



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 12, No. 3, 2021
Research Paper

Concurrent Prediction of Transient and Short-term Voltage Instability in Power Systems Employing Intelligent Wide Area Measurement System

Mahmoud Lashgari ¹, Seyed Mohammad Shahrtash ²

¹ Center of Excellence for Power Automation and Operation, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

² Center of Excellence for Power Automation and Operation, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

Abstract:

Most of the proposed methods for investigating the transient and short-term voltage (STV) stability have assumed that only one of the two phenomena exists, i.e. either transient instability or STV instability. While these two phenomena exist simultaneously with one of them being dominant, according to the operating point of the system and disturbance condition. A unified online prediction method is presented in this paper to distinguish between the stable and unstable conditions. In the proposed method, by employing the intelligent wide area measurement system (IWAMS), the frequency deviation and the active power imbalance are calculated by the generation buses, which are considered as the intelligent generation buses (IGB). By tracking the trajectories of the frequency deviation and the active power imbalance and checking some simple defined rules, early prediction of both transient and STV instability can be achieved. In order to evaluate the performance of the proposed algorithm, the method has been tested on single machine infinite bus (SMIB) system, single machine load bus (SMLB) system, IEEE 39-bus system and IEEE 118-bus system. According to the obtained results, the proposed algorithm has the overall accuracy of 99.5% under symmetrical and asymmetrical faults, PMU measurement error, different operating points and topological changes.

Keywords: Transient stability, Short-term voltage stability, Early prediction, Intelligence wide-area measurement system.



2252-083X/ © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.123780.1395>

پیش‌بینی هم‌زمان وقوع ناپایداری گذرا و ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در شبکه‌های قدرت با به‌کارگیری سیستم هوشمند پایش سراسری محمود لشگری^۱ و سید محمد شهرتاش^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

lashgari@elec.iust.ac.ir

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

shahrtash@iust.ac.ir

چکیده: عمده روش‌ها در تشخیص ناپایداری گذرا یا ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت با این فرض است که یکی از این دو پدیده در شبکه حادث خواهد شد. این در حالیست که این دو پدیده به‌صورت هم‌زمان اما با غالب‌بودن یکی بر دیگری، بسته به نقطه کار سیستم و شرایط اغتشاش در شبکه بروز می‌کنند. در این مقاله، الگوریتمی جدید با هدف پیش‌بینی آنالاین و یکپارچه وضعیت پایداری گذرا و پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت بعد از وقوع خطای اتصال کوتاه در سیستم قدرت معرفی شده است. در روش پیشنهادی، با به‌کارگیری سیستم هوشمند پایش سراسری، روند تغییرات دو متغیر انحراف فرکانس (ΔF_i) و عدم تعادل توان (ΔP_i) توسط شین‌های ژنراتوری که به عنوان شین‌های هوشمند دارای توان محاسباتی در نظر گرفته شده‌اند، بررسی شده و وقوع ناپایداری‌های گذرا (به هر دو حالت نوسان اول و یا چند نوسانه) و یا ولتاژ کوتاه‌مدت، به صورت زود هنگام پیش‌بینی می‌شود. عملکرد الگوریتم به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، روی چهار شبکه شامل تک‌ماشین متصل به شین بی‌نهایت، شبکه تک‌ماشین متصل به بار و شبکه‌های چندماشینه ۳۹ و ۱۱۸ شین IEEE ارزیابی شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، الگوریتم پیشنهادی دارای دقت عملکرد کلی ۹۹/۵٪ در شرایط مختلفی همچون انواع خطاهای اتصال کوتاه، خطای اندازه‌گیری PMU، شرایط مختلف بهره‌برداری و تغییر توپولوژی است.

واژه‌های کلیدی: پایداری گذرا، پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت، پیش‌بینی زود هنگام، سیستم هوشمند پایش سراسری

۱- مقدمه

آنها طوری طراحی نشده‌اند که در برابر تمام رویدادهای ممکن، مصون و ایمن باشند؛ به‌ویژه رویدادهای غیر منتظره‌ای که به ناپایداری زاویه روتور، فرکانس و ولتاژ منجر می‌شوند.

ناپایداری ولتاژ به دلیل ناتوانی سیستم قدرت در حفظ ولتاژ پایدار و پذیرفتنی در تمام شین‌ها در شرایط کار عادی و پس از اعمال یک اغتشاش به وجود می‌آید و براساس نوع اغتشاش و مدت زمان مطالعه‌شده، به ترتیب به اغتشاش بزرگ و کوچک و پدیده کوتاه‌مدت و بلندمدت تقسیم‌بندی می‌شود [۲]. پایداری زاویه روتور در دسته پایداری‌های کوتاه‌مدت است و به توانایی ژنراتور در حفظ سنکرونیسم اشاره دارد. در حالت وقوع اغتشاش بزرگ، پایداری زاویه با نام پایداری گذرا شناخته می‌شود و در بین انواع پایداری‌ها،

سیستم‌های قدرت به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا بتوانند در مواجهه با اغتشاشات مختلفی همچون خطاهای اتصال کوتاه، تغییرات بزرگ در بار یا از دست رفتن واحد تولیدی، در محدوده پذیرفته‌شده‌ای از ولتاژ و فرکانس به‌طور رضایت‌بخشی به عملکرد خود ادامه دهند [۱]؛ با این حال،

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۲۹

نام نویسنده مسئول: سید محمد شهرتاش

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه علم و

صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق

استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازور^۲ (PMU) توانایی محاسبه فرکانس را دارند و با محاسبه عدم تعادل توان و میزان انحراف فرکانس و در نهایت بررسی نحوه تغییرات مسیر این دو متغیر نسبت به یکدیگر، وضعیت پایداری گذرا و ولتاژ کوتاه‌مدت را پیش‌بینی می‌کنند. الگوریتم پیشنهادی دارای قابلیت پیش‌بینی زودهنگام ناپایداری‌های گذرا و ولتاژ کوتاه‌مدت است و به ساختار شبکه و مدل بار وابسته نیست. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند روش ارائه‌شده به‌صورت زمان حقیقی، پیاده‌سازی شود.

در ادامه، ساختار مقاله بدین شرح است: در بخش دوم، اصول پایه تشریح شده‌اند. در بخش سوم، صفحه ارزیابی پایداری معرفی شده است. در بخش‌های چهارم و پنجم به ترتیب الگوریتم پیشنهادی و شبیه‌سازی، ارائه و نتایج بررسی شده‌اند. مقایسه در بخش ششم ارائه شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش هفتم ذکر شده است.

۲- اصول پایه

۲-۱- سیستم هوشمند پایش سراسری

در سال‌های گذشته، پیدایش سیستم پایش سراسری زمینه وقوع تحول را در پایش و کنترل سیستم قدرت فراهم آورده است. با توجه به اینکه اطلاعات دریافت‌شده از نقاط مختلف شبکه در سیستم پایش سراسری، هم‌زمان و دارای برچسب زمانی‌اند، این سیستم امکان پایش رفتار دینامیکی سیستم را فراهم می‌آورد [۲۰ و ۲۱].

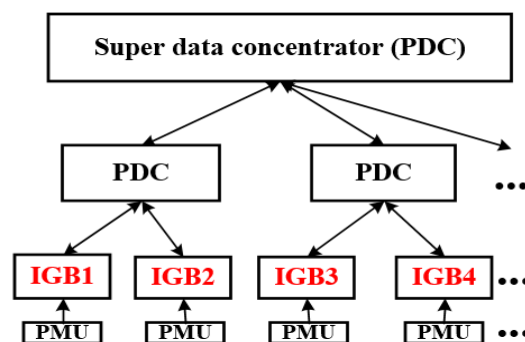
سیستم هوشمند پایش سراسری به‌کاررفته در الگوریتم پیشنهادی دارای یک ساختار سلسله‌مراتبی است که مطابق شکل (۱) از سه سطح تشکیل شده است.

اهمیت بیشتری دارد [۲].

با توجه به یکسان‌بودن بازه زمانی مطالعات پایداری گذرا و پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت (بازه زمان صفر تا ۱۰ ثانیه)، این دو پدیده همواره درهم‌تنیده‌اند [۳]. به این صورت که صرف‌نظر کردن از دینامیک ژنراتور در مدل‌های ساده‌شده برای بررسی پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت، در حالت تغییرات چشمگیر شرایط بهره‌برداری ژنراتورها، به نبود دقت در نتیجه منجر خواهد شد [۴]. همچنین، صرف‌نظر کردن از دینامیک بار، ممکن است به نتیجه‌گیری نادرست از وضعیت پایداری سیستم قدرت منجر شود [۵]. در [۶] نشان داده شده است به‌منظور بهبود وضعیت پایداری سیستم قدرت، باید به هر دو پایداری گذرا و ولتاژ کوتاه‌مدت به‌طور هم‌زمان توجه شود؛ در غیر این صورت، ممکن است اتخاذ اقدام اصلاحی به بهبود یک نوع از این ناپایداری منجر شود و نوع دیگر را در وضعیت بحرانی قرار دهد.

