

تعیین ATC با در نظر گرفتن همزمان پایداری ولتاژ و پایداری گذرا

مصطفی عیدانی*، محمدحسن مدیر شانه‌چی** و ابراهیم واحدی***

گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد واحد بجنورد
گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
دانشگاه انگلیسی کلمبیا و شرکت Fellow IEEE, BC Hydro

(دریافت مقاله: ۸۱/۸/۲۰ - دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۵/۲۱)

چکیده - روشهای تعیین ATC را می‌توان به دو گروه روشهای ایستا و روشهای پویا تقسیم کرد. این مقاله یک روش سریع پویا برای تعیین ATC ارائه می‌دهد که در آن هم حد پایداری دینامیکی ولتاژ و هم حد پایداری گذرای زاویه در نظر گرفته شده‌اند. برای تعیین حد دینامیکی ولتاژ از دترمینان ماتریس ژاکوبین، که با تقریب محاسبه می‌شود، به عنوان شاخص استفاده شده است و برای تعیین پایداری گذرا از روش مستقیم انرژی استفاده می‌شود. با ترکیب این دو روش، الگوریتمی ارائه شده که می‌تواند ATC را با در نظر گرفتن هر دو حد پایداری دینامیکی ولتاژ و گذرای زاویه تعیین کند. مهمترین مزیت این الگوریتم علاوه بر در نظر گرفتن پایداری دینامیکی ولتاژ و گذرای زاویه، سرعت آن است. با توجه به سرعت این روش می‌توان آن را به عنوان نامزد مناسبی برای غربال اولیه پیشامدها و تعیین مواردی که بایستی با دقت بیشتر بررسی شوند، در نظر گرفت. نتایج کاربرد این روش برای سیستمهایی با ۲، ۳، ۷ (CIGREE)، ۱۰، ۳۰ (IEEE) و ۱۴۵ باس در مقاله آورده شده است که سرعت و کارایی آن را محرز می‌سازد.

واژگان کلیدی: پایداری ولتاژ، پایداری گذرا، ATC

Assessment of ATC Using Simultaneous Voltage and Transient Stability

M. Eidiyani, M. H. Modir Shanechi and E. Vaahedi
Azad University of Bojnourd, Ferdowsi University B.C Hydro

Abstract: Methods for calculating Available Transfer Capability (ATC) of the transmission systems may be grouped under Static and Dynamic methods. This paper presents a fast dynamic method for ATC calculations, which considers both Transient Stability Limits and Voltage Stability Limits as terminating criteria. A variation of Energy Function Method is used to determine the transient stability limit and the determinant of the Jacobian matrix of the system is used as an index to determine the voltage stability limit. A novel method is used to approximately calculate this determinant. Combining these two methods, an algorithm that calculates ATC, based on both voltage and angle dynamic stability is presented. The advantage of this algorithm, besides considering both voltage and angle dynamic stability, is its high speed. This speed of calculation makes the algorithm a perfect

*** - استاد

** - دانشیار

* - مربی

candidate to be used in screening contingencies and to determine those cases that need to be further analyzed. To demonstrate the validity, efficiency, and the speed of the new method, it is employed in the calculation of ATC for numerical examples with 2, 3, 7 (CIGREE), 10, 30 (IEEE) and 145 (Iowa State) buses.

Keywords: Voltage Stability, Transient Stability, ATC

فهرست علائم

PEBS	سطح مرزی انرژی پتانسیل	ATC	توانایی انتقال قابل دسترس
POMP	نقطه ماکزیمم انرژی پتانسیل	(a,b,c)	پارامترهای ثابت
V^S	ولتاژ پایدار سیستم	A,B,C,D	چهار قسمت ماتریس ژاکوبین
$V(\delta,v)$	تابع انرژی	ADE	معادله دیفرانسیل - جبری
δ	زاویه باس بار	BCU	روش نقطه تعادل ناپایدار کنترل کننده بر اساس
δ^S	زاویه پایدار سیستم	محدوده	پایداری
δ^U	زاویه ناپایدار سیستم	B_{ij}	سوسپتانس خط بین باسهای (i) و (j)
ω_i	سرعت زاویه‌ای ژنراتور نام	CTSA	روش ترکیبی پایداری گذرا
λ	پارامتر تغییر توان	Det(J)	دترمینان ماتریس ژاکوبین
Q_L	توان موهومی مصرفی در باس بار	Di	ثابت اینرسی ژنراتور نام
Q_{Lmax}	حداکثر توان موهومی مجاز مصرفی در باس بار	Diag	یک تابع در زبان مطلب، بردار قطر اصلی ماتریس
SEP	نقطه تعادل پایدار	EPEBS	تخمین PEBS
Ts	تابع آزمایش	FERC	کمیسیون قانون‌گذاری انرژی فدرال
Trajectory	مسیر نقاط تعادل پایدار به سمت نقاط تعادل ناپایدار	FCTTC	توانایی انتقال کل با در نظر گرفتن اولین اتفاق
T_{cl}	زمان قطع خطا	$f(\delta_1, \delta_2)$	معادله ساده شده دینامیکی برای واحد نام (با حذف ولتاژ)
UEPi	نقطه تعادل ناپایدار شماره نام	$f_i(\delta,v)$	تابع پخش توان (معادله پخش بار)
V_i	ولتاژ باس نام	J	ماتریس ژاکوبین
V_{pe}	انرژی پتانسیل	NORP	نکات پیشنهادی منظم شده برای شرکت‌های برق
P_{mi}	توان تولیدی واحد نام	ODE	معادله دیفرانسیل جزئی
P_L	توان مصرفی در باس بار	OASIS	سیستم اطلاعاتی دسترس آزاد همزمان
Prod	یک تابع در زبان مطلب، حاصلضرب قطر اصلی ماتریس		

