

آنالیز پایداری گذرا شبکه قدرت در حضور ژنراتورهای آسنکرون به روش تابع انرژی و سطح مرزی پتانسیل PEBS

حمیدرضا تیموری / موسسه آموزش عالی خراسان / مشهد-ایران / ha.r.teymouri@khorasan.ac.ir

مصطفی عیدیانی / دانشیار موسسه آموزش عالی خراسان / مشهد-ایران / eidiani@khorasan.ac.ir

چکیده

امروزه در صنعت برق یکی از مسایل حائز اهمیت بهره‌برداران شبکه، کاهش خاموشی و پایدار ماندن سیستم در اثر اغتشاشات می‌باشد. رفتار سیستم قدرت در زمان بروز خطا، وابسته به ماهیت عناصر موجود در شبکه است. یکی از عواملی که به حفظ پایداری در زمان خطا کمک می‌کند، اینرسی موجود در ژنراتورهای سنکرون می‌باشد. این اینرسی، مانع شتاب گرفتن و از دست دادن سنکرونیسم خواهد شد. با توجه به اینکه امروزه علاوه بر نیروگاه‌های فسیلی، حضور مزارع بادی رو به افزایش می‌باشد و ژنراتورهای آسنکرون در مقایسه با ژنراتورهای سنکرون اینرسی پایینی دارند، از این رو پایداری گذرا در شبکه کاهش می‌یابد. این مقاله اثر کاهش اینرسی سیستم را بر پایداری گذرا در نتیجه حضور ژنراتورهای آسنکرون در شبکه قدرت، با استفاده از تابع انرژی بررسی می‌کند. جهت شبیه‌سازی، ژنراتور آسنکرون به صورت ژنراتور سنکرون با اینرسی پایین مدل می‌شود. ارزیابی بر روی یک شبکه نمونه جهت محاسبه انرژی بحرانی و زمان بحرانی رفع خطا با روش نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار، نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده و سطح مرزی انرژی پتانسیل PEBS انجام می‌گردد. کاهش راکتانس خطوط با استفاده از ادوات FACTS جهت جبران کمبود اینرسی سیستم در اثر حضور ژنراتور آسنکرون، پیشنهاد می‌شود و میزان جبران‌سازی در خطوط انتقال محاسبه خواهد شد.

کلمات کلیدی: پایداری گذرا، اینرسی، ژنراتور آسنکرون، تابع انرژی، زمان بحرانی رفع خطا

Transient stability analysis of power system in the presence of asynchronous generators using potential energy boundary surface PEBS

Hamidreza Teymouri / Student, Department of Electrical Engineering, Khorasan Institute of higher education / Mashhad, Iran
ha.r.teymouri@khorasan.ac.ir

Mostafa Eidiani / Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Khorasan institute of higher education / Mashhad, Iran
eidiani@khorasan.ac.ir

Abstract

Nowadays, in the power industry, the reduction of power outage and stability of the system due to disturbances is one of the important issues for network operators. Operation of power system depends on the nature of all elements in network. One of the factors that help maintain synchronism during fault is inertia of synchronous generators. This

inertia will prevent the acceleration and loss of synchronization. Nowadays penetration of wind farms is increasing and asynchronous generators have lower inertia compared with synchronous generators, so the transient stability decreases in the network. This paper reviews the effect of system inertia reduction on transient stability in the presence of asynchronous generators in the power grid using the energy function. As a simulation, the asynchronous generator is modeled as an equivalent conventional synchronous generator with negligible inertia. The evaluation is done on a sample network for calculating critical energy and critical clearing time (CCT) using three methods which are called the closest unstable equilibrium point (UEP), controlling unstable equilibrium point, and the potential energy boundary surface (PEBS). Reduction of line reactance is proposed by using FACTS devices to compensate the inertia reduction of the system in the presence of an asynchronous generator and the compensation amount in the transmission lines will be calculated.

Keywords: Transient Stability, Inertia, Asynchronous Generator, Energy Function, Critical Clearing Time

۱- مقدمه

هر سیستم دینامیکی که طراحی و یا ساخته می‌شود باید در شرایط پایدار کار کند. در این شرایط، سیستم باید به صورت رضایت‌بخشی بکار خود ادامه دهد و با حاشیه ایمنی مناسب بتواند در تمام زمان‌ها حتی در زمان وقوع خطا پایدار بماند. هنگامی که یک سیستم دینامیک مانند یک سیستم قدرت به هم پیوسته با خطوط انتقال طولانی، بزرگ و پیچیده باشد بررسی پایداری با استفاده از یک روش تحلیلی و عملی بسیار موثر خواهد بود. سیستم قدرت یک سیستم دینامیکی است و پایداری یک سیستم دینامیک را می‌توان به صورت زیر مشخص کرد. فرض کنید سیستم در یکی از حالت‌های تعادل خود قرار داشته باشد اگر پس از یک اغتشاش، سیستم بالاخره به موقعیت تعادل خود یا به موقعیت تعادل دیگری همگرا شود سیستم را پایدار می‌نامند و اگر متغیرهای سیستم با افزایش زمان از نقطه تعادل دور شوند سیستم را ناپایدار گویند [۱].

