

حفاظت از سنکرونیزم ژنراتور سنکرون در شبکه قدرت چندماشینه با استفاده از متغیر محلی

حمید یعقوبی^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۱۸	از دست رفتن سنکرونیزم ژنراتورهای سنکرون در شبکه‌های قدرت یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های مهندسان برق است. بیشتر روش‌های متداول برای تشخیص این شرایط، مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس در محل ژنراتور است که مشکلات بسیاری در مورد عملکرد و تنظیمات آن‌ها در مراجع مختلف گزارش شده است. از این رو برای غلبه بر برخی از مشکلات موجود، در این مقاله یک روش جدید مبتنی بر اندازه‌گیری متغیر محلی برای آشکارسازی از دست رفتن سنکرونیزم ژنراتور سنکرون، در شبکه قدرت چندماشینه ارائه شده است. در این آشکارسازی از سرعت و شتاب زاویه‌ای ژنراتور، اندازه‌گیری شده از توان خروجی ماشین در محل رله استفاده می‌شود. زمانی که پلاریته شتاب زاویه‌ای از مقداری منفی به مقداری مثبت تغییر می‌کند و سرعت زاویه‌ای از مقدار پایه سرعت زاویه‌ای بزرگ‌تر باشد، شرایط خروج از سنکرون تشخیص داده می‌شود. این روش بدون نیاز به استفاده از روش‌های پیچیده کاهش مرتبه می‌تواند به صورت مستقیم به شبکه‌های قدرت چندماشینه اعمال شود. نتایج به دست آمده بر روی شبکه‌های مختلف، کارایی، سرعت، سادگی و امنیت روش پیشنهادی را تحت شرایط عملیاتی متنوع تأیید می‌کند.
واژگان کلیدی: ژنراتور سنکرون، از دست رفتن سنکرونیزم، توان اکتیو.	

۱- مقدمه

خاموشی‌های گسترده چند سال اخیر منجر به توجه ویژه محققان به بررسی جنبه‌های مختلف حفاظت سیستم قدرت شده است. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در گزارش‌های مختلف به آن اشاره شده، نوسان توان و حفاظت خروج از سنکرون ژنراتور در شبکه‌های قدرت است [۱]. در شرایط سنکرونیزم دو میدان دوار روتور و استاتور همدیگر را جذب و با یک سرعت ثابت (سرعت سنکرون n_s) به چرخش ادامه می‌دهند. به تعبیری فیزیکی، این دو میدان با یک فنر مجازی به هم متصل شده، حرکت می‌کنند. فاصله این دو میدان با هم با زاویه قدرت، یعنی δ تعریف می‌شود. در موتور سنکرون میدان استاتور، میدان روتور را جذب می‌کند و در ژنراتور سنکرون برعکس است؛ یعنی میدان روتور، میدان استاتور را جذب می‌کند (شکل ۱). از بین رفتن این ارتباط به دلیل عوامل مختلف خروج از سنکرون نام دارد. بدون شک از دست رفتن سنکرونیزم

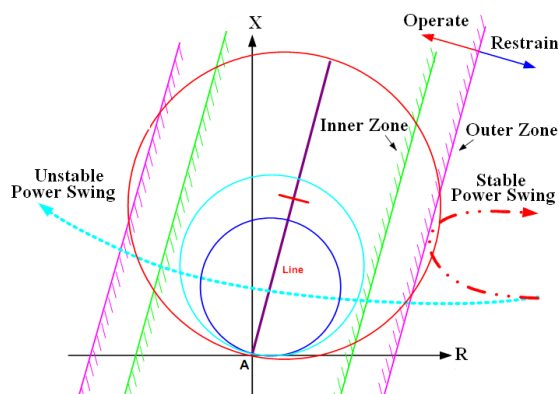
ژنراتورهای سنکرون یکی از دغدغه‌های ویژه مهندسان برق از ابتدای پیدایش این صنعت تاکنون بوده است. خروج از سنکرون در ژنراتورهای سنکرون ممکن است به علت قطع تحریک ژنراتور یا رخ دادن شرایط از دست رفتن سنکرونیزم در شبکه قدرت به وجود آید. در قطع تحریک کامل یا جزئی، سیستم تحریک به صورت کامل یا جزئی به علت برخی مسائل تکنیکی از دست می‌رود [۲]. در حالی که در شرایط خروج از سنکرون، سیستم تحریک مشکلی ندارد و ژنراتور سنکرونیزم خود را با شبکه قدرت به دلیل اغتشاشاتی مانند اتصال کوتاه، قطع و وصل خطوط، حذف بار، تغییرات ناگهانی بار و... از دست می‌دهد. این اغتشاشات منجر به حالات گذرا در سیستم می‌شوند که بسته به شدت اغتشاشات، نوساناتی در شبکه قدرت به وجود می‌آید. اگر اغتشاشات جدی باشند، نوسانات میرا نمی‌شوند و باعث عملکرد آسنکرونی ژنراتور می‌شود که این شرایط خروج از گام یا خروج از سنکرون نام دارد. نوسان توان ناپایدار که منجر به خروج از سنکرون ژنراتور می‌شود، باعث آسیب

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: yaghobi@semnan.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

در اثر القای جریان‌های گردابی و افزایش تنش‌های مکانیکی روتور و استاتور اشاره کرد.

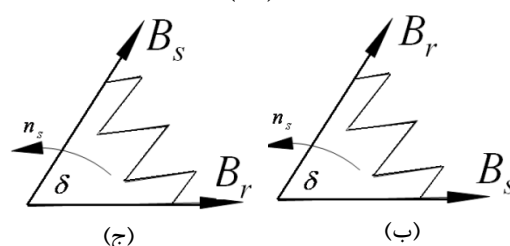
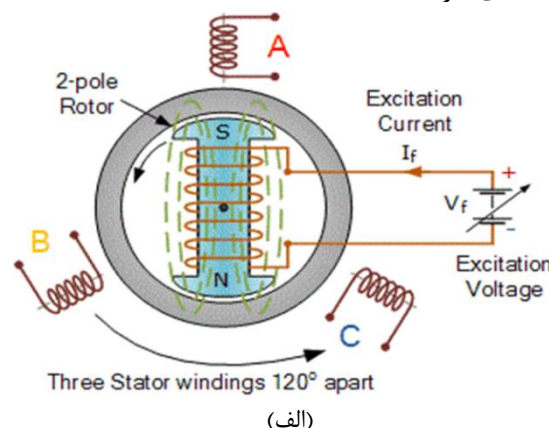
در شکل (۲) یک نمونه رله امیدانسی با طرح بلیندر دابل، نشان داده شده است. در واقع این نوع از حفاظت‌ها از یک رله دیستانس مجهز به بلیندرها در صفح $R-X$ به همراه یک تایمر استفاده می‌کنند. ساختار این نوع از رله‌ها به صورت کامل در مرجع [۳] شرح داده شده است. تنظیم بلیندرها در صفحه $R-X$ و تعیین زمان موردنظر برای مقایسه، مهم‌ترین مشکلات این نوع از حفاظت‌ها است که نیاز به مطالعات گسترده در زمینه پایداری دارند [۴]. همان‌طور که ذکر شد، زمان موردنظر برای مقایسه، با استفاده از مطالعات پایداری به دست می‌آید. این زمان زمان موردنیاز برای رسیدن زاویه قدرت از مقدار بحرانی (زاویه قدرتی که ماشین ناپایدار شده است) به زاویه 180° درجه است. این زمان را t_1 می‌نامیم. سپس زمان موردنیاز برای عبور خط سیر امیدانسی از دو زون بیرونی و درونی طرح‌های هم‌مرکز توسط یک تایمر اندازه‌گیری می‌شود و آن را t_2 می‌نامیم. حال اگر زمان t_2 از زمان t_1 کوچک‌تر باشد، خطای اتصال کوتاه رخ داده است و اگر زمان t_2 از زمان t_1 بزرگ‌تر باشد، شرایط خروج از سنکرونیسم برای ژنراتور اتفاق افتاده است.



