

## پایش آنلاین وضعیت پایداری ولتاژ کوتاه مدت در قالب سامانه حفاظت از یکپارچگی

### سیستم

محمود لشگری<sup>۱</sup> و سید محمد شهرتاش<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران، lashgri@elec.iust.ac.ir

<sup>۲</sup> قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران، shahrtash@iust.ac.ir

چکیده - در این مقاله الگوریتمی مبتنی بر PMU با هدف پایش آنلاین وضعیت پایداری ولتاژ کوتاه مدت بعد از بروز یک اغتشاش بزرگ در سیستم قدرت معرفی شده است. به منظور حفظ یکپارچگی کل سیستم از منظر پایداری کوتاه مدت ولتاژ، الگوریتم پیشنهادی بر پایه ساختار سامانه حفاظت از یکپارچگی سیستم و با قابلیت پیش‌بینی زود هنگام ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت ارائه شده است. روش پیشنهادی براساس تغییرات دو شاخص انحراف فرکانس و پاسخ فرکانس اینرسی در زمان بعد از وقوع اغتشاش است و با توجه به مسیر تغییرات این دو شاخص و بدون نیاز به مقدار آستانه‌ای، وضعیت پایداری ولتاژ کوتاه مدت پایش می‌شود. مطابق نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی شبکه ۳۹ شین IEEE که به منظور بررسی پایداری ولتاژ کوتاه مدت، موتورهای القایی به آن اضافه شده است، الگوریتم پیشنهادی دارای قابلیت اطمینان و امنیت ۱۰۰٪ است. کلید واژه- پایداری ولتاژ کوتاه مدت، پیش‌بینی زود هنگام، PMU، موتور القایی، فرکانس.

شده‌اند.

### ۱- مقدمه

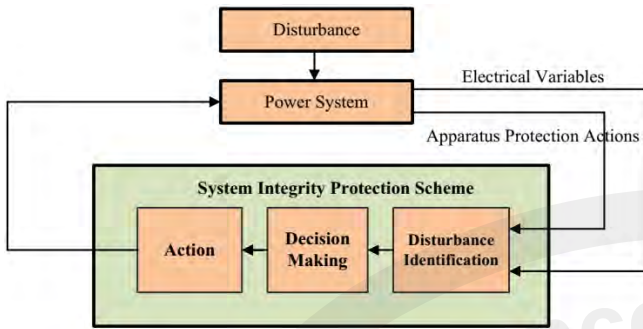
در [۲] روش Maximum Lyapunov Exponents (MLE) به عنوان ابزاری که همگرایی و یا واگرایی مسیر تغییرات ولتاژ شین‌های بار را نشان می‌دهد، به منظور پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه پنجره مورد نیاز برای محاسبه MLE نقش بسیار مهمی در دقت و سرعت عملکرد این روش دارد به گونه ای که اندازه کوچک پنجره منجر به سرعت بالا در پیش‌بینی ولی کاهش امنیت عملکرد می‌شود و موارد پایدار به عنوان حالت ناپایدار تشخیص داده می‌شوند و اندازه بزرگ پنجره اگرچه منجر به افزایش امنیت می‌شود اما سرعت پیش‌بینی را کاهش می‌دهد. همچنین اندازه طول بهینه برای پنجره وابسته به نوع و شدت اغتشاش و ساختار شبکه است [۲]، که این امر موجب عدم امکان پیاده‌سازی روش در شرایط بررسی پایداری بصورت زمان حقیقی می‌شود. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز در [۸-۹] و با هدف پایش ناپایداری کوتاه مدت ولتاژ معرفی شده‌اند. در این روش‌ها ابزارهای مختلفی همچون شبکه عصبی به منظور تفکیک حالت پایدار از ناپایدار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اگرچه روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی از سرعت بالایی برخوردار هستند اما میزان دقت عملکرد آنها وابسته به میزان آموزش داده در شرایط مختلفی همچون انواع شرایط بهره‌برداری و تغییر توپولوژی شبکه است.

مدار معادل تونن به عنوان مدل ساده شده یک سیستم قدرت بزرگ، روش تحلیلی است که در بررسی تعیین وضعیت پایداری ولتاژ در مراجع

ناپایداری ولتاژ به دلیل ناتوانی سیستم قدرت در حفظ ولتاژ پایدار و قابل قبول در تمام شین‌ها در شرایط کار عادی و پس از اعمال یک اغتشاش به وجود می‌آید [۱]. براساس نوع اغتشاش و مدت زمان مورد مطالعه، مشکلات پایداری ولتاژ به ترتیب به اغتشاش بزرگ و کوچک و پدیده کوتاه مدت و بلند مدت تقسیم‌بندی می‌شود [۱]. برخلاف پایداری ولتاژ بلند مدت در اثر وقوع اغتشاش کوچک، به مشکلات پایداری کوتاه مدت ولتاژ در اثر وقوع اغتشاش بزرگ کمتر پرداخته شده است [۲].

