

ارزیابی امنیت ولتاژ سیستم‌های قدرت باروش انحراف*

محمدحسین جاویدی (۲)

علی اکبر قره‌ویسی (۱)

چکیده امنیت سیستم‌های قدرت تحت فشار، بطور جدی توسط پدیده فروپاشی ولتاژ تهدید می‌شود. در این مقاله با تکیه بر روش انحراف، الگوریتم جدیدی برای تعیین حاشیه امنیت ولتاژ ارائه شده است که با توجه به سرعت بالای روش پیشنهادی می‌توان آن را در ارزیابی بلادرنگ پایداری ولتاژ بکار برد. سیستم‌های تحت مطالعه در این مقاله، شبکه‌های ۱۴، ۳۰ و ۵۷ باس IEBE می‌باشند. **واژه‌های کلیدی** پایداری ولتاژ، امنیت ولتاژ، پارامتر انحراف

Perturbation Method Based Evaluation of

Power System Voltage Security

A. A. Gharaveici

M. H. Javidi

Abstract Security in stressed power systems is seriously affected by voltage collapse phenomena. This paper proposes a new algorithm for determining the voltage security margin. The algorithm is based on the perturbation method and has a very high computation efficiency. Therefore, it can be used for on line voltage evaluation. The proposed approach has been validated using IEEE 14, 30 and 57 buses systems.

Key Words Voltage Stability, Voltage Security, Perturbation Parameter

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۷۹/۶/۳۰ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۰/۲/۱۹ به دفتر نشریه رسیده است.

۱ - دانشجوی دکتری برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی "مشهد"

۲ - استادیار انرژی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی "مشهد" www.SID.ir

مقدمه

اگرچه طراحان سیستم‌های قدرت برای طراحی سیستمی «خوب» بر اساس فرضیات مهندسی تلاش فراوانی نموده‌اند، با وجود این در اثر وقوع برخی حوادث پیش بینی نشده عملکرد سیستم دچار اختلال می‌گردد و حتی سیستم تا خاموشی کامل پیش می‌رود. از این رو، امنیت یک سیستم قدرت از جمله مسائل مهم در بهره‌برداری از آن است که بر کیفیت تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی تأثیرات تعیین کننده‌ای دارد.

امروزه بخاطر رشد فزاینده بارهای الکتریکی و عملکرد مطمئن پایدار کننده‌های سیستم‌های قدرت (Power Systems Stabilizers)، از این سیستم‌ها در نزدیکی مرزهای پایداری توان-زاویه بهره‌برداری می‌شود [۱]. اصطلاحاً سیستم‌هایی را که در نزدیکی مرزهای پایداری توان-زاویه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، سیستم‌های قدرت تحت فشار (Stressed Power Systems) می‌نامند.

پدیده ناپایداری ولتاژ (Voltage Instability) برای امنیت سیستم‌های قدرت تحت فشار تهدیدی جدی است و یکی از اساسی‌ترین عوامل تعیین کننده مرزهای بارگذاری مطمئن سیستم‌های قدرت بشمار می‌آید. مفاهیم پایداری توان - زاویه و پایداری ولتاژ زیر مجموعه‌ای از فضای پایداری سیستم‌های قدرت هستند که می‌توان آنها را با ارائه مثالهای ساده زیر از یکدیگر تمیز داد [۲].

پایداری توان - زاویه: ژنراتور سنکرونی که از طریق یک خط با راکتانس X_L به باس بی‌نهایت متصل شده است را در نظر می‌گیریم. در مورد چنین سیستمی منظور از پایداری همان پایداری توان-زاویه است. مفهوم پایداری توان - زاویه در مقالات متعددی بررسی شده است [۳ و ۴].

پایداری ولتاژ: هرگاه سیستم مورد مطالعه ژنراتور

سنکرونی باشد که یک بار استاتیکی را از طریق خطی با راکتانس X_L تغذیه می‌کند، آنگاه مفهوم پایداری برای این سیستم همان پایداری ولتاژ است. برای تشریح مفهوم پایداری ولتاژ فرض کنید که بار بتدریج زیاد شود. با افزایش بار نقطه کار سیستم هر لحظه تغییر می‌کند تا اینکه بالاخره در نقطه‌ای قرار می‌گیرد که یک تغییر جزئی در مقدار بار سبب تغییر کلی در مشخصه سیستم می‌گردد. این نقطه مرز پایداری ولتاژ نامیده می‌شود که همان نقطه انشعاب گره-زینی (Saddle-Node Bifurcation) می‌باشد. در این نقطه ماتریس ژاکوبین معادلات پخش بار ویژه (Singular) می‌شود و یک مقدار ویژه صفر دارد [۵]. ناپایداری ولتاژ در بسیاری از سیستم‌های قدرت واقعی اتفاق افتاده است که در زیر به شماری از آنها اشاره می‌شود.

۱- فروپاشی ولتاژ غرب فرانسه در ۱۹۸۷ که باعث خروج ۹۰۰۰ MW از ژنراتورهای این سیستم رخ داد [۶].
۲- فروپاشی ولتاژ شهر توکیو در ۱۹۸۷ که بدلیل افزایش غیرعادی بار با نرخ ۴۰۰ MW/Min در ظهر یک روز گرم اتفاق افتاد [۷].

۳- بروز ناپایداری ولتاژ شبکه شمال کالیفرنیا در ۱۹۸۳، که به مدت دو دقیقه و بعثت خروج خطوط HVDC رخ داد. در این حالت فروپاشی ولتاژ اتفاق نیفتاد زیرا با قطع برخی از بارها، شبکه توانست در یک نقطه کار پایدار جدید قرار بگیرد [۸].

پایداری ولتاژ هر شبکه باید به صورت بلادرنگ (On Line) ارزیابی گردد، تا بتوان امنیت سیستم را تضمین نمود. پدیده پایداری ولتاژ در دو حالت دینامیکی و استاتیکی قابل بررسی است. در مطالعات دینامیکی پایداری ولتاژ، معادلات دیفرانسیل غیرخطی تحلیل می‌شود اما در مطالعات استاتیکی پایداری ولتاژ، قابل حل

اطلاعات بانک داده‌های VSA حوادث بحرانی انتخاب می‌شوند.

مرحله رتبه‌بندی. در اینجا حوادث با توجه به شدت آنها مرتب می‌شوند.

مرحله ارزیابی. در اینجا با استفاده از لیست تهیه شده در مرحله رتبه‌بندی، حوادث بطور دقیق ارزیابی می‌شوند.

مرحله اصلاح و پیشگیری. در این مرحله استراتژیهای اصلاحی مانند پخش بهینه توان راکتیو پس از وقوع حادثه یا استراتژیهای پیشگیرانه نظیر قطع اضطراری بار قبل از بروز حادثه بر سیستم قدرت اعمال می‌گردند.

برای تعیین مرز پایداری ولتاژ یا نقطه انشعاب گره-زینی، همه روشهای تحقیقاتی مطرح شده در یکی از دو گروه زیر قرار می‌گیرند:

۱- روشهای مستقیم [۱۱ و ۱۰]

۲- روشهای غیرمستقیم [۱۲ و ۱۳]

در روشهای مستقیم روابطی متناظر با شرایط سیستم قدرت در نقطه گره-زینی به معادلات پخش بار اضافه می‌شوند و با حل دسته معادلات حاصل نقطه گره-زینی بدست می‌آید.

در روشهای غیرمستقیم با استفاده از یک جواب پخش بار، بطور مداوم جوابهای دیگری از سیستم بدست می‌آیند تا اینکه سیستم قدرت به مرز پایداری برسد.