شکل ۲: رله امیدانسی جهت حفاظت خروج از سنکرونیسم با طرح بلیندر دابل [۱]

پیچیدگی این روش‌ها زمانی که به سیستم‌های چندماشینه اعمال می‌شوند، نسبت به سیستم‌های تک‌ماشینه بسیار افزایش می‌یابد. همچنین قابل ذکر است که شرایط بار سنگین در خطوط طولانی، باعث می‌شود تا ناحیه بار به مشخصه عملکردی رله دیستانس نزدیک شود و احتمال عملکرد اشتباه رله‌های امیدانسی افزایش یابد. در مراجع [۱] و [۵] چندین مورد از عملکرد اشتباه این رله‌ها گزارش شده

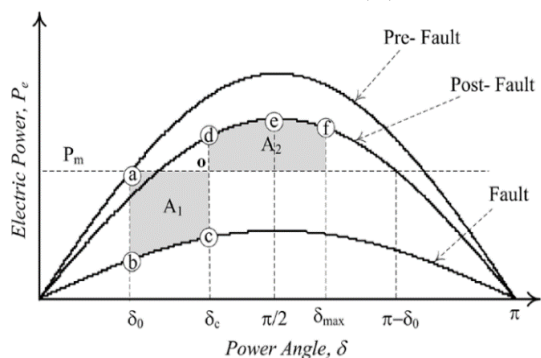
جدی به ژنراتور، وقفه در تولید و هزینه‌های سنگین اقتصادی خواهد شد [۳].



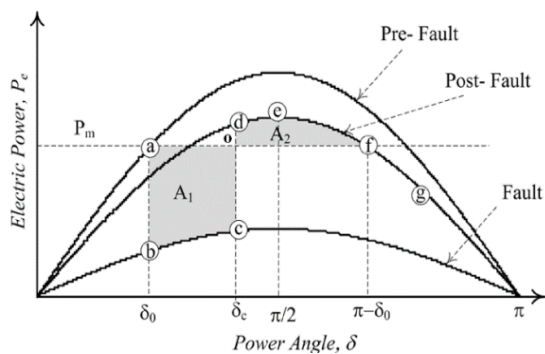
شکل ۱: ماشین سنکرون الف- نمای ماشین با در نظر گرفتن سیستم تحریک، ب- ژنراتور سنکرون از دید میدان‌های دوار، ج- موتور سنکرون از دید میدان‌های دوار

امروزه متداول‌ترین روش جهت حفاظت از دست رفتن سنکرونیسم در شبکه‌های قدرت، استفاده از رله‌های امیدانسی است که بر مبنای اندازه‌گیری امیدانسی توالی مثبت در مکان رله عمل می‌کنند. رله خروج از گام، اساساً یک رله دیستانس با طرح‌های متفاوت مانند طرح دایره هم‌مرکز، طرح عدسی هم‌مرکز، طرح مستطیل هم‌مرکز، طرح چندضلعی متحدالمرکز یا یک طرح بلیندر دابل است. انتخاب طرح بسته به ساختار شبکه قدرت، شرایط بار و نوع خطایی که در شبکه رخ می‌دهد، متفاوت است، ولی الگوریتم اصلی برای عملکرد همه آن‌ها یکسان است. صرف‌نظر از نوسان توان پایدار و ناپایدار، رله‌های دیستانس مستعد عملکرد اشتباه در تشخیص نوسان توان و خطا هستند. معمولاً از تأخیر زمانی برای جلوگیری از این اشتباه استفاده می‌شود. اما ایجاد تأخیر زمانی برای شناسایی درست خطا نمی‌تواند یک راه‌حل ایده‌آل باشد؛ چراکه این تأخیر زمانی به این معناست که طی بروز خطا، ژنراتور و شبکه قدرت برای مدت بیشتری تحت تنش قرار دارند، که همین امر باعث آسیب‌پذیری بیشتر ماشین و شبکه قدرت خواهد شد که از آن جمله می‌توان به گرم‌شدن سطح روتور

مفید هستند ولی حالت‌ها و شرایط مختلف سیستم قدرت باید به آن‌ها آموزش داده شود که معمولاً بسیار زمان‌بر و در برخی موارد غیرممکن است [۹، ۱۰]. روش ترکیبی جدیدی بر مبنای استفاده از سرعت و زاویه قدرت ژنراتور در مرجع [۵] پیشنهاد شده است. همچنین از تابع انرژی برای تشخیص شرایط نوسانات توان ناپایدار استفاده شده است [۱۱]. اما وابستگی این روش به اطلاعات ماهواره‌ای، استفاده از آن را پیچیده کرده است.



(الف)



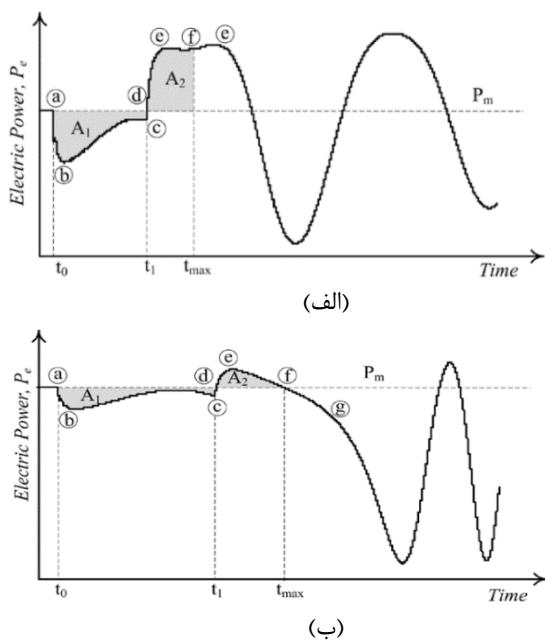
(ب)

شکل ۳: منحنی‌های توان-زاویه قدرت (P-δ) الف- حالت پایدار، ب- حالت ناپایدار [۴]

از سویی دیگر، استفاده از سرعت و شتاب زاویه‌ای اندازه‌گیری شده از ورودی‌های مختلف در مراجع [۳، ۱۲ و ۱۳] پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۲] سرعت زاویه‌ای اندازه‌گیری شده به صورت مستقیم از روتور ماشین به وسیله سنسورهای مربوط، برای تشخیص شرایط خروج از سنکرون پیشنهاد شده است. تجهیزات خاص، اطلاعات گسترده و اندازه‌گیری‌های هم‌زمان در این روش مورد نیاز است. علاوه بر این نوسانات پیچشی روتور مشکل بزرگی در این روش است. در نیروگاه‌های بخار و هسته‌ای، توربین و ژنراتور بر روی یک محور قرار دارند. در این ساختار وقتی اغتشاشی به وقوع می‌پیوندد، اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای به وسیله نوسانات پیچشی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در مرجع [۱۳]

است. از این رو برای بالابردن قابلیت اطمینان این روش‌ها و غلبه بر مشکلات موجود، تحقیقات بسیاری انجام شده است و روش‌های مختلفی توسط محققان در مراجع علمی معرفی شده است که در ادامه به صورت مختصر آن‌ها را معرفی می‌کنیم. مرجع [۶]، یک الگوریتم برای تشخیص خروج از گام بر مبنای استفاده از تغییرات مقاومت پیشنهاد می‌کند. در این طرح به جای استفاده از تغییرات امپدانس ظاهری، از تغییرات مقاومت استفاده شده است. در این طرح، همچنان نیاز به شبیه‌سازی گسترده تحت شرایط متفاوت برای تنظیم مشخصه‌های رله وجود دارد. در مرجع [۱]، نرخ تغییرات نوسان ولتاژ به عنوان تکنیکی مؤثر برای تمایز بین نوسانات پایدار و ناپایدار مطرح شده است. اما باید توجه داشت در شبکه‌های قدرت چندماشینه، ولتاژ اندازه‌گیری شده در محل رله اطلاعات دقیقی در مورد نرخ تغییرات نوسان ولتاژ در اختیار قرار نمی‌دهد. علاوه بر این مشابه روش‌های امپدانس و مقاومتی، این روش نیز به مطالعات و شبیه‌سازی‌های گسترده‌ای برای به دست آوردن مقدار آستانه نرخ تغییرات نوسان ولتاژ نیاز دارد. در مرجع [۷]، با استفاده از روش کلاسیک سطوح برابر در حوزه توان-زاویه قدرت (P-δ)، وضعیت خروج از سنکرون ماشین شناسایی می‌شود. شکل‌های (۳) الف و (۳) ب، روش کلاسیک سطوح برابر را در حوزه توان-زاویه قدرت (P-δ)، نمایش می‌دهند. با توجه به شکل (۳) الف، این تکنیک بیان می‌کند که اگر $A1 \leq A2$ ، آن‌گاه سیستم پایدار است. شکل (۳) ب مربوط به حالت ناپایدار است و در این حالت $A1 > A2$ است.

