



روشی ابتکاری برای اندازه‌گیری دقیق امپدانس شبکه فشار متوسط در

شبکه‌های توزیع با استفاده از بار پرتابل

کد مقاله: ۰۱۳۳۰

امیر باقری

گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

زنجان، ایران

amir_bagheri@znu.ac.ir

اکبر بیات

شرکت توزیع نیروی برق استان زنجان

زنجان، زنجان، ایران

Abbayat60@gmail.com

واژه‌های کلیدی: بار پرتابل، اندازه‌گیری امپدانس شبکه بالادست،
DPMU

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع به جهت قرار گرفتن در آخرین حلقه از زنجیره تولید، انتقال و توزیع برق، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. چرا که ضمن برخورداری از وسعت بالای شبکه، به‌طور مستقیم با مصرف‌کننده‌ها (مشترکین) در ارتباط می‌باشند. لذا مباحث مرتبط با ولتاژ، به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم کیفیت توان، در این بخش بسیار حائز اهمیت است. به منظور برقرسانی مطمئن، رفع ضعف ولتاژ در ساعت‌های پیک بار شبکه، کاهش تلفات و افزایش راندمان بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع، همواره مطالعاتی از قبیل بازآرایی شبکه، مکان‌یابی و تعیین ظرفیت خازن و منابع تولید پراکنده و نظیر آن در شبکه‌های توزیع انجام می‌گیرد [۱]. این مطالعات بر اساس مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه مطابق با اطلاعات موجود از پارامترهای شبکه از قبیل بار و امپدانس خطوط صورت می‌پذیرد. معمولاً برای دستیابی به مدل دقیق امپدانس شبکه، از مشخصات کارخانه‌ای سیم و کابل بکار گرفته شده و برآورد طول آن استفاده می‌شود. نکته حائز اهمیت این است که به دلیل وجود اتصالات متعدد در مسیر سیم‌ها و کابل‌ها، وجود جمپرها و کلمپ‌ها، انواع جدا کننده‌ها مانند کلیدها، سکسیونرها، کات‌اوت فیوزها و تیغه‌های جداکننده، وجود اتصالات سست (که بسته به سطح تماس کنتاکت‌ها و اتصالات، منجر به افزایش مقاومت خط می‌شوند)، و تفاوت در مشخصات اعلامی و واقعی سیم و کابل منجر به خطای قابل توجه مدل شبکه با مدل واقعی می‌شود. این خطای مدل‌سازی می‌تواند منجر

چکیده — بدست آوردن پارامترهای دقیق شبکه اولین قدم در مطالعه هر نوع سیستم قدرت می‌باشد. در شبکه‌های توزیع، به دست آوردن مقدار دقیق امپدانس شبکه بالادست از دید هر نقطه دلخواه از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که این امپدانس در مطالعات اتصال به شبکه منابع تولید پراکنده، تعیین جریان اتصال کوتاه و قدرت قطع کلیدها، تنظیم رله‌های حفاظتی و همچنین مطالعات بازآرایی و بهره‌برداری شبکه اهمیت بسزایی دارد. مدل شبکه‌های توزیع در روش‌های مرسوم فعلی که با اتکا به دیتا شیت کابل‌های زمینی و هوایی بدست می‌آید دارای خطاهای بزرگی است، به نحوی که نتایج مطالعات حاصل از شبیه‌سازی‌ها در نرم افزارهای تحلیل شبکه از جمله DigSILENT با نتایج واقعی تفاوت قابل توجهی دارد. علت این تفاوتها عمدتاً به دلیل عدم توانایی بهره‌بردار شبکه توزیع در مدل نمودن مقدار دقیق امپدانس سایر تجهیزات شبکه از قبیل کلیدها، سکسیونرها، تیغه و کات‌اوت فیوزهای منصوبه در شبکه می‌باشد که به دلیل استفاده مکرر و تضعیف سطح تماس بین کنتاکت‌ها و وجود اتصالات سست دچار افزایش مقاومت شده‌اند. در این مقاله روش ابتکاری جدیدی برای اندازه‌گیری امپدانس واقعی شبکه بالادست ارائه شده است که می‌تواند بصورت عملی نیز مورد استفاده قرار گیرد. در روش پیشنهادی با استفاده از واحد اندازه‌گیری فازور توزیع (DPMU) و بار پرتابل خازنی-اهمی و تنها با قرائت ولتاژ و زاویه آن در نقطه مورد نظر از شبکه، مقدار دقیق R و X شبکه بالادست محاسبه می‌شود.



