

یک روش سریع برای محاسبه ATC با در نظر گرفتن پایداری گذرا و پایداری ولتاژ

مصطفی عیدانی* - 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

چکیده

در این مقاله یک روش سریع دینامیکی برای محاسبه ATC¹ 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 می‌تواند 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 POMP² 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

جدید، حداکثر توان انتقالی بین دو باس و یا دو ناحیه مشخص می‌شود. ایده‌های ارائه شده در این مقاله بر روی سیستمهای ۳، 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 پیش‌بینی شده است - ATC گفته می‌شود [1,2]. روشهای محاسبه ATC را می‌توان به دو گروه استاتیک و دینامیک تقسیم کرد. در روشهای استاتیک، تغییرات زمانی متغیرهای سیستم در نظر گرفته نمی‌شوند و در روشهای پویا، از مدل‌های دینامیکی و استاتیکی بطور همزمان استفاده می‌شود. روشهای استاتیک را می‌توان به روشهای OPF، تحلیل حساسیت [3,4] و پخش بار متوالی [5-7] تقسیم کرد. در OPF، برای هر قرارداد، توانهای تولیدی و

1. Available Transmission Capability
2. Point of Maximum Potential Energy

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

ثانیاً، در هیچ یک از روشهای ارائه شده تاکنون، وقتی پایداری گذرا در نظر گرفته می‌شود؛ پایداری ولتاژ (استاتیک و یا دینامیک) در نظر گرفته نمی‌شود و معمولاً از اثر ولتاژها صرف‌نظر می‌شود. 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 پایداری ولتاژ، روش تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین است [14]. این روش با روش اختلاف انرژی بین نقطه تعادل پایدار و ناپایدار [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 می‌باشد. PEBS^۳ [18]، نقطه تعادل ناپایدار کنترل کننده^۴ [19]، BCU^۵ [20]، ضربه دوم^۶ [21]، شاخص سختی^۷ [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 پویا 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

مصرفی مورد نظر در ATC، بطور بهینه افزایش داده می‌شوند. 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 می‌شود. 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 می‌شود. "پخش بار بهینه سیستم قدرت" [8]، "در نظر گرفتن توان موهومی در ATC خطی" [9] و "الگوریتم نقطه درونی" [10] از جمله مقاله‌های مهم در ATC ایستا می‌باشند.

معیارهایی که باعث محدودیت افزایش توان در الگوریتم محاسبه ATC ایستا می‌شوند عبارتند از: محدودیتهای حرارتی و استاتیکی خطوط، واگرایی پخش 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 می‌شود. در روشهای ارائه شده تاکنون از غربال و رتبه‌بندی پیشامدها در نقطه کار استفاده شده است و با افزایش تدریجی توان تولیدی و مصرفی، حداکثر توان انتقالی بین دو باس و یا دو ناحیه محاسبه می‌شود. "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 می‌باشند. دقت محاسبه در این روشها از مهم‌ترین مزایای آنها نسبت به روشهای ایستا می‌باشند ولی معایب آنها را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد: اولاً خطرناکترین پیشامدها در حالت پایه و در حالت حداکثر انتقال توان با

3. Potential Energy Boundary Surface
4. Controlling UEP
5. Boundary Controlling UEP
6. Second Kick
7. Severity Index

توابع انرژی که شامل انرژی جنبشی و پتانسیل (وابسته به مسیر و مستقل از مسیر) می‌باشند؛ بصورت زیر خلاصه می‌شوند [25]:

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

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

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

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

(۳)

می‌دانیم بررسی سیستم قدرت، شامل حل معادلات دیفرانسیل معمولی (ODE) ^{۱۱} 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) ^{۱۱} 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:

$$\dot{\tilde{\phi}}_i = P_i + \sum_{j=1}^{n+N} B_{ij} v_i v_j \sin(\tilde{\phi}_i - \tilde{\phi}_j) \quad , i = n+1 : n+N$$

$$\dot{v}_i = Q_i - \sum_{j=1}^{n+N} B_{ij} v_i v_j \cos(\tilde{\phi}_i - \tilde{\phi}_j) \quad , i = n+1 : n+N$$

(۴)

حال می‌توان روابط (۱) و (۴) را در یک دستگاه معادلات دیفرانسیل حل کرد.