در تحقیقی دیگر [۸]، این تکنیک توسط پاولا در یک سیستم چندماشینه بررسی شده است. با استفاده از این روش، رله مورد نظر در شبکه قدرت میان ایالات جورجیا و فلوریدا در ایالات متحده در ۱۹۹۳ تعبیه شد و تا ۱۹۹۵ عملیاتی بود. اما در این روش اندازه‌گیری زاویه قدرت مشکلات خاص خود را داشت و نیازمند استفاده از PMUها و ابزارهای ارتباطی فراوانی بود. همچنین باید گفت مشکل بزرگ این روش، گرافیکی بودن آن است. برخی مراجع با استفاده از روش‌های هوشمند مبتنی بر منطق فازی و شبکه‌های عصبی، برای تشخیص نوسانات توان ناپایدار تلاش کرده‌اند. در این روش‌ها از ورودی‌های مختلفی برای آموزش سیستم استفاده شده و معمولاً ناپایداری ماشین پیش‌بینی می‌شود که از این نظر بسیار



شکل ۴: منحنی‌های توان-زمان (P-Time) الف- حالت پایدار، ب- حالت ناپایدار [۴]

شکل (۴) الف- مربوط به حالت پایدار و شکل (۴) ب- مربوط به حالت ناپایدار است. اما باید توجه داشت آنالیز مربوط گرافیکی است، در نتیجه، این ویژگی، کاربرد این روش را محدود خواهد کرد.

الگوریتم جدیدی برای تشخیص شرایط خروج از سنکرون با استفاده از سرعت و شتاب زاویه‌ای اندازه‌گیری شده از فازور ولتاژ در باس محل نصب ژنراتور پیشنهاد شده است، اما باید توجه داشت که ولتاژ تحت‌تأثیر حالت‌های گذرا ناشی از سویچینگ قرار می‌گیرد [۵]. از این رو در مرجع [۳] این الگوریتم با استفاده از ورودی شار مغناطیسی توسط نویسنده بهبود داده شده است؛ زیرا ژنراتور سنکرون یک مدار القایی سنگین است و شار مغناطیسی تحت‌تأثیر نوسانات گذرا قرار نمی‌گیرد و شاخص خوبی برای تشخیص خروج از سنکرونیزم در ماشین‌های سنکرون است. اما قابل ذکر است اندازه‌گیری شار پیوندی، کار دشواری است و نیاز به نفوذ و نصب سنسورهایی در داخل ماشین دارد.

از سوی دیگر، شایستگی توان اکتیو برای تشخیص خروج از سنکرونیزم در ماشین‌های سنکرون با استفاده از روش کلاسیک سطوح برابر در حوزه توان-زمان در مرجع [۴] به اثبات رسیده است. به عبارت دیگر به علت این که اندازه‌گیری زاویه قدرت ماشین کار سختی است، روش کلاسیک سطوح برابر به جای حوزه توان-زاویه قدرت (P- δ)، در حوزه توان-زمان (P-Time) در این مرجع پیشنهاد شده است. شکل‌های (۴) الف و (۴) ب روش کلاسیک سطوح برابر در حوزه توان-زمان (P-Time) را نمایش می‌دهند.

جدول ۱- مقایسه روش‌های مختلف تشخیص خطا [۱۴]

Parameter	Measurement Device	Potential Information Richness	Intrusive to Electrical Machine
Current	Hall Effect Transducer	Average	No
Voltage	DVM	Average	No
Flux	Search Coil	Very High	Yes And No
	Hall Effect Device		
Force	Dynamometer	Very High	No
Vibration	Accelerometer	High	Yes And No
Acoustics	Microphone	High	No
Temperature	Hand-Held Probe	Low	Yes And No
	Thermal Paint		Yes
	Thermocouple	Average	Yes
	Infra-Red Camera	High	No
Instantaneous Angular Speed	Encoder	Average	No
Torque	Torque Sensors	High	No

$$I = \frac{E_G \angle \delta - E_T \angle 0}{Z_L + Z_G} \quad (2)$$

با استفاده از روابط (۱) و (۲)، فازور توان در باس ۱ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$P = \frac{Z_L}{(Z_L + Z_G)^2} E_G^2 \angle 2\delta + \frac{Z_G}{Z_G + Z_L} E_G E_T \angle \delta - \frac{Z_L}{Z_G + Z_L} E_G E_T \angle \delta - \frac{Z_G}{(Z_L + Z_G)^2} E_T^2 \angle 0 \quad (3)$$

رابطه (۳) در حوزه زمان به صورت رابطه (۴) بازنویسی می‌شود:

$$P(t) = A \cos[w_0 t + 2\delta(t) + \alpha] + B \cos[w_0 t + \delta(t) + \beta] - C \cos[w_0 t + \delta(t) + \alpha] - D \cos[w_0 t + \beta] \quad (4)$$

در این رابطه :

$$A = \frac{Z_L}{(Z_L + Z_G)^2} |E_G^2|, B = \frac{Z_L}{(Z_L + Z_G)^2} |E_G E_R|$$

$$C = \frac{Z_G}{(Z_L + Z_G)^2} |E_T^2|, D = \frac{Z_G}{(Z_L + Z_G)^2} |E_G E_R|$$

$$\alpha = \arg\left(\frac{Z_L}{(Z_L + Z_G)^2}\right), \beta = \arg\left(\frac{Z_G}{(Z_L + Z_G)^2}\right) \quad (5)$$

با فرض اینکه امیدانس سیستم تغییر نکند، در رابطه (۴)، $P(t)$ سه مؤلفه فرکانسی $w_0 + d\delta/dt$ ، $w_0 + 2d\delta/dt$ و w_0 دارد. بنابراین با توجه چهار عبارت موجود در رابطه (۴) می‌توان نوشت:

$$4w_p = 4w_0 + 4d\delta(t)/dt \quad (6)$$

بنابراین در نهایت سرعت زاویه‌ای محاسبه شده از فازور توان طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$w_p = w_0 + d\delta(t)/dt \quad (7)$$

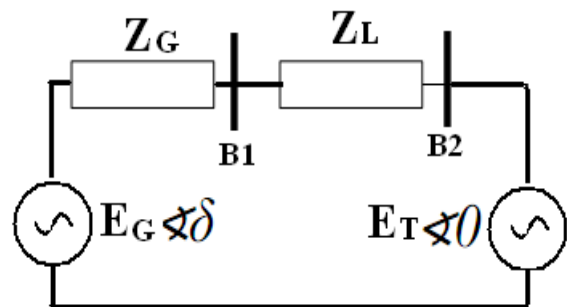
$d\delta(t)/dt$ سرعت زاویه‌ای اندازه‌گیری شده از زاویه قدرت (δ) است. علاوه بر این با گرفتن مشتق از رابطه (۷)، شتاب زاویه‌ای محاسبه شده از فازور توان نیز مطابق رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$\alpha_p = d^2 \delta(t) / dt^2 \quad (8)$$

