

بهبود امنیت دینامیکی در مقابل حملات تروریستی در سامانه‌های قدرت

با ضریب نفوذ بالای منابع فتوولتائیک

کتایون حسین‌آبادی^۱، مرتضی خردمندی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت: ۹۷/۰۲/۱۸، پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۱)

چکیده

سامانه‌های قدرت همواره در معرض اغتشاشات از قبیل حملات تروریستی هستند. وقوع این اغتشاشات باعث برهم خوردن تعادل بین توان‌های تولیدی و مصرفی و بروز نوسانات زاویه‌ای در روتور ژنراتورها می‌شود. بررسی نوسانات زاویه‌ای و پایداری شبکه به‌ازای اغتشاشات بزرگ تحت عنوان پایداری گذرا طبقه‌بندی می‌شود. از طرفی در سال‌های اخیر، با توجه به نیاز روزافزون کشورها به منابع انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی رو به گسترش است. هدف این پژوهش، بررسی تأثیرات وارد شدن سامانه‌های فتوولتائیک در شبکه‌های قدرت در پایداری گذرای سیستم قدرت بزرگ است. با توجه به اینکه منابع فتوولتائیک دینامیک متفاوتی نسبت به ژنراتورهای سنکرون دارند با بالا رفتن ضریب نفوذ توان تولیدی این منابع به‌جای ژنراتورهای سنکرون، دینامیک شبکه دستخوش تغییر می‌شود. به‌منظور در نظر گرفتن این تأثیرات، مدلی مناسب برای منابع فتوولتائیک در زمان گذرا انتخاب شده و به کمک روش تابع انرژی گذرا، این مدل در روابط حاشیه انرژی گنجانده شده است و حساسیت آن نسبت به جایگزینی توان ژنراتورهای سنکرون با منابع فتوولتائیک محاسبه گردیده است. با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف به‌طور مثال رخ دادن چهار خطا در سیستم قدرت، مکان و ظرفیت بهینه‌ای برای این منابع به‌دست‌آمده است.

کلیدواژه‌ها: پایداری گذرا، منابع فتوولتائیک، آنالیز حساسیت، تابع انرژی گذرا

Enhancing Dynamic Security against Terrorist Attacks in Power Systems with Higher Penetration of Photovoltaic Resources

K. Hosseinabadi, M. Kheradmandi*

Shahid Beheshti University

(Received: 08/05/2018; Accepted: 01/01/2019)

Abstract

The wide spreading restructuring has laid further emphasis on economic and reliable operation of power grids. Power systems are, however, always subject to disturbances. These disturbances cause an unbalance between the electrical and mechanical power in generators, thus leading to angle oscillations on generator rotors. The analysis of system behavior in case of large disturbances is referred to as transient stability. On the other hand, exploiting renewable sources has been increasing due to the ever-increasing energy requirements in the developing and developed countries. Solar power is among the main sources of renewables that has drawn much attention due to the environmental concerns. In this project, the impact of integration of photovoltaic (PV) systems on transient stability of bulk power systems is investigated. As the PVs have different dynamic characteristic than the synchronous machines, system dynamic behavior will be affected by an increased penetration of photovoltaic generation. An appropriate model is, therefore, utilized for PVs in the transient period and incorporated in the energy margin. The sensitivity of energy margin is then calculated to the replacement of conventional generation resources with photovoltaic resources. Based on different scenarios, for example, four faults in the power system, the photovoltaic generations are located and sized at various buses.

Keywords: Transient Stability, Photovoltaic, Sensitivity Analysis, Transient Energy Function

۱. مقدمه

قابلیت اطمینان دارای دو مؤلفه کفایت^۱ و امنیت^۲ است که مؤلفه امنیت را می‌توان به دو دسته امنیت استاتیکی و دینامیکی تقسیم‌بندی نمود. امنیت دینامیکی قابلیت سیستم در پشت سر گذاشتن نوسانات ناشی از یک خروج یا زنجیره‌ای از خروج‌ها و استقرار در نقطه کار جدید قابل قبول است. پایداری گذرا یکی از مؤلفه‌های مهم امنیت دینامیکی سیستم است که روی قابلیت اطمینان شبکه نقش مهمی دارد. پایداری گذرا، پایداری سیستم در مقابل اغتشاشات بزرگ است. خطاها را می‌توان به دو بخش خطاهای ناشی از خروج و خطاهای اتصال کوتاه تقسیم‌بندی نمود. خطاهای ناشی از خروج شامل خروج ژنراتورها یا بارها در پایداری گذرا مورد بررسی قرار نمی‌گیرند و خطاهای ناشی از خروج خط هم معمولاً خیلی شدید نیستند. خطاهای اتصال کوتاه نیز انواع مختلف دارند که شدیدترین آن‌ها خطای اتصال کوتاه سه فاز است. بنابراین در این پژوهش خطاها از نوع اتصال کوتاه سه فاز در نظر گرفته شده‌اند.

در هنگام رخ دادن خطا ژنراتورها به دو دسته بحرانی و غیر بحرانی تقسیم‌بندی می‌شوند. ژنراتورهای بحرانی، ژنراتورهای هستند که در اثر بروز خطا زاویه روتور آن‌ها شروع به افزایش می‌کند و باعث ناپایداری سیستم می‌شوند. ژنراتورهای غیر بحرانی این چنین نیستند و باعث ناپایداری سیستم نمی‌شوند.

مطالعات پایداری گذرا را می‌توان به دو دسته حوزه زمان و مستقیم تقسیم نمود. روش‌های حوزه زمان دارای این مزیت هستند که می‌توانند هرگونه پیچیدگی مدل را لحاظ کنند به همین خاطر نتایج حاصل از این روش‌ها به‌عنوان معیاری برای سنجش صحت نتایج سایر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از معایب این روش‌ها می‌توان به حجم بالای محاسبات در صورت افزایش ابعاد مسئله و ارائه نکردن شاخصی برای درجه پایداری اشاره کرد. روش‌های مستقیم دارای سرعت مناسبی هستند و همچنین شاخصی از درجه پایداری ارائه می‌دهند. از روش‌های مستقیم می‌توان به روش سطوح معادل^۳ و تابع انرژی^۴ اشاره کرد. روش تابع انرژی جزء روش‌های مهم ارزیابی پایداری گذرا است.

اکثر پژوهش‌های گذشته به بررسی اثر منابع فتوولتائیک بر روی سیستم توزیع پرداخته‌اند و کمتر به بررسی اثر آن بر سیستم انتقال پرداخته شده است؛ چراکه بر این گمان بودند که اثر این منابع بر روی سیستم انتقال کم است [۲]. اما امروزه با افزایش ضریب نفوذ این منابع، اثر آن‌ها بر سیستم انتقال نیز قابل توجه شده است [۳]. در این پژوهش به بررسی اثر این منابع

در سال‌های اخیر، تجربیات جنگ‌ها و حملات تروریستی بر اهمیت مطالعه آسیب‌پذیری زیرساخت‌های اساسی افزوده است. یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های اساسی هر کشور، زیرساخت شبکه برق آن است زیرا زیرساخت‌های دیگر به آن وابسته‌اند. تهدیدات بهره‌بردار به حوادث درون شبکه‌ای نظیر خطا و خرابی تجهیزات و برون شبکه‌ای مانند برخورد صاعقه، طوفان و اشتباه عوامل انسانی اطلاق می‌شوند. در سالیان متمادی مسئله امنیت و قابلیت اطمینان و پایداری شبکه قدرت در برابر این تهدیدات مورد توجه قرار گرفته است [۱].