امروزه با توجه به افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل عدم آلودگی محیط زیست در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، رشد چشمگیری داشته است. یکی از این انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد می‌باشد. ژنراتورهای مورد استفاده در این توربین‌ها از نوع آسنکرون یا القایی می‌باشند [۲]. هرچه ضریب نفوذ نیروگاه‌های بادی افزایش یابد و در کنار آن ظرفیت تولیدی این نیروگاه‌ها افزایش یابد، موضوع پایداری از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد [۳]. بررسی اثر افزایش نفوذ ژنراتور آسنکرون بر پایداری گذرا یکی از مسایل مورد توجه در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت می‌باشد [۴، ۵]. دو روش مختلف برای بررسی پایداری گذرا مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک روش شبیه‌سازی و یا حل مستقیم معادلات دیفرانسیل غیرخطی سیستم قدرت است و روش دوم، روش تحلیلی است که بر اساس انرژی کل سیستم بنا شده است. از جمله روش‌های تحلیلی، روش دوم لیاپانوف می‌باشد که قابلیت بیشتری نسبت به روش اول دارد [۱].

به منظور بررسی پایداری گذرای سیستم‌های قدرت تا قبل از قانون دوم لیاپانوف تنها از روش شبیه‌سازی زمانی معادلات حالت سیستم استفاده می‌شود؛ اما روش‌های تابع انرژی طرح شده تا قبل از سال ۱۹۷۸ نتایج محافظه کارانه زیادی ارائه می‌نمودند بدین معنی که مقداری که برای زمان قطع بحرانی خطا به کمک این روش‌ها بدست می‌آمد، خیلی از مقدار واقعی آن کوچک‌تر بود. علت این امر آن بود که انرژی بحرانی سیستم مستقل از محل خطا و به ازای نقطه تعادل ناپایداری که دارای کمترین سطح انرژی بود، محاسبه می‌شد [۶]. در سال ۱۹۷۶ در مرجع [۷] نشان داده شد که انرژی بحرانی سیستم

وابسته به خطای اعمال شده در سیستم است و به ازای هر محل خطا بایستی به طور مستقل محاسبه شود و مفهوم نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار که زمانی دیگر نقطه تعادل ناپایدار کنترل کننده نامیده شد، مطرح گردید. سپس در سال ۱۹۷۸ توسط کاکیموتو [۸] و در سال ۱۹۷۹ توسط اتسای [۹] روش مرز سطح انرژی پتانسیل ارائه گردید. همچنین در اواخر دهه هشتاد میلادی طی مقالاتی توسط چیانگ در [۱۰-۱۲] بنیان تئوری روش PEBS و روش مستقیم ارزیابی پایداری گذرای سیستم قدرت مطرح شد [۶]. تحقیقات انجام شده بیشتر با ژنراتورهای سنکرون بوده و از ژنراتور آسنکرون استفاده نشده است. در این مقاله در یک شبکه نمونه با ژنراتور سنکرون، محاسبه زمان قطع بحرانی با روش شبیه‌سازی و روش‌های انرژی انجام و نتایج مقایسه می‌گردند، سپس نتیجه حضور ژنراتور آسنکرون و کاهش اینرسی شبکه بررسی و با جبران‌سازی در خطوط انتقال و کاهش راکتانس خط به کمک ادوات فکتس، کاهش اینرسی شبکه جبران می‌گردد.

۲- روش‌های ارزیابی پایداری گذرا

در مطالعه پایداری گذرا روش‌های مختلفی توسعه یافته است. در تمام این روش‌ها، هدف اصلی تعیین زمان قطع بحرانی خطا می‌باشد.

تعدادی از این روش‌ها عبارت‌اند از [۱]:

- ۱- روش شبیه‌سازی یا حل مستقیم معادلات دیفرانسیل غیرخطی
- ۲- روش شناسایی الگو
- ۳- روش مستقیم
 - الف- روش صفحه - فاز
 - ب- روش سطوح مساوی
 - ج- روش نقطه به نقطه
 - د- معیار انتگرال - انرژی
- ۴- روش PEBS (سطح مرزی انرژی پتانسیل)

در این مقاله آنالیز پایداری گذرا در سیستم‌های چند ماشینه بررسی می‌شود.

