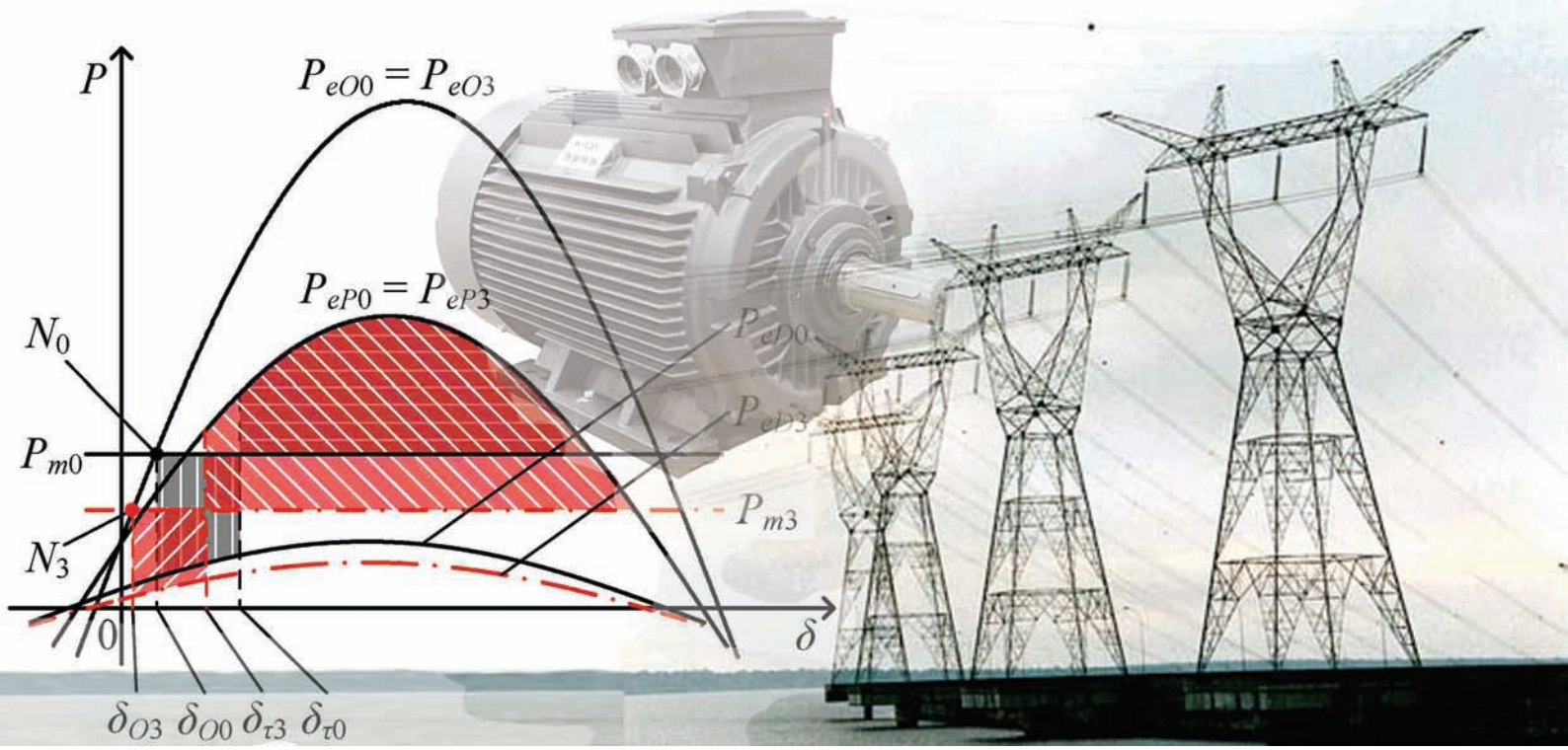


آنالیز پایداری گذرا شبکه قدرت در حضور ژنراتورهای آسنکرون به روش تابع انرژی و سطح مرزی انرژی پتانسیل PEBS

