الگوی جدید تصحیح لغزش فاز به منظور تخمین پارامترهای مدار معادل تونن در سیستمهای قدرت با استفاده از اندازه‌گیریهای فازوری

بهمن علی نژاد[1] ، دانشجوی دکتری، دکتر حسین کاظمی کارگر[2]، استادیار دانشگاه

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
b_alinejad@sbu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران
h_kazemi@sbu.ac.ir

چکیده: در این تحقیق، شیوه جدیدی به منظور محاسبه آنلاین پارامترهای مدار معادل تونن سیستم قدرت از دیدگاه ترمینال ژنراتور برپایه اندازه‌گیریهای فازوری ارائه شده است. محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن سیستم توسط سه فازور متوالی ولتاژ و جریان ترمینال ژنراتور، صورت می‌پذیرد. به منظور تصحیح لغزش فاز احتمالی فازورهای متوالی که ناشی از تخطی فرکانس سیستم از مقدار نامی آن بوده و مسبب خطای قابل توجه در محاسبات می‌گردد، از یک بردار مجازی در روش مثلث بردارها استفاده شده-است. نتایج نشان می‌دهند که درصورت وجود لغزش فاز، به‌کارگیری بردار مجازی در تشکیل مثلث بردارها درجهت همگام سازی زاویه فاز فازورهای متوالی با یک مرجع مشخص، شیوه‌ای عملی و کارآمد است. همچنین روشی جدید به منظور حذف اندازه‌گیریهای دارای اغتشاش و ناهماهنگ نیز پیشنهاد شده‌است. پاسخ الگوریتم بر روی شبکه استاندارد ۳۰ باس IEEE در حالت پایدار و گذرا و در آزمایشگاه حفاظت دانشگاه شهیدبهشتی توسط مجموعه‌ای آزمایشگاهی شامل موتور و ژنراتور متصل به شبکه، ارائه و مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته‌است. پاسخ مناسب و دقیق الگوریتم نشان‌دهنده کفایت و قابلیت آن در محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن سیستم قدرت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدار معادل تونن، واحدهای اندازه‌گیری فازوری، روش مثلث بردارها، لغزش فاز

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۰۶/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر حسین کاظمی کارگر

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.6.9]

۱- مقدمه

اندازه‌گیری فازوری می‌تواند به منظور بهره‌برداری بهینه از سیستمهای قدرت، حفاظت خطوط انتقال انرژی، مدلسازی و ارزیابی حاشیه امنیت سیستمهای قدرت مورد استفاده قرار گیرند [3-1].

محاسبه مدار معادل تونن سیستم از دیدگاه یک ژنراتور میتواند در محاسبه جریان اتصال کوتاه، ارزیابی پایداری و مکان‌یابی خطا مفید واقع شود. به منظور مطالعات آنلاین، تخمین پارامترهای مدار معادل تونن نیز باید در حالت آنلاین انجام شود که فازورهای ارسالی از واحدهای اندازه‌گیری فازوری (PMU) برای این منظور مناسب می‌باشند.

برخی از تحقیقات انجام شده در این زمینه، بر روی پایداری ولتاژ نقاط بار در سیستمهای قدرت تمرکز نموده‌اند. آنالیز نسبت امپدانس تونن (Z_{th}) به امپدانس بار (Z_L) در یک ترمینال بار در شبکه به منظور تحلیل پایداری ولتاژ در [5-4] ارائه شده است. در مراجع [7-6] نیز به کمک محاسبه امپدانس و ولتاژ تونن (V_{th}) در شبکه قدرت با توربینهای بادی بزرگ به تخمین پایداری ولتاژ و محاسبه نمودار ظرفیت توربینهای بادی اشاره شده است. یافتن محل دقیق خطا با استفاده از تخمین امپدانس تونن در [8] توسعه داده شده است.

در مرجع [9] از ولتاژ و جریان ترمینال ژنراتور به منظور محاسبه امپدانس تونن و سپس طراحی یک تنظیم کننده ولتاژ ژنراتور استفاده شده‌است. در مرجع [10] با استفاده از تخمین حالت و استفاده از فازورهای ارسالی، محاسبات پایداری ولتاژ صورت پذیرفته است. در [11] از تئوری تلگان به منظور محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن و تخمین پایداری ولتاژ استفاده شده‌است. در این تحقیق از دو اندازه‌گیری فازوری متوالی استفاده شده است. مرجع [12] از الگوریتم بازگشتی با درنظر گرفتن تغییرات پارامترهای سیستم به محاسبه مدار معادل تونن پرداخته‌است. تصحیح لغزش فازورهای متوالی به منظور محاسبه مدار معادل تونن توسط معادلات ریاضی و روش مثلث بردارها در [14-13] صورت گرفته است. روش حداقل مربعات خطا به همراه الگوریتم بازگشتی به منظور محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن در [15] معرفی و بررسی شده‌است.

گرچه پارامترهای مدار معادل تونن از دیدگاه ترمینال بار به منظور بررسی پایداری ولتاژ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، اما باید توجه نمود که محاسبه مدار معادل تونن از دیدگاه ترمینال ژنراتور نیز می‌تواند در محاسبه پایداری ژنراتور از روش معیار سطوح برابر، محاسبات اتصال کوتاه و تنظیم صحیح رله‌های حفاظتی آن مفید واقع شود. همچنین محاسبه مدار معادل تونن سیستم قدرت از دیدگاه ترمینال ژنراتور به‌دلیل رفتار دینامیکی و برهم‌کنشهای آن با سیستم قدرت، با دشواریهای بیشتری همراه بوده و نیازمند الگوریتمهای دقیقتر و پیچیده‌تری است.

در این نوشتار روش جدید و موثری برمبنای به‌کارگیری سه اندازه‌گیری فازوری متوالی ولتاژ و جریان ترمینال ژنراتور به منظور محاسبه مدار معادل تونن سیستم از دیدگاه همان ترمینال معرفی و مورد بررسی قرار گرفته‌است. نشان داده‌شده‌است که استفاده از روش مثلث بردارها به منظور تصحیح لغزش فاز فازورهای متوالی تنها در صورت استفاده از بردار مجازی امکان‌پذیر است.

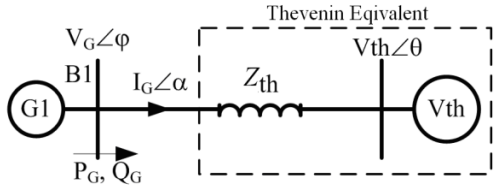
شایان ذکر است از آنجاییکه تنها اندازه‌گیریهای محلی ولتاژ و جریان ژنراتور جهت محاسبه مدار معادل تونن توسط روش ارائه شده لازم است، لذا می‌توان علاوه بر PMU از اندازه‌گیریهای فازوری رله‌های دیجیتال، ثبات‌های خطا و دستگاههای اندازه‌گیری دیگر نیز در صورت وجود استفاده نمود. اما استفاده از PMU به‌دلیل دقت بالاتر و سرعت بیشتر در محاسبه فازورها ارجح می‌باشد.