۳- آنالیز پایداری گذرای سیستم چند ماشینه

۳-۱- معادلات نوسان

نخستین قدم در آنالیز پایداری گذرا در سیستم‌های چند ماشینه اجرای پخش بار و تعیین مقادیر دامنه و زاویه ولتاژ باس‌ها می‌باشد. جریان ماشین‌ها قبل از اغتشاش به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۳]:

$$\omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i \quad (8)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (9)$$

متغیرهای حالت سیستم در چهارچوب مرجع مرکز اینرسی به صورت $\theta_i = \delta_i - \delta_0$, $\omega_i = \omega_i - \omega_0$ تعریف می‌شوند:
بنابراین معادلات نوسان رابطه (۶) به صورت زیر خواهند بود:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \Delta \omega_i$$

$$\frac{d\Delta \omega_i}{dt} = \frac{P_{mi} - P_{ei}}{M_i} - \frac{P_{COL}}{M_T}, \text{ for } i=1, \dots, n-1 \quad (10)$$

$$P_{COL} = \sum_{i=1}^n P_i - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (11)$$

تابع انرژی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی است. انرژی پتانسیل خود به دو قسمت تقسیم می‌شود $V_p(\theta)$ که مستقل از مسیر انتگرال گیری می‌باشد و $V_d(\theta)$ که وابسته به مسیر است [۲].

$$V(\theta, \omega) = V_{ke}(\omega) + V_{pe}(\theta) =$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^s) -$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s)] -$$

$$\int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \quad (12)$$

در رابطه فوق θ^s بردار نقاط تعادل سیستم بعد از خطا می‌باشد.

$$V_d(\theta) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \quad (13)$$

رابطه (۱۳) را می‌توان با تقریب زیر محاسبه کرد [۱]:

$$V_d(\theta) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \frac{\theta_i + \theta_j - \theta_i^s - \theta_j^s}{\theta_i - \theta_j - \theta_i^s + \theta_j^s} \times$$

$$[\sin(\theta_{ij}) - \sin(\theta_{ij}^s)] \quad (14)$$

۳-۳- تحلیل پایداری گذرا با روش‌های انرژی

۳-۳-۱- نقاط تعادل سیستم

در سیستم غیرخطی $\dot{x} = f(x)$ اگر مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین بدون قسمت حقیقی صفر باشند، سیستم دارای یک نقطه تعادل است در این صورت اگر قسمت حقیقی مقادیر ویژه به‌طور اکید منفی باشد، نقطه تعادل پایدار مجانبی در غیر این صورت یک نقطه تعادل ناپایدار است. اگر یک مقدار ویژه با قسمت حقیقی مثبت داشته باشد، نقطه تعادل ناپایدار نوع یک و اگر K مقدار ویژه با قسمت حقیقی مثبت داشته باشد، نقطه تعادل ناپایدار نوع K نامیده می‌شود [۲].

۳-۳-۲- محاسبه زمان قطع بحرانی به روش نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار CLUEP²

الگوریتم محاسبه زمان قطع بحرانی خطا [۱]:

۱- تمام نقاط تعادل ناپایدار نوع یک محاسبه می‌شوند.

۲- نقاط تعادل به ترتیب تابع انرژی مرتب می‌شوند.

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

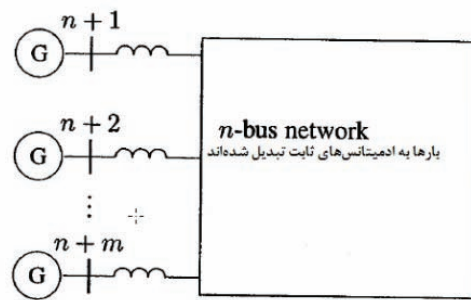
m تعداد ژنراتورهاست. V_i ولتاژ ترمینال ژنراتور i ام و P_i و Q_i توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتور می‌باشند. ولتاژهای پشت راکتانس‌های گذرا به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۳]:

$$E_i' = V_i + jX_d' I_i \quad (2)$$

سپس تمام بارها با استفاده از رابطه (۳) به ادمیتانس‌های معادل تبدیل می‌شوند.

$$y_{i0} = \frac{S_i^*}{|V_i|^2} = \frac{P_i - jQ_i}{|V_i|^2} \quad (3)$$

در این حالت می‌توان شبکه را با شبکه شکل (۱) معادل کرد. نودهای $m+n, \dots, 2+n, 1+n$ باس‌های ماشین یا به عبارت دیگر باس‌های پشت راکتانس‌های گذرا هستند [۱۳].