در روش‌های ارائه‌شده در [۷-۱۲] با هدف بررسی ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت، فرض شده است تنها این نوع ناپایداری در شبکه امکان وقوع دارد و به ناپایداری گذرا توجهی نشده است. در مقابل، در روش‌های ارائه‌شده در [۱۳-۱۹] با هدف بررسی ناپایداری گذرا نیز همین شیوه اتخاذ شده است. این در حالیست که با توجه به درهم‌تنیده بودن این دو نوع ناپایداری، به روشی واحد نیاز است تا چه ناپایداری غالب از نوع گذرا و چه از نوع ولتاژ کوتاه‌مدت، بتواند میان حالت پایدار و ناپایدار تمایز قائل شود.

در این مقاله، با به‌کارگیری سیستم هوشمند پایش سراسری^۱، روش جدیدی به‌منظور پیش‌بینی هم‌زمان و یکپارچه ناپایداری گذرا و ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت سیستم ارائه شده است. در این روش، هر یک از شین‌های ژنراتوری یک شین هوشمند در نظر گرفته شده‌اند که با



شکل (۱): سیستم هوشمند پایش سراسری

می‌شود [۲۲]:

$$f_i = \frac{P_f}{4\pi} (\omega_i - \omega_0) + f_0 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، P_f و f_0 به ترتیب بیان‌کننده تعداد قطب‌های ماشین و فرکانس نامی شبکه برحسب هرتزند و ω_i برحسب رادیان بر ثانیه‌اند و به ترتیب به سرعت الکتریکی سنکرون و لحظه‌ای روتور اشاره دارند که تا قبل از وقوع اغتشاش، با یکدیگر برابرند.

سرعت روتور ژنراتور نیز با حل معادله نوسان، مطابق

رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۲۳].

$$\frac{2H_i}{\omega_0} \frac{d(\omega_i - \omega_0)}{dt} + D_i \frac{d\delta_i}{dt} = P_i^m - P_i^e \quad (2)$$

در رابطه (۲)، δ_i ، H_i و D_i به ترتیب بیان‌کننده زاویه روتور، ثابت اینرسی و ضریب میرایی‌اند و P_i^e و P_i^m به ترتیب اشاره به توان مکانیکی و الکتریکی دارند. با توجه به اینکه دوره مطالعاتی پایداری گذرا و ولتاژ کوتاه‌مدت، بازه زمانی کوتاهی است، از ضریب میرایی صرف‌نظر می‌شود [۲۳]. با انتگرال‌گیری در بازه زمانی یک گام زمانی، سرعت روتور مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\int_{t-\Delta t}^t \frac{d\omega_i(t)}{dt} dt = \frac{\omega_0}{2H} \int_{t-\Delta t}^t (P_m - P_e) dt; \quad (3)$$

$$\omega_i(t) = \omega_i(t - \Delta t) + \frac{\omega_0}{2H} [(P_m^t - P_e^t) + (P_m^{t-\Delta t} - P_e^{t-\Delta t})] \Delta t$$

در رابطه (۳)، P_e با استفاده از ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور سنکرون محاسبه می‌شود که از طریق PMU نصب‌شده در شین ژنراتور در دسترس‌اند. توان مکانیکی نیز برابر با مقدار توان الکتریکی در زمان قبل از وقوع اغتشاش در نظر گرفته شده است [۲۳]؛ در نتیجه، سرعت روتور در الگوریتم پیشنهادی، با استفاده از ولتاژ و جریان خروجی ژنراتورها در هر گام زمانی به صورت آنلاین محاسبه می‌شود و مطابق رابطه (۱)، با معلوم‌بودن مقدار سرعت روتور، مقدار فرکانس ژنراتورها به دست می‌آید.

۳- صفحه ارزیابی پایداری

در هر گام زمانی، متغیر انحراف فرکانس (ΔF_i) مطابق

سطوح سیستم هوشمند پایش سراسری عبارت‌اند از: سطح اول) در الگوریتم پیشنهادی این مقاله، شین‌های ژنراتوری شین‌های هوشمند (IGBT) در نظر گرفته شده‌اند که توانایی انجام محاسبات را دارند. کامپیوترهای میزبان^۴ در پست‌های سیستم قدرت می‌توانند در نقش IGBTها قرار گیرند و وظایف آنها را انجام دهند. در سطح اول سیستم هوشمند پایش سراسری، IGBTها قرار دارند که فازور ولتاژ و جریان‌ها را از طریق PMUهای نصب‌شده در این شین‌ها دریافت می‌کنند.

سطح دوم) در این سطح، مراکز جمع‌آوری داده‌های فازوری^۵ (PDC) اطلاعات از قبل مشخص شده را از چند IGBT، دریافت و پس از مرتب‌سازی، آنها را به سطح سوم منتقل می‌کنند.

سطح سوم) در این سطح، عملکرد Super PDC مشابه با PDCها است و اطلاعات مربوط به تمام PDCها را دریافت و سپس تصمیمی برای انجام اقدامات مناسب اتخاذ می‌کند.

۲-۲- تخمین فرکانس

زمانی که اغتشاش‌هایی همچون خطاهای اتصال کوتاه و یا خروج خطوط اتفاق می‌افتد، میان توان الکتریکی و مکانیکی ژنراتور، عدم تعادلی ایجاد می‌شود. این عدم تعادل به انحراف زاویه روتور ژنراتور و فرکانس ژنراتورهای سنکرون به ترتیب از مقدار حالت ماندگار و نامی منجر می‌شود [۲۰]. میزان حرکت زاویه روتور در ماشین‌های مختلف به مقدار اینرسی ماشین‌ها و میزان نامتعادلی توان ایجادشده بستگی دارد. افزایش فرکانس، تنها در حالت مواجهه سیستم با ناپایداری گذرا ایجاد نخواهد شد و حتی در شرایط ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت درحالی‌که ژنراتورها در شرایط سنکرون باقی می‌مانند، می‌تواند بروز یابد [۲۲]؛ بنابراین، انحراف فرکانس از مقدار نامی، چه در حالت وقوع فقط ناپایداری ولتاژ یا فقط ناپایداری گذرا، به وجود می‌آید. به همین دلیل، در این مقاله، فرکانس در خروجی ژنراتورهای سنکرون، ورودی الگوریتم در نظر گرفته شده است.

فرکانس الکتریکی ژنراتور مطابق رابطه (۱) محاسبه

پیش‌بینی هم‌زمان وقوع ناپایداری گذرا و ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در شبکه‌های قدرت

بر روی متغیر ΔF_i شناسایی می‌شود، موقعیت P_1 به‌عنوان نقطه عطف است که در صفحه ارزیابی پایداری در شکل (۳) نشان داده شده است. شرط تشخیص موقعیت P_1 به‌عنوان نقطه عطف در صفحه ارزیابی پایداری مطابق رابطه (۶) است:

$$\Delta F_i((n-m)\Delta t) < \Delta F_i(n\Delta t) < \Delta F_i((n+m)\Delta t) \quad (6)$$

$$\& \Delta P_i(n\Delta t) > \Delta P_i((n \pm m)\Delta t); m = 1, 2$$

حالت دوم) نقطه ماکزیمم: مطابق حالت‌های شماره ۲ و ۳ در شکل (۲)، اولین موقعیتی که به‌عنوان نقطه ماکزیمم بر روی متغیر ΔF_i شناسایی شود، موقعیت P_1 به‌عنوان نقطه ماکزیمم است که در صفحه ارزیابی پایداری در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. شرط تشخیص موقعیت P_1 به‌عنوان نقطه ماکزیمم در صفحه ارزیابی پایداری، مطابق رابطه (۷) است.

$$\Delta F_i(n\Delta t) > \Delta F_i((n \pm m)\Delta t); m = 1, 2 \quad (7)$$

در روابط (۶) و (۷)، $n\Delta t$ بیان‌کننده موقعیت P_1 (n_{p1}) و m بیان‌کننده پارامتری برای اطمینان از صحیح‌بودن نتایج است.

با توجه به رابطه (۵)، مقدار متغیر ΔP_i برحسب مشتق فرکانس است. در حالتی که موقعیت P_1 یک نقطه ماکزیمم است (مشتق فرکانس برابر با صفر است)، مقدار متغیر ΔP_i در این موقعیت در صفحه ارزیابی پایداری برابر با صفر است.

رابطه (۴) توسط IGB محاسبه می‌شود [۲۳].

$$\Delta F_i(n\Delta t) = (f_i(n\Delta t)/f_0) - 1 \quad (4)$$

در رابطه (۴)، f_0 به‌ترتیب بیان‌کننده فرکانس خروجی ژنراتور i ام و فرکانس نامی‌اند و هر دو بر حسب هرتزند.

همچنین، متغیر عدم تعادل توان (ΔP_i) نیز مطابق رابطه (۵) در هر گام زمانی محاسبه می‌شود [۲۴].

$$\Delta P_i(n\Delta t) = -\frac{2H_i}{f_0} S_{Ni} \frac{df_i(n\Delta t)}{dt} = P_i^e - P_i^m \quad (5)$$

در رابطه (۵)، S_{Ni} بیان‌کننده اینرسی و توان ظاهری نامی ژنراتور i ام بر حسب مگاوات آمپر است.