پاسخ الگوریتم بر روی شبکه ۳۰ باس IEEE در حالت بهره‌برداری عادی شبکه و در حالت گذرا که سیستم با خطا مواجه است، مورد بررسی قرار گرفته‌است. همچنین، عملکرد الگوریتم در آزمایشگاه حفاظت دانشگاه شهیدبهشتی توسط مجموعه آزمایشگاهی شامل موتور، ژنراتور متصل به شبکه، ترانسفورماتور، ثبات دیجیتال مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. اندازه‌گیریهای فازوری مورد نیاز مطابق استاندارد IEEE C37.118 در نرم‌افزار MATLAB به‌دست آمده‌اند. پاسخ مناسب و دقیق الگوریتم نشاندهنده کفایت و قابلیت آن در محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن شبکه می باشد.

در ادامه و در بخشهای بعدی ابتدا به بررسی معضلات محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن در یک شبکه واقعی با استفاده از اندازه‌گیریهای فازوری می‌پردازیم. سپس الگوریتم پیشنهادی به منظور تصحیح لغزش فاز ارائه خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی، بحث و بررسی نتایج در بخش بعد ارائه خواهد شد.

۲- بررسی مساله و بیان الگوریتم پیشنهادی

در شکل (۱) مدار معادل تونن سیستم قدرت از دیدگاه ترمینال ژنراتور توسط یک منبع ولتاژ V_{th} و یک امپدانس Z_{th} نمایش داده شده است.



شکل (۱): مدار معادل تونن سیستم قدرت از دیدگاه ترمینال ژنراتور

اگر دو فازور متوالی ولتاژ و جریان ترمینال ژنراتور در دسترس باشد و فرض کنیم که مدار معادل تونن در دو اندازه‌گیری متوالی ثابت

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.6.9]

می‌ماند، آنگاه پارامترهای مدار معادل تونن را می‌توان از روابط (۱) و (۲) محاسبه نمود.

$$\bar{Z}_{th} = \frac{\bar{V}_{G1} - \bar{V}_{G0}}{\bar{I}_{G1} - \bar{I}_{G0}} \quad (۱)$$

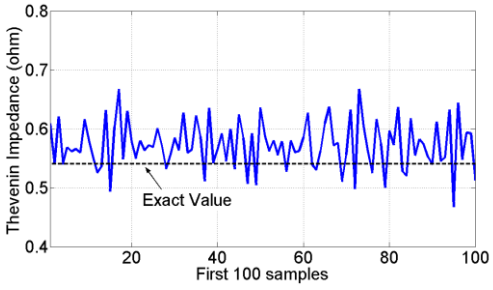
$$\bar{V}_{th} = \bar{V}_{G1} - \bar{Z}_{th}\bar{I}_{G1} \quad (۲)$$

تمامی پارامترهای روابط (۱) و (۲) از نوع فازوری بوده و زیرنویسهای صفر و یک بیانگر اندازه‌گیریهای متوالی اول و دوم می‌باشند.

ثابت فرض نمودن مدار معادل تونن به‌دلیل بازه زمانی کوتاه دردسترس بودن فازورها توسط PMU (۲۰ میلی‌ثانیه در این تحقیق) نسبت به تغییرات حالتهای سیستم همانند تغییر تپ ترانسفورماتورها و سیستمهای تنظیم ولتاژ ژنراتورها، دور از واقعیت نیست. همچنین در یک سیستم قدرت بزرگ، چون تغییرات دینامیکی ژنراتور از تغییرات دینامیکی سیستم قدرت متصل به آن (به دلیل لختی بسیار کوچکتر ژنراتور در مقایسه با لختی سیسنم قدرت) کمتر است، لذا تغییرات دینامیکی سیستم قدرت در مقایسه با ژنراتور تقریبا ناچیز بوده و می‌توان فرض نمود که مدار معادل تونن آن در طول اندازه‌گیریهای متوالی ثابت خواهد ماند. این امر این امکان را فراهم می‌کند تا مدار معادل تونن سیستم قدرت از دید ترمینال ژنراتور محاسبه شود.

هرچند این روش ساده می‌باشد، اما عملا نمی‌توان از آن در شبکه واقعی استفاده نمود، زیرا در شبکه‌های واقعی به‌دلیل انحراف فرکانس سیستم از مقدار نامی، همواره مابین اندازه‌گیریهای متوالی مقداری لغزش فاز وجود دارد و همین امر موجب خواهد شد که فازورهای متوالی نسبت به یک مرجع سنکرون نباشند. عدم سنکرونیزم فازورهای متوالی موجب بروز خطا در محاسبه امپدانس تونن سیستم خواهد شد.

در شکل (۲) اندازه امپدانس تونن محاسبه شده براساس رابطه (۱) از دیدگاه ترمینال ۴۰۰ کیلوولت نیروگاه سد دز بر اساس فازورهای واقعی ثبت‌شده توسط PMU در حالت بهره‌برداری عادی شبکه نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست امپدانس محاسبه شده خالی از دقت مناسب بوده و عملا نمی‌تواند در مطالعات سیستم مورد استفاده قرار گیرد. همانطور که بیان شد این امر به دلیل وجود لغزش فاز در دو اندازه‌گیری متوالی می‌باشد. بر این اساس ضروری است که روشی به منظور تصحیح لغزش فاز و سنکرون نمودن فازورهای اندازه‌گیری شده بر روی یک مرجع یکسان ارائه شود.



شکل (۲): امپدانس تونن بدون اصلاح لغزش فاز

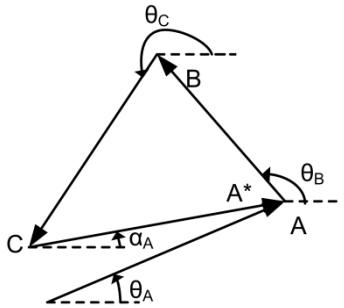
در مرجع [14] روشی مبتنی بر تصحیح لغزش فاز بر مبنای سه اندازه‌گیری فازوری متوالی پیشنهاد شده است. این روش به طور خلاصه در پیوست ۱ آورده شده است. براساس این روش، سه بردار A، B و C توسط سه اندازه‌گیری متوالی ولتاژ و جریان ترمینال ژنراتور تشکیل شده و سپس با تشکیل مثلث بردارها (مطابق شکل (۲۳) پیوست ۱) مقدار لغزش فاز هریک از فازورهای اندازه‌گیری شده تصحیح می‌شود. پس از تصحیح فاز و سنکرون شدن بردارها برروی یک مرجع، پارامترهای مدار معادل تونن از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند.