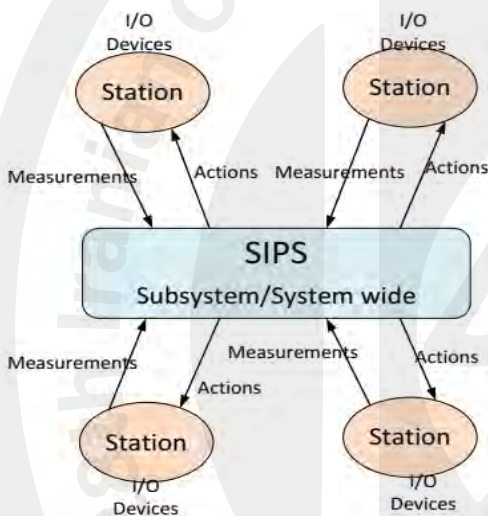
ناپایداری کوتاه مدت ولتاژ عمدتاً در اثر توقف موتورهای القایی بوجود می‌آید [۲]. در این شرایط به دنبال وقوع یک پیشامد، موتورهای القایی در بازه زمانی چند ثانیه پس از پیشامد، به اندازه شش برابر مقدار نامی، توان راکتیو مصرف می‌کنند. اکثر مطالعات انجام شده در زمینه پایداری ولتاژ کوتاه مدت بر روی مدل‌سازی دینامیکی و بارهای با عکس العمل سریع مانند موتورهای القایی متمرکز بوده است. در [۳] تأثیر موتورهای القایی بر روی پایداری ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج بدست آمده در [۴]، با افزایش درصد حضور موتورهای القایی در شبکه، مشکلات ناپایداری کوتاه مدت ولتاژ آشکار می‌شود.

شاخص‌های مختلفی در مراجع برای بررسی تشخیص ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت در نظر گرفته است. در [۵] توقف موتور القایی، در [۶] زمان بحرانی رفع خطا، در [۷] منحنی ولتاژ بعد از وقوع اغتشاش به عنوان معیارهای بررسی و تشخیص ناپایداری کوتاه مدت ولتاژ در نظر گرفته



شکل ۱: نحوه عملکرد کلی SIPS [۱۳]

شده و به یک مکان مرکزی منتقل می‌شود و پردازش داده‌ها و تصمیم‌گیری در این مکان مرکزی انجام می‌شود. در الگوریتم ارائه شده در این مقاله، ساختار متمرکز مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲: SIPS متمرکز [۱۴]

### ۳- معرفی صفحه ارزیابی پایداری (SAP)

طرح پیشنهادی ارائه شده مبتنی بر فرکانس ژنراتورهای شبکه است که فرض این الگوریتم در دسترس بودن این مقادیر توسط PMUهای قرار گرفته در شین‌های ژنراتوری شبکه می‌باشد. در این بخش ابتدا صفحه ارزیابی پایداری ارائه شده در این مقاله معرفی شده است و در ادامه، مراحل الگوریتم پیشنهادی به صورت گام به گام تشریح شده است. شرط فعال‌سازی الگوریتم پیشنهادی مقدار گرفتن سیگنال  $\Delta F_i$  (تغییر فرکانس نسبت به فرکانس شبکه) مطابق رابطه (۱) است.

$$\Delta F_i(j\Delta t) = f_i(j\Delta t) - 1 \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $f_i(j\Delta t)$  بیانگر فرکانس خروجی ژنراتور  $i$  ام است.

مختلفی همچون [۱۰] مورد استفاده قرار گرفته است. در روش‌های مبتنی بر محاسبه و تخمین پارامترهای مدار معادل تونن، از آنجاییکه از دینامیک ژنراتور صرف‌نظر شده و تنها به دینامیک بار توجه می‌شود، تحت حالت‌هایی که شرایط بهره‌برداری ژنراتورها تغییر می‌کنند، مدل ساده شده از دقت کافی برخوردار نخواهد بود [۱۱].

به دنبال وقوع اغتشاش در شبکه، نامتعادلی میان بار و تولید بوجود می‌آید که این موضوع سبب انحراف فرکانس خواهد شد [۱۲]. در این مقاله با استفاده از فرکانس اندازه‌گیری شده توسط PMUهای نصب شده در شین‌های ژنراتوری و سپس محاسبه پاسخ فرکانس اینرسی (IFR) و انحراف فرکانس و در نهایت بررسی نحوه تغییرات این دو شاخص، الگوریتمی به منظور پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت در قالب سامانه حفاظت از یکپارچگی (SIPS) سیستم ارائه شده است.