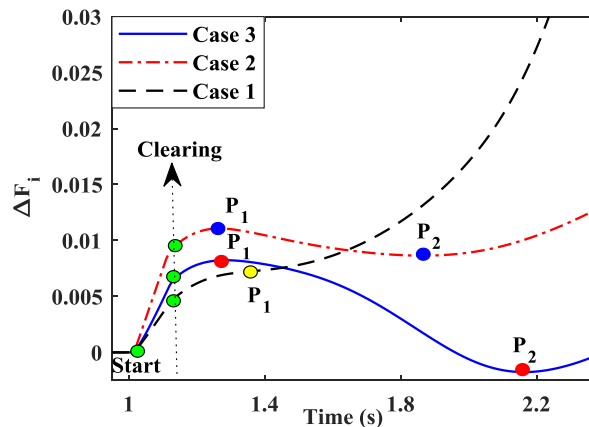
صفحه ارزیابی پایداری معرفی شده در این مقاله، برای نشان دادن تغییرات دو متغیر ΔP_i و ΔF_i نسبت به یکدیگر ترسیم می‌شود. الگوریتم پیشنهادی، مبتنی بر تشخیص دو موقعیت کلیدی در صفحه ارزیابی پایداری در شرایط آنلاین است که در ادامه تشریح شده‌اند.

۳-۱- موقعیت‌های کلیدی

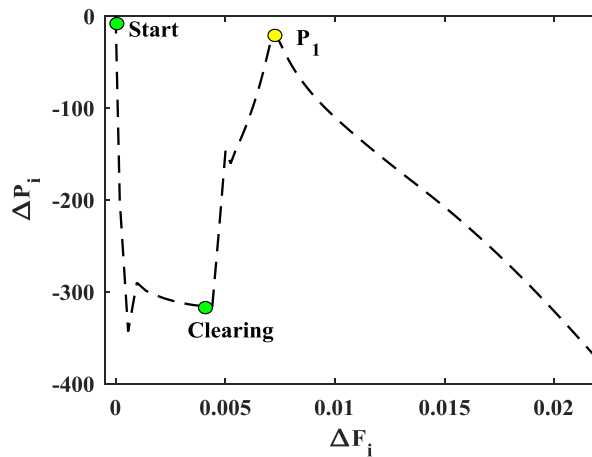
IGB به دنبال دو موقعیت P_1 و P_2 در صفحه ارزیابی پایداری است که عبارت‌اند از:

- موقعیت P_1 : با توجه به روند تغییرات متغیر ΔF_i موقعیت P_1 به دو حالت ظاهر می‌شود:

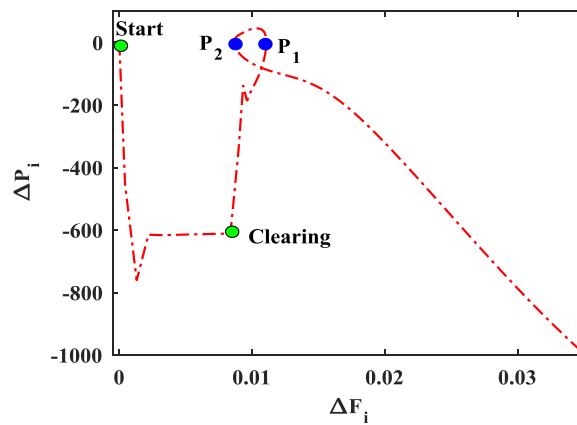
حالت اول) نقطه عطف: مطابق حالت شماره ۱ در شکل (۲)، نخستین موقعیتی که به‌عنوان نقطه عطف



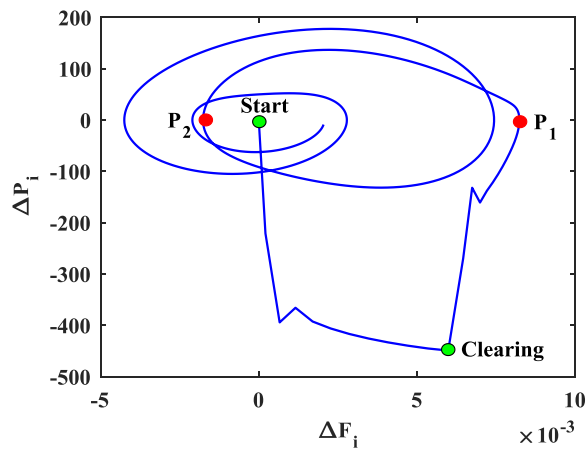
شکل (۲): تغییرات متغیر ΔF_i



شکل (۳): صفحه ارزیابی پایداری حالت شماره ۱ در شکل (۲)



شکل (۴): صفحه ارزیابی پایداری حالت شماره ۲ در شکل (۲)



شکل (۵): صفحه ارزیابی پایداری حالت شماره ۳ در شکل (۲)

شناسایی شود، به عنوان موقعیت P_2 انتخاب می‌شود. این موقعیت در صفحه ارزیابی پایداری در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. شرط تشخیص موقعیت P_2 در صفحه ارزیابی پایداری مطابق رابطه (۸) است.

• موقعیت P_2 : برخلاف موقعیت P_1 ، موقعیت P_2 تنها به یک حالت ظاهر می‌شود که عبارت است از:
 نقطه مینیمم: مطابق حالت‌های شماره ۲ و ۳ در شکل (۲)، اولین موقعیتی که به عنوان نقطه مینیمم بر متغیر ΔF_i

پیش‌بینی هم‌زمان وقوع ناپایداری گذرا و ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در شبکه‌های قدرت

سراسری هوشمند اجرا می‌شود، لحظه وقوع و پاکسازی اغتشاش با تجهیزات حفاظتی برای Super PDC ارسال می‌شود.

گام چهارم) پیش‌بینی وقوع ناپایداری در الگوریتم پیشنهادی، سه معیار به‌منظور پیش‌بینی وقوع ناپایداری گذرا و ولتاژ کوتاه‌مدت با IGB‌های کاندید واری می‌شوند. دو معیار P_1 ، نقطه عطف و P_1 ، نقطه ماکزیمم به‌منظور پیش‌بینی وقوع ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت و ناپایداری گذرا از نوع نوسان اول (first-swing) هستند و معیار نهایی به‌منظور پیش‌بینی وقوع ناپایداری‌های چندنوسانه (multi-swing) ارائه شده است. در ادامه، هر یک از این معیارها تشریح شده‌اند.

➤ معیار P_1 به‌عنوان نقطه عطف:

چنانچه موقعیت P_1 به‌عنوان نقطه عطف، با IGB تشخیص داده شود، معیار P_1 به‌عنوان نقطه عطف برآورده می‌شود و الگوریتم پیشنهادی در همان موقعیت از نظر زمانی، وقوع ناپایداری گذرا یا ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت را پیش‌بینی می‌کند.

برآورده شدن معیار P_1 به‌عنوان نقطه عطف در نیم صفحه منفی، نشان می‌دهد همواره P^e از P^m در رابطه (۵) کوچک‌تر است (مسیر تغییرات در نیم صفحه منفی ΔP_i قرار دارد)؛ در نتیجه، همواره حالت Accelerating برقرار است و نقطه تعادل پایداری حاصل نخواهد شد.

➤ معیار P_1 به‌عنوان نقطه ماکزیمم:

چنانچه موقعیت P_1 نقطه ماکزیمم تشخیص داده شود، IGB در لحظه رسیدن مسیر به موقعیت P_2 ، ارزیابی خود را از امکان وقوع ناپایداری گذرا یا ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت انجام می‌دهد.

نخستین شرطی که با IGB کاندید چک می‌شود، مطابق رابطه (۹) است:

$$[\Delta F_i(n_{P1}\Delta t) - \Delta F_i(n_{P2}\Delta t)] / \Delta F_i(n_{clear}\Delta t) < 1 \quad (9)$$

در رابطه (۹)، $\Delta F_i(n_{P1}\Delta t)$ ، $\Delta F_i(n_{P2}\Delta t)$ و $\Delta F_i(n_{clear}\Delta t)$ به ترتیب بیان‌کننده مقدار متغیر انحراف فرکانس در موقعیت P_1 ، P_2 و لحظه پاکسازی اغتشاش است. اگر این شرایط برقرار باشد، IGB شیب منفی ΔP_i را

$$\Delta F_i(n\Delta t) < \Delta F_i((n \pm m)\Delta t); \quad m = 1, 2 \quad (8)$$

در موقعیت P_2 نیز مشابه با موقعیت P_1 زمانی که به‌عنوان یک نقطه ماکزیمم است، مقدار متغیر ΔP_i در صفحه ارزیابی پایداری برابر با صفر است.

۴- الگوریتم پیشنهادی

در این بخش، گام‌های الگوریتم پیشنهادی تشریح شده‌اند. فرض در نظر گرفته شده در الگوریتم پیشنهادی، وجود یک واحد PMU در هر شین ژنراتوری برای اندازه‌گیری فازور ولتاژ و جریان است.

گام اول) انتخاب شین‌های ژنراتوری به‌عنوان شین‌های هوشمند

هر یک از شین‌های ژنراتوری به‌عنوان یک شین هوشمند یا IGB انتخاب می‌شود.

گام دوم) محاسبه متغیرهای ΔF_i و ΔP_i با IGBها با استفاده از ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور سنکرون که از طریق PMU نصب‌شده بر شین ژنراتور در دسترس است، فرکانس مطابق بخش ۲-۲ توسط IGB محاسبه می‌شود و سپس دو متغیر ΔF_i و ΔP_i مطابق روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند.