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 سنکرونیزم 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 این‌رو پایداری گذرا در شبکه کاهش می‌یابد. این مقاله اثر کاهش اینرسی سیستم را بر پایداری گذرا درنتیجه حضور ژنراتورهای آسنکرون در شبکه قدرت، با استفاده از تابع انرژی بررسی می‌کند. جهت شبیه‌سازی، ژنراتور آسنکرون به‌صورت 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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

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

هـر سیستم دینامیکی که طراحی و یا ساخته می‌شود باید در شرایط پایدار کار کند. در این شرایـط، سیستم باید به‌صورت رضایت‌بخشی بکار خود ادامه دهد و با حاشیه ایمنی مناسب بتواند در تمام زمان‌ها حتـی در زمـان وقوع خطـا پایدار بمانـد. هنگامی‌که یـک سیستم دینامیـک مانند یک سیستـم قدرت به‌هم‌پیوسته بـا خطوط انتقال طولانی، بزرگ و پیچیده باشد بررسی پایداری با استفاده از یک روش تحلیلـی و عملی بسیار موثر خواهـد بود. سیستم قدرت یک سیستم دینامیکـی است و پایداری یک سیستم دینامیک را می‌توان به‌صورت زیر مشخص کرد. فرض کنید سیستم دریکی از حالت‌های تعادل خود قرار داشته باشد اگر پس از یک اغتشاش، سیستم بالاخره به موقعیت تعـادل خود یا به موقعیت تعادل دیگری همگرا شود سیستم را پایدار می‌نامنـد و اگر متغیرهای سیستم با افزایش زمان از نقطه تعادل دور شوند سیستم را ناپایدار گویند[۱].

امـروزه بـا توجه به افزایـش تقاضای انـرژی الکتریکـی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیـر به‌دلیل عدم آلودگی محیط‌زیست در مقایسه بـا سوخت‌های فسیلی، رشـد چشمگیری داشته اسـت. یکی از این انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد می‌باشـد. ژنراتورهای مورداستفاده 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 افزایـش یابد، موضوع پایداری از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد[۳]. بررسی اثر افزایش نفوذ ژنراتور آسنکرون بر پایداری گذرا یکـی از مسایل مورد توجه در طراحـی و بهره‌برداری از سیستم‌های قـدرت می‌باشد[۴, ۵]. دو روش مختلف بـرای بررسی پایداری گذرا مورد استفاده قرار می‌گیـرد. یک روش شبیه‌سازی و یا حل مستقیم معادلات دیفرانسیل غیرخطی سیستم قدرت است و روش دوم، روش تحلیلـی است که بر اساس انرژی کل سیستم بنا شده است. از جمله روش‌هـای تحلیلی، روش دوم لیاپانـوف می‌باشد که قابلیت بیشتری نسبت به روش اول دارد[۱].

به‌منظور بررسی پایداری گـذرای سیستم‌های قدرت تا قبل از قانون دوم لیاپانـوف تنها از روش شبیه‌سازی زمانی معادلات حالت سیستم استفـاده می‌شد؛ امـا روش‌های تابع انرژی طرح‌شـده تا قبل از سال ۱۹۷۸ نتایـج محافظه‌کارانه زیادی ارایه می‌نمودنـد بدین معنی که مقداری که برای زمان قطع بحرانی خطا به کمک این روش‌ها بدست می‌آمـد، 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 سـال ۱۹۷۶ در مرجع [۷] نشـان داده شد که انرژی بحرانی سیستم وابسته به خطای اعمال‌شده در سیستم است و به ازای هر محل خطا بایستی به‌طور مستقل محاسبه شود و مفهوم نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایـدار که زمانی دیگر نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده نامیده شد، مطـرح گردید. سپس در سال ۱۹۷۸ توسط کاکی‌موتو [۸] و در سال ۱۹۷۹ توسط اتـای [۹] روش مرز سطح انرژی پتانسیل ارایه گردید. همچنیـن در اواخر دهه هشتاد میلادی طـی مقالاتی توسط چیانگ در[۱۰-۱۲] بنیـان تئـوری روش PEBS[1] و روش مستقیـم ارزیابی پایداری گـذرای سیستم قدرت مطرح شـد[۶]. تحقیقات انجام‌شده بیشتـر با ژنراتورهای سنکـرون بوده و از ژنراتـور آسنکرون استفاده نشـده است. در این مقالـه در یک شبکه نمونه بـا ژنراتور سنکرون، محاسبـه زمان قطـع بحرانی با روش شبیه‌سـازی و روش‌های انرژی انجام و نتایج مقایسه می‌گردند، سپس نتیجه حضور ژنراتور آسنکرون و کاهـش اینرسی شبکه بررسی و با جبران‌سازی در خطوط انتقال و کاهش راکتانس خط به کمـک ادوات فکتس، کاهش اینرسی شبکه جبران می‌گردد.