۱- مقدمه

ناپایداری گذرا. ATC^۱ حداکثر مقدار توانی است که در هر ساعت می‌توان اضافه بر آنچه برای آن ساعت برنامه‌ریزی شده است، بین دو نقطه انتقال داد بدون اینکه هیچ کدام از این حدود خدشه‌دار شود. از آنجا که این حداکثر انتقال توان به محدودیتهای مختلفی وابسته است لذا مفاهیم گوناگونی از ATC پدید می‌آید که برای توضیحات بیشتر می‌توانید به مراجع [۱ و ۲] مراجعه کنید. پس از آزادسازی تجارت انرژی الکتریکی در ایالات متحده، طبق دستورالعمل^۲ ۸۸۹ که توسط FERC^۳ ارائه شده است؛ کلیه

محاسبه ظرفیت انتقال توان از نقطه‌ای به نقطه دیگر از قدیمی‌ترین و مهمترین مسائل در بهره‌برداری و طراحی سیستم قدرت است. حداکثر توانی که می‌توان از یک نقطه (باس یا منطقه) به نقطه‌ای دیگر (باس یا منطقه) انتقال داد توسط عوامل زیر محدود می‌شود: حد حرارتی خطوط، حد پایداری استاتیکی، حد ولتاژ در باسها، ناپایداری ولتاژ دینامیک و

سیستمهای موجود موظف شدند که هر ساعت، ATC را محاسبه و برای درج در یک سیستم اطلاعاتی به نام OASIS^۴ (سیستم اطلاعاتی دسترس آزاد همزمان) ارسال کنند. از این زمان، محاسبه ATC اهمیت بیشتری پیدا کرده است. از آنجا که هر یک MW ظرفیت انتقال، می‌تواند ارزش میلیون دلاری در سال داشته باشد؛ دقت در تعیین ATC دارای اهمیت زیاد و اولویت اصلی است به طوری که صاحبان سیستمهای انتقال، زمان بسیار زیادی را صرف محاسبه دقیق آن می‌کنند.

از نقطه نظر موضوعی، روشهای محاسبه ATC به دو گروه کلی روشهای ایستا و روشهای پویا تقسیم می‌شوند. اصولاً به روشهایی ایستا می‌گویند که تغییرات زمانی متغیرهای سیستم را در نظر نمی‌گیرند. اگر بخواهیم ATC را از یک ناحیه به ناحیه دیگر، با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ بررسی کنیم، توان مصرفی در ناحیه (یا باس) مقصد و توان تولیدی در ناحیه (یا باس) مبدا، آن قدر افزایش داده می‌شود تا دیگر پخش بار، جواب نداشته باشد. این نوع تعیین انتقال توان، ساده‌ترین نوع تعیین ATC است که فقط حدود استاتیکی مانند واگرایی پخش بار، حد ولتاژ در باسها، محدودیت توان موهومی تولیدی در باسها و ... در محاسبه آن مد نظر قرار می‌گیرد. پخش بار متوالی [۳] و [۴] قدیمی‌ترین روشی است که در روشهای جدید نیز برای مقایسه استفاده می‌شود. پخش بار بهینه [۵]، در نظر گرفتن توان موهومی در ATC [۶]، روش تحلیل حساسیت [۷]، الگوریتم نقطه درونی [۸] و روش تقریب درمیان [۲] از دیگر روشهای ایستا برای تعیین ATC هستند. از مزایای این روشها می‌توان، سادگی، واضح بودن، انعطاف پذیری و سرعت را نام برد و عیب آنها خطای زیاد محاسبات است.

