

المللى

98-F-PSS-491

Internationa

Conference

Power System

مTC یک روش سریع برای محاسبه ATC با در نظر گرفتن پایداری گذرا و پایداری ولتاژ مصطفی عیدیانی\* - محمد حسن مدیر شانهچی\*\* - ابراهیم واحدی\*\*\* \*کمیته تحقیقات برق منطقهای شمال خراسان- دانشگاه آزاد \*\*دانشگاه نیو مکزیکو - Perot System\*\*

واژههای کلیدی: انتقال توان، ATC، پایداری ولتاژ و پایداری گذرا

*چکید*ہ

در این مقاله یک روش سریع دینامیکی برای محاسبه ATC<sup>۱</sup> ارائه شده است که با در نظر گرفتن حدود پایداری ولتاژ و پایداری گذرا، حداکثر توان انتقالی بین دو باس و یا دو ناحیه محاسبه شده است. روش ارائه شده می تواند برای رتبهبندی پیشامدها نیز بکار رود.

در این مقاله از روش تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین برای تشخیص پایداری ولتاژ استفاده شده و با روشهای دیگر مقایسه شده است. روش استفاده شده برای تشخیص پایداری گذرا، روش سریع POMP<sup>۲</sup> میباشد که بدنبال نقطه ماکزیمم انرژی پتانسیل مسیر بعد از خطا میگردد. این روش بدلیل عدم استفاده از روشهای همگرایی، حتماً به جواب رسیده و سرعت آن نیز بالا است. با ترکیب دو روش فوق و ارائه یک الگوریتم

1. Available Transmission Capability

2. Point of Maximum Potential Energy

جدید، حداکثر توان انتقالی بین دو باس و یا دو ناحیه مشخص می شود. ایده های ارائه شده در این مقاله بر روی سیستمهای ۲، ۷، ۱۰ (Cigre)، ۳۰ (IEEE) و ۱۴۵ باس امتحان شده است.

۱ – مقدمه

به مقدار توانایی انتقال توان بین دو ناحیه و یا دو باس – اضافه بر آنچه برای آن پیش بینی شده است– ATC گفته می شود [1,2]. روشهای محاسبه ATC را می توان به دو گروه استاتیک و دینامیک تقسیم کرد. در روشهای استاتیک، تغییرات زمانی متغیرهای سیستم در نظر گرفته نمی شوند و در روشهای پویا، از مدلهای دینامیکی و استاتیکی بطور همزمان استفاده می شود. روشهای استاتیک را می توان به روشهای GPF، تحلیل حساسیت [3,4] و پخش بار متوالی [7-5] تقسیم کرد. در OPF، برای هر قرارداد، توانهای تولیدی و

مصرفی مورد نظر در ATC، بطور بهینه افزایش داده می شوند. در پخش بار متوالی، برای هر قرارداد، توانهای تولیدی و مصرفی تا رسیدن سیستم به یک حد MVA و یا هر حد ایستای دیگر افزایش داده می شود. در روشهای تحلیل حساسیت، این افزایش توان، با در نظر گرفتن سیستم قدرت خطی شده انجام میشود که این کار باعث افزایش سرعت محاسبه ATC می شود.

"پخش بار بهینه سیستم قدرت" [8]، "در نظر گرفتن توان موهومی در ATC خطی" [9] و "الگوريتم نقطه دروني" [10] از جمله مقالههاي مهم در ATC ایستا می باشند.

معیارهایی که باعث محدودیت افزایش توان در الگوريتم محاسبه ATC ايستا مي شوند عبارتند از: محدودیتهای حرارتی و استاتیکی خطوط، واگرایی یخش بار DC و AC و حد اندازه ولتاژ در باسها.

سادگی و سرعت از مهمترین مزایای روشهای ATC ایستا میباشند و جواب غیردقیق و در نظر نگرفتن حدود دینامیکی از معایب این روشها میباشند.

در روشهای ATC پویا، از مدلهای دینامیکی سیستم قدرت و پایداری گذرا استفاده می شود. در روشهای ارائه شده تاکنون از غربال و رتبهبندی پیشامدها در نقطه کار استفاده شده است و با افزایش تدريجي توان توليدي و مصرفي، حداكثر توان انتقالي بین دو باس و یا دو ناحیه محاسبه می شود. "انتخاب چندین پیشامد برای مطالعه ATC" [11]، "پایداری ولتاژ و حداکثر بارگذاری" [12] و "حداکثر انتقال توان با در نظر گرفتن پایداری گذرا" [13] از جمله مهمترین مقالهها در زمینه ATC پویا می باشند. دقت محاسبه در این روشها از مهمترین مزایای آنها نسبت به روشهای ایستا میباشند ولی معایب آنها را میتوان بصورت زير خلاصه كرد: اولاً خطرناكترين پيشامدها در حالت پایه و در حالت حداکثر انتقال توان با

یکدیگر متفاوتند و استفاده از رتبهبندی پیشامدها در حالت یایه برای محاسبه ATC باعث ایجاد خطا می شود. این موضوع در مقاله حاضر برطرف شده است.

ثانیاً، در هیچ یک از روشهای ارائه شده تاکنون، وقتی پایداری گذرا در نظر گرفته می شود؛ پایداری ولتاژ (استاتیک و یا دینامیک) در نظر گرفته نمیشود و معمولاً از اثر ولتاژها صرفنظر می شود. در مقاله حاضر، علاوه بر استفاده از حد پایداری گذرا، بطور مطلوبی از حد پایداری ولتاژ نیز استفاده شده است.

روش استفاده شده در این مقاله برای تعیین حد پايدارى ولتاژ، روش تقريب دترمينان ماتريس ژاكوبين است [14]. این روش با روش اختلاف انرژی بین نقطه تعادل يايدار و نايايدار [15,16]، شاخص تابع آزمایش [17] و روش پخش بار متوالی مقایسه شده است.