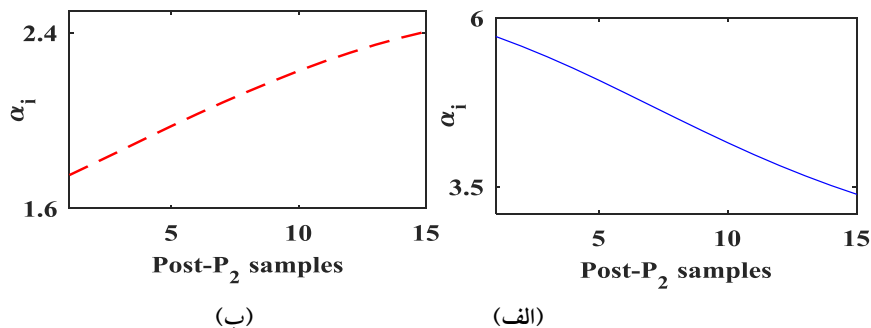
گام سوم) انتخاب IGB‌های کاندید

با وقوع اغتشاش در شبکه، ژنراتورهایی که از نظر الکتریکی، کمترین فاصله را تا محل اغتشاش دارند، بیشترین تأثیر را از اغتشاش می‌پذیرند [۲۲] و مقدار متغیر ΔP_i آنها مطابق رابطه (۵) بیشترین تغییرات را خواهد داشت. بر همین اساس در طرح پیشنهادی، مقدار ΔP_i محاسبه‌شده توسط IGBها در لحظه وقوع اغتشاش ($\Delta P_i(n_{fault}\Delta t)$) برای PDCها و سپس برای Super PDC ارسال می‌شود. در Super PDC مقدار میانگین تمام $\Delta P_i(n_{fault}\Delta t)$ های دریافتی محاسبه شده است؛ سپس هر IGB که $\Delta P_i(n_{fault}\Delta t)$ مربوط به آن دارای مقدار کمتری از مقدار میانگین محاسبه‌شده داشته باشد، IGB کاندید انتخاب می‌شود. سپس، فرمان انجام پیش‌بینی وضعیت پایداری گذرا و ولتاژ کوتاه‌مدت برای IGB‌های کاندید ارسال می‌شود. با توجه به اینکه الگوریتم پیشنهادی در ساختار سیستم پایش

مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌کند: برخلاف شرایط پایدار، انتظار می‌رود در شرایط

ناپایدار، مطابق شکل (۶) ب، مقدار متغیر α افزایشی باشد.

$$\alpha_i(t) = \Delta P_i(t - \Delta t) - \Delta P_i(t) \quad (10)$$



شکل (۶): تغییرات متغیر α ، (الف) حالت پایدار (ب) حالت ناپایدار

متصل به بار (SMLB) ارزیابی و سپس اعتبارسنجی نتایج روی شبکه‌های چندماشینه ۳۹ و ۱۱۸ شین IEEE بررسی شده است. شبیه‌سازی‌های دینامیکی در نرم‌افزار DigSILENT [۲۵] انجام شدند و الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار متلب اجرا شده است. بازه زمانی نمونه‌برداری نیز برابر با ۰/۰۱ ثانیه انتخاب شده است.

۵-۱- شبکه تست SMIB

در شبکه SMIB نیز از آنجایی که بار در شبکه حضور ندارد، تنها ناپایداری گذرا می‌تواند رخ دهد [۲۶]. در شبکه تست SMIB نشان داده شده در شکل (۷)، از مدل ۲.۲ برای ژنراتور استفاده شده [۲۷] و نیز سیستم تحریک IEEE1 در نظر گرفته شده است. ثابت اینرسی ژنراتور نیز برابر با ۲/۷۶ ثانیه است.

به‌ازای وقوع خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در نقطه میانی خط L_1 در زمان ۱ ثانیه و زمان رفع خطای ۱/۲۹ و ۱/۳ ثانیه با باز شدن خط، تغییرات زاویه روتور در شکل (۸) نشان داده شده‌اند.

با توجه به شکل (۸)، به‌ازای دو زمان رفع خطای ۱/۲۹ و ۱/۳ ثانیه، شبکه به ترتیب در وضعیت پایدار و ناپایدار گذرا قرار دارد. به‌ازای این دو شرایط ناپایدار و پایدار، مسیر تغییرات در صفحه پایدار به ترتیب در شکل‌های (۹) (الف) و (ب) نشان داده شده است.

افزایشی یا کاهش‌ی بودن متغیر α به‌ازای سه نمونه ابتدایی از آن چک می‌شود. چنانچه روند به‌ازای این سه نمونه افزایشی باشد، معیار P_1 به‌عنوان نقطه ماکزیمم برآورده می‌شود و IGB وقوع ناپایداری گذرا یا ولتاژ کوتاه‌مدت را پیش‌بینی می‌کند.

برآورده شدن معیار P_1 به‌عنوان نقطه ماکزیمم بیان‌کننده آن است که انرژی جنبشی ذخیره‌شده در زمان پاکسازی خطا از ماکزیمم انرژی پتانسیل در موقعیت P_2 بیشتر است؛ در نتیجه، نقطه تعادل پایداری حاصل نخواهد شد.

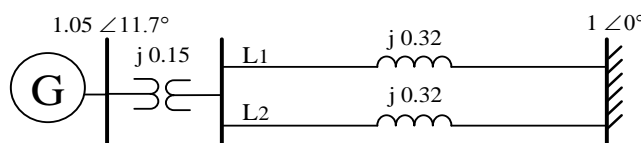
➤ معیار نهایی:

چنانچه وقوع ناپایداری با دو معیار P_1 به‌عنوان نقطه عطف و P_1 به‌عنوان نقطه ماکزیمم پیش‌بینی نشود، شرط معیار نهایی توسط تمامی IGBها (کاندیدا و غیر کاندیدا) واریسی خواهد شد. براساس این شرط، چنانچه IGB موقعیتی را (موقعیت P_3) روی صفحه ارزیابی پایداری شناسایی کند که مجدداً رابطه (۸) برقرار باشد و ΔF_i دارای مقدار مثبت باشد، شیب منفی ΔP_i مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. چنانچه متغیر α به‌ازای سه نمونه متوالی بعد از این موقعیت دارای روند صعودی باشد، معیار نهایی، برآورده و وقوع ناپایداری گذرای چندنوسانه پیش‌بینی می‌شود.

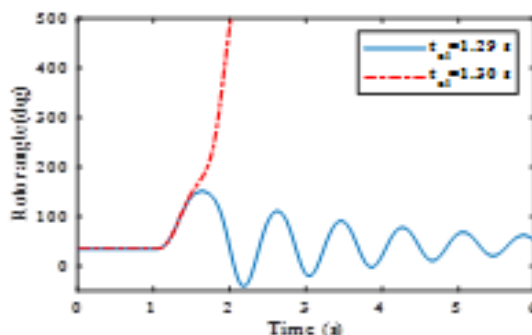
۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، ابتدا عملکرد الگوریتم روی دو شبکه تک‌ماشین متصل به شین بی‌نهایت (SMIB) و تک‌ماشین

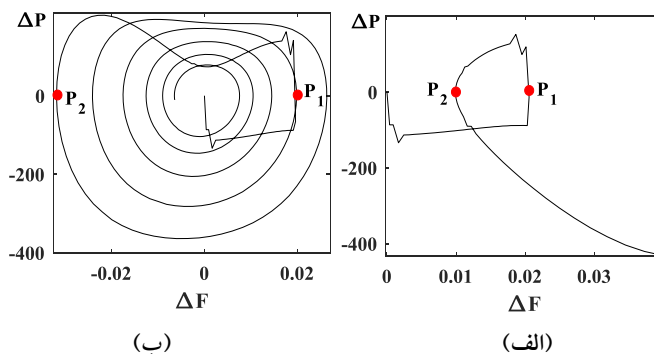
پیش‌بینی هم‌زمان وقوع ناپایداری گذرا و ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در شبکه‌های قدرت



شکل (۷): شبکه تست SMIB



شکل (۸): تغییرات زاویه روتور ژنراتور در دو حالت پایدار و ناپایدار



شکل (۹): مسیر تغییرات در صفحه ارزیابی پایداری،

(الف) شرایط ناپایدار (ب) شرایط پایدار

پایداری در شبکه SMLB نقشی ندارد و از میان ناپایداری گذرا و ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت، تنها ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در شبکه می‌تواند رخ دهد [۲۶]. از آنجایی که ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در حضور بارهایی مانند موتورهای القایی (که دارای دینامیک سریع‌اند و در مقابل اغتشاش به سرعت واکنش نشان می‌دهند) رخ می‌دهد [۲]، در شبکه تست SMLB نشان داده شده در شکل (۱۰)، از موتور القایی به‌عنوان بار استفاده شده است. دینامیک ژنراتور نیز همانند شبکه SMIB در بخش ۵-۱ در نظر گرفته شده است. همچنین از مدل مرتبه سه برای موتور القایی استفاده شده که به‌منظور بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت مدلی کافی است و اطلاعات آن در [۲۶] ذکر شده‌اند.

به‌ازای وقوع خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در نقطه میانی

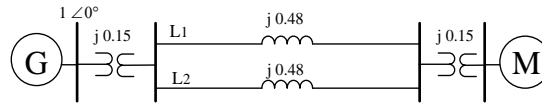
مطابق شکل (۹) (الف) و (ب)، در هر دو صفحه ارزیابی پایداری، شرط (۷) برقرار است؛ بنابراین، «معیار - P_1 به‌عنوان نقطه ماکزیمم» بررسی می‌شود. به‌ازای حالت پایدار، شرط (۹) برقرار نیست (سمت چپ رابطه (۹) دارای مقدار $2/7$ است)؛ بنابراین، شرایط پایدار توسط IGB اعلام می‌شود. در حالت ناپایدار، شرط (۹) برقرار است (سمت چپ رابطه (۹) دارای مقدار $0/52$ است) و روند افزایشی متغیر α به‌ازای سه نمونه متوالی تأیید می‌شود؛ در نتیجه، IGB در زمان $1/57$ ثانیه به‌درستی وقوع ناپایداری گذرا را پیش‌بینی می‌کند.

