محله علمی پژو،شی «علوم و فناوری می مدافند نوین» سال ششم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴؛ ص ۲۶۳–۲۵۵

الگوريتم سريع براي تشخيص خروج از سنكرون ژنراتور هنگام بمباران الكترومغناطيسي حبيبا... اعلمي "\*، محسن آقازاده"، رضا دشتي "

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)

### چکیدہ

بمبهای الکترومغناطیسی از یک پالس الکترومغناطیسی قوی برای تخریب هدف استفاده می کنند. 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 می کنند 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 بهدست آمده از آن، خروج از سنکرون ژنراتورها به سرعت تشخیص داده می شود. سپس حفاظتهای لازم برای پایداری سامانه و جلوگیری از فروپاشی شبکه به عمل میآید. نتایج شبیهسازی و مقایسه روش پیشنهادی با روش استادارد مستطیل مرکزی نشان میدهد که روش پیشنهادی نسبت به روشهای مشابه قبلی از دقت و سرعت بالاتری برخوردار بوده، نیازی به کاهش ابعاد

كليد واژهها: معيار سطوح برابر، خروج از سنكرون، پايدارى، بمباران الكترومغناطيسى.

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

H. A. Alami<sup>\*</sup>, 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.

\*Corresponding Author E-mail: halami@ihu.ac.ir

# ۱. مقدمه

109

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<sup>۱</sup> ، 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 یدید می آید، تمامی مدارهای الکترونیک را در یک محدوده خاص نابود می سازد. بزودی این نکته روشن شد که مناسب ترین امواج الكترومغناطيس براى ساخت بمبهاى الكترومغناطيس امواج با فرکانس در حدود گیگا هرتز است. این نوع امواج قادرند به درون انواع دستگاههای الکترونیک نفوذ کنند و آن ها 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 ماركس» بود. گذشته از توليد پالسهاى الكترومغناطيسي طي انفجارهای هستهای، روشهای دیگری نیز برای تولید پالسهای الكترومغناطيسي وجود دارد كه ميتوان أنها را هدفمندتر از محدودهای اندک و فرکانسهایی خاص به کار برد. فناوری اساسی که توليد پالسهای الكترومغناطيسی در سلاحها توسط آنها صورت می گیرد، غالباً عبارتند از: مولدهای فشردهسازی شار <sup>†</sup> (FCG)، ژنراتورهای Magnet-Hydrodynamic و دستهای از وسایل پر قدرت مایکروویو<sup>۳</sup> (HPM) که در رأس آنها نوسان ساز با کاتد مجازی یا ویرکتور (Vircator) قرار دارد، البته روشهای نوین تولید پالسهای الكترومغناطيسي قدرتمند ونيز پالسهاى الكترومغناطيسي توليد شده در سامانه، استفاده از شتاب دهندههای ذرات باردار پر انرژی می باشد که می تواند حتی به سامانه های پوشش دار و حفاظت شده عادی نیز نفوذ کرده و تخریب لازم روی سامانه های الکتریکی و الکترونیکی را بر جای گذارد [۳]. بمب های الکترومغناطیسی از یک پالس الكترومغناطيسي قوى براى تخريب هدف استفاده ميكنند. موقع استفاده از چنین بمب هایی، به دلیل به وجود آمدن شار مغناطیسی قوی ناشی از استفاده از چنین بمبهایی، جریان زیادی در خطوط انتقال ظاهر می شود که برای تجهیزات مختلف الکتریکی و الكترونيكي مي تواند مخرب باشد. جريان شديد حاصل از انفجار بمب

الکترومغناطیسی می تواند آسیبهای جدی بر تجهیزات شبکه قدرت مانند کلیدها، ترانسفورماتورها، کابلها، خطوط هوایی، دستگاههای اندازه گیری و تجهیزات کنترلی وارد نماید [۳]. وقتی خط انتقالی در معرض بمب الكترومغناطيسي قرار مي كيرد، به دليل ايجاد الكترون هاى آزاد حاصل از بمب، ممكن است خط دچار اتصال كوتاه شود. این خطای شدید موجب یک نوسان سریع توان می شود که به نوبه خود کار رله برای تشخیص خطا را دشوار می کند. در نتیجه، ژنراتورهای یک ناحیه ممکن است با وضعیت خروج از سنکرون مواجه شوند که در صورت عدم انجام عملیات پیشگیرانه شاید باعث خاموشے سراسے ی سامانہ قدرت شود. بنابراین لازم است تا الگوريتمي سريع طراحي شود تا اين نوسانات سريع توان تشخيص 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 می شوند 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 می کند و یا سامانه را در نقاط از پیش تعیین شدہ جداسازی مے کند [۴]. زاویہ توان (δ) در طے نوسان توان، نوسان کرده و منجر به نوسان کمیتهای الکتریکی مثل فركانس، ولتاژ، جريان و امپدانس در نقاط مختلف سامانه قدرت می شود. بیشتر روش های تشخیص خروج از سنکرون مبتنی بر حس کردن نوسانات و یا نرخ تغییر یکی از کمیتهای سامانه هستند [۵].