شکل ۱: نمایش سیستم قدرت جهت آنالیز پایداری گذرا [۱۳]

حال توان الکتریکی خروجی هر ماشین برحسب ولتاژهای داخلی ماشین با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$P_{ei} = \sum_{k=1}^n [B_{ik} E_i' E_k' \sin(\delta_i - \delta_k) + G_{ik} E_i' E_k' \cos(\delta_i - \delta_k)] \quad (4)$$

$$P_{ei} = G_{ii} E_i'^2 + \sum_{k=1}^n [B_{ik} E_i' E_k' \sin(\delta_i - \delta_k) + G_{ik} E_i' E_k' \cos(\delta_i - \delta_k)] \quad (5)$$

که $C_{ik} = B_{ik} E_i' E_k'$, $D_{ik} = G_{ik} E_i' E_k'$ بنا بر این معادلات نوسان در سیستم چند ماشین با رابطه (۶) بدست می‌آیند [۲]:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \Delta \omega_i \text{ (rad/s)}$$

$$\frac{d\Delta \omega_i}{dt} = \frac{P_{mi} - P_{ei}}{M_i} \text{ (rad/s}^2\text{)}, \text{ for } i=1, \dots, n \quad (6)$$

M ممان اینرسی هر ژنراتور می‌باشد.

۳-۲- تابع انرژی

به‌طور معمول در روش تابع انرژی بیشتر از معادلات حالتی استفاده می‌کنند که در چهارچوب مرجع اینرسی COI بیان شده‌اند، زیرا توابع انرژی بدست آمده از این نوع معادلات نسبت به معادلات حالتی که در چهارچوب مرجع سنکرون بیان شده‌اند دارای تقارن بیشتری بوده و به کارگیری جملات وابسته به مسیر آن‌ها ساده‌تر است از این‌رو مرکز اینرسی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم [۲]:

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (7)$$

۳- نقاط تعادلی که در مرز منطقه پایداری هستند، شناسایی می‌شوند. ۴- از میان نقاط تعادلی که روی مرز قرار دادند آن که کمترین مقدار تابع انرژی را دارد نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار است و انرژی پتانسیل در آن انرژی بحرانی V_{cr} می‌باشد.

۵- الف- اگر $V[X(t_{cr})] < V_{cr}$ باشد سیستم پایدار است.

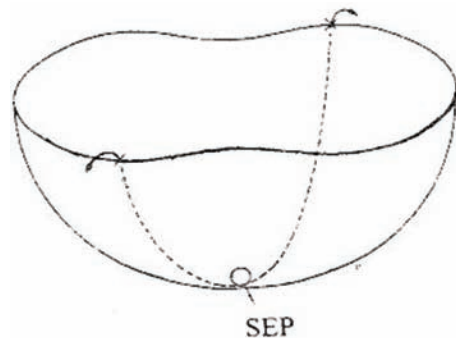
ب- $t = t_{cr}$ چنان محاسبه می‌شود که $V[X(t)] = V_{cr}$ و در نتیجه $t = t_{cr}$

۳-۳-۳- محاسبه زمان قطع بحرانی به روش نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده^۳ CUEP

اگر مسیر سیستم خطادار را انتگرال‌گیری کنیم بالاخره این مسیر از مرز پایداری سیستم بعد از خطا خواهد گذشت. در هنگام عبور از مرز، این مسیر از نزدیکی نقطه تعادل ناپایداری عبور می‌کند. به این نقطه، نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده می‌گوییم. انرژی پتانسیل در این نقطه به‌عنوان انرژی بحرانی در نظر گرفته می‌شود و به‌طور معمول از انرژی بحرانی نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار، بیشتر است. این بدان معنی است که ناحیه پایداری سیستم بزرگ‌تر شده و جواب زمان قطع بحرانی خطا t_{cr} دارای تقریب بهتری می‌باشد [۱].

