

الگوریتم سریع برای تشخیص خروج از سنکرون ژنراتور هنگام بمباران الکترومغناطیسی

حبیب‌ا... اعلمی^{۱*}، محسن آقازاده^۲، رضا دشتی^۳

۱- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۲- کارشناس ارشد ۳- استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۳/۱۱/۲۷، پذیرش: ۹۴/۰۶/۲۲)

چکیده

بمب‌های الکترومغناطیسی از یک پالس الکترومغناطیسی قوی برای تخریب هدف استفاده می‌کنند. موقع استفاده از چنین بمب‌هایی، به دلیل به وجود آمدن شار مغناطیسی قوی، جریان زیادی در خطوط انتقال ظاهر می‌شود که برای تجهیزات مختلف الکتریکی و الکترونیکی می‌تواند مخرب باشد. در این مقاله الگوریتمی جدید معرفی می‌شود تا ضمن حفظ انسجام شبکه الکتریکی، از بروز نقص در تجهیزات الکتریکی نظامی در طی بمباران الکترومغناطیسی جلوگیری شود. در این تحقیق که از مفهوم معیار سطوح برابر اصلاح شده در حوزه زمان بهره می‌برد، فرض شده است رله‌های حفاظتی خطوط انتقال قادر به تشخیص اضافه جریان‌ها بوده و فرمان‌های لازم را به مدارشکن‌ها ارسال می‌کنند تا خطوط مربوطه را جدا کنند. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، به جای استفاده از معیار سطوح برابر در حوزه فرکانس از سطوح برابر در حوزه زمان استفاده شده، نوسان‌های سریع توان بررسی شده و بر اساس نتایج به دست آمده از آن، خروج از سنکرون ژنراتورها به سرعت تشخیص داده می‌شود. سپس حفاظت‌های لازم برای پایداری سامانه و جلوگیری از فروپاشی شبکه به عمل می‌آید. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه روش پیشنهادی با روش استاندارد مستطیل مرکزی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مشابه قبلی از دقت و سرعت بالاتری برخوردار بوده، نیازی به کاهش ابعاد سامانه چند ماشینه ندارد و کارایی لازم برای حفظ انسجام شبکه را دارد.

کلید واژه‌ها: معیار سطوح برابر، خروج از سنکرون، پایداری، بمباران الکترومغناطیسی.

A Fast Algorithm for Detecting Loss of Synchronism of Generator during Electromagnetic Bombing

H. A. Alami*, M. Aghazadeh, R. Dashti

Imam Hossein University

(Received: 16/02/2015; Accepted: 13/09/2015)

Abstract

Electromagnetic bombs use a powerful electromagnetic pulse to destroy the target. When using this kind of bombs, due to presence of strong magnetic flux, high voltages and currents appear on the transmission lines, which are harmful and destructive for all kinds of electrical and electronic equipment. In this paper a new algorithm is introduced with which robustness of electrical network and its electrical components are preserved in a possible electromagnetic attack. In this work, that used from Time-Based Improved Equal Area Criterion (TBIEAC) idea, it is assumed that protective relays of transmission lines are able to detect the over currents and send commands to circuit breakers for disconnecting related lines. Here, with the use of presented algorithm, fast power swings are scrutinized. Based on the results obtained, a decision is made to identify if the specified generator is subjected to a loss of synchronism or not. The simulation results show that the proposed method has higher response and precision compared with the previous methods.

Keywords: Equal Area Criterion, Loss of Synchronism, Stability, Electromagnetic Bomb.

۱. مقدمه

الکترومغناطیسی می‌تواند آسیب‌های جدی بر تجهیزات شبکه قدرت مانند کلیدها، ترانسفورماتورها، کابل‌ها، خطوط هوایی، دستگاه‌های اندازه‌گیری و تجهیزات کنترلی وارد نماید [۳]. وقتی خط انتقالی در معرض بمب الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد، به دلیل ایجاد الکترون‌های آزاد حاصل از بمب، ممکن است خط دچار اتصال کوتاه شود. این خطای شدید موجب یک نوسان سریع توان می‌شود که به نوبه خود کار رله برای تشخیص خطا را دشوار می‌کند. در نتیجه، ژنراتورهای یک ناحیه ممکن است با وضعیت خروج از سنکرون مواجه شوند که در صورت عدم انجام عملیات پیشگیرانه شاید باعث خاموشی سراسری سامانه قدرت شود. بنابراین لازم است تا الگوریتمی سریع طراحی شود تا این نوسانات سریع توان تشخیص داده شود. حفاظت خروج از سنکرون به عنوان کمک و راهکاری برای پایداری سامانه طراحی شده است. رله‌های خروج از سنکرون شرایطی را تشخیص می‌دهند که در آن ژنراتورهای یک بخش از سامانه شتابدار می‌شوند در حالی که ژنراتورهای بخش دیگری از سامانه کند شده و شتاب خود را کاهش می‌دهند. موقع بروز شرایط خروج از سنکرون، رله یا ژنراتور را ایزوله می‌کند و یا سامانه را در نقاط از پیش تعیین شده جداسازی می‌کند [۴]. زاویه توان (δ) در طی نوسان توان، نوسان کرده و منجر به نوسان کمیت‌های الکتریکی مثل فرکانس، ولتاژ، جریان و امپدانس در نقاط مختلف سامانه قدرت می‌شود. بیشتر روش‌های تشخیص خروج از سنکرون مبتنی بر حس کردن نوسانات و یا نرخ تغییر یکی از کمیت‌های سامانه هستند [۵].

یکی از معایب روش‌های مرسوم تشخیص نوسان توان نیاز به بررسی‌های تخصصی سامانه برای تعیین تنظیمات رله است. علاوه بر این، این تنظیمات ثابت هستند و موقع تغییرات مداوم شرایط عملکردی سامانه سازگار نخواهند بود [۶]. منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز به منظور تشخیص شرایط خروج از سنکرون به کار می‌روند [۷]. این روش‌ها نیازمند فرآیند سنگین و زمان‌بر آموزش هستند تا همه سناریوهای ممکن نوسان را آموزش دهند. بنابراین با افزایش اتصالات داخلی سامانه، این فرآیند آموزش دشوار شده و پیچیدگی این روش‌ها نیز افزایش می‌یابد [۸]. اخیراً روش‌های مبتنی بر واحد اندازه‌گیری فازور^۴ (PMU) برای تشخیص موقعیت خروج از سنکرون به کار گرفته شده است. این روش‌ها نیازمند تجهیزات مخابراتی زیادی در نقاط مختلف سامانه هستند تا اطلاعات را به دست آورند و مبتنی بر اندازه‌گیری‌های محلی نیستند [۹].