یکی از معایب روش های مرسوم تشخیص نوسان توان نیاز به بررسی های 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 [۲]. این روش ها نیازمند فرآیند سنگین و زمان بر آموزش هستند تا همه سناریوهای ممکن نوسان را آموزش دهند. بنابراین با افزایش اتصالات داخلی سامانه، این فرایند آموزش دهند. بنابراین با پیچیدگی این روش ها نیز افزایش مییابد [۸]. اخیراً روش های مبتنی بر واحد اندازه گیری فازور <sup>†</sup>(PMU) برای تشخیص موقعیت خروج از سنکرون به کار گرفته شده است. این روش ها نیازمند تجهیزات مخابراتی زیادی در نقاط مختلف سامانه هستند تا اطلاعات را بهدست آورند و مبتنی بر اندازه گیری های محلی نیستند [۹].

با استفاده از نمایش صفحه فضای حالت، سرعت ژنراتور و زاویه توان روشی برای حفاظت از خروج از سنکرون بهدست 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 بهدست میآید. اثبات شده است که این

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Loss of Synchronism

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Flux Compression Generator

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Hi Power Microwave

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Phasor Measurement Unit

201

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 به کار 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 پیش بینی شده است. با این حال به منظور جداسازی، عملکرد محلی رلههای دیستانس باید توسط تابع مسدود کننده خروج از سنکرون مسدود شود. این کار روش های تشخیص نوسان توان و خطاهای متعادل را بر اساس روابط ریاضی ارائه می دهد [11].

تشخیص خطا و عملکردهای حفاظت خروج از سنکرون دو الزام مهم در رلههای دیستانس هستند که به شرایط نوسان توان می پردازند. بخش اول روی توسعه تابع مسدود کننده خروج از سنکرون مبتنی بر آنتروپی موجک با استفاده از نوسان پایدار توان و راهاندازی تابع در طی نوسان ناپایدار توان متمرکز است. بخش دوم از شاخص مبتنی بر آنتروپی تکین موجک برای تمیز بین خطا و نوسان توان بهره می برد [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 میآورنـد. تشخیص خروج از سنکرون مبتنی بر شرایط معیار سطوح برابر<sup>۱</sup> (EAC) کلاسیک در حوزه زاویه توان روشی جدیـد است کـه نیازمنـد منحنیهای زاویه توان (δ-e) قبل و پس از اغتشاش سامانه برای رله معلوم میباشد. منحنیهای δ-P به پیکربندی سامانه بستگی دارنـد، بنابراین لازم است تجهیزات زیاد انـدازه گیـری و مخـابراتی در نقـاط 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 می آید. 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 <sup>۲</sup>WAMS نیز امکان پذیر 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 [1۵].

روش نوین حفاظت خروج از سنکرون در سامانههای انتقال ولتاژ

بالا چندپایانهای نیز مطرح است. این روش دارای مزیت اندازه گیری های سنکروفازور سراسر سامانه است. از داده های اندازه گیری شده برای اجرای چندین الگوریتم تشخیص نقطه به نقطه استفاده می شود. 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 می شود [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 تخمین گر حالت دینامیکی حاصل میشود. این تخمین گر تنها از اندازه گیری های محلی استفاده کرده و نیازی به اندازه گیری های همزمان PMU ندارد [۱۷].