۲- روش‌های ارزیابی پایداری گذرا

در مطالعه پایداری گذرا روش‌های مختلفی توسعه‌یافته 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

و- روش تحلیلی بر اساس انرژی کل سیستم (لیاپانوف)

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

نخستیـن قـدم در آنالیز پایداری گـذرا در سیستم‌های چند ماشینه اجـرای پخش بار و تعیین مقادیر دامنه و زاویه ولتاژ باس‌ها می‌باشد. جریان ماشین‌ها قبل از اغتشاش به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۳]:

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \qquad i = 1,2,...,m \qquad (۱)$$

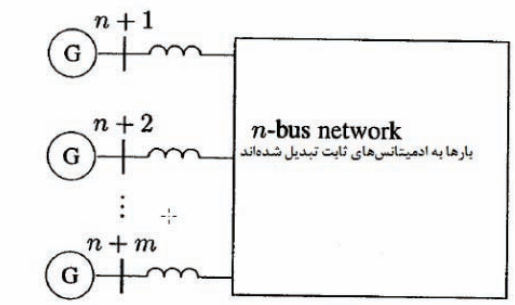
m تعـداد ژنراتورهاسـت. V_i ولتاژ ترمینال ژنراتـور i ام و P_i و Q_i توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتور می‌باشند. ولتاژهای پشت راکتانس‌های گذرا به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۳]:

$$E_i^{'} = V_i + jX_d^{'} I_i \qquad (۲)$$

سپـس تمام بارها با استفـاده از رابطه (۳) بـه ادمیتانس‌های معادل تبدیل می‌شوند.

$$y_{i0} = \frac{S_i^*}{|V_i|^2} = \frac{P_i - jQ_i}{|V_i|^2} \qquad (۳)$$

در این حالت می‌توان شبکه را با شبکه شکل (۱) معادل کرد. نودهای m+n,…,2+n,1+n باس‌هـای ماشین یا به‌عبارت‌دیگر باس‌های پشت راکتانس‌های گذرا هستند [۱۳].



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

حال تـوان الکتریکی خروجی هر ماشین برحسـب ولتاژهای داخلی ماشین با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$P_{ei} = \sum_{k=1}^{n} [B_{ik} E_i^{'} E_k^{'} \sin(\delta_i - \delta_k) + G_{ik} E_i^{'} E_k^{'} \cos(\delta_i - \delta_k)] \qquad (۴)$$

$$P_{ei} = G_{ii} E_i^{'2} + \sum_{k=1}^{n} [B_{ik} E_i^{'} E_k^{'} \sin(\delta_i - \delta_k) + G_{ik} E_i^{'} E_k^{'} \cos(\delta_i - \delta_k)] \qquad (۵)$$

کـه $C_{ik} = B_{ik} E_i^{'} E_k^{'}$, $D_{ik} = G_{ik} E_i^{'} E_k^{'}$ بنابرایـن معـادلات نوسـان در سیستم چند ماشین با رابطه (۶) بدست می‌آیند[۲]:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \Delta\omega_i^{(rad/s)}$$
$$\frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \frac{P_{mi} - P_{ei}}{M_i}^{(rad/s^2)} , \quad for\ i = 1,...,n \qquad (۶)$$

M ممان اینرسی هر ژنراتور می‌باشد.