امروزه به دلیل اهمیت مسائل زیست‌محیطی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و جایگزینی منابع سوخت فسیلی با این نوع منابع انرژی پاک بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از منابع تأمین انرژی رایگان و عاری از اثرات مخرب زیست‌محیطی، انرژی خورشیدی است که در سال‌های اخیر با توجه به بحران انرژی، جایگزین انرژی‌های فسیلی شده و به دلیل کاهش انتشار گازهای آلاینده با استقبال فراوانی مواجه شده است به طوری که در سال ۲۰۱۶ میلادی، برق خورشیدی ۴۷ درصد از کل ظرفیت نصب شده جدید را به خود اختصاص داد. در این سال، ۷۵ گیگاوات سیستم فتوولتائیک در جهان نصب شد که این میزان، بیشتر از توان نصب شده در ۵ سال قبل از آن بوده است. مجموع ظرفیت منابع فتوولتائیک نصب شده در جهان تا سال ۲۰۱۶ به ۳۰۳ گیگاوات رسیده است [۱]. نیاز روزافزون تعویض منابع سوخت فسیلی با منابع انرژی پاک و تجدید پذیر، چالش‌های جدیدی برای شبکه‌های قدرت ایجاد کرده است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به تأثیر آن بر پایداری سامانه‌های قدرت اشاره کرد.

از طرف دیگر، به دلیل گسترش و پیچیدگی روزافزون شبکه‌های سرتاسری قدرت، وقوع حوادث و بلایای طبیعی، جنگ و حمله‌های نظامی کشورهای مهاجم و نیز حملات تروریستی و خرابکارانه، امنیت شبکه بیش‌ازپیش مورد تهدید واقع شده است؛ لذا نیاز است که سیستم با قابلیت اطمینان بالاتری مورد بهره برداری قرار گیرد. پدافند غیرعامل، دفاع در برابر تهاجم، بدون استفاده از سلاح و درگیر شدن مستقیم است. به بیانی دیگر، علاوه بر اینکه باید اقدامات لازم برای جلوگیری از این اقدامات انجام گیرد باید شبکه به نوعی طراحی و بهره برداری گردد که در صورت بروز چنین اتفاقاتی، بتواند همچنان به تغذیه بارها ادامه دهد. بنابراین اجرای اقدامات پدافند غیرعامل به‌منظور ارتقاء قابلیت اطمینان شبکه دارای اهمیت فراوانی است.

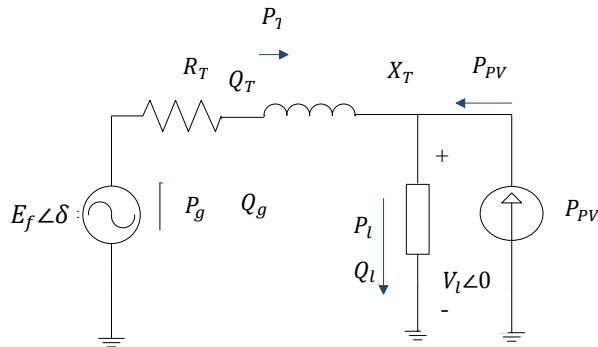
^۱ Adequacy

^۲ Security

^۳ Equal Area Criterion

^۴ Energy Function

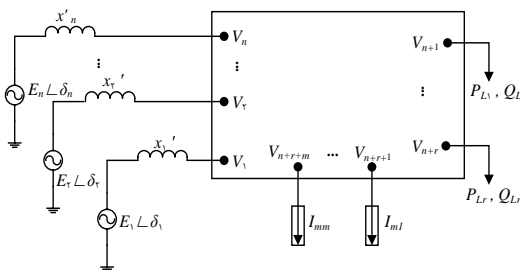
PVهای صنعتی نسبت به مدل‌سازی برای مطالعات پخش توان به صورت متفاوتی مدل می‌شوند. این تفاوت در مدل‌سازی برای مطالعات دینامیکی ناشی از این واقعیت است که این واحدها مجهز به مبدل‌هایی هستند که برای در نظر گرفتن رفتار دینامیکی بهتر، نیاز به مدل‌سازی دارند [۹] در این پژوهش، مطابق شکل (۱) مدل در نظر گرفته شده برای منابع فتوولتائیک معادل منبع جریان است.



شکل ۱. شبکه ساده دو باس همراه با PV

در مدل کلاسیک سیستم قدرت، ژنراتورها به صورت یک منبع ولتاژ ثابت EMF^۱ پشت راکتانس سنکرون نمایش داده می‌شوند. لازم به ذکر است که در مطالعات پایداری گذرا، با توجه به زمان عملکرد سیستم تنظیم خودکار ولتاژ AVR^۲، ولتاژ داخلی (جهت ثابت نگه‌داشتن ولتاژ پایانه) نمی‌تواند تغییر سریع داشته باشد. بنابراین می‌توان گره‌های ولتاژ داخلی را به مدل شبکه اضافه کرد. زاویه مکانیکی روتور، همان زاویه EMF داخلی ژنراتور خواهد بود. با توجه به زمان کوتاه پدیده ناپایداری گذرا و سرعت کنترلرهای فرکانس ژنراتورها، توان مکانیکی ژنراتورها ثابت در نظر گرفته می‌شود. همچنین از دمپینگ (میرایی) یا توان آسنکرون ژنراتور صرف نظر می‌گردد.

فرض می‌شود که شبکه قدرت دارای n باس نیروگاهی و m باس بار غیرخطی جریان ثابت و r باس بار خطی امپدانس ثابت است. شکل (۲) طرح شماتیکی شبکه مفروض را نشان می‌دهد.



شکل ۲. طرح شماتیکی شبکه قدرت با بار غیرخطی

بر روی سیستم انتقال پرداخته می‌شود. همچنین پژوهش‌های گذشته به بررسی اثر منابع فتوولتائیک بر پایداری سیگنال کوچک یعنی پایداری به‌ازای اغتشاشات کوچک پرداخته‌اند [۴]. در شبکه‌های بزرگ قدرت بررسی پایداری گذرا یعنی پایداری شبکه به‌ازای اغتشاشات بزرگ نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در این پژوهش به بررسی آن پرداخته می‌شود.

با توجه به اینکه منابع فتوولتائیک دینامیک متفاوتی نسبت به ژنراتورهای سنکرون دارند با بالا رفتن ضریب نفوذ توان تولیدی این منابع به جای ژنراتورهای سنکرون، دینامیک شبکه دستخوش تغییر می‌شود [۵]. منابع فتوولتائیک توانایی تنظیم ولتاژ را نداشته و عمدتاً به‌عنوان منابع تولید توان اکتیو هستند و توان راکتیو تولید نمی‌کنند. بنابراین کمبود توان راکتیو و کاهش اینرسی از اثرات جایگزینی این منابع در سیستم است. ظرفیت (ضریب نفوذ) و محل اتصال این منابع تأثیر به‌سزایی بر رفتار دینامیکی شبکه دارد [۶].

در این پژوهش، با توجه به نیاز جایگزینی منابع سوخت فسیلی با منابع تجدیدپذیر مانند منابع فتوولتائیک هدف جایگزینی برخی ژنراتورهای سنکرون با منابع فتوولتائیک و بررسی پایداری گذرا شبکه قدرت ۳ ماشین در مواجهه با حملات تروریستی است. در بخش ۲ روش تحقیق، بخش ۳ نتایج و بحث، بخش ۴ نتیجه‌گیری تشریح می‌شود.