در روشهای پویا از مدل‌های دینامیکی سیستم قدرت استفاده می‌شود. روشهای دینامیکی خود به دو گروه دینامیکهای کند و سریع تقسیم می‌شوند. دینامیکهای کند در ازای تغییر آرام متغیرهای سیستم به وجود می‌آیند که معمولاً با خطی‌سازی اجزای سیستم قابل بررسی‌اند و در این مقاله مد نظر نیستند. دینامیکهای سریع در ازای تغییرات شدید در سیستم قدرت از

قبیل تغییر ناگهانی بار، اتصال کوتاه، از دست دادن ژنراتور و ... به وجود می‌آیند که برای تحلیل این نوع دینامیکها باید از مدل دقیق و غیرخطی سیستم قدرت استفاده کرد. ساده‌ترین محدودیت دینامیکی، حد پایداری گذراست. در این نوع تعیین ATC پویا، فرض می‌شود زمان قطع خطا در هنگام اتصال کوتاه مشخص است و رله‌ها بر روی یک زمان مشخص تنظیم شده‌اند. لذا در ازای یک خطا، سیستم از نظر گذرا، پایدار و یا ناپایدار است. در این حالت، آن قدر توان مصرفی در باس (ناحیه) مقصد و توان تولیدی در باس (ناحیه) مبدا افزایش داده می‌شود (با یک گام ثابت و یا متغیر) تا سیستم ناپایدار شود. این انتقال توان محدودیت بیشتری را مد نظر قرار داده است. در این روش، برای افزایش سرعت، از اثر ولتاژ باسها صرف‌نظر می‌شود و فقط تغییرات زاویه-توان در معادلات آورده می‌شود.

در بررسیهای دینامیکی، حد دینامیکی پایداری ولتاژ و حد پایداری گذرا دو عامل مهم محدودیت کننده برای انتقال توان به شمار می‌آیند که علاوه بر آنها، محدودیتهای استاتیکی نیز باید در نظر گرفته شوند. یکی از مهمترین مراجع در زمینه ATC پویا، روش MAT^۵ است [۹]. در این روش که در مقاله "ماکزیمم مقدار توان قابل انتقال با در نظر گرفتن حد پایداری گذرا" در سال ۱۹۹۹ ارائه شده است، ابتدا تعداد زیادی از اتفاقات در حالت بار پایه برحسب حد پایداری گذرا دسته‌بندی و تعدادی از آنها غربال می‌شوند و خطرناکترین آنها به طور دقیق موشکافی می‌شود. سپس با استفاده از این طبقه‌بندی پیشامدها و داشتن الگوی ATC، حداکثر انتقال توان محاسبه می‌شود. دیگر روشهای پویا را می‌توان در مراجع زیر بررسی کرد: انتخاب و غربال چندین پیشامد برای مطالعه توانایی انتقال [۱۰]، بیشترین توانایی بارگذاری [۱۱] و استفاده از روشهای انرژی برای تعیین ATC و FCTTC^۱ [۱۲] و [۱۳]. از مزایای این روشهای می‌توان توانایی حل مسئله پس از تغییر پارامترها و دقت محاسبات را نام برد و عیب آنها معمولاً پاسخ کند روشهاست.

از آنجا که در این مقاله، ATC به روش پویا - با تاکید بر ناپایداری ولتاژ و ناپایداری گذرا به عنوان عوامل محدود کننده انتقال توان-

بررسی می‌شود، بر روی مهمترین روشهای تعیین پایداری ولتاژ و گذرا متمرکز می‌شویم. مهمترین روشهای تعیین حد پایداری ولتاژ عبارت اند از: پخش بار متوالی، شرایط عددی در ویژه بودن ماتریس ژاکوبین، شاخص فاصله اقلیدسی بین نقطه تعادل پایدار و ناپایدار، شاخص اختلاف انرژی بین نقطه تعادل پایدار و ناپایدار [۱۴-۱۶]، حل مشخصه سیستم برای پیدا کردن نقطه بحرانی، تعیین حساسیت معادلات پخش بار به تغییرات بار، شاخص تابع آزمایش دکتر چیانگ^۷ [۱۷] و روش تقریبی دترمینان [۲]. در بخش دوم به طور خلاصه بعضی از روشهای فوق با هم مقایسه می‌شوند و بهترین روش انتخاب می‌شود. همچنین مهمترین روشهای تعیین حد پایداری گذرا عبارت اند از: استفاده از نقاط تعادل ناپایدار (نزدیکترین و یا کنترل کننده)،^۸ PEBS [۱۸] و POMP^۹ [۱۹]. در بخش سوم به طور خلاصه بعضی از روشهای فوق با هم مقایسه شده و بهترین روش انتخاب می‌شود. از آنجا که باید ارتباط بین دو محدودیت پایداری گذرا و پایداری ولتاژ کاملاً مشخص شود و مرزهای پایداری و نقاط تعادل پایدار و ناپایدار بررسی شوند؛ لذا از دو سیستم ساده برای نشان دادن این مفاهیم استفاده شده است. در قسمت اول بخش چهارم، انرژی، سطح مرزی انرژی پتانسیل، دترمینان ماتریس ژاکوبین و معادلات دینامیکی بر روی یک سیستم ساده با ۳ ژنراتور بررسی شده است که در این مثال از اثر ولتاژ صرف نظر شده است. در قسمت دوم بخش چهارم، موارد قبلی با در نظر گرفتن تغییرات ولتاژ بر روی یک سیستم ساده دو باسه تکرار شده است. در بخش پنجم، الگوریتم اصلی این مقاله برای تعیین ATC با در نظر گرفتن تمام حدود استاتیکی و دینامیکی ارائه شده است. در بخش ششم، الگوریتم اصلی بر روی سیستمهای ۷، ۱۰، ۳۰ و ۱۴۵ باس اجرا شده است و دقت روش با روش شبیه‌سازی و پخش بار متوالی مقایسه شده است. در بخش هفتم نتیجه گیری و بخش هشتم مراجع آورده شده است.