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

۲ - معادلات سیستم قدرت

در بررسی پایداری گذرا، وقتی بار با امپدانس ثابت مدل زده می‌شود و یا از اثر ولتاژ صرف‌نظر می‌شود؛ ممکن است در محاسبه زمان قطع خطای بحرانی خطایی ایجاد شود. لذا در این مقاله از معادلات سیستم قدرت و توابع انرژی با حفظ ساختار^۸ استفاده می‌شود [25]. فرض کنید N تعداد باسهای بار و n تعداد ژنراتورها باشد. معادلات سیستم قدرت در مرجع مرکز اینرسی (COI) ^۹ به قرار زیر خلاصه می‌شود [25]:

$$\dot{\tilde{\phi}}_i = \tilde{\omega}_i \quad , \quad i = 1 : n$$

$$M_i \dot{\tilde{\omega}}_i = P_{mi} - \sum_{j=1}^{n+N} B_{ij} v_i v_j \sin(\tilde{\phi}_i - \tilde{\phi}_j) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}$$

(۱)

که n تعداد ژنراتورها، N تعداد باسها، δ_1 تا δ_n زاویه ولتاژ داخلی ژنراتور، δ_{n+1} تا δ_{2n} زاویه ولتاژ باس، δ_0 زاویه مرکز COI، ω_0 سرعت زاویه‌ای در COI و بقیه پارامترها بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\phi = [\delta_1 : \delta_n : \delta_{n+1} : \delta_{2n}]^T \quad \tilde{\phi} = \phi - \delta_0 \quad , \quad \tilde{\omega} = \omega - \omega_0$$

معادلات پخش بار (معادلات استاتیک) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$P_i + \sum_{j=1}^{n+N} B_{ij} v_i v_j \sin(\tilde{\phi}_i - \tilde{\phi}_j) = 0 \quad , i = n+1 : n+N$$

$$Q_i - \sum_{j=1}^{n+N} B_{ij} v_i v_j \cos(\tilde{\phi}_i - \tilde{\phi}_j) = 0 \quad , i = n+1 : n+N$$

(۲)

۳- روشهای پایداری ولتاژ

قدیمی‌ترین و مهم‌ترین روش تشخیص پایداری ولتاژ روش پخش بار متوالی است [5,6] که عیب آن سرعت کم روش می‌باشد. 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 مهم‌ترین روشهای تشخیص پایداری ولتاژ می‌باشند که در جریان این مقاله بررسی شده‌اند.

روش ارائه شده در [17] ساده‌تر و ارزاتر 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 می‌باشد. 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 A, B, C و D تقسیم کرد و دترمینان آن را می‌توان بصورت زیر تبدیل کرد:

$$\text{Det}(J) = \det(A) \cdot \det(D - CA^{-1}B) \quad (5)$$

روابط زیر را تعریف می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \text{diag}(A) &= [a_{11} \ a_{22} \ \dots \ a_{nn}], \text{ such that } a_{ii} \\ &\text{are diagonal elements of } A. \\ \text{prod}(\text{diag}(A)) &= a_{11} \cdot a_{22} \cdot \dots \cdot a_{nn} \\ 1./\text{diag}(A) &= [1/a_{11} \ 1/a_{22} \ \dots \ 1/a_{nn}] \end{aligned} \quad (6)$$

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

حال نشان می‌دهیم که:

$$|X_{ii}| > |X_{ij}| \quad \forall i, j \text{ and } X=A, B, C \text{ and } D \quad (7)$$

برای ماتریسهای A و D داریم:

$$A_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{j=1, \neq i}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (8)$$

$$A_{jj} = \frac{\partial P_j}{\partial \delta_j} = V_j V_i Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij})$$

$$D_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \sum_{j=1, \neq i}^n V_i Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) + 2V_i Y_{ii} \sin(-\gamma_{ii})$$

$$D_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij})$$

با فرض $|v_i| \approx 1$ و $|\delta_i| \approx 0$ و $|\gamma_{ij}| \approx 90$ (داریم شبیه پخش بار جدا شده):

$$A_{ii} = - \sum_{j=1, \neq i}^n Y_{ij}, \quad A_{ij} = Y_{ij} \Rightarrow |A_{ii}| > |A_{ij}| \quad (9)$$

$$D_{ii} = - \sum_{j=1}^n Y_{ij} - Y_{ii}, \quad D_{ij} = -Y_{ij} \Rightarrow |D_{ii}| > |D_{ij}|$$