۵-۲- شبکه تست SMLB

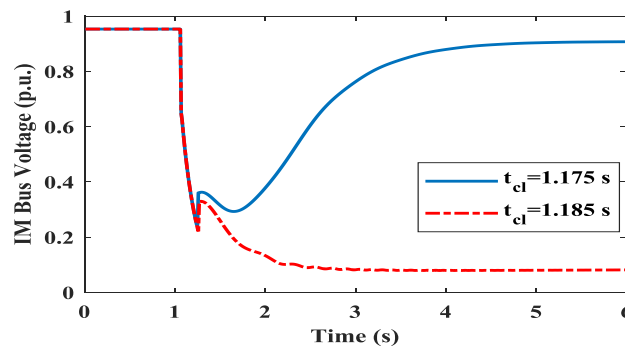
برخلاف شبکه SMIB، معادله نوسان در بررسی

شده‌اند. تغییرات مسیر در صفحه پایداری در شرایط ناپایدار و پایدار به ترتیب در شکل‌های ۱۲ (الف) و (ب) ترسیم شده‌اند.

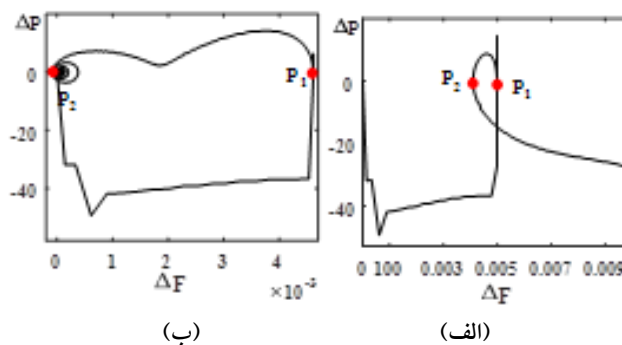
خط L_1 در زمان ۱ ثانیه و زمان رفع خطای $1/175$ و $1/185$ ثانیه با باز شدن خط، شبکه به ترتیب در وضعیت پایدار و ناپایدار ولتاژ کوتاه مدت است. تغییرات ولتاژ شین موتور القایی به ازای این دو شرایط در شکل (۱۱) نشان داده



شکل (۱۰): شبکه تست SMLB



شکل (۱۱): تغییرات ولتاژ شین موتور القایی



شکل (۱۲): مسیر تغییرات در صفحه ارزیابی پایداری

(الف) شرایط ناپایدار (ب) شرایط پایدار

ثانیه به درستی توسط IGB تشخیص داده می‌شود.

۵-۳- شبکه تست ۳۹ شین IEEE

شبکه ۳۹ شین IEEE، مطابق شکل (۱۳)، به عنوان یک شبکه تست معتبر در بسیاری از مراجع از جمله [۱۱-۱۷] برای بررسی پایداری گذرا و پایداری ولتاژ کوتاه مدت استفاده شده است. در این بخش، عملکرد الگوریتم پیشنهادی روی این شبکه به ازای شرایط مختلفی همچون انواع شرایط مختلف بهره‌برداری، انواع خطاهای اتصال

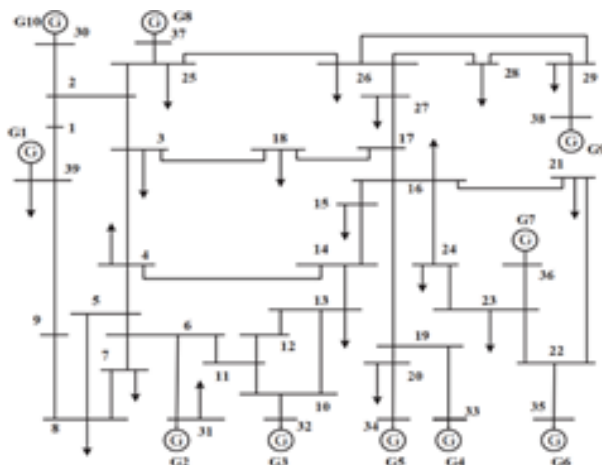
مطابق شکل (۱۱)، برخلاف حالت پایدار، در حالت ناپایدار، ولتاژ بازایی نشده و فروپاشی ولتاژ رخ داده است. در هر دو حالت پایدار و ناپایدار، شرط (۷) برقرار است؛ بنابراین، «معیار P_1 به عنوان نقطه ماکزیمم» بررسی می‌شود. برخلاف حالت پایدار (که سمت چپ رابطه (۹) دارای مقدار $1/0.1$ است)، در حالت ناپایدار شرط (۹) برقرار است (سمت چپ رابطه (۹) دارای مقدار $0/18$ است) و روند افزایشی متغیر α به ازای سه نمونه متوالی تأیید می‌شود. بنابراین، وقوع ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت در زمان $1/87$

پیش‌بینی هم‌زمان وقوع ناپایداری گذرا و ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در شبکه‌های قدرت

هستند. همچنین به سبب اینکه مهم‌ترین بخش در بررسی ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت، بحث مدل بار است، پنج موتور القایی در شین‌های ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸ و ۲۹ در نظر گرفته شده‌اند و سایر بارها از نوع وابسته به فرکانس و ولتاژند.

کوتاه، تغییر توپولوژی شبکه و خطای اندازه‌گیری PMU بررسی شده است.

در مدل‌سازی دینامیکی ژنراتورها از مدل ۲.۲ استفاده شده است و واحدها دارای کنترلر AVR، گاورنر و PSS



شکل (۱۳): شبکه تست ۳۹ شین IEEE

➤ حالت اول: ولتاژ پنج شین دارای موتور القایی و زاویه روتور ژنراتورها به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده‌اند. مطابق گام سوم الگوریتم پیشنهادی، PDCها مقدار $\Delta P_i(n_{fault}\Delta t)$ محاسبه شده توسط IGBها را در لحظه وقوع اغتشاش، جمع‌آوری و به Super PDC ارسال می‌کنند. در هر دو حالت اول و دوم، تنها IGB_4 ، IGB_6 و IGB_7 مقدار $\Delta P_i(n_{fault}\Delta t)$ کمتر از مقدار میانگین تمام $\Delta P_i(n_{fault}\Delta t)$ های دریافتی را دارند و به‌عنوان کاندیدا برای پیش‌بینی وضعیت پایداری توسط Super PDC انتخاب شده‌اند. صفحه ارزیابی پایداری به‌ازای IGB_6 دارای کمترین مقدار ΔP ، در شکل (۱۶) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۶)، هیچ‌یک از معیارهای « P_1 به‌عنوان نقطه عطف»، « P_1 به‌عنوان نقطه ماکزیمم» و «نهایی» برآورده نشده‌اند و الگوریتم به‌درستی وضعیت پایدار را پیش‌بینی کرده است.

۵-۳-۱- بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی

در این بخش، جزئیات نحوه عملکرد الگوریتم پیشنهادی در پنج حالت ارائه شده‌اند.

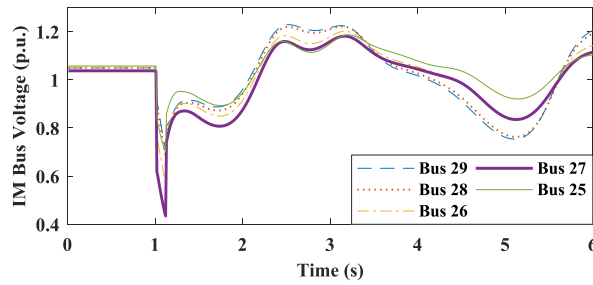
حالت اول: وقوع خطای اتصال کوتاه سه‌فاز روی خط ۱۶-۲۱ در فاصله ۲۵ درصد از خط ۱۶ و به مدت ۶ سیکل.

حالت دوم: وقوع خطای اتصال کوتاه سه‌فاز روی خط ۱۶-۲۱ در فاصله صفر درصد از خط ۱۶ و به مدت ۶ سیکل.

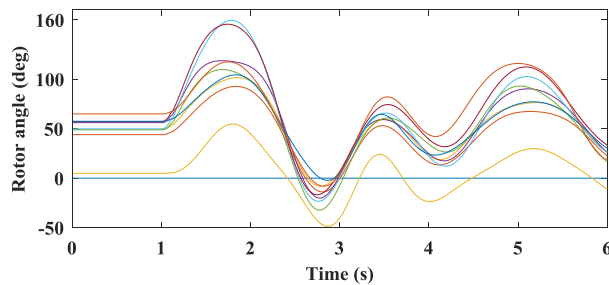
حالت سوم: وقوع خطای اتصال کوتاه تک‌فاز فاز A با مقاومت خطای ۳۰ اهم روی خط ۲۶-۲۹ در فاصله ۵۰ درصد از خط و به مدت ۵ سیکل.

حالت چهارم: وقوع خطای اتصال کوتاه سه‌فاز روی خط ۱۶-۲۴ در فاصله صفر درصد از خط ۲۴ و به مدت ۶ سیکل.