۳-۴- تحلیل پایداری گذرا به روش سطح مرزی انرژی پتانسیل PEBS

پایداری گذرا یک سیستم را می‌توان به‌طور ساده با استفاده از یک گوی غلتان بر سطح انرژی پتانسیل توصیف کرد و سطح می‌تواند یک کاسه چندوجهی باشد (شکل ۲). محدوده داخل کاسه، نشان‌دهنده ناحیه پایداری و محدوده خارج کاسه، ناحیه ناپایداری را نشان می‌دهد. در ابتدا گوی در کف کاسه قرار دارد که کف کاسه را نقطه تعادل پایدار در نظر می‌گیریم و انرژی پتانسیل در این نقطه، کمینه یا صفر است. با بروز اغتشاش، انرژی جنبشی وارد شده به گوی سبب می‌شود که گوی به سمت لبه کاسه حرکت کند و در حین بالا رفتن به سمت لبه کاسه و خروج از کاسه، انرژی پتانسیل جذب می‌کند. هنگامی که مقداری انرژی جنبشی به گوی وارد شود، گوی در جهت خاصی حرکت می‌کند و بر روی سطح داخلی کاسه بر روی مسیری که با جهت حرکت اولیه تعیین می‌شود به‌طرف بالا غلت خواهد زد. نقطه‌ای که گوی از حرکت بازخواهد ایستاد با مقدار انرژی پتانسیل وارد شده به سیستم تعیین می‌شود. اگر گوی قبل از آن که به لبه کاسه برسد تمامی انرژی جنبشی خود را به انرژی پتانسیل تبدیل کند، به‌طرف پایین غلت می‌خورد و در پایان بعد از مقداری رفت و برگشت در نقطه تعادل پایدار، مستقر خواهد شد. اگر انرژی جنبشی وارد شده به سیستم به‌اندازه کافی بزرگ باشد، گوی به لبه کاسه رسیده و از آن بیرون می‌افتد. در این صورت گوی به محدوده ناپایداری وارد شده و به نقطه تعادل پایدار بازخواهد گشت. سطح داخل کاسه، سطح انرژی پتانسیل می‌باشد و لبه کاسه را می‌توان به‌عنوان PEBS در نظر گرفت [۲، ۱۴].



شکل ۲: کاسه چندوجهی و گوی غلتان [۱۴]

۳-۴-۱- روش اتای جهت محاسبه زمان قطع بحرانی خطا

در این روش معیار PEBS به شکل زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$\sum_{i=1}^n f_i(\theta_i) \cdot (\theta_i - \theta_i^0) \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) θ^0 مشخص‌کننده نقاط تعادل پایدار سیستم بعد از خطا می‌باشد؛ بنابراین نقطه عبور از PEBS زمانی است که رابطه (۱۵) مساوی صفر شود. مقدار رابطه (۱۵) در داخل PEBS منفی و در خارج آن، مثبت می‌باشد. حال با استفاده از این معیار می‌توان مرز پایداری سیستم اصلی را به‌صورت زیر مشخص کرد:

- گام اول: مسیر سیستم خطادار محاسبه می‌شود.
 - گام دوم: مقدار معیار PEBS در هر گام از انتگرال‌گیری محاسبه می‌شود.
 - گام سوم: گام‌های ۱ و ۲ آن‌قدر تکرار می‌شوند تا معیار PEBS مساوی صفر شود و یا علامت آن تغییر کند. این زمان، زمان عبور از PEBS بوده و انرژی در این نقطه به‌عنوان V_{cr} در نظر گرفته می‌شود.
 - گام چهارم: با شروع از حالت اولیه سیستم قبل از خطا، دوباره از سیستم خطادار انتگرال‌گیری می‌شود تا انرژی کل سیستم به مقدار V_{cr} برسد. این زمان t_{cr} خواهد بود.
- در این مقاله جهت محاسبه زمان قطع بحرانی به روش PEBS از روش پیشنهادی اتای استفاده شده است.

۴- شبیه‌سازی

۴-۱- حضور ماشین سنکرون در شبکه قدرت

در این قسمت از یک مثال ساده سه ژنراتور که ژنراتور سوم به‌عنوان مرجع انتخاب شده است استفاده می‌شود [۱۵]. اگر این سیستم دارای پارامترهای زیر باشد:

$$M_1 = M_2 = 2, P_{m1} = 0.02, P_{m2} = 0.1 \quad (16)$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = 1, B_{12} = B_{23} = 1, B_{13} = 2$$

معادلات دینامیکی سیستم با استفاده از رابطه (۶) به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = -\sin \delta_1 - 0.5 \sin(\delta_1 - \delta_2) + 0.01 = f_1(\delta_1, \delta_2) \\ \dot{\omega}_2 = -0.5 \sin \delta_2 - 0.5 \sin(\delta_2 - \delta_1) + 0.05 = f_2(\delta_1, \delta_2) \end{cases} \quad (17)$$

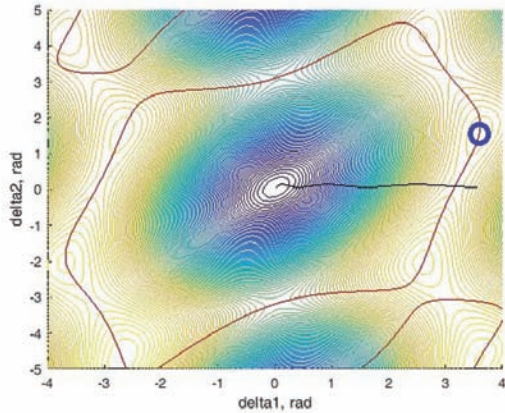
نقاط تعادل پایدار و ناپایدار سیستم را مشخص کرده، سپس با استفاده از نقطه تعادل پایدار و روابط بخش ۳-۲ تابع انرژی سیستم با رابطه (۱۸) مشخص می‌گردد. انرژی پتانسیل هرکدام از نقاط تعادل محاسبه شده و در جدول شماره (۱) نشان داده شده است.