۲- روشهای تعیین پایداری ولتاژ

۱-۲- مقدمه

در این بخش به طور خلاصه، مزایا و معایب بعضی از

روشهای تعیین پایداری ولتاژ آورده شده است و بهترین روش انتخاب می‌شود. اختلاف انرژی بین نقطه تعادل پایدار و ناپایدار به عنوان شاخص پایداری ولتاژ در مراجع [۱۴-۱۶] آورده شده است. با آن که در مرجع [۱۶] روش قدیمی این روش [۱۵] بهبود یافته است ولی مشکل یافتن نقطه تعادل ناپایدار همچنان باقی مانده است و در سیستمهای واقعی و بزرگ این مسئله به یک مشکل زمان‌بر تبدیل می‌شود و این نوع روشها ارزش خود را از دست می‌دهند.

روش دوم مورد بررسی، روش پخش بار تداومی کاربردی است. عیب این روش این است که دیر به جواب می‌رسد و مزیت آن این است که احتیاج به الگوریتم خاصی ندارد و فقط از پخش بار کلاسیک استفاده می‌شود [۳] و در اغلب موارد برای مقایسه دیگر روشها به کار می‌رود. روش سوم مورد مطالعه، شاخص تابع آزمایش ts [۱۷] است که به دلیل ساختاری، قادر است مستقیماً در تعیین ATC ایستا به کار رود. مزیت روش فوق سادگی و کمی محاسبات است و فقط احتیاج به جواب دو معادله پخش بار است. این روش از دیگر روشها مانند مقادیر ویژه، بردار ویژه و تابع انرژی و شرایط عددی قویتر است [۱۷]. همچنین این روش احتیاج به محاسبه نقطه تعادل ناپایدار ندارد که مهمترین مشکل روشهای انرژی است. ولی نشان داده شده است که این روش دو عیب دارد [۲]. اولاً زمان محاسبه تابع آزمایش زیاد است (مخصوصاً برای سیستمهای بزرگ). ثانیاً تابع آزمایش مدل زده شده دقیق نیست. بالاخره روش چهارم، روش جدید تقریب دترمینان برای تعیین پایداری ولتاژ است [۲]. نشان داده شده است که با استفاده از رابطه تقریبی دترمینان و استفاده از سه نقطه کار، می‌توان تقریب خوبی از حد پایداری ولتاژ ارائه داد [۲].

۲-۲- روش تقریب دترمینان

در این روش سعی شده است سرعت روش دترمینان افزایش یابد. از روش زیر می‌توان به عنوان تقریب دترمینان برای افزایش سرعت محاسبه آن استفاده کرد: (J ماتریس ژاکوبین

است که به چهار زیر ماتریس A, B, C و D تقسیم شده است؛
شبه معادله ۱۰)

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

در رابطه فوق که به زبان مطلب نوشته شده است اگر A یک ماتریس و B یک بردار باشد، $\text{diag}(A)$ به معنای عناصر قطری ماتریس A ، $\text{prod}(B)$ به معنای حاصلضرب عناصر بردار B و $\text{diag}(B)$ به معنای ماتریسی است که قطر آن بردار B است. رابطه فوق به عنوان تقریبی از دترمینان ماتریس ژاکوبین (J) استفاده می‌شود. با استفاده از این رابطه تقریبی، حتی اگر تعداد باسها زیاد باشد؛ تقریباً زمانی برای محاسبه دترمینان صرف نمی‌شود. برای تعیین الگوی ATC بین باسهای تولید و باسهای مصرف از پارامتر λ به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$P_{gi} = P_{gi}^0 (1 + \lambda) \quad (2)$$

$P_{dj} = P_{dj}^0 (1 + \lambda)$
که P_{gi}^0 و P_{dj}^0 نقطه کار حالت پایه سیستم‌اند و i به تعداد باسهای تولید و j به تعداد باسهای مصرف، طبق الگوی ATC، مشخص‌اند و بسته به اینکه هر ژنراتور چه سهمی از تولید دارد و یا هر بار چه سهمی از مصرف دارد؛ همواره سعی می‌شود توان کل تولیدی با توان کل مصرفی برابر باشد و معمولاً سهم تلفات توسط باس مرجع تامین می‌شود.