با استفاده از نمایش صفحه فضای حالت، سرعت ژنراتور و زاویه توان روشی برای حفاظت از خروج از سنکرون به دست می‌آید. زاویه بحرانی رفع خطا با استفاده از این قاعده محاسبه می‌شود که کل انرژی سامانه در لحظه رفع خطا باید برابر حداکثر انرژی پتانسیل سامانه باشد. زمان بحرانی رفع خطا متناظر با مقدار زاویه بحرانی رفع خطا به طور مستقیم از کالیبره کردن زمانی سرعت نسبی در برابر منحنی پاسخ زاویه توان به دست می‌آید. اثبات شده است که این

دامنه وسیعی از اغتشاشات بزرگ و کوچک ممکن است در یک سامانه قدرت و در طی شرایط عملکرد رخ دهد. برخی از این خطاها می‌تواند باعث خروج از سنکرون ژنراتورها از سایر بخش‌های سامانه شوند. در یک موقعیت خروج از سنکرون^۱، لازم است ژنراتور یا نواحی سامانه که به طور غیرسنکرون با هم کار می‌کنند، فوراً جدا شوند تا از قطعی‌های گسترده و آسیب رسیدن به تجهیزات پیشگیری شود [۱]. نوسان‌های بزرگ توان، پایدار یا ناپایدار، می‌توانند موجب عملکردهای ناخواسته رله‌ها در نقاط مختلف شبکه شوند که اغتشاشات سامانه را هرچه بیشتر تشدید کرده و منجر به قطعی‌های متوالی و در نتیجه خاموشی سراسری شبکه شوند [۲].

متخصصان در حدود نیم قرن پیش به این نکته پی بردند که اگر یک بمب هسته‌ای منفجر شود، امواج الکترومغناطیسی که در اثر انفجار پدید می‌آید، تمامی مدارهای الکترونیک را در یک محدوده خاص نابود می‌سازد. بزودی این نکته روشن شد که مناسب‌ترین امواج الکترومغناطیس برای ساخت بمب‌های الکترومغناطیس امواج فرکانس در حدود گیگا هرتز است. این نوع امواج قادرند به درون انواع دستگاه‌های الکترونیک نفوذ کنند و آن‌ها را از کار بیندازند. برای تولید امواج با فرکانس گیگا هرتز نیاز به تولید پالس‌های الکتریکی بود که تنها ۱۰۰ پیکو ثانیه تداوم پیدا کنند. یک شیوه تولید این نوع پالس‌ها استفاده از دستگاهی به نام «مولد ژنراتور مارکس» بود. گذشته از تولید پالس‌های الکترومغناطیسی طی انفجارهای هسته‌ای، روش‌های دیگری نیز برای تولید پالس‌های الکترومغناطیسی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را هدمندتر از محدوده‌ای اندک و فرکانس‌هایی خاص به کار برد. فناوری اساسی که تولید پالس‌های الکترومغناطیسی در سلاح‌ها توسط آن‌ها صورت می‌گیرد، غالباً عبارتند از: مولدهای فشرده‌سازی شار^۲ (FCG)، ژنراتورهای Magnet-Hydrodynamic و دسته‌ای از وسایل پر قدرت مایکروویو^۳ (HPM) که در رأس آن‌ها نوسان‌ساز با کاتد مجازی یا ویرکتور (Vircator) قرار دارد، البته روش‌های نوین تولید پالس‌های الکترومغناطیسی قدرتمند و نیز پالس‌های الکترومغناطیسی تولید شده در سامانه، استفاده از شتاب دهنده‌های ذرات باردار پر انرژی می‌باشد که می‌تواند حتی به سامانه‌های پوشش‌دار و حفاظت شده عادی نیز نفوذ کرده و تخریب لازم روی سامانه‌های الکتریکی و الکترونیک را بر جای گذارد [۳]. بمب‌های الکترومغناطیسی از یک پالس الکترومغناطیسی قوی برای تخریب هدف استفاده می‌کنند. موقع استفاده از چنین بمب‌هایی، به دلیل به وجود آمدن شار مغناطیسی قوی ناشی از استفاده از چنین بمب‌هایی، جریان زیادی در خطوط انتقال ظاهر می‌شود که برای تجهیزات مختلف الکتریکی و الکترونیک می‌تواند مخرب باشد. جریان شدید حاصل از انفجار بمب

¹ Loss of Synchronism

² Flux Compression Generator

³ Hi Power Microwave

⁴ Phasor Measurement Unit

بالا چندپایانه‌ای نیز مطرح است. این روش دارای مزیت اندازه‌گیری‌های سنکروفازور سراسر سامانه است. از داده‌های اندازه‌گیری شده برای اجرای چندین الگوریتم تشخیص نقطه‌به‌نقطه استفاده می‌شود. این روش مبتنی بر این پدیده است که در طی از دست رفتن پایداری سامانه، اختلاف فرکانس، اختلاف ولتاژ و اختلاف جریان در هر نقطه سامانه ظاهر می‌شود [۱۶].

طرح حفاظت خروج از سنکرون مبتنی بر انرژی نیز از روش‌های جدید می‌باشد. این روش مبتنی بر پایش پویای زمان واقعی سامانه است که از طریق پیاده‌سازی یک تخمین‌گر حالت دینامیکی حاصل می‌شود. این تخمین‌گر تنها از اندازه‌گیری‌های محلی استفاده کرده و نیازی به اندازه‌گیری‌های هم‌زمان PMU ندارد [۱۷].

نوآوری این تحقیق استفاده از مفهوم معیار سطوح برابر اصلاح شده در حوزه زمان^۳ (یعنی به جای استفاده از معیار سطوح برابر در حوزه فرکانس از سطوح برابر در حوزه زمان استفاده شود) می‌باشد. معیار سطوح برابر در حوزه زمان به جای منحنی‌های $P_e-\delta$ مبتنی بر منحنی‌های P_e-t است و از اطلاعات محلی توان الکتریکی خروجی استفاده می‌کند. روش معیار سطوح برابر حوزه زمان نیاز به اطلاعات پارامترهای دیگر سامانه قدرت مثل امیدانس خط، پارامترهای ماشین معادل و غیره ندارد. توان الکتریکی خروجی از اطلاعات ولتاژ و جریان محلی اندازه‌گیری شده در محل رله و انرژی گذرا، که ناحیه زیر منحنی P_e-t است، محاسبه می‌شوند و نوسان بسته به نواحی محاسبه شده، به عنوان پایدار یا ناپایدار دسته‌بندی می‌شود.

مؤثر بودن الگوریتم معرفی شده برای یک سامانه یک باس بی‌نهایت تک ماشینه (SMIB^۴) و یک سامانه با باس بی‌نهایت سه ماشینه با استفاده از ابزار شبیه‌ساز نرم‌افزاری PSCAD^۵ نشان داده شده است. مطالعات شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای تشخیص شرایط خروج از سنکرون ساده و سریع است. همچنین نتایج به‌دست آمده روی سامانه باس بی‌نهایت سه ماشینه نشان می‌دهد که برای استفاده مستقیم این روش برای سامانه‌های چند ماشینه نیازمند هیچگونه کاهش سامانه نیست.

۲. روش تحقیق

شکل (۱) یک چیدمان SMIB را نشان می‌دهد که برای نشان دادن معیار سطوح برابر معرفی شده در حوزه زمان به‌کار می‌رود [۱۸].

در شکل (۱) ولتاژ نقطه ارسال (Es) نسبت به ولتاژ نقطه دریافت (ER) به اندازه δ پیش‌فاز است. زاویه δ را زاویه نسبی روتور یا زاویه توان گویند. توان خروجی حالت دائم ژنراتور P_e بوده و با توان مکانیکی ورودی به ژنراتور (P_m) برابر است.