مطابق روابط (۱۸) و (۱۹) پیوست ۱ و همچنین توضیحات مندرج در [17]، دو پاسخ مختلف برای تصحیح لغزش فاز از روش فوق قابل حصول است. تشخیص اینکه کدامیک از جوابها، جواب درست و کدامیک نادرست است، عملا بستگی به نوع داده‌های اندازه‌گیری شده داشته و همین امر موجب می‌شود که در بسیاری از موارد پاسخ الگوریتم حتی در شرایط عادی بهره‌برداری شبکه با خطای زیادی همراه باشد. به منظور غلبه بر این مشکل، روشی مبتنی بر تشکیل مثلث بردارها بر مبنای بردارهای مجازی پیشنهاد می‌شود که در ادامه به شرح و بررسی آن می‌پردازیم. روش ارائه شده به بخشهای زیر تقسیم می شود:

گام اول) فرض کنید که سه اندازه‌گیری فازوری متوالی ولتاژ و جریان ژنراتور به صورت (V_0, I_0)، (V_1, I_1) و (V_2, I_2) در دسترس باشد. زیرنویسهای صفر، یک و دو به ترتیب بیانگر اندازه‌گیری اول، دوم و سوم می باشند.

گام دوم) فرض کنید که در بردارهای B و C (رابطه (۱۷) از پیوست ۱ را ملاحظه فرمایید) لغزش فاز نداشته باشیم و تنها بردار A از لغزش فاز تاثیر پذیرفته باشد. مطابق شکل (۳)، اندازه و فاز بردار A را به گونه‌ای تغییر می‌دهیم که امکان ساخت مثلث بردارها توسط بردار مجازی A که A^* نامیده می‌شود به‌همراه بردارهای B و C وجود داشته باشد. مطابق شکل (۳) بردار مجازی A را برابر $A^* = -B - C$ تعریف می‌کنیم که در اینصورت زاویه فاز معادل α_0 به منظور تصحیح لغزش فاز بردار A عبارت خواهد بود از:

$$\alpha_0 = \alpha_A - \theta_A = \text{angle}(A^*) - \text{angle}(A) = \\ = \text{angle}(-B - C) - \text{angle}(A) \quad (۳)$$



شکل (۳): تشکیل مثلث بردارها به کمک بردار مجازی A^*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.6.9]

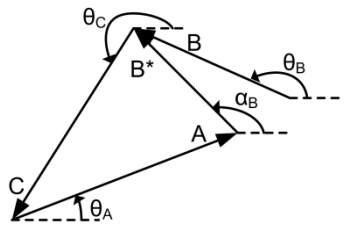
بنـــــابراین اولـــــین انـــــدازه‌گیـــــری مطـــــابق $(\overline{V}_0^C, \overline{I}_0^C) = (\overline{V}_0 e^{-j\alpha_0}, \overline{I}_0 e^{-j\alpha_0})$ اصلاح شـده کـه در آن $(\overline{V}_0^C, \overline{I}_0^C)$ مقادیر تصحیح شده فازورها در اندازه‌گیری اول می‌باشند. اولین مقـدار تخمینی امپدانس تونن$(\overline{Z}_{th})$ از فازور تصحیح شده $(\overline{V}_0^C, \overline{I}_0^C)$ و هریک از دو فازور اندازه‌گیری شده دیگر به صورت (۴) محاسبه می شود:

$$\overline{Z}_{th}^0 = \left(\frac{\overline{V}_0^C - \overline{V}_1}{\overline{I}_0^C - \overline{I}_1}\right) = \left(\frac{\overline{V}_0^C - \overline{V}_2}{\overline{I}_0^C - \overline{I}_2}\right) \quad (۴)$$

در (۴)، $\overline{Z}_{th}^0$ مقدار امپدانس تونن تخمینی بر مبنای اصلاح لغـزش فاز اندازه‌گیری اول می‌باشد.

گام سوم) در این حالت فرض برآن اسـت کـه تنهـا بـردار B متـاثر از لغزش فاز بوده و بردارهای A و C از این قائده مستثنی بوده‌اند. در این حالت بردار مجـازی B^* کـه مسـاوی $B^* = -A - C$ مـی‌باشـد و در شکل (۴) نشان داده‌شده‌است، تولید شده و زاویـه فـاز معـادل α_1 بـه منظور تصحیح لغزش فاز اندازه‌گیری دوم به شـرح رابطـه (۵) خواهـد بود.

$$\alpha_1 = \alpha_B - \theta_B = \text{angle}(B^*) - \text{angle}(B) = \\ = \text{angle}(-A - C) - \text{angle}(B) \quad (۵)$$



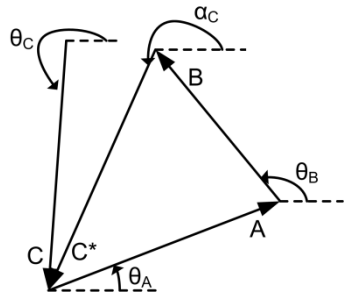
شکل (۴): تشکیل مثلث بردارها به کمک بردار مجازی B^*

با توجه به شکل (۴)، دومین اندازه‌گیری فـازوری ولتـاژ و جریـان ترمینال ژنراتور بـه شـکل $(\overline{V}_1^C, \overline{I}_1^C) = (\overline{V}_1 e^{-j\alpha_1}, \overline{I}_1 e^{-j\alpha_1})$ اصـلاح شده و دومین امپدانس تونن $\overline{Z}_{th}^2$ از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\overline{Z}_{th}^2 = \left(\frac{\overline{V}_1^C - \overline{V}_0}{\overline{I}_1^C - \overline{I}_0}\right) = \left(\frac{\overline{V}_1^C - \overline{V}_2}{\overline{I}_1^C - \overline{I}_2}\right) \quad (۶)$$

گام چهارم) همانند گامهای دوم و سوم، بـردار مجـازی C^* کـه برابـر $C^* = -B - A$ می‌باشد مطابق شـکل (۵) بـه منظـور ایجـاد مثلـث بردارها، محاسبه زاویه α_2 و تصحیح لغزش فاز انـدازه‌گیـری سـوم بـه صورت $(\overline{V}_2^C, \overline{I}_2^C) = (\overline{V}_2 e^{-j\alpha_2}, \overline{I}_2 e^{-j\alpha_2})$ تعریف می‌شود.

$$\alpha_2 = \alpha_C - \theta_C = \text{angle}(C^*) - \text{angle}(C) = \\ = \text{angle}(-B - A) - \text{angle}(C) \quad (۷)$$



شکل (۵): تشکیل مثلث بردارها به کمک بردار مجازی C^*

سومین امپدانس تخمینی $\overline{Z}_{th}^3$ با استفاده از انـدازه‌گیـری تصـحیح شده سوم و هریک از دو اندازه‌گیری دیگر به صورت رابطه (۸) خواهـد بود.

$$\overline{Z}_{th}^3 = \left(\frac{\overline{V}_2^C - \overline{V}_0}{\overline{I}_2^C - \overline{I}_0}\right) = \left(\frac{\overline{V}_2^C - \overline{V}_1}{\overline{I}_2^C - \overline{I}_1}\right) \quad (۸)$$

گام پنجم) مقدار نهایی امپدانس تونن $(\overline{Z}_{th}^f)$ از میـانگین‌گیـری سـه امپدانس تونن محاسبه شده در گامهای دوم، سـوم و چهـارم محاسـبه می‌شود.