در ادامه، ساختار مقاله بدین شرح است: در بخش دوم سامانه حفاظت از یکپارچگی سیستم تشریح شده است. در بخش سوم الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش چهارم به شبیه‌سازی و بررسی نتایج پرداخته شده است و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

### ۲- سامانه حفاظت از یکپارچگی سیستم (SIPS)

تجهیزات حفاظتی مرسوم به دلیل استفاده از داده‌های محلی، قادر به حفظ یکپارچگی کل سیستم نیستند، بنابراین به منظور اتخاذ اقدامات کنترلی مناسب در وضعیت اضطراری سیستم، طراحی سیستم حفاظت جامعی که بتواند با ارزیابی شرایط کل سیستم عمل نماید، ضروری است. در سال‌های اخیر برای حل این مسئله از طرح‌های حفاظت یکپارچگی سیستم، با نام SIPS استفاده شده است. SIPS را می‌توان به عنوان سیستم حفاظت خودکار به منظور شناسایی شرایط غیرعادی و یا از پیش تعیین شده سیستم یا اغتشاشات معرفی نمود که با تشخیص زود هنگام موجب حفظ پایداری سیستم در شرایط اضطراری می‌شود [۱۳].

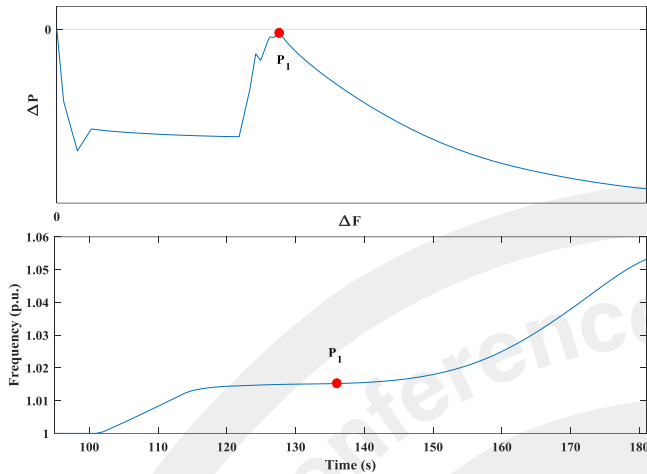
وقوع اغتشاش در سیستم قدرت را می‌توان از روش‌های مختلفی همچون استفاده از اندازه‌گیری ولتاژها و جریان‌ها و یا عملکرد یک رله در برابر وقوع این اغتشاش، مشاهده نمود. این سیگنال‌ها می‌توانند به عنوان ورودی SIPS مورد استفاده قرار گیرند و با استفاده از المان‌های تصمیم‌گیری، مورد پردازش قرار گیرند. اگر معیار در نظر گرفته شده برای تصمیم‌گیری از سطح تعیین شده خارج شود، اقدامات از پیش تعیین شده اجرا خواهند شد. ساختار این فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است.

در طرح‌های SIPS از ساختارهای مختلفی همچون مسطح، سلسله مراتبی و متمرکز استفاده می‌شود [۱۴]. در ساختار متمرکز، مطابق نام این و شکل ۲، تمام اطلاعات از پست‌ها و محل‌های مورد پایتشی جمع‌آوری

۲ Stability Assessment Plot (SAP)

۱ Inertial frequency response (IFR)

۲ System Integrity protection scheme (SIPS)



شکل ۴: صفحه SAP با وجود موقعیت P<sub>1</sub>

- **موقعیت P<sub>2</sub>:** در صورتیکه موقعیت P<sub>1</sub> یک موقعیت ماکزیمم نسبی باشد (حالت اول)، فرکانس پس از این موقعیت، کاهش می‌یابد. محلی که مطابق شکل ۳ (ب)، این روند کاهشی متوقف شود و فرکانس مجدداً افزایش یابد، موقعیت P<sub>2</sub> تعیین می‌شود. از آنجایی که این موقعیت یک موقعیت اکسترمم به حساب می‌آید، مشتق فرکانس (ΔP<sub>i</sub>) مقداری نزدیک صفر است.

#### ۴- الگوریتم پیشنهادی

در ادامه، گام‌های الگوریتم پیشنهادی تشریح شده است.

##### گام اول) انتخاب ژنراتورهای کاندیدا (در شرایط آنلاین)

با وقوع اغتشاش در شبکه، ژنراتورهایی که از نظر الکتریکی کمترین فاصله تا محل اغتشاش را دارند، بیشترین تأثیر از اغتشاش را می‌پذیرند [۱۵]. بگونه‌ای که به دلیل اختلاف ایجاد شده در توان مکانیکی و الکتریکی، فرکانس به طور ناگهانی افزایش می‌یابد و بیشتر بودن شیب این افزایش برای ژنراتوری نسبت به دیگر ژنراتورها، نشان دهنده تأثیر پذیری بیشتر این ژنراتور از اغتشاش بوجود آمده است. بر همین اساس در طرح پیشنهادی، با وقوع اغتشاش ابتدا ژنراتوری که مقدار میانگین |ΔP<sub>i</sub>| آن در ۵ گام زمانی اول بعد از وقوع اغتشاش دارای بیشترین مقدار است، انتخاب شده و از میان دیگر ژنراتورها، ژنراتورهایی که مقدار میانگین ΔP<sub>i</sub> آنها در بازه زمانی مذکور بیشتر از نصف |ΔP<sub>i</sub>| ژنراتور انتخاب شده باشد، به عنوان ژنراتورهای کاندیدا انتخاب می‌شوند و سپس تغییرات ΔP<sub>i</sub>-ΔF<sub>i</sub> مربوط به آنها جهت پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