۳-۲-تابع انرژی

به‌طـور معمول در روش تابع انرژی بیشتر از معادلات حالتی استفاده می‌کنند که در چهارچوب مرجع اینرسی COI بیان‌شده‌اند، زیرا توابع انرژی بدست‌آمده از این نوع معادلات نسبت به معادلات حالتی که در چهارچوب مرجع سنکـرون بیان‌شده‌اند دارای تقارن بیشتری بوده و به‌کارگیری جملات وابسته به مسیر آن‌ها ساده‌تر است از این‌رو مرکز اینرسی را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم [۲]:

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{n} M_i \delta_i \qquad (۷)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{n} M_i \omega_i \qquad (۸)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^{n} M_i \qquad (۹)$$

متغیرهای حالت سیستم در چهارچوب مرجع مرکز اینرسی به‌صورت $\tilde{\theta}_i = \delta_i - \delta_0$, $\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0$ تعریف می‌شوند:

بنابراین معادلات نوسان رابطه (۶) به‌صورت زیر خواهند بود:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \Delta\tilde{\omega}_i$$
$$\frac{d\Delta\tilde{\omega}_i}{dt} = \frac{P_{mi} - P_{ei}}{M_i} - \frac{P_{COI}}{M_T} , \quad for\ i = 1,...,n-1 \qquad (۱۰)$$

$$P_{COI} = \sum_{i=1}^{n} P_i - 2\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} D_{ij} \cos\theta_{ij} \qquad (۱۱)$$

تابـع انرژی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشـی است. انرژی پتانسیل خـود به دو قسمـت تقسیم می‌شـود $V_P(\theta)$ که مستقـل از مسیر انتگرال‌گیری می‌باشد و $V_d(\theta)$ که وابسته به مسیر است[۲].

$$V(\theta,\tilde{\omega}) = V_{ke}(\tilde{\omega}) + V_{pe}(\theta) =$$
$$\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^{n} P_i(\theta_i - \theta_i^s) -$$
$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} [C_{ij}(\cos\theta_{ij} - \cos\theta_{ij}^s) -$$
$$\int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos\theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j)] \qquad (۱۲)$$

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

$$V_d(\theta) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos\theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \qquad (۱۳)$$

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

$$V_d(\theta) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} D_{ij} \frac{\theta_i + \theta_j - \theta_i^s - \theta_j^s}{\theta_i - \theta_j - \theta_i^s + \theta_j^s} \times$$
$$[\sin(\theta_{ij}) - \sin(\theta_{ij}^s)] \qquad (۱۴)$$

۳-۳- تحلیل پایداری گذرا با روش‌های انرژی

۳-۳-۱-نقاط تعادل سیستم

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

۳-۳-۲-محاسـبه زمـان قطع بحرانـی بـه 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.

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

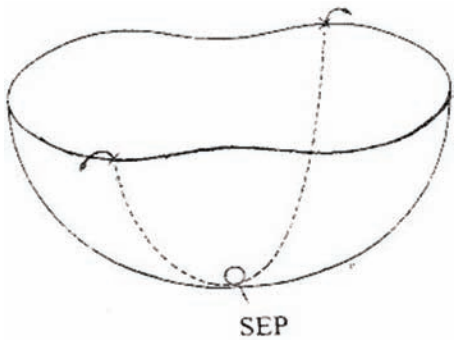
۳- نقاط تعادلی که در مرز منطقه پایداری هستند، شناسایی می‌شوند.
۴-از میان نقاط تعادلی کـه روی مرز قراردادند آن‌که کمترین مقدار تابـع انرژی را دارد نزدیک‌ترین نقطـه تعادل ناپایدار است و انرژی پتانسیل در آن انرژی بحرانی V_{cr} می‌باشد.
۵- الف- اگر $V[X(t_{cl})]<V_{cr}$ باشد سیستم پایدار است.
ب- t چنان محاسبه می‌شود که $V[X(t)]=V_{cr}$ و درنتیجه $t=t_{cr}$