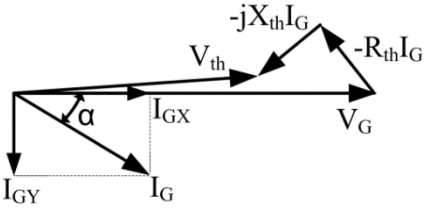
$$\overline{Z}_{th}^f = \left(\frac{\overline{Z}_{th}^1 + \overline{Z}_{th}^2 + \overline{Z}_{th}^3}{3}\right) \quad (۹)$$

زمانیکه $\overline{Z}_{th}^f$ محاسبه شد، میتوان ولتاژ تونن $(\overline{V}_{th})$ را از فازورهای تصحیح شده و $\overline{Z}_{th}^f$ به‌صورت رابطه (۱۰) محاسبه نمود.

$$V_{th} = V_0^C - Z_{th}^f I_0^C = V_1^C - Z_{th}^f I_1^C = V_2^C - Z_{th}^f I_2^C \quad (۱۰)$$

هرچند در روش ارائه شده لغزش فاز اندازه‌گیریهای فازوری متوالی اصلاح می‌شود، اما همچنان وجود داده‌های دارای نویز و شرایط گذرای سیستم (بـه طـور مثـال در زمـان خطـا و یـا اغتشاشـات ناگهـانی در سیستم) موجب می‌شوند که محاسبات با خطای غیرقابل‌قبـول همـراه شوند. لذا برای مصون‌سازی روش ارائه شده بـه انـدازه‌گیریهـای دارای نویز و غیرقابل قبول روش زیر پیشنهاد می‌شود.

شکل (۶) دیـاگرام فـازوری پارامترهـای ولتـاژ و جریـان ترمینـال ژنراتور را نشان می‌دهد. V_G ولتاژ فاز به زمین ترمینال و I_G جریان فـاز ژنراتور می‌باشند.



شکل (۶): دیاگرام فازوری پارامترهای ترمینال ژنراتور

از این دیاگرام خواهیم داشت:

$$(V_G - R_{th} I_{GX} + X_{th} I_{GY})^2 + (R_{th} I_{GY} + X_{th} I_{GX})^2 \\ = V_{th}^2 \quad (۱۱)$$

با فرض $I_G^2 = I_{GX}^2 + I_{GY}^2$ رابطه (۱۱) به (۱۲) تبدیل خواهد شد:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.6.9]

$$V_G^2 - 2R_{th}V_GI_{GX} + 2X_{th}V_GI_{GY} + R_{th}^2I_G^2 + X_{th}^2I_G^2 = V_{th}^2 \quad (۱۲)$$

با تقسیم طرفین رابطه (۱۲) بر I_G^2 خواهیم داشت:

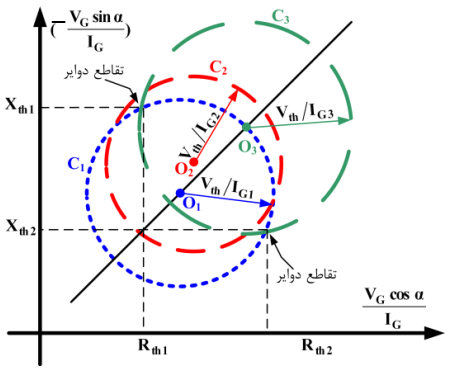
$$\left(R_{th} - V_G\frac{I_{GX}}{I_G^2}\right)^2 + \left(X_{th} + V_G\frac{I_{GY}}{I_G^2}\right)^2 = \left(\frac{V_{th}}{I_G}\right)^2 \quad (۱۳)$$

با کمی ساده‌سازی رابطه (۱۳) به صورت (۱۴) نوشته می‌شود (تمامی مقادیر بیانگر دامنه هستند).

$$\left(R_{th} - \frac{V_G}{I_G}\cos\alpha\right)^2 + \left(X_{th} + \frac{V_G}{I_G}\sin\alpha\right)^2 = \left(\frac{V_{th}}{I_G}\right)^2 \quad (۱۴)$$

در صفحه مختصات مختلط $R_{th} - X_{th}$ رابطه (۱۴) مختصات دوایری را بیان می‌کند که مرکز آنها در $\left(\frac{V_G\cos\alpha}{I_G}, -\frac{V_G\sin\alpha}{I_G}\right)$ و شعاع آنها برابر $\left(\frac{V_{th}}{I_G}\right)$ می‌باشند. با داشتن حداقل دو بردار اندازه‌گیری‌شده (V_G, I_G) دو دایره تشکیل خواهد شد. بدین ترتیب محل تقاطع دو دایره بیانگر پارامترهای مدار معادل تونن (R_{th}, X_{th}) می‌باشد. در این مقاله پارامترهای مدار معادل تونن از سه اندازه‌گیری متوالی محاسبه می‌شوند. برای اینکه سه اندازه‌گیری متوالی بیانگر یک مدار معادل تونن باشند، لازم است که محلهای تقاطع سه دایره در یک نقطه باشد. این امر مستلزم آن است که مراکز همه دایره‌ها بر روی یک خط مستقیم قرار گیرند. اگر در سه اندازه‌گیری متوالی، مراکز دوایر بر روی یک خط مستقیم قرار نگیرند در اینصورت یا لازم است که از اندازه-گیریهای دیگری به منظور محاسبه امپدانس تونن استفاده نمود و یا اندازه‌گیریها را با تخمین خطی اصلاح نمود تا مراکز دوایر بر روی یک خط قرار گیرند.

به طور مثال، در شکل (۷) اندازه‌گیریهای متوالی اول و سوم که مراکز دوایر برای آنها به‌ترتیب O_1 و O_3 می‌باشند، بر روی یک خط راست قرار گرفته‌اند، اما مرکز دایره ناشی از اندازه‌گیری دوم، O_2 برروی خط واصله قرار نگرفته‌است. لذا به‌منظور استفاده از اندازه‌گیری دوم در محاسبات مدار معادل تونن، لازم است که اندازه‌گیری دوم به-گونه‌ای اصلاح شود تا مرکز آن نیز بر روی خط واصل بین O_1 و O_3 قرار بگیرد. در این حالت محل تقاطع هرسه دایره مطابق شکل، یک مقدار را برای مدار معادل تونن به‌دست خواهند داد.



شکل (۷): روش مرکز دوایر برای اصلاح فازورهای متوالی

۳- شبیه سازی و مقایسه نتایج

به منظور صحت سنجی الگوریتم ارائه شده، از شبکه ۳۰ باس IEEE که در نرم‌افزار DigSILENT در حوزه زمان شبیه سازی شده است استفاده می‌شود. این شبکه در شکل (۸) نشان داده شده است.