حد پایداری گذرا از مهمترین محدودیتهای مورد نظر در هنگام تعیین ATC می باشد. PEBS" [18]، نقطه تعادل نايايدار كنترل كننده <sup>\*</sup> [19]، BCU [20]، ضربه دوم<sup>\*</sup> [21]، شاخص سختی<sup>۷</sup> [23] و POMP [24] از مهمترین روشهای تشخیص پایداری گذرا به روش مستقیم انرژی میباشند. در این مقاله روش POMP در مقاله [24] بهبود یافته تا برای ATC يويا استفاده شود.

در بخش دوم مقاله، معادلات سیستم بطور خلاصه آورده شده است [25]. روشهای پایداری ولتاژ در بخش سوم و روشهای پایداری گذرا در بخش چهارم بررسی شدهاند. در بخش پنجم، الگوریتم اصلی مقاله

<sup>3.</sup> Potential Energy Boundary Surface

<sup>4.</sup> Controlling UEP

<sup>5.</sup> Boundary Controlling UEP

<sup>6.</sup> Second Kick

<sup>7.</sup> Severity Index

به همراه نکات قوت روش آورده شده است. در فصل ششم، الگوریتم ارائه شده بر روی سیستمهای مختلف امتحان شده است. نتیجه گیری و مراجع در انتهای مقاله آورده شده است.

### ۲ – معادلات سیستم قدرت

در بررسی پایداری گذرا، وقتی بار با امپدانس ثابت مدل زده می شود و یا از اثر ولتاژ صرفنظر می شود؛ ممکن است در محاسبه زمان قطع خطای بحرانی ممکن است در محاسبه زمان قطع خطای بحرانی قدرت و توابع انرژی با حفظ ساختار<sup>\*</sup> استفاده می شود قدرت و توابع انرژی با حفظ ساختار<sup>\*</sup> استفاده می شود قدرت و توابع انرژی با حفظ ساختار<sup>\*</sup> استفاده می شود [25]. فرض کنید N تعداد باسهای بار و n تعداد ژنراتورها باشد. معادلات سیستم قدرت در مرجع مرکز ژنراتورها باشد. معادلات سیستم قدرت در مرجع ( یزان تورها باشد. معادلات سیستم قدرت در مرجع ( آیزاتورها باشد. معادلات سیستم قدرت ( آیزاتورها باشد. معادلات سیستم قدرت ( آیزاتورها باشد. معادلات سیستم ( آیزاتورها باشد. می ()

$$\begin{split} \delta_{n} & \text{is } \delta_{1} \text{ is } n \text{ is } N \text{ is } N \text{ is } n \text{ is } \delta_{1} \text{ is } n \text{ is } n \text{ is } \delta_{1} \text{$$

معادلات پخش بار (معادلات استاتیک) را می توان  
بصورت زیر نوشت:  
$$P_i + \sum_{j=1}^{n+N} B_{ij} v_i v_j \sin(\widetilde{\phi}_i - \widetilde{\phi}_j) = 0 , i = n+1: n+N$$
$$Q_i - \sum_{j=1}^{n+N} B_{ij} v_i v_j \cos(\widetilde{\phi}_i - \widetilde{\phi}_j) = 0 , i = n+1: n+N$$
(Y)

8. structure preserving energy functions and system equations

9. Center of Inertia

$$V(\widetilde{\omega}, \widetilde{\phi}, v) = V_k(\widetilde{\omega}) + V_{p1}(\widetilde{\phi}, v) + V_{p2}(\phi)$$

$$V_k(\widetilde{\omega}) = 0.5 \sum_{i=1}^n M_i \widetilde{\omega}_i^2 \quad \mathbf{y} \quad V_{p2}(\widetilde{\phi}) = \sum_{i=n+1}^{n+N} P_i(\widetilde{\phi}_i - \widetilde{\phi}_i^s)$$

$$V_{p1}(\widetilde{\phi}, v) = -\sum_{i=1}^n P_{mi}(\widetilde{\phi}_i - \widetilde{\phi}_i^s) + \sum_{i=n+1}^{n+N} Q_i \ln(\frac{v_i}{v_i^s}) -$$

$$0.5 \sum_{i=1}^{n+N} \sum_{j=1}^{n+N} B_{ij}(v_i v_j \cos(\widetilde{\phi}_{ij}) - v_i^s v_j^s \cos(\widetilde{\phi}_{ij}^s)))$$
( $\mathbf{\tilde{v}}$ )

میدانیم بررسی سیستم قدرت، شامل حل معادلات دیفرانسیل معمولی (ODE)<sup>۱۰</sup> به همراه حل معادلات جبری (معادلات پخش بار) میباشد. نشان داده شده است که حل معادلات دیفرانسیل معمولی، سادهتر از حل ترکیبی معادلات جبری-دیفرانسیلی (DAE)<sup>۱۱</sup> است [26]. لذا در این مقاله معادلات جبری پخش بار به معادلات دینامیکی تبدیل شده و با معادلات دینامیکی سیستم قدرت ترکیب شده است و برای اینکار رابطه (۲) بصورت زیر تبدیل شده است:

$$\dot{\tilde{\epsilon\phi_i}} = P_i + \sum_{j=1}^{n+N} B_{ij} v_i v_j sin(\widetilde{\phi_i} - \widetilde{\phi_j}) , i = n+1: n+N$$
  
$$\dot{\epsilon v_i} = Q_i - \sum_{j=1}^{n+N} B_{ij} v_i v_j cos(\widetilde{\phi_i} - \widetilde{\phi_j}) , i = n+1: n+N$$
  
(\*)

. • \

10. Ordinary Differential Equation

11. Differential-Algebraic Equation

### ۳– روشهای پایداری ولتاژ

قدیمی ترین و مهم ترین روش تشخیص پایداری ولتاژ روش پخش بار متوالی است [5,6] که عیب آن سرعت کم روش می باشد. فاصله اقلیدسی بین نقطه تعادل پایدار (SEP) و ناپایدار (UEP) [27]، اختلاف انرژی بین SEP و UEP [15,16]، تابع آزمایش [17] و تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین [14] از مهم ترین روشهای تشخیص پایداری ولتاژ می باشند که در جریان این مقاله بررسی شدهاند.