۲. روش تحقیق

روش تحقیق شامل مباحث مدل منابع فتوولتائیک در حالات گذرا، تابع انرژی و نحوه گنجاندن مدل منابع فتوولتائیک و آنالیز حساسیت است که در ادامه هر کدام از آن‌ها تشریح می‌شوند.

۲-۱. مدل منابع فتوولتائیک در حالات گذرا

بسیاری از سامانه‌های فتوولتائیک نصب‌شده روی پشت‌بام منازل مسکونی، دارای توان خروجی کوچک و بدون قابلیت توان راکتیو هستند. بنابراین به‌منظور انجام مطالعات پخش بار، به‌عنوان بارهای با توان اکتیو منفی و ثابت لحاظ می‌شوند. تنها مؤلفه‌های توان اکتیو مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، باس‌های شامل سامانه‌های PV مسکونی به صورت باس‌های PQ با $Q=0$ مدل می‌شوند. هر چند که PVهای مورد استفاده در صنعت دارای قابلیت توان راکتیو بوده و بنابراین به روشی مشابه با ژنراتورهای مرسوم برای تحلیل حالت ماندگار مدل می‌شوند، این واحدها به صورت باس‌های PV با محدودیت‌های VAR مناسب مدل می‌شوند [۸].

برای مطالعات دینامیکی، PVهای خانگی به صورت بارهای جریان ثابت متناظر با تزریق توان منفی مدل می‌شوند. اما

^۱ Electromotive Force

^۲ Automatic Voltage Regulator

ارزیابی پایداری گذرا به روش تابع انرژی گذرا فقط برای آخرین گذرا انجام می‌گیرد. برای ارزیابی پایداری گذرا، مقدار انرژی گذرا V در دو لحظه که یکی در انتهای آخرین اغتشاش (لحظه رفع خطا) و دیگری در نقطه تعادل ناپایدار کنترلی است، محاسبه شده و باهم مقایسه می‌شوند. مقدار تابع V در لحظه رفع خطا با V_{cl} و مقدار آن در نقطه تعادل ناپایدار کنترلی که مقدار بحرانی تابع V است، با V_{cr} نشان داده می‌شود. اگر $V_{cl} < V_{cr}$ باشد سیستم پایدار است و اگر $V_{cr} < V_{cl}$ سیستم ناپایدار است. بنابراین برای انجام ارزیابی پایداری گذرا، حاشیه انرژی ΔV به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Delta V = V_{cr} - V_{cl} \quad (۴)$$

به عبارت دیگر اگر $\Delta V > 0$ باشد سیستم پایدار و اگر $\Delta V < 0$ باشد سیستم ناپایدار است. یکی از سختی‌های این روش این است که صحت نتایج آن به محاسبه دقیق نقطه تعادل ناپایدار کنترلی بستگی دارد و این محاسبه دشوار است.

تابع انرژی از معادلات دینامیکی سیستم که نسبت به مرکز اینرسی نوشته شده است به دست می‌آید. بنابراین معادله سوئینگ که نسبت به مرکز اینرسی در شبکه بعد از خطا نوشته شده است، در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} M_i \ddot{\omega}_i &= P_{m_i} - P_{e_i} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \\ \dot{\theta}_i &= \dot{\omega}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (۵)$$

حاشیه انرژی از مقایسه انرژی جنبشی و پتانسیل در شرایط تعادل و حین خطا به دست می‌آید. مقادیر V_{cl} و V_{cr} محاسبه می‌شوند. برای جمله مربوط به تلفات، از فرض مسیر زاویه‌ای خطی، بین دو نقطه انتهای اغتشاش و نقطه تعادل ناپایدار کنترلی استفاده می‌شود. $(\theta^{cl}, \dot{\omega}^{cl})$ شرایط سیستم در انتهای اغتشاش و $(\theta^u, 0)$ شرایط سیستم در نقطه تعادل ناپایدار کنترلی را نشان می‌دهد [۱۱]. حاشیه انرژی به صورت زیر به دست می‌شود.

$$\begin{aligned} \Delta V &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_{eq}^{cl2} - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i^u - \theta_i^{cl}) \\ &\quad - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij}^u \\ &\quad - \cos \theta_{ij}^{cl}) \\ &\quad - B_{ij} D_{ij} (\sin \theta_{ij}^u - \sin \theta_{ij}^{cl})] \\ &\quad + \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^{cl}}^{\theta_i^u} E_i I_{GL_i} \cos(\theta_i - \tau_i) d\theta_i \end{aligned} \quad (۶)$$

که در آن:

منبع جریان به صورت بار غیرخطی وارد ماتریس ادمیتانس کاهش یافته می‌شود و باعث به وجود آمدن جمله I_{GL} در معادله جریان-ولتاژ می‌شود.

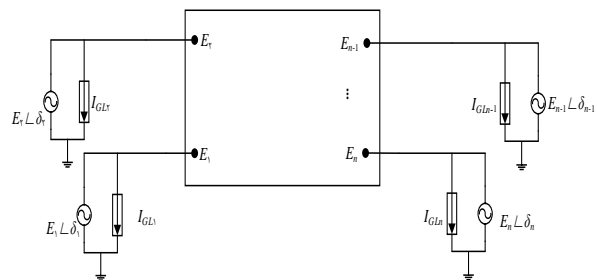
$$I_{NG} = (\hat{Y}_{NN} - \hat{Y}_{NM} \hat{Y}_{MM}^{-1} \hat{Y}_{MN}) V_{NG} + \hat{Y}_{NM} \hat{Y}_{MM}^{-1} I_M \quad (۱)$$

که در آن:

$$Y_{red} = \hat{Y}_{NN} - \hat{Y}_{NM} \hat{Y}_{MM}^{-1} \hat{Y}_{MN} \quad (۲)$$

$$I_{GL} = \hat{Y}_{NM} \hat{Y}_{MM}^{-1} I_M \quad (۳)$$

مشاهده می‌شود که رابطه جریان تزریقی به شبکه از دو جمله تشکیل شده است. در حالی که اگر بار غیرخطی در شبکه وجود نداشته باشد این رابطه تنها از یک جمله تشکیل می‌شود. جمله اول Y_{redcc} ماتریس ادمیتانس کاهش یافته شبکه نامیده می‌شود؛ با کاهش دادن ماتریس ادمیتانس به گره‌های داخلی ژنراتور، ابعاد ماتریس به ماتریسی با ابعاد تعداد ژنراتورهای شبکه کاهش می‌یابد. شکل (۳) طرح شماتیکی شبکه قدرت کاهش یافته با در نظر گرفتن بار غیرخطی را نشان می‌دهد.