برای ماتریسهای B و C نیز می‌توان مانند رابطه (۹)، نشان داد که درایه‌های قطر اصلی ماتریسهای A, B, C و D ، از تمام درایه‌های قطرهای فرعی آنها بزرگتر است. لذا می‌توان دترمینان ماتریس ژاکوبین را بصورت زیر تقریب زد:

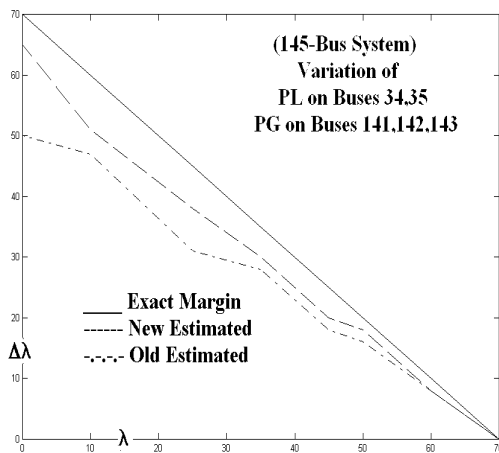
$$\text{Det}(J) = \text{prod}(\text{diag}(A)) \cdot \text{prod}(\text{diag}(D) - \text{diag}(C) \cdot \text{diag}(1./\text{diag}(A)) \cdot \text{diag}(B)) \quad (10)$$

تقریب رابطه (۱۰)، بسیار سریع می‌تواند دترمینان ماتریس ژاکوبین را محاسبه کند و می‌توان از آن در محاسبه ATC استفاده کرد. برای نشان دادن تغییر توانهای تولیدی و مصرفی در محاسبه ATC، از پارامتر تغییر توان λ بصورت زیر استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} P_{gi} &= P_{gi}^0 (1 + \lambda) \quad i \in N_g \text{ (number of generators)} \\ P_{dj} &= P_{dj}^0 (1 + \lambda) \quad j \in N_D \text{ (number of demands)} \end{aligned} \quad (11)$$

که P_{gi}^0 و P_{dj}^0 به ترتیب توانهای تولیدی و مصرفی در نقطه کار می‌باشند. در روش تعیین ATC با تقریب دترمینان، ابتدا λ را بر حسب دترمینان ماتریس ژاکوبین با یک معادله درجه ۲ تقریب می‌زنیم (شبیه روش تابع آزمایش دکتر چیانگ):

$$\lambda = -a (\text{Det}(J))^2 + b \quad a \ \& \ b \ \text{are unknown} \quad (12)$$



شکل (۱) - مقایسه سه روش جدید، قدیم و دقیق، بر روی سیستم ۱۴۵ باس

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 که دیده می‌شود 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 می‌باشند. با آنکه روش PEBS اتای^{۱۲} [18] یکی از سریع‌ترین روشها می‌باشد ولی نشان داده شده است که این روش دارای

که برای تعیین دو پارامتر مجهول a و b ، 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 (λ_1, λ_2) و $(\det(J_1), \det(J_2))$ می‌توان a و b را از دو معادله زیر بدست آورد:

$$\lambda_1 = -a (\text{Det}(J_1))^2 + b \quad (13)$$

$$\lambda_2 = -a (\text{Det}(J_2))^2 + b$$

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 $\det(J)$ با معادله زیر تقریب زد:

$$\lambda = -a (\text{Det}(J))^c + b \quad a, b, c \text{ are unknown} \quad (14)$$

که در رابطه فوق سه پارامتر a ، b و c مجهول‌اند که با سه پخش بار مشخص می‌شوند. نشان داده شده است که این کار باعث افزایش دقت محاسبات می‌شود. حال می‌توان الگوریتم تعیین ATC با تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین را بصورت زیر خلاصه کرد:

۱. دو معادله پخش بار در جهت ATC معین مشخص می‌شوند.
۲. با دو معادله پخش بار، دو متغیر معادله a و b در معادله (۱۲) مشخص می‌شوند.
۳. نقطه کار بحرانی پیش‌بینی می‌شود:

$$\det(J)=0 \Rightarrow \lambda_{cr}=b$$

۴. با سه نقطه کار، سه پارامتر a ، b و c در معادله (۱۴) محاسبه می‌شوند.