$$V(\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2) = \omega_1^2 + \omega_2^2 - 2 \cos \delta_1 - \cos \delta_2 - \cos(\delta_1 - \delta_2) - 0.02 \delta_1 - 0.1 \delta_2 \quad (18)$$

با استفاده از مقادیر جدول (۱) معیار PEBS به‌صورت زیر مشخص می‌شود:

$$PEBS = f_1(\delta_1, \delta_2) \times (\delta_1 - 0.02801) + f_2(\delta_1, \delta_2) \times (\delta_2 - 0.06403) \quad (19)$$

مسیرهای انرژی و محل نقاط تعادل سیستم روی مرز پایداری در فضای دوبعدی و سه‌بعدی در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند. با استفاده از روش‌های بیان شده در بخش ۳ زمان قطع بحرانی خطا را با بروز خطا در سیستم، محاسبه می‌شود. همان‌طور که بیان



شکل ۵: مسیر سیستم خطادار

۴-۲- حضور ماشین آسنکرون در شبکه قدرت

با حضور ماشین آسنکرون در شبکه قدرت، اینرسی سیستم کاهش می‌یابد و به دنبال آن با بروز خطا در سیستم پایداری گذرا نیز کاهش می‌یابد. در این مقاله برای شبیه‌سازی ماشین آسنکرون، ماشین سنکرون با اینرسی کم به کار برده می‌شود. با فرض کاهش اینرسی ماشین شماره یک ($M_1 = 1$) معادلات دینامیکی سیستم به صورت زیر تغییر خواهند کرد:

نتایج شبیه‌سازی و محاسبه زمان قطع بحرانی با معادلات جدید سیستم در جدول (۳) نشان داده شده است.

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = -2 \sin \delta_1 - \sin(\delta_1 - \delta_2) + 0.02 \\ \dot{\omega}_2 = -0.5 \sin \delta_2 - 0.5 \sin(\delta_2 - \delta_1) + 0.05 \end{cases} \quad (20)$$

جدول ۳: زمان قطع بحرانی خطا با حضور ماشین آسنکرون

روش	زمان (ثانیه)	انرژی
نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار	0.30	-0.3133
نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده	0.36	1.9198
PEBS	0.39	1.9311

۴-۳- بهبود پایداری گذرا با حضور ماشین آسنکرون در شبکه

در این مقاله روش پیشنهادی جهت جبران کاهش اینرسی شبکه، کاهش راکتانس خطوط با استفاده از ادوات FACTS⁴ می‌باشد. با این روش مزاد اینرسی مورد نیاز جهت حفظ پایداری سیستم در اثر کاهش اینرسی در نتیجه حضور ژنراتورهای آسنکرون، تأمین شده و سیستم پایدار خواهد شد [۲].

با حضور ژنراتور آسنکرون در شبکه می‌بایست خطوطی را که می‌توانند در جبران‌سازی شرکت نمایند، تشخیص داد. از این رو الگوریتم زیر جهت تشخیص خطوط مذکور پیشنهاد می‌گردد [۲]:

۱- حضور ژنراتور آسنکرون در یک باس و محاسبه میزان جبران‌سازی سری خط از فرمول زیر:

$$X_c = X_{AB}(1 - 0.8) \quad (21)$$

$$X_{AB}^{new} = X_{AB} - X_c$$

در رابطه (۲۱)، X_{AB} راکتانس خط انتقال بین باس A و باس B می‌باشد.