روش ارائه شده در [17] سادهتر و ارزانتر از روشهایی مانند مقدار ویژه، بردار ویژه و توابع انرژی است [17]. دلیل عمده آن نیز عدم استفاده از روشهای همگرایی و عدم استفاده از نقاط تعادل ناپایدار است. اما نشان داده شده است [14] که این روش نیز دارای معایبی چون زمان زیاد محاسبات و عدم دقت کافی در محاسبات می باشد. در این بخش بطور خلاصه روش تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین آورده شده است.

۳–۱– روش تقریبی دترمینان ماتریس ژاکوبین

ماتریس ژاکوبین J را میتوان به چهار زیر ماتریس C ،B ،A و D تقسیم کرد و دترمینان آن را میتوان بصورت زیر تبدیل کرد:

 $Det(J) = det(A). det(D-CA^{-1}B)$  (a)

 $diag(A) = [a_{11} \ a_{22} \ ... \ a_{nn}], such that \ a_{ii}$ are diagonal elements of A.  $prod(diag(A)) = a_{11}. \ a_{22}. \ ... \ a_{nn}$  $1./diag(A) = [1/a_{11} \ 1/a_{22} \ ... \ 1/a_{nn}]$  (§)

$$diag(diag(A)) = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{nn} \end{bmatrix}$$

حال نشان میدهیم که: |Xii/ > /Xij/ ∀i,j and X=A, B, C and D (۷)

ΥΔΛ *www.SID.ir* 

که برای تعیین دو پارامتر مجهول a و d، باید دو پخش بار جداگانه را بررسی کرد که یکی در نقطه کار و دیگری با افزایش کمی در تولید و مصرف (در جهت (ATC) مشخص میشوند. با داشتن دو مقدار ( $\lambda 1,\lambda 2)$ ) و ( $\lambda 1,\lambda 2$ ) میتوان a و d را از دو معادله زیر بدست آورد:

 $\lambda_{I} = -a \left( Det(J_{I}) \right)^{2} + b \tag{11}$  $\lambda_{2} = -a \left( Det(J_{2}) \right)^{2} + b$ 

پس از شبیهسازیهای فراوان به این نتیجه رسیدیم که تقریب درجه ۲ شبیه تابع آزمایش دکتر چیانگ دارای خطا میباشد لذا برای افزایش دقت آن، از یک پخش بار سوم نیز استفاده کردیم. این نقطه کار با استفاده از نقطه کار تقریب زده شده و از معادله (۱۲) مشخص میشود. با داشتن سه نقطه کار میتوان λ را بر حسب (J) با معادله زیر تقریب زد:  $\lambda = -a (Det(J))^c + b$  a, b, c are unknown

(14)

که در رابطه فوق سه پارامتر a، b و c مجهولاند که با سه پخش بار مشخص می شوند. نشان داده شده است که این کار باعث افزایش دقت محاسبات می شود. حال می توان الگوریتم تعیین ATC با تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین را بصورت زیر خلاصه کرد: ۱. دو معادله پخش بار در جهت ATC معین مشخص می شوند.

 ۲. با دو معادله پخش بار، دو متغیر معادله a و b در معادله (۱۲) مشخص می شوند.

$$det(J)=0 \implies \lambda_{cr}=b$$
  
۲. با سه نقطه کار، سه پارامتر a b ، a و c در معادله  
(۱۴) محاسبه می شوند.

۵. نقطه کار بحرانی تصحیح می شود: 
$$det(J)=0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{cr}=b$$



با استفاده از الگوریتم فوق، دقت و سرعت محاسبه ATC افزایش یافته است. شکل (۱) را در نظر بگیرید. برای سیستم ۱۴۵ باس (دانشگاه ایالتی آیوا) سه روش پخش بار متوالی (روش دقیق)، روش تابع آزمایش (روش قدیم) و روش تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین (روش جدید) با هم مقایسه شدهاند. همچنان ژاکوبین (روش جدید) با هم مقایسه شدهاند. همچنان دیده می شود دقت محاسبه ATC افزایش یافته است. همچنین سرعت محاسبات بطور متوسط دو برابر شده است [14].

در این مقاله از روش تقریب دترمینان برای تشخیص حد پایداری ولتاژ در محاسبه ATC پویا استفاده میکنیم. یادآوری میشود که در مقاله [14]، ATC ایستا بررسی شده است.

۴– روشهای تشخیص پایداری گذرا

روشهای مستقیم پایداری گذرا از مهمترین روشهای تشخیص پایداری گذرا می باشند. با آنکه روش PEBS اتای<sup>۱۲</sup> [18] یکی از سریعترین روشها می باشد ولی نشان داده شده است که این روش دارای

12. Athay

دقت کمی است [24]. در این قسمت از مقاله، علاوه بر مرور مختصری بر روش اتای، روش POMP که در مقاله [24] ارائه شده است بهبود یافته و برای محاسبه ATC پویا مورد استفاده قرار میگیرد.

### ۴-۱- روش PEBS اتای

در این روش، بارها با امپدانس ثابت مدل زده می شود و در ماتریس ادمیتانس ادغام می شوند و ولتاژها ثابت فرض می شوند. اگر m تعداد ژنراتور باشد؛ با استفاده از مدل مرکز اینرسی (COI) برای iامین ژنراتور داریم:

 $\dot{\theta}_i(t) = \widetilde{\omega}_i \text{ and } M_i \dot{\widetilde{\omega}}(t) = f_i(\theta_1(t), \dots, \theta_m(t))$  (10)

که  $\theta_i = \theta_i$  و  $\tilde{\omega}_i$  به ترتیب زاویه داخلی و سرعت ژنراتور أم نسبت به مرکز اینرسی (COI) است و  $f_i(\theta_1(t), \dots, \theta_m(t))$ ، توان شتاب دهنده ژنراتور أم است [28]. برای محاسبه زمان قطع بحرانی به تابع انرژی سیستم نیاز داریم که میتوان آن را بصورت زیر خلاصه کرد: [25]

$$V(\theta,\widetilde{\omega}) = \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{2} M_i \widetilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^{m} \int_{\theta_i^s}^{\theta} f_i(\theta) d\theta = V_{KE}(\widetilde{\omega}) + V_{PE}(\theta)$$
(19)

اساس این معیار، اتای الگوریتم خود را بصورت زیر مشخص کرد.