۳-۳-۳-محاسـبه زمان قطع بحرانی به روش نقطـه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده CUEP[3]

اگـر 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، نقطـه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده می‌گوییـم. 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 اسـت که ناحیه پایداری سیستم بزرگ‌تـر شده و جواب زمان قطع بحرانی خطا t_{cr} دارای تقریب بهتری می‌باشد[۱].

۳-۴-تحلیـل پایـداری گذرا به روش سـطح مرزی انرژی پتانسـیل PEBS

پایـداری گـذرا یـک سیسـتـم را می‌توان به‌طـور ساده بـا استفاده از یـک گـوی غلتان بر سطح انـرژی پتانسیل توصیـف کرد و سطح می‌تواند یک‌کاسـه چندوجهی باشد (شکل ۲). محدوده داخل کاسه، نشان‌دهنده ناحیه پایداری و محدوده خارج کاسه، ناحیه ناپایداری را نشـان می‌دهد. در ابتدا گوی در کف کاسه قرار دارد که کف کاسه را نقطـه تعادل پایدار در نظر می‌گیریـم و انرژی پتانسیل در این نقطه، کمینه یا صفر است. با بروز اغتشاش، انرژی جنبشی واردشده به گوی سبـب می‌شود که گـوی به سمت لبه کاسه حرکـت کند و در حین بـالا رفتن به سمت لبه کاسه و خروج از کاسه، انرژی پتانسیل جذب می‌کند. هنگامی‌که مقـداری انرژی جنبشی به گوی وارد شود، گوی در جهت خاصی حرکت می‌کند و بر روی سطح داخلی کاسه بر روی مسیـری که با جهـت حرکت اولیه تعیین می‌شـود به‌طرف بالا غلت خواهد زد. نقطه‌ای که گوی از حرکت بازخواهد ایستاد با مقدار انرژی پتانسیـل وارد شده به سیستم تعیین می‌شود. اگر گوی قبل از آن‌که به لبـه کاسه برسد تمامی انرژی جنبشی خـود را به انرژی پتانسیل تبدیـل کند، به‌طرف پایین غلت می‌خـورد و در پایان بعد از مقداری رفت‌وبرگشـت در نقطه تعادل پایدار، مستقـر خواهد شد. اگر انرژی جنبشی واردشده به سیستم به‌انـدازه کافی بزرگ باشد، گوی به لبه کاسه رسیـده و از آن بیرون می‌افتد. در این صورت گوی به محدوده ناپایـداری وارد شده و به نقطه تعادل پایـدار بازنخواهد گشت. سطح داخـل کاسه، سطـح انرژی پتانسیل می‌باشد و لبـه 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]:

$$\sum_{i=1}^{n} f_i(\theta).(\theta_i-\theta_i^s) \qquad (۱۵)$$

در رابطـه (۱۵) θ^S مشخص‌کننده نقاط تعـادل پایدار سیستم بعد از خطـا می‌باشد؛ بنابرایـن نقطه عبور از PEBS زمانـی است که رابطه (۱۵) مساوی صفـر 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.
- گـام دوم: مقدار معیار PEBS در هر گـام از انتگرال‌گیری محاسبه می‌شود.
- گـام سوم: گام‌هـای ۱ و ۲ آن‌قدر تکرار می‌شونـد تا معیار PEBS مسـاوی صفر شود و یا علامت آن تغییر کند. این زمان، زمان عبور از PEBS بـوده و انـرژی در این نقطه به‌عنـوان V_{cr}در نظر گرفته می‌شود.
- گـام چهارم: با شـروع از حالت اولیه سیستم قبـل از خطا، دوباره از سیسـتـم خطادار انتگرال‌گیـری می‌شود تا انرژی کل سیستم به مقدار V_{cr} برسد. این زمان t_{cr} خواهد بود.