شکل ۳. طرح شماتیکی شبکه قدرت کاهش یافته

۲-۲. تابع انرژی و نحوه گنجاندن مدل منابع فتوولتائیک

روش تابع انرژی جزء روش‌های مهم ارزیابی پایداری گذرا است. این روش بر پایه معیار دوم لیاپانوف در تحلیل پایداری سامانه‌های غیرخطی بنا نهاده شده است. در این روش پس از تعیین یک تابع انرژی مناسب که انرژی گذرای سیستم را به خوبی توصیف می‌کند به محاسبه تابع در لحظه برطرف شدن اغتشاش در شبکه می‌پردازد تا بدین وسیله مقدار انرژی تزریق شده به شبکه در حین اغتشاش را به دست آورد (V_{cl}). حال چنانچه مقدار این انرژی از حد معینی که انرژی بحرانی (V_{cr}) نامیده می‌شود کمتر باشد حالت‌های سیستم درون ناحیه پایداری یا دامنه جذب نقطه تعادل پایدار پس از اغتشاش قرار داشته و سیستم به صورت مجانبی پایدار است و پس از طی شدن حالت گذرا به نقطه تعادل پایدار پس از اغتشاش نشست خواهد کرد ولی چنانچه انرژی تزریق شده به شبکه در حین اغتشاش بیش از انرژی بحرانی باشد سیستم ناپایدار خواهد شد [۱۰].

توان فتوولتائیک از رابطه فوق نسبت به توان فتوولتائیک مشتق گرفته می‌شود.

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial P_{PV}} = \frac{\partial \vec{V}_G}{\partial P_{PV}} + \vec{Z} \frac{\partial \vec{I}_G}{\partial P_{PV}} \quad (10)$$

برای محاسبه حساسیت ولتاژ داخلی ژنراتورها به محاسبه $\frac{\partial \vec{V}_G}{\partial P_{PV}}$ و $\frac{\partial \vec{I}_G}{\partial P_{PV}}$ نیاز است که به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_G}{\partial P_{PV}} &= (-V_G \sin \delta + jV_G \cos \delta) \frac{\partial \delta}{\partial P_{PV}} \\ &= V_G \left[\delta + \frac{\pi}{2} \right] \frac{\partial \delta}{\partial P_{PV}} \\ &= j\vec{V}_G \frac{\partial \delta}{\partial P_{PV}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{d\vec{I}_G}{\partial P_{PV}} = \frac{\left(\frac{\partial P_G}{\partial P_{PV}} - j \frac{\partial Q_G}{\partial P_{PV}} \right) - (Q_G + jP_G) \frac{\partial \delta}{\partial P_{PV}}}{\vec{V}_G^*} \quad (12)$$

رابطه جریان ژنراتور برحسب ولتاژ آن و جریان فتوولتائیک به صورت زیر به دست آورده شده است.

$$\begin{aligned} I_n &= \left(Y_{r1cc} - Y_{r1cc} Y_{11cc}^{-1} Y_{12cc} \right) V_n + \\ &Y_{r1cc} Y_{11cc}^{-1} I_m \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن:

$$I_{GL} = Y_{r1cc} Y_{11cc}^{-1} I_m \quad (14)$$

$$Y_{redcc} = Y_{r1cc} - Y_{r1cc} Y_{11cc}^{-1} Y_{12cc} \quad (15)$$

با مشتق گیری از روابط فوق به دست می‌آید:

$$\frac{\partial Y_{redcc}}{\partial P_{PV}} = Y_{r1cc} Y_{11cc}^{-1} \frac{\partial Y_{11cc}}{\partial P_{PV}} Y_{11cc}^{-1} Y_{12cc} \quad (16)$$

$$\frac{\partial I_{GL}}{\partial P_{PV}} = Y_{r1cc} Y_{11cc}^{-1} \frac{\partial I_m}{\partial P_{PV}} + Y_{r1cc} Y_{11cc}^{-1} \frac{\partial Y_{11cc}}{\partial P_{PV}} Y_{11cc}^{-1} I_m \quad (17)$$

با محاسبه $\frac{\partial I_m}{\partial P_{PV}}$ و $\frac{\partial Y_{11cc}}{\partial P_{PV}}$ حساسیت ماتریس ادمیتانس کاهش

یافته و I_{GL} نسبت به توان منابع فتوولتائیک به دست می‌آید. برای

محاسبه $\frac{\partial Y_{11cc}}{\partial P_{PV}}$ قسمت حقیقی و موهومی آن به صورت جداگانه

در نظر گرفته شده و مشتق گیری انجام می‌شود:

$$\operatorname{Re} \left(\frac{\partial \vec{Y}_{11cc}}{\partial P_{PV}} \right) = \frac{\partial G_{ij}}{\partial P_{PV}} = -\frac{1}{V^2} - \frac{2 P_l}{V^3} \frac{\partial V}{\partial P_{PV}} \quad (18)$$

$$\operatorname{Im} \left(\frac{\partial \vec{Y}_{11cc}}{\partial P_{PV}} \right) = \frac{\partial B_{ij}}{\partial P_{PV}} = \frac{2 Q_l}{V^3} \frac{\partial V}{\partial P_{PV}} \quad (19)$$

$$\beta_{ij} = \frac{\left(\theta_i + \theta_j - \theta_i^{s_r} - \theta_j^{s_r} \right)}{\theta_{ij} - \theta_{ij}^{s_r}} D_{ij} \quad (7)$$

جمله آخر مشخص شده مربوط به منبع جریان مدل شده است که در تابع انرژی ظاهر می‌شود. داخل این جمله انتگرال وجود دارد که باید با خطی سازی و به صورت تقریبی حل شود.

اگر حاشیه انرژی به عنوان شاخص پایداری در نظر گرفته شود، دارای این کمبود خواهد بود که حاشیه انرژی در شبکه‌های مختلف به خصوص با تغییر ابعاد شبکه ممکن است مقادیر متفاوتی به خود بگیرد. دقت شود که هر چه انرژی جنبشی لحظه رفع خطا بیشتر باشد و نیز حاشیه جذب انرژی پتانسیل کمتر باشد، خطر ناپایداری بیشتر است. بنابراین شاخصی از میزان پایداری یا ناپایداری تحت عنوان حاشیه انرژی نرمال شده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta V_n = \frac{\Delta V}{V_{KE_{corr}}} \quad (8)$$

هر چه حاشیه انرژی نرمال شده مثبت و بزرگ‌تر باشد، سیستم پایدارتر و هر چه منفی‌تر باشد، سیستم ناپایدارتر است.

حاشیه انرژی شاخص امنیت سیستم را قبل از وقوع خطا نشان می‌دهد. بنابراین سیستم می‌تواند خطایی شدیدتر از آن را تحمل نماید؛ مادامی که این مقدار از حاشیه انرژی گذرای محاسبه شده بالاتر نرود. بنابراین منطقی است که حاشیه انرژی برابر مقدار انرژی گذرای در نظر گرفته شود که مستقیماً در ناپایداری نقش دارد.

از طرفی انرژی جنبشی تصحیح شده $V_{KE_{corr}}$ ، همان مؤلفه‌ای از انرژی گذرای انتهای اغتشاش است که باید جهت حفظ پایداری به سایر شکل‌های انرژی تبدیل شود. در نتیجه، حاصل تقسیم $\Delta V / V_{KE_{corr}}$ معیار و شاخصی صحیح از شدت یک اغتشاش است.

۳-۲. آنالیز حساسیت

به منظور بررسی پایداری گذرای سیستم، حساسیت تابع انرژی نسبت به توان PV محاسبه می‌شود. بدین منظور محاسبه حساسیت پارامترهای مختلف شبکه از جمله ولتاژ داخلی ژنراتورها و ماتریس ادمیتانس کاهش یافته نسبت به توان PV لازم است. ولتاژ داخلی ژنراتورها به صورت زیر محاسبه می‌شود.