## ۲-۱-۱-۱ الگوریتم PEBS اتای

۱. نقاط تعادل پایدار سیستم برای سیستم قبل از خطا $(\theta^0)$  و بعد از خطا ( $(\theta^0)$  محاسبه می شوند.

۲. با شروع از نقطه تعادل پایدار سیستم قبل از خطا  $({}^{\circ}\theta_{0} = 0 = {}^{\circ})$ ، از سیستم خطادار انتگرالگیری میشود (معادلات سیستم خطادار حل میشود) و در هر گام از انتگرالگیری  $(({}^{s}\theta - \theta)(\theta - \theta)(\theta))$ محاسبه میشود.

۳. گام ۲ آنقدر تکرار می شود که در  $(\theta^{F})$  داشته باشیم  $(f^{T}(\theta^{F})(\theta^{F} - \theta^{s}) = 0)$   $(V_{cr} = V_{PE}(\theta^{F}))$ . در این حالت انرژی بحرانی محاسبه شده است. (  $V_{cr} = V_{PE}(\theta^{F})$ 

۲. دوباره از سیستم خطادار انتگرالگیری می شود و در هر گام انرژی کل سیستم ( $((\theta, \widetilde{\omega})))$  محاسبه می شود. انرژی کل در  $(-\theta_{cr}) = (-\widetilde{\omega}_{cr})$  با انرژی بحرانی برابر می شود. زمان رسیدن به این نقطه، زمان قطع بحرانی ( $t_{cr}$ ) است.

۴-۲- روش POMP

۲-۴–۱–۱ انگیزه تعیین POMP

شکل (۲) را در نظر بگیرید. در این شکل مسیر سیستمهای قبل از خطا، خطادار و بعد از خطا (خطوط پر) و PEBS (خط چین) برای یک سیستم سه ماشینه نشان داده شده است. ژنراتور سوم به عنوان مرجع انتخاب شده است. فرض شده است خطا در زمان صفر اتفاق میافتد و در زمان (t<sub>cl</sub>) خطا برطرف شده است. لذا نقاط تعادل پایدار سیستم قبل از خطا و بعد از خطا یکسان شدهاند. فرض شده است سیستم بدون تلفات است و هیچگونه تبادل انرژی با بیرون ندارد.

> Y۶· ♦ www.SID.ir

نامیده شده است و مقدار تابع انرژی در نقطه تماس A، انرژی بحرانی میباشد (V<sub>cr</sub>). برای اینکه سیستم پایدار بماند باید انرژی در نقطه قطع خطا از این مقدار انرژی بحرانی کمتر باشد. پیدا کردن نقطه A و محاسبه انرژی در آن، هدف تمامی روشهای مختلفی است که با ستفاده از روش مستقیم لیاپانوف بدنبال بررسی پایداری گذرای سیستم میباشند. از آنجا که پیدا کردن دقیق نقطه A خیلی مشکل است؛ تمام روشها بگونهای بدنبال تقریب این نقطه و محاسبه تقریبی انرژی بحرانی میباشند.

مسیر سوم مربوط به حالتی است که خطا زودتر از زمان قطع خطای بحرانی برطرف شده است. مسیر سیستم خطادار از نقطه تعادل پایدار قبل از خطا شروع شده و تا زمان قطع خطا ادامه مییابد. از آنجا که زمان قطع خطا کمتر از زمان قطع خطای بحرانی است؛ سیستم پایدار بوده و بدون اینکه مسیر سیستم بعد از خطا به مرز PEBS برسد؛ مسیر به سمت نقطه تعادل مهم است. در این نقطه، انرژی پتانسیل ماکزیمم و انرژی جنبشی مینیمم است.

مسیر چهارم مربوط به حالتی است که خطا دیرتر از زمان قطع خطای بحرانی برطرف شده است. مسیر سیستم خطادار از نقطه تعادل پایدار سیستم قبل از خطا شروع شده و تا زمان قطع خطا ادامه مییابد. در این حالت سیستم ناپایدار بوده و مسیر سیستم بعد از خطا از مرز PEBS عبور میکند که نقطه تقاطع مسیر با مرز با D در شکل (۲) نمایش داده شده است. در نقطه D، انرژی پتانسیل ماکزیمم شده است.

نقاط A و B در شکل که انرژی جنبشی در آنها مینیمم و انرژی پتانسیل در آنها ماکزیمم است؛ در روش ارائه شده در این قسمت بسیار مهماند. ما این نقاط را POMP (نقطه ماکزیمم انرژی پتانسیل و



چهار مسیر سیستم در شکل نشان داده شده است. اولین مسیر، سیستم خطادار را مشخص میکند که این مسیر از نقطه تعادل پایدار سیستم قبل از خطا (°<sup>6</sup>و 0 = °<sup>®</sup>) شروع شده (نقطه (0,0) شکل) و مستقیماً به سمت مرز PEBS رفته و از آن عبور میکند. نقطه تقاطع مسیر با مرز با (F) نشان داده شده است که این نقطه خیلی به نقطه تعادل ناپایدار کنترل کننده زین اسبی نزدیک است [28].