در نهایت به منظور جمع‌بندی این مبحث، دقت کلی روش‌های مختلف تشخیص خطا در جدول ۱ آورده شده است. این جدول توسط Payne و همکاران ارائه شده که در آن به چگونگی دسترسی به اطلاعات داخل ماشین و به تجهیزات اندازه‌گیری موردنیاز نیز اشاره شده است [۱۴]. بنابراین با توجه به مفاهیم مطرح شده و برای غلبه بر بخشی از مشکلات موجود، در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص شرایط خروج از سنکرونیزم ژنراتور با استفاده از ورودی توان اکتیو بر اساس الگوریتمی جدید پیشنهاد شده است. قابل ذکر است توان اکتیو متغیری محلی محسوب می‌شود و اندازه‌گیری آن از ترمینال ماشین قابل انجام است. در این آشکارسازی از سرعت و شتاب زاویه‌ای ژنراتور، اندازه‌گیری شده از توان خروجی ماشین در محل رله استفاده می‌شود و نیازی به ماهواره و هم‌زمان‌سازی داده‌ها نیست. زمانی که پلاریته شتاب زاویه‌ای از مقداری منفی به مقداری مثبت تغییر می‌کند و سرعت زاویه‌ای از مقدار پایه سرعت زاویه‌ای بزرگ‌تر باشد، شرایط خروج از سنکرون برای ماشین تشخیص داده می‌شود. این روش بدون نیاز به استفاده از روش‌های پیچیده کاهش مرتبه، می‌تواند به صورت مستقیم به شبکه‌های قدرت چندماشینه اعمال شود. نتایج به دست آمده بر روی شبکه‌های مختلف، کارایی، سرعت، سادگی و امنیت روش پیشنهادی را تحت شرایط عملیاتی متنوع تأیید می‌کنند.

۲- محاسبه سرعت و شتاب زاویه‌ای از فازور توان

شبکه قدرت تک‌ماشینه نشان داده شده در شکل (۵) را در نظر بگیرید.



شکل ۵: شبکه قدرت تک‌ماشینه

ولتاژ و جریان باس ۱ با روابط زیر به دست می‌آیند.

$$V = \frac{Z_L}{Z_L + Z_G} E_G \angle \delta + \frac{Z_G}{Z_G + Z_L} E_T \angle 0 \quad (1)$$

ماشین به یک نقطه پایدار جدید در موقعیت 0 منتقل می‌شود. در خلال حرکت از نقطه 0 به سمت نقطه f در شکل (۳)-الف، توان الکتریکی از توان مکانیکی بزرگ‌تر است ($p_e > p_m$) و توان شتاب دهنده منفی خواهد بود ($d\delta(t)/dt > 0, d^2\delta(t)/dt < 0$ و $p_A < 0$) بنابراین طبق معادلات (۷) و (۸) $w_p > w_0, \alpha_p < 0$. نقطه f معادل بر روی شکل (۶)-الف نشان داده شده است. همچنین در طی حرکت به سمت نقطه b در شکل (۳)-الف، توان الکتریکی کمتر از توان مکانیکی است و توان شتاب‌دهنده مثبت است. بنابراین طبق معادلات (۷)، (۸) و (۱۱)، $w_p < w_0, \alpha_p > 0$ خواهد بود. نقطه معادل b در شکل (۶)-الف نمایش داده شده است و در نهایت نقطه کار ماشین به یک نقطه پایدار جدید در موقعیت 0 منتقل می‌شود.

در حالت نوسان توان ناپایدار، وقتی اغتشاشی در شبکه قدرت، رخ می‌دهد، زاویه قدرت (δ) مطابق شکل (۳)-ب شروع به نوسان بین نقاط 0، f، و g می‌کند. در حالت کار پایدار، نقطه کار ماشین در نقطه 0 قرار دارد و در این نقطه $p_e = p_m$ و توان شتاب‌دهنده $p_A = 0$ است. در این حالت خواهیم داشت $w_p = w_0, \alpha_p = 0$. نقطه کار معادل بر روی شکل (۶)-ب نمایش داده شده است. با شروع اغتشاش نقطه کار ماشین به سمت نقطه f در شکل (۳)-ب حرکت می‌کند. در نقطه e در شکل (۳)-ب، توان الکتریکی از توان مکانیکی بزرگ‌تر است ($p_e < p_m$) و توان شتاب‌دهنده منفی خواهد بود ($p_A < 0$) و معادلات (۷) و (۸)، $w_p > w_0, \alpha_p < 0$ خواهد بود.

در نقطه f سطح A1 بزرگ‌تر از سطح A2 است و حرکت بر روی شکل (۳)-ب ادامه خواهد داشت. در این حالت $p_e < p_m$ ، توان شتاب‌دهنده مثبت ($p_A < 0$) و $d\delta(t)/dt > 0, d^2\delta(t)/dt > 0$ خواهد بود. بنابراین $w_p > w_0, \alpha_p > 0$. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نقطه g ماشین به سمت ناپایداری پیش می‌رود و به عبارتی دیگر سنکرونیسم خود با شبکه قدرت را از دست داده است.

بنابراین در این روش، هنگامی که پلاریته مقدار متوسط شتاب زاویه‌ای (محاسبه‌شده از توان اکتیو) از علامت منفی به مثبت تغییر می‌کند و مقدار متوسط سرعت زاویه‌ای

در قسمت بعدی نحوه استفاده از سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای محاسبه‌شده از فازور توان، برای تشخیص خروج از سنکرونیسم به صورت کامل شرح داده شده است.

۳- روش پیشنهادی

ابتدا تبدیل فوریه گسسته بر روی توان اکتیو اعمال می‌شود تا دامنه و زاویه توان اکتیو به دست آید. آن‌گاه متوسط سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای به ترتیب به صورت زیر محاسبه شود.

$$w_{P_{avg}}(k) = \sum_{k=-N}^N \frac{\angle P(k) - \angle P(k-1)}{T} \quad (۹)$$

$$\alpha_{P_{avg}}(k) = \sum_{k=-N}^N \frac{\angle w(k) - \angle w(k-1)}{T} \quad (۱۰)$$

k تعداد نمونه‌ها و T دوره تناوب است. قابل ذکر است، توان اکتیو به راحتی در ترمینال ماشین قابل اندازه‌گیری است و معمولاً خروجی این متغیر بر روی تابلوهای کنترل در مراکز صنعتی موجود است. همچنین معادله نوسان ماشین که رفتار دینامیکی آن را توصیف می‌کند در رابطه زیر آورده شده است [۴].

$$\frac{M}{w_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = p_m - p_e = p_A \quad (۱۱)$$

M ثابت اینرسی ماشین، p_e توان الکتریکی، p_m توان مکانیکی، p_A توان شتاب‌دهنده و w_s فرکانس شبکه قدرت است.

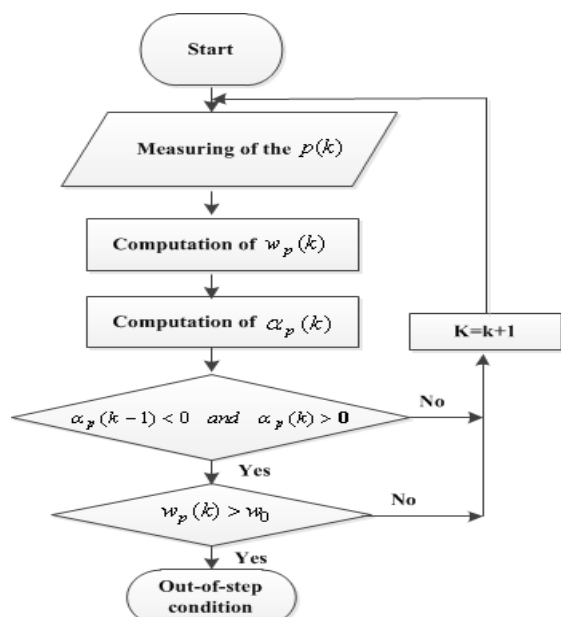
در حالت نوسان توان پایدار، وقتی اغتشاشی در شبکه قدرت، رخ می‌دهد، زاویه قدرت (δ) مطابق شکل (۳)-الف بین نقاط 0، f و b شروع به نوسان می‌کند. در حالت کار پایدار، نقطه کار ماشین در نقطه 0 قرار دارد و در این نقطه $p_e = p_m$ و توان شتاب‌دهنده $p_A = 0$ است. در این حالت طبق معادله نوسان (معادله (۱۱)) داریم:

$$d\delta(t)/dt = 0, d^2\delta(t)/dt = 0$$

در نهایت بر اساس معادلات (۷) و (۸) خواهیم داشت $w_p = w_0, \alpha_p = 0$. نقطه کار معادل، این نقطه بر روی منحنی شکل (۶)-الف نمایش داده شده است.