##### گام دوم) پیش‌بینی وقوع ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت (در شرایط آنلاین)

در الگوریتم پیشنهادی، سه شرط به منظور پیش‌بینی وقوع ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت چک می‌شوند. دو شرط از این شروط مربوط به دو موقعیت P<sub>1</sub> و P<sub>2</sub> تشریح شده در بخش ۳ است. در ادامه هر یک از این شروط تشریح شده‌اند.

همزمان با فعال شدن الگوریتم، سیگنال ΔF<sub>i</sub> و سیگنال IFR (ΔP<sub>i</sub>) مطابق رابطه (۲) در هر گام زمانی محاسبه می‌شوند.

$$\Delta P_i(j \Delta t) = -\frac{2H_i}{f_0} S_{Ni} \frac{df_i(j \Delta t)}{dt} \quad (2)$$

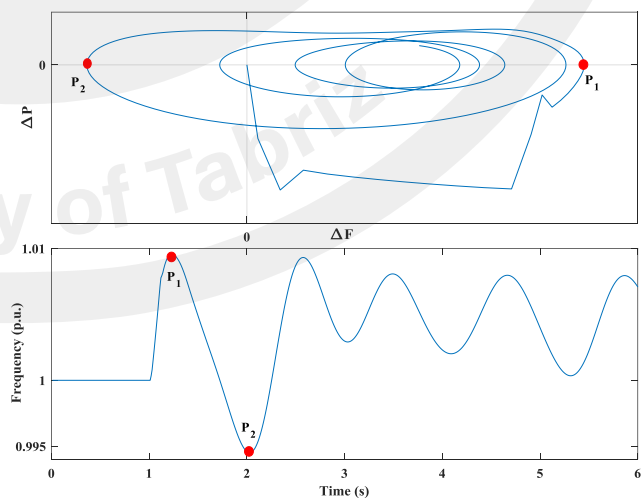
و در رابطه (۲)، H<sub>i</sub>، S<sub>Ni</sub> و f<sub>0</sub> به ترتیب بیانگر اینرسی، توان ظاهری نامی ژنراتور i ام و فرکانس نامی است.

با رسم تغییرات دو سیگنال ΔF<sub>i</sub> و ΔP<sub>i</sub> نسبت به یکدیگر، صفحه ارزیابی پایداری ولتاژ کوتاه مدت (SAP) ایجاد می‌شود. الگوریتم پیشنهادی ارائه شده در این مقاله مبتنی بر تشخیص دو موقعیت در صفحه SAP در شرایط آنلاین است. این دو موقعیت عبارتند از:

- **موقعیت P<sub>1</sub>:** با توجه به روند تغییرات فرکانس، دو حالت برای موقعیت P<sub>1</sub> ممکن است وجود داشته باشد:

➤ **حالت اول)** موقعیت P<sub>1</sub> محلی است که مطابق شکل ۳ (الف)، فرکانس پس از طی روند افزایشی، کاهش نماید، در نتیجه این موقعیت یک ماکزیمم نسبی (یا ماکزیمم در حالت پایدار) تلقی می‌شود و مشتق فرکانس در موقعیت P<sub>1</sub> مقداری نزدیک به صفر است. در نتیجه مطابق شکل ۳ (ب)، موقعیتی که ΔF<sub>i</sub> از آن لحظه شروع به کاهش می‌نماید و مقدار ΔP<sub>i</sub> که متناسب با مشتق فرکانس است نزدیک مقدار صفر است، موقعیت P<sub>1</sub> تعیین می‌شود.

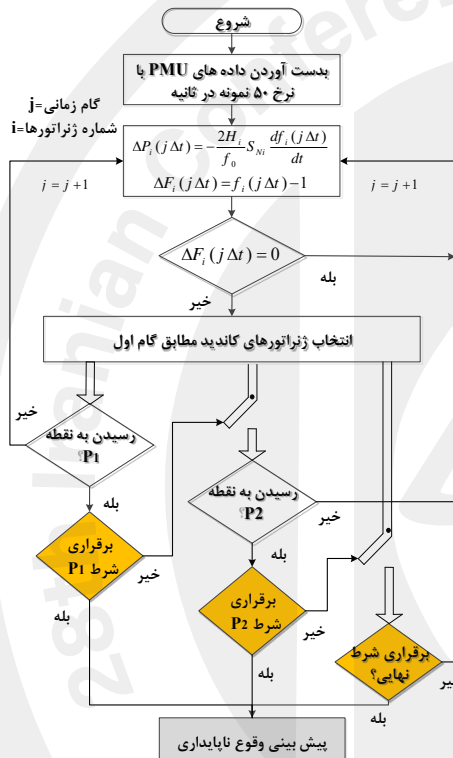
➤ **حالت دوم)** موقعیت P<sub>1</sub> موقعیتی است که مطابق شکل ۴ (الف)، فرکانس در حین صعوی بودن دارای یک نقطه عطف باشد. این نقطه عطف باعث تغییر پلاریته مشتق فرکانس شده و در نتیجه همانطور که در صفحه ارزیابی SAP در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است، مسیر تغییرات در راستای محور ΔP<sub>i</sub> که وابسته به مقدار مشتق فرکانس است، بعد از موقعیت P<sub>1</sub> تغییر نموده است.