بالادست با اندازه‌گیری ولتاژ نود z یک بار قبل از اضافه کردن بار، و بار دوم پس از اضافه کردن بار اهمی یا خازنی میسر خواهد بود. نکته‌ای که برای عملیاتی شدن روش پیشنهادی برای تخمین امپدانس شبکه بالادست وجود دارد، اندازه‌گیری زاویه ولتاژ باس z است. برای این اندازه‌گیری، لازم است که حداقل ۲ دستگاه واحد اندازه‌گیری فازور توزیع ($DPMU^1$)، یکی در ابتدای فیدر و دیگری در باس z نصب گردد. با سنکرون کردن زمان دو دستگاه از طریق تکنولوژی GPS امکان اندازه‌گیری زاویه ولتاژ باس z نسبت به مقدار مرجع در ابتدای فیدر ممکن می‌باشد [۴]. با توجه به حرکت شبکه‌های توزیع کنونی به سمت شبکه‌های توزیع هوشمند، استفاده از واحدهای $DPMU$ در این شبکه‌ها در حال گسترش است [۵ و ۶].

به بهره‌برداری غیربینه از شبکه گردد و حتی هزینه‌های بیشتری بر بهره‌بردار شبکه تحمیل نماید [۲]. در اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه نیز نیاز به برآورد دقیق امپدانس شبکه بالادست است تا بتوان به محاسبه قدرت اتصال کوتاه و تعیین قدرت قطع کلیدها پرداخت [۳]. با این وجود مطالعات چندانی در زمینه اندازه‌گیری دقیق امپدانس شبکه‌های توزیع صورت نگرفته است. شاید یکی از دلایل عملیاتی نشدن بیشتر مطالعات تئوریک در شبکه‌های واقعی، عدم اطلاع از مدل واقعی شبکه‌های توزیع باشد. در این مقاله برای اولین بار روشی ارائه می‌شود که بر اساس آن می‌توان امپدانس دقیق شبکه را به‌طور عملی اندازه‌گیری نمود. در ابتدا مباحث تئوریک مربوطه ارائه شده و سپس ساختار پیشنهادی تجهیز اندازه‌گیر ارائه شده است.

۲- بیان مساله

۲-۱- مدل دو شینه شبکه بالادست

شکل (۱) مدل واقعی شبکه بالادست نقطه دلخواه z و مدل ساده شده آن را نشان می‌دهد. در مدل ساده شده، از دو شینه استفاده شده و امپدانس بین دو شینه برابر با مجموع امپدانس‌های شبکه بالادست (بین نقطه z و شینه فشارموسط پست فوق‌توزیع) می‌باشد. بدیهی است در مدل ساده شده دو شینه نیز همچنان مقدار r و jx نامشخص هستند. در مدل ساده شده مقدار $P + jQ$ باید به نحوی تعیین گردد که ولتاژ باس z دقیقاً برابر با ولتاژ باس z گردد. روابط (۱)–(۹) معادلات مورد نیاز جهت محاسبه امپدانس شبکه بالادست را نشان می‌دهند. رابطه (۱) برای شبکه دو شینه ساده شده برقرار است. افت ولتاژ حاصل از عبور جریان نامعلوم I از امپدانس شبکه برابر با اختلاف ولتاژ دو شینه است. اگر مقدار مزدوج ولتاژ شین z در طرفین معادله ضرب شود، رابطه (۳) حاصل می‌شود. از تفکیک مقادیر حقیقی و موهومی معادله (۳)، معادله شماره (۴) به دست می‌آید. اگر فرض شود مقادیر P_0 و Q_0 به شین دوم تزریق شوند، آنگاه معادلات به صورت رابطه (۵) قابل بیان خواهند بود. تفاضل معادله (۴) و (۵) معادله (۶) را نتیجه می‌دهد. در معادله (۶)، تنها مقدار نامعلوم، همان امپدانس شبکه بالادست می‌باشد. لذا از طریق رابطه (۷) می‌توان امپدانس شبکه را محاسبه نمود. در صورت تزریق تنها بار راکتیو، رابطه (۸) برای اندازه‌گیری مناسب می‌باشد. از آنجائیکه تزریق توان اکتیو نیاز به ژنراتور و سنکرونیزاسیون دارد، می‌توان بار اهمی به شبکه اضافه نمود و به مقدار P_0 ضریب منفی را اضافه کرد. در این صورت رابطه (۹) با ضریب منفی P_0 مناسب می‌باشد. بنابراین با استفاده از مدل z شینه پیشنهادی و روابط بیان شده آن در این بخش، امکان محاسبه امپدانس شبکه