با شروع اغتشاش نقطه کار ماشین به سمت نقطه f در شکل (۳)-الف حرکت می‌کند. در این نقطه دو سطح A1 و A2 با هم برابر می‌شوند و حرکت متوقف خواهد شد و نقطه کار

دارد. قابل ذکر است الگوریتم پیشنهادی چنین قابلیت‌هایی را دارا است. در واقع به دلیل استفاده از سیگنالی محلی، یعنی توان اکتیو هر ژنراتور، می‌توان همه ژنراتورها را به رله پیشنهادی مجهز کرد. در این صورت با توجه به الگوریتم ارائه شده، چنانچه شرایط خروج از سنکرون برای هر ژنراتوری برقرار شد، به این مفهوم است آن ژنراتور زودتر از بقیه ژنراتورها در معرض خروج از سنکرونیزم قرار گرفته است و سیگنال تریپ برای آن ژنراتور ارسال خواهد شد.



شکل ۷: فلوچارت روش پیشنهادی

۴- بررسی عملکرد رله پیشنهادی جهت

تشخیص خروج از سنکرون ژنراتور

در این قسمت، عملکرد رله پیشنهادی برای شرایط مختلف در شبکه قدرت ۱۷ باسه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۸). در این شبکه قدرت ۱۷ باس (B1-B17)، ۸ ترانسفورماتور (Tr1-Tr8)، ۱۴ خط انتقال (T1-T13)، ۲ ژنراتور سنکرون (G1, G2)، ۲ بار موتوری (M1, M2) و ۴ بار استاتیک وجود دارد. جزئیات این شبکه قدرت در ضمیمه [۱۵ و ۱۶] ارائه شده است. در این شبکه هر دو ژنراتور به رله پیشنهادی مجهز شده‌اند و با در نظر گرفتن گاورنر، پایدارساز، اکسایتر و توربین هیدرولیکی بر اساس مدل‌های ارائه شده در مراجع [۱۷ و ۱۸] مدل‌سازی شده‌اند. براساس توصیه‌های انجام شده در مرجع [۱۵]، به منظور ایجاد نوسانات توان پایدار و ناپایدار، خطای سه فاز اتصال کوتاه متعددی با زمان‌های متنوع در وسط خطوط انتقال T5، T7a و T9 انجام شده است.

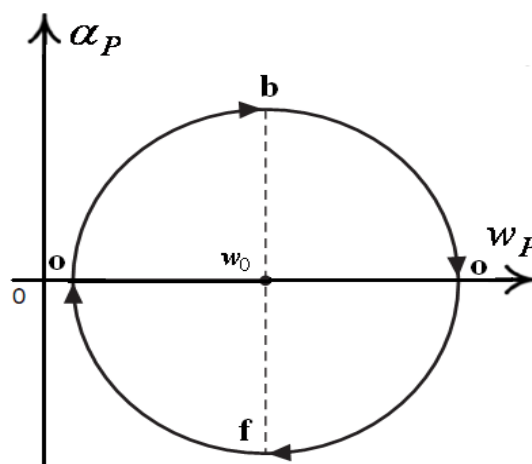
(محاسبه شده از توان اکتیو)، از مقدار پایه سرعت زاویه‌ای یعنی از $w_0 = 377 \text{ rad/s}$ بزرگ‌تر باشد، شرایط خروج از سنکرونیزم ژنراتور تشخیص داده خواهد شد و در غیر این صورت سیستم پایدار خواهد بود. به عبارت دیگر برای خروج از سنکرون باید شرایط (a) و (b) در معادله زیر با هم برقرار باشد:

$$\alpha_p(k-1) < 0 \text{ and } \alpha_p(k) > 0$$

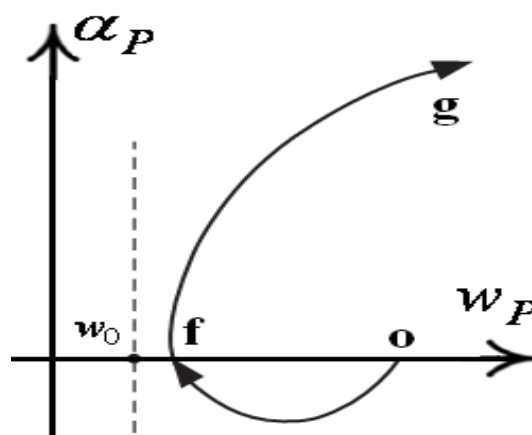
$$w_p(k) > w_0 \tag{۱۲}$$

⇒ Out-of-step Condition

الگوریتم روش پیشنهادی به صورت خلاصه در شکل (۷) آورده شده است.



(الف)

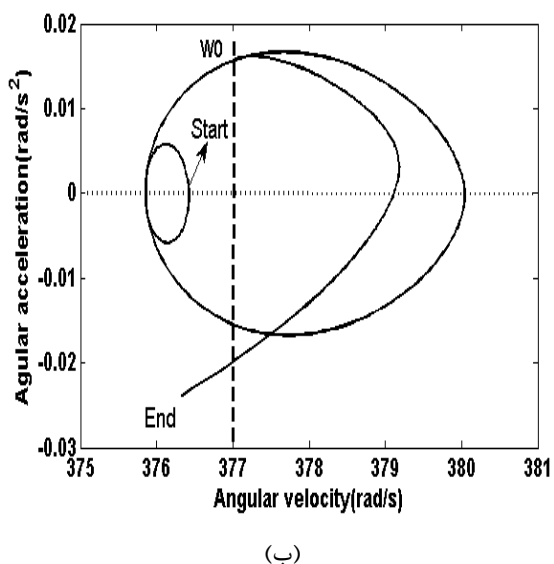
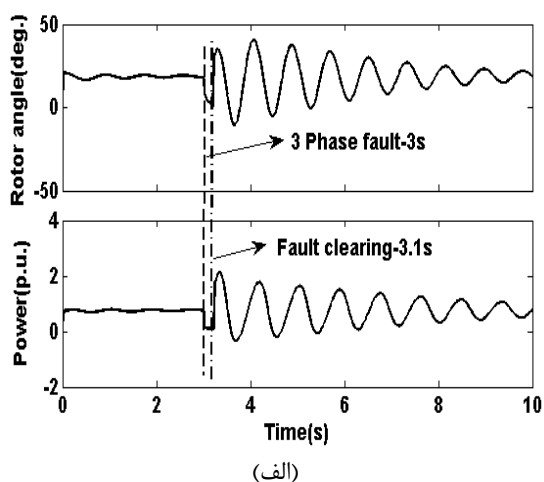


(ب)

شکل ۶: سرعت و شتاب زاویه‌ای محاسبه شده از توان الکتریکی الف-حالت پایدار، ب-حالت ناپایدار

از سوی دیگر، در یک سیستم چندماشینه و به دنبال وقوع یک خطا، تشخیص اینکه کدام یک از ژنراتورها زودتر از بقیه در معرض خروج از سنکرونیزم قرار می‌گیرند اهمیت زیادی

