

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

ا حمیدر ضا تیموری/ موسسه آموزش عالی خر اسان/مشهد–ایران/ ha.r.teymouri@khorasan.ac.ir همطفی عیدیانی/ دانشیار موسسه آموزش عالی خر اسان/مشهد–ایران/ khorasan.ac.ir -

چکيده

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 می کند، 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 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 می کند. 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 نزدیک ترین نقطه تعادل ناپایدار، نقطه تعادل ناپایدار کنترل کننده و سطح مرزی انرژی پتانسیل عرای بحرانی و زمان می گردد. کاهش راکتانس خطوط با استفاده از ادوات FACTS جهت جبران کمبود اینرسی سیستم در اثر حضور ژنراتور آسنکرون، پیشنهاد میشود و میزان جبران سازی 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



علمی – ترویجی انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران – شاخه خراسان سال پنجم/ شماره۱۱۱ زمستان ۱۳۹۷ 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 می شود باید در شرایط پایدار کار کند. در این شرایـط، سیستم باید به صورت رضایت بخشی بکار خود ادامه دهد و با حاشیه ایمنی مناسب بتواند در تمام زمان ها حتـی در زمـان وقوع خطـا پایدار بمانـد. هنگامی که یـک سیستم مولانی، بزرگ و پیچیده باشد بررسی پایداری با استفاده از یک روش تحلیلـی و عملی بسیار موثر خواهـد بود. سیستم قدرت یک سیستم زیر مشخص کرد. فرض کنید سیستم دینامیک را می توان به صورت قرار داشته باشد اگر پس از یک اغتشاش، سیستم بالاخره به موقعیت تعـادل خود یا به موقعیت تعادل دیگری همگرا شود سیستم را پایدار می نامنـد و اگر متغیرهای سیستم با افزایش زمان از نقطه تعادل دور شوند سیستم را ناپایدار گویند[۱].

امروزه با توجه به افزایت تقاضای انرژی الکتریکی، استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر بهدلیل عدم آلودگی محیطزیست در مقایسه با سوختهای فسیلی، رشد چشمگیری داشته است. یکی از این انرژیهای تجدیدپذیر، انرژی باد میباشد. ژنراتورهای مورداستفاده نفوذ نیروگاههای از نوع آسنکرون یا القایی میباشند[۲]. هرچه ضریب نفوذ نیروگاهها فازایش یابد، موضوع پایداری از اهمیت بیشتری برخوردار نیروگاهها فزایش یابد، موضوع پایداری از اهمیت بیشتری برخوردار می گردد[۳]. بررسی اثر افزایش نفوذ ژنراتور آسنکرون بر پایداری گذرا یکی از مسایل مورد توجه در طراحی و بهرهبرداری از سیستمهای مورد استفاده قرار می گیرد. یک روش شبیه سازی و یا حل مستقیم معادلات دیفرانسیل غیر خطی سیستم قدرت است و روش دوم، روش روش های تحلیلی است که بر اساس انرژی کل سیستم بنا شده است. از جمله روش های تحلیلی، روش دوم لیاپانوف میباشد که قابلیت بیشتری نسبت به روش اول دارد[۱].

بهمنظور بررسی پایداری گذرای سیستمهای قدرت تا قبل از قانون دوم لیاپانوف تنها از روش شبیهسازی زمانی معادلات حالت سیستم استفاده میشد؛ اما روشهای تابع انرژی طرحشده تا قبل از سال ۱۹۷۸ نتایج محافظه کارانه زیادی ارایه 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

> فصل نامه علمی- ترویجی اتحت مایس بیتر مالکتها کی این شراید شاخه خاص

نجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران–شاخه خراسان <mark>۶</mark> سال **پنج**م/شماره۱۱۱ زمستان ۱۳۹۷