۲-۲- شرایط اندازه‌گیری

به منظور اندازه‌گیری صحیح مطابق با روش پیشنهادی در بخش قبل، ضروری است که اندازه‌گیری در بار ثابت شبکه صورت پذیرد. در عمل تغییرات بار به صورت زمان-پیوسته و خارج از کنترل بهره‌بردار شبکه اتفاق می‌افتد. لذا لازم است که ورود و خروج بار اهمی-خازنی به مدار و اندازه‌گیری در مدت کوتاهی مثلاً یک دقیقه صورت گیرد تا بار شبکه در این زمان دچار تغییر زیادی نشود.

¹ Distribution Phasor Measurement Unit (DPMU)



0.0121 - 0.90384 است. مقدار بارها ثابت نگه داشته شده و بار ۱۰ کیلو واتی به نود شماره ۱۸ اضافه می‌شود. در این حالت مقدار توان تزریقی برابر با منهای ۱۰ کیلو وات بوده (مصرفی) و باید در رابطه (۹) جایگذاری شود. پس از اعمال این بار، مقدار ولتاژ نود ۱۸ به $0.0197 - 0.89484$ پریونیت تغییر می‌کند. لذا رابطه (۹) را می‌توان برای این آزمایش به صورت رابطه (۱۰) بازنویسی کرد. از حل معادله (۱۰)، مقدار امپدانس تخمینی برای شبکه بالادست نود شماره ۱۸ برابر با $7.1000 + j6.6687$ پریونیت به دست می‌آید. مشاهده می‌شود این مقدار تخمینی دارای خطای $0.5/6\%$ در مقایسه با مقدار واقعی است. شکل (۴) خطای تخمین امپدانس نودهای شبکه با استفاده از دو آزمایش بار ۱۰ کیلوواتی و خازن ۱۰ کیلو وار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خطای تخمین با افزایش فاصله از ابتدای فیدر افزایش می‌یابد. همچنین با دقت در نتایج، ملاحظه می‌گردد که خطای تخمین مقاومت در بار ۱۰ کیلو وات منفی بوده (یعنی کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شده) و در آزمایش با تزریق ۱۰ کیلو وار خازنی مثبت می‌شود (یعنی بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده شده است). نکته جالب‌تر این است که اندازه خطاها بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. لذا نمودار مجموع خطای دو آزمایش نزدیک به صفر می‌شود. گفتنی است که در روش اضافه نمودن بار اکتیو و راکتیو نیز همچنان خطاهای بالای تخمین (کمتر از $1/8$) در نتایج مشاهده گردید. همچنین نکته حائز اهمیت این است که با افزایش یا کاهش بار مقاومتی یا خازنی، مقدار خطای اندازه‌گیری تغییر چندانی نمی‌کند.