طرح نسبت به طرح دو کورکننده بسیار سریع‌تر است. این روش برای تشخیص اولین شرایط خروج از سنکرون یک سامانه دو ناحیه‌ای با استفاده از اطلاعات گسترده سامانه به‌کار می‌رود. در این روش نیاز است دو ژنراتور به صورت یک سامانه معادل تک ماشین باس بی‌نهایت نمایش داده شود [۱۰].

شرایط خروج از سنکرون حاصل از نوسان ناپایدار توان نیازمند تشخیص سریع نوسان توان و پس از آن جداسازی کنترل شده نواحی مختلف سامانه، در مکان‌های از قبل پیش‌بینی شده است. با این حال به منظور جداسازی، عملکرد محلی رله‌های دیستانس باید توسط تابع مسدود کننده خروج از سنکرون مسدود شود. این کار روش‌های تشخیص نوسان توان و خطاهای متعادل را بر اساس روابط ریاضی ارائه می‌دهد [۱۱].

تشخیص خطا و عملکردهای حفاظت خروج از سنکرون دو الزام مهم در رله‌های دیستانس هستند که به شرایط نوسان توان می‌پردازند. بخش اول روی توسعه تابع مسدود کننده خروج از سنکرون مبتنی بر آنتروپی موجهک با استفاده از نوسان پایدار توان و راه‌اندازی تابع در طی نوسان ناپایدار توان متمرکز است. بخش دوم از شاخص مبتنی بر آنتروپی تکین موجهک برای تمیز بین خطا و نوسان توان بهره می‌برد [۱۲].

بیشتر روش‌های فوق‌الذکر نیازمند تحلیل گسترده سامانه برای تنظیمات رله هستند و در نتیجه برای سامانه‌های قدرت چندماشینه، مسئله پیچیده‌ای را برای تنظیمات رله به وجود می‌آورند. تشخیص خروج از سنکرون مبتنی بر شرایط معیار سطوح برابر^۱ (EAC) کلاسیک در حوزه زاویه توان روشی جدید است که نیازمند منحنی‌های زاویه توان ($P_e-\delta$) قبل و پس از اغتشاش سامانه برای رله معلوم می‌باشد. منحنی‌های $P_e-\delta$ به پیکربندی سامانه بستگی دارند، بنابراین لازم است تجهیزات زیاد اندازه‌گیری و مخابراتی در نقاط مختلف موجود باشد تا اطلاعات سامانه فعلی را دریافت کنند [۱۳].

روشی مؤثر برای تشخیص ناحیه دچار خروج از سنکرون شده با تحلیل ویژگی تغییر اختلاف زاویه فاز شاخه در مکان‌های مختلف شبکه در زمان از دست دادن پایداری سامانه، به‌دست می‌آید. این روش نشان می‌دهد که بخش خروج از سنکرون تنها می‌تواند در وسط خطوط واقع بین گروه‌ها رخ دهد [۱۴].

روش پایش ناحیه گسترده برای تشخیص خروج از سنکرون بر اساس WAMS^۲ نیز امکان‌پذیر است. در حقیقت این روش یک سامانه کنترل خروج از سنکرون ناحیه گسترده توسعه یافته است. این روش یک روش تشخیص برخط برای نوسان توان ماشین مبتنی بر الگوریتم دسته‌بندی است [۱۵].

روش نوین حفاظت خروج از سنکرون در سامانه‌های انتقال ولتاژ

^۳ Time-Based Improved Equal Area Criterion (TBIEAC)

^۴ Single-Machine-Infinite-Bus

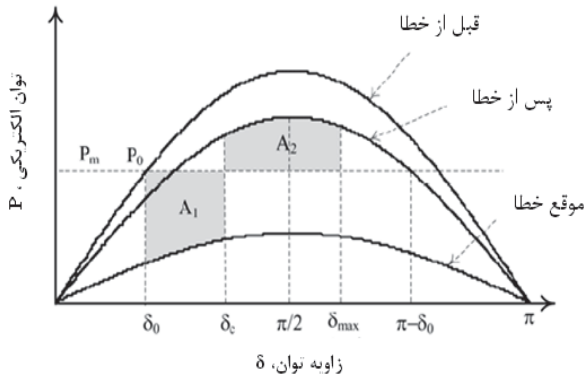
^۵ Power Systems Computer Aided Design

^۱ Equal Area Criterion

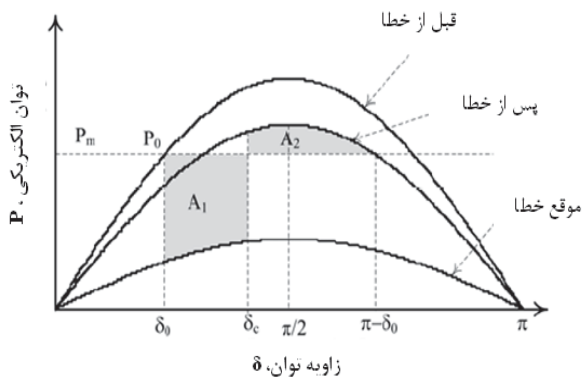
^۲ Wide-Area Monitoring Systems

که در آن، $\omega(t)$ سرعت روتور در طی گذراست. از رابطه‌های (۱ و ۲) رابطه زیر حاصل می‌شود:

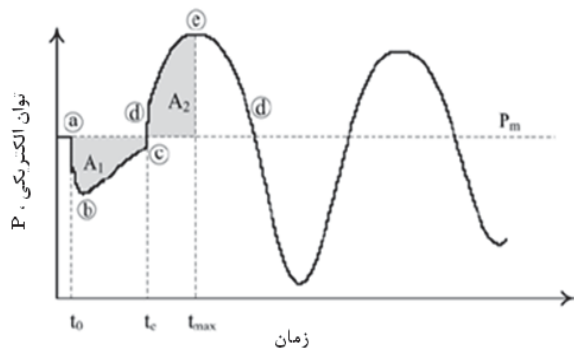
$$\frac{M}{\omega_s} d\omega_{\Delta} = (P_m - P_e)dt \quad (۳)$$



شکل ۲. منحنی‌های $P_e-\delta$ برای سامانه پایدار [۱۳]



شکل ۳. منحنی‌های $P_e-\delta$ برای سامانه ناپایدار [۱۳]



شکل ۴. منحنی P_e-t برای سامانه پایدار [۱۸]

با انتگرال‌گیری از رابطه‌های (۳ و ۴) رابطه زیر حاصل می‌شود:

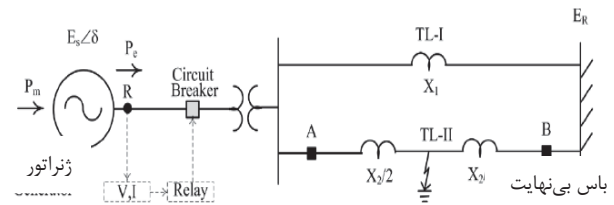
$$\frac{M}{\omega_s} \int d\omega_{\Delta} = \int (P_m - P_e)dt \quad (۴)$$

ناحیه A_1 از رابطه (۴) با قرار دادن حدود انتگرال از t_0 تا t_1 به دست می‌آید (شکل‌های (۴ و ۵)). t_0 زمان شروع خطا (زاویه توان متناظر برابر است با δ_0 و t_1 زمانی است که P_e از خط P_m تجاوز می‌کند.