۵. نقطه کار بحرانی تصحیح می‌شود:

$$\det(J)=0 \Rightarrow \lambda_{cr}=b$$

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

۴-۱-۱- الگوریتم PEBS اتای

۱. نقاط تعادل پایدار سیستم برای سیستم قبل از خطا (θ^0) و بعد از خطا (θ^s) محاسبه می‌شوند.
۲. با شروع از نقطه تعادل پایدار سیستم قبل از خطا (θ^0) و $(\tilde{\omega} = 0)$ ، از سیستم خطادار انتگرال‌گیری می‌شود (معادلات سیستم خطادار حل می‌شود) و در هر گام از انتگرال‌گیری $(f^T(\theta)(\theta - \theta^s))$ محاسبه می‌شود.
۳. گام ۲ آنقدر تکرار می‌شود که در (θ^F) داشته باشیم $(f^T(\theta^F)(\theta^F - \theta^s) = 0)$. در این حالت انرژی بحرانی محاسبه شده است. $(V_{cr} = V_{PE}(\theta^F))$
۴. دوباره از سیستم خطادار انتگرال‌گیری می‌شود و در هر گام انرژی کل سیستم $(V(\theta, \tilde{\omega}))$ محاسبه می‌شود. انرژی کل در $(\theta_{cr}$ و $\tilde{\omega}_{cr})$ با انرژی بحرانی برابر می‌شود. زمان رسیدن به این نقطه، زمان قطع بحرانی (t_{cr}) است.

۴-۲- روش POMP

۴-۲-۱- 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_{cl}) 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.

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 امیدانس ثابت مدل زده می‌شود و در ماتریس ادمیتانس ادغام می‌شوند و ولتاژها ثابت فرض می‌شوند. اگر m تعداد ژنراتور باشد؛ با استفاده از مدل مرکز اینرسی (COI) برای $\dot{\mathbf{A}}$ ژنراتور داریم:

$$\dot{\theta}_i(t) = \tilde{\omega}_i \text{ and } M_i \dot{\tilde{\omega}}_i(t) = f_i(\theta(t), \dots, \theta_m(t)) \quad (15)$$

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

$$V(\theta, \tilde{\omega}) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^m \int_{\theta_i^0}^{\theta_i} f_i(\theta) d\theta = V_{KE}(\tilde{\omega}) + V_{PE}(\theta) \quad (16)$$

که: $\tilde{\omega} = [\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_m]^T$ and $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T$

فرض کنید: $f(\theta) = [f_1(\theta), f_2(\theta), \dots, f_m(\theta)]^T$
 نشان داده شده است [25] که داخل PEBS $(f^T(\theta)(\theta - \theta^s) < 0)$ و خارج از PEBS $(f^T(\theta)(\theta - \theta^s) > 0)$ و در مرز PEBS $(f^T(\theta)(\theta - \theta^s) = 0)$ است و انرژی پتانسیل $(VPE(\square))$ در مرز ماکزیمم است.

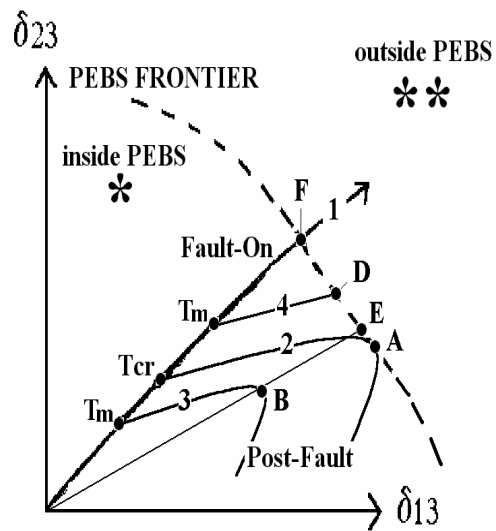
در روش PEBS اتای، عبور از PEBS با تغییر علامت $(f^T(\theta)(\theta - \theta^s))$ مشخص می‌شود. بر

نامیده شده است و مقدار تابع انرژی در نقطه تماس A، انرژی بحرانی می‌باشد (V_{cr}). 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 استفاده از روش مستقیم لیپانوف 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 پایدار سیستم پیش می‌رود. نقطه B در این مسیر بسیار 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.