۳-۱- آزمایش ۴ مرحله‌ای به منظور دست‌یابی

به کمترین میزان خطا

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی این ایده مطرح می‌گردد که میانگین نتایج حاصل از آزمایش با بار اهمی و خازنی به عنوان نتایج آزمایش اعلام شود. مراحل پیشنهادی این آزمایش به صورت ذیل می‌باشد:

۱- اندازه‌گیری ولتاژ در نقطه مورد نظر

۲- به مدار آمدن بار خازنی و اندازه‌گیری ولتاژ

۳- خروج بار خازنی و به مدار آمدن بار مقاومتی و اندازه‌گیری مجدد

۴- خارج شدن بار مقاومتی و اندازه‌گیری مجدد ولتاژ نقطه مورد نظر

اندازه‌گیری‌ها در مرحله ۱ و ۴ به منظور بررسی عدم تغییر بار شبکه در حین اندازه‌گیری می‌باشد. به این مفهوم که اگر مقادیر دامنه و زاویه ولتاژ نقطه مورد نظر در شروع و پایان مراحل اندازه‌گیری یکسان نباشد آنگاه مجدداً باید مراحل آزمایش تکرار شود. میانگین نتایج تخمین امپدانس در مرحله ۲ و ۳ مقادیر تخمینی نهایی برای امپدانس شبکه بالادستی نقطه اندازه‌گیری خواهد بود. جدول (۲) نتایج تخمین امپدانس برای نودهای انتخابی ۶، ۱۳،

از آنجائیکه تغییرات بار در بامداد کمترین مقدار خود را دارد، لذا بهترین زمان برای اندازه‌گیری امپدانس شبکه این مواقع می‌باشد. هرچند می‌توان اندازه‌گیری را در طول روز نیز انجام داد. نکته جالب این است که در این روش اندازه‌گیری، تغییرات بار به غیر از زمان اندازه‌گیری کوچکترین تأثیری بر نتایج اندازه‌گیری ندارد. یعنی اینکه در چه زمانی و در چه سطح باری از شبکه اندازه‌گیری صورت گیرد تفاوتی در نتایج اندازه‌گیری نخواهد داشت. در مورد زمان اندازه‌گیری لازم به ذکر است که از آنجائیکه دینامیک شبکه بسیار بالا است، در مدت زمان کمی پس از ورود و یا خروج بار اهمی و خازنی، شبکه به حالت ماندگار رسیده و امکان اندازه‌گیری مهیا می‌شود. برای مشاهده این واقعیت، یک شبیه‌سازی در نرم‌افزار DiGSILENT به منظور بررسی رفتار ولتاژ شبکه در حین ورود و خروج بار اهمی-خازنی بر روی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE، که در بخش شبیه‌سازی به آن اشاره خواهد شد، صورت گرفته است. این بار به شین شماره ۹ این شبکه اتصال می‌یابد. ابتدا یک بار خازنی کوچک در زمان $25ms$ وارد شبکه شده و در زمان $100ms$ از مدار خارج می‌شود. سپس بار اهمی در زمان $125ms$ وارد شده و در زمان $150ms$ از مدار خارج می‌گردد. منحنی تغییرات ولتاژ باس ۹ در حین این فرایند در شکل (۲) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود حداکثر 50 میلی ثانیه (معادل 0.05 ثانیه) طول می‌کشد تا دینامیک شبکه میرا شده و شبکه به حالت ماندگار برسد. لذا مشکلی در روش پیشنهادی برای اندازه‌گیری امپدانس پیش نخواهد آمد.

نکته دیگر در مورد روش پیشنهادی این است که محدودیتی برای ظرفیت بار اکتیو و یا راکتیو به لحاظ تئوری وجود ندارد و با هر مقدار از توان راکتیو و اکتیو (مطابق با روابط ۸ و ۹) می‌توان امپدانس شبکه بالادست را به طور دقیق اندازه‌گیری نمود ولی به دلیل وجود خطاهای اندازه‌گیری شاید نیاز باشد تا مقدار بار اکتیو و راکتیو به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود.