مانند روش دکتر چیانگ که تابع آزمایش، با یک معادله درجه ۲ یا ۴ تقریب زده می‌شود؛ در اینجا نیز دترمینان ماتریس ژاکوبین با یک معادله درجه ۲ مدل زده شده و به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\lambda = -a \cdot (\det(J))^c + b, c = 2 \quad (3)$$

در معادله فوق، تابع دترمینان J بر حسب λ (پارامتر تغییر توان) با یک معادله درجه دو مدل زده شده است و با دو نقطه کار مشخص می‌شود. به عبارت دیگر، اگر دو نقطه کار (دو جواب پخش بار)، یکی در نقطه کار پایه و دیگری با افزایش کمی در λ در جهت الگوی ATC، معلوم باشند؛ متغیرهای a و b به راحتی به دست می‌آیند (دو معادله، دو مجهول):

$$\lambda_1 = -a(\det(J(x_1, \lambda_1)))^2 + b \quad (4)$$

$$\lambda_2 = -a(\det(J(x_2, \lambda_2)))^2 + b$$

با شبیه‌سازیهای فراوان این نتیجه حاصل شده است [۲] که در بعضی از تغییرات بار، تغییرات دترمینان از یک معادله درجه ۲ فاصله می‌گیرد (مانند تابع آزمایش t_s). لذا برای تعیین دقیقتر حد پایداری از روش زیر استفاده می‌شود. معادله λ بر حسب دترمینان به صورت تابعی از درجه c مدل زده می‌شود که سه متغیر a, b و c ، در معادله (۳) مجهول‌اند. ابتدا با فرض $c=2$ و دو نقطه کار می‌توان دو نقطه $(\lambda_1, \det(J_1))$ و $(\lambda_2, \det(J_2))$ را محاسبه کرد سپس با استفاده از معادله (۴)، a و b را محاسبه کرد. در مرحله اول، مقدار λ بحرانی در ازای دترمینان مساوی صفر پیش‌بینی می‌شود که برابر مقدار محاسبه شده b است. از آنجا که در بعضی از مثالها مقدار پیش‌بینی شده از مقدار ماکزیمم واقعی بار بیشتر است؛ به دلیل جلوگیری از واگرایی پخش بار، با نصف مقدار پیش‌بینی شده یک پخش بار سریع انجام می‌شود. با نقطه کار جدید، مقدار پیش‌بینی شده در حالت اول تصحیح می‌شود. در این حالت مقدار a, b و c ، بگونه‌ای تعیین می‌شوند که از سه نقطه کار عبور کند (سه معادله، سه مجهول). سپس λ بحرانی در ازای مقدار جدید b محاسبه می‌شود. به طور خلاصه روش تقریب دترمینان را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

الف- با دو نقطه کار پایدار و تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین با معادله درجه دو، مقدار λ بحرانی در جهت الگوی ATC پیش‌بینی می‌شود.

ب- با نصف مقدار پیش‌بینی شده پخش بار سریع دیگری انجام می‌شود. با سه نقطه کار و با تقریب دترمینان با معادله درجه c ، مقدار λ بحرانی در جهت مشخص ATC تصحیح می‌شود.

روش ارائه شده نه تنها تمام مزایای روش تابع آزمایش دکتر چیانگ را دارد (بخش ۲-۱)؛ بلکه سرعت و دقت تعیین ATC را نیز افزایش داده است [۲].

با توجه به نتایج گرفته شده [۲]، در مقاله حاضر از تقریب دترمینان برای تعیین حد پایداری ولتاژ استاتیک استفاده می‌شود.