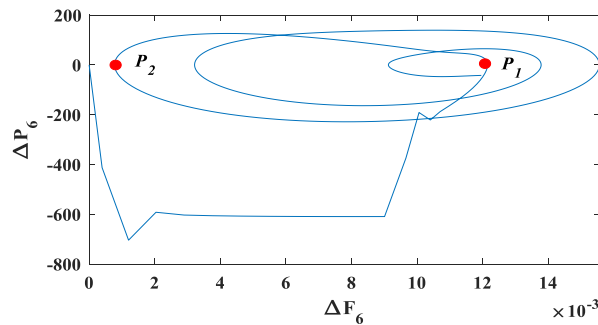
حالت پنجم: وقوع خطای اتصال کوتاه سه‌فاز روی خط ۲۶-۲۷ در فاصله صفر درصد از خط ۲۷ و به مدت ۵ سیکل.



شکل (۱۴): تغییرات ولتاژ شین‌های موتور القایی



شکل (۱۵): تغییرات زاویه روتور ژنراتور



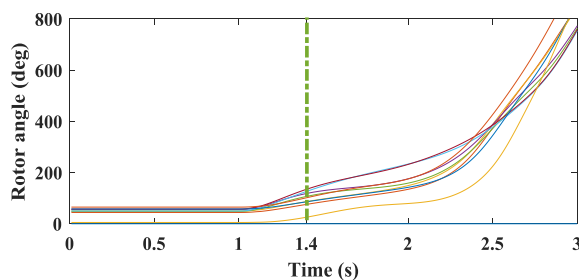
شکل (۱۶): صفحه ارزیابی پایداری در شرایط پایدار

در مدت زمان 0.3 ثانیه بعد از پاکسازی اغتشاش تشخیص داده شده است. با توجه به شکل‌های (۱۷) و (۱۸)، این زمان در مقایسه با زمان بروز ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت و زمان ناپایداری گذرا به صورت خط‌چین نشان داده شده است. الگوریتم پیشنهادی با سرعت بالایی وقوع ناپایداری را پیش‌بینی کرده است.

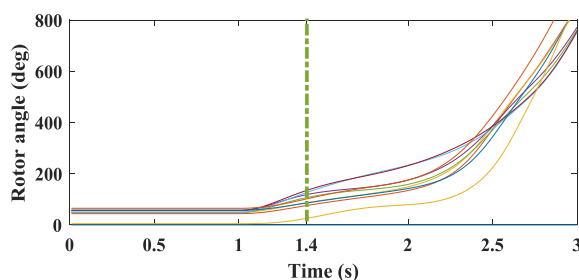
➤ حالت دوم: ولتاژ پنج شین دارای موتور القایی، زاویه روتور ژنراتورها و صفحه ارزیابی پایداری به‌زای IGB_6 به‌ترتیب در شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) نشان داده شده‌اند.

➤ مطابق شکل (۱۹)، شرط (۶) برقرار بوده و برقراری معیار « P_1 به‌عنوان نقطه عطف» توسط IGB_6 تأیید شده و وقوع هم‌زمان دو ناپایداری گذرا و ولتاژ کوتاه‌مدت

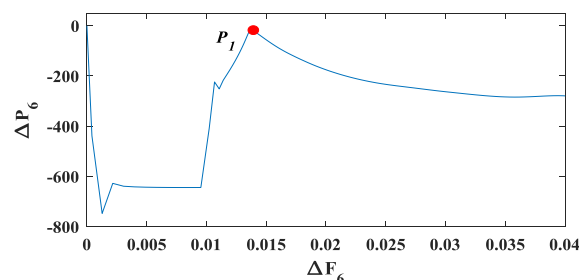
پیش‌بینی هم‌زمان وقوع ناپایداری گذرا و ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در شبکه‌های قدرت



شکل (۱۷): تغییرات ولتاژ شین‌های موتور القایی



شکل (۱۸): تغییرات زاویه روتور ژنراتور



شکل (۱۹): صفحه ارزیابی پایداری در شرایط ناپایدار

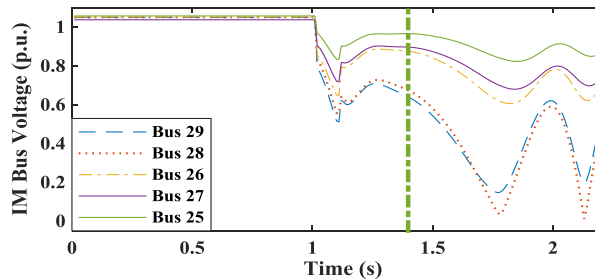
شده است.

مطابق شکل (۲۲)، شرط (۶) برقرار بوده و معیار « P_1 » به‌عنوان نقطه عطف برآورده شده و الگوریتم به‌درستی وقوع ناپایداری را در مدت زمان ۰/۳۳ ثانیه بعد از پاکسازی اغتشاش پیش‌بینی کرده است (به‌صورت خط‌چین در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است).

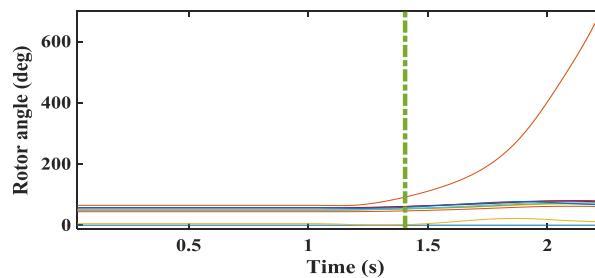
➤ حالت سوم: در این حالت، تنها IGB دارای

$\Delta P_i(n_{fault}\Delta t)$ کمتر از مقدار میانگین تمام $\Delta P_i(n_{fault}\Delta t)$ ‌های

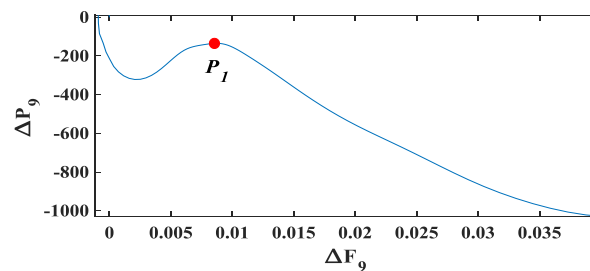
دریافتی است و به‌عنوان کاندیدا برای پیش‌بینی وضعیت پایداری توسط Super PDC انتخاب شده است. ولتاژ پنج شین دارای موتور القایی و زاویه روتور ژنراتورها به‌ترتیب در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده‌اند. همچنین صفحه ارزیابی پایداری به‌ازای IGB در شکل (۲۲) رسم



شکل (۲۰): تغییرات ولتاژ شین‌های موتور القایی



شکل (۲۱): تغییرات زاویه روتور ژنراتور

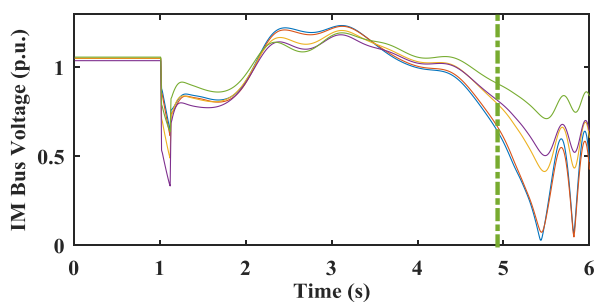


شکل (۲۲): صفحه ارزیابی پایداری در شرایط ناپایدار

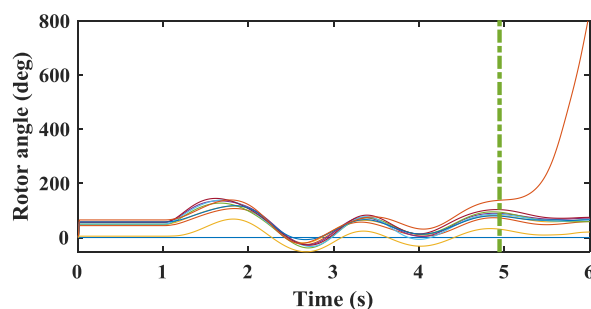
و ΔF_i نیز در این موقعیت دارای مقدار مثبت است. در این حالت، تغییرات متغیر α در شکل (۲۶) نشان داده شده‌اند. مطابق شکل (۲۶)، روند صعودی متغیر α به‌ازای سه نمونه متوالی توسط IGB تأیید شده و با برآورده شدن معیار نهایی، الگوریتم به‌درستی وقوع ناپایداری چندنوسانه را در زمان $4/95$ ثانیه (به‌صورت خط‌چین در شکل‌های (۲۳) و (۲۴) نشان داده شده است) پیش‌بینی کرده است.