در ایـن مقاله جهـت محاسبه زمان قطع بحرانی بـه روش PEBS از روش پیشنهادی اتای استفاده‌شده است.

۴- شبیه‌سازی

۴-۱- حضور ماشین سنکرون در شبکه قدرت

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

$$M_1=M_2=2\ ,\ P_{m1}=0.02\ ,\ P_{m2}=0.1$$
$$V_1=V_2=V_3=1\ ,\ B_{12}=B_{23}=1\ ,\ B_{13}=2 \qquad (۱۶)$$

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

$$\begin{cases}\dot{\omega}_1=-\sin\delta_1-0.5\sin(\delta_1-\delta_2)+0.01=f_1(\delta_1,\delta_2)\\ \dot{\omega}_2=-0.5\sin\delta_2-0.5\sin(\delta_2-\delta_1)+0.05=f_2(\delta_1,\delta_2)\end{cases} \qquad (۱۷)$$

نقـاط تعادل پایـدار و ناپایـدار سیستم را مشخص کـرده، سپس با استفاده از نقطه تعادل پایدار و روابط بخش ۳-۲ تابع انرژی سیستم با رابطـه (۱۸) مشخص می‌گردد. انرژی پتانسیل هرکدام از نقاط تعادل محاسبه‌شده و در جدول شماره (۱) نشان داده‌شده است.

$$V(\delta_1,\delta_2,\omega_1,\omega_2)=\omega_1^2+\omega_2^2-$$
$$2\cos\delta_1-\cos\delta_2-\cos(\delta_1-\delta_2)-0.02\delta_1-0.1\delta_2 \qquad (۱۸)$$

بـا استفاده از مقادیر جـدول (۱) معیار PEBS به‌صورت زیر مشخص می‌شود:

$$PEBS=f_1(\delta_1,\delta_2)\times(\delta_1-0.02801)$$
$$+f_2(\delta_1,\delta_2)\times(\delta_2-0.06403) \qquad (۱۹)$$

مسیرهـای انرژی و محل نقاط تعادل سیستـم روی مرز پایداری در فضای دوبعدی و سه‌بعدی در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده‌شده‌اند. بـا استفاده از روش‌های بیان‌شده در بخش ۳ زمان قطع بحرانی خطا را بـا بروز خطـا در سیستم، محاسبـه می‌شود. همان‌طـور که بیان

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

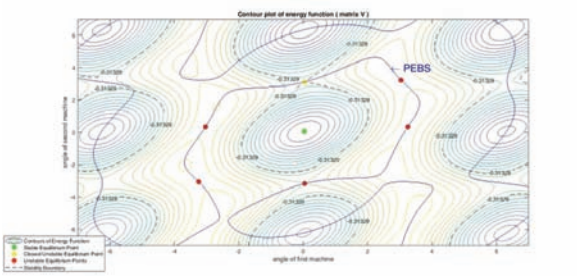
شـد نزدیک‌ترین نقطه تعـادل ناپایدار، نقطه تعـادل ناپایداری است کـه کمترین انـرژی را دارد، بنابرایـن نقطه تعادل ناپایـدار با انرژی ۰,۳۱۳۳- نزدیک‌ترین نقطه تعـادل ناپایدار می‌باشد. با بروز خطا در سیستـم مسیر سیستم خطادار به سمت مرز پایداری حرکت می‌کند. بـا توجه به شکـل (۵) مسیر سیستم خطـادار در هنگام عبور از مرز پایداری از نزدیک نقطه تعادل ناپایدار با انرژی ۱,۹۱۹۸ عبور می‌کند بنابرایـن ایـن نقطه را نقطه تعـادل ناپایدار کنترل‌کننـده می‌نامیم. بـا استفاده از روش اتای معیـار PEBS را محاسبـه می‌کنیم. انرژی سیستـم را در لحظه عبور از مرز پایـداری به‌عنوان انرژی بحرانی در نظـر گرفته و زمانی که انرژی کـل سیستم به مقدار بحرانی می‌رسد، زمان قطع بحرانی خطا خواهـد بود. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۲) نشان داده‌شده‌اند.