نوآوری این تحقیق استفاده از مفهوم معیار سطوح برابر اصلاح شده در حوزه زمان<sup>۳</sup> (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 منحنی های δ-P مبتنی بر منحنی های t-P است و از اطلاعات محلی توان الکتریکی خروجی استفاده میکند. روش معیار سطوح برابر حوزه زمان نیاز به اطلاعات پارامترهای دیگر سامانه قدرت مثل امپدانس خط، پارامترهای ماشین معادل و غیره ندارد. توان الکتریکی خروجی از اطلاعات ولتاژ و جریان معادل و غیره ندارد. توان الکتریکی خروجی از اطلاعات ولتاژ و جریان محلی اندازه گیری شده در محل رله و انـرژی گـذرا، کـه ناحیـه زیـر منحنی t-P 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 بی نهایت تک ماشینه (<sup>\*</sup>SMIB) و یک سامانه با باس بی نهایت سه ماشینه با استفاده از ابزار شبیهساز نرمافزاری <sup>۵</sup>PSCAD 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 بی نهایت 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 چیـدمان SMIB را نشـان مـی دهـد کـه بـرای نشـان دادن معیـار سـطوح برابـر معرفـی شـده در حـوزه زمـان بــه *کـ*ار میرود [۱۸].

در شـکل (۱) ولتـاژ نقطـه ارسـال (Es) نسـبت بـه ولتـاژ نقطـه دریافـت (E<sub>R</sub>) بـه انـدازه δ پیشـفاز اسـت. زاویـه δ را زاویـه نسـبی روتور یا زاویـه تـوان گوینـد. تـوان خروجـی حالـت دائـم ژنراتـور P<sub>e</sub> بـوده و بـا تـوان مکـانیکی ورودی بـه ژنراتـور (P<sub>m</sub>) برابـر اسـت.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Equal Area Criterion

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Wide-Area Monitoring Systems

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Time-Based Improved Equal Area Criterion (TBIEAC)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Single-Machine-Infinite-Bus

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Power Systems Computer Aided Design

سامانه دارای دو خط موازی است، IL-II و IL-IT، به ترتیب با امپدانسهایی برابر با X<sub>1</sub> و X<sub>2</sub> میباشد. یک خطای سه فاز در وسط خط IL-II اعمال می شود. با باز شدن همزمان کلیدهای (۱) با (۱) می تأخیر رفع می شود. اگر رابطه (۱) با استفاده از روشهای انتگرال گیری عددی حل شود، پاسخ گذرا متناظر با اغتشاش در پیکربندی SMIB به دست می آید [۱۸]:

$$\frac{M}{\sigma_{s}}\frac{d^{2}\delta}{dt^{2}} = P_{m} - P_{e}(\delta)$$
(1)

که در آن، M ثابت اینرسی ژنراتور وω<sub>s</sub> 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 بی نهایت (SMIB)

الگوریتم عنوان شده مبتنی بر منحنی  $P_e$ –۱ است و این اطلاعات را میتوان مستقیماً از اندازه گیری های محل رله به دست آورد. بنابراین الگوریتم معرفی شده، برای یافتن منحنی  $P_e$ -4، نیازمند حل رابطه نوسان نیست. شکل (۲) منحنی های  $\delta_{-9}$  را برای سامانه پایدار نشان می دهد. شکل (۳) منحنی های  $\delta_{-9}$  را برای یک سامانه ناپایدار نشان می دهد.

از این دو منحنی بـرای بررسـی معیـار سـطوح برابـر در حـوزه δ استفاده میشود. منحنیهـای Pe-t متنـاظر بـا دو منحنـی δ-Pe در شکلهای (۴ و ۵) نشان داده شدهاند و این منحنیها بـرای توصیف الگوریتم معرفی شده بهکار میروند.

در شکلهای (۲ و ۳)،  $\delta_0$  معرف زاویه توان قبل از خطا،  $\delta_c$  معرف زاویه توان در لحظه رفع خطا و  $\delta_{max}$  نمایانگر بیشترین نوسان زاویه توان است. معیار سطوح برابر در حوزه  $\delta$  بیان میکند که برای پایدار بودن سامانه، A1 برابر است با A2 و ناحیه 2A قبل از  $\pi$ - $\delta_0$  رخ میدهد. برای یک سامانه ناپایدار، ناحیه A1 بزرگتر از ناحیه A2 بوده و ناحیه A2 در  $\delta_0$  –  $\pi$  اتفاق میافتد. بیشترین نوسان  $\delta_0$  بر برای نوسان پایدار کمتر از  $\pi$ -  $\delta_0$  است [19].