۲- زمان قطع بحرانی را محاسبه و با زمان قطع بحرانی قبل از کاهش

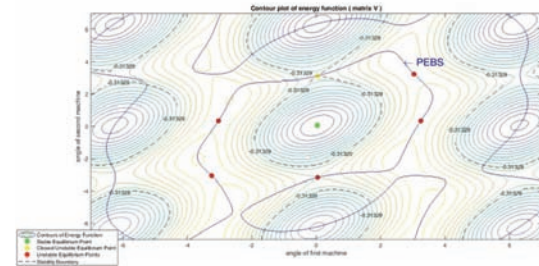
شد نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار، نقطه تعادل ناپایداری است که کمترین انرژی را دارد، بنابراین نقطه تعادل ناپایدار با انرژی ۰.۳۱۳۳ - نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار می‌باشد. با بروز خطا در سیستم مسیر سیستم خطادار به سمت مرز پایداری حرکت می‌کند. با توجه به شکل (۵) مسیر سیستم خطادار در هنگام عبور از مرز پایداری از نزدیک نقطه تعادل ناپایدار با انرژی ۱.۹۱۹۸ عبور می‌کند بنابراین این نقطه را نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده می‌نامیم. با استفاده از روش اتای معیار PEBS را محاسبه می‌کنیم. انرژی سیستم را در لحظه عبور از مرز پایداری به‌عنوان انرژی بحرانی در نظر گرفته و زمانی که انرژی کل سیستم به مقدار بحرانی می‌رسد، زمان قطع بحرانی خطا خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۲) نشان داده شده‌اند.

جدول ۱: نقاط تعادل پایدار و ناپایدار و انرژی پتانسیل هر کدام

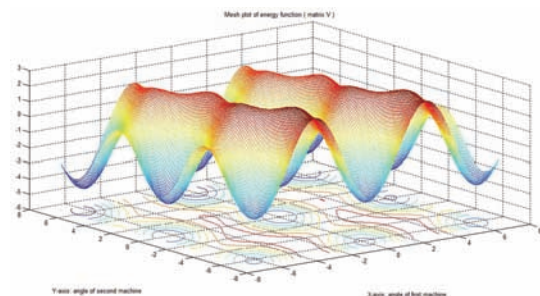
δ_1	δ_2	$V(\delta_1, \delta_2)$	نوع نقاط تعادل
۰.۰۲۸۰۱	۰.۰۶۴۰۳	-۴.۰۰۳۵	پایدار
۰.۰۴۶۶۷	۳.۱۱۴۹	-۰.۳۱۳۳	ناپایدار
۰.۰۴۶۶۷	-۳.۱۶۸۳	۰.۳۱۵	ناپایدار
۳.۰۴۰۷	۳.۲۲۳۲	۱.۶۲	ناپایدار
۳.۲۴۵۸	-۰.۳۳۴۱	۱.۹۱۹۸	ناپایدار
-۳.۰۳۷۴	-۰.۳۳۴۱	۲.۰۴۵۵	ناپایدار
-۳.۲۴۳	-۳.۰۶	۲.۳۷۴	ناپایدار

جدول ۲: زمان قطع بحرانی خطا با روش‌های انرژی

روش	زمان (ثانیه)	انرژی
نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار	۰.۵۷	-۰.۳۱۳۳
نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده	۰.۷۰	۱.۹۱۹۸
PEBS	۰.۷۱	۱.۹۳۹۲



شکل ۳: مسیرهای انرژی و محل نقاط تعادل سیستم در فضای دوبعدی



شکل ۴: مسیرهای انرژی و PEBS در فضای سه‌بعدی

مراجع

- [1] M. Eidiani and M. H. M. Shanechi, «CTS COMPLEX TRANSIENT STABILITY THE NEW METHOD FOR DIRECT ANALYSIS OF TRANSIENT STABILITY», in 12th International Power System Conference, PSC, 1997, pp. 4-6.
- [2] P. Kethavath, «Transient Stability Analysis for Power System Networks with Asynchronous Generation», The University of Auckland pp. 1-124, 2015.
- [3] D. Naimi, T. J. L. E. J. o. P. Bouktir, and Technologies, «Impact of wind power on the angular stability of a power system», Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies vol. 7, no. 12, pp. 83-94, 2008.
- [4] A. Dadhania, B. Venkatesh, A. Nassif, V. J. I. J. o. E. P. Sood, and E. Systems, «Modeling of doubly fed induction generators for distribution system power flow analysis», ELSEVIER vol. 53, pp. 576-583, 2013.
- [5] اسماعیل صیادی، مجیدولی زاده، «طراحی پایدارساز سیستم قدرت برای توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوستغذیه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات»، دومین کنفرانس ملی رویکردهای نوین در مهندسی کامپیوتر و برق، ۱۳۹۵.
- [6] اعلی کرمی «روش ترکیبی شبیه‌سازی زمانی و BCU جهت تعیین پایداری گذرای سیستم‌های قدرت»، د. ف. د. گیلان، ایران، ۱۳۸۵.
- [7] C. Gupta, A. J. I. T. o. P. A. El-Abiad, and Systems, «Determination of the closest unstable equilibrium state for Liapunov methods in transient stability studies», IEEE vol. 95, no. 5, pp. 1699-1712, 1976.
- [8] N. J. T. I. o. J. Kakimoto, «Transient Stability Analysis of Electric Power System via Lure-Type Lyapunov Function Part I», IEEE vol. 98, pp. 62-71, 1978.
- [9] T. Athay, R. Podmore, S. J. I. T. o. P. A. Virmani, and Systems, «A practical method for the direct analysis of transient stability», IEEE no. 2, pp. 573-584, 1979.
- [10] H.-D. Chiang, «A theory-based controlling UEP method for direct analysis of power system transient stability», in Circuits and Systems, 1989., IEEE International Symposium on, 1989, pp. 1980-1983.
- [11] H.-D. Chiang, F. Wu, P. J. I. T. o. C. Varaiya, and systems, «Foundations of direct methods for power system transient stability analysis», IEEE vol. 34, no. 2, pp. 160-173, 1987.
- [12] H.-D. Chiang, F. F. Wu, P. P. J. I. T. o. c. Varaiya, and systems, «Foundations of the potential energy boundary surface method for power system transient stability analysis», IEEE vol. 35, no. 6, pp. 712-728, 1988.
- [13] H. Saadat, Power System Analysis McGraw-Hill Series in Electrical Computer Engineering. 1999.
- [14] فصل هفتم پایداری و کنترل سیستم‌های قدرت. Available: <http://kavir3.persiangu.com/EP2A2-Chapter7-4-PowerSystemStability&Control.pdf/download?0f3a>
- [15] H.-D. Chiang, J. S. J. I. T. o. C. Thorp, and Systems, «The closest unstable equilibrium point method for power system dynamic security assessment», IEEE vol. 36, no. 9, pp. 1187-1200, 1989.