۳-۲- شبیه‌سازی و نتایج

شکل (۳) ساختار شبکه ۳۳ باسه IEEE را نشان می‌دهد. شبکه ۳۳ شینه یک شبکه با سطح ولتاژ $12/66$ کیلوولت می‌باشد که شامل پنج حلقه و ۵ شاخه تایی-لاین (Tie-Line) (شاخه‌های ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶ و ۳۷) می‌باشد. تلفات شبکه اصلی برابر ۲۱۱ کیلووات بوده و کمترین ولتاژ شبکه نیز برابر 0.90384 پریونیت می‌باشد. سایر اطلاعات این شبکه در جدول (۱) آورده شده است. همانطور که از جدول (۱) نیز می‌توان محاسبه نمود، امپدانس شبکه بالادست نود شماره ۱۸ برابر با $12.0618 + j10.1421$ اهم است و با احتساب امپدانس پایه برابر با 1.602 اهم، مقدار پریونیتی آن برابر با $7.5262 + j6.3279$ پریونیت می‌باشد. ولتاژ این نود برابر با



8TH REGIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION

Tehran 25,26 Jan. 2020

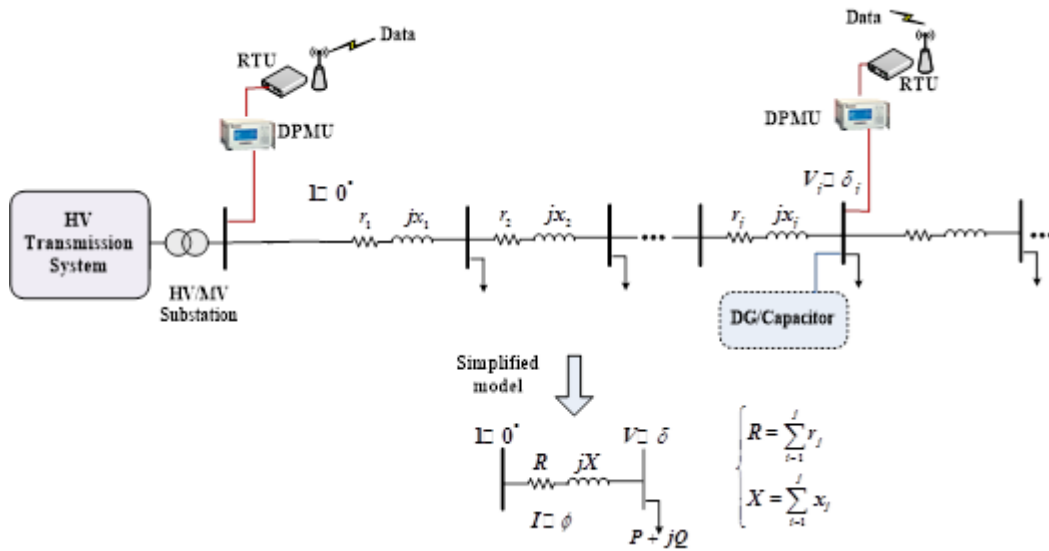


هشتمین کنفرانس منطقه‌ای سید

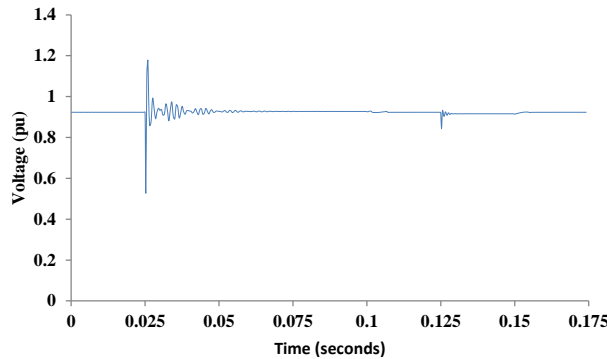
تهران، ۵ و ۶ بهمن‌ماه ۱۳۹۸



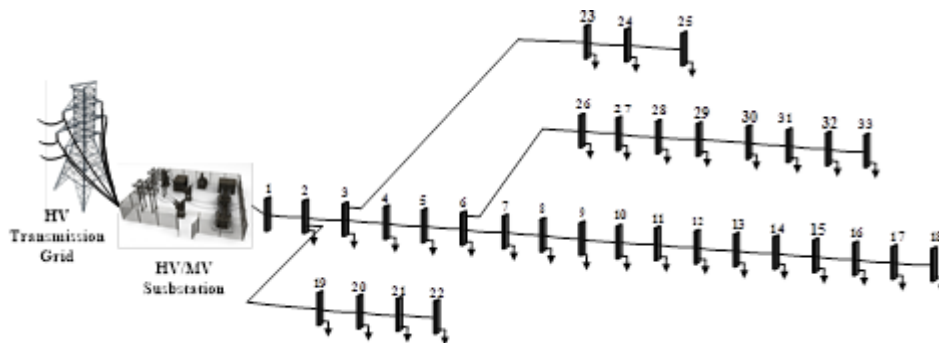
انجمن مهندسی کارفرمایان شرکت‌های توزیع نیروی برق



شکل (۱): شبکه بالادست نقطه دلخواه z و مدل ساده شده آن



شکل (۲): تغییرات ولتاژ شبکه در حین ورود-خروجی بار خازنی-اهمی



شکل ۲: شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE

$$\begin{bmatrix} R \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -10 \\ -10 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (0.9038 * \sin(-0.0121)) - (0.8948 * \sin(-0.0197)) \\ (0.9038 * \cos(-0.0121) - 0.9038^2) - (0.8948 * \cos(-0.0197) - 0.8948^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.1000 \\ 6.6687 \end{bmatrix} \quad (10)$$



8TH REGIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION

Tehran 25,26 Jan. 2020



هشتمین کنفرانس منطقه‌ای سیرد

تهران، ۵ و ۶ بهمن ماه ۱۳۹۸



انجمن مهندسی کارفرمایان
شرکت‌های توزیع نیروی برق