عبارتهای ریاضی باری ارزیابی نواحی A1 و A2 در حوزه زمان را می اون از رابطه نوسان (۱) بهدست آورد. اگر انحراف سرعت روتور برابر ۵۵ باشد، آنگاه

$$\omega_{\Delta} = \omega(t) - \omega_{s} = \frac{d\delta}{dt}$$
(7)



$$\frac{M}{\omega_{s}}d\omega_{\Delta} = (P_{m} - P_{e})dt \tag{7}$$



**شکل۲.** منحنیهای Pe-δ برای سامانه پایدار [۱۳]







 $[1\Lambda]$  شکل ۴. منحنی $P_e$ -t برای سامانه پایدار

با انتگرال گیری از رابطههای (۳ و ۴) رابطه زیر حاصل می شود:  $\frac{M}{\omega_s} d\omega_{\Delta} = \int (P_m - P_e) dt$ (۴)  $t_1$   $t_1$  از رابطـه (۴) بـا قـرار دادن حـدود انتگـرال از  $t_0$  تـا  $t_1$  تا بهدست می آید (شـکلهـای (۴ و ۵)).  $t_0$  زمـان شـروع خطـا (زاویـه  $P_m$  رابـر اسـت بـا  $\delta_0$  و  $t_1$  زمـانی اسـت کـه P از خـط  $P_m$  از خـط تجاوز می کند.



(۱۸] شکل ۵. منحنی  $P_e$ -t برای سامانه ناپایدار ا

توجه شود که در t<sub>0</sub> انحراف سرعت صفر میباشد، چون سرعت روتور سرعت سنکرون است.

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

وقتی  $P_{\rm m} \ge P_{\rm e}$  برای  $t_{\rm 0}$  تا  $t_{\rm 1}$  باشد، ناحیه A1 مثبت است. به طور  $t_{\rm max}$  t باری 1 مثابه، ناحیه A2 از رابطه (۴) با قرار دادن حدود انتگرال از A1 تا  $t_{\rm max}$  بهدست میآید.

$$A_{2} = \int_{t_{1}}^{t_{max}} (P_{m} - P_{e}(t)) dt = \frac{M}{\omega_{s}} (\omega_{\Delta}|_{t_{max}} - \omega_{\Delta}|_{t_{1}})$$
(9)

که در آن،  $P_m \leq P_e$  زمانی است که  $\delta = \delta_{max}$  فتری  $P_m \leq P_e$  برای  $t_{max}$  زمانی است که منفی است. برای یک سامانه پایدار، در  $t_{max}$  t = t ا تا  $t_{max}$  باشد، ناحیه A2 منفی است. برای یک سامانه پایدار، در  $t_{max}$ ، سرعت روتور سرعت سنکرون می باشد، بنابراین انحراف سرعت مفر است. برای شرایط خروج از سنکرون، سرعت روتور در  $t_{max}$  از  $t_{max}$  ایرا و سرعت سنکرون این کل ناحیه برای شرایط پایدار و خروج از سنکرون از رابطههای ( $\delta \in \mathcal{S}$ ) به صورت زیر به دست می آید:

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

برای شرایط خروج از سنکرون به صورت زیر است:

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

رابطههای (۷ و ۸) معادلات معیار سطوح برابر در حوزه زمان هستند و بیان میکند در طی دوره گذرا، اگر A1 و A2 طی منحنی P<sub>e</sub>-t برابر باشند، سامانه پایدار میشود. اما اگر ناحیه A1 بزرگتر از ناحیه A2 شود، سامانه به شرایط خروج از سنکرون نمی رود. ناحیه زیر منحنی t<sub>-</sub>P 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

انتگرالها در رابطههای (۷ و ۸) با استفاده از جمع سطوح، ساده میشوند و قبل از شروع خطا میتوان P<sub>m</sub> را برابر P<sub>e</sub> قرار داد. حدود زمانها نیز برحسب P<sub>e</sub> بیان میشوند. بنابراین برای شرایط پایدار، مجموع دو ناحیه A1 و A2 برابر میشود با:

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

$$A = \sum_{t_0}^{t_{max}} \left( P_e(t) |_{t_0 - \Delta t} - P_e(t) \right) \Delta t > 0 \tag{1.1}$$

که در آن،  $t_0$  زمانی است که  $P_e(t) < P_e(t) = P_e(t)$  برای بار اول اتفاق میافت. میافت.د،  $t_{max}$  زمانی است که 0 = A|A (پای.دار) یا زمانی که  $t_{max}$  (میافت.د،  $t_{max}$  زمانی که  $P_e(t) = 0$  (خروج از سنکرون)  $P_e(t) = P_e(t)|_{t_0-\Delta t}$  (to perfect) ( $P_e(t)|_{t_0-\Delta t}$  ( $P_e(t)|_{t_0-\Delta t}$ 