جدول ۱: نقاط تعادل پایدار و ناپایدار و انرژی پتانسیل هرکدام

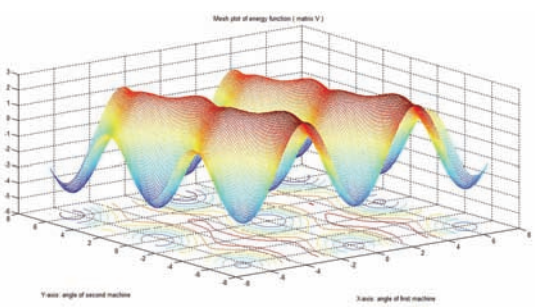
نوع نقاط تعادل	$V(\delta_1,\delta_2)$	δ_2	δ_1
پایدار	-۴.۰۰۳۵	۰.۰۶۴۰۳	۰.۰۲۸۰۱
ناپایدار	-۰.۳۱۳۳	۳.۱۱۴۹	۰.۰۴۶۶۷
ناپایدار	۰.۳۱۵	-۳.۱۶۸۳	۰.۰۴۶۶۷
ناپایدار	۱.۶۲	۳.۲۲۳۲	۳.۰۴۰۷
ناپایدار	۱.۹۱۹۸	۰.۳۳۴۱	۳.۲۴۵۸
ناپایدار	۲.۰۴۵۵	۰.۳۳۴۱	-۳.۰۳۷۴
ناپایدار	۲.۳۷۴	-۳.۰۶	-۳.۲۴۳

جدول۲: زمان قطع بحرانی خطا با روش‌های انرژی

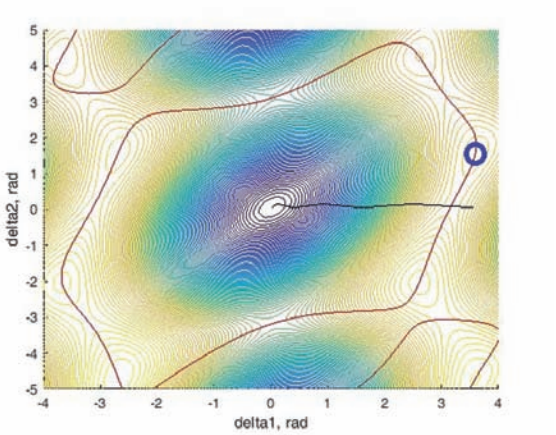
انرژی	زمان (ثانیه)	روش
-۰.۳۱۳۳	۰.۵۷	نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار
۱.۹۱۹۸	۰.۷۰	نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده
۱.۹۲۹۲	۰.۷۱	PEBS



شکل۳: مسیرهای انرژی و محل نقاط تعادل سیستم در فضای دوبعدی



شکل۴: مسیرهای انرژی و PEBS در فضای سه‌بعدی



شکل۵: مسیر سیستم خطادار

۴-۲-حضور ماشین آسنکرون در شبکه قدرت

با حضور ماشین آسنکـرون در شبکه قدرت، اینرسی سیستم کاهش می‌یابد و به دنبال آن با بروز خطا در سیستم پایداری گذرا نیز کاهش می‌یابـد. در این مقاله بـرای شبیه‌سازی ماشیـن آسنکرون، ماشین سنکـرون با اینرسی کم به‌کار بـرده می‌شود. با فرض کاهش اینرسی ماشین شماره یـک $(M_1 = 1)$ معادلات دینامیکی سیستم به‌صورت زیر تغییر خواهند کرد:

نتایـج شبیه‌سازی و محاسبـه زمان قطع بحرانی بـا معادلات جدید سیستم در جدول (۳) نشان داده‌شده است.