یکی از روشهای غیر مستقیم روش پخش بار مداوم

(Continuation Power Flow) است [۱۳]. در این روش

روش (CPF) با انتخاب یک پارامتر و تغییر تدریجی آن

نقطه انشعاب سیستم قدرت شناسایی می‌گردد. در این مقاله

با استفاده از نظریه انحراف (Perturbation Theory)

روش جدیدی برای ارزیابی امنیت ولتاژ سیستم‌های قدرت

ارائه می‌شود. با توجه به انعطاف‌پذیری این روش براحتی

می‌توان توسط آن با سرعت بسیار بالایی فاصله نقطه کار

بودن معادلات جبری پخش بار بررسی می‌گردند.

با توجه به اهمیت پایداری ولتاژ ضرورت دارد که برای

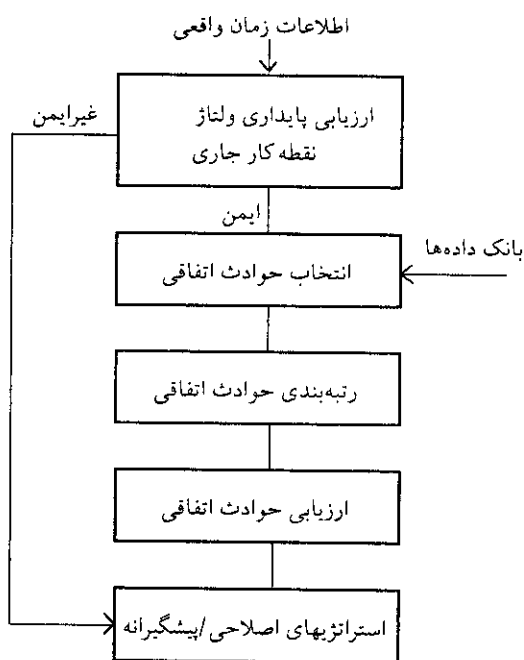
ارزیابی امنیت ولتاژ (Voltage Security Assessment)

سیستم‌های قدرت، ابزاری را به سیستم مدیریت انرژی

(Energy Management System) اضافه کرد. این ابزار را

محیط ارزیابی ولتاژ (VSA Environment) می‌نامند [۹] و

شامل پنج مرحله است که در شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱ محیط ارزیابی ولتاژ

در ادامه این مراحل تعریف می‌شوند:

مرحله ارزیابی نقطه کار جاری. این ارزیابی با استفاده

از آنالیز حساسیت مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین انجام

می‌شود. اگر یکی از مقادیر ویژه این ماتریس صفر باشد،

معنایش این است که سیستم در مرز پایداری ولتاژ قرار

دارد.

با توجه به شرایط نقطه کار و www.SID.ir **مرحله انتخاب حوادث.**

- $Q_{Di} = Q_{Di0} + \lambda (K_{Di} S_{\Delta base} \sin \theta_i)$
 $P_{Gi} = P_{Gi0} (1 + \lambda K_{Gi})$
 K_{Gi} : ضریب مشخص‌کننده مقدار تغییر تولید باس-i ام
 P_{Gi0} : توان حقیقی تولیدی باس-i ام در حالت پایه
 Q_{Di0} : توان موهومی مصرفی باس-i ام در حالت پایه
 P_{Di0} : توان حقیقی مصرفی باس-i ام در حالت پایه
 K_{Di} : ضریب مشخص‌کننده مقدار تغییر بار باس-i ام
 θ : زاویه ضریب توان تغییر بار باس-i ام
 V_i : ولتاژ باس-i ام
 $S_{\Delta base}$: توان ظاهری پایه مربوط به پارامتر λ
 y_{ik} : عنصر (i,k) از ماتریس y_{bus}
 $G_{ik} = \text{real}(y_{ik})$ $e_i = \text{real}(V_i)$
 $B_{ik} = \text{imag}(y_{ik})$ $f_i = \text{imag}(V_i)$
 بنابراین معادلات پارامتری پخش بار برای باس-i ام با ترکیب روابط بالا بدست می‌آیند.

پخش بار مداوم

در ارزیابی پایداری استاتیکی ولتاژ سیستم‌های قدرت معادلات پخش بار حل می‌شوند. در مرز پایداری ولتاژ، ماتریس ژاکوبین سیستم منفرد بوده و از این رو در نزدیکی این نقطه حل عددی معادلات پخش بار واگرا می‌شود. یکی از روشهای مرتفع کردن این مشکل استفاده از روش CPF بجای پخش بار معمولی است. معادلات بکار رفته در CPF همان فرم پارامتری معادلات پخش بار می‌باشند. در ادامه این روش بررسی می‌شود.

الگوریتم پخش بار مداوم. در روش CPF برای حل معادلات پارامتری پخش بار و ارزیابی مرزهای پایداری از تکنیک پارامتری کردن محلی مداوم (LPC) استفاده می‌شود [۱۴]. بدین ترتیب که از جواب حالت پایه معادلات پخش بار یعنی $(V_i, \delta_i, \lambda_i)$

سیستم را تا مرز پایداری ولتاژ تعیین نمود. برای آزمایش روش جدید، سیستم‌های قدرت ۱۴، ۳۰ و ۵۷ باس IEEE در نظر گرفته می‌شوند. همچنین روش پیشنهادی در این مقاله با روش CPF مقایسه می‌گردد.

نمایش معادلات سیستم قدرت

معادلات پخش بار معمولی سیستم‌های قدرت را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$F(\delta, V) = 0 \quad (1)$$

رابطه (۱) که دارای $n_p + 2n_q$ مجهول و همان تعداد معادله است که:

تعداد باسهای PV: n_p و تعداد باسهای PQ: n_q

δ و V نیز به ترتیب زاویه ولتاژ و اندازه ولتاژ باسهای سیستم هستند.

در مطالعات ارزیابی امنیت ولتاژ فرم پارامتری معادلات پخش بار استفاده می‌شوند. برای بدست آوردن فرم پارامتری معادلات پخش بار، پارامتر بار λ در معادلات پخش بار معمولی به صورت زیر وارد می‌شود:

$$F(\delta, V, \lambda) = 0 \quad \text{و} \quad \lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_{critical} \quad (2)$$

در رابطه (۲) تعداد معادلات $n_p + 2n_q$ و تعداد مجهولات یکی بیشتر از تعداد معادلات، یعنی $n_p + 2n_q + 1$ می‌باشند و $\lambda = 0$ شرایط بار حالت پایه (Base Case) و $\lambda = \lambda_{critical}$ شرایط بار بحرانی یا نقطه انشعاب گره-زینی را نشان می‌دهند.

با وارد کردن λ در فرم دکارتی معادلات پخش بار، برای باس-i ام چنین بدست می‌آید:

$$P_{Gi} - P_{Di} - P_{Ti} = 0 \quad (3)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_{Ti} = 0 \quad (4)$$

$$P_{Ti} = \sum_k G_{ik} (e_i e_k + f_i f_k) + \sum_k B_{ik} (e_k f_i - e_i f_k)$$

$$Q_{Ti} = \sum_k G_{ik} (e_k f_i - e_i f_k) - \sum_k B_{ik} (e_i e_k + f_i f_k)$$

$$P_{Di} = P_{Di0} + \lambda (K_{Di} S_{\Delta base} \cos \theta_i) \quad \text{www.SID.ir}$$

k-امین عنصر t) چنین بدست می‌آید:

$$[F_{\delta}, F_V, F_{\lambda}] t = 0 \quad \text{و} \quad t_k = \pm 1 \quad (8)$$

حال با حل صریح دستگاه (8) جوابهای مرحله پیش بینی به صورت زیر خواهند بود:

$$\delta^* = \delta + \sigma d\delta \quad (9-الف)$$

$$V^* = V + \sigma dV \quad (9-ب)$$

$$\lambda^* = \lambda + \sigma d\lambda \quad (9-ج)$$

که بالانویس * مربوط به جوابهای مرحله پیش بینی و σ گام این مرحله است. مقدار σ طوری انتخاب می‌شود که جوابهای مرحله پیش بینی در شعاع همگرایی مرحله تصحیح واقع شوند [15].