وابسته به خطای اعمال شده در سیستم است و به ازای هر محل خطا بایستی به طور مستقل محاسبه شود و مفهوم نزدیک ترین نقطه تعادل ناپایـدار که زمانی دیگر نقطه تعادل ناپایدار کنترل کننده 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 مور [۱۰–۱۲] بنیـان تئـوری روش اZEBS و روش مستقیـم ارزیابی پایداری گـذرای سیستم قدرت مطرح شـد[۶]. تحقیقات انجام شده 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 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]: ۲- روش شبیهسازی یا حل مستقیم معادلات دیفرانسیل غیرخطی ۳- روش مستقیم الف- روش صفحه – فاز 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

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]:

$$\omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i \tag{A}$$

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \tag{9}$$

متغیرهای حالت سیستم در چهارچوب مرجع مرکز اینرسی به صورت $\bar{\theta}_i = \delta_i - \delta_0$, $\bar{\omega}_i = \omega_i - \omega_0$ تعریف می شوند: بنابراین معادلات نوسان رابطه (۶) به صورت زیر خواهند بود:

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

$$\frac{d\Delta \tilde{\omega_i}}{dt} = \frac{P_{mi} - P_{ei}}{M_i} - \frac{P_{COI}}{M_T}, \text{ for } i = 1, ..., n-1 \qquad (1 \cdot)$$

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

تابع انرژی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی است. انرژی پتانسیل
خـود به دو قسمـت تقسیم میشـود (
$$P(\theta)$$
 که مستقـل از مسیر
انتگرالگیری میباشد و ($V_d(\theta)$ که وابسته به مسیر است[۲].
 $V(\theta, \tilde{\omega}) = V_{ke}(\tilde{\omega}) + V_{pe}(\theta) =$
 $\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^{n} P_i(\theta_i - \theta_i^s) -$
 $\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} [C_{ij}(\cos\theta_{ij} - \cos\theta_{ij}^s) -$
 $\int_{\theta_i^t + \theta_j}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos\theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j)]$
در رابطه فوق P^s بردار نقاط تعادل سیستم بعد از خطا میباشد.

$$V_d(\theta) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \int_{\theta_i^a + \theta_j^a}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \tag{17}$$

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

$$V_{d}(\theta) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} D_{ij} \frac{\theta_{i} + \theta_{j} - \theta_{i}^{s} - \theta_{j}^{s}}{\theta_{i} - \theta_{j} - \theta_{i}^{s} + \theta_{j}^{s}} \times [\sin(\theta_{ij}) - \sin(\theta_{ij}^{s})]$$
(14)

۳-۳- تحلیل پایداری گذرا با روشهای انرژی ۳-۳-۱-نقاط تعادل سیستم

در سیستم غیرخطی (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]. متبت داشته باشد، نقطه تعادل ناپایدار نوع K نامیده میشود [۲]. تعادل ناپایدار CLUEP²

الگوریتم محاسبه زمان قطع بحرانی خطا [1]: ۱- تمام نقاط تعادل ناپایدار نوع یک محاسبه میشوند. ۲- نقاط تعادل به ترتیب تابع انرژی مرتب میشوند.



علمی – ترویجی انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران – شاخه خراسان سال ینجم/ شعمار ۱۱۵ (زمستان ۱۳۹۷ ۷

$$I_{i} = \frac{S_{i}^{*}}{V_{i}^{*}} = \frac{P_{i} - jQ_{i}}{V_{i}^{*}} \qquad i = 1, 2, ..., m$$
(1)

 $Q_i \in P_i$ تعداد ژنراتورهاست. V_i ولتاژ ترمینال ژنراتور i ام و $T_i \in Q_i$ و توانهای اکتیو و راکتیو ژنراتور میباشند. ولتاژهای پشت راکتانسهای گذرا به صورت زیر محاسبه می شوند [۱۳]:

$$E'_{i} = V_{i} + jX'_{d}I_{i} \tag{(7)}$$

سپــس تمام بارها با استفـاده از رابطه (۳) بــه ادمیتانس.های معادل تبدیل میشوند.

$$y_{i0} = \frac{S_i^*}{|V_i|^2} = \frac{P_i - jQ_i}{|V_i|^2}$$
(7)