۳- روشهای تعیین پایداری گذرا

۳-۱- مقدمه

روش شبیه‌سازی، نزدیک‌ترین نقطه تعادل پایدار، نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده، PEBS [۱۸]، شبکه عصبی [۲۰]، روش ترکیبی [۲۱]، روش تقریب در محاسبه نقطه تعادل ناپایدار BCU [۲۲] و روشهای تقریب در مسیر سیستم بعد از خطا POMP [۱۹]، CTSA [۲۳] و ضربه دوم [۲۴]، از جمله مهمترین روشهای تعیین حد پایداری گذرا هستند. تمام روشهایی که به دنبال نقطه تعادل ناپایدارند، به دلیل استفاده از روشهای همگرایی، دارای سرعت کم‌اند و در بعضی از مواقع، عدم همگرایی باعث کاهش دقت این روشها می‌شود. به نظر می‌رسد بهترین راه حل، استفاده از روشهای ترکیبی است که در آنها محاسبه انرژی در داخل شبیه‌سازی زمانی انجام می‌شود. این کار باعث می‌شود که با حفظ تواناییهای روش شبیه‌سازی، هزینه تعیین حد پایداری گذرا نیز کاهش یابد [۳]. از جمله این روشها، روش POMP است که نشان داده شده است دقت و سرعت آن قابل قبول است [۱۹] و در تعیین ATC با حد پایداری گذرا نیز قابلیت فراوان دارد [۱۳]. لذا در این مقاله از روش POMP برای تعیین حد پایداری گذرا استفاده می‌شود.

۳-۲- روش POMP

روش POMP بدنبال نقطه ماکزیمم انرژی پتانسیل در مسیر سیستم بعد از خطا می‌شود که این نقطه با تقریب بسط تیلور مرتبه دوم سیستم بعد از خطا محاسبه شده است. شکل (۱) را در نظر بگیرید. POMP و تقریب آن یعنی EPOMP^{۱۱} در شکل نشان داده شده است. تعیین POMP مشکل است؛ لذا از تقریب آن استفاده می‌شود. EPOMP به راحتی از بسط تیلور مرتبه دوم از مسیر سیستم بعد از خطا مشخص می‌شود. به طور خلاصه می‌توان الگوریتم محاسبه زمان قطع بحرانی این روش را به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. سیستم قبل از خطا، سیستم خطادار و سیستم بعد از خطا مشخص می‌شوند.

۲. نقطه تعادل پایدار اولیه سیستم قبل از خطا و نقطه تعادل پایدار سیستم بعد از خطا محاسبه می‌شوند.

۳. مسیر سیستم خطادار با استفاده از روشهای سریع انتگرال‌گیری برای یک فاصله زمانی Δt به دست می‌آید.

۴. مسیر سیستم بعد از خطا با بسط تیلور مرتبه دوم حول نقطه محاسبه شده در گام ۳ مدل زده می‌شود و ماکزیمم زوایای ماشینها محاسبه می‌شوند.

۵. معیار PEBS محاسبه می‌شود [۱۸ و ۲۰]. اگر این مقدار منفی بود مرحله ۳ انجام می‌شود و در غیر این صورت مرحله ۶ انجام می‌شود.

۶. انرژی پتانسیل در EPOMP به عنوان تقریبی از انرژی بحرانی در نظر گرفته می‌شود (V_{cr}). این انرژی با انرژی نقطه‌ای بر روی سیستم خطادار که آخرین نقطه محاسبه شده در ۴ است؛ مقایسه می‌شود. (V_1)

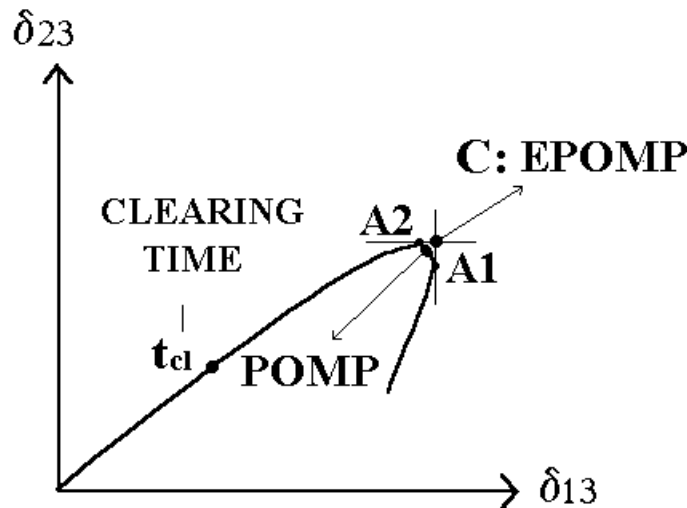
۷. از سیستم خطادار با توجه به مقادیر دو انرژی فوق انتگرال‌گیری می‌شود.

اگر $V_{cr} > V_1$ باشد انتگرال‌گیری مستقیم انجام می‌شود. ($t = t + dt$) و اگر $V_{cr} < V_1$ باشد انتگرال‌گیری معکوس انجام می‌شود. ($t = t - dt$) این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که دو انرژی برابر شوند. در این نقطه، زمان برابر زمان قطع بحرانی است.

