Artificial Intelligence & Applications (IJAIA), Vol. 4, No. 6, November 2013.

[15] John A. Stankovic Department of Computer Science University of Virginia « Wireless Sensor Networks» June 19, 2006