سامانه دارای دو خط موازی است، TL-I و TL-II، به ترتیب با امپدانس‌هایی برابر با X_1 و X_2 می‌باشد. یک خطای سه فاز در وسط خط TL-II اعمال می‌شود. با باز شدن هم‌زمان کلیدهای 'A' و 'B' خطا با یک تأخیر رفع می‌شود. اگر رابطه (۱) با استفاده از روش‌های انتگرال‌گیری عددی حل شود، پاسخ گذرا متناظر با اغتشاش در پیکربندی SMIB به دست می‌آید [۱۸]:

$$\frac{M}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e(\delta) \quad (۱)$$

که در آن، M ثابت اینرسی ژنراتور و ω_s فرکانس سامانه است [۱۴]. مزیت معیار سطوح برابر در حوزه δ این است که پایداری سامانه را بدون حل رابطه نوسان توصیف می‌کند. مشکلات مربوط به معیار سطوح برابر در حوزه δ جهت تشخیص شرایط خروج از سنکرون در بخش قبلی بحث شد.



شکل ۱. دیاگرام تک خطی سامانه تک ماشین باس بی‌نهایت (SMIB)

الگوریتم عنوان شده مبتنی بر منحنی P_e-t است و این اطلاعات را می‌توان مستقیماً از اندازه‌گیری‌های محل رله به دست آورد. بنابراین الگوریتم معرفی شده، برای یافتن منحنی P_e-t ، نیازمند حل رابطه نوسان نیست. شکل (۲) منحنی‌های $P_e-\delta$ را برای سامانه پایدار نشان می‌دهد. شکل (۳) منحنی‌های $P_e-\delta$ را برای یک سامانه ناپایدار نشان می‌دهد.

از این دو منحنی برای بررسی معیار سطوح برابر در حوزه δ استفاده می‌شود. منحنی‌های P_e-t متناظر با دو منحنی $P_e-\delta$ در شکل‌های (۴ و ۵) نشان داده شده‌اند و این منحنی‌ها برای توصیف الگوریتم معرفی شده به کار می‌روند.

در شکل‌های (۲ و ۳)، δ_0 معرف زاویه توان قبل از خطا، δ_c معرف زاویه توان در لحظه رفع خطا و δ_{max} نمایانگر بیشترین نوسان زاویه توان است. معیار سطوح برابر در حوزه δ بیان می‌کند که برای پایدار بودن سامانه، A_1 برابر است با A_2 و ناحیه A_2 قبل از $\pi-\delta_0$ رخ می‌دهد. برای یک سامانه ناپایدار، ناحیه A_1 بزرگ‌تر از ناحیه A_2 بوده و ناحیه A_2 در $\pi-\delta_0$ اتفاق می‌افتد. بیشترین نوسان δ ، δ_{max} برای نوسان پایدار کمتر از $\pi-\delta_0$ است [۱۹].

عبارت‌های ریاضی برای ارزیابی نواحی A_1 و A_2 در حوزه زمان را می‌توان از رابطه نوسان (۱) به دست آورد. اگر انحراف سرعت روتور برابر ω_{Δ} باشد، آنگاه

$$\omega_{\Delta} = \omega(t) - \omega_s = \frac{d\delta}{dt} \quad (۲)$$

برای شرایط خروج از سنکرون به صورت زیر است:

$$A = \sum_{t_0}^{t_{max}} (P_e(t)|_{t_0-\Delta t} - P_e(t)) \Delta t > 0 \quad (10)$$

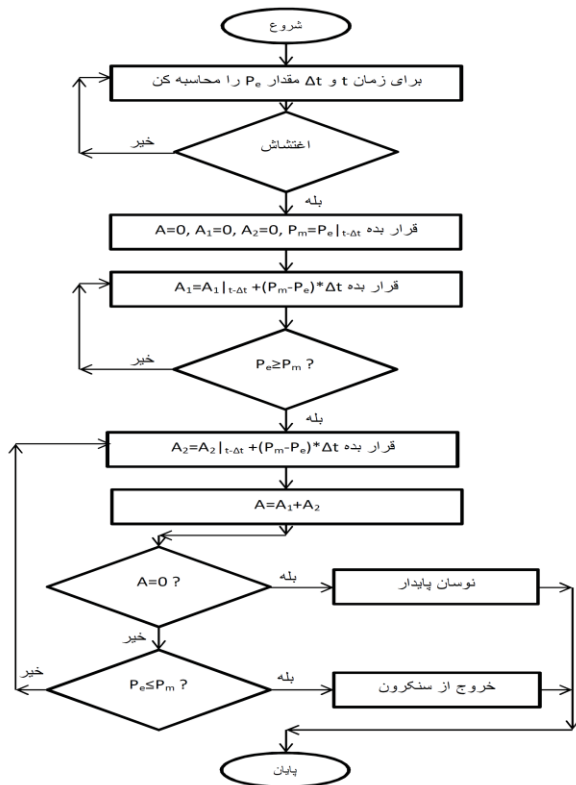
که در آن، t_0 زمانی است که $P_e(t) < P_e(t)|_{t-\Delta t}$ برای بار اول اتفاق می‌افتد، t_{max} زمانی است که $A|t = 0$ (پایدار) یا زمانی که در رابطه‌های (۹) و (۱۰) می‌باشد، Δt نمایانگر فاصله زمانی نمونه‌برداری است، زمانی که پس از آن مقدار جدید P_e برای رله خروج از سنکرون فراهم می‌شود.

در رابطه (۹) و حد t_{max} برای مورد پایدار همواره به خاطر تقریب انتگرال گیر با جمع به طور دقیق برابر صفر نمی‌شوند. به صورت زیر اصلاح می‌شوند:

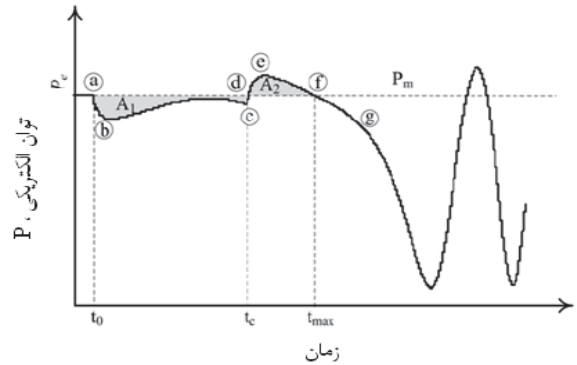
$$A = \sum_{t_0}^{t_{max}} (P_e(t)|_{t_0-\Delta t} - P_e(t)) \Delta t \leq 0 \quad (11)$$

که در آن، t_{max} زمانی که $A|t \leq 0$ و $A|t-\Delta t > 0$ (پایدار) است.

رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) در کنار شرایط برای t_0 و t_{max} شکل دهنده الگوریتم معرفی شده برای تشخیص خروج از سنکرون هستند. بر اساس الگوریتم معرفی شده، با توجه به شرایط پایدار یا خروج از سنکرون همیشه تصمیمی در t_{max} (زمان متناظر با δ_{max}) با خطایی برابر Δt یا کمتر، گرفته می‌شود. بنابراین الگوریتم کلی را می‌توان به صورت روندنمای شکل (۶) مطرح کرد. در رابطه (۹) فرض شده است که P_e ژنراتورها بدون تلفات هستند. با این حال، در یک سامانه واقعی، P_e محاسبه شده از طریق اندازه‌گیری‌های محلی در لحظه شروع خطا، باید تلفات و سایر بارهای (بار خانگی و غیره) متصل به ژنراتور را اصلاح کرد.



شکل ۶. روندنمای الگوریتم پیشنهادی



شکل ۵. منحنی P_e-t برای سامانه ناپایدار [۱۸]

توجه شود که در t_0 انحراف سرعت صفر می‌باشد، چون سرعت روتور سرعت سنکرون است.

$$A_1 = \int_{t_0}^{t_1} (P_m - P_e(t)) dt = \frac{M}{\omega_s} (\omega_{\Delta}|_{t_1} - \omega_{\Delta}|_0) \quad (5)$$

وقتی $P_m \geq P_e$ برای $t = t_0$ تا t_1 باشد، ناحیه A_1 مثبت است. به طور مشابه، ناحیه A_2 از رابطه (۴) با قرار دادن حدود انتگرال از t_1 تا t_{max} به دست می‌آید.

$$A_2 = \int_{t_1}^{t_{max}} (P_m - P_e(t)) dt = \frac{M}{\omega_s} (\omega_{\Delta}|_{t_{max}} - \omega_{\Delta}|_{t_1}) \quad (6)$$

که در آن، t_{max} زمانی است که $\delta = \delta_{max}$ باشد. وقتی $P_m \leq P_e$ برای $t = t_1$ تا t_{max} باشد، ناحیه A_2 منفی است. برای یک سامانه پایدار، در t_{max} سرعت روتور سرعت سنکرون می‌باشد، بنابراین انحراف سرعت صفر است. برای شرایط خروج از سنکرون، سرعت روتور در t_{max} از سرعت سنکرون بیشتر است. بنابراین کل ناحیه برای شرایط پایدار و خروج از سنکرون از رابطه‌های (۵) و (۶) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$A = A_1 + A_2 = \int_{t_0}^{t_{max}} (P_m - P_e(t)) dt = 0 \quad (7)$$

برای شرایط خروج از سنکرون به صورت زیر است:

$$A = A_1 + A_2 = \int_{t_0}^{t_{max}} (P_m - P_e(t)) dt > 0 \quad (8)$$

رابطه‌های (۷) و (۸) معادلات معیار برابر در حوزه زمان هستند و بیان می‌کند در طی دوره گذرا، اگر A_1 و A_2 طی منحنی P_e-t برابر باشند، سامانه پایدار می‌شود. اما اگر ناحیه A_1 بزرگ‌تر از ناحیه A_2 شود، سامانه به شرایط خروج از سنکرون نمی‌رود. ناحیه زیر منحنی P_e-t نمایانگر انرژی است. بنابراین می‌توان این مفهوم را معیار موازنه انرژی در حوزه زمان نامید. تعادل در انرژی گذرا باعث نوسان پایدار می‌شود در حالی که یک نامتعادلی در انرژی گذرا باعث نوسان خروج از سنکرون خواهد شد.

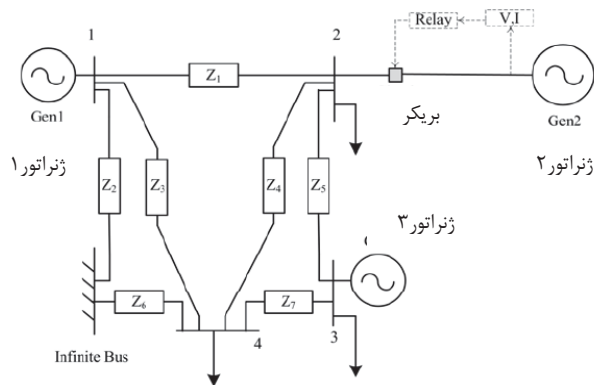
انتگرال‌ها در رابطه‌های (۷) و (۸) با استفاده از جمع سطوح، ساده می‌شوند و قبل از شروع خطا می‌توان P_m را برابر P_e قرار داد. حدود زمان‌ها نیز برحسب P_e بیان می‌شوند. بنابراین برای شرایط پایدار، مجموع دو ناحیه A_1 و A_2 برابر می‌شود با:

$$A = \sum_{t_0}^{t_{max}} (P_e(t)|_{t_0-\Delta t} - P_e(t)) \Delta t = 0 \quad (9)$$

در جدول (۱) سناریوهای شبیه‌سازی در حالت پایدار و در جول (۲) سناریوهای شبیه‌سازی در حالت خروج از سنکرون آورده شده است.

جدول ۱. سناریوهای شبیه‌سازی در حالت پایدار

بار پیش از خطا، pu	۱/۵	۱/۲
مدت زمان خطا، ثانیه	۰/۱	۰/۲۵



شکل ۷. دیاگرام تک خطی یک سامانه سه ماشین متصل به باس بی نهایت [۱۸]

بار پیش از خطا برابر ۱/۲ pu قرار داده شده است. خطای سه فاز در باس ۱ اعمال می‌شود و پس از ۰/۲۵ ثانیه رفع می‌گردد. منحنی P-t برای این مورد در شکل (۹) نشان داده شده است. از منحنی P-t مربوط به ژنراتور ۲ به دست می‌آید که ناحیه A₁ برابر است با ۰/۱۶۳۲ pu-s و پس از ۰/۶۶۴۲ ثانیه ناحیه کل برابر صفر می‌شود و بنابراین این مورد هم نوسان پایدار تشخیص داده می‌شود.

جدول ۲. سناریوهای شبیه‌سازی در حالت خروج از سنکرون

بار پیش از خطا، pu	۱/۵	۱/۲
مدت زمان خطا، ثانیه	۰/۲۵	۰/۳

۲-۳. موارد منجر به خروج از سنکرون

در اینجا نیز دو شبیه‌سازی انجام می‌شود تا شرایط خروج از سنکرون با استفاده از الگوریتم معرفی شده نشان داده شود. در اولین شبیه‌سازی، بار پیش از خطا در سامانه برابر است با ۱/۵ pu، خطای سه فاز در باس ۱ اتفاق می‌افتد و پس از ۰/۲۵ ثانیه رفع می‌شود. منحنی‌های P-t برای این شبیه‌سازی در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. از منحنی مربوط به ژنراتور Gen2، ناحیه A₁ برابر ۰/۲۰۲۰ pu-s و ناحیه A₂ برابر ۰/۱۱۶ pu-s هستند. پس از شرایط خروج از سنکرون تشخیص داده می‌شود و ناحیه کل برابر با ۰/۱۹۰۵ pu-s می‌شود. در مورد بعدی، بار پیش از خطا برابر ۱/۲ pu قرار داده شده است. خطای سه فاز در باس ۱ اعمال می‌شود و پس از ۰/۳ ثانیه رفع می‌شود. شکل (۱۱) منحنی‌های P-t را برای این مورد نشان می‌دهد. از منحنی P-t مربوط به ژنراتور Gen2، ناحیه A₁ برابر با ۰/۲۰۵۳ pu-s و ناحیه A₂ برابر ۰/۰۲۵ pu-s است. پس از مدت زمان ۰/۳۶۰۲ ثانیه این مورد به عنوان یک شرایط خروج از سنکرون تشخیص داده

در مطالعات، وقتی فرض می‌شود شرایط ناپایدار است که دامنه بیشترین اغتشاش (تغییر در P_e از مقدار اصلی) بیشتر از ۱۰٪ باشد. به این طریق، از محاسبات اضافی مربوط به نویز و سایر نوسانات دینامیکی اجتناب می‌شود. در پیاده‌سازی عملی، این روش در ترکیب با یک عنصر راه‌انداز رله به کار خواهد رفت، بنابراین تنها برای مواقع خطا عمل می‌کند.