➤ حالت چهارم: در این حالت، دو معیار « P_1 » به‌عنوان نقطه عطف، « P_1 » به‌عنوان نقطه ماکزیمم» به‌ازای هیچ‌یک از IGB‌های کاندیدا برآورده نشده‌اند؛ در نتیجه، شرط معیار نهایی به‌ازای تمام IGB‌ها چک خواهد شد. ولتاژ پنج شین دارای موتور القایی، زاویه روتور ژنراتورها و صفحه ارزیابی پایداری به‌ازای IGB به‌ترتیب در شکل‌های (۲۳) تا (۲۵) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل (۲۵)، شرط (۸) توسط IGB در موقعیت P_3 برآورده شده

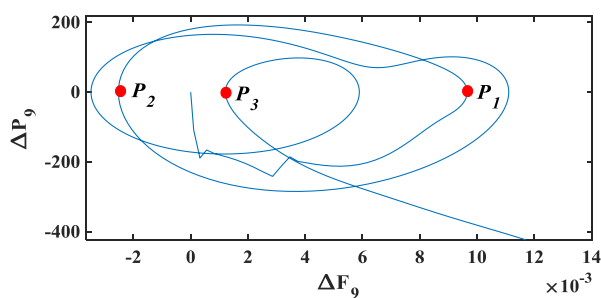
پیش‌بینی هم‌زمان وقوع ناپایداری گذرا و ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در شبکه‌های قدرت



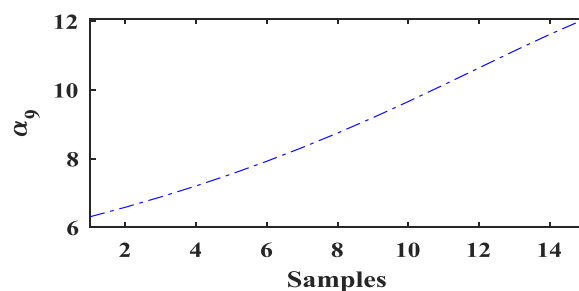
شکل (۲۳): تغییرات ولتاژ شین‌های موتور القایی



شکل (۲۴): تغییرات زاویه روتور ژنراتور



شکل (۲۵): صفحه ارزیابی پایداری در شرایط ناپایدار چندنوسانه



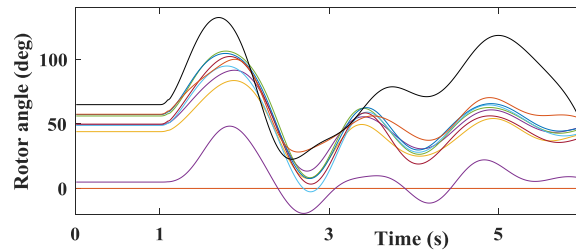
شکل (۲۶): تغییرات متغیر α

شکل‌های (۲۷) و (۲۸) نشان داده شده‌اند. همچنین صفحه ارزیابی پایداری به‌ازای IGB_8 و تغییرات متغیر α به‌ترتیب در شکل‌های (۲۹) و (۳۰) رسم شده‌اند.

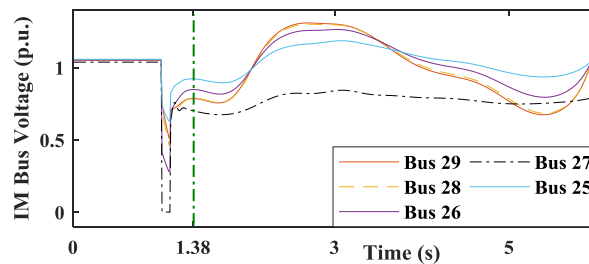
➤ حالت پنجم: در این حالت IGB_6, IGB_7, IGB_8 و IGB_9 به‌عنوان کاندیدا انتخاب شده‌اند. زاویه روتور ژنراتورها و ولتاژ پنج شین دارای موتور القایی به‌ترتیب در

تأیید شده است؛ بنابراین، برقراری معیار « P_1 به عنوان نقطهٔ ماکزیمم» توسط IGB_8 تأیید شده و وقوع ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در مدت زمان $0/29$ ثانیه بعد از پاکسازی اغتشاش تشخیص داده شده است.

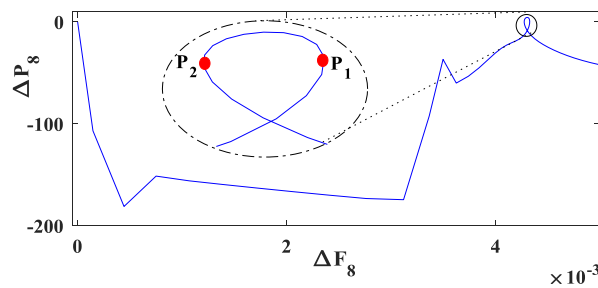
با توجه به [۱۲] و شکل‌های (۲۷) و (۲۸)، در این حالت تنها ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در شین ۲۷ رخ داده است و سیستم از لحاظ پایداری گذرا در وضعیت پایدار قرار دارد. مطابق شکل (۲۹)، شرط (۹) برقرار بوده و روند صعودی متغیر α به‌ازای سه نمونهٔ متوالی توسط IGB_8



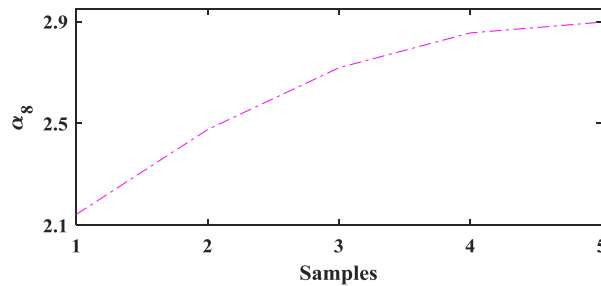
شکل (۲۷): تغییرات زاویهٔ روتور ژنراتور



شکل (۲۸): تغییرات ولتاژ شین‌های موتور القایی



شکل (۲۹): صفحه ارزیابی پایداری در شرایط ناپایدار



شکل (۳۰): تغییرات متغیر α

۵-۳-۲- بررسی تأثیر سایر عوامل

سطح بارگذاری ۹۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۱۰٪ روی شبکه ۱۱۸ شین IEEE [۲۹] بررسی شده است. چهار موتور القایی در شین‌های ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳ در نظر گرفته شدند و سایر بارها از نوع وابسته به فرکانس و ولتاژند. نتایج به‌دست‌آمده از عملکرد الگوریتم در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. مطابق نتایج، الگوریتم پیشنهادی دقت ۱۰۰٪ و ۹۹/۶٪ در تشخیص موارد ناپایدار و پایدار دارد.

جدول (۱): نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شبکه ۳۹

شین IEEE

درصد دقت پیش‌بینی		موارد پیش‌بینی شده	
ناپایدار	پایدار	ناپایدار	پایدار
۱۰۰٪	۹۹/۳٪	۱۳۲۸ مورد از ۱۳۲۸ مورد	۳۲۰۸ مورد از ۳۲۳۲ مورد

جدول (۲): نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شبکه

شین IEEE ۱۱۸

درصد دقت پیش‌بینی		موارد پیش‌بینی شده	
ناپایدار	پایدار	ناپایدار	پایدار
۱۰۰٪	۹۹/۶٪	۱۸۸ مورد از ۱۸۸ مورد	۸۰۹ مورد از ۸۱۲ مورد

۶- مقایسه

در جدول (۳)، عملکرد و نتایج الگوریتم پیشنهادی در این مقاله با برخی از روش‌های ارائه‌شده برای بررسی ناپایداری گذرا یا ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت، مقایسه شده است. با توجه به جدول (۳)، الگوریتم پیشنهادی بدون نیاز به مطالعات آفلاین و در شرایط مختلفی همچون خطای اندازه‌گیری، تغییر توپولوژی و شرایط مختلف بهره‌برداری، دقت عملکرد بالای ۹۹/۵٪ در پیش‌بینی وضعیت ناپایداری گذرا (به هر دو حالت نوسان اول و یا چند نوسانه) و ولتاژ کوتاه‌مدت دارد. الگوریتم پیشنهادی دارای توانایی پیش‌بینی ناپایداری‌های بحرانی است و در شبکه‌های بزرگ به کار گرفته می‌شود. درصدهای ارائه‌شده برای دقت پیش‌بینی الگوریتم براساس ارزیابی ۵۵۶۰ حالت است؛ درحالی‌که در برخی مراجع، تنها به‌ازای بررسی تعداد محدودی از موارد (مانند [۱۹]) که تنها دو حالت بررسی شده است) عملکرد

عملکرد الگوریتم پیشنهادی به‌ازای ۴۵۶۰ پیشامد N-1 و در شرایط مختلف ارزیابی شده است. اغتشاش در نظر گرفته شده به‌جز بخش «خطای اتصال کوتاه نامتقارن»، در سایر حالت‌ها خطای اتصال کوتاه سه‌فاز است. در هر یک از حالت‌ها خطاهای اتصال کوتاه به‌ازای سه مدت زمان ۵، ۶ و ۷ سیکل در ۵ محل مختلف روی هر یک از خطوط انتقال (در ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) در نظر گرفته شده است.

شرایط در نظر گرفته شده عبارت‌اند از:

- خطای اتصال کوتاه متقارن: پیشامدهای در نظر گرفته شده شامل خطاهای اتصال کوتاه سه‌فاز است.
 - خطای اندازه‌گیری PMU: به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم در این شرایط، به سبب اینکه خطای اندازه‌گیری PMU کمتر از یک درصد است [۲۸]، خطای اندازه‌گیری تصادفی بین صفر تا یک درصد در نظر گرفته شده است.
 - خطای اتصال کوتاه نامتقارن: سه نوع خطای نامتقارن دو فاز به هم و به زمین فازهای A و C با مقاومت خطای ۱ اهم، دو فاز به هم فازهای B و C و تک‌فاز به زمین فاز B با مقاومت خطای ۵ اهم به‌ازای پیشامدهای ذکرشده در حالت اتصال کوتاه متقارن در نظر گرفته شده‌اند.
 - شرایط مختلف بهره‌برداری: افزایش و کاهش به میزان ۱۰٪ در بارها و توان ژنراتورهای سنکرون در مقایسه با شرایط بار پایه در نظر گرفته شده است.
 - تغییر توپولوژی شبکه: در ساختار توپولوژی شبکه (در شکل (۱۳)) خط ۷-۸ و خط ۱۷-۱۸ خارج شده‌اند.
- نتایج عملکرد الگوریتم در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.
- مطابق نتایج نشان داده شده در جدول (۱)، الگوریتم پیشنهادی دقت عملکرد کلی بالای ۹۹/۵٪ و در حالت شرایط ناپایدار، دقت ۱۰۰٪ دارد.