در رابطه (۹) و حد tmax برای مورد پایدار همواره به خاطر تقریب انتگرال گیر با جمع به طور دقیق برابر صفر نمی شوند. به صورت زیر اصلاح می شوند:

$$A = \sum_{t_0}^{t_{max}} \left( P_e(t) |_{t_0 - \Delta t} - P_e(t) \right) \Delta t \le 0 \tag{11}$$

که در آن، t<sub>max</sub> زمانی که A|t-∆t> 0 و A|t ≤ 1 (پایدار) است.

رابطه های (۱۰ و ۱۱) در کنار شرایط برای  $t_{max}$  و  $t_{max}$  معرفی شده برای تشخیص خروج از سنکرون هستند. بر اساس الگوریتم معرفی شده برای تشخیص خروج از سنکرون هستند. بر اساس الگوریتم معرفی شده، با توجه به شرایط پایدار یا خروج از سنکرون هستند. معرفی میشه تصمیمی در منه ازمان متناظر با  $\delta_{max}$ ) با خطایی برابر Δ یا کمتر، گرفته می شود. بنابراین الگوریتم کلی را می توان به صورت روندنمای شکل (۶) مطرح کرد. در رابط (۹) فرض شده است که ژراتورها بدون تلفات هستند. با این حال، در یک سامانه واقعی،  $P_{\rm e}$  محاسبه شده از طریق اندازه گیریهای محلی در لحظه شروع خطا، باید تلفات و سایر بارهای را محلی در لحظه شروع خطا، باید محاسبه شده از طریق اندازه گیریهای 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

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

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. نتايج و بحث

26.

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 می شود. از یک سامانه سه ماشینه متصل به باس بی نهایت همانند شکل (۷) استفاده شده است تا مؤثر بودن الگوریتم روی یک سامانه پیچیده نشان داده شود. البته برای شبیه سازی می توان از شبکه های 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 ماشینه توان پایه = ۳۳۵ مگاولتآمپر توان نامیژنراتور ۱ = ۵۵۵ مگاولتآمپر توان نامیژنراتور ۲ = ۶۳۵ مگاولتآمپر ولتاژ باس = ۲۴ کیلوولت

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

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 شبیه سازی، خطای سه فاز در باس ۱ اعمال می شود. بار پیش از خطا برابر ۱/۵pu بوده و مدت زمان خطا ۰/۱ ثانیه است. منحنی های P-t برای هر سه ژنراتور در شکل (۸) نشان داده شده است. از منحنی P-t مربوط به ژنراتور ۲، ناحیه A<sub>1</sub> برابر با pu-s است. از منحنی ا-t مربوط به ژنراتور ۲، ناحیه کل برابر صفر شده و نوسان به عنوان نوسان پایدار تشخیص داده می شود.

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

جدول ۱. سناريوهای شبیه سازی در حالت پايدار 1/7 1/4 pu ، بل پيش از خطا، pu ، بل پيش از خطا، ثانيه مدت زمان خطا، ثانيه 1/1 1/4

**شکل۷.** دیاگرام تک خطی یک سامانه سه ماشین متصل به باس بی نهایت [۱۸]

بار پیش از خطا برابر ۲۵ مرار داده شده است. خطای سه فاز در باس ۱ اعمال میشود و پس از ۲۵/۰ ثانیه رفع می گردد. منحنی P-t برای این مورد در شکل (۹) نشان داده شده است. از منحنی P-t مربوط به ژنراتور ۲ بهدست می آید که ناحیه از A۱ برابر است با s-۱۶۳۲ pu-s و پس از ۶۶۴۲۰ ثانیه ناحیه کل برابر صفر می شود و بنابراین این مورد هم نوسان پایدار تشخیص داده می شود.