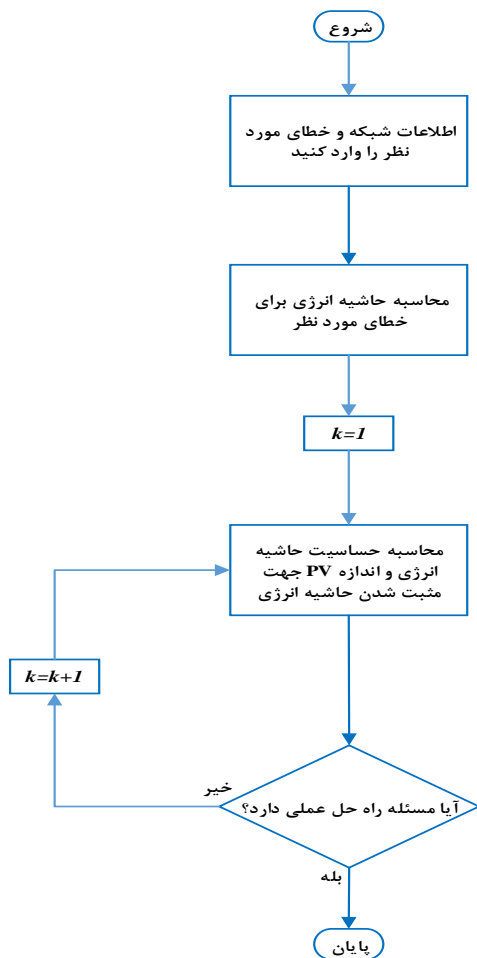
$$\vec{E} = \vec{V}_G + \vec{Z} \vec{I}_G \quad (9)$$

که در آن V_G ولتاژ پایانه، Z امپدانس داخلی و I_G جریان ژنراتورها است. برای محاسبه حساسیت ولتاژ داخلی نسبت به

نشان داده شده است. بدین ترتیب تابع هدف به‌منظور جابجایی و ظرفیت فتوولتائیک به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^n \Delta P_{Pi} \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n f_{Pi} \Delta P_{Pi} \geq -\Delta V \end{aligned} \quad (22)$$

با حل مسئله کمینه‌سازی فوق به‌صورت تحلیلی می‌توان مکان و ظرفیت فتوولتائیک را محاسبه کرد. بدین منظور با تشکیل یک حلقه و حل تکراری، مقدار ظرفیت لازم جهت اینکه حاشیه انرژی باوجود منابع فتوولتائیک، به عددی بزرگ‌تر و یا مساوی صفر برسد؛ محاسبه می‌شود. شکل (۴) الگوریتم پیاده شده به‌منظور محاسبه ظرفیت PV را نشان می‌دهد.



شکل ۴. الگوریتم تعیین ظرفیت PV

۳-۱. بررسی تأثیر PV بر پایداری گذرا در شبکه ۳ ماشین با در نظر گرفتن یک خطا

در شکل (۵) شمای تک‌خطی شبکه ۳ ماشین نشان داده شده است. این شبکه شامل ۳ ژنراتور، ۹ باس و ۹ خط انتقال است. باس ۱، به‌عنوان باس اسلک در نظر گرفته شده است. مقادیر تولید و مصرف با در نظر گرفتن $S_{base} = 100 MVA$ برحسب پریونیت بیان شده است.

حال به محاسبه I_m و حساسیت آن نسبت به توان فتوولتائیک $\frac{\partial I_m}{\partial P_{PV}}$ پرداخته می‌شود.

$$I_m = I_{PPV} + jI_{QPv} = \frac{P_{PV}}{V} + j \frac{Q_{PV}}{V} \quad (20)$$

$$\frac{\partial I_m}{\partial P_{PV}} = \left(\frac{1}{V} - \frac{\frac{\partial V}{\partial P_{PV}} P_{PV}}{V^2} \right) + j \left(0 - \frac{\frac{\partial V}{\partial P_{PV}} Q_{PV}}{V^2} \right) \quad (21)$$

بدین ترتیب حساسیت ماتریس ادمیتانس کاهش یافته و I_{GL} به‌دست می‌آید.

۳. نتایج و بحث

در صورتی که شبکه با وقوع یک خطا، ناپایدار گردد؛ حاشیه انرژی عددی منفی خواهد بود. با محاسبه ضرایب حساسیت حاشیه انرژی نسبت به توان فتوولتائیک می‌توان مکان و ظرفیت آن را جهت اینکه حاشیه انرژی به عددی بزرگ‌تر از صفر برسد؛ محاسبه نمود. روند تعیین ظرفیت و مکان PVها به‌روش حساسیت حاشیه انرژی، بر این اساس است که به‌ازای خطاهای در نظر گرفته شده ابتدا حساسیت تابع انرژی نسبت به توان PV در باس‌های مختلف محاسبه می‌شود؛ سپس محل و اندازه بهینه PV جهت پایدارسازی شبکه، به کمک حل یک مسئله کمینه‌سازی تعیین می‌گردد. مقدار توان PVها باید به‌نحوی باشند که حاشیه انرژی شبکه به‌ازای خطاهایی که شبکه را ناپایدار می‌کند، باوجود PV پیشنهادی به عددی بزرگ‌تر مساوی صفر برسد. در انجام محاسبات، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱- تمامی خطاهای فرض شده از نوع اتصال کوتاه سه فاز هستند.

۲- مکان خطاها در روی باس‌ها و ابتدای خطوط واصل به آن‌ها فرض شده است. این فرض، خطاهای وسط خطوط را هم پوشش خواهد داد.

۳- فرض گردیده است که خطاها با باز شدن خط دچار خطا، رفع شده است.

۴- بارها در طول زمان گذرا، به‌صورت امپدانس ثابت مدل شده‌اند.

۵- از تأثیر عملکرد AVR و گاورنر صرف‌نظر گردیده است.

۶- ژنراتورها با مدل کلاسیک مدل شده‌اند.

فرض شود که شبکه قدرت برای یک خطا و زمان رفع خطای معین، ناپایدار بوده و دارای حاشیه انرژی منفی است و هدف پایدارسازی شبکه باوجود منابع فتوولتائیک است. حساسیت حاشیه انرژی نسبت به توان اکتیو فتوولتائیک در باس i ام، با $f_{P_{Pi}}$

با در نظر گرفتن مدل کلاسیک ژنراتورها انجام گرفته است.

جدول ۱. اطلاعات سرعت و زاویه رفع خطای ژنراتورها برای خطای خط ۸-باس ۸

شماره ژنراتور	$\bar{\omega}_{cl}$ (rad/s)	θ_{cl} (درجه)
۱	-۰/۰۰۸۰۲۹۲	-۲۴/۴۹۱
۲	۰/۰۱۶۱۵۷	۴۶/۱۳۳
۳	۰/۰۰۲۰۳۰۷	۱۲/۸۹۱

با استفاده از نقاط شروع و همچنین استفاده از الگوریتم نیوتن رافسون بهبودیافته، مقدار دقیق زاویه نقطه تعادل ناپایدار کنترلی محاسبه می‌شود. این زوایا برحسب درجه در جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زاویه ژنراتور بحرانی مثبت و زوایای بقیه ژنراتورها منفی است.