مرحله تصحیح‌گر و پارامتری کردن. جواب مرحله پیش بینی خارج از منحنی $V-\lambda$ است. در مرحله تصحیح این جواب اصلاح شده و نقطه $(V_1, \delta_1, \lambda_1)$ که بر منحنی $V-\lambda$ قرار دارد، بدست می‌آید. تعداد مجهولات این مرحله نیز یکی بیشتر از تعداد معادلات می‌باشد. بردار مجهولات به صورت زیر است:

$$X = [\delta, v, \lambda]^T \quad (10)$$

برداری با طول $2n_1 + n_2 + 1$

بسا معلوم شدن یکی از متغیرهای بردار X (مثلاً $x_k = \mu$) و حل دسته معادلات زیر بروش نیوتن-رافسون جواب مرحله تصحیح بدست می‌آید.

$$F(X) = 0 \quad (11-الف)$$

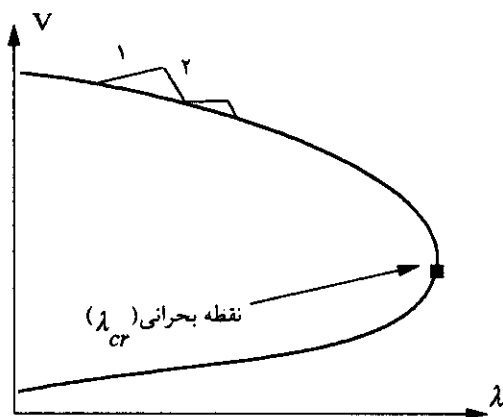
$$x_k - \mu = 0 \quad (11-ب)$$

در روش LPC، در هر مرحله تصحیح ممکن است یکی از متغیرهای بردار X معلوم باشد. این متغیر را پارامتر تداوم (Continuation Parameter) گویند. مولفه‌ای از t که دارای بیشترین مقدار باشد متناظر با پارامتر تداوم خواهد بود. بنابراین، پارامتر تداوم همان متغیر معلوم مرحله پیش بینی است و به صورت زیر تعیین می‌شود:

جوابهای پایایی دیگری به صورت $(V_1, \delta_1, \lambda_1)$ ، $(V_2, \delta_2, \lambda_2)$ و ... بدست می‌آیند $(\lambda_2 < \lambda_1 < \lambda_0)$. شکل (2) مراحل کار را نشان می‌دهد. پخش بار مداوم شامل دو زیر مرحله است:

الف- مرحله پیش‌بینی (Predicting)

ب- مرحله تصحیح‌گر و پارامتری کردن



شکل 2 طرح پخش بار مداوم (1: پیش‌بینی و 2: تصحیح)

مرحله پیش‌بینی. در این مرحله با شروع از حالت پایه در راستای بردار مماس بر منحنی $V-\lambda$ یک جواب تقریبی برای معادلات پخش بار پارامتری بدست می‌آید. بنابراین اولین قدم در مرحله پیش‌بینی محاسبه بردار مماسی است. با دیفرانسیل‌گیری از طرفین (2) چنین بدست می‌آید:

$$dF = F_{\delta} d\delta + F_V dV + F_{\lambda} d\lambda \quad (5)$$

پس از فاکتورگیری چنین بدست می‌آید:

$$[F_{\delta}, F_V, F_{\lambda}] t = 0 \quad (6)$$

$$t = [d\delta, dV, d\lambda]^T \quad (7)$$

که $[F_{\delta}, F_V, F_{\lambda}]$ به ترتیب دارای ابعاد $(2n_1 + n_2) \times (2n_1 + n_2 + 1)$ و $(2n_1 + n_2) \times 1$ هستند. بدین ترتیب، بردار مماسی t (مثلاً

شرح روش پیشنهادی

در ارزیابی امنیت ولتاژ باید معادلات پارامتری پخش بار به ازای افزایش λ از λ_0 (مقدار پارامتر بار در حالت پایه) تا λ_{cr} (مقدار بحرانی پارامتر بار) حل شوند. اندازه λ_{cr} - معیاری از حاشیه امنیت ولتاژ سیستم قدرت می‌باشد. دسته معادلات پارامتری پخش بار شامل $2n_1 + n_2 + 1$ معادله و $2n_1 + n_2 + 1$ مجهول است. بنابراین تعداد معادلات یکی کمتر از تعداد مجهولات می‌باشد. در این مقاله با استفاده از تئوری انحراف روش جدیدی مطرح می‌گردد که با انتخاب یکی از مجهولات به عنوان پارامتر انحراف (Perturbation Parameter) امکان دستیابی به جوابهای دیگر معادلات پخش بار پارامتری فراهم می‌شود. تئوری انحراف به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۶]:

معادله زیر را در نظر بگیرید.

$$f(x, \varepsilon) = 0 \quad (13)$$

در این رابطه که آنرا یک معادله جبری انحراف یافته گویند، $\varepsilon < 1$ و پارامتر انحراف نامیده می‌شود. هرگاه در (۱۳) پارامتر انحراف را صفر قرار دهیم معادله زیر بدست می‌آید:

$$f(x) = 0 \quad (14)$$

اگر جواب معادله (۱۴) برابر x_0 باشد، آنگاه جواب (۱۳) بر حسب ε به صورت زیر خواهد بود:

$$x = x_0 + \sum_{k=1}^{\infty} x_k \varepsilon^k \quad (15)$$

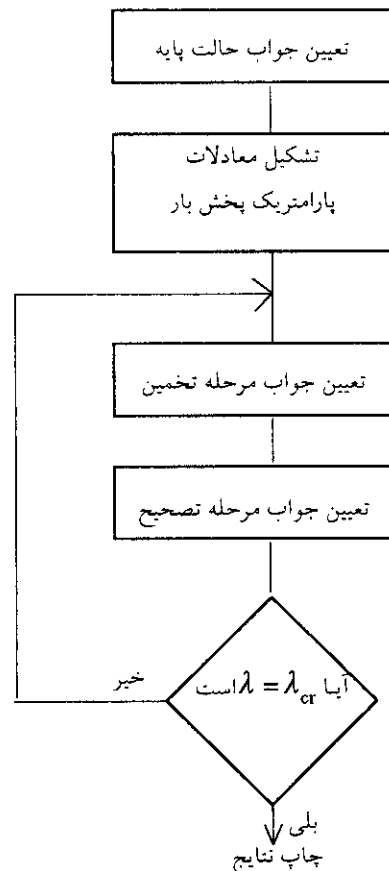
برای یافتن x_k ها بجای x از رابطه (۱۵) در (۱۳) قرار داده و ضرایب توانهای مختلف پارامتر انحراف ε را برابر با صفر می‌گیریم. با توجه به کوچک بودن پارامتر ($\varepsilon < 1$) می‌توان x را به صورت زیر نوشت:

$$x \approx x_0 + \sum_{k=1}^p x_k \varepsilon^k \quad (16)$$

در معادله (۱۶) از جملات با توانهای بیشتر از m چشم‌پوشی است.

$$\mu = \{ x_k : |t_k| = MAX, 2 \leq k \leq 2n_1 + n_2 + 1 \} \quad (12)$$

پارامتر تداوم μ در شروع کار همان λ است. اما در مراحل بعدی اندازه ولتاژ یا زاویه ولتاژ باسها هم می‌تواند باشد. با نزدیک شدن به مرز پایداری ولتاژ (نقطه انشعاب گره-زینی) $\Delta \lambda = 0$ و λ بیشترین مقدار را دارد. با عبور از نقطه بحرانی نرخ تغییرات λ منفی شده و λ کاهش می‌یابد. از این رو $\Delta \lambda$ می‌تواند معیاری برای تشخیص مرز پایداری ولتاژ باشد. شکل (۳) فلوچارت CPF را نشان می‌دهد.