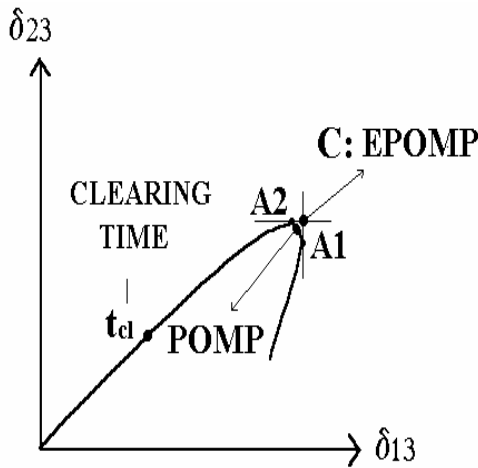
نقاط A و B در شکل که انرژی جنبشی در آنها مینیمم و انرژی پتانسیل در آنها ماکزیمم است؛ در روش ارائه شده در این قسمت بسیار مهم‌اند. ما این نقاط را POMP (نقطه ماکزیمم انرژی پتانسیل و



شکل (۲) - مسیرهای سیستم خطادار، بعد از خطا، مسیر بحرانی PEBS 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 (θ°) و به سمت مرز PEBS ($\tilde{\omega} = 0$) 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_{cr}) 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 $(0,0)$. در نقطه A، انرژی جنبشی صفر شده و انرژی پتانسیل به حداکثر خود رسیده است. این مسیر، مسیر بحرانی



شکل (۳) - مسیر سیستم خطادار و بعد از خطا برای محاسبه EPOMP

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

$$\delta_{im} = \delta_i - \delta_m = \theta_i - \theta_m \quad (17)$$

$$\dot{\delta}_{im} = \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_m = \tilde{\omega}_i - \tilde{\omega}_m = \tilde{\omega}_{im}$$

$$\ddot{\delta}_{im} = \ddot{\theta}_i - \ddot{\theta}_m = \frac{1}{M_i} f_i(\theta) - \frac{1}{M_m} f_m(\theta) = F_{im}(\theta)$$

با بسط دادن $\delta_{im}(t)$ ، مسیر بعد از خطا با بسط تیلور مرتبه ۲ حول زمان قطع خطا و با استفاده از معادلات فوق داریم:

$$\delta_{im}(t) = \delta_{im}(t_{cl}) + \frac{d\delta_{im}}{dt}(t_{cl})(t-t_{cl}) + \frac{d^2\delta_{im}}{2dt^2}(t_{cl})(t-t_{cl})^2 = \delta_{im}(t_{cl}) + \tilde{\omega}_{im}(t_{cl})(t-t_{cl}) + \quad (18)$$

$$\frac{1}{2} F_{im}(\theta(t_{cl}))(t-t_{cl})^2 = (\theta_i(t_{cl}) - \theta_m(t_{cl})) +$$

$$(\tilde{\omega}_i(t_{cl}) - \tilde{\omega}_m(t_{cl}))(t-t_{cl}) + \frac{1}{2} F_{im}(\theta(t_{cl}))(t-t_{cl})^2$$

خطا بشمار می‌آیند. همچنین آخرین حالت سیستم بعد از

خطا بشمار می‌آیند. همچنین آخرین حالت سیستم

مینیمم انرژی جنبشی مسیر سیستم بعد از خطا می‌نامیم.

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

۴-۲-۲- 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 δ_{13} و δ_{23} به ترتیب در نقاط A1 و A2 اتفاق می‌افتند. ژنراتور سوم به عنوان مرجع انتخاب شده است. A1 و A2 همزمان اتفاق نمی‌افتند. ماکزیمم مقدار زاویه δ_{13} (نقطه A1) بعضی وقتها بعد از ماکزیمم زاویه δ_{23} (نقطه A2) اتفاق می‌افتد. نقطه C را در نظر بگیرید. این نقطه با استفاده از نقاط A1 و A2 مشخص می‌شوند. به عبارت دیگر $C=(A_1, A_2)$ و به نظر می‌رسد تقریب خوبی برای POMP باشد.

از شرایط اولیه (θ^0 و $\tilde{\omega}^0 = 0$) شروع شده و با یک روش سریع، انتگرال‌گیری می‌شود. مقادیر زمان و حالت‌های سیستم در پایان انتگرال‌گیری با (θ_b, t_b) مشخص می‌شوند.