به دلیل اینکه اختلاف اولیه بین دو انرژی کم است؛ مقدار انتگرال‌گیری دوم خیلی ناچیز است و خیلی سریع به جواب اصلی می‌رسیم. همچنین به این دلیل که لازم نیست تمام مسیر خطادار را انتگرال بگیریم؛ سرعت این روش بالا می‌رود و چون از سیستم بعد از خطا به طور مستقیم استفاده می‌شود؛ دقت محاسبات افزایش یافته است [۱۳ و ۱۹].

۴- مثالهای ساده

در این بخش، از دو مثال ساده برای درک بهتر مرزهای پایداری ولتاژ و گذرا و ارتباط بین این دو محدودیت استفاده می‌شود همچنین نقاط تعادل پایدار و ناپایدار و نقش آنها در پایداری ولتاژ و گذرا بررسی می‌شود. از هر مثال، یک ایده



شکل ۱ - مسیر سیستم خطادار و بعد از خطای یک سیستم پایدار و نمایش POMP و EPOMP

به سادگی و با انتگرال‌گیری از دو معادله فوق می‌توان رابطه انرژی پتانسیل را به صورت زیر مشخص کرد:

$$V_{pe}(\delta_1, \delta_2) = \cos(\delta_1) + 0.5 \cos(\delta_1 - \delta_2) + 0.5 \cos(\delta_2) + 0.01\delta_1 + 0.05\delta_2 \quad (8)$$

به راحتی می‌توان ثابت کرد که:

$$\frac{\partial V_{pe}}{\partial \delta_1} = f_1(\delta_1, \delta_2), \quad \frac{\partial V_{pe}}{\partial \delta_2} = f_2(\delta_1, \delta_2) \quad (9)$$

همچنین ماتریس ژاکوبین سیستم فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$(10)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \delta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\delta_1) - 0.5 \cos(\delta_1 - \delta_2) & 0.5 \cos(\delta_1 - \delta_2) \\ 0.5 \cos(\delta_1 - \delta_2) & -0.5 \cos(\delta_2) - 0.5 \cos(\delta_1 - \delta_2) \end{bmatrix}$$

$\det(J)=0$ ، مرز پاسخ داشتن معادلات پنخس بار سیستم است و به نقطه کار وابسته نیست. در این قسمت، سطح مرزی انرژی پتانسیل (PEBS) را می‌توان با مشتق گرفتن از انرژی پتانسیل به دست آورد که به صورت زیر نمایش داده می‌شود و به معیار PEBS معروف است [۲۰]:

$$(11)$$

$$PEBS(\delta_1, \delta_2) = f_1(\delta_1, \delta_2)(\delta_1 - \delta_1^S) + f_2(\delta_1, \delta_2)(\delta_2 - \delta_2^S)$$

اصلی برای الگوریتم تعیین ATC نتیجه می‌شود.

۴-۱- سیستم ساده سه باسه بدون اثر ولتاژ

در این قسمت از یک مثال ساده سه ژنراتور که ژنراتور سوم به عنوان مرجع انتخاب شده است استفاده می‌شود تا به طور واضح و به صورت تصویری رابطه سطح مرزی انرژی پتانسیل برای پایداری گذرا و دترمینان ماتریس ژاکوبین مساوی صفر برای پایداری ولتاژ؛ مشخص شود. مانند بسیاری از تحلیل‌های پایداری گذرا که فقط اثر زاویه‌ها برای تعیین حد پایداری گذرا استفاده می‌شود؛ در این مثال نیز از اثر ولتاژ صرف نظر شده است. اگر این سیستم دارای پارامترهای زیر باشد:

$$M_1=M_2=2, \quad D_1=D_2=0.6, \quad P_{m1}=0.02, \quad P_{m2}=0.1, \quad V_1=V_2=V_3=1, \quad B_{12}=B_{23}=1, \quad B_{13}=2 \quad (5)$$

معادلات دینامیکی سیستم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲۵]:

$$(6)$$

$$\dot{\delta}_1 = \omega_1, \quad \dot{\omega}_1 = -\sin(\delta_1) - 0.5 \sin(\delta_1 - \delta_2) - 0.3\omega_1 + 0.01$$

$$\dot{\delta}_2 = \omega_2, \quad \dot{\omega}_2 = -0.5 \sin(\delta_2) - 0.5 \sin(\delta_2 - \delta_1) - 0.3\omega_2 + 0.05$$

با صرف نظر کردن از اثر دمپینگ، می‌توان به معادلات کاهش یافته سیستم دست یافت:

$$\dot{\delta}_1 = -\sin(\delta_1) - 0.5 \sin(\delta_1 - \delta_2) + 0.01 = f_1(\delta_1, \delta_2) \quad (7)$$

$$\dot{\delta}_2 = -0.5 \sin(\delta_2) - 0.5 \sin(\delta_2 - \delta_1) + 0.05 = f_2(\delta_1, \delta_2)$$