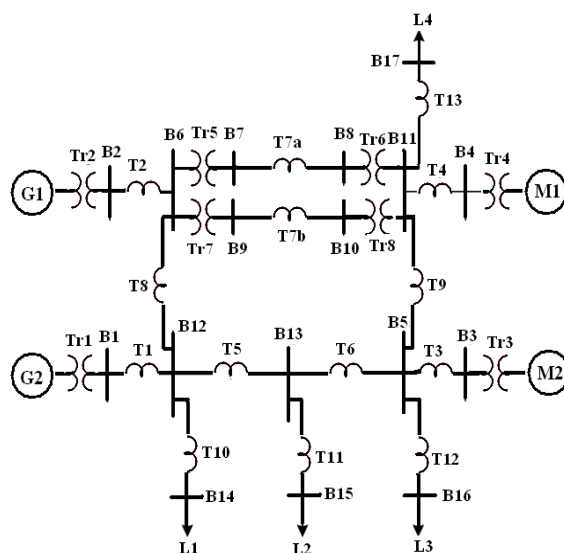
در شکل (۹)-الف زاویه قدرت و توان اکتیو خروجی ژنراتور مربوط به حالت ۱، نشان داده شده است. همچنین در شکل (۹)-ب شتاب زاویه‌ای برحسب سرعت زاویه‌ای ماشین محاسبه شده از توان اکتیو، نمایش داده شده است. همان طور که از این شکل مشخص است، پس از زمان رفع خطای اتصال کوتاه مطابق با الگوریتم ارائه شده، منحنی حرکت حلزونی دارد. با توجه به اینکه شرایط خروج از سنکرون در این حالت برقرار نشده است، با عنایت به خروجی الگوریتم پیشنهادی، این مورد حالت پایدار نوسان توان است که برای ژنراتور و شبکه مضر نیست (به شکل‌های (۶)-الف و (۹)-ب دقت شود).



شکل ۹: اثر نوسان توان پایدار بر ژنراتور ۱ در خلال شبیه‌سازی حالت اول الف-زاویه قدرت و توان اکتیو خروجی ماشین، ب- شتاب زاویه‌ای برحسب سرعت زاویه‌ای ماشین محاسبه شده از توان اکتیو

سپس ۱۶ نمونه از سیگنال توان اکتیو، ولتاژ خروجی و شار مغناطیسی استاتور ژنراتورهای ۱ و ۲ برای محاسبه سرعت و شتاب زاویه‌ای و تشخیص خروج از سنکرون ماشین بر اساس الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. قابل ذکر است استفاده از ولتاژ خروجی برای محاسبه سرعت و شتاب زاویه‌ای در مرجع [۱۳] و استفاده از شار مغناطیسی استاتور برای محاسبه سرعت و شتاب زاویه‌ای در مرجع [۳] توسط نویسنده پیشنهاد شده است.

یک خطای سه فاز اتصال کوتاه در وسط خط T9 با ۴ زمان مختلف ۰،۱۴، ۰،۱۴۷، ۰،۱۴۸ و ۰،۱۶ ثانیه ایجاد شده است. در حالت اول با زمان خطای ۰،۱۴ ثانیه نوسان توان پایدار ایجاد شد. در حالت بعدی که زمان خطا به ۰،۱۴۷ ثانیه افزایش داده شده است نیز نوسان توان پایدار ایجاد شد. با زمان‌های خطای ۰،۱۴۸ و ۰،۱۶ ثانیه، نوسان توان ناپایدار ایجاد شد که به ترتیب در زمان‌های ۱،۰۷ و ۱،۱۲۱ ثانیه توسط روش پیشنهادی تشخیص داده شده است. این نتایج برای ژنراتور ۱ در حالت‌های مختلف، در جدول ۲ به صورت خلاصه آورده شده است. همچنین جهت مقایسه با تحقیقات انجام شده در مراجع [۳ و ۱۳]، از ورودی‌های ولتاژ و شار مغناطیسی نیز برای محاسبه سرعت و شتاب زاویه‌ای استفاده شده است و نتایج در جداول مربوط ارائه شده است.



شکل ۸: شبکه قدرت ۱۷ باسه [۱۵]

با توجه به نتایج ارائه شده، مشخص است که، متغیر ولتاژ شاخص مطمئنی نیست؛ زیرا تحت تأثیر نوسانات ناشی از سویچینگ قرار می‌گیرد و دقت لازم در تشخیص را ندارد [۵].

جدول ۲: نتایج برای رله پیشنهادی نصب شده در محل ژنراتور ۱ با استفاده از ورودی‌های مختلف-ایجاد خطای سه فاز در وسط خط انتقال T9

شبه‌سازی	۱	۲	۳	۴
بار قبل از خطا-p.u.	۱,۲۴۳۶	۱,۲۴۳۶	۱,۲۴۳۶	۱,۲۴۳۶
مدت زمان خطا-s	۰,۱۴	۰,۱۴۷	۰,۱۴۸	۰,۱۶
حالت واقعی نوسان	پایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
ولتاژ-زمان تشخیص-s	پایدار	پایدار	×	۱,۳۲۴
شار-زمان تشخیص-s	پایدار	پایدار	۰,۴۵۳	۰,۵۷۱
توان-زمان تشخیص-s	پایدار	پایدار	۱,۰۷	۱,۱۲۱

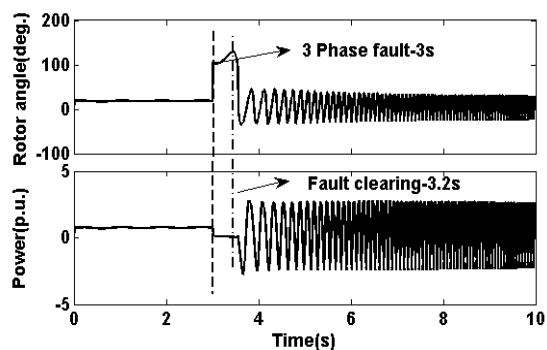
جدول ۳: نتایج برای رله پیشنهادی نصب شده در محل ژنراتور ۱ با استفاده از ورودی‌های مختلف-ایجاد خطای سه فاز در وسط خط انتقال T5

شبه‌سازی	۵	۶	۷	۸
بار قبل از خطا-p.u.	۱,۳۱۹۹	۱,۳۱۹۹	۱,۳۱۹۹	۱,۳۱۹۹
مدت زمان خطا-s	۰,۰۸	۰,۱	۰,۱۰۱۰	۰,۱۱
حالت واقعی نوسان	پایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
ولتاژ-زمان تشخیص-s	پایدار	پایدار	۱,۳۵	×
شار-زمان تشخیص-s	پایدار	پایدار	۰,۶۱۲	۰,۵۴۲
توان-زمان تشخیص-s	پایدار	پایدار	۱,۲۴	۰,۹۸۵

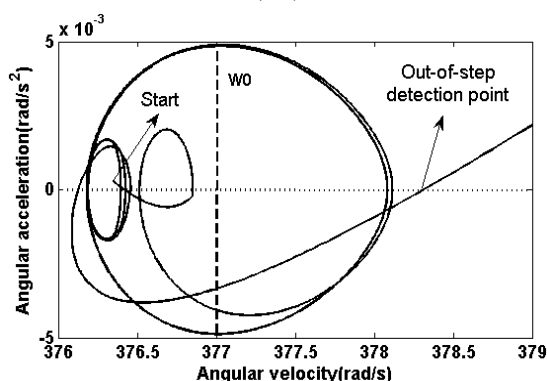
جدول ۴: نتایج برای رله پیشنهادی نصب شده در محل ژنراتور ۲ با استفاده از ورودی‌های مختلف-ایجاد خطای سه فاز در وسط خطوط مختلف

شبه‌سازی	۹	۱۰	۱۱	۱۲
بار قبل از خطا-p.u.	۱,۳۱۹۹	۱,۳۱۹۹	۱,۳۱۹۹	۱,۳۱۹۹
مدت زمان خطا-s	۰,۰۸	۰,۱	۰,۱۰۱۰	۰,۱۱
حالت واقعی نوسان	پایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
محل ایجاد خطا	T5	T7a	T5	T9
ولتاژ-زمان تشخیص-s	پایدار	پایدار	۱,۶۵	۱,۷۴
شار-زمان تشخیص-s	پایدار	پایدار	۰,۶۳	۰,۷
توان-زمان تشخیص-s	پایدار	پایدار	۱,۴۹	۱,۵۶

برای تشخیص خروج از سنکرون را به دنبال خواهد داشت.