شکل ۳: صفحه SAP، به همراه دو موقعیت مورد پایش P<sub>1</sub> و P<sub>2</sub>

تغییرات صفحه  $SAP$  پس از عبور از دو موقعیت  $P_1$  و  $P_2$  به سمت افزایش در مقدار  $\Delta F_i$  و کاهش در مقدار  $\Delta P_i$  خواهد شد. بنابراین دو شاخص  $\Delta F_i$  و  $\Delta P_i$  بعد از موقعیت  $P_2$  تا آخرین نمونه مورد پایش قرار می‌گیرند و به محض آنکه الگوریتم به ازای  $50$  نمونه متوالی تشخیص افزایش در مقدار  $\Delta F_i$  و کاهش در  $\Delta P_i$  را بدهد، وقوع ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت پیش‌بینی می‌شود، در غیر اینصورت الگوریتم تشخیص شرایط پایدار می‌دهد.

روندنامی الگوریتم پیشنهادی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: روندنامی الگوریتم پیشنهادی

### ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش عملکرد الگوریتم به ازای وقوع شرایط منجر به حالت پایدار و ناپایدار ولتاژ کوتاه مدت بر روی شبکه ۳۹ شین IEEE [۱۶]، مطابق شکل ۷، بررسی شده است.

شبیه‌سازی‌های دینامیکی مورد نیاز در نرم افزار DIgSILENT [۱۷]، انجام شده و الگوریتم پیشنهادی در نرم افزار متلب اجرا شده است. همانطور که در [۱۸] بررسی شده است، عدم در نظر گرفتن دینامیک ژنراتور منجر کاهش دقت تحلیل می‌شود، به همین منظور در شبکه ۳۹ شین IEEE مورد مطالعه در این مقاله از مدل مرتبه شش برای ژنراتورها استفاده شده و واحدها دارای کنترلر AVR، گاورنر و PSS می‌باشند. از آنجاییکه مهمترین بخش در بررسی ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت، بحث مدلسازی بار است، سه موتور القایی در سه شین ۱۸، ۲۱ و ۲۶ در نظر گرفته شده است و سایر بارها مطابق روابط (۵) و (۶) از نوع وابسته به فرکانس و ولتاژ است.

➤ **شرط P1:** اگر موقعیت  $P_1$  مطابق حالت دوم شرح داده شده در بخش ۳ باشد، الگوریتم پیشنهادی در همان موقعیت از نظر زمانی، وقوع ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت را پیش‌بینی می‌نماید.

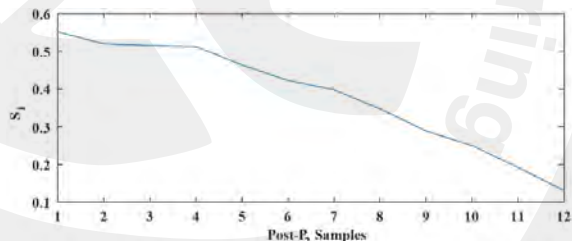
➤ **شرط P2:** موقعیت  $P_2$  در صورتی وجود خواهد داشت که موقعیت  $P_1$  مطابق حالت اول شرح داده شده در بخش ۳ باشد. با رسیدن مسیر تغییرات در صفحه  $SAP$  به موقعیت  $P_2$ ، مقدار  $\Delta F_i$  در این موقعیت را با مقدار آن در موقعیت  $P_1$  مقایسه می‌نماید. اگر  $\Delta F_i(P_2) / \Delta F_i(P_1) > 0.5$  باشد، الگوریتم بدون بررسی شرط  $P_2$  در این گام زمان تشخیص شرایط پایدار می‌دهد و در ادامه بررسی، الگوریتم مطابق روندنامی نشان داده شده در شکل ۶، وارد بخش بررسی شرط نهایی می‌شود. شرط  $P_2$  بدین صورت است که ابتدا سیگنال  $D_i$  مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$D_i(t) = \Delta P_i(t - \Delta t) - \Delta P_i(t) \quad (3)$$