دومین مسیر، مسیر خطای بحرانی میباشد. مسیر سیستم خطادار از نقطه تعادل پایدار قبل از خطا (0,0) شروع شده و تا زمان قطع خطای بحرانی (t<sub>cr</sub>) ادامه پیدا میکند. در این زمان خطا برطرف شده و مسیر سیستم بعد از خطا به سمت مرز پیش میرود. این مسیر با مرز PEBS در نقطه A مماس شده ولی از آن عبور نمیکند و سپس به سمت نقطه تعادل پایدار سیستم بعد از خطا حرکت میکند که در این مثال همان نقطه تعادل قبل از خطا فرض شده است (0,0). به حداکثر خود رسیده است. این مسیر، مسیر بحرانی

781



در این روش، ما از نقطه C به عنوان تقریب POMP استفاده میکنیم و به آن POMP استفاده میکنیم و به آن EPOMP اسی میگوییم. برای تعیین EPOMP، از بسط سری تیلور زوایا استفاده میکنیم و فقط سه جمله اول آن را نگه میداریم و از بقیه صرفنظر میکنیم. با استفاده از معادلات (۱۵) داریم:

$$\begin{split} \delta_{im} &= \delta_i - \delta_m = \theta_i - \theta_m \quad (1 \forall) \\ \dot{\delta}_{im} &= \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_m = \widetilde{\omega}_i - \widetilde{\omega}_m = \widetilde{\omega}_{im} \\ \dot{\dot{\delta}}_{im} &= \dot{\widetilde{\omega}}_i - \dot{\widetilde{\omega}}_m = \frac{1}{M_i} f_i(\theta) - \frac{1}{M_m} f_m(\theta) = F_{im}(\theta) \\ \mu_m &= \mu_m + \mu_m +$$

$$\begin{split} &\delta_{im}(t) = \delta_{im}(t_{cl}) + \frac{d\partial_{im}}{dt}(t_{cl})(t-t_{cl}) + \\ &\frac{d^2\delta_{im}}{2dt^2}(t_{cl})(t-t_{cl})^2 = \delta_{im}(t_{cl}) + \widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})(t-t_{cl}) + \quad (\Lambda\Lambda) \\ &\frac{1}{2}F_{im}(\theta(t_{cl}))(t-t_{cl})^2 = (\theta_i(t_{cl}) - \theta_m(t_{cl})) + \\ &(\widetilde{\omega}_i(t_{cl}) - \widetilde{\omega}_m(t_{cl}))(t-t_{cl}) + \frac{1}{2}F_{im}(\theta(t_{cl}))(t-t_{cl})^2 \\ &(\widetilde{\omega}(t_{cl}) - \theta_m(t_{cl}))(t-t_{cl}) + \frac{1}{2}F_{im}(\theta(t_{cl}))(t-t_{cl})^2 \\ &(t_{cl}) = \theta_i(t_{cl}) + \frac{1}{2}F_{im}(\theta(t_{cl}))(t-t_{cl}) + \frac{1}{2}F_{im}(\theta(t_{cl}))(t-t_{cl})^2 \\ &(t_{cl}) = \theta_i(t_{cl}) + \frac{1}{2}F_{im}(\theta(t_{cl}))(t-t_{cl}) + \frac{1}{2}F_{im}(\theta(t_{cl}))(t-t_{cl})$$

13. Estimate of POMP

مینیمم انرژی جنبشی مسیر سیستم بعد از خطا) مینامیم.

حال فرض کنید به روشی حتی تقریبی بتوانیم این PEBS نقاط را مشخص کنیم. لذا در گام دوم روش  $(f^{T}(\theta)(\theta)^{T}(\theta))$  (که  $\theta$ اتای به جای محاسبه ( $(f^{T}(\theta)(\theta)^{T}(\theta))$ ) (که  $\theta$ نقطه ای روی مسیر خطادار است) میتوان از نقطه POMP(B) استفاده کرد. یعنی به جای ((Tm) در شکل از ( $\theta(B)$  استفاده میکنیم.

با انتگرالگیری مداوم از سیستم بعد از خطا، بالاخره به نقطه A میرسیم. قبل از رسیدن به نقطه A، همیشه ( $(f^{T}(\theta^{B})(\theta^{B} - \theta^{s}))$  منفی بوده و در نقطه A صفر و بعد از آن مثبت میشود. در نتیجه پیدا کردن نقاط B میتواند شاخص مهمی برای تعیین نقطه A شود. پس از تعیین نقطه A، محاسبه انرژی بحرانی بسیار راحت است.

# ۲-۲-۴ روش محاسبه POMP

برای محاسبه POMP، انتگرالگیری از سیستم بعد از خطا خیلی وقتگیر است. در اینجا ما از یک تقریب استفاده میکنیم. شکل (۳) را در نظر بگیرید. مسیر سیستم خطادار و بعد از خطا و POMP برای یک سیستم پایدار نشان داده شده است. اندازههای ماکزیمم میافتند. ژنراتور سوم به عنوان مرجع انتخاب شده میافتند. ژنراتور سوم به عنوان مرجع انتخاب شده میافتند. واویه دام (نقطه 1A) بعضی وقتها بعد از ماکزیمم زاویه دام (نقطه 1A) بعضی وقتها بعد از ماکزیمم زاویه دوک (نقطه 2A) اتفاق میافتد. نقطه C را در نظر بگیرید. این نقطه با استفاده از نقاط 1A و A مشخص میشوند. به عبارت دیگر (POMP باشد. و به نظر میرسد تقریب خوبی برای POMP باشد.

خطادار و در زمان  $\mathbf{t}_{cl}$  نیز میباشند. با مشتق گیری از رابطه (۱۸) نسبت به زمان و مساوی صفر قرار دادن آن، می توان زمانی را محاسبه کرد که در آن زاویه ( $\delta_{im}(t)$ ) ماکزیمم می شود.