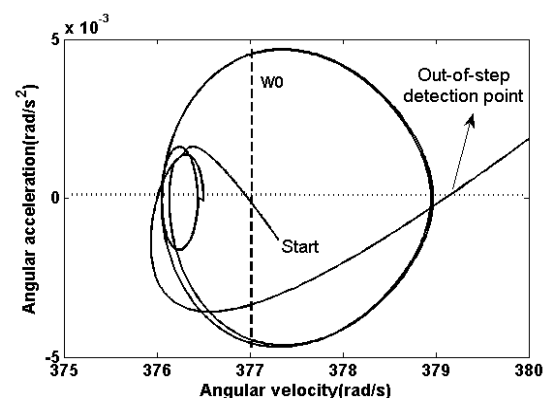


(الف)



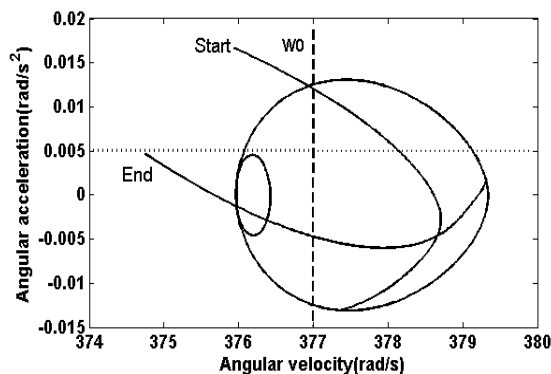
(ب)

شکل ۱۱: اثر نوسان توان ناپایدار بر ژنراتور ۱ در خلال شبیه‌سازی حالت سوم، الف-زاویه قدرت و توان اکتیو خروجی ماشین، ب- شتاب زاویه‌ای بر حسب سرعت زاویه‌ای ماشین محاسبه شده از توان اکتیو



شکل ۱۲: شتاب زاویه‌ای بر حسب سرعت زاویه‌ای ماشین محاسبه شده از توان اکتیو، مربوط به ژنراتور ۱ ناشی از نوسان توان ناپایدار در خلال شبیه‌سازی حالت چهارم

این متغیر، شاخص قابل اطمینانی است؛ زیرا یک ژنراتور سنکرون، یک مدار القایی سنگین است و نوسانات ناشی از سویچینگ تأثیر کمی بر این متغیر دارند [۳]. در عین حال باید توجه کرد که اندازه‌گیری شار پیوندی مغناطیسی در



شکل ۱۰: شتاب زاویه‌ای بر حسب سرعت زاویه‌ای ماشین محاسبه شده از توان اکتیو، مربوط به ژنراتور ۱ ناشی از نوسان توان پایدار در خلال شبیه‌سازی حالت دوم

در شکل (۱۰) شتاب زاویه‌ای بر حسب سرعت زاویه‌ای ماشین محاسبه شده از توان اکتیو مربوط به حالت ۲، نمایش داده شده است. با توجه به اینکه شرایط خروج از سنکرون در این حالت نیز برقرار نشده است، بنابراین با عنایت به خروجی الگوریتم پیشنهادی، این مورد نیز حالت پایدار نوسان توان است. در شکل (۱۱)-الف زاویه قدرت و توان اکتیو خروجی ژنراتور مربوط به حالت سوم، نشان داده شده است.

همچنین در شکل (۱۱)-ب منحنی شتاب زاویه‌ای بر حسب سرعت زاویه‌ای ماشین محاسبه شده از توان اکتیو، مربوط به حالت سوم نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۱۱)-الف خروج از سنکرون در این حالت اتفاق افتاده است. از سوی دیگر خروجی الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱۱)-ب، نیز این حالت را به درستی تشخیص داده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، شرط خروج از سنکرون مطرح شده در معادله (۱۲) برقرار شده است و ماشین به سمت ناپایداری پیش می‌رود.

همچنین در شکل (۱۲) شتاب زاویه‌ای بر حسب سرعت زاویه‌ای ماشین محاسبه شده از توان اکتیو مربوط به حالت ۴، نمایش داده شده است. با توجه به اینکه شرایط خروج از سنکرون در این حالت نیز برقرار شده است، بنابراین با عنایت به خروجی الگوریتم پیشنهادی، این مورد نیز حالت ناپایدار نوسان توان است. نتایج تحلیل‌های مشابه، برای ژنراتورهای ۱ و ۲ در حالت‌های مختلف دیگر، در جداول ۳ و ۴ به صورت خلاصه آورده شده است.

با بررسی و تحلیل نتایج ارائه شده در جداول ۲، ۳ و ۴ مشخص است، چنانچه از شار مغناطیسی برای محاسبه سرعت و شتاب زاویه‌ای استفاده شود، کمترین زمان لازم

$$\lambda_{q0} = -\frac{(v_d - r_a i_d)}{w} \quad (18)$$

با استفاده از این مفاهیم و معادلات (۱۵) و (۱۶) شار در دو محور d و q یعنی λ_d و λ_q تخمین زده می‌شوند. سپس با استفاده از معادله زیر شار منتج از ماشین محاسبه می‌شود.

$$\lambda = \sqrt{\lambda_d^2 + \lambda_q^2} \quad (19)$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود محاسبات زیادی برای تخمین شار موردنیاز است که در کاربردهای عملی، باعث محدودیت می‌شود. در حالی که اندازه‌گیری توان اکتیو در ترمینال ماشین به راحتی قابل انجام است و معمولاً توسط سازنده در دسترس بهره‌بردار قرار می‌گیرد. بنابراین اندازه‌گیری راحت و ساده سیگنال توان اکتیو بدون نیاز به نفوذ به داخل ماشین بر تخمین شار ارجحیت دارد. همچنین چون توان الکتریکی، از حاصل ضرب ۲ متغیر محلی ولتاژ و جریان در ترمینال ماشین به دست می‌آید، دارای قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به هر کدام از این متغیرها است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید با استفاده از سرعت و شتاب زاویه‌ای ژنراتور، اندازه‌گیری شده از توان اکتیو ماشین در محل رله، برای تشخیص شرایط خروج از سنکرون ژنراتور ارائه شده است. در این الگوریتم، زمانی که پلاریته شتاب زاویه‌ای از مقداری منفی به مقداری مثبت تغییر می‌کند و سرعت زاویه‌ای از مقدار پایه سرعت زاویه‌ای بزرگ‌تر باشد، شرایط خروج از سنکرون برای ماشین تشخیص داده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص از دست رفتن سنکرونیسم ژنراتور سنکرون، بر روی یک شبکه قدرت چندماشینه ۱۷ باسه تحت شرایط عملیاتی متنوع موردبررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در شرایط مختلف، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد و بدون نیاز به استفاده از روش‌های پیچیده کاهش مرتبه می‌تواند به صورت مستقیم به شبکه‌های قدرت چندماشینه اعمال شود. در این روش، تشخیص شرایط پایدار و ناپایدار ژنراتور، صرفاً با استفاده از داده‌های قابل دسترس در ترمینال ماشین انجام می‌گیرد و به اطلاعات شبکه قدرت و مطالعات گسترده پایداری نیازی

ماشین‌های الکتریکی کار آسانی نیست و باید به داخل ماشین نفوذ کرد که از نظر برخی از منتقدان ممکن است برای ماشین خطرناکی را به دنبال داشته باشد. از سوی دیگر، بحث تخمین، برای اندازه‌گیری شار مطرح می‌شود که باید به موارد زیر در این موضوع توجه کرد.