جدول ۲. نقاط تعادل ناپایدار کنترلی برای خطای خط ۸-باس ۸

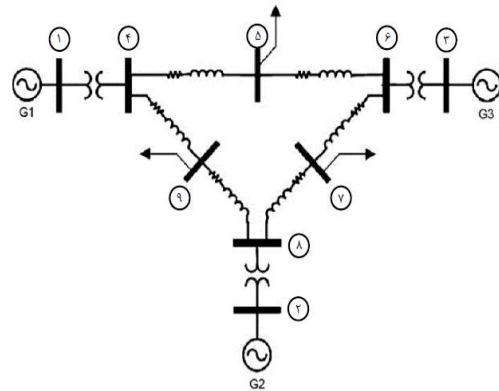
شماره ژنراتور	θ^u (درجه)
۱	-۶۱/۲۳۵
۲	۹۵/۴۲۴
۳	۷۴/۵۹۵

خطای قابل قبول در محاسبه نقطه تعادل ناپایدار کنترلی، مقدار 10^{-11} قرار داده شده است. با محاسبه نقطه تعادل ناپایدار کنترلی حاشیه انرژی در لحظه رفع خطا برابر 0.073697 و حاشیه انرژی لحظه رفع خطای بحرانی برابر 0.066138 است. در لحظه رفع خطای بحرانی سیستم در مرز پایداری قرار دارد اما حاشیه انرژی منفی است، این مسئله بیانگر محافظه کارانه بودن روش تابع انرژی گذرا است. حساسیت حاشیه انرژی نسبت به توان PV در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳. حساسیت حاشیه انرژی نسبت به توان در خطای خط ۸-باس ۸

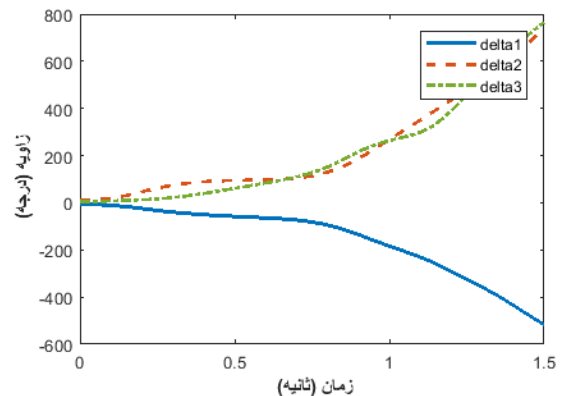
شماره باس	$\frac{\partial \Delta V}{\partial P_i}$
۱	۱/۱۹۲۴
۲	-۱/۸۸۵۸
۳	-۱/۱۸۹۵
۴	۰/۶۰۷۹۰
۵	۰/۱۲۸۰۸
۶	-۰/۸۹۵۷
۷	-۱/۰۲۰۹
۸	-۱/۱۵۶۵
۹	۰/۲۲۷۵۲

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقادیر ضرایب حساسیت تابع انرژی در باس‌های ۲ و ۳ و ۶ و ۷ و ۸ که نزدیک محل قرارگیری ژنراتورهای بحرانی است منفی است. بنابراین PV را تا حد امکان



شکل ۵. شمای تک‌خطی شبکه ۳ ماشین

فرض می‌گردد که شبکه فقط در صورت بروز یک خطا ناپایدار می‌گردد. با بررسی زمان رفع بحرانی خطاهای محتمل در شبکه، خطای دارای کمترین زمان بحرانی مشخص می‌گردد. مشخصات این خطا به این صورت است که خطا در خط ۸ (خط واصل باس‌های ۸ و ۹) باس ۸ رخ داده است و زمان رفع خطای بحرانی آن 0.1937 ثانیه است. خطا بعد از 0.2 ثانیه با باز شدن خط رفع می‌شود. بنابراین خطا در زمانی بالاتر از زمان رفع خطای بحرانی رفع شده است و شبکه ناپایدار می‌شود. زمان رفع خطای بحرانی با انجام تعداد زیادی شبیه‌سازی زمانی به‌دست آمده است؛ به این صورت که زمانی که مرز پایداری و ناپایداری شبکه است به‌عنوان زمان رفع خطای بحرانی سیستم در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی زمانی با رانگ کوتای درجه ۴ انجام گرفته است. شکل (۶) وضعیت زوایای روتور ژنراتورها را در اثر بروز این خطا نشان می‌دهد.



شکل ۶. شبیه‌سازی زمانی خطای خط ۸-باس ۸

مشاهده می‌گردد که وقوع این خطا منجر به ناپایداری ژنراتور ۲ و ۳ می‌شود. در روش تابع انرژی به‌منظور محاسبه نقطه تعادل ناپایدار کنترلی، نیاز به اطلاعات سیستم در لحظه رفع خطا است. این اطلاعات با استفاده از شبیه‌سازی زمانی به‌دست می‌آید. اطلاعات سرعت و زوایای سیستم در مختصات مرکز اینرسی در لحظه رفع خطا، در جدول (۱) آمده است. شبیه‌سازی زمانی نیز

باس‌های ۸ و ۹، خط ۶ واصل باس‌های ۷ و ۸، خط ۵ خط واصل باس‌های ۶ و ۷ و خط ۳ خط واصل باس‌های ۵ و ۶ هستند. ضرایب حساسیت حاشیه انرژی نسبت به توان PV مربوط به هر یک از این خطاها در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ۵. اطلاعات خطا در زمان رفع خطای ۰/۲۵ ثانیه

حاشیه انرژی زمان رفع خطا (pu) (ثانیه)	حاشیه انرژی زمان رفع خطای بحرانی (pu) (ثانیه)	حاشیه انرژی زمان رفع خطای بحرانی (pu) (ثانیه)	مکان خطا
-۰/۱۵۱۵۹	-۰/۰۶۶۱	-۰/۱۹۳۷	خط ۸-باس ۸
-۱/۲۳۶۴	-۰/۱۸۲۵	-۰/۲۰۱۳	خط ۶-باس ۸
-۰/۲۰۴۶	-۰/۰۹۰۵	-۰/۲۴۵۱	خط ۵-باس ۶
-۰/۰۱۳۳	-۰/۰۰۰۶	-۰/۲۴۶۱	خط ۳-باس ۶

جدول ۶. حساسیت حاشیه انرژی در زمان رفع خطای ۰/۲۵ ثانیه

مکان خطا	خطا خط ۶- باس ۸				شماره باس
	خطا خط ۵- باس ۶	خطا خط ۸- باس ۸	خطا خط ۳- باس ۶	خطا خط ۳- باس ۶	
	$\frac{\partial \Delta V}{\partial P_i}$	$\frac{\partial \Delta V}{\partial P_i}$	$\frac{\partial \Delta V}{\partial P_i}$	$\frac{\partial \Delta V}{\partial P_i}$	
۱	۱/۵۳	۱/۵۷	۱/۶۷۶۹	۲/۰۶۸۵	۱
۲	-۱/۱۶	۰/۸۸۸۹	-۱/۸۰۱۱	-۱/۳۶۲۹	۲
۳	-۱/۷۶۰۱	-۱/۲۹۶۸	-۰/۶۳۶۳۷	۰/۹۵۹۸۷	۳
۴	۰/۸۵۹۷۱	۱/۱۶۰۶	۰/۹۷۸۱۵	۱/۴۴۰۹	۴
۵	۰/۳۷۹۸۷	۰/۷۲۶۰۳	۰/۵۱۴۷۸	۱/۲۲۸۲	۵
۶	-۰/۸۶۳۰۶	-۰/۰۸۷۸۱۵	-۰/۴۵۵۴	۰/۸۹۸۶۱	۶
۷	-۰/۷۷۵۴۵	۰/۶۲۴۳۹	-۰/۷۰۵۳۶	۰/۶۵۱۸۵	۷
۸	-۰/۷۲۷۷۸	۰/۷۸۹۱۷	-۰/۸۸۰۲۳	-۰/۲۰۵۶۱	۸
۹	۰/۳۶۹۱۵	۱/۰۱۳۹	۰/۴۴۶۱۸	۰/۸۲۷۸۹	۹