$$A_{i,i} = \sum_{j \neq i} (G_{ij}e_{j,o} - B_{ij}f_{j,o}) + (G_{ii}e_{i,o} + B_{ii}f_{i,o}) + G_{i1}e_1$$

$$A_{i,j} = G_{ij}e_{i,o} + B_{ij}f_{i,o}$$

$$B_{i,i} = \sum_{j \neq i} (G_{ij}f_{j,o} + B_{ij}e_{j,o}) + (G_{ii}f_{i,o} - B_{ii}e_{i,o}) + B_{i1}e_1$$

$$B_{i,j} = G_{ij}f_{i,o} - B_{ij}e_{i,o}$$

$$C_{i,i} = -\sum_{j \neq i} (G_{ij}f_{j,o} + B_{ij}e_{j,o}) + (G_{ii}f_{i,o} + B_{ii}e_{i,o}) - B_{i1}e_1$$

$$C_{i,j} = G_{ij}f_{i,o} - B_{ij}e_{i,o}$$

$$D_{i,i} = \sum_{j \neq i} (G_{ij}e_{j,o} - B_{ij}f_{j,o}) - (G_{ii}e_{i,o} + B_{ii}f_{i,o}) + G_{i1}e_1$$

$$D_{i,j} = -G_{ij}e_{i,o} - B_{ij}f_{i,o}$$

$$\alpha_{i,1} = K_{Gi} - K_{Di}$$

$$\beta_{i,1} = -K_{Di} \tan \theta_i$$

$$\alpha_{i,q} = -\sum_{j \neq i} \{ G_{ij} \sum_{q=1}^{p-1} (e_{i,q}e_{j,p-q} + f_{i,q}f_{j,p-q}) + B_{ij} \sum_{q=1}^{p-1} (e_{j,q}f_{i,p-q} - e_{i,q}f_{j,p-q}) \}$$

$$\beta_{i,q} = -\sum_{j \neq i} \{ G_{ij} \sum_{q=1}^{p-1} (e_{j,q}f_{i,p-q} - e_{i,q}f_{j,p-q}) - B_{ij} \sum_{q=1}^{p-1} (e_{i,q}e_{j,p-q} + f_{i,q}f_{j,p-q}) \}$$

قضیه ۲: هرگاه در فرم دکارتی معادلات پارامتری بخش بار (یعنی روابط (۳) و (۴)) پارامتر انحراف تغییرات قسمت حقیقی ولتاژ باس بحرانی باشد که به صورت

مبانی ریاضی روش پیشنهادی

قضیه ۱: فرم دکارتی معادلات پارامتری بخش بار یعنی روابط (۳) و (۴) را در نظر بگیرید. اگر $\varepsilon_\lambda = \Delta \lambda$ پارامتر انحراف باشد آنگاه قسمتهای حقیقی و موهومی ولتاژ باسها از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$e_i = e_{i,o} + e_{i,1} \varepsilon_\lambda + e_{i,2} \varepsilon_\lambda^2 + \dots + e_{i,p_1} \varepsilon_\lambda^{p_1} \quad (17)$$

$$f_i = f_{i,o} + f_{i,1} \varepsilon_\lambda + f_{i,2} \varepsilon_\lambda^2 + \dots + f_{i,p_1} \varepsilon_\lambda^{p_1} \quad (18)$$

$$i = 2, 3, \dots, n$$

که $e_{i,o}$ و $f_{i,o}$ به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی ولتاژ باس نام در حالت پایه و $e_{i,1}$ تا e_{i,p_1} و $f_{i,1}$ تا f_{i,p_1} از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} E_q \\ F_q \end{bmatrix} = J_o^{-1} \begin{bmatrix} \alpha_q \\ \beta_q \end{bmatrix} \quad (19)$$

$q = 1, 2, 3, \dots, p_1$

$$J_o = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$E_q = \begin{bmatrix} e_{2,q} \\ \vdots \\ e_{n,q} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$F_q = \begin{bmatrix} f_{2,q} \\ \vdots \\ f_{n,q} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\alpha_q = \begin{bmatrix} \alpha_{2,q} \\ \vdots \\ \alpha_{n,q} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\beta_q = \begin{bmatrix} \beta_{2,q} \\ \vdots \\ \beta_{n,q} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$H_i = G_{\text{indx},i} e^* + B_{\text{indx},i} f_{\text{indx},o} \text{ و } i \neq \text{indx}$$

$$J_i = G_{\text{indx},i} f_{\text{indx}} - B_{\text{indx},i} e^* \text{ و } i \neq \text{indx}$$

$$J_{\text{indx}} = \sum_{j \neq 1} (G_{\text{indx},j} f_{j,o} + B_{\text{indx},j} e_{j,o}) + (G_{\text{indx},\text{indx}} f_{\text{indx},o} - B_{\text{indx},\text{indx}} e^*)$$

$$L = K_{D,\text{indx}} - K_{G,\text{indx}}$$

α'_q ، β'_q و γ_q به ازای $q=1$ عبارتند از:

$$\alpha'_{1,i} = G_{i,\text{indx}} e_{i,o} + B_{i,\text{indx}} f_{i,o} \text{ و } i \neq \text{indx}$$

$$\beta'_{1,i} = G_{i,\text{indx}} f_{i,o} - B_{i,\text{indx}} e_{i,o} \text{ و } i \neq \text{indx}$$

$$\beta'_{1,\text{indx}} = -\sum_{j \neq 1} (G_{\text{indx},j} f_{j,o} + B_{\text{indx},j} e_{j,o}) + (G_{\text{indx},\text{indx}} f_{\text{indx},o} - B_{\text{indx},\text{indx}} e^*) - B_{\text{indx},1} e_1$$

$$\gamma_{1,\text{indx}} = \sum_{j \neq 1} (G_{\text{indx},j} e_{j,o} - B_{\text{indx},j} f_{j,o}) + (G_{\text{indx},\text{indx}} e^* + B_{\text{indx},\text{indx}} f_{\text{indx}}) + G_{\text{indx},1} e_1$$

و برای $q > 1$ ($q=2, \dots, p$) به صورت زیر هستند:

$$\alpha'_{i,q} = -\sum_{j \neq 1,i} \left\{ G_{ij} \sum_{q=1}^{p-1} (e_{i,q} e_{j,p-q} + f_{i,q} f_{j,p-q}) + B_{ij} \sum_{q=1}^{p-1} (e_{i,q} f_{j,p-q} - e_{i,q} f_{j,p-q}) \right\} - G_{i,\text{indx}} \sum_{q=1}^{p-1} (f_{\text{indx},q} f_{i,p-q} - e_{i,p-1}) + B_{i,\text{indx}} \sum_{q=1}^{p-1} (f_{i,q} e_{\text{indx},p-q} + f_{i,p-1})$$

$$\beta'_{i,q} = -\sum_{j \neq 1,i} \left\{ G_{ij} \sum_{q=1}^{p-1} (e_{j,q} f_{i,p-q} - e_{i,q} f_{j,p-q}) - B_{ij} \sum_{q=1}^{p-1} (e_{i,q} e_{j,p-q} + f_{i,q} f_{j,p-q}) \right\} + G_{i,\text{indx}} \sum_{q=1}^{p-1} (e_{i,q} f_{\text{indx},p-q} + f_{i,p-1}) + B_{i,\text{indx}} \sum_{q=1}^{p-1} (f_{\text{indx},q} f_{i,p-q} - e_{i,p-1})$$

$e_{\text{indx}} = e^* - \varepsilon_{\text{indx}}$ تعریف می‌شود. آنگاه قسمت‌های حقیقی و موهومی و لتاز باسها و پارامتر بار λ از روابط زیر بدست می‌آیند: ($\varepsilon_e = \varepsilon_{e_{\text{indx}}}$)

$$e_i = e_{i,o} + e_{i,1} \varepsilon_e + e_{i,2} \varepsilon_e^2 + \dots + e_{i,p} \varepsilon_e^p \quad (25)$$

$i \neq \text{indx}, i = 2, 3, \dots, n$

$$f_i = f_{i,o} + f_{i,1} \varepsilon_e + f_{i,2} \varepsilon_e^2 + \dots + f_{i,p} \varepsilon_e^p \quad (26)$$