مشاهده می‌شود که کمترین خطا در این سه سناریو متعلق به سناریوی شماره ۲ است و بیشترین خطای اندازه‌گیری متعلق به سناریوی ۳ یعنی اضافه نمودن همزمان بار اهمی و خازنی می‌باشد. روش ۴ مرحله‌ای پیشنهادی ترکیبی از سناریوهای ۱ و ۲ بوده و میانگین نتایج آن به عنوان تخمین امیدانس شبکه بالادستی در نظر گرفته می‌شود. مشاهده می‌شود که در این روش، حداکثر خطای تخمین کمتر از ۰/۲٪ بوده و دقت بالای ۹۹/۸٪ را به همراه دارد.

۴- نتیجه گیری

یکی از مشکلات شرکت‌های توزیع در محقق نمودن مطالعات صورت گرفته بر روی شبکه، عدم دسترسی به اطلاعات واقعی پارامترهای خطوط می‌باشد. از آنجائیکه روش مرجعی برای اندازه‌گیری امیدانس شبکه بالادست از نقطه دلخواه در شبکه وجود ندارد، لذا برای مدل‌سازی شبکه تنها به مشخصات سیم‌ها و کابل‌های بکار گرفته شده با توجه به اطلاعات ارائه شده توسط کارخانه تولید کننده اکتفا می‌شود. این در حالی است که در شبکه‌های توزیع وسعت شبکه بالا بوده و قطع کننده‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند و این امر منجر به تغییر امپدانس شبکه می‌شود. ترنسپوز نمودن خط به منظور یکسان‌سازی اندوکتانس خط نیز در شبکه‌های توزیع به درستی صورت نمی‌گیرد. در این مقاله برای اولین بار روشی ابتکاری ارائه گردید که بر اساس آن تنها با اندازه‌گیری اندازه و زاویه ولتاژ یک نقطه از شبکه می‌توان امیدانس بالادست آن نقطه را محاسبه نمود. بدین منظور، یک روش ۴ مرحله‌ای با دقت اندازه‌گیری بالا (بیش از ۹۹٪) ارائه گردید. از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- نیاز به تجهیزات ساده برای اندازه‌گیری، نظیر بار مقاومتی و بار خازنی
- ۲- عدم نیاز به بار مقاومتی و خازنی یکسان
- ۳- ظرفیت مقاومت و خازن باید تنها در حدی باشد که بتواند خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری را پوشش دهد.
- ۴- قابلیت استفاده بدون استفاده از بار پرتابل برای نیروگاه‌های تولید پراکنده متصل به شبکه
- ۵- امکان اندازه‌گیری با سرعت بالا با استفاده از سوئیچینگ بار پرتابل
- ۶- عدم تاثیر سطح بار شبکه بر روی نتایج اندازه‌گیری