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = -2\sin\delta_1 - \sin(\delta_1 - \delta_2) + 0.02 \\ \dot{\omega}_2 = -0.5\sin\delta_2 - 0.5\sin(\delta_2 - \delta_1) + 0.05 \end{cases} \quad (۲۰)$$

جدول ۳: زمان قطع بحرانی خطا با حضور ماشین آسنکرون

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

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

در ایـن مقاله روش پیشنهادی جهت جبـران کاهش اینرسی شبکه، کاهـش راکتانس خطوط بـا استفـاده از ادوات FACTS[4] می‌باشد. با ایـن روش مازاد اینرسی موردنیاز جهت حفظ پایداری سیستم در اثر کاهـش اینرسی درنتیجه حضور ژنراتورهـای آسنکرون، تأمین‌شده و سیستم پایدار خواهد شد[۲].

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

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

$$X_c = X_{AB}(1-0.8)$$
$$X_{AB}^{new} = X_{AB} - X_c \quad (۲۱)$$

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

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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

اینرسی و حضـور ژنراتور آسنکرون در شبکـه (جدول ۲) مقایسه می‌کنیم.

۳- اگـر زمان بدست‌آمـده بیشتر بود بنابراین خـط AB می‌تواند در جبران‌سـازی مشارکت نماید، در غیر این صـورت خط مذکور در جبران‌سازی مشارکت نخواهد داشت.

نتایـج شبیه‌سازی با روش‌های انرژی در جـدول (۴) نشان داده‌شده است. بـا توجه به بررسی جدول (۴) نتیجـه می‌گیریم که خط ۳-۱ نمی‌تواند در جبران‌سازی مشارکت نماید. در حالت نخست (خط ۳-۲) مشاهده می‌شود که روش‌های CUEP و PEBS نتایج قابل‌قبول دارند. در حالت دوم (خط ۲-۱) مشاهده می‌شود که روش‌های CLUEP و PEBS نتایج قابل‌قبول دارند ولی در حالت سوم روش CUEP خطای زیادی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در ایـن مقالـه بررسـی پایداری گذرا بـا روش‌های انـرژی (CUEP و CLUEP و PEBS) انجـام شـد. قبـل از حضور ژنراتـور آسنکرون در شبکـه، زمان قطـع بحرانی با هر سـه روش محاسبه شد و روش PEBS دقـت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها داشت. با حضور ژنراتور آسنکرون در شبکه به‌دلیل پایین بودن اینرسی ژنراتور، پایداری گذرا کاهش‌یافته و درنتیجه زمان قطع بحرانی خطا کاهش یافت. به‌منظور جبـران میزان کاهش اینرسی در شبکه جبران‌سازی خطوط انتقال با استفاده از ادوات FACTS پیشنهـاد گردید. در بررسی پایداری گذرا و محاسبـه زمـان قطع بحرانی، روش‌های انـرژی در مقایسه با روش شبیه‌سـازی و حل مستقیـم معادلات دیفرانسیـل، سرعت بیشتری داشتـه و نتایج قابل قبولـی را ارایه می‌نماینـد و در میان روش‌های انـرژی، بهترین معیار بررسـی بهبود پایداری گذرا بـا توجه به دقت بیشتر، روش PEBS خواهد بود.

جدول۴: 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

مراجع

[1]M .Eidiani and M .H .M .Shanechi» ,CTS COMPLEX TRANSIENT STABILITY THE NEW METHOD FOR DIRECT ANALYSIS OF TRANSIENT STABILITY «,in12 th Interna onal 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.

[۵]اسماعیل صیادی، مجیدولی زاده، «طراحی پایدارساز سیستم قدرت برای توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسوتغذیه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات،» دومیـن کنفرانس ملـی رویکردهای نوین در مهندسـی کامپیوتر و برق، ۱۳۹۵.

[۶]علـی کرمـی «روش ترکیبی شبیه‌سـازی زمانی و BCU جهـت 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.

[۱۴]فصل هفتم پایداری و کنترل سیستم‌های قدرت.
Available:http://kavir3.persiangig.com/EPSA2-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.

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]