کلیه اندازه‌گیریها در حوزه زمان با فرکانس ۲ کیلوهرتز انجام شده و پس از آن به منظور محاسبه مقادیر فازوری به نرم‌افزار MATLAB که در آن برنامه محاسباتی فازور، بر اساس استاندارد IEEE C37.118 نوشته‌شده‌است وارد می‌شوند. قابلیت الگوریتم ارائه شده در دو سناریوی متفاوت بررسی شده است. این سناریوها عبارتند از تغییرات ناگهانی بار در سیستم و خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در خطوط انتقال مجاور ژنراتور. هدف از شبیه‌سازی محاسبه مدار معادل تونن از دیدگاه ژنراتور $G2$ می‌باشد که مطابق شکل (۸) به ترمینال شماره ۲ متصل است. از آنجاییکه در شبکه ۳۰ باس استاندارد، مقدار R_{th} خیلی کوچکتر از X_{th} می‌باشد، لذا تنها مقادیر X_{th} در نتایج آورده‌شده‌است.

۳-۱- تغییرات ناگهانی بار در سیستم

به منظور رسیدن سیستم به حالت عادی اجازه داده می‌شود که شبیه سازی سیستم به مدت ۲۰ ثانیه انجام شود. در ثانیه بیستم شبیه‌سازی، باری معادل ۶۳ مگاوات و ۱۸ مگاوار در ترمینال شماره ۲۶ مطابق شکل (۸) به سیستم اعمال می‌شود. به دلیل ورود بار و پاسخ سیستم، فرکانس دستخوش نوسان خواهد شد و درنتیجه در مقادیر فازورهای اندازه‌گیری شده توسط PMUها لغزش فاز خواهیم داشت.

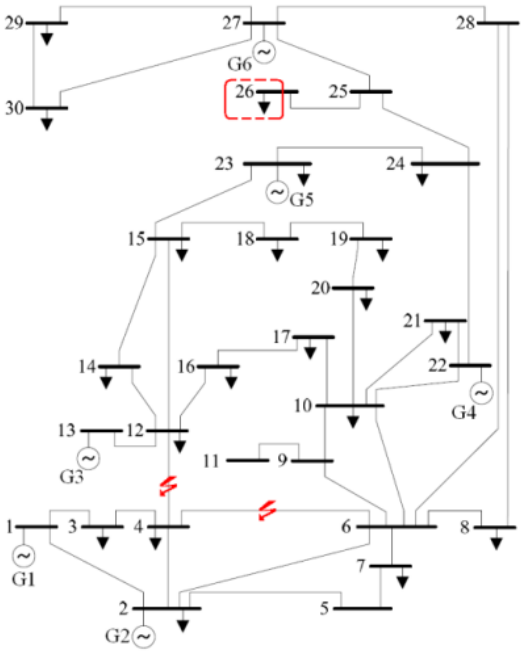
شکلهای شماره (۹) و (۱۰) به ترتیب ادمیتانس و ولتاژ تونن محاسبه‌شده توسط الگوریتم ارائه شده را نشان می‌دهند. به منظور مقایسه نتایج، پاسخ روش توسعه داده‌شده در مرجع [14] به عنوان معیار مقایسه مدنظر قرار گرفته‌است. بر روی شکل (۹) همچنین مقدار عددی مولفه امپدانس مثبتی که از ترمینال شماره ۲ اندازه‌گیری می-شود نیز نشان داده‌شده‌است. همانطور که از شکل برمی‌آید پس از اعمال بار، تغییر قابل توجهی در اندازه این امپدانس دیده نمی‌شود. دلیل این امر را می‌توان در دور بودن نسبی بار از ژنراتور $G2$ و اندازه کوچک بار در مقایسه با کل بار سیستم دانست.

مقادیر صحیح برای راکتانس، مقاومت و ولتاژ تونن از دیدگاه باس شماره ۲ به ترتیب برابر ۰/۱۷۲ اهم، ۰/۰۰۸ اهم و ۱۰ کیلوولت می-باشد که توسط محاسبات اتصال کوتاه از نرم‌افزار DigSILENT استخراج شده‌است. مقایسه نتایج بیانگر دقت بالاتر الگوریتم ارائه‌شده در محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن می‌باشد چراکه پاسخ مزبور از نوسانات و اغتشاشات کمتری برخوردار است.

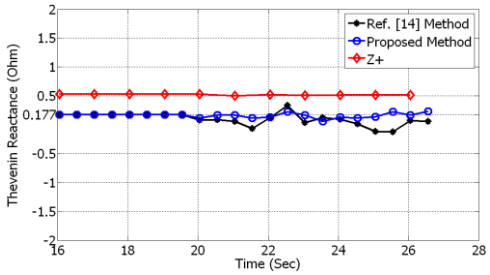
در شکل (۹) امپدانس مثبت سیستم نیز از دید ترمینال شماره ۲ رسم شده‌است. هرچند در امپدانس مثبت، تغییر قابل توجهی دیده نمی‌شود اما باید توجه داشت که تغییر بار در سیستم موجب تغییر فرکانس سیستم و در نتیجه لغزش فاز خواهد شد. در شکلهای (۱۱) و (۱۲) فازور ولتاژ و جریان ژنراتور برروی صفحه مختلط رسم شده‌است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

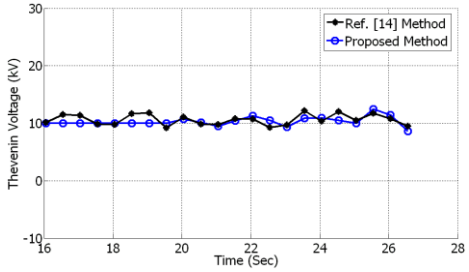
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.6.9]



شکل (۸): تک‌خطی شبکه استاندارد ۳۰ باس IEEE

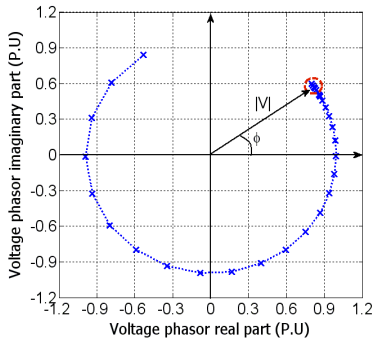


شکل (۹): تخمین راکتانس تونن در هنگام تغییرات بار

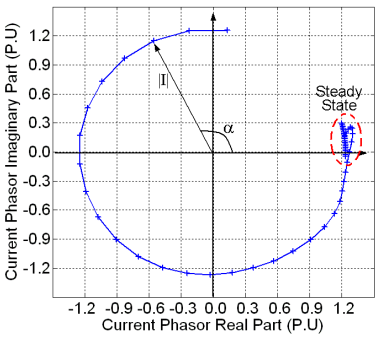


شکل (۱۰): تخمین ولتاژ تونن هنگام تغییرات بار

تجمع نقاط ثبت شده در دایره کوچک مربوط به زمانیست که هنوز بار در ترمینال ۲۶ وصل نشده است. پس از وصل بار در ثانیه ۲۰، فرکانس دستخوش تغییرات شده و فازورهای ارسالی از PMU دارای همان دامنه قبلی اما لغزش فاز قابل توجهی خواهند بود که از مکان اولیه خود دور شده و گرد دایره نشان داده‌شده در شکل خواهند چرخید. بین هردو فازور متوالی در این حالت اختلاف فازی مشاهده می‌شود که بخش عمده آن به‌دلیل لغزش فاز می‌باشد. لذا باید قبل از استفاده در محاسبات تونن، لغزش فاز بوجود آمده را شناسایی و تصحیح نمود.