۵-۴- شبکه تست ۱۱۸ شین IEEE

به‌منظور ارزیابی بیشتر، عملکرد الگوریتم پیشنهادی به‌ازای ۱۰۰۰ حالت در شرایط مختلف بهره‌برداری (در

الگوریتم بررسی شده و درصد دقت عملکرد الگوریتم ارائه نشده است.

جدول (۳): مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر مراجع

شاخص‌ها	[۷]	[۸]	[۹]	[۱۱]	[۱۳]	[۱۴]	[۱۵]	[۱۸]	[۱۹]	روش پیشنهادی
پیش‌بینی هر دو پایداری گذرا و ولتاژ کوتاه‌مدت	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
پیش‌بینی ناپایداری چندنوسانه	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
پیش‌بینی پایداری بحرانی	✓	✓	N	N	x	x	x	N	N	✓
مصون در برابر خطای اندازه‌گیری	x	N	N	N	✓*	N	N	N	N	✓
مصون در برابر تغییر توپولوژی شبکه	x	N	N	N	✓	N	N	N	N	✓
مصون در برابر بارهای وابسته به ولتاژ	✓	✓	✓	✓	✓	N	N	N	N	✓
مصون در برابر شرایط بهره‌برداری	N	✓	N	N	✓*	N	N	N	N	✓
عدم نیاز به مطالعات آفلاین	✓	x	✓	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
قابلیت به‌کارگیری الگوریتم در شبکه‌های بزرگ	✓	N	N	N	N	✓	✓	✓	✓	✓
درصد دقت پیش‌بینی موارد پایدار	LC	٪ ۹۸۷	LC	N	٪ ۱۰۰	LC	LC	LC	LC	٪ ۹۹/۳
درصد دقت پیش‌بینی موارد ناپایدار	LC	٪ ۹۸/۸	LC	N	٪ ۹۷	LC	LC	LC	LC	٪ ۱۰۰

N= ذکر نشده است، LC= موارد محدود، بررسی و نتیجه ارائه نشده است، *✓= به انجام فرآیند آموزش مجدد داده‌ها نیاز است.

۷- نتیجه‌گیری

مراجع

- در این مقاله، با به‌کارگیری سیستم هوشمند پایش سراسری، الگوریتمی جدید به منظور پیش‌بینی زودهنگام وضعیت هر دو پایداری گذرا و ولتاژ کوتاه‌مدت ارائه شد. در روش ارائه‌شده، شین‌های هوشمند ژنراتوری، تنها با استفاده از فرکانس ژنراتورهای سنکرون، به صورت آنلاین وضعیت‌های مختلف پایداری از جمله پایداری بحرانی، ناپایداری گذرا (به هر دو حالت نوسان اول یا چند نوسانه) و ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت را پیش‌بینی می‌کنند. الگوریتم پیشنهادی به ساختار شبکه و مدل بار وابسته نیست و در شبکه‌های با مقیاس بزرگ نیز به کار گرفته می‌شود.
- مطابق نتایج به دست آمده از ارزیابی ۵۵۶۰ حالت در چهار شبکه تست SMIB (که تنها امکان بروز ناپایداری گذرا دارد)، SMLB (که تنها امکان بروز ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت دارد)، ۳۹ شین IEEE و ۱۱۸ شین IEEE، در شرایط مختلفی از جمله شرایط بهره‌برداری مختلف، وقوع انواع خطاهای اتصال کوتاه، تغییر توپولوژی شبکه و خطای اندازه‌گیری PMU، دارای دقت عملکرد کلی بالای ۹۹/۵٪ و دقت ۱۰۰٪ در پیش‌بینی موارد ناپایدارند.
- [1] A. D. Rajapakse, F. Gomez, K. Nanayakkara, P. A. Crossley and V. V. Terzija, "Rotor Angle Instability Prediction Using Post-Disturbance Voltage Trajectories", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 2, pp. 947-956, 2010.
 - [2] P. Kundur, et al., "Definition and Classification of Power System Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1387-1401, 2004.
 - [3] Y. Wang, Y. Sun and S. Mei, "A method of distinguishing short-term voltage stability from rotor angle stability and its application", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Tianjin, China, pp. 1-5, 2012.
 - [4] 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. 1-13, 2020.
 - [5] S. Dasgupta, M. Paramasivam, U. Vaidya and V. Ajarapu, "PMU-based model-free approach for short term voltage stability monitoring", IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, pp. 1-8, 2012.
 - [6] 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.
 - [7] S. Dasgupta, M. Paramasivam, U. Vaidya and V. Ajarapu, "Real-Time Monitoring of Short-Term Voltage Stability Using PMU Data", IEEE Trans. Power Syst, Vol. 28, No. 4, pp. 3702-3711, 2013.
 - [8] H. Khoshkhou and S. M. Shahrtash, "Fast online dynamic voltage instability prediction and voltage stability classification", IET Gen. Transm. Distrib.,

- [17] H. Yang and et al., "PMU-based model-free method for transient instability prediction and emergency generator-shedding control", *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, Vol. 105, pp. 381-393, 2019.
- [18] S. Wang, J. Yu, W. Zhang, "Transient Stability Assessment Using Individual Machine Equal Area Criterion PART I: Unity Principle", *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 77065-77076, 2018.
- [19] S. Dasgupta, M. Paramasivam, U. Vaidya, V. Ajarapu, "PMU-Based Model-Free Approach for Real-Time Rotor Angle Monitoring", *IEEE Trans. Power Syst*, Vol. 30, No. 5, pp. 2818-2819, 2015.
- [20] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. New York: Springer, 2008.
- [21] S. Sodeifi and H. K. Karegar, "Wide Area Islanding Protection of Wind Turbine Equipped With Permanent Magnet Synchronous Generator by Using PMU", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 115-132, 2016.
- [22] K. R. Padiyar, *Power System Dynamics*, BSP, 2008.
- [23] P. Kundur, *Power system stability and control*, McGraw-Hill, 1994.
- [24] D. Lara-Jimenez, J. M. Ramirez and F. Mancilla-David, "Allocation of PMUs for power system-wide inertial frequency response estimation", *IET Gen. Transm. Distrib.*, Vol. 11, No. 11, pp. 2902-2911, 2017.
- [25] D. PowerFactory, Version 15.0. DIgSILENT International, Germany.
- [26] C.W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, McGraw-Hill, 1994.
- [27] IEEE Standard 1110-2002: 'IEEE guide for synchronous generator modeling practices and applications in Power system stability analyses', 2003.
- [28] IEEE Standard C37.118-2005 (Revision of IEEE Standard 1344-1995): 'IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems', 2006.
- [29] IIT, 'Index of Data Illinois Institute of Technology', Available: motor.ece.iit.edu/data
- Vol. 8, No. 5, pp. 957-965, 2014.
- [9] 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 Gen. Transm. Distrib.*, Vol. 12, No. 19, pp. 4292-4300, 2018.
- [10] G. Lammert, D. Premm, L. D. P. Ospina, J. C. Boemer, M. Braun, T. Van Cutsem, "Control of Photovoltaic Systems for Enhanced Short-Term Voltage Stability and Recovery", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 34, No. 1, pp. 243-254, 2019.
- [11] Y. Xu and et al., "Assessing Short-Term Voltage Stability of Electric Power Systems by a Hierarchical Intelligent System", *IEEE Trans. Neural Networks and Learning Syst*, Vol. 27, No. 8, pp. 1686-1696, 2016.
- [12] 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 Trans. Power Syst*, Vol. 32, No. 3, pp. 1796-1804, 2017.
- [13] F. R. Gomez, A. D. Rajapakse, U. D. Annakkage, I. T. Fernando, "Support Vector Machine-Based Algorithm for Post-Fault Transient Stability Status Prediction Using Synchronized Measurements", *IEEE Trans. Power Syst*, Vol. 26, No. 3, pp. 1474-1483, 2011.
- [14] A. R. Sobbouhi and A. Vahedi, "Online synchronous generator out-of-step prediction by ellipse fitting on acceleration power-Speed deviation curve", *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, Vol. 119, pp. 1-8, 2020.
- [15] A. R. Sobbouhi and A. Vahedi, "Online synchronous generator out-of-step prediction by electrical power curve fitting", *IET Gen. Transm. Distrib.*, Vol. 14, No. 7, pp. 1169-1176, 2020.
- [16] H. Hosseini, S. Naderi and S. Afsharnia, "New approach to transient stability prediction of power systems in wide area measurement systems based on multiple-criteria decision making theory", *IET Gen. Transm. Distrib.*, Vol. 13, No. 21, pp. 4960-4967, 2019.

¹ Intelligence wide-area measurement system (IWAMS)

² Phasor Measurement System (PMU)

³ Intelligence generation bus (IGB)

⁴ Host computers

⁵ Phasor Data Concentrator (PDC)