$$\begin{split} \dot{\delta}_{im}(t) &= \widetilde{\omega}_{im}(t_{cl}) + F_{im}(\theta(t_{cl}))(t_i - t_{cl}) = 0 \quad (14) \\ (t_i - t_{cl}) &= -\frac{\widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})}{F_{im}(\theta(t_{cl}))} \\ (t_i - t_{cl}) &= -\frac{\widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})}{F_{im}(\theta(t_{cl}))} \\ \vec{\delta}_{im}(t_{cl}) &= -\frac{\widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})}{F_{im}(\theta(t_{cl}))} \\ \vec{\delta}_{im}(t_{cl}) &= -\frac{\widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})}{F_{im}(\theta(t_{cl}))} \\ \vec{\delta}_{im}(t_{cl}) &= -\frac{\widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})}{F_{im}(\theta(t_{cl}))} \\ \vec{\delta}_{im}^{Max} &= \delta_{im}(t_{cl}) + \omega_{im}(t_{cl})(t_i - t_{cl}) + \\ \frac{1}{2}F_{im}(\theta(t_{cl}))(t_i - t_{cl})^2 &= (\theta_i(t_{cl}) - \theta_m(t_{cl})) - \\ \widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})(\frac{\widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})}{F_{im}(\theta(t_{cl}))}) + \frac{1}{2}F_{im}(\theta(t_{cl}))(\frac{\widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})}{F_{im}(\theta(t_{cl}))})^2 \\ = \\ (\theta_i(t_i) - \theta_i(t_{cl})^2 - \frac{\widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})^2}{\widetilde{\omega}_{im}(t_{cl})^2} \\ \end{array}$$

$$(t_{cl}) - \theta_m(t_{cl})) - \frac{\omega_{im}(t_{cl})}{2F_{im}(\theta(t_{cl}))}$$
(Y•)

حال با حل کردن معادلات بر حسب (i)، تقریب POMP یعنی EPOMP (یا نقطه C) قابل محاسبه است.

$$\theta_i^{Max} - \theta_m^{Max} = \delta_{im}^{Max} , \sum_{i=1}^m M_i \theta_i^{Max} = 0$$
 (Y1)

و در نتيجه داريم:

$$EPOMP = C = (\theta_1^{Max}, \dots, \theta_m^{Max}) = (\theta^{Max})$$
(YY)

## POMP الگوريتم POMP

با داشتن تقریب POMP می توان با استفاده از آن، زمان قطع خطای بحرانی را بصورت زیر مشخص کرد: ۱) نقاط کار پایدار سیستم قبل از خطا (<sup>6</sup>θ) و بعد از خطا (<sup>6</sup><sup>S</sup>) محاسبه می شوند.

۲) از سیستم خطادار برای یک فاصله زمانی کوچک (Δ(t انتگرالگیری میشود. این انتگرالگیری

از شرایط اولیه ( $\theta^{\circ} = 0 = \widetilde{\Theta}$ ) شروع شده و با یک روش سریع، انتگرالگیری میشود. مقادیر زمان و  $\theta_b t_b$ ,, ) حالتهای سیستم در پایان انتگرالگیری با ( $\theta_b t_b$ ,, ) مشخص میشوند.

۳) با قرار دادن  $t_b$  به جای  $t_{cl}$  در معادلات (۲۰) تا (۳) به عنوان (۲۲)، EPOMP (نقطه C در شکل ۳) به عنوان تقریبی از نقطه B (شکل ۲) مشخص می شود.

۴) در هر گام از انتگرالگیری و با استفاده از گام ( $f^{T}(\theta^{Max})(\theta^{Max} - \theta^{s})$  محاسبه می شود.

۵) گامهای ۲، ۳ و ۴ آنقدر ادامه داده می شود تا شاخص PEBS در ( $(\theta^*)$ ) صفر شود و یا تغییر علامت بدهد. ( $(\theta^*)$  خیلی به  $(\theta^A + \theta^B)$  شکل ۲ نزدیک است که در این نقطه  $(\theta^A - \theta^S) = (f^T (\theta^A))$ . در این حالت انرژی بحرانی محاسبه می شود ( $(f^R)^R + V_{PE})$ .

۶) با استفاده از آخرین حالت محاسبه شده در گام ۲، آنقدر از سیستم خطادار انتگرالگیری می شود که انرژی کل با انرژی بحرانی برابر شود یعنی  $(V(\theta_{cr}, \widetilde{\omega}_{cr}) = V_{cr})$ . در این زمان، زمان قطع بحرانی محاسبه می شود (انتگرالگیری می تواند مستقیم باشد اگر  $(V(\theta_{cr}, \widetilde{\omega}_{cr}) > V_{cr})$  باشد و انتگرالگیری معکوس می شود اگر  $(V(\theta_{cr}, \widetilde{\omega}_{cr}) > V_{cr})$  باشد).

۵-۱-۵ نکات مهم در الگوریتم

با توجه به روشهای ارائه شده برای تشخیص پایداری ولتاژ و پایداری گذرا در بخشهای قبلی، حال میتوان الگوریتم تعیین ATC را با کمک دو روش فوق ارائه داد. این الگوریتم برای سیستمهای ۲، ۷، ۱۰، فوق ارائه داد. این الگوریتم برای سیستمهای ۳ ماه ۷ فوق ارائه داد. این المحان شده است. زمان قطع خطا ۵ سیکل فرض شده است و حذف خطا با برطرف شدن خطا میسر می شود. یعنی سیستم قبل از خطا و بعد از

خطا یکسان فرض شدهاند. برای اینکه یکی از ایدههای اصلی الگوریتم مشخص شود به شکل (۴) توجه کنید. برای تعیین پایداری دینامیکی سیستم قدرت (تعیین ATC پویا) ابتدا با روش سریع تقریب دترمینان، حد پایداری استاتیکی سیستم در ازای یک ATC مشخص تعیین میشود. سپس با شروع از این نقطه، بدنبال حد پایداری دینامیکی سیستم می گردیم. مزایای اینکار عبارتند از:



اولاً، با شبیهسازیهای فراوان این نتیجه حاصل شده است که زمان مصرفی روش ارائه شده کمتر از حالتی است که مستقیماً از حالت پایه شروع به تعیین حد پویای سیستم میشود.

ثانیا، از آنجا که در تمام روشهای ارائه شده تاکنون، از رتبهبندی پیشامدها در حالت پایه برای تعیین ATC استفاده شده است و میدانیم که با تغییر نقطه کار برای تعیین ATC، رتبهبندی پیشامدها تغییر میکند و ممکن است غربال انجام شده در حالت پایه برای تعیین خطرناکترین پیشامد، باعث حذف خطرناکترین خطا در هنگام تعیین ATC شود؛ لذا در روش ارائه شده در این قطه کار، رتبهبندی پیشامدها انجام می شود. در این حالت، امکان گم کردن خطرناکترین خطا در هنگام تعیین پایداری پویا وجود ندارد.