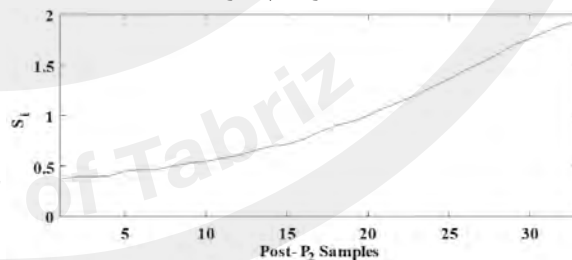
در شرایط پایدار انتظار آن است که به دلیل نزدیک شدن مقادیر  $\Delta P_i$  به هم، پوش سیگنال  $D_i$  نزولی باشد. به منظور یافتن نزولی و یا صعودی بودن تغییرات، با استفاده از قاعده دوزنقه‌ای، سیگنال  $S_i$  که برابر با رابطه (۴) است، محاسبه می‌شود.

$$S_i(x) = \sum [D_i(t - \Delta t) + \frac{D_i(t - 2\Delta t) + D_i(t)}{2}] \quad (4)$$

سیگنال  $S_i$  برای دو حالت پایدار و ناپایدار به ترتیب در حالت‌های (الف) و (ب) شکل ۵ نشان داده شده است.



(الف) شرایط پایدار

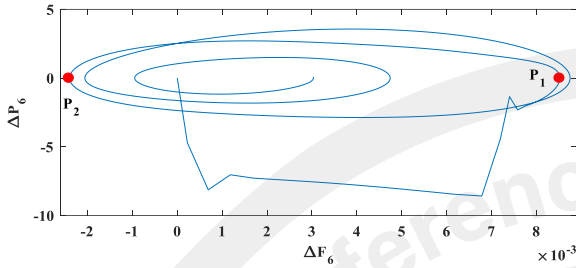


(ب) شرایط ناپایدار

شکل ۵: تغییرات سیگنال  $S$  در دو شرایط پایدار و ناپایدار  
شرط  $P_2$  بدین صورت می‌باشد که اگر  $S_i(3) > S_i(2)$  باشد، وقوع ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت پیش‌بینی می‌شود و در غیر اینصورت الگوریتم وارد بررسی شرط نهایی خواهد شد.

➤ **شرط نهایی:** با وقوع ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت، فرکانس در مقدار و شیب افزایش می‌یابد که این نحوه تغییرات منجر به حرکت مسیر

مطابق گام اول الگوریتم، چهار ژنراتور  $G_3$ ،  $G_4$ ،  $G_6$  و  $G_7$  به عنوان ژنراتورهای کاندید انتخاب شده و صفحه  $SAP$  به ازای ژنراتور  $G_6$  به عنوان ژنراتوری که بیشتری تاثیر را از وقوع خطا داشته است در شکل ۹ نشان داده شده است.

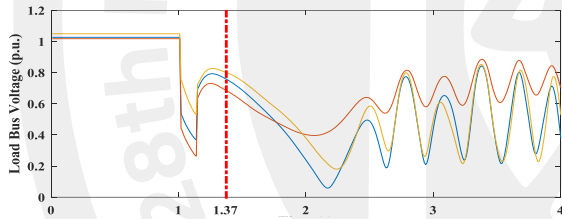


شکل ۹: صفحه  $SAP$  در شرایط پایدار

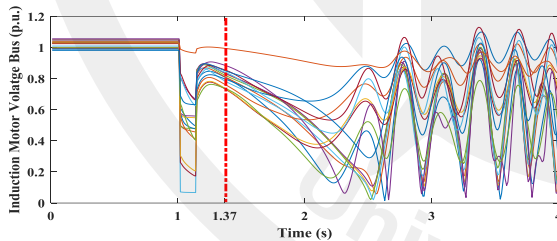
مطابق شکل ۹، هیچ یک از سه شرط  $P_1$  و  $P_2$  و نهایتاً بر آورده نشده است و الگوریتم به درستی تشخیص شرایط پایدار ولتاژ کوتاه مدت داده است.

#### ۵-۲- بررسی شرایط ناپایدار با استفاده از $SAP$

به ازای وقوع خطای ذکر شده در بخش ۵-۱ در فاصله ۵۰ درصد از خط ۱۵ که منجر به ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت شده است، ولتاژ سه شین دارای موتور القایی، ولتاژ سایر شین‌های بار و صفحه  $SAP$  به ازای ژنراتور  $G_6$  به ترتیب در شکل ۱۰ (الف) و (ب) و ۱۱ نشان داده شده است.