اینرسی و حضور ژنراتور آسنکرون در شبکه (جدول ۲) مقایسه می‌کنیم.

۳- اگر زمان بدست‌آمده بیشتر بود بنابراین خط AB می‌تواند در جبران‌سازی مشارکت نماید، در غیر این صورت خط مذکور در جبران‌سازی مشارکت نخواهد داشت.

نتایج شبیه‌سازی با روش‌های انرژی در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به بررسی جدول (۴) نتیجه می‌گیریم که خط ۳-۱ نمی‌تواند در جبران‌سازی مشارکت نماید. در حالت نخست (خط ۳-۲) مشاهده می‌شود که روش‌های CUEP و PEBS نتایج قابل قبول دارند. در حالت دوم (خط ۲-۱) مشاهده می‌شود که روش‌های CLUEP و PEBS نتایج قابل قبول دارند ولی در حالت سوم روش CUEP خطای زیادی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی پایداری گذرا با روش‌های انرژی (CUEP و CLUEP و PEBS) انجام شد. قبل از حضور ژنراتور آسنکرون در شبکه، زمان قطع بحرانی با هر سه روش محاسبه شد و روش PEBS دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها داشت. با حضور ژنراتور آسنکرون در شبکه به دلیل پایین بودن اینرسی ژنراتور، پایداری گذرا کاهش یافته و در نتیجه زمان قطع بحرانی خطا کاهش یافت. به منظور جبران میزان کاهش اینرسی در شبکه جبران‌سازی خطوط انتقال با استفاده از ادوات FACTS پیشنهاد گردید. در بررسی پایداری گذرا و محاسبه زمان قطع بحرانی، روش‌های انرژی در مقایسه با روش شبیه‌سازی و حل مستقیم معادلات دیفرانسیل، سرعت بیشتری داشته و نتایج قابل قبولی را ارائه می‌نمایند و در میان روش‌های انرژی، بهترین معیار بررسی بهبود پایداری گذرا با توجه به دقت بیشتر، روش PEBS خواهد بود.

جدول ۴: محاسبه زمان قطع بحرانی به روش‌های انرژی بعد از جبران‌سازی

خط انتقال	روش	زمان قطع بحرانی قبل از حضور ژنراتور آسنکرون	زمان قطع بحرانی با حضور ژنراتور آسنکرون و جبران‌سازی
۲-۳	CLUEP	۰.۵۷	۰.۵۵
	CUEP	۰.۷۰	۰.۸۱
	PEBS	۰.۷۱	۰.۸۳
۱-۲	CLUEP	۰.۵۷	۰.۵۹
	CUEP	۰.۷۰	۰.۶۹
	PEBS	۰.۷۱	۰.۸۲
۱-۳	CLUEP	۰.۵۷	۰.۵۴
	CUEP	۰.۷۰	۰.۸۲
	PEBS	۰.۷۱	۰.۷۰

پی‌نوشت‌ها

- 1 Potential Energy Boundary Surface
- 2 Closest Unstable Equilibrium Point
- 3 Controlling Unstable Equilibrium Point
- 4 Flexible AC Transmission System