$i = 2, 3, \dots, n$

$$\lambda = \lambda_o + \lambda_1 \varepsilon_e + \lambda_2 \varepsilon_e^2 + \dots + \lambda_p \varepsilon_e^p \quad (27)$$

که λ_o بار پایه، $e_{i,o}$ و $f_{i,o}$ به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی و لتاز باس i ام در حالت پایه و $e_{i,p}$ تا $e_{i,1}$ و $f_{i,p}$ تا $f_{i,1}$ از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} E'_q \\ F'_q \\ \lambda'_q \end{bmatrix} = (J_o)^{-1} \begin{bmatrix} \alpha'_q \\ \beta'_q \\ \gamma_q \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$q = 1, 2, 3, \dots, p$$

$$J_o = \begin{bmatrix} A' & B' & M \\ C' & D' & N \\ H & J & L \end{bmatrix} \quad (29)$$

E_k با حذف متغیر e_{indx} در E_K تعریف می‌شود. اگر سطر و ستون indx را در A حذف کنیم A' بدست می‌آید. با حذف سطر indx در B ماتریس B' ساخته می‌شود و با حذف ستون indx در C ماتریس C' بدست می‌آید.

همچنین:

$$D' = D$$

$$M_i = K_{Di} - K_{Gi} \text{ و } i \neq \text{indx}$$

$$N_i = K_{Di} \text{ TAN } \theta_i$$

رابطه زیر برای تشخیص باس بحرانی استفاده می‌کنیم:

$$\text{indx} = \{i: \left| \frac{\Delta v_i}{\Delta \lambda} \right| = \text{MAX}, 2 \leq i \leq 2n_1 + n_2 + 1\} \quad (30)$$

ضمناً در الگوریتم پیشنهادی با توجه به شیب منحنی $v-\lambda$ ($\frac{\Delta v_{\text{indx}}}{\Delta \lambda}$) پارامتر انحراف از ε_λ به $\varepsilon_{\text{indx}}$ تغییر می‌یابد. فلوجارت این روش در شکل (۴) نشان داده است. در فلوجارت شکل (۴)، Z^* شبی از منحنی $v-\lambda$ است که پارامتر انحراف از ε_λ به $\varepsilon_{\text{indx}}$ تغییر می‌یابد. Z_{cr} شیب منحنی $v-\lambda$ در نقطه انشعاب گره-زینی است که متناظر با بیشترین مقدار پارامتر بار (λ_{cr}) بوده و از این نقطه به بعد λ کم می‌شود.

بررسی سیستم‌های استاندارد IEEE

با استفاده از روش پیشنهاد شده در این مقاله، پایداری ولتاژ شبکه‌های استاندارد ۱۴ و ۳۰ و ۵۷ باس IEEE ارزیابی می‌شوند [۱۷]. در این شبیه‌سازیها محدودیت تولید توان راکتیو باسهای کنترل ولتاژ نیز در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) ولتاژ باسهای شبکه ۱۴ باس IEEE به‌ازای افزایش بار سیستم به میزان ۱ p.u. نسبت به حالت پایه را نشان می‌دهد. دو حالت از روش پیشنهادی برای ردیابی جوابهای شبکه ۱۴ باس تا افزایش بار به مقدار ۱ p.u. شبیه‌سازی شده‌اند. پارامتر انحراف $\varepsilon_\lambda = 0/25$ در حالت اول و $\varepsilon_\lambda = 0/1$ در حالت دوم می‌باشد. در هر یک از این دو حالت نیز به‌ازای سه مقدار p_1 (۵، ۶ و ۷) نتایج سیستم ۱۴ باس در جدول (۱) درج شده است. همچنین حل دقیق (روش CPF) به‌ازای پارامتر تداوم $\Delta \lambda = 0/2$ در آخرین ستون جدول (۱) دیده می‌شود. با استفاده از روش پیشنهادی در حالت اول پس از چهار مرحله تکرار و در حالت دوم پس از ده مرحله تکرار جوابهای سیستم بدست می‌آیند. زیرا با توجه به الگوریتم روش که در بخش قبل ارائه شده، در هر بار تکرار فقط یک مرحله

$$\gamma_q = - \sum_{j \neq 1, i} \{ G_{\text{indx}j} \sum_{q=1}^{P-1} (f_{i,q} f_{j,p-q} - e_{j,p-1}) + B_{\text{indx}j} \sum_{q=1}^{P-1} (e_{j,q} f_{\text{indx},p-q} + f_{j,p-1}) \} - G_{\text{indx},\text{indx}} \sum_{q=1}^{P-1} f_{\text{indx},q} f_{\text{indx},p-q}$$

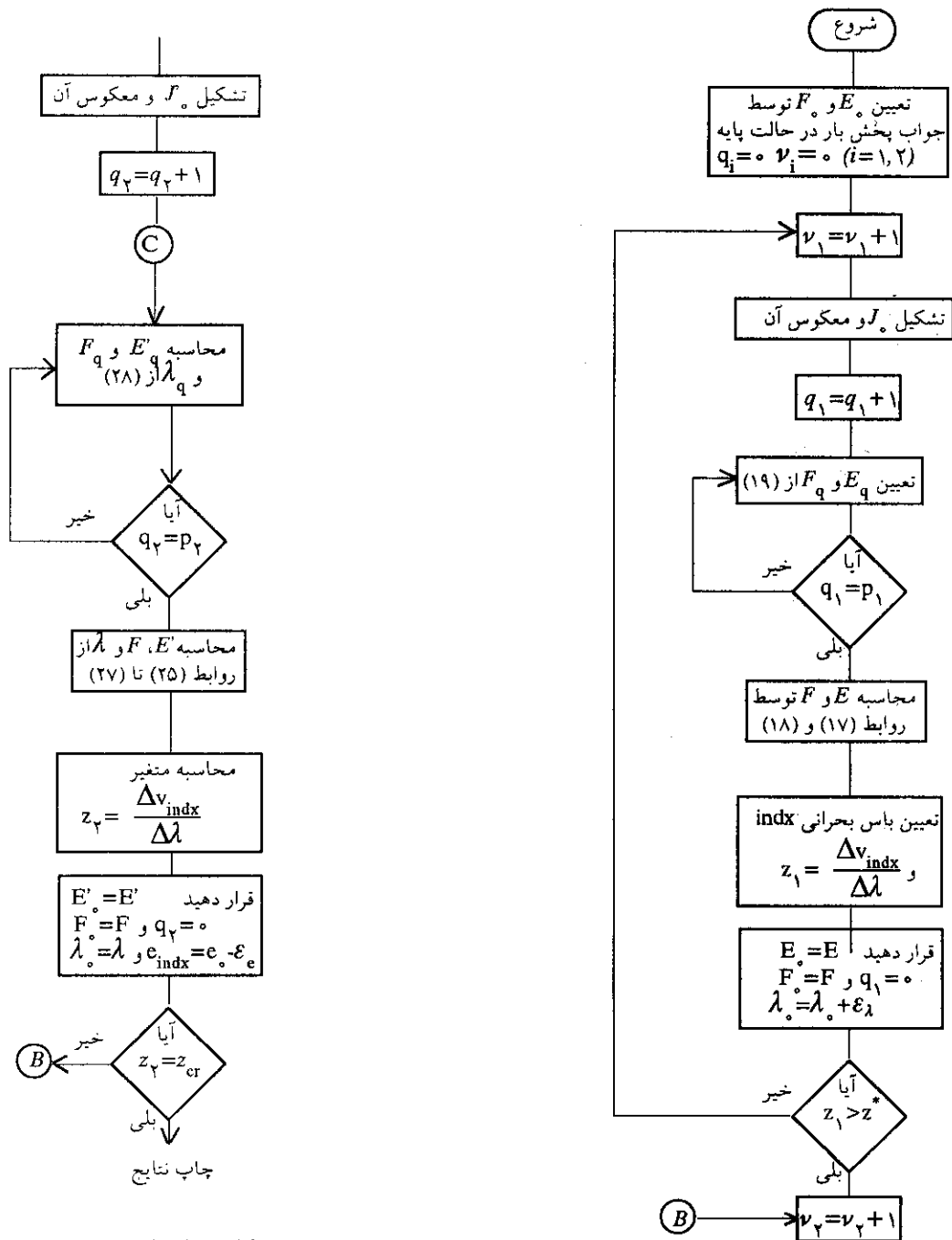
همچنین $\beta'_{\text{indx},q}$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta'_{\text{indx},q} = - \sum_{j \neq 1, i} \{ G_{\text{indx}j} \sum_{q=1}^{P-1} (e_{j,q} f_{\text{indx},p-q} + f_{j,p-1}) - B_{\text{indx}j} \sum_{q=1}^{P-1} (f_{\text{indx},q} f_{j,p-q} - e_{j,p-1}) \} + B_{\text{indx},\text{indx}} \sum_{q=1}^{P-1} f_{\text{indx},q} f_{\text{indx},p-q}$$