از معایب این روش اندازه‌گیری نیز می‌توان نیاز به PMU برای اندازه‌گیری مقدار زاویه ولتاژ را برشمرد. البته لازم به ذکر است که امروزه حرکت به سمت شبکه‌های هوشمند و نیاز به مانتورینگ دقیق شبکه به منظور بهره‌برداری بهینه ضروری و لازم به نظر می‌رسد.

۲۵ و ۳۳ را نشان می‌دهد. نودهای انتخاب شده اتفاقی بوده و تنها از دوری و نزدیکی به ابتدای فیدر متفاوت انتخاب شده‌اند. سه سناریوی اندازه‌گیری امیدانس شبکه بالادست برای این نودها در نظر گرفته شده است. این سناریوها به ترتیب به شرح ذیل می‌باشند:

جدول ۱: اطلاعات شبکه استاندارد ۳۳ شینه

شماره خط	باس فرستنده	باس گیرنده	R	X
1	1	2	0.0922	0.047
2	2	3	0.493	0.2512
3	3	4	0.3661	0.1864
4	4	5	0.3811	0.1941
5	5	6	0.819	0.707
6	6	7	0.1872	0.6188
7	8	7	1.7115	1.2351
8	8	9	1.029	0.74
9	9	10	1.044	0.74
10	10	11	0.1967	0.0651
11	11	12	0.3744	0.1238
12	12	13	1.468	1.1549
13	13	14	0.5416	0.7129
14	15	14	0.5909	0.526
15	15	16	0.7462	0.5449
16	16	17	1.2889	1.721
17	17	18	0.732	0.5739
18	2	19	0.164	0.1565
19	19	20	1.5042	1.3555
20	20	21	0.4095	0.4784
21	21	22	0.7089	0.9373
22	3	23	0.4512	0.3084
23	23	24	0.898	0.7091
24	24	25	0.8959	0.7071
25	6	26	0.2031	0.1034
26	26	27	0.2842	0.1447
27	27	28	1.0589	0.9338
28	28	29	0.8043	0.7006
29	29	30	0.5074	0.2585
30	30	31	0.9745	0.9629
31	31	32	0.3105	0.3619
32	32	33	0.3411	0.5302
33	8	21	2	2
34	9	15	2	2
35	12	22	2	2
36	18	33	0.5	0.5
37	25	29	0.5	0.5

- سناریوی ۱: $P=0$ و $Q=100$
- سناریوی ۲: $P=-100$ و $Q=0$
- سناریوی ۳: $P=-100$ و $Q=100$