ثالثاً، با این کار می توان راحت تر خطرناکترین خطاها را مشخص کرد. وقتی سیستم تحت فشار قرار می گیرد؛ ولتاژ بعضی از باسها کاهش یافته و زوایای ولتاژ بعضی دیگر از باسها افزایش می یابد. این نوع باسها مستعد تولید خطرناکترین خطا می باشند. با اتصال کوتاه و یا افزایش بار در این نوع باسها می توان به راحتی (زمان اتصال کوتاه کمتر –افزایش بار کمتر) خطاهای خطرناک ایجاد کرد. لذا لزومی ندارد در باسهای و خطهای قوی دیگر، خطایی ایجاد شود.

نکته دومیکه برای افزایش سرعت روش در این الگوریتم لحاظ شده است؛ تقریب مسیر نقاط تعادل پایدار سیستم از حالت پایه تا حد استاتیک (در جهت ATC مشخص) میباشد که این تقریب با یک معادله درجه ۲ انجام شده است. این کار باعث میشود در هنگام تعیین حد پایداری پویا، مجبور نباشیم پخش بارهای زیادی انجام دهیم.

الگوریتم اصلی را می توان بصورت زیر خلاصه کرد:

- ۱) با استفاده از الگوریتم بخش ۳، ATC ایستا در جهت الگوی معین ATC، مشخص می شود.
- ۲) مسیر نقاط تعادل پایدار سیستم با یک معادله
   درجه ۲ تقریب زده می شود.
- ۳) با استفاده از نزدیکترین نقطه تعادل پایدار سیستم به مرز پایداری استاتیک، با اتصال کوتاه و یا افزایش بار، خطرناکترین خطاها مشخص میشوند.
- ۴) با استفاده از روش POMP، پیشامدهای مورد نظر در گام ۳، رتبهبندی میشوند و با در نظر گرفتن حد مجاز خطا، میتوان پایدار بودن و یا نبودن سیستم را مشخص کرد.

rse *www.SID.ir* 

شبیهسازی برای تمام خطاها) و روش قدیم [13] مقایسه شده است. سیستم قبل و بعد از خطا یکسان فرض شدهاند و زمان قطع خطا برای تمام سیستمها ۵ سیکل در نظر گرفته شده است. ATC به روش ایستا (روش تقریب دترمینان)، ATC به روش پویا با سه روش جديد، قديم و دقيق و سرعت روش جديد نسبت به روش قدیم، در جدول (۱) آورده شده است. هر چه سیستم بزرگتر شود سرعت روش جدید بیشتر میشود و توانایی آن افزایش مییابد. همچنین روش ارائه شده در این مقاله، بطور متوسط %11.2 دقیقتر از روش قدیمی است و فقط %4 با روش دقیق اختلاف دارد. با مقایسه ATC ایستا و ATC پویا در جدول (۱)، دیده می شود که ATC ایستا، دو تا سه برابر ATC پويا است. اين موضوع اهميت تعيين ATC پویا را بیشتر نشان میدهد. برای سیستمهای دیگر نیز نتایجی مشابه جدول (۱) بدست آمده است.  ۵) الف: در صورت پایدار نبودن سیستم، با کاهش توانهای تولیدی و مصرفی در جهت الگوی مشخص ATC و تقریب در نظر گرفته شده در گام ۲، گام ۴ تکرار میشود.
 ب: در صورت پایدار بودن، به جواب رسیدهایم.
 یعنی ATC با در نظر گرفتن حد پایداری ولتاژ و پایداری گذرا مشخص شده است.

در این الگوریتم، دینامیکهای متوسط مانند OLTCها در نظر گرفته نشدهاند. اما از آنجا که سرعت الگوریتم زیاد است میتوان این مشکل را حل نمود.

۶– سیستمهای مورد آزمایش

روش ارائه شده در این مقاله (روش جدید) بر روی ۵ سیستم ۳، ۷، ۱۰،۳۰ و ۱۴۵ باس آزمایش شده است. و این روش با روش دقیق (پخش بار متوالی و

Static ATC (p.u.)	Dynamic ATC				ATC between		
	Exact method	Old method	New Method		ATC between		
	ATC(p.u.)	ATC(p.u.)	Speed of new method per old method	ATC(p.u.)	To (PL)	From(P <sub>G</sub> )	System
18	6.04	5.10	1.00	4.79	2	3	3 bus
5.0	1.14	1.24	1.49	1.4	5	2	7 bus
5.5	1.42	1.53	1.31	1.44	5,6	2,3,4	
3.1	0.60	0.28	2.65	0.77	8,9	5,6,7	10 bus
4.2	0.83	0.92	5.14	0.90	3	2	
3.8	0.63	0.85	6.11	0.79	16	2	
3.7	0.89	0.95	6.19	0.97	18	2	
3.6	1.25	1.16	6.68	1.10	23	2	30 bus
3.1	0.80	0.86	5.18	0.85	24	2	50 043
2.09	0.50	0.64	6.25	0.60	30	2	
6.5	1.64	1.83	8.88	1.75	141-143	34,35	145 bus

## جدول (۱) – محاسبه ATC برای سه روش جدید. قدیم و دقیق

ATC پایداری ولتاژ و پایداری گذرا، سرعت تعیین ATC پویا بسیار افزایش یافته است. در نظر گرفتن معادلات سیستم با حفظ ساختار، پایداری گذرا و پایداری ولتاژ از نکات قوت این روش بشمار میآیند. روش ارائه شده را می توان برای رتبهبندی پیشامدها نیز بکار برد.