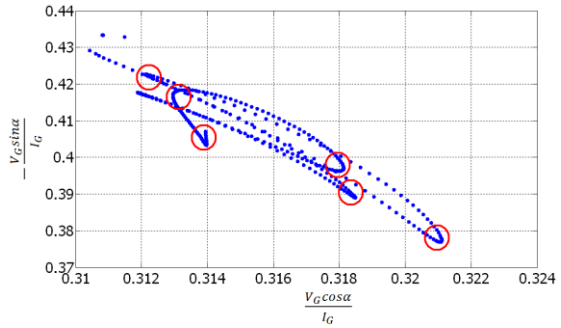


شکل (۱۱): فازور یکه شده ولتاژ ژنراتور قبل و بعد از ورود بار



شکل (۱۲): فازور یکه شده جریان ژنراتور قبل و بعد از ورود بار

همانطور که در بخش قبل شرح داده‌شد، فازورهای قابل قبول در سه اندازه‌گیری متوالی برای محاسبه مدار معادل تونن آنهایی هستند که مقدار $\left(\frac{V_G\cos\propto}{I_G}, -\frac{V_G\sin\propto}{I_G}\right)$ برای آنها برروی یک خط مستقیم قرار داشته‌باشد. این نقاط در شکل (۱۳) برای سناریوی اول رسم شده‌اند. مشاهده می‌شود که غیر از معدود نقاطی که داخل دوایر کوچک قرار گرفته‌اند، سایر نقاط تقریبا بر روی یک خط مستقیم قرار دارند و می‌توان در محاسبه مدار معادل تونن از آنها بهره برد. نقاط قرار گرفته در داخل دوایر یا باید کنار گذاشته‌شوند و یا پس از تخمین خطی مورد استفاده قرار گیرند.



شکل (۱۳): نمایش یکه شده $\left(\frac{V_G\cos\propto}{I_G}, -\frac{V_G\sin\propto}{I_G}\right)$ قبل و بعد از ورود بار

۳-۲- خطای اتصال کوتاه در سیستم

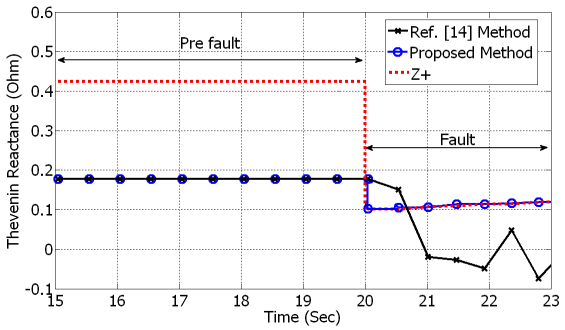
به منظور بررسی پاسخ الگوریتم به حالتهای گذرای شدید در سیستم، پاسخ آن در هنگام بروز اتصال کوتاه سه‌فاز ملاحظه می‌شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

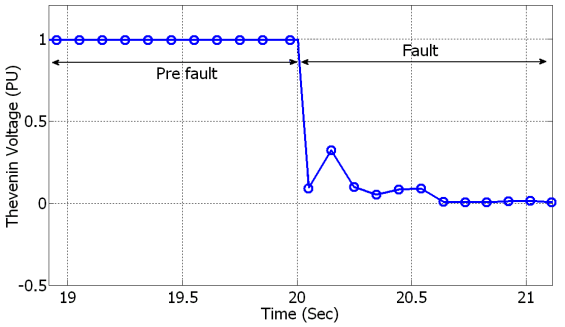
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.6.9]

بدین منظور همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده‌است دو خطای اتصال کوتاه به طور همزمان بر روی خطوط ارتباطی ترمینالهای ۴ به ۶ و ۴ به ۱۲ با امپدانس صفر در ثانیه ۲۰ به سیستم اعمال می‌شود. انتظار می‌رود که امپدانس و ولتاژ تونن افت قابل توجه‌ای داشته‌باشند. نتایج در شکلهای (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده‌اند.

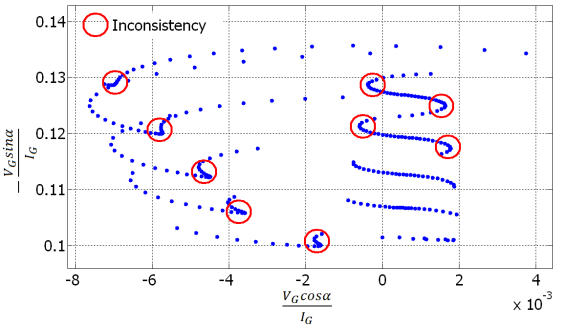
همانطور که از شکلهای (۱۴) و (۱۵) برمی‌آید، روش ارائه شده در این تحقیق پاسخ بهتری را نسبت به روش بیان شده در مرجع [14] به‌همراه داشته و نوسانات آن به نسبت روش مزکور بسیار کمتر می‌باشد. در هنگام بروز خطا به‌دلیل تغییرات شدید در فرکانس سیستم، فازورهای ارسالی از PMU لغزش فاز شدیدتری را تجربه خواهند کرد. در شکل (۱۶) مقدار $\left(\frac{V_G\cos\propto}{I_G}, -\frac{V_G\sin\propto}{I_G}\right)$ در هنگام بروز خطا نشان داده‌شده است. مشاهده می‌شود که نسبت به سناریوی قبل فازورهای غیر قابل قبول بیشتر شده و نقاط بیشتری از حالت خطی خارج شده‌اند. این نقاط در دوایر کوچکی که در شکل مشخص می‌باشند قرار گرفته‌اند.