برای اثبات قضایای فوق کافی است که ابتدا متغیرهای تعریف شده در (۱۷) و (۱۸) یا (۲۵) تا (۲۷) را در فرم دکارتی معادلات بخش بار پارامتری (یعنی روابط (۳) و (۴)) قرار داده، سپس ضرایب مربوط به توانهای پارامتر انحراف را از ۱ تا p برابر صفر قرار دهیم [۱۸].

الگوریتم روش پیشنهادی. برای ارزیابی پایداری ولتاژ یک سیستم قدرت با توجه به نتایج قضیه ۱ از نقطه کار پایه شروع نموده و با مقدار دادن پارامتر انحراف ε_λ مقدار بار را افزایش می‌دهیم. در حوالی مرز پایداری ولتاژ ماتریس J (رابطه (۲۰)) میل به منفرد شدن دارد. بنابراین برای آنکه بتوان دقیقاً به مرز پایداری ولتاژ دست یافت قبل از نقطه انشعاب گره-زینی پارامتر انحراف را از ε_λ به $\varepsilon_{\text{indx}}$ (باس بحرانی است) تغییر می‌دهیم. با توجه به نتایج قضیه ۲ و باکم کردن قسمت حقیقی ولتاژ باس بحرانی مرز پایداری ولتاژ را محاسبه می‌کنیم. در اینجا دو سوال مهم مطرح می‌شود که عبارتند از:

- ۱- باس بحرانی چگونه شناسایی می‌شود؟
 - ۲- چه هنگام پارامتر انحراف از ε_λ به $\varepsilon_{\text{indx}}$ تغییر می‌کند؟
- باسی که بیشترین "نسبت افت ولتاژ به تغییر بار" را دارد. باس بحرانی در نظر گرفته می‌شود و بنابراین از



شکل ۴. فلوچارت روش جدید

بنابراین سرعت روش پیشنهادی از بخش بار مداوم بیشتر است. نتایج نشان می‌دهند که خطای جوابهای روش جدید نسبت به جوابهای دقیق (روش CPF) بسیار ناچیز بوده و با افزایش P_1 براحتی می‌توان آنرا کمتر هم کرد. یکی از

مرحله تصحیح) معکوس سازی ماتریس نیاز می‌باشد. معکوس سازی ماتریس انجام می‌شود. با روش CPF نیز پس از چهار بار تکرار جوابها بدست می‌آیند و در هر بار تکرار بین ۴ تا ۸ مرحله (یک مرحله تخمین و بین ۳ تا ۷

افزایش بار به مقدار $\epsilon_{\lambda} = 0/05$ کاهش می‌یابد. پس از آنکه رشد بار به $1/3 p.u.$ رسید پارامتر انحراف از ϵ_{λ} به $\epsilon_{\lambda} = 0/1$ تغییر می‌کند. در ابتدا $0/05$ بوده اما در هر یک از سه حالت روش پیشنهادی به مقادیر $0/05$ ، $0/1$ و $0/05$ می‌رسد. برای رسیدن به جواب دقیق با روش CPF حداقل مقدار پارامتر تداوم را $0/01$ انتخاب کرده‌ایم. در صد خطای نسبی در تعیین پارامتر بار در نقطه گره-زینی برای هر یک از حالت‌های روش پیشنهادی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & 1/25\% = 100 \times \frac{1/4197 - 1/5187}{1/5187} \\ & 0/3\% = 100 \times \frac{1/5141 - 1/5187}{1/5187} \\ & 0/04\% = 100 \times \frac{1/5181 - 1/5187}{1/5187} \end{aligned}$$

همانگونه که دیده می‌شود در حالت سوم خطا تقریباً صفر می‌باشد. در نتیجه با تنظیم پارامتر انحراف ϵ_{indx} در الگوریتم پیشنهادی می‌توان جواب دقیقتری بدست آورد.

مشکلات روش CPF آن است که شرط همگرایی الگوریتم در مرحله تصحیح انتخاب مناسب طول گام مرحله تخمین است. لیکن در روش پیشنهادی با توجه به یک مرحله‌ای بودن الگوریتم این مشکل وجود نداشته و تنها شرط در همگرایی روش جدید آن است که پارامتر انحراف از یک کمتر باشد ($\epsilon < 1$). هرچه پارامتر انحراف بزرگتر باشد (و کمتر از یک) برای داشتن جواب‌های با تقریب کمتر باید توان‌های بالاتری از p_1 را در نظر گرفت. البته با نزدیک شدن به نقطه گره-زینی و برای تعیین دقیق آن پارامتر انحراف کوچکتر می‌شود.

جدول (۲) ولتاژ باس‌های شبکه ۱۴ باس IEEE در نقطه گره-زینی را نشان می‌دهد. نتایج سه حالت مختلف روش پیشنهادی در جدول نشان داده شده است. در هر سه حالت پارامتر انحراف از ابتدا $\epsilon_{\lambda} = 0/1$ بوده و پس از $1 p.u.$

جدول ۱ ولتاژ باس‌های شبکه IEEE-۱۴ به ازای ۱ p.u. افزایش بار بالگوی بار پایه

روش CPF	روش جدید ($\epsilon_{\lambda} = 0/1$)			روش جدید ($\epsilon_{\lambda} = 0/25$)			شماره باس
	$p_1 = 7$	$p_1 = 6$	$p_1 = 5$	$p_1 = 7$	$p_1 = 6$	$p_1 = 5$	
$\Delta \lambda = 0/2$	$1/06 < 0$	$1/06 < 0$	$1/06 < 0$	$1/06 < 0$	$1/06 < 0$	$1/06 < 0$	۱
	$0/9823 < -06/691$	$0/9823 < -06/691$	$0/9823 < -06/691$	$0/9823 < -06/691$	$0/9823 < -06/691$	$0/9823 < -06/691$	۲
	$0/8635 < -19/146$	$0/8635 < -19/146$	$0/8635 < -19/146$	$0/8635 < -19/146$	$0/8635 < -19/146$	$0/8635 < -19/146$	۳
	$0/9010 < -15/126$	$0/9010 < -15/126$	$0/9010 < -15/126$	$0/9010 < -15/126$	$0/9010 < -15/126$	$0/9011 < -15/126$	۴
	$0/9224 < -12/669$	$0/9224 < -12/669$	$0/9224 < -12/669$	$0/9224 < -12/669$	$0/9224 < -12/669$	$0/9224 < -12/669$	۵
	$0/8372 < -24/286$	$0/8372 < -24/286$	$0/8372 < -24/286$	$0/8372 < -24/286$	$0/8372 < -24/286$	$0/8372 < -24/286$	۶
	$0/8663 < -21/769$	$0/8663 < -21/769$	$0/8663 < -21/769$	$0/8663 < -21/769$	$0/8663 < -21/769$	$0/8663 < -21/769$	۷
	$0/9127 < -21/769$	$0/9127 < -21/769$	$0/9127 < -21/769$	$0/9127 < -21/769$	$0/9127 < -21/769$	$0/9127 < -21/769$	۸
	$0/8344 < -25/454$	$0/8344 < -25/454$	$0/8344 < -25/454$	$0/8344 < -25/454$	$0/8344 < -25/454$	$0/8344 < -25/454$	۹
	$0/8218 < -25/905$	$0/8218 < -25/905$	$0/8218 < -25/905$	$0/8218 < -25/905$	$0/8218 < -25/905$	$0/8218 < -25/905$	۱۰
	$0/8234 < -25/405$	$0/8234 < -25/405$	$0/8234 < -25/405$	$0/8234 < -25/405$	$0/8234 < -25/405$	$0/8234 < -25/405$	۱۱
	$0/8114 < -26/201$	$0/8114 < -26/200$	$0/8114 < -26/201$	$0/8114 < -26/201$	$0/8114 < -26/200$	$0/8114 < -26/200$	۱۲
	$0/8042 < -26/368$	$0/8042 < -26/368$	$0/8042 < -26/368$	$0/8042 < -26/368$	$0/8042 < -26/368$	$0/8042 < -26/368$	۱۳
	$0/7865 < -28/139$	$0/7865 < -28/139$	$0/7865 < -28/139$	$0/7865 < -28/139$	$0/7865 < -28/139$	$0/7865 < -28/138$	۱۴