8TH REGIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION

Tehran 25,26 Jan. 2020

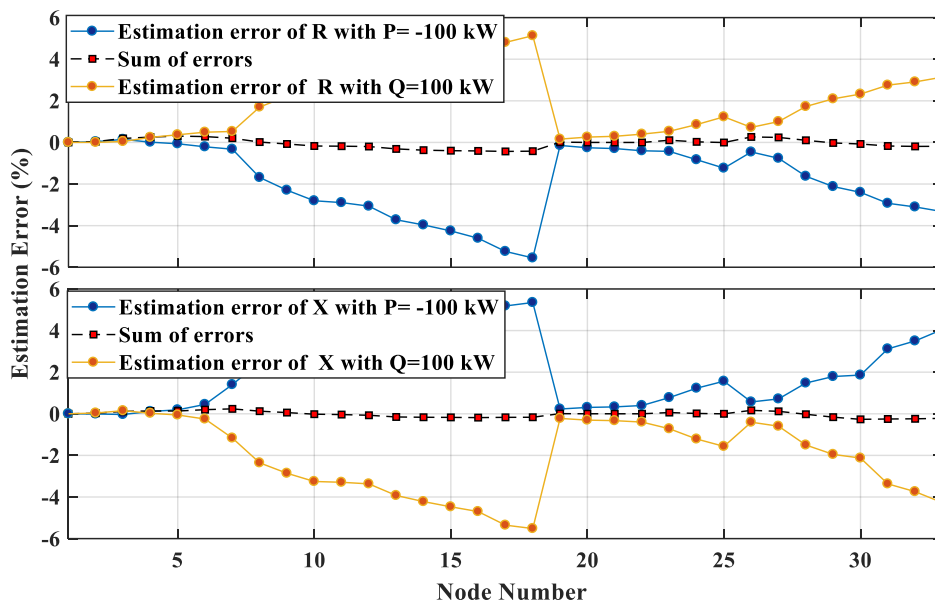


هشتمین کنفرانس منطقه‌ای سید

تهران، ۵ و ۶ بهمن‌ماه ۱۳۹۸



انجمن مهندسی کارفرمایان
شرکت های توزیع نیروی برق



شکل (۴): خطای تخمین امپدانس نودهای شبکه با استفاده از دو آزمایش $P=-100$ و $Q=100$

جدول ۲: نتایج تخمین امپدانس برای نودهای انتخابی ۶، ۱۳، ۲۵ و ۳۳

نودهای انتخابی جهت محاسبه امپدانس شبکه بالا دست	مقادیر پرونیته واقعی شبکه بالادست		مقادیر تخمین زده شده						روش اندازه گیری ۲ مرحله ای	
			سناریو های اندازه گیری							
			1		2		3			
			P=0 kW	Q=100 kVAr	P=-100 kW	Q=0 kVAr	P=-100 kW	Q=100 kVAr		
R	X	R (pu)	X (pu)	R (pu)	X (pu)	R (pu)	X (pu)	R	X	
6	1.342	0.865	1.349	0.862	1.340	0.869	1.341	0.861	1.344	0.865
13	5.093	3.783	5.267	3.635	4.904	3.926	4.940	3.600	5.085	3.780
25	1.766	1.262	1.788	1.242	1.744	1.282	1.746	1.240	1.766	1.262
33	4.140	3.358	4.270	3.214	4.002	3.494	3.997	3.221	4.136	3.354
حداکثر خطای تخمین امپدانس (%)			3.4%	4.3%	3.7%	4.1%	3.5%	4.9%	0.2%	0.1%

“Improving distribution network model accuracy using impedance estimation from micro-synchrophasor data” 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM).

- [5] Y. Liu, L. Wu, J. Li, “D-PMU based applications for emerging active distribution systems: A review”, Electric Power Systems Research., vol. 1, no. 179:106063, Feb. 2020.
- [6] A. Von Meier, E. Stewart, A. McEachern, M. Andersen, L. Mehrmanesh, “Precision micro-synchrophasors for distribution systems: A summary of applications”, IEEE Transactions on Smart Grid. vol. 8, no. 6, pp. 2926-2936, Jun. 2017.

۵- منابع

- [1] H. Seifi, M. S. Sepasian, Electric Power System Planning Issues, Algorithms, and Solutions, Springer, 2011.
- [2] H. L. Willis, Power Distribution Planning Reference Book, 2nd Edition, MarcelDekker, New York, 2004, pp. 1217.
- [3] T.N. Boutsika and S.A. Papathanassiou, Short-Circuit Calculations in Networks with Distributed Generation, Electric Power System Research, Vol. 78, 2008, pp. 1181-1191.
- [4] C.M. Roberts ; C. M. Shand ; K.W. Brady ; E. M. Stewart ; A. W. McMorran ; G. A. Taylor,