شکل (۱۴): راکتانس تونن قبل و بعد از وقوع خطا در سیستم



شکل (۱۵): ولتاژ تونن قبل و بعد از وقوع خطا در سیستم

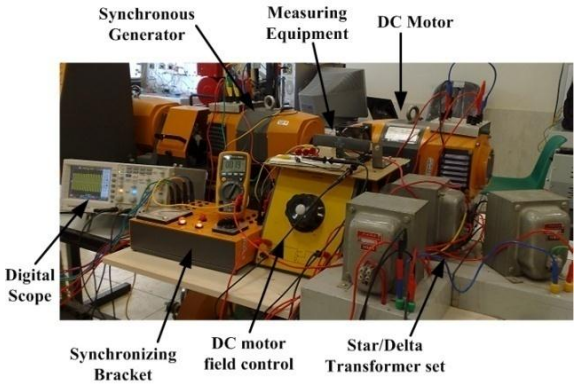


شکل (۱۶) نمایش یکه شده $\left(\frac{V_G\cos\propto}{I_G}, -\frac{V_G\sin\propto}{I_G}\right)$ قبل و بعد از بروز خطا

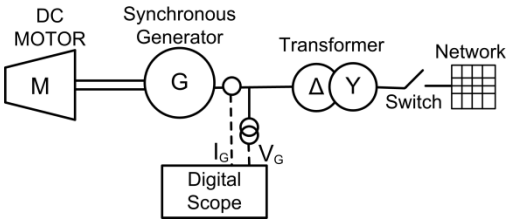
در این حالت اهمیت حذف فازورهای غیرقابل‌قبول با توجه به معیار ذکر شده در بخش قبل مشخص می‌شود.

۴- نتایج عملی

پاسخ الگوریتم در آزمایشگاه حفاظت دانشگاه شهیدبهشتی توسط یک مجموعه آزمایشگاهی شامل موتور جریان مستقیم و ژنراتور سنکرون که به شبکه آزمایشگاه متصل شده‌اند، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌است. شمای کلی و دیاگرام تک خطی مجموعه آزمایشگاهی در شکلهای (۱۷) و (۱۸) نشان داده‌شده است.



شکل (۱۷): شمای مجموعه تست در آزمایشگاه حفاظت



شکل (۱۸): تک‌خطی مجموعه تست در آزمایشگاه حفاظت

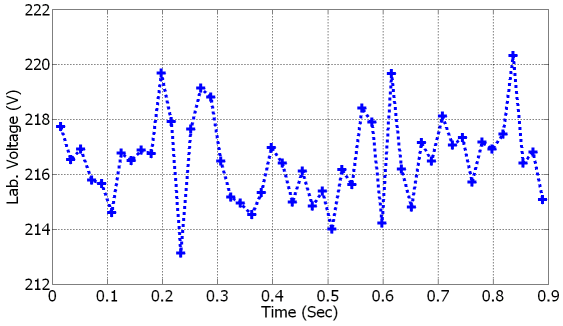
مجموعه شامل یک موتور DC به‌عنوان محرک ژنراتور سه فاز سنکرون که آن نیز به شبکه آزمایشگاه متصل می‌باشد، است. یک ثبات دیجیتال به منظور ثبت ولتاژ و جریان ژنراتور که توسط ترانسفورماتورهای مبدل اندازه‌گیری می‌شوند، به‌کار گرفته می‌شود. فرکانس نمونه‌گیری برابر ۱ کیلوهرتز تنظیم شده است. به منظور اتصال ژنراتور به شبکه آزمایشگاه از یک تابلوی سنکرون کننده استفاده می‌شود.

هدف از آزمایش محاسبه مدار معادل تونن شبکه آزمایشگاه از دیدگاه ترمینال ژنراتور می‌باشد. بدلیل وجود نوسانات در ولتاژ آزمایشگاه، محاسبه با دشواری مواجه خواهد بود چراکه ولتاژ در دواندازه‌گیری متوالی ثابت نخواهند ماند. شکل موج دامنه ولتاژ آزمایشگاه در شکل (۱۹) نشان داده‌شده است.

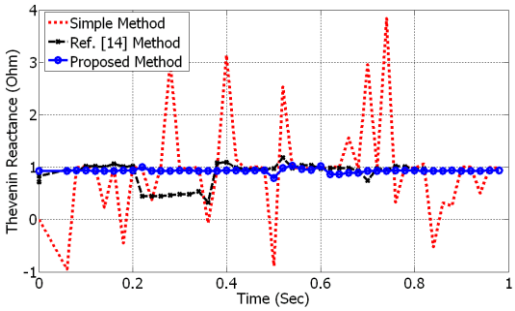
نتایج محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن آزمایشگاه، در شکلهای (۲۰) الی (۲۲) نشان داده شده است. شکل (۲۰) راکتانس تونن، شکل (۲۱) مقاومت تونن و شکل (۲۲) ولتاژ تونن را نشان می‌دهند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

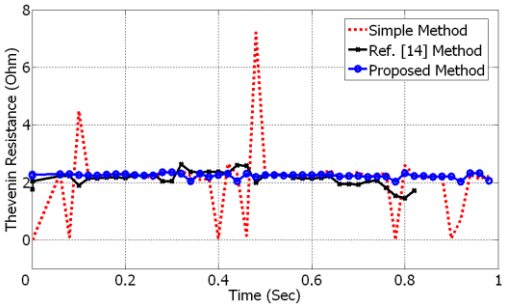
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.6.9]



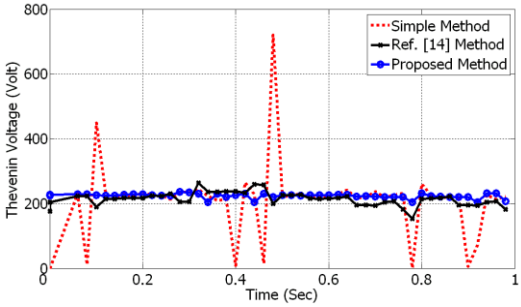
شکل (۱۹): دامنه و تغییرات ولتاژ آزمایشگاه در هنگام آزمایش