جدول ۲ ولتاژ باسهای شبکه IEEE-۱۴ BUS در نقطه گره-زینی به‌ازای افزایش بار بالگوری بار پایه

شماره باس	حالت پایه	روش جدید ($\varepsilon_{e14}=0/05$)		روش جدید ($\varepsilon_{e14}=0/01$)		روش جدید*	روش CPF**
		$\lambda_{cr}=1/2997$	$\lambda_{cr}=1/5141$	$\lambda_{cr}=1/5141$	$\lambda_{cr}=1/5141$	$\lambda_{cr}=1/5181$	$\lambda_{cr}=1/5187$
۱	۱/۰۶<	۱/۰۶<	۱/۰۶<	۱/۰۶<	۱/۰۶<	$p_v=3$	$\Delta\lambda = 0/001$
۲	۱/۰۳۸۹<-۰۴/۹۱۰	۰/۸۹۰۶<-۰۷/۸۷۶	۰/۸۹۰۶<-۰۷/۸۷۶	۰/۸۹۰۶<-۰۷/۸۷۶	۰/۸۹۰۶<-۰۷/۸۷۶	۰/۸۸۱۹<-۰۷/۹۶۰	۰/۸۸۱۶<-۰۷/۹۶۱
۳	۰/۹۷۶۸<-۱۲/۲۹۷	۰/۶۸۰۲<-۲۷/۸۳۷	۰/۶۸۰۲<-۲۷/۸۳۶	۰/۶۶۱۶<-۲۸/۷۸۸	۰/۶۶۱۶<-۲۸/۷۸۸	۰/۶۶۱۹<-۲۸/۸۰۵	۰/۶۶۱۳<-۲۸/۸۳۵
۴	۱/۰۰۴۱<-۱۰/۲۹۷	۰/۷۲۵۰<-۲۰/۳۸۰	۰/۷۲۵۰<-۲۰/۳۷۹	۰/۷۰۸۱<-۲۰/۸۹۶	۰/۷۰۸۱<-۲۰/۸۹۶	۰/۷۰۸۶<-۲۰/۹۱۲	۰/۷۰۸۱<-۲۰/۹۲۷
۵	۱/۰۱۴۵<-۰۸/۷۸۳	۰/۷۶۴۱<-۱۶/۴۰۰	۰/۷۶۴۱<-۱۶/۴۰۰	۰/۷۲۸۹<-۱۶/۳۲۲	۰/۷۲۸۹<-۱۶/۳۲۲	۰/۷۴۹۵<-۱۶/۷۵۰	۰/۷۴۹۰<-۱۶/۷۵۹
۶	۰/۹۶۵۷<-۱۵/۲۱۵	۰/۵۹۸۵<-۴۰/۰۷۰	۰/۵۹۸۵<-۴۰/۰۶۹	۰/۵۷۸۰<-۴۱/۹۵۸	۰/۵۷۸۰<-۴۱/۹۵۸	۰/۵۷۹۳<-۴۱/۹۰۹	۰/۵۷۸۶<-۴۱/۹۷۱
۷	۰/۹۹۳۲<-۱۴/۰۶۱	۰/۶۳۲۴<-۳۳/۲۹۷	۰/۶۳۲۴<-۳۳/۲۹۷	۰/۶۱۳۸<-۳۴/۸۴۶	۰/۶۱۳۸<-۳۴/۸۴۶	۰/۶۱۵۰<-۳۴/۸۳۴	۰/۶۱۴۴<-۳۴/۸۷۷
۸	۱/۰۳۴۲<-۱۴/۰۶۱	۰/۶۹۵۲<-۳۳/۲۹۷	۰/۶۹۵۲<-۳۳/۲۹۷	۰/۶۷۶۳<-۳۴/۸۴۶	۰/۶۷۶۳<-۳۴/۸۴۶	۰/۶۷۷۴<-۳۴/۸۳۴	۰/۶۷۶۸<-۳۴/۸۷۷
۹	۰/۹۷۵۶<-۱۶/۰۵۴	۰/۵۷۳۲<-۴۱/۹۹۰	۰/۵۷۳۲<-۴۱/۹۸۹	۰/۵۵۱۲<-۴۴/۰۱۵	۰/۵۵۱۲<-۴۴/۰۱۵	۰/۵۵۲۸<-۴۳/۹۶۶	۰/۵۵۲۰<-۴۴/۰۳۲
۱۰	۰/۹۶۵۸<-۱۶/۲۶۱	۰/۵۵۵۶<-۴۳/۲۱۶	۰/۵۵۵۶<-۴۳/۲۱۶	۰/۵۳۲۸<-۴۵/۳۵۴	۰/۵۳۲۸<-۴۵/۳۵۴	۰/۵۳۴۴<-۴۵/۲۹۸	۰/۵۳۳۶<-۴۵/۳۶۸
۱۱	۰/۹۶۲۱<-۱۵/۹۱۴	۰/۵۶۶۷<-۴۲/۳۱۰	۰/۵۶۶۷<-۴۲/۳۱۰	۰/۵۴۴۵<-۴۴/۳۷۵	۰/۵۴۴۵<-۴۴/۳۷۵	۰/۵۴۶۰<-۴۴/۳۱۹	۰/۵۴۵۳<-۴۴/۳۸۷
۱۲	۰/۹۵۰۹<-۱۶/۲۲۱	۰/۵۵۲۱<-۴۴/۵۸۹	۰/۵۵۲۱<-۴۴/۵۸۸	۰/۵۳۰۴<-۴۶/۸۷۰	۰/۵۳۰۴<-۴۶/۸۷۰	۰/۵۳۱۹<-۴۶/۸۰۱	۰/۵۳۱۲<-۴۶/۸۷۶
۱۳	۰/۹۴۷۲<-۱۶/۳۵۷	۰/۵۳۷۸<-۴۴/۹۵۲	۰/۵۳۷۸<-۴۴/۹۵۱	۰/۵۱۶۴<-۴۷/۳۳۵	۰/۵۱۶۴<-۴۷/۳۳۵	۰/۵۱۸۰<-۴۷/۲۶۸	۰/۵۱۷۳<-۴۷/۳۴۷
۱۴***	۰/۹۴۲۶<-۱۷/۳۶۴	۰/۴۹۷۰<-۴۹/۵۲۰	۰/۴۹۷۰<-۴۹/۵۱۹	۰/۴۸۱۵<-۵۲/۵۷۸	۰/۴۸۱۵<-۵۲/۵۷۸	۰/۴۸۳۹<-۵۲/۴۹۴	۰/۴۸۳۳<-۵۲/۵۹۴