معیار ناپایداری بحث شده در این بخش نشان می‌دهد که روش ساده بوده و به سرعت به جواب می‌رسد. بنابراین برای استفاده در اهداف حفاظتی خروج از سنکرون بسیار مناسب است.

۳. نتایج و بحث

الگوریتم ارائه شده روی یک سامانه سه ماشین متصل به باس بی نهایت در دو حالت پایدار و خروج از سنکرون آزمایش شده است و نتایج آن ارائه می‌شود. از یک سامانه سه ماشین متصل به باس بی نهایت همانند شکل (۷) استفاده شده است تا مؤثر بودن الگوریتم روی یک سامانه پیچیده نشان داده شود. البته برای شبیه‌سازی می‌توان از شبکه‌های نمونه بزرگ‌تر استفاده کرد. اما بزرگی یا کوچکی سامانه در این روش اثری ندارد و هدف نشان دادن قدرت الگوریتم ارائه شده در تشخیص نوسان تنها یک ژنراتور است. بنابراین سامانه هر تعداد باس که داشته باشد و هر تعداد ژنراتور در حال کار باشند، تأثیری در عملکرد این الگوریتم ندارد. پارامترهای سامانه در زیر آورده شده است:

پارامترهای سامانه سه ماشین

توان پایه = ۶۳۵ مگاوات آمپر

توان نامی ژنراتور ۱ = ۵۵۵ مگاوات آمپر

توان نامی ژنراتور ۲ = ۶۳۵ مگاوات آمپر

توان نامی ژنراتور ۳ = ۶۶ مگاوات آمپر

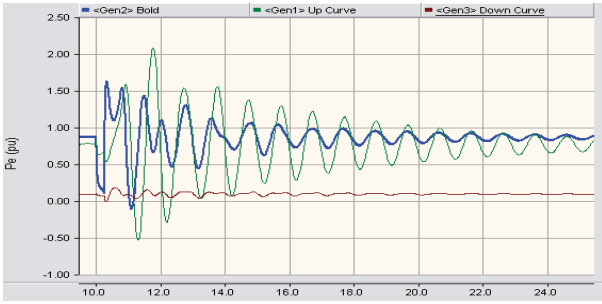
ولتاژ باس = ۲۴ کیلوولت

$$\begin{aligned} Z1 &= 0.048 + j0.48\Omega, \\ Z2 &= 0.00576 + j0.573\Omega, \\ Z3 &= 0.0288 + j0.288\Omega, \\ Z4 &= 0.0576 + j0.576\Omega, \\ Z5 &= 0.0142 + j0.142\Omega, \\ Z6 &= 0.0192 + j0.192\Omega, \\ Z7 &= j0.0957\Omega \end{aligned}$$

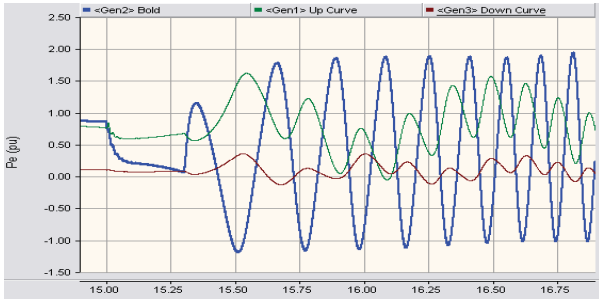
رله خروج از سنکرون نصب شده است تا شرایط خروج از سنکرون ژنراتور (Gen2) را تشخیص دهد. الگوریتم ارائه شده روی منحنی P-t مربوط به ژنراتور Gen2 اعمال می‌شود.

۳-۱. موارد پایدار

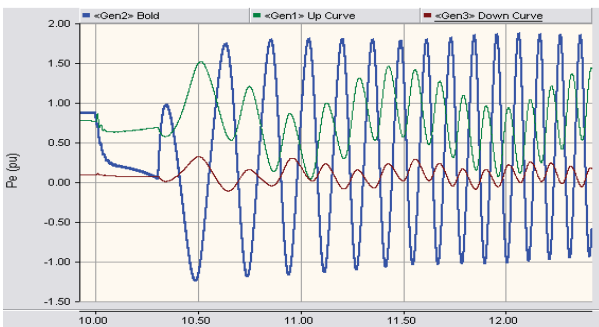
برای اولین مورد شبیه‌سازی، خطای سه فاز در باس ۱ اعمال می‌شود. بار پیش از خطا برابر ۱/۵ pu بوده و مدت زمان خطا ۰/۱ ثانیه است. منحنی‌های P-t برای هر سه ژنراتور در شکل (۸) نشان داده شده است. از منحنی P-t مربوط به ژنراتور ۲، ناحیه A₁ برابر با ۰/۰۵۶۸ pu-s می‌باشد. پس از ۰/۲۸۸۲ ثانیه، ناحیه کل برابر صفر شده و نوسان به عنوان نوسان پایدار تشخیص داده می‌شود.



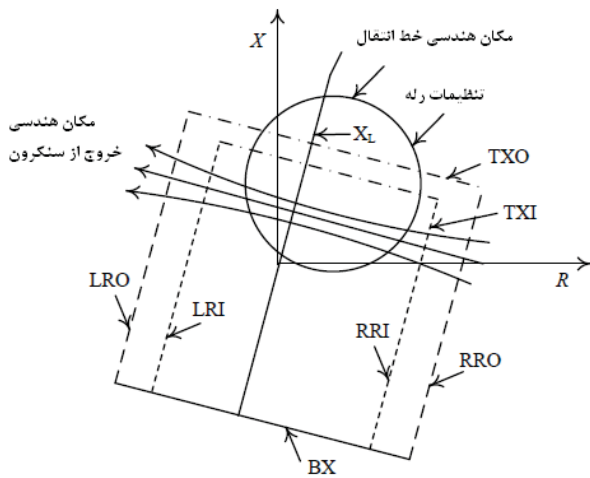
شکل ۹. منحنی‌های P-t برای بار پیش از خطای ۱/۲ pu و زمان رفع خطای ۰/۲۵ ثانیه (محور افقی برحسب ثانیه).



شکل ۱۰. منحنی‌های P-t برای بار پیش از خطای ۱/۵ pu و زمان رفع خطای ۰/۲۵ ثانیه (محور افقی برحسب ثانیه).