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

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

(۵) گام‌های ۲، ۳ و ۴ آنقدر ادامه داده می‌شود تا شاخص PEBS در (θ^*) صفر شود و یا تغییر علامت بدهد. (θ^*) خیلی به θ^A شکل ۲ نزدیک است که در این نقطه $(f^T(\theta^A)(\theta^A - \theta^s)) = 0$. در این حالت انرژی بحرانی محاسبه می‌شود $V_{cr} = V_{PE}(\theta^*)$.

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

۵- الگوریتم اصلی

۵-۱- 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 ۳، ۷، ۱۰، ۳۰ و ۱۴۵ باس امتحان شده است. زمان قطع خطا ۵ سیکل فرض شده است و حذف خطا با برطرف شدن خطا میسر می‌شود. یعنی سیستم قبل از خطا و بعد از

خطا دار و در زمان t_{cl} نیز می‌باشند. با مشتق‌گیری از رابطه (۱۸) نسبت به زمان و مساوی صفر قرار دادن آن، می‌توان زمانی را محاسبه کرد که در آن زاویه $(\delta_{im}(t))$ ماکزیمم می‌شود.

$$\dot{\delta}_{im}(t) = \tilde{\omega}_{im}(t_{cl}) + F_{im}(\theta(t_{cl}))(t_i - t_{cl}) = 0 \quad (19)$$

$$(t_i - t_{cl}) = -\frac{\tilde{\omega}_{im}(t_{cl})}{F_{im}(\theta(t_{cl}))}$$

قابل توجه است که اگر سیستم پایدار باشد مقدار $(F_{im}(\theta(t_{cl})))$ منفی است. لذا (ti-tcl) مثبت می‌شود. همچنین به ازای آهای مختلف، ماکزیمم δ_{im} ها در زمانهای مختلفی اتفاق می‌افتد. با قرار دادن زمان ماکزیمم زوایای معادله (۱۹) در معادله (۱۸) داریم:

$$\begin{aligned} \delta_{im}^{Max} &= \delta_{im}(t_{cl}) + \omega_{im}(t_{cl})(t_i - t_{cl}) + \\ &\frac{1}{2} F_{im}(\theta(t_{cl}))(t_i - t_{cl})^2 = (\theta_i(t_{cl}) - \theta_m(t_{cl})) - \\ &\tilde{\omega}_{im}(t_{cl}) \left(\frac{\tilde{\omega}_{im}(t_{cl})}{F_{im}(\theta(t_{cl}))} \right) + \frac{1}{2} F_{im}(\theta(t_{cl})) \left(\frac{\tilde{\omega}_{im}(t_{cl})}{F_{im}(\theta(t_{cl}))} \right)^2 = \\ &(\theta_i(t_{cl}) - \theta_m(t_{cl})) - \frac{\tilde{\omega}_{im}(t_{cl})^2}{2F_{im}(\theta(t_{cl}))} \end{aligned} \quad (20)$$

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

$$\theta_i^{Max} - \theta_m^{Max} = \delta_{im}^{Max} \sum_{i=1}^m M_i \theta_i^{Max} = 0 \quad (21)$$

و در نتیجه داریم:

$$EPOMP = C = (\theta_1^{Max}, \dots, \theta_m^{Max}) = (\theta^{Max}) \quad (22)$$

۴-۲-۳- الگوریتم POMP

با داشتن تقریب POMP می‌توان با استفاده از آن، زمان قطع خطای بحرانی را بصورت زیر مشخص کرد: (۱) نقاط کار پایدار سیستم قبل از خطا (θ^0) و بعد از خطا (θ^S) محاسبه می‌شوند.

(۲) از سیستم خطا دار برای یک فاصله زمانی کوچک $\Delta(t)$ انتگرال‌گیری می‌شود. این انتگرال‌گیری

ثالثاً، با این کار می‌توان راحت‌تر خطرناکترین خطاها را مشخص کرد. وقتی سیستم تحت فشار قرار می‌گیرد؛ ولتاژ بعضی از باسها کاهش یافته و زوایای ولتاژ بعضی دیگر از باسها افزایش می‌یابد. این نوع باسها مستعد تولید خطرناکترین خطا می‌باشند. با اتصال کوتاه و یا افزایش بار در این نوع باسها می‌توان 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.