جدول ۲. سناریوهای شبیه سازی در حالت خروج از سنکرون

٦/٢	١/۵	بار پیش از خطا، pu
۰ /٣	٠/٢۵	مدت زمان خطا، ثانیه

## ۲-۳. موارد منجر به خروج از سنکرون

در اینجا نیز دو شبیه سازی انجام می شود تا شرایط خروج از سنگرون با استفاده از الگوریتم معرفی شده نشان داده شود. در اولین شبیه سازی، بار پیش از خطا در سامانه برابر است با pu ۱/۵، خطای سه فاز در باس ۱ اتفاق می افتد و پس از ۲۵/۵ ثانیه رفع می شود. منحنی های t-۲ برای این شبیه سازی در شکل (۱۰) نشان داده شده اند. از منحنی مربوط به ژنراتور Gen2، ناحیه A۱ برابر su خروج از سنگرون ناحیه A2 برابر su ۲۰۱۶ وستند. پس از شرایط خروج از سنگرون تشخیص داده می شود و ناحیه کل A برابر با su ۲۹۰۵/ ۰ می شود. در مورد بعدی، بار پیش از خطا برابر pu-۱۲ می راده شده است. خطای سه فاز در باس ۱ اعمال می شود و پس از ۳/۰ ثانیه رفع می شود. شکل (۱۱) منحنی های t-۲ را برای این مورد نشان می دهد. از منحیه t-۲۰۵۳ pu-s، ناحیه A1 برابر با su ماز ۳/۰ ثانیه رفع در مورد بعدی، بار پیش از خطا برابر و این مورد نشان می دهد. از می شود. شکل (۱۱) منحنی های t-۲ را برای این مورد نشان می دهد. از مانحیه A2 برابر Su برابر Su را ۲۰۰۶ است. بس از مدت زمان ۲۶۰۰۲ و



شکل ۹. منحنی های 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 بـرای بـار پـیش از خطـای ۱/۵ pu و زمـان رفـع 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 ۲/۳ ثانیه (محور افقی برحسب ثانیه)



شکل ۱۲. مکان هندسی امپدانس برای شرایط خروج از سنکرون و تنظيمات كوركننده (طرح مستطيل مركزى).

می شود. خلاصه ای از نتایج شبیه سازی 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 می رسد. ملاحظه می شود 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 نتيجه پديده خروج از سنكرون اتفاق مىافتد. نكته مهم اين است كه الگوریتم ارائه شده قادر است در زمان مناسب و با توجه به اندازه گیری های مربوط به حوزه زمان ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور، حالات پایدار و خروج از سنکرون را تشخیص داده و اعلام کند. به این ترتیب می توان 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 می گیرد و نواحی دیگر نجات می یابند. این موضوع در رابطه با مسائل نظامی اهمیت بیشتری هم می یابد. به ویژه آنکه خاموشی بخشی از شبکه برق نباید به بخشهای حساس سرایت کند و تجهیزات واقع در آنها دچار اختلال شوند.

## ۳-۳. مقایسه نتایج با طرح مستطیل مرکزی

برای مقایسه عملکرد، یک رکه امپدانسی با طرح مستطیل مرکزی در یک سر خط TL-I (شکل (۱۲)) قرار می گیرد که ۸۰٪ خط را حفاظت میکند. نوسان توان در TL-I از طریق اعمال یک خطا در وسط خط TL-II و عملکرد همزمان مدارشـکنهـای A و B بـا تـأخير زمـانی نسـبت بـه وقـوع خطـا بەدست مىآيد.

با استفاده از تنظیمات یاد شده، شبیهسازی های مختلفی برای مقایسه الگوریتم ارائه شده با طرح مستطیل مرکزی انجام می گیرد. در شبیه سازی اول، زاویه توان پیش از خطا برابر  $\delta = \delta = \delta$  و زمان رفع خطا برابر ۱۴ سیکل (۲۳۳ ثانیه) قرار داده می شود. برای تشخیص اینکه آیا سامانه دچار خروج از سنکرون است یا نـه، طـرح مسـتطیل مرکـزی ۴/۹۳ ثانیـه طـول می کشد. مکان هندسی نوسان در شکل (۱۳) نشان داده شده



شکل ۸. منحنی های P-t برای بار پیش از خطای ۱/۵ pu و زمان رفع خطای ۰/۱ ثانیه (محور افقی برحسب ثانیه)