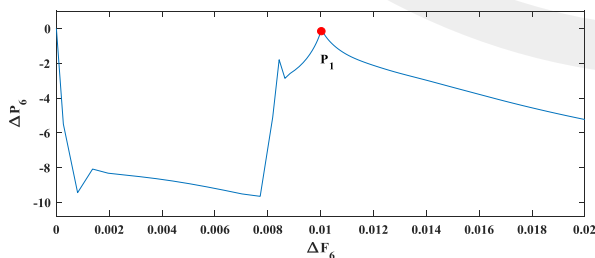


(الف) ولتاژ شین‌های بار

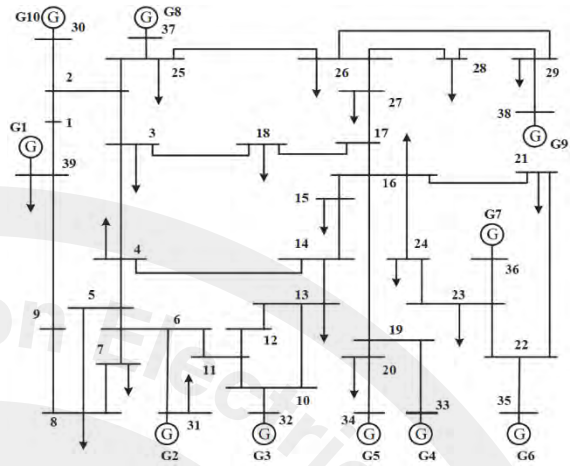


(ب) ولتاژ شین‌های موتور القایی

شکل ۱۰: تغییرات ولتاژ بعد از وقوع و پاکسازی خطا



شکل ۱۱: صفحه  $SAP$  در شرایط ناپایدار



شکل ۷: شبکه تست ۳۹ شین IEEE

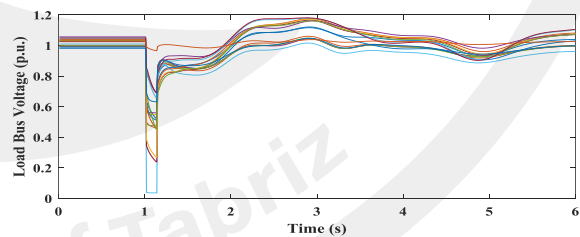
$$P_{Load} = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right) \left( \frac{f}{f_0} \right)^{0.75} \quad (5)$$

$$Q_{Load} = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (6)$$

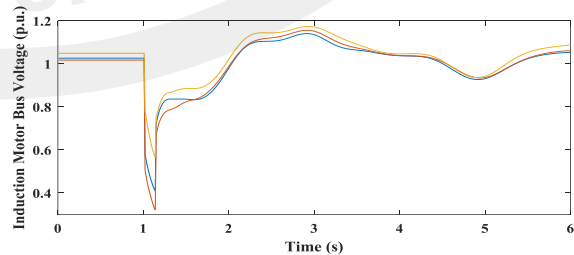
در روابط (۵) و (۶)،  $V_0$  و  $f_0$  ولتاژ و فرکانس نامی بارها است. همچنین به منظور در نظر گرفتن عملکرد PMU، بازه زمانی نمونه‌برداری برابر با ۰/۰۱ ثانیه انتخاب شده است.

#### ۵-۱- بررسی شرایط پایدار با استفاده از $SAP$

عملکرد الگوریتم پیشنهادی به ازای وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز بر روی خط ۱۵-۱۶ در فاصله ۲۵ درصد از خط ۱۵ و به مدت ۷ سیکل (۱۱۶.۶ میلی ثانیه) در این بخش بررسی شده است. ولتاژ سه شین دارای موتور القایی و ولتاژ سایر شین‌های بار به ترتیب در شکل ۸ (الف) و (ب) نشان داده شده است.