شکل ۱۱. منحنی‌های P-t برای بار پیش از خطای ۱/۲ pu و زمان رفع خطای ۰/۳ ثانیه (محور افقی برحسب ثانیه)



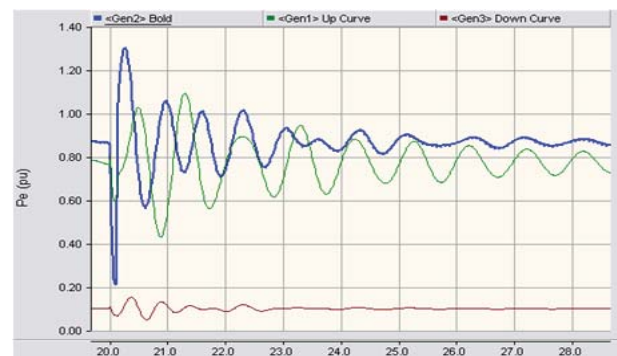
شکل ۱۲. مکان هندسی امپدانس برای شرایط خروج از سنکرون و تنظیمات کورکننده (طرح مستطیل مرکزی).

می‌شود. خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی شرایط پایدار و خروج از سنکرون برای یک سامانه سه ماشینه باس بی نهایت در جدول (۳) لیست شده است. با توجه به جدول (۳)، با افزایش مدت زمان خطا وضعیت از حالت پایدار به حالت خروج از سنکرون می‌رسد. ملاحظه می‌شود که در حالت پایدار سطوح A1 و A2 با هم برابرند و در حالت خروج از سنکرون مقدار مطلق ناحیه A1 بیشتر از ناحیه A2 است و در نتیجه پدیده خروج از سنکرون اتفاق می‌افتد. نکته مهم این است که الگوریتم ارائه شده قادر است در زمان مناسب و با توجه به اندازه‌گیری‌های مربوط به حوزه زمان ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور، حالات پایدار و خروج از سنکرون را تشخیص داده و اعلام کند. به این ترتیب می‌توان در حالت خروج از سنکرون ژنراتور یا ژنراتورهای مربوطه را از مدار خارج کرد تا مانع خروج دیگر ژنراتورهای سامانه از حالت سنکرون شد. در نتیجه تنها انرژی الکتریکی ناحیه‌ای خاص تحت تأثیر (خاموشی) قرار می‌گیرد و نواحی دیگر نجات می‌یابند. این موضوع در رابطه با مسائل نظامی اهمیت بیشتری هم می‌یابد. به ویژه آنکه خاموشی بخشی از شبکه برق نباید به بخش‌های حساس سراسر کند و تجهیزات واقع در آن‌ها دچار اختلال شوند.

۳-۳. مقایسه نتایج با طرح مستطیل مرکزی

برای مقایسه عملکرد، یک رله امپدانسی با طرح مستطیل مرکزی در یک سر خط TL-I (شکل (۱۲)) قرار می‌گیرد که ۸۰٪ خط را حفاظت می‌کند. نوسان توان در TL-I از طریق اعمال یک خطا در وسط خط TL-II و عملکرد هم‌زمان مدارشکن‌های A و B با تأخیر زمانی نسبت به وقوع خطا به‌دست می‌آید.

با استفاده از تنظیمات یاد شده، شبیه‌سازی‌های مختلفی برای مقایسه الگوریتم ارائه شده با طرح مستطیل مرکزی انجام می‌گیرد. در شبیه‌سازی اول، زاویه توان پیش از خطا برابر $\delta = 30^\circ$ و زمان رفع خطا برابر ۱۴ سیکل (۰/۲۳۳ ثانیه) قرار داده می‌شود. برای تشخیص اینکه آیا سامانه دچار خروج از سنکرون است یا نه، طرح مستطیل مرکزی ۴/۹۳ ثانیه طول می‌کشد. مکان هندسی نوسان در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳. منحنی‌های P-t برای بار پیش از خطای ۱/۵ pu و زمان رفع خطای ۰/۱ ثانیه (محور افقی برحسب ثانیه)

جدول ۳. خلاصه نتایج شبیه سازی سامانه سه ماشین باس بی نهایت

۱/۲	۱/۵	۱/۲	۱/۵	pu، بار پیش از خطا،
۰/۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱	مدت زمان خطا، ثانیه
۰/۲۰۵	۰/۲۰۲	۰/۱۶۳	۰/۰۵۶	ناحیه A_1 ، pu-s
- ۰/۰۰۲	- ۰/۰۱۱	- ۰/۱۶۳	- ۰/۰۵۶	ناحیه A_2 ، pu-s
۰/۲۰۲	۰/۱۹۰	۰	۰	$A=A_1+A_2$
۰/۳۶۰	۰/۳۸۲	۰/۶۶۴	۰/۲۸۸	زمان تصمیم، ثانیه
خروج از سنکرون	خروج از سنکرون	پایدار	پایدار	نوع تصمیم

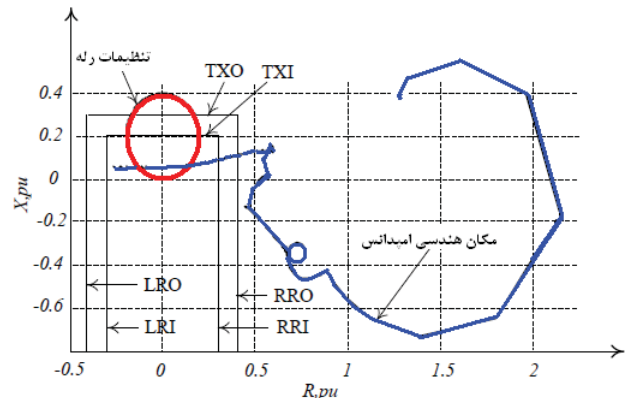
مستطیل مرکزی دقیق تر و سریع تر است. توجه شود که زمان تصمیم گیری برای یک طرح مستطیل مرکزی به دستورالعمل های به کار رفته برای تنظیمات رله بستگی دارد. در کنار این، یافتن تنظیمات لازم برای روش مستطیل مرکزی خیلی سراسر است و آسان نیست. این تنظیمات به پارامترهای سامانه بستگی دارد حال آنکه الگوریتم ارائه شده مستقل از پارامترهای سامانه است که یک مزیت فوق العاده خوب به شمار می آید. به این ترتیب وقتی بمباران الکترومغناطیسی صورت گیرد و بخشی از خط اضافه جریان هایی را تجربه کند، طوری که این اتفاقات در نهایت ممکن است باعث خروج از سنکرون ژنراتور یا ژنراتورهای شود، آنگاه الگوریتم ارائه شده برای رله خروج از سنکرون ژنراتور با توجه به مزایایی که برای آن برشمرده شد، می تواند در زمان مناسب تشخیص مناسب را انجام دهد.