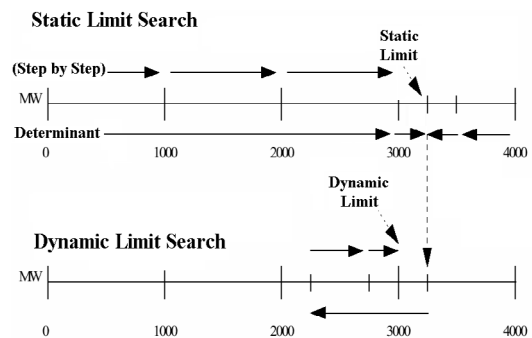
نکته دومی که برای افزایش سرعت روش در این الگوریتم لحاظ شده است؛ تقریب مسیر نقاط تعادل پایدار سیستم از حالت پایه تا حد استاتیک (در جهت ATC مشخص) می‌باشد که این تقریب با یک معادله درجه ۲ انجام شده است. این کار باعث می‌شود در هنگام تعیین حد پایداری پویا، مجبور نباشیم پخش بارهای زیادی انجام دهیم.

۵-۲- الگوریتم

- الگوریتم اصلی را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:
- (۱) با استفاده از الگوریتم بخش ۳، ATC ایستا در جهت الگوی معین ATC، مشخص می‌شود.
 - (۲) مسیر نقاط تعادل پایدار سیستم با یک معادله درجه ۲ تقریب زده می‌شود.
 - (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.

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 می‌گردیم. مزایای اینکار عبارتند از:



شکل (۴) - الگوریتم اصلی

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. ثانیاً، 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 قسمت، ابتدا سیستم تحت فشار قرار می‌گیرد و در این نقطه کار، رتبه‌بندی پیشامدها انجام می‌شود. در این حالت، امکان گم کردن خطرناکترین خطا در هنگام تعیین پایداری پویا وجود ندارد.

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، ۳۰، ۱۰۵ و ۱۴۵ باس آزمایش شده است. و این روش با روش دقیق (پخش بار متوالی و

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 جدید، قدیم و دقیق و سرعت روش جدید 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 می‌شود که ATC ایستا، دو تا سه برابر ATC پویا است. این موضوع اهمیت تعیین ATC پویا را بیشتر نشان می‌دهد. برای سیستمهای دیگر نیز نتایج مشابه جدول (۱) بدست آمده است.

جدول (۱) - محاسبه ATC برای سه روش جدید، قدیم و دقیق

| Static ATC (p.u.) | Dynamic ATC | | | | ATC between | | System |
|-------------------|--------------|------------|------------------------------------|-----------|-------------|-----------------------|---------|
| | Exact method | Old method | New Method | | To (PL) | From(P _G) | |
| | ATC(p.u.) | ATC(p.u.) | Speed of new method per old method | ATC(p.u.) | | | |
| 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 | 30 bus |
| 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 | |
| 3.1 | 0.80 | 0.86 | 5.18 | 0.85 | 24 | 2 | |
| 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 |

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 می‌توان برای رتبه‌بندی پیشامدها نیز بکار برد.

۷- نتیجه

در این مقاله یک روش جدید برای محاسبه ATC پویا ارائه شده است. روش ارائه شده می‌تواند ATC را بین یک باس (ناحیه) تا باس (ناحیه) دیگر مشخص کند. با استفاده از دو روش سریع برای تشخیص

۸- مراجع

- & *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] عیدانی، مصطفی؛ مدیر شانه‌چی، محمد حسن؛ واحدی، ابراهیم، "روش سریع و دقیق برای تعیین ATC با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ"، مجله علمی 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] عیدانی، مصطفی؛ مدیر شانه‌چی، محمد حسن؛ واحدی، ابراهیم، "تعیین FCTTC با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ و پایداری گذرا به روش انرژی"، دهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، تبریز، مجموعه مقالات قدرت، صص ۸۶-۹۴، 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 on-line TSA model development anal. and
- [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/svyrslult.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 sys., Preprint Order 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 Annual Hawaii 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, N0. 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 26th 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] عیدپانی، مصطفی؛ مدیر شانه‌چی، محمد حسن، "POMP، نقطه ماکزیمم انرژی پتانسیل، روشی جدید در تشخیص پایداری گذرا به روش 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. Iwamoto, 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.