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 توان الکتریکی خروجی هر ماشین برحسب ولتاژهای داخلی ماشین با رابطه زیر مشخص می شود:

$$P_{ei} = \sum_{k=1}^{n} [B_{ik} E_{i} E_{k} \sin(\delta_{i} - \delta_{k}) + G_{ik} E_{i} E_{k} \cos(\delta_{i} - \delta_{k})]$$
(*)

$$P_{ei} = G_{ii}E_{i}^{2} + \sum_{k=1}^{n} [B_{ik}E_{k}^{'}E_{k}^{'}\sin(\delta_{i} - \delta_{k}) + G_{ik}E_{i}^{'}E_{k}^{'}\cos(\delta_{i} - \delta_{k})] \quad (\Delta)$$

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

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

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

بهطـور معمول در روش تابع انرژی بیشتر از معادلات حالتی استفاده میکنند که در چهارچوب مرجع اینرسی COI بیان شدهاند، زیرا توابع انرژی بدستآمده از این نوع معادلات نسبت به معادلات حالتی که در چهارچوب مرجع سنکـرون بیان شدهاند دارای تقارن بیشتری بوده و به کارگیری جملات وابسته به مسیر آن ها سادهتر است از این رو مرکز اینرسی را به صورت زیر تعریف میکنیم [۲]:

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \tag{V}$$

۳- نقاط تعادلی که در مرز منطقه پایداری هستند، شناسایی می شوند. ۴-از میان نقاط تعادلی کـه روی مرز قراردادند آن که کمترین مقدار

تابع انرژی را دارد نزدیکترین نقطه تعادل ناپایدار است و انرژی یتانسیل در آن انرژی بحرانی $V_{\rm cr}$ میباشد.

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

 $t = t_{cr}$ جنان محاسبه می شود که $V[X(t)] = V_{cr}$ و درنتیجه $t = t_{cr}$ ۳-۳-۳ محاسبه زمان قطع بحرانی به روش نقطه تعادل ناپایدار كنترلكننده CUEP³

اگر مسیر سیستم خطادار را انتگرال گیری 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، نقطــه تعادل ناپايدار كنترلكننده مي گوييـم. انرژي پتانسيل در اين نقطه بهعنوان انرژی بحرانی در نظر گرفته می شود و به طور 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 _۲ دارای تقریب بهتری میباشد[۱]. ۳-۳-تحلیل پایداری گذرا به روش سطح مرزی انرژی پتانسیل

پایداری گذرا یک سیستم را میتوان به طور ساده با استفاده از یک گوی غلتان بر سطح انرژی پتانسیل توصیف کرد و سطح می تواند یک کاسـه 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 نقط و انرژی پتانسیل در انظر می گیریم و انرژی پتانسیل در این نقطه، کمینه یا صفر است. با بروز اغتشاش، انرژی جنبشی واردشده به گوی سبب می شود که گوی به سمت لبه کاسه حرکت کند و در حین بالا رفتن به سمت لبه كاسه و خروج از كاسه، انرژى پتانسيل 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 مسيرى كه با جهت حركت اوليه تعيين مى شود به طرف بالا غلت خواهد زد. نقطهای که گوی از حرکت بازخواهد ایستاد با مقدار انرژی پتانسیل وارد شده به سیستم تعیین می شود. اگر گوی قبل از آن که به لبـه کاسه برسد تمامی انرژی جنبشی خـود را به انرژی پتانسیل تبديل كند، بهطرف پايين غلت ميخـورد و در پايان بعد از مقداري رفتوبر گشت در نقطه تعادل پایدار، مستقر خواهد شد. اگر انرژی جنبشی واردشده 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 بازنخواهد گشت. سطح داخل کاسه، سطح انرژی پتانسیل می باشد و لبه کاسه را می توان بهعنوان PEBS در نظر گرفت [۲, ۱۴].