حال با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خطی با تابع هدف و محدودیت‌های زیر مکان و ظرفیت موردنیاز PV برای پایداری شبکه به‌زای تعداد مختلف PV به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^n P_{PV_i} \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n f_{P_{ij}} P_{PV_i} &\geq -\Delta V_j \\ j &\in \psi \\ 0 &\leq P_{PV_i} \leq 0/3 \end{aligned} \quad (23)$$

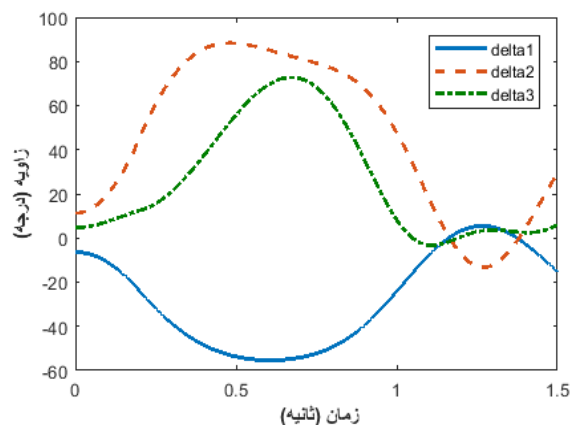
که در آن ψ مجموعه سناریوهای خطاهای ناپایدارکننده است. تاکنون فرض شده است که توان اضافه‌شده به شبکه توسط PV از

نباید نزدیک ژنراتورهای بحرانی قرار داد چراکه در این صورت PV با تولید توان بیشتر باعث افزایش فاصله بین دو دسته بحرانی و غیر بحرانی می‌شود و وضعیت پایداری گذرای شبکه را بدتر می‌کند. ضرایب حساسیت باس‌های ۱ و ۴ و ۵ و ۹ که نزدیک به گروه غیر بحرانی هستند (در اینجا باس اسلک گروه غیر بحرانی است). مثبت است بدین معنی که قرار دادن PV در این باس‌ها باعث بهبود پایداری گذرا می‌شود. اگر یک باس برای قرار دادن PV مدنظر باشد، باس ۱ که دارای بالاترین ضریب حساسیت است بهترین مکان برای قرارگیری PV است. اما در صورتی که از نظر شرایط آب و هوایی و روزهای آفتابی محدودیت وجود داشته باشد به ترتیب اولویت آمده در جدول (۴) مقدار موردنیاز PV در باس مربوطه قرار داده می‌شود.

جدول ۴. مکان و مقدار PV بهینه در خطای خط ۸-باس ۸

شماره باس	P_i (pu)
۱	۰/۰۶۱۸
۴	۰/۱۲۱۲
۵	۰/۵۷۵۴
۹	۰/۳۲۳۹

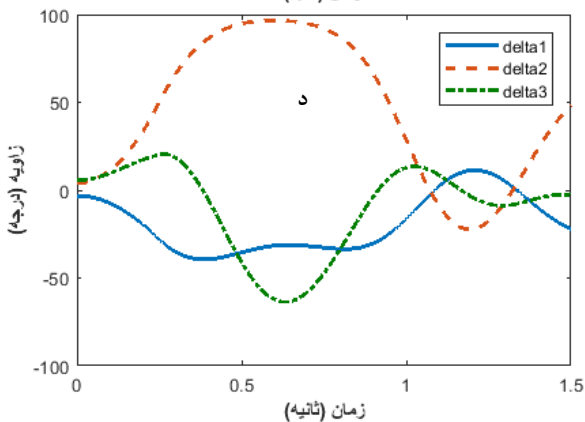
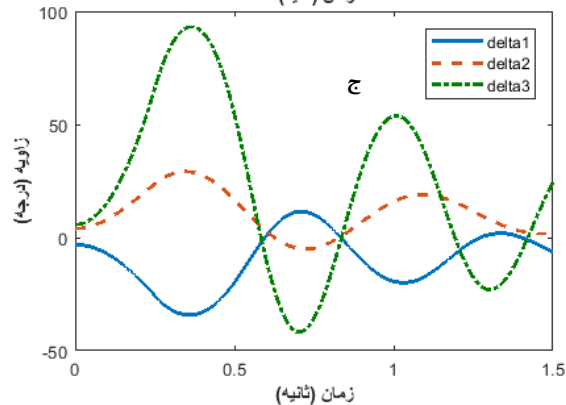
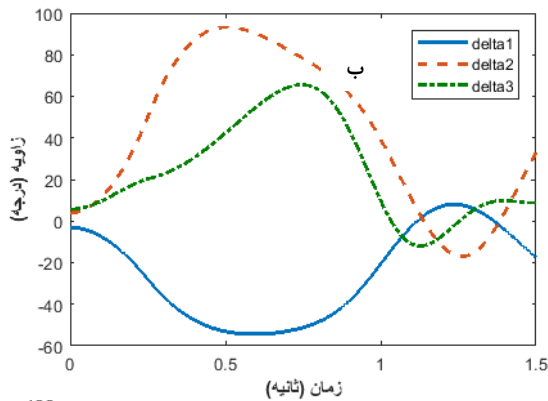
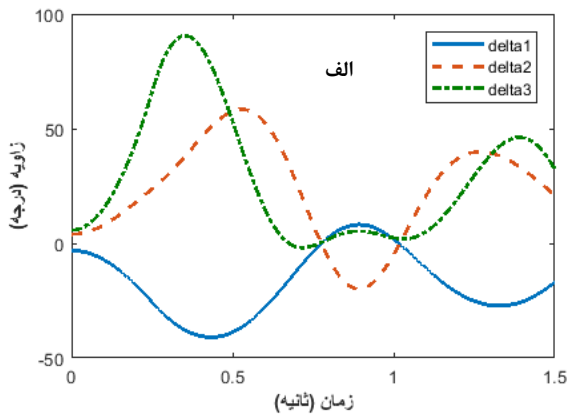
با قرار دادن ۰/۰۶۱۸ در باس ۱ مشاهده می‌شود که مقدار حاشیه انرژی به ۰/۰۰۴۰۸۵ می‌رسد و سیستم پایدار می‌شود. شکل (۷) وضعیت نوسانات زاویه روتور ژنراتورها را در لحظه رفع خطا با وجود PV را نشان می‌دهد.



شکل ۷. پایداری شبکه با وجود PV در خطای خط ۸-باس ۸

۳-۲. بررسی تأثیر PV بر پایداری گذرا در شبکه ۳ ماشین با در نظر گرفتن بیش از یک خطا

با افزایش زمان رفع خطا به ۰/۲۵ ثانیه، خطا که دارای زمان‌های رفع خطای بحرانی کمتر از این مقدار هستند، به‌عنوان خطاهای ناپایدارکننده ظاهر می‌شوند. مشخصات این خطاها در جدول (۵) آمده است. لازم به ذکر است که خط ۸ خط واصل



شکل ۸. شبیه‌سازی زمانی پایداری شبکه در ۴ خطا (الف) پایداری شبکه باوجود PV در خطای خط ۳-باس ۶ (ب) پایداری شبکه باوجود PV در خطای خط ۸-باس ۸ (ج) پایداری شبکه باوجود PV در خطای خط ۵-باس ۶ (د) پایداری شبکه باوجود PV در خطای خط ۶-باس ۸

باس اسلک کم شود و مقادیر ضرایب حساسیت نیز با این فرض به‌دست آمده است. نتیجه بهینه‌سازی انجام شده نشان می‌دهد که در این حالت سیستم تنها باوجود PV در سه باس پایدار می‌شود. ظرفیت PV در این باس‌ها در جدول (۷) آمده است.