* حداقل مقدار پارامتر انحراف: $\varepsilon_{e14}=0/005$ ** حداقل مقدار پارامتر تداوم: $\Delta|V_{14}|=0/001$ *** باس بحرانی

جدول ۳ شرایط نقطه گره-زینی (λ_{cr}) سیستم‌های استاندارد IEEE

شبکه IEEE	(روش پیشنهادی) λ_{cr}	(روش CPF) λ_{cr}
۱۴ BUS	۱/۵۱۸۱	۱/۵۱۸۷
۳۰ BUS	۱/۲۸۷۰	۱/۲۸۷۹
۵۷ BUS	۳/۴۸۱۴	۳/۴۸۳۶

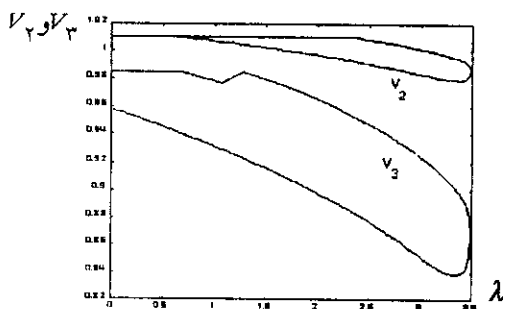
باس IEEE نشان می‌دهد. شکل‌های (۵ و ۶) نیز به ترتیب منحنی λ_{cr} باسهای بحرانی شبکه‌های ۵۷ و ۳۰ باس را که با روش جدید بدست آمده نشان می‌دهند. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی برای محاسبه جوابهای شبکه ۵۷ باس IEEE در چند نقطه از بخش زیرین منحنی λ_{cr} نیز در جدول (۴) درج شده است. ضمناً شکل (۷) منحنی λ_{cr} دو باس کنترل ولتاژ (باسهای ۲ و ۳) از شبکه ۵۷ باس IEEE را نشان می‌دهد.

جدول (۳) مرز پایداری ولتاژ یعنی فاصله حالت پایه تا نقطه گره-زینی را برای شبکه‌های ۱۴، ۳۰ و ۵۷

جدول ۴ نقاطی از قسمت زیرین منحنی ۷-۸
(شبکه IEEE-57BUS)

ردیف	ولتاژ باس بحرانی (V_{31})	پارامتر بار (λ)
۱*	۰/۴۵۸۹ < -۴۷/۲۷۰	۳/۴۸۱۴
۲	۰/۴۳۵۶ < -۴۹/۷۵۹	۳/۴۷۹۹
۳	۰/۴۱۴۵ < -۵۲/۶۷۰	۳/۴۷۳۴
۴	۰/۳۹۶۳ < -۵۶/۰۳۷	۳/۴۵۸۴
۵	۰/۳۰۱۷ < -۶۴/۲۷۵	۳/۱۵۸۴
۶	۰/۱۶۷۴ < -۷۶/۹۶۲	۲/۱۵۸۴

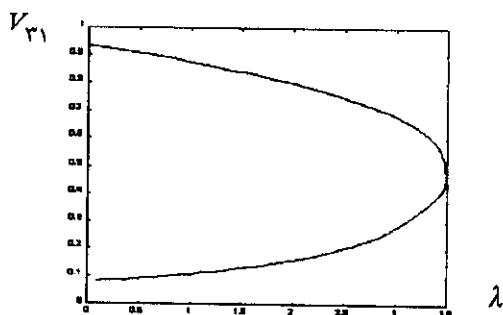
* مختصات نقطه بحرانی (نقطه گره-زینی)



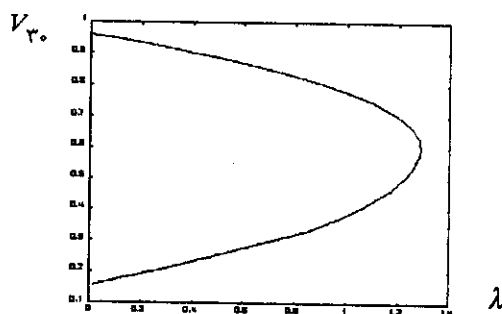
شکل ۷ منحنی ۷-۸ دوباس کنترل ولتاژ (باسهای ۲ و ۳)
شبکه IEEE-57BUS

نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برای ارزیابی پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت و در نتیجه تعیین مرزهای پایداری ولتاژ ارائه شده است. نشان داده شد که روش مقاله دارای دقت قابل قبولی بوده و می‌توان در رسم منحنی‌های λ - V نیز آن را بکار برد. باتوجه به اینکه در هر بار تکرار الگوریتم روش جدید فقط یک مرحله معکوس‌سازی ماتریس وجود دارد. بنابراین، روش پیشنهادی نسبت به روش پخش بار مداوم بسیار سریعتر است. ضمناً با انتخاب مناسب پارامتر انحراف می‌توان با دقت مناسب و سرعت محاسباتی بالایی نقطه گره-زینی سیستم قدرت را با روش جدید تعیین نمود.



شکل ۵ منحنی ۷-۸ باس بحرانی (باس ۳۱) در شبکه
IEEE-57BUS



شکل ۶ منحنی ۷-۸ باس بحرانی (باس ۳۰) در شبکه
IEEE-30BUS

مراجع

1. Mansour Y. and et. al., "SVC placement using critical modes of voltage instability", *IEEE Trans. on PWRs*, Vol.9, pp. 757-763, May (1994).
2. IEEE Committee Report, "Voltage stability of power systems, concepts, analytical tools, and Industry Experience, *IEEE publication*.
3. Anderson P.M. and Fouad A.A., *Power System Control and Stability*, The Iowa State University Press, Ames, (1977).
4. de Mello F.P. and Undrill J.M., "Automatic generation control", *IEEE Tutorial Course*.
5. Galiana F.D., "Load flow feasibility and the voltage collapse problem", *Proc. of 23th Conf. on Decision and Control*, Las Vegas, Nevada, Dec. (1984).
6. Taylor C.W., "*Power System Voltage Stability*", Mc Graw - Hill Int. Editions, (1994).
7. Kuita A. and Sakurai T., "The power system failure on July 23, 1987 in Tokyo", *IEEE Proceeding*, pp. 2093-2097 Dec. (1988).
8. North American Electric Reliability Council, 1989 System Disturbances, July. (1990).
9. Ejebe G.C. and et. al., "Methods for contingency screening and ranking for voltage stability analysis of power systems", *IEEE Trans. on Pwrs*, pp. 350-356, Feb. (1995).
10. Seydel R., "*From Equilibrium to Chaos*", Elsevier Science Publishing Co. Inc., (1988).
11. Moore G. and Spence A. "The calculation of turning points of nonlinear equations", *SIAM J. Num. Anal.* 17 pp. 567-576, (1980).
12. Kubicek M. and Marek M., "*Computational Methods in Bifurcation Theory and Dissipative Structures*", Springer-Verlag, (1983).
13. Ajarapu V. and Christy C., "The continuation power flow : A tool for steady state voltage stability analysis", *IEEE Trans. on Pwrs*, pp. 416-423, Feb. (1992).
14. Rheinboldt W.C., "*Numerical Analysis of Parametrized Nonlinear Equations*", John Wiley & Sons, New York, 1986).
15. Rheinboldt W.C. and Burkardt J.V., "A locally parametrized continuation process", *ACM Trans. on Mathematica Software*, June. (1983).
16. Nayfeh A.H., "*Introduction to Perturbation Techniques*", John Wiley & Sons Int., (1981).
17. Wallach Y., "*Calculation and Programs for Power System Networks*", Prentice-Hall Int., Engle Wood, (1986).

۱۸. قره‌ویسی، علی‌اکبر، " روشی جدید برای تعیین نقاط انشعاب سیستم‌های غیرخطی و کاربرد آن در ارزیابی امنیت ولتاژ سیستم‌های قدرت"، رساله دکتری مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، بهار (۱۳۸۰).