شکل (۲۰): راکتانس تونن محاسبه شده در آزمایشگاه حفاظت



شکل (۲۱): مقاومت تونن محاسبه شده در آزمایشگاه حفاظت



شکل (۲۲): ولتاژ تونن محاسبه شده در آزمایشگاه حفاظت

در این بخش به منظور مقایسه نتایج، پاسخ دو الگوریتم دیگر نیز در نظر گرفته شده‌است. اولین روش بر اساس روابط (۱) و (۲) و بدون تصحیح لغزش فاز فازورهای متوالی می‌باشد که در شکلها با عنوان "Simple Method" و با منحنی نقطه‌چین نمایان شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود پاسخ به هیچوجه قابل قبول نمی‌باشد چراکه دارای نوسانات بسیار زیادی است. در روش دوم محاسبات مدار معادل تونن بر اساس مرجع [14] انجام شده‌است که در شکلها با عنوان "Ref.[14] Method" شناخته می‌شود. درنهایت روش ارائه شده در این تحقیق با عنوان "Proposed Method" می باشد که عملا بهترین و دقیقترین جواب مرتبط با همین روش می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشی مبتنی بر بردارهای مجازی در روش مثلث بردارها به منظور تعیین و تصحیح لغزش فاز فازورهای ارسالی از PMU به منظور محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن سیستم قدرت از دیدگاه ترمینال ژنراتور ارائه شده است. روش مزبور مشکل ناهماهنگی داده‌های ارسالی را با استفاده از تمرکز نقاط بر روی دوایر مشخص مرتفع نموده و بدین ترتیب فازورهای نامرتبط و غیرقابل‌قبول از محاسبات حذف خواهند شد. به منظور صحت سنجی و تخمین دقت الگوریتم از شبیه‌سازی شبکه ۳۰ باس و آزمایشگاه حفاظت استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که پاسخ الگوریتم در زمان بهره‌برداری عادی شبکه به پاسخهای الگوریتمهای دیگر در این زمینه نزدیک می‌باشد. اما، در زمان اغتشاش در سیستم، مخصوصا بروز خطا و وجود اغتشاش و نوسان در ولتاژ سیستم، پاسخها به مراتب دقیقتر و پایدارتر می‌باشند. مولفین براین عقیده‌اند که روش مزبور می‌تواند به طور موثری در محاسبات تخمین پارامترهای مدار معادل تونن سیستمهای قدرت در حالت آنلاین مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] B. Alinejad, M. Akbari, H. Kazemi, „PMU-based distribution network load modelling using Harmony Search Algorithm", 17th Conference on Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 2012, pp 1-6

[2] H. Karegar, B. Alinejad, "On-Line transmission line zero sequence impedance estimation using Phasor Measurement Units", 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2012, pp 1-5

[3] S. Soni, S. Bhil, D. Mehta, S. Wagh, "Linear state estimation model using phasor measurement unit (PMU) technology", 9th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2012, pp 1-6

[4] A. M. Chebbo, M. R. Irving, and M. J. H. Sterling, "Voltage Collapse proximity indicator, behavour and implications," IEE Proc.-C, vol. 139, no. 3, pp. 241-252, May 1992.

[5] M. M. Elkateb, S. Abdelkader, and M. S. Kandil, "Linear indicator for voltage collapse in power systems," IEE Proc.-Pt. C. vol. 144, no. 2, pp. 139-146, Mar. 1997.

[6] S. Abdelkader and D. Flynn, "Graphical determination of network limits for wind power integration," IET Gen., Transm., Distrib., vol. 3, no. 9, pp. 841-849, 2009.

[7] S. Abdelkader and B. Fox, "Voltage stability assessment for system with large wind power generation," Int. J. Power Syst. Optimiz., vol 2, no. 1, pp. 99-104, Jan. 2010.

[8] M. C.-Y. Chuang, S.-J. S. Tsai, Chia-Chi Chu, "Fault locating estimation using Thévenin equivalent in power systems", power Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp 1-7, 2008

[9] G. Fusco and M. Russo, "Adaptive voltage regulator design for synchronous generator," IEEE Trans. Energy Convers., vol 23, no. 3, pp. 946-956, Sep. 2008.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.6.9]

[10] S. Corsi and G. N. Taranto, "A real time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements," IEEE Trans. Power Syst., vol 23, no. 3, pp. 1271-1279, Aug. 2008.
[11] I. Smon, G. Verbic, F. Gubina, "Local voltage stability index using Tellegen's theorem," IEEE Trans., Power Syst., vol. 21, no. 3, pp. 1267-1275, Aug. 2006
[12] W. Munan, L. Baozhu, D. Zhelin, " An improved recursive assessment method of Thévenin equivalent parameters based on PMU measurement", Power Engineering and Automation Conference (PEAM), pp. 372-375, 2011.
[13] S. Abdelkader, "Online Thévenin's Equivalent Using Local PMU Measurements", International conference on renewable energy and power quality (ICREPQ 11), pp. 1-4, 2010
[14] S.M. Abdelkader, D.J. Morrow, "Online Tracking of Thévenin Equivalent Parameters Using PMU Measurements", IEEE Trans. on Power Syst., vol. 27, no. 2, pp. 975-983, 2012.
[15] S.-J.S Tsai, K.-H Wong, "On-line estimation of Thévenin equivalent with varying system states", IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp 1-7, 2008.
[16] J. Lazaro, J.F. Miñambres, M.A. Zorrozua, "Filtering Techniques: An historical overview and summary of current status", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13), pp 1-5, 2013
[17] Vanouni, M.: 'Discussion of "Online Tracking of Thévenin Equivalent Parameters Using PMU Measurements', IEEE Trans. on Power Syst., 28, (2), May 2013, pp. 1899

پیوست ۱

براساس تئوری مطرح شده در مرجع [14]، شرط لازم و کافی برای وجود معادل تونن در یک نقطه از سیستم بر اساس سه اندازه-گیری متوالی انجام شده آن است که رابطه (۱۵) برقرار باشد.

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ V_0 & V_1 & V_2 \\ I_0 & I_1 & I_2 \end{vmatrix} = 0 \qquad (۱۵)$$

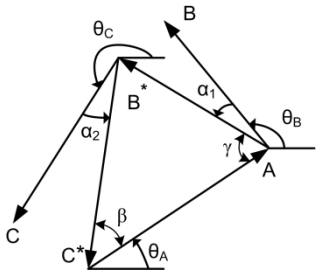
با فرض اندازه‌گیری اول (V_0, I_0) بعنوان مرجع، اندازه‌گیریهای متوالی بعدی به‌صورت $(V_1 e^{-j\alpha 1}, I_1 e^{-j\alpha 1})$ و $(V_2 e^{-j\alpha 2}, I_2 e^{-j\alpha 2})$ اصلاح خواهند شد. باجایگذاری این مقادیر در رابطه (۱۵) خواهیم داشت:

$$A + B^* + C^* = 0 \qquad (۱۶)$$

که در آن $B^* = Be^{j\alpha 1}$، $C^* = Ce^{j\alpha 2}$ و

$$A = \begin{vmatrix} V_1 & V_2 \\ I_1 & I_2 \end{vmatrix}, B = \begin{vmatrix} V_2 & V_0 \\ I_2 & I_0 \end{vmatrix}, \quad C = \begin{vmatrix} V_0 & V_1 \\ I_0 & I_1 \end{vmatrix} \qquad (۱۷)$$

رابطه (۱۶) بیان می‌دارد که اگر سه اندازه‌گیری فازوری متوالی متعلق به یک معادل تونن مشخص باشند، سه بردار A، B و C تشکیل مثلث بردارها مطابق شکل (۲۳) را خواهند داد.



شکل (۲۳): مثلث بردارها

بر اساس مثلث تشکیل شده در شکل (۲۳) می‌توان زوایای α_1 و α_2 را مطابق روابط (۱۸) یا (۱۹) محاسبه کرد.

$$\alpha_1 = \pi + \theta_A - \gamma - \theta_B$$
$$\alpha_2 = \pi + \theta_A + \beta - \theta_C \qquad (۱۸)$$

$$\alpha_1 = \pi + \theta_A + \gamma - \theta_B$$
$$\alpha_2 = \pi + \theta_A - \beta - \theta_C \qquad (۱۹)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.6.9]