جدول ۴. مقایسه الگوریتم پیشنهادی با طرح مستطیل مرکزی

زاویه توان پیش از خطا (δ)	۳۰ درجه	۳۰ درجه	۳۰ درجه
تعداد سیکل خطا	۱۸	۱۶	۱۴
مدت زمان خطا، ثانیه	۰/۳۰	۰/۲۶	۰/۲۳
زمان تصمیم گیری (طرح مستطیلی)، ثانیه	۴/۵۸	۴/۷۰	۴/۹۳
زمان تصمیم گیری (الگوریتم پیشنهادی)، ثانیه	۰/۴۷	۰/۵۰	۰/۶۰

۴. نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتمی جدید معرفی شد تا انسجام شبکه الکتریکی حفظ شده و از نقص تجهیزات الکتریکی نظامی در طی بمباران الکترومغناطیسی جلوگیری شود. با اصلاح شرایط معیار سطوح برابر کلاسیک به حوزه زمان، روشی برای تشخیص خروج از سنکرون ژنراتورها ارائه و کارایی آن روی یک سامانه سه ماشین متصل به باس بی نهایت آزمایش شد. این الگوریتم قادر است بر اساس اطلاعات ولتاژ و جریان در محل رله، به خوبی بین نوسانات پایدار و خروج از سنکرون تبعیض قائل شود. این تحلیل نشان داد که الگوریتم پیشنهادی به هیچ پارامتری از خط و یا مطالعات خارج از خط سامانه نیاز ندارد. مطالعات شبیه سازی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و روش استاندارد مستطیل مرکزی روی یک پیکربندی سه ماشین متصل به باس بی نهایت نشان داد که الگوریتم ارائه شده را می توان به خوبی به یک سامانه چندماشینه اعمال کرد بدون آنکه نیاز به کاهش ابعاد سامانه باشد.



شکل ۱۳. مکان هندسی نوسان خروج از سنکرون برای مدت زمان خطای ۱۴ سیکل و $\delta = 30^\circ$

در شکل (۱۲) موارد زیر وجود دارد:

مقاومت درونی راست (RRI) = $0/3$ پریونیت،
مقاومت بیرونی راست (RRO) = $0/4$ پریونیت،
مقاومت بیرونی چپ (LRI) = $0/3$ پریونیت،
مقاومت درونی چپ (LRO) = $0/4$ پریونیت،
راکتانس درونی بالا (TXI) = $0/2$ پریونیت،
راکتانس بیرونی بالا (TXO) = $0/3$ پریونیت،
مستطیل های انتهایی (BX) = $1/94$ - پریونیت.

نوسان به تنهایی $27/5$ سیکل ($0/458$ ثانیه) طول می کشد تا بین دو مستطیل مرکزی نوسان کند. برای این مورد، الگوریتم ارائه شده تنها $0/6$ ثانیه برای تشخیص خروج از سنکرون زمان می برد. در مورد بعدی، زمان رفع خطا به 16 سیکل ($0/26$ ثانیه) افزایش می یابد.

مکان هندسی نوسان $20/98$ سیکل ($0/349$ ثانیه) طول می کشد تا به طور کامل بین دو مستطیل مرکزی جابه جا شود و تصمیم مبنی بر خروج از سنکرون در $4/70$ ثانیه اتخاذ می شود، در حالی که الگوریتم ارائه شده تنها $0/5$ ثانیه برای تصمیم گیری زمان می برد. افزایش زمان رفع خطا باعث تشدید نوسان می شود، بنابراین مکان هندسی نوسان در $17/37$ سیکل ($0/289$ ثانیه) بین دو مستطیل جابه جا می شود. طرح مستطیل مرکزی $4/58$ ثانیه و الگوریتم ارائه شده $0/47$ ثانیه برای تصمیم گیری زمان نیاز دارد. نتایج در جدول (۴) ارائه شده است.

نتایج نشان می دهد که الگوریتم ارائه شده نسبت به طرح استاندارد

۵. مراجع

- [10] Shrestha, B.; Gokaraju, R.; Sachdev, M. "Out-of-Step Protection Using State-Plane Trajectories Analysis"; IEEE Trans. Power Delivery 2013, 27, 1083-1093.
- [11] Gautam, S.; Brahma, S. M. "Out-of-Step Blocking Function in Distance Relay Using Mathematical Morphology"; IET Gen. Trans. Dis. 2012, 6, 313-319.
- [12] Dubey, R.; Samantaray, S. R. "Wavelet Singular Entropy-based Symmetrical Fault-Detection and Out-of-Step Protection during Power Swing"; IET Gen. Trans. Dis. 2013, 7, 1123-1134.
- [13] Kirby, B.; Zou, L.; Cao, J.; Kamwa, I. "Development of a Predictive Out-of-Step Relay Using Model Based Design"; 2nd IEEE PES Int. Conf. and Exhibition 2011, 1-6.
- [14] Xiangxia, M.; Zhanjun, Q. "Forecast of Out-of-Step Section in Complicated Power System"; Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), Second Int. Conf. 2012, 266-269.
- [15] Yingtao, W.; Yong, T.; Lijie, D.; Chuankai, Z.; Zhen, C.; Yuanchao, H. "A Wide-Area Coordinated Out-of-Step Control System"; Power System Technology (POWERCON), Int. Conf. 2014, 691-695.
- [16] Krata, J.; Balcerek, P.; Gajic, Z. "The New Frequency Difference Based Out-of-Step Protection For Multi Terminal Transmission System"; Developments in Power System Protection (DPSP 2014), 12th IET Int. Conf. 2014, 1-6.
- [17] Farantatos, E.; Huang, R.; Cokkinides, G. J.; Meliopoulos, A. P. "A Predictive Out-of-Step Protection Scheme Based on PMU Enabled Dynamic State Estimation"; Power and Energy Society General Meeting IEEE, 2011, 1-8.
- [18] Cheng, S.; Sachdev, M. S. "Out-of-Step Protection using the Equal Area Criterion"; In Proc. Canadian Conf. Electrical and Computer Eng. 2005, 1488-1491.
- [19] Grigsby, L. L. "Power System Stability and Control"; 3th Ed., CRC Press, 2012.
- [1] Elmore, W. A. "Protective Relaying Theory and Applications"; 2nd Ed., New York: Marcel Dekker, 2004.
- [2] Blackburn, J. L.; Domin, D. J. "Protective Relaying: Principles and Applications"; 4th Ed., CRC Press, 2014.
- [3] Aalami, H. A.; Ramezani, H. "Assess Vulnerable Points of Power Generation and Transmission Centers in the Military Attacks and Solutions for the Improvement of Passive Defense Indices"; Passive Defense Conf., Imam Hossein Univ. 2012 (In Persian).
- [4] Holbach, J. "New Out of Step Blocking Algorithm for Detecting Fast Power Swing Frequencies"; In Proc. Power Systems Conf.: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources 2006, 182-199.
- [5] Liu, Y. "Aspects on Power System Islanding for Preventing Wide Spread Blackout"; In Proc. IEEE Int. Conf. Networking, Sensing and Control 2006, 1090-1095.
- [6] Mechraoui, A. "A New Principle for High Resistance Earth Fault Detection during Fast Power Swings for Distance Protection"; IEEE Trans. Power Delivery 1997, 12, 1452-1457.
- [7] Paudyal, S.; Ramakrishna, G.; Sachdev, M. S. "Application of Equal Area Criterion Conditions in the Time Domain for Out-of-Step Protection"; IEEE Trans. Power Delivery 2010, 25, 600-609.
- [8] Rebizant, W. "Fuzzy Logic Application to Out-of-Step Protection of Generators"; In Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, 2001, 2, 927-932.
- [9] Padiyar, R.; Krishna, S. "Online Detection of Loss of Synchronism Using Energy Function Criterion"; IEEE Trans. Power Delivery 2006, 21, 46-55.