جدول ۷. مکان و مقادیر بهینه PV برای ۴ خطا در شبکه

محل بهینه	توان اکتیو (pu)
باس ۱	۰/۳
باس ۴	۰/۳
باس ۵	۰/۱۴۹۴۷

با توجه به این‌که باس‌های ۱ و ۴ در شبکه دو طرف ترانسفورماتور هستند و از نظر موقعیت مکانی نزدیک به هم هستند. بهتر است یکی از آن‌ها را در نظر گرفته و دیگری از باس‌های کاندید حذف شود. اگر باس ۴ حذف شود نتیجه بهینه‌سازی حداقل با سه باس به جواب می‌رسد. در جدول (۸) نتیجه بهینه‌سازی آمده است.

اگر باس ۱ حذف شود با محدودیت $0 \leq P_{PV_i} \leq 0/3$ بهینه‌سازی به جوابی نمی‌رسد و باید این محدودیت تغییر نماید. اگر محدودیت به $0 \leq P_{PV_i} \leq 0/4$ تغییر داده شود، بهینه‌سازی به نتیجه آمده در جدول (۹) می‌انجامد.

جدول ۸. مکان و مقادیر بهینه PV در ۳ باس با حذف باس ۴ برای ۴ خطا در شبکه

محل بهینه	توان اکتیو (pu)
باس ۱	۰/۳
باس ۵	۰/۳
باس ۹	۰/۲۷۵۳

جدول ۹. مکان و مقادیر بهینه PV در ۳ باس با حذف باس ۱ برای ۴ خطا در شبکه

محل بهینه	توان اکتیو (pu)
باس ۴	۰/۴
باس ۵	۰/۴
باس ۹	۰/۲۰۳۸۴

صحت نتایج بهینه‌سازی در تمامی حالات بیان شده توسط شبیه‌سازی زمانی بررسی شده است و در شکل (۸) مشاهده می‌شود که با اعمال مقادیر پیشنهادی PV در باس‌های مربوطه سیستم در هر ۴ خطا پایدار شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با ترکیب روش تابع انرژی گذرا و تکنیک‌های حساسیت به بررسی پایداری گذرا باوجود منابع فتوولتائیک در سیستم قدرت پرداخته شده است. با انجام آنالیز حساسیت، به‌ازای سناریوهای مختلف، حساسیت حاشیه انرژی نسبت به توان منابع فتوولتائیک در شبکه محاسبه گردید. با انجام بهینه‌سازی خطی مقادیر و مکان مناسب جهت قرارگیری منابع فتوولتائیک در شبکه به‌منظور پایداری سیستم محاسبه گردید. با استفاده از آنالیز حساسیت مشخص گردید که ضرایب حساسیت برای برخی از باس‌ها مثبت و برای برخی دیگر منفی است. به‌طور کلی این ضرایب برای باس‌های نزدیک به باس‌های ژنراتورهای بحرانی (ژنراتورهایی که در اثر بروز خطا زاویه روتورشان بالا می‌رود) منفی و برای باس‌های نزدیک به ژنراتورهای غیر بحرانی (ژنراتورهایی که در اثر بروز خطا باعث ناپایداری نمی‌شوند) مثبت است. با بررسی دقیق‌تر استنباط می‌شود که قرار دادن منابع فتوولتائیک در نزدیکی باس‌های ژنراتورهای بحرانی در پایداری گذرا اثر منفی دارد و قرار دادن آن‌ها در باس‌های نزدیک ژنراتورهای غیر بحرانی، باعث بهبود پایداری گذرا می‌شود. همان‌طور که ملاحظه گردید به‌ازای خطاهای مختلف حساسیت حاشیه انرژی تغییر می‌کند؛ زیرا ژنراتورهای بحرانی در خطاهای مختلف، متفاوت هستند. بنابراین نیاز به برنامه‌ریزی جامع‌تر است. با در نظر گرفتن رفتار متفاوت ژنراتورها و نیز تأثیر متفاوت منابع فتوولتائیک در خطاهای مختلف، بهبود پایداری گذرا باوجود چهار خطا در سیستم موردبررسی قرار گرفته است. با استفاده از بهینه‌سازی خطی، این منابع فتوولتائیک به‌صورتی جایابی و محاسبه می‌گردند که شبکه به‌ازای تمام سناریوهای خطا پایدار بماند. در این پژوهش سناریوهای متفاوتی موردبررسی قرار گرفته شده است و سیستم باوجود منابع فتوولتائیک در مکان‌های مناسب و با ظرفیت‌های بهینه‌شده، به‌ازای تمامی سناریوها پایدار باقی مانده است.

۵. مراجع‌ها

- [1] Ranjbar, M. H.; Pirayesh, A. "Providing a Method to Assess and Reduce the Risk of Power System against Terrorist Threats"; J. Adv. Defense Sci. Tech. 2016, 4, 327-337 (In Persian).
- [2] European Photovoltaic Industry Association [Online].
- [3] Hoballah, A. "Power System Dynamic Behavior with Large Scale Solar Energy Integration"; 4th Int. Conf. Electric Power and Energy Conversion Systems 2015, 1-6.
- [4] Bueno, P.; Ruiz-Rodriguez, F.; Hernandez, J. "Stability Assessment for Transmission Systems with Large Utility-Scale Photovoltaic Units"; IET Renewable Power Generation 2016, 10, 584-597.
- [5] Eftekharijad, S.; Vittal, V.; Heydt, G. T.; Keel, B.; Loehr, J. "Small Signal Stability Assessment of Power Systems with Increased Penetration of Photovoltaic generation: A case Study"; IEEE Trans. Sustainable Energy 2013, 4, 4.
- [6] Yagami, M.; Ishikawa, S.; Ichinohe, Y.; Misawa, K.; Tamura, J. "Transient Stability Analysis of Power System With Photovoltaic Systems Installed"; Proc. third Renewable Power Generation Conference 2014, 1-6.
- [7] Eftekharijad, S.; Vittal, V.; Heydt, G. T.; Keel, B.; Loehr, J. "Impact of Increased Penetration of Photovoltaic Generation on Power Systems"; IEEE Trans. Power System 2013, 28, 2.
- [8] Eftekharijad, S.; Heydt, G. T.; Vittal, V. "Optimal Generation Dispatch with high Penetration of Photovoltaic Generation"; IEEE Trans. Sustainable Energy 2015, 6, 3.
- [9] Mahmoud, Y. A.; Xiao, W.; Zeineldin, H. H. "A Parameterization Approach for Enhancing PV Model Accuracy"; IEEE Trans. Industrial Electronics 2013, 60, 5708-5716.
- [10] Chiang, H. D. "Direct Methods for Stability Analysis of Electric Power Systems: Theoretical Foundation, BCU Methodologies, and Applications"; Wiley, 2010.
- [11] Kheradmandi, M. "Dynamic Security Assessment in Restructured Power Systems"; Ph.D Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, 2010.