#### مجله علمی ــ پژوهشی «علوم و فناوریهای پدافند نوین»؛ سال ششم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴

١/٢	۱/۵	١/٢	۱/۵	بار پیش از خطا، pu
٠ /٣	٠/٢۵	۰/۲۵	• / ١	مدت زمان خطا، ثانیه
۰/۲۰۵	•/٢•٢	•/19٣	•/•۵۶	ناحيه pu-s ،Aı
- •/••Y	- •/• \ \	- •/18٣	- •/•۵۶	ناحيهpu-s A <sub>2</sub>
•/٢•٢	٠/١٩٠	•	•	$A = A_1 + A_2$
•/٣۶•	۰ /۳۸۲	• /994	•/۲۸۸	زمان تصميم، ثانيه
خروج از سنكرون	خروج از سنكرون	پايدار	پايدار	نوع تصميم

جدول ٣. خلاصه نتایج شبیه سازی سامانه سه ماشین باس بی نهایت



**شکل ۱۳.** .مکان هندسی نوسان خروج ازسنکرون برای مدت زمان خطای . ۱۴ سیکل و ۳۰ = δ

در شکل (۱۲) موارد زیر وجود دارد: مقاومت درونی راست (RRI) = ۰/۰ پریونیت، مقاومت بیرونی راست (RRO) = ۰/۰ پریونیت، مقاومت بیرونی چپ (LRI) = ۰/۰ پریونیت، مقاومت درونی چپ (LRO) = ۰/۰ پریونیت، راکتانس درونی بالا (TXI) = ۲/۰ پریونیت، راکتانس بیرونی بالا (TXO) = ۰/۰ پریونیت، مستطیل های انتهایی (BX) = ۱/۹۴ – پریونیت.

نوسان به تنهایی ۲۷/۵ سیکل (۰/۴۵۸ ثانیه) طول میکشد تا بین دو مستطیل مرکزی نوسان کند. برای این مورد، الگوریتم ارائـه شـده تنها ۰/۶ ثانیه برای تشخیص خروج از سنکرون زمان میبرد. در مورد بعدی، زمان رفع خطا به ۱۶ سیکل (۰/۲۶ ثانیه) افزایش مییابد.

مکان هندسی نوسان ۲۰/۹۸ سیکل (۲۴۹۹ ثانیه) طول می کشد تا به طور کامل بین دو مستطیل مرکزی جابهجا شود و تصمیم مبنی بر خروج از سنکرون در ۴/۲۰ ثانیه اتخاذ می شود، در حالی که الگوریتم ارائه شده تنها ۲۰/۵ ثانیه برای تصمیم گیری زمان می برد. افزایش زمان رفع خطا باعث تشدید نوسان می شود، بنابراین مکان هندسی نوسان در ۱۷/۳۷ سیکل (۲۸۹۹ ثانیه) بین دو مستطیل جابهجا می شود. طرح مستطیل مرکزی ۴/۵۸ ثانیه و الگوریتم ارائه شده ۲۴/۰ ثانیه برای تصمیم گیری زمان نیاز دارد. نتایج در جدول (۴) ارائه شده است.

نتايج نشان مىدهد كه الگوريتم ارائه شده نسبت به طرح استاندارد

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 سرراست و آسان ایست. این تنظیمات به پارامترهای سامانه است که یک مزیت وقوق العاده خوب به شمار میآید. 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 ژنراتورهایی شود، آنگاه الگوریتم ارائه شده برای رله خروج از سنکرون ژنراتور با توجه به مزایایی که برای آن برشمرده شد، میتواند در زمان مناسب تشخیص مناسب را انجام دهد.

**جدول ۴**. مقایسه الگوریتم پیشنهادی با طرح مستطیل مرکزی

۳۰ درجه	۳۰ درجه	۳۰ درجه	زاويه توان پيش از خطا (δ)
١٨	18	14	تعداد سيكل خطا
• /٣ •	۰/۲۶	۰/۲۳	مدت زمان خطا، ثانیه
۴/۵۸	۴/۷۰	۴/۹۳	زمان تصمیم گیری (طرح مستطیلی)، ثانیه
•/۴٧	• /۵ •	•  8•	زمان تصمیم گیری (الگوریتم پیشنهادی)، ثانیه

### ۴. نتیجهگیری

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 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 نمود. این تحلیل نشان داد که الگوریتم پیشنهادی به هیچ پارامتری از استفاده از الگوریتم پیشنهادی به می مرکزی روی استفاده از الگوریتم پیشنهادی و روش استاندارد مستطیل مرکزی روی استفاده از الگوریتم پیشنهادی و روش استاندارد مستطیل مرکزی روی آیک 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.

۵. مراجع

- 282
- [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"; 4<sup>th</sup> 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.