۱- پیچیدگی روش‌های تخمین شار و محاسبات زیاد که سرعت روش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع در تخمین شار به مدل دقیق ماشین نیاز داریم. قابل ذکر است، در بیشتر این روش‌ها باید خطی‌سازی انجام گیرد. در ضمن آن روش‌هایی که نیاز به خطی‌سازی ندارند، محاسبات بسیار زیادی دارند.

۲- تخمین یک سیگنال نسبت به اندازه‌گیری مستقیم آن سیگنال، دقت کمتری دارد. در عین حال، تخمین سیگنال نیز نیاز به سخت‌افزار دارد.

به عنوان نمونه، در ادامه روند تخمین سیگنال شار استاتور یک ژنراتور سنکرون آورده شده است. با در نظر گرفتن مدل یک ژنراتور سنکرون در قاب مرجع روتور خواهیم داشت [۱۹]:

$$v_d = \frac{d\lambda_d}{dt} - w\lambda_q - r_a i_d \quad (13)$$

$$v_q = \frac{d\lambda_q}{dt} + w\lambda_d - r_a i_q \quad (14)$$

متغیرهای v_d ، v_q ، i_d ، i_q از روی سیگنال‌های مرتبط با استاتور از ترمینال ماشین قابل محاسبه هستند. w سرعت روتور است که به صورت الکتریکی یا مکانیکی قابل اندازه‌گیری است. با حل معادلات دیفرانسیل و بازنویسی معادلات (۱۳) و (۱۴) معادلات زیر به دست می‌آید.

$$\frac{1}{\Delta t} \lambda_{dk} - w\lambda_{qk} = v_{dk} + r_a i_{dk} + \frac{1}{\Delta t} \lambda_{d(k-1)} \quad (15)$$

$$\frac{1}{\Delta t} \lambda_{qk} + w\lambda_{dk} = v_{qk} + r_a i_{qk} + \frac{1}{\Delta t} \lambda_{q(k-1)} \quad (16)$$

k نشان‌دهنده نمونه k ام سیگنال و Δt فاصله زمانی بین نمونه‌ها است. برای حل دقیق این معادلات، مقادیر اولیه شار، یعنی λ_{d0} و λ_{q0} موردنیاز است. این مقادیر می‌توانند از شرایط حالت ماندگار طبق معادلات زیر محاسبه شوند:

$$\lambda_{d0} = \frac{(v_q + r_a i_q)}{w} \quad (17)$$

نیست. این ویژگی‌ها باعث می‌شود روش پیشنهادشده بدون کارایی، سرعت و سادگی باشد. نیاز به استفاده از ماهواره‌ها و هم‌زمان‌سازی داده‌ها، دارای

۶- ضمیمه

جدول ۵: مشخصات ماشین‌ها [۱۴]

Machine	G1	G2	M1	M2
Rated Power (MW)	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۶۰۰	۶۰۰
Rated I-I Voltage (kV)	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
X_d (p.u.)	۰.۸۶۶	۰.۸۶۶	-	-
Inertia Constant (sec)	۱.۷	۱.۷	-	-

جدول ۶: مشخصات ترانسفورماتورها [۱۴]

Name	MVA Rating	Voltage Ratio (kV)	X (p.u.)
Tr1	۱۵۰۰	۱۵,۵۰۰	۰,۱
Tr2	۳۰۰۰	۱۵,۵۰۰	۰,۱
Tr3	۸۰۰	۱۵,۵۰۰	۰,۱
Tr4	۹۰۰	۱۵,۵۰۰	۰,۱
Tr5	۱۰۰۰	۵۰۰,۷۳۵	۰,۱
Tr6	۱۰۰۰	۵۰۰,۷۳۵	۰,۱
Tr7	۱۰۰۰	۵۰۰,۷۳۵	۰,۱
Tr8	۱۰۰۰	۵۰۰,۷۳۵	۰,۱

جدول ۷: مشخصات خطوط انتقال [۱۴]

Transmission Line	Length (km)	Reactance (p.u.)
TL1	۱۲۰	۰,۱۳۴۳
TL2	۵۰	۰,۰۷
TL3	۴۵	۰,۰۵۶۰۳
TL4	۱۶۰	۰,۰۷۱۶
TL5	۱۰۰	۰,۱۱۶۶
TL6	۶۰	۰,۰۷۰۶
TL7a	۱۳۰	۰,۰۷۰۹
TL7b	۱۳۰	۰,۰۷۰۹
TL8	۵۰	۰,۰۵۴۳۱
TL9	۴۵	۰,۰۴۸۸۸
TL10	۵۰	۰,۰۴۸۸۸
TL11	۵۰	۰,۰۵۹۷۴
TL12	۴۵	۰,۰۳۲۵۸
TL13	۴۵	۰,۰۴۸۰۰

۷- مراجع

- [1] IEEE Power System Relaying Committee Working Group D6, "Power swing and out-of-step considerations on transmission lines", 2005.
- [2] Amini, M., Davarpanah, M., Sanaye-Pasand, M., "A Novel Approach to Detect the Synchronous Generator Loss of Excitation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No.3, 2015, pp. 1429-1438.
- [3] Yaghoobi, H., "Out-of-step protection of generator using analysis of angular velocity and acceleration data measured from magnetic flux", Elsevier, Electric Power Systems Research, vol. 132, 2016, pp. 9-21.
- [4] Paudyal, S., Ramakrishna, G., Sachdev, S., "Application of equal area criterion conditions in the time domain for out-of-step protection", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, No.2, 2010, pp. 600-609.
- [5] Paudyal, S., Ramakrishna, G., Sachdev, S., "Out-of-step protection using state-plane trajectories analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, No.2, 2013, pp. 1083-1093.
- [6] Taylor, J.H., Hill, L., Mittelstadt, W., Cresap, R., "A new out-of-step relay with rate of change of apparent resistance augmentation", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, No. 3, 1983, pp. 631-639.
- [7] Centeno, V., et al., "An adaptive out-of-step relay for power system protection", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, No.1, 1997, pp. 61-71.
- [8] Xue, Y., Van Custem, T., Ribbens-Pavella, M., "Extended equal area criterion justifications, generalizations, applications", IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, No. 1, 1989, pp. 44-52, 1989.
- [9] Rebizant, W., "Fuzzy logic application to out-of-step protection of generators", IEEE, Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, 2001, pp. 927-932.
- [10] Abdelaziz, A.Y., et al., "Adaptive protection strategies for detecting power system out-of step conditions using neural networks", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 145, No. 4, 1998, pp. 387-394.
- [11] Abdelaziz, A.Y., Irving, M.R., El-Arabaty, A.M., Mansour, M.M., "Out-of-step prediction based on artificial neural networks", Elsevier, Electric Power Systems Research, vol. 34, 1995, pp. 135-142.
- [12] Morioka, Y., et al., "System separation equipment to minimize power system instability using generator's angular-velocity measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, No.3, 1993, pp. 941-947.
- [13] So, K.H., Heo, J.Y., Kim, C.H., Aggarwal, R.K., Song, K.B., "Out-of-step detection algorithm using frequency deviation of voltage", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 1, No. 1, 2007, pp. 119-126.
- [14] Payne, B.S., Husband, S.M., Ball, A.D., "Development of condition monitoring techniques for a transverse flux motor", IEE, International conference on power electronics, machines and drives-PEMD, Bath, UK, 2002, pp. 139-144.
- [15] Paudyal, S., Gokaraju, R., "Out-of-step protection for multi-machine power systems using local measurements", IEEE Conference on powertech, Eindhoven, 2015.
- [16] Paudyal, S. (2008). "Out-of-step protection using energy equilibrium criterion in the time domain". M.Sc Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- [17] IEEE Std. 421.5, "Recommended practice for excitation system models for power system stability studies", 1992.
- [18] IEEE Working group, "prime mover and energy supply models for system dynamic performance studies, Hydraulic turbine and turbine control models for dynamic studies", IEEE Trans. Power Syst., vol. 7, No. 1, 1992, pp. 167-179.
- [19] Ong, C.M., "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using MATLAB/SIMULINK", Prentice Hal, New Jersey, 2nd edn, 1998.