شکل ۲: کاسه چندوجهی و گوی غلتان [۱۴]

فصلنامه علمى- ترويجي نجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران-شاخه خراسان ۸ سال پنجم/شماره۱۱/ زمستان ۱۳۹۷

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

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

$$\sum_{i=1}^{n} f_i(\theta) \cdot (\theta_i - \theta_i^s) \tag{10}$$

در رابطـه (۱۵) θ^{s} مشخص کننده نقاط تعـادل پایدار سیستم بعد از خطا می باشد؛ 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 می باشد. حال با استفاده از این معیار می توان مرز پایداری سیستم اصلی را به صورت زیر مشخص کرد:

• گام اول: مسیر سیستم خطادار محاسبه می شود.

- گام دوم: مقدار معیار PEBS در هر گام از انتگرال گیری محاسبه مىشود.
- گام سوم: گامهای ۱ و ۲ آنقدر تکرار می شوند تا معیار PEBS مساوى صفر شود و يا علامت أن تغيير كند. اين زمان، زمان عبور از PEBS بوده و انرژی در این نقطه به عنوان V_{cr} در نظر گرفته مىشود.
- گام چهارم: با شروع از حالت اولیه سیستم قبل از خطا، دوباره از سیستم خطادار انتگرال گیری می شود 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 استفادهشده 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 می شود [10]. اگر این سیستم دارای پارامترهای زیر باشد:

$$M_1 = M_2 = 2 , P_{m1} = 0.02 , P_{m2} = 0.1$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = 1 , B_{12} = B_{23} = 1 , B_{13} = 2$$
(19)

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

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{1} = -\sin \delta_{1} - 0.5 \sin(\delta_{1} - \delta_{2}) + 0.01 = f_{1}(\delta_{1}, \delta_{2}) \\ \dot{\omega}_{2} = -0.5 \sin \delta_{2} - 0.5 \sin(\delta_{2} - \delta_{1}) + 0.05 = f_{2}(\delta_{1}, \delta_{2}) \end{cases}$$
(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 رابطــه (۱۸) مشخص می گردد. انرژی پتانسیل هر کدام از نقاط تعادل محاسبه شده و در جدول شماره (۱) نشان داده شده است.

$$V(\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2) = \omega_1^2 + \omega_2^2 - 2\cos\delta_1 - \cos\delta_2 - \cos(\delta_1 - \delta_2) - 0.02\delta_1 - 0.1\delta_2$$
(1A)

با استفاده از مقادیر جـدول (۱) معیار PEBS به صورت زیر مشخص مى شود:

$$PEBS = f_1(\delta_1, \delta_2) \times (\delta_1 - 0.02801)$$

+ $f_2(\delta_1, \delta_2) \times (\delta_2 - 0.06403)$ (19)

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

شد نزدیکترین نقطه تعادل ناپایدار، نقطه تعادل ناپایداری است که کمترین انرژی را دارد، بنابراین نقطه تعادل ناپایدار با انرژی 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 ۱۹۱۹۸ عبور میکند بنابراین این نقطه را نقطه تعادل ناپایدار کنترل کننده می امیم. با استفاده از روش اتای معیار PEBS را محاسبه میکنیم. انرژی در سیستم را در لحظه عبور از مرز پایداری بهعنوان انرژی بحرانی در نظر گرفته و زمانی که انرژی کل سیستم به مقدار بحرانی میرد. زمان قطع بحرانی خطا خواهد بود. نتایج شبیه سازی در جدول (۲)

ر و انرژی پتانسیل هرکدام	عادل پایدار و ناپایدا	جدول ١: نقاط ت
		·

$\delta_{_1}$	δ_2	$V(\delta_1,\delta_2)$	نوع نقاط تعادل
•.• ٢٨ • ١		-4.••20	پايدار
• .• 4997	۳.۱۱۴۹	-•.٣١٣٣	ناپايدار
•.• 4997	-٣.١۶٨٣	۰.۳۱۵	ناپايدار
۳.۰۴۰۷	۳.۲۲۳۲	1.97	ناپايدار
۳.۲۴۵۸	•.٣٣۴١	١.٩١٩٨	ناپايدار
-۳.•۳٧۴	•.٣٣۴١	7.0400	ناپايدار
-٣.٢۴٣	-٣.•۶	۲.۳۷۴	ناپايدار