۷- نتيجه

ATC در این مقاله یک روش جدید برای محاسبه ATC پویا ارائه شده است. روش ارائه شده می تواند ATC را بین یک باس (ناحیه) تا باس (ناحیه) دیگر مشخص کند. با استفاده از دو روش سریع برای تشخیص & Energy Sys., Vol. 15, No. 3, 1993, pp. 145-154.

[13] A. L. Bettiol, L. Wehenkel, M. Pavella, TSA constrained maximum allowable transfer, IEEE Trans. On Power Sys., Vol. 14, No. 2, May 1999, pp. 654-659. [14]. عيدياني، مصطفى؛ مدير شانهچي، محمد حسن؛ واحدى، ابراهيم، "روش سريع و دقيق برای تعیین ATC با در نظر گرفتن پایداری

ولتار"، مجله علمي برق، دوره ۳۵، شماره مقاله

۸۰/۵۳ صص: ۵۶–۶۸، ۱۳۸۱.

[15] T. J. Overby, I. Dobson, C. L. DeMarco, Q-V curve interpretations of energy measure for voltage security, IEEE Trans. On Power Sys., Vol. 9, No. 4, Feb. 1994, pp. 331-340.

> [16]. عيدياني، مصطفى؛ مدير شانه چي، محمد حسن؛ واحدى، ابراهيم، "تعيين FCTTC با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ و پایداری گذرا به روش انرژی"، دهمین کنفرانس مهندسی برق

ايران، تبريز، مجموعه مقالات قدرت، صص

۹۴–۹۴، اردیبهشت ۱۳۸۱.

- [17] H. D. Chiang, Toward a practical performance index for predicting VC in electric power Sys., IEEE Trans. On Power Sys., Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 584-590.
- [18] T. Athay, R. Podmore, S. Virmani, A practical method for direct analysis of TSA, IEEE Trans. On Power App. & Sys., Vol. PAS-98, No. 2, Mar./Apr., 1979, pp. 584-588.
- [19] G. D. Irisari, G. C. Ejebe, W. F. Tinney, Efficient solution for EP in transient energy function analysis, IEEE Trans. on Power Sys., Vol.9, No.2, May 1994, pp.693-699.
- [20] H. D. Chiang, F. F. Wu, P. P. Varaiya, A BCU method for direct analyze of power system TSA, IEEE Trans. On Power Sys., Vol. 9, No. 3, Aug. 1994, pp. 1194-1208.
- [21] Y. Mansour, E. Vaahedi, A. Y. Chang, B. R. Corns, B. W. Garrett, K. Bemaree, T. Atahy, K. Cheung, B.C. hydro's online TSA model development anal. and

۸- مراجع

- [1] Summary result, by region of a recent TRM and capacity benefit margin survey conducted by the ATCWG, ftp.nerc.com/pub/sys/all updl/ac/atcwg/ svyrsult.pdf, 1999.
- [2] The Changing Structure of the Electric Power Industry: An Update, www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/ chg stru update/
- [3] M. H. Gravener C. Nwankpa, ATC and first order sensitivity, PE-464-PWRS-0-05-1998
- [4] G. C. Ejebe, J. G. Waight, M. Santos-Nieto, W. F. Tinny, Fast calculation of linear ATC, IEEE Trans. on Power Sys., Vol. 15, No. 3, Aug. 2000, pp. 1112-1116.
- [5] P. Sh. Kundur, Power system stability and Control, McGraw-Hill, 1996.
- [6] C. W. Taylor, Power system voltage stability, New York, McGraw-Hill, 1994.
- [7] G. Hamoud, Assessment of ATC of transmission Preprint Order SVS., Number: PE-002PRS (09-99), Feb. 2000.
- [8] J. Peschon, Interchange power sys. optimum power flow for system with area interchange control, IEEE Trans. on Power and Apparatus Sys., Vol. T-PAS-72, May 1972, pp. 898-905.
- [9] S. Grijalva, P. W. Sauer, Reactive power considerations in linear ATC computation, Proceedings of the 32nd Hawaii Annual International Conference on System Sciences, 1999.
- [10] Y. Dai, J. D. McCalley, V. Vittal, Simplification, expansion and enhancement of direct interior point algorithm for power system maximum loadability, IEEE Trans. on Power Sys., Vol. 15, No. 3, Aug. 2000, pp.1014-1021.
- [11] R. A. Schluter, A. Costi, Multiple contingency selection for transmission reliable, Electrical Machines and Power Sys., Vol. 20, NO. 3, May 1992, pp. 223-237.
- [12] P. W. Sauer, B. C. Lesieutre, M. A. Pai, Maximum loadability and VS in power system, Int. Journal of Electrical Power

post-processing, *IEEE Trans. On Power Sys.*, Vol. 10, No. 1, Feb. 1995.

- [22] H. D. Chiang J. S. Throp, The closest UEP method for power sys. dynamic security assess., *Proc. of the 26<sup>th</sup> Con.* on Decision and Control, Los Angeles, Dec. 1987, pp. 72-76.
- [23] C. FU, A. Bose, Contingency ranking based on severity indices in DSA, *IEEE Trans. On Power Sys.*, Vol. 14, No. 3, Aug. 1999.

[24]. عيدياني، مصطفى؛ مدير شانه چي، محمد حسن، "POMP، نقطه ماكزيمم انرژى پتانسيل، روشی جدید در تشخیص پایداری گذرا بهروش مستقیم"، ششمین کنفرانس مهندسی برق ایران، صص ۲۳–۵ الی ۲۶–۵ ۱۳۷۷.

- [25] A. A. Fouad V. Vittal, *Power System TSA Using the Transient Energy Function Method*, Prentice-Hall, 1992.
- [26] K.L. Praprost, A. Loparto, An energy function method for determining VC during a power system transient, *IEEE*. *Trans. On Circuit and System*, *Fundamental Theory and Applications*, Vol. 41, No. 10, Oct. 1994, pp. 635-651.
- [27] T. Tamura, H. Mori, S. Iwamato, Relationship between voltage stability and multiple load flow solutions in electric power systems, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No.5, May 1983, pp. 1115-1125.
- [28] P.W. Sauer and M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998.

797