(الف) ولتاژ شین‌های بار



(ب) ولتاژ شین‌های موتور القایی

شکل ۸: تغییرات ولتاژ بعد از وقوع و پاکسازی خطا

## مراجع

- [1] P. Kundur, et al., "Definition and Classification of Power System Stability," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 2, pp. 1387-1401, 2004.
- [2] S. Dasgupta, M. Paramasivam, U. Vaidya and V. Ajarapu, "Real-Time Monitoring of Short-Term Voltage Stability Using PMU Data," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 4, pp. 3702-3711, 2013.
- [3] B. Otomega, T. Van Cutsem, "A load shedding scheme against both short- and long-term voltage instabilities in the presence of induction motors", Proc. PowerTech 2011 IEEE Trondheim, pp. 1-7, 2011.
- [4] A Technical Reference Paper Fault-Induced Delayed Voltage Recovery NERC Transmission Issues Subcommittee and System Protection and Control Subcommittee, 2009.
- [5] G. Lammert, D. Premm, L. D. P. Ospina, J. C. Boemer, M. Braun and T. Van Cutsem, "Control of Photovoltaic Systems for Enhanced Short-Term Voltage Stability and Recovery," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, no. 1, pp. 243-254, 2019.
- [6] K. Kawabe, Y. Ota, A. Yokoyama and K. Tanaka, "Novel Dynamic Voltage Support Capability of Photovoltaic Systems for Improvement of Short-Term Voltage Stability in Power Systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 3, pp. 1796-1804, 2017.
- [7] W. Zhao, Q. Guo, H. Sun, H. Ge and H. Li, "Practical short-term voltage stability index based on voltage curves: definition, verification and case studies," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 12, no. 19, pp. 4292-4300, 2018.
- [8] Y. Xu et al., "Assessing Short-Term Voltage Stability of Electric Power Systems by a Hierarchical Intelligent System," IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 27, no. 8, pp. 1686-1696, 2016.
- [9] L. Zhu, C. Lu, Z. Y. Dong and C. Hong, "Imbalance Learning Machine-Based Power System Short-Term Voltage Stability Assessment," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 13, no. 5, pp. 2533-2543, 2017.
- [10] Y. Wang et al., "Voltage Stability Monitoring Based on the Concept of Coupled Single-Port Circuit," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 4, pp. 2154-2163, 2011.
- [11] H. Ge, Q. Guo, H. Sun and W. Zhao, "A model and data hybrid-driven short-term voltage stability real-time monitoring method", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 114, pp. 105373, 2020.
- [12] J. D. Lara-Jimenez, J. M. Ramirez and F. Mancilla-David, "Allocation of PMUs for power system-wide inertial frequency response estimation," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 11, pp. 2902-2911, 2017.
- [13] M. Panteli and P. Crossley, "Impact of SIPS performance on power systems integrity", International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, pp. 280-285, 2011.
- [14] Y. Cong, "Synchronized Measurement Technology Supported Operational Tripping Schemes", Doctoral thesis at the University of Manchester, 2015.
- [15] A. G. Phadke and J. S. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. New York: Springer, 2008.
- [16] M.A. Pai, Energy Function Analysis for Power System Stability. Boston, MA, USA: Kluwer, 1989.
- [17] D. PowerFactory, Version 15.0. DlgSILENT International, Germany.
- [18] K. Kawabe and A. Yokoyama, "Study on short-term voltage stability improvement using batteries on extra-high voltage network," IEEE Grenoble Conference, Grenoble, pp. 1-3, 2013.

مطابق شکل ۱۱، برقراری شرط P1 توسط الگوریتم تایید شده است و وقوع ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت در مدت زمان ۰.۳۷ ثانیه بعد از وقوع اغتشاش تشخیص داده است. همانطور که در شکل ۱۰ این زمان در مقایسه با زمان وقوع فروپاشی و ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت نشان داده شده است، الگوریتم پیشنهادی با سرعت بالایی وقوع این ناپایداری را پیش‌بینی نموده است.

## ۳-۵- بررسی کلی شرایط پایداری ولتاژ کوتاه مدت

پیشامدهای در نظر گرفته شده شامل خطاهای اتصال سه فاز در ۵ محل مختلف بر روی خطوط انتقال (در ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) در شرایط پاکسازی خطا در سه مدت زمان استاندارد ۵، ۶ و ۷ سیکل، توسط جدا شدن خط خطادار از شبکه است. بنابراین ۵۱۰ حالت به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته شده است. نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادی تحت پیشامدهای ذکر شده، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادی

مدت زمان باقی ماندن خطا (سیکل)	وضعیت	پایدار پیش‌بینی شده	ناپایدار پیش‌بینی شده	قابلیت اطمینان (%)	امنیت (%)
۵	پایدار	۱۳۳	صفر	۱۰۰	۱۰۰
	ناپایدار	صفر	۳۷		
۶	پایدار	۱۱۰	صفر	۱۰۰	۱۰۰
	ناپایدار	صفر	۶۰		
۷	پایدار	۹۵	صفر	۱۰۰	۱۰۰
	ناپایدار	صفر	۷۵		

مطابق نتایج نشان داده شده در جدول ۱، الگوریتم پیشنهادی دارای دقت ۱۰۰٪ در دو حالت تشخیص شرایط پایدار و ناپایدار ولتاژ کوتاه مدت است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتمی در قالب سامانه حفاظت از یکپارچگی سیستم به منظور پیش‌بینی وضعیت پایداری ولتاژ کوتاه مدت ارائه شد. در روش ارائه شده با استفاده از تغییرات فرکانس ایجاد شده در اثر نامتعادلی میان بار و تولید به دنبال وقوع یک اغتشاش بزرگ، دو شاخص انحراف فرکانس و پاسخ فرکانس اینرسی بصورت آنلاین محاسبه شده و با بکارگیری مسیر تغییرات این دو شاخص، روشی برای پیش‌بینی وضعیت پایداری ولتاژ کوتاه مدت ارائه شد. الگوریتم پیشنهادی دارای قابلیت پیش‌بینی زود هنگام ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت است و وابسته به ساختار شبکه و مدل بار نیست و به هیچ مقدار آستانه‌ای نیاز ندارد. مطابق نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، الگوریتم پیشنهادی دارای دقت ۱۰۰٪ در پیش‌بینی شرایط ناپایدار و تشخیص شرایط پایدار ولتاژ کوتاه مدت است.