جدول۲: زمان قطع بحرانی خطا با روشهای انرژی

روش	زمان (ثانیه)	انرژى
نزديكترين نقطه تعادل ناپايدار	۲۵. ۰	-•.5177
نقطه تعادل ناپايدار كنترلكننده	• ٧ •	۱.۹۱۹۸
PEBS	۰.۷۱	1.9797



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



شکل۴: مسیرهای انرژی و PEBS در فضای سهبعدی



۴-۲-حضور ماشین آسنکرون در شبکه قدرت

 $(7 \cdot)$

با حضور ماشین آسنکرون در شبکه قدرت، اینرسی سیستم کاهش می ابد و به دنبال آن با بروز خطا در سیستم پایداری گذرا نیز کاهش می ابد. در این مقاله برای شبیه سازی ماشین آسنکرون، ماشین سنکرون با اینرسی کم به کار برده می شود. با فرض کاهش اینرسی ماشین شماره یک (M₁ = 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 دادهشده است.

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

جدول ۳: زمان قطع بحرانی خطا با حضور ماشین آسنکرون

روش	زمان (ثانیه)	انرژی
نزديكترين نقطه تعادل ناپايدار	0.30	-0.3133
نقطه تعادل ناپايدار كنترلكننده	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 می اشد. با این روش مازاد اینرسی موردنیاز جهت حفظ پایداری سیستم در اثر کاهش اینرسی درنتیجه 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 اینرو الگوریتم زیر جهت تشخیص خطوط مذکور پیشنهاد می گردد[۲]:

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

$$X_{c} = X_{AB}(1 - 0.8) \tag{(1)}$$

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

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

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



میمی مرویجی انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران-شاخه خراسان سال پنجم/شماره۱۱۱(زمستان۱۳۹۷ ۹

- [1]M.Eidiani and M.H.M.Shanechi», CTS COMPLEX TRAN-SIENT 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,» دومین کنفرانس ملی رویکردهای نوین در مهندسی کامپیوتر و برق,
- .1890
- [۶]علی 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.

[۱۴] افصل 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.

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

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

نتایج شبیه سازی با روش های انرژی در جـدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به بررسی جدول (۴) نتیجـه می گیریم که خط ۳-۱ نمی تواند در جبران سازی مشارکت نماید. در حالت نخست (خط ۳-۲) مشاهده می شود که روش های CUEP و PEBS نتایج قابل قبول دارند. در حالت دوم (خط ۲-۱) مشاهده می شود که روش های CLUEP و PEBS نتایج قابل قبول دارند ولی در حالت سوم روش CUEP خطای زیادی دارد.

۵- نتیجهگیری

در ایت 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 آسنکرون در شبکه بهدلیل پایین بودن اینرسی ژنراتور، پایداری گذرا کاهش یافته و درنتیجه زمان قطع بحرانی خطا کاهش یافت. بهمنظور استفاده از ادوات FACTS پیشنهاد گردید. در بررسی پایداری گذرا و محاسبه زمان قطع بحرانی، روشهای انرژی در مقایسه با روش شبیه ازی و حل مستقیم معادلات دیفرانسیل، سرعت بیشتری داشته و نتایج قابل قبولی را ارایه مینمایند و در میان روشهای انرژی، بهترین معیار بررسی بهبود پایداری گذرا با توجه به دقت بیشتر، روش PEBS

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
	CLUEP	۰.۵۷	۵۵. •
۲-۳	CUEP	۰.۷۰	۰.۸۱
	PEBS	۰.۷۱	۰.۸۳
	CLUEP	۰.۵۷	۰.۵۹
۱-۲	CUEP	•.٧•	۰.۶۹
	PEBS	۰.۷۱	۲۸. •
	CLUEP	۰.۵۷	۰.۵۴
۳-۲	CUEP	۰.۷۰	۲۸. •
	PEBS	۰.۲۱	۰.۷۰

پىنوشتھا

1 Potential Energy Boundary Surface

- 2 Closest Unstable Equilibrium Point
- 3 Controlling Unstable Equilibrium Point
- 4 Flexible AC Transmission System