که δ^S نقطه تعادل پایدار سیستم و نقاط $PEBS=0$ تقریبی از مرز پایداری گذرای سیستم را مشخص می‌کند. این سطح به نقطه کار سیستم وابسته است. این سیستم یک نقطه تعادل پایدار (δ^S) و چند نقطه تعادل ناپایدار (δ^U) دارد که دو نقطه تعادل نوع یک آن (UEP1,UEP2) در شکل (۲) مشخص شده‌اند. در شکل (۲)، خطوط کم رنگ، سطوح هم انرژی، خطوط دایره‌ای پر رنگ، نقاط $\det(J)=0$ و منحنی بسته بزرگ کم رنگ، نقاط $PEBS=0$ را مشخص می‌کنند که شامل نقاط تعادل ناپایدار نیز می‌شود. محور افقی، اختلاف زاویه بین ولتاژ باسهای ۱ و ۳ و محور عمودی، اختلاف زاویه بین ولتاژ باسهای ۲ و ۳ هستند. شکل‌های (۳) و (۴) نیز مانند شکل (۲) هستند با این تفاوت که در شکل (۳)، سیستم در ازای افزایش توان در باس (۲) و در شکل (۴)، سیستم در ازای افزایش توان در باس (۱) تحت فشار قرار گرفته است. همچنین در شکل (۴)، مسیر سیستم خطادار رسم شده است که از نقطه تعادل پایدار اولیه به سمت نقطه تعادل ناپایدار نوع یک شماره یک پیش می‌رود. در شکل‌های (۳) و (۴)، نقطه تعادل پایدار و نقطه تعادل ناپایدار به یکدیگر نزدیک شده‌اند. همچنین منحنیهای $\det(J)=0$ و $PEBS=0$ بر هم مماس شده‌اند. در حالت عادی، شکل (۲)، انرژی در UEP2 کمتر از انرژی در بقیه نقاط تعادل ناپایدار است و این نقطه تعادل، نزدیکترین نقطه تعادل ناپایدار است. لذا اتصال کوتاه در باس ۲، خطرناکترین خطا به شمار می‌آید. در شکل (۳)، خطرناک بودن اتصال کوتاه در باس ۲، به دلیل افزایش توان در باس ۲، تشدید شده است ولی لیست رتبه‌بندی پیشامدها نسبت به حالت پایه، شکل (۲) تغییر نکرده است. در شکل (۴)، خطرناکترین خطا، اتصال کوتاه در باس یک است چرا که در این حالت انرژی در UEP1 کمترین انرژی بین نقاط تعادل ناپایدار است و در نتیجه لیست رتبه‌بندی پیشامدها نسبت به حالت پایه تغییر کرده است. در روش MAT [9]، از رتبه‌بندی پیشامدها در حالت پایه برای تعیین ATC استفاده می‌شود و همچنان که در مثال فوق نشان داده شد؛ این لیست در ازای تغییر توان برای تعیین ATC، اعتبار کافی ندارد. لذا در

روش ارائه شده در این مقاله، ابتدا در ازای الگوی ATC، سیستم تحت فشار قرار گرفته و سپس از رتبه‌بندی پیشامدها استفاده می‌شود که باعث افزایش دقت در تعیین حدود ATC می‌شود. در بخش بعدی با در نظر گرفتن اثر ولتاژ باسهای بار، تحلیل بخش (۱-۴) تکرار می‌شود.

۴-۲- سیستم ساده دو باسه با اثر ولتاژ

یک سیستم ساده شامل یک ژنراتور، یک خط و یک باس بار در نظر بگیرید که $x=10$, $PL=2$, $QL=1$ مشخصات سیستم باشند. معادلات پخش توان سیستم به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۵]:

$$f_1(\delta, v) = P_L - B_{12}v \sin(\delta) = 0 \quad (12)$$

$$f_2(\delta, v) = Q_L - B_{22}v^2 - B_{12}v \cos(\delta) = 0$$

مانند بخش (۱-۴)، با انتگرال‌گیری از معادله فوق می‌توان معادله تابع انرژی را به صورت زیر به دست آورد [۱۵]: (فقط باید f_2 را بر v تقسیم کرده و سپس انتگرال بگیرید)

$$V(\delta, v) = -0.5B_{22}v^2 - B_{12}v \cos(\delta) + Q_L \ln(v) + P_L \delta \quad (13)$$

به راحتی می‌توان ثابت کرد که:

$$\frac{\partial V}{\partial \delta} = f_1(\delta, v), \quad \frac{\partial V}{\partial v} = \frac{f_2(\delta, v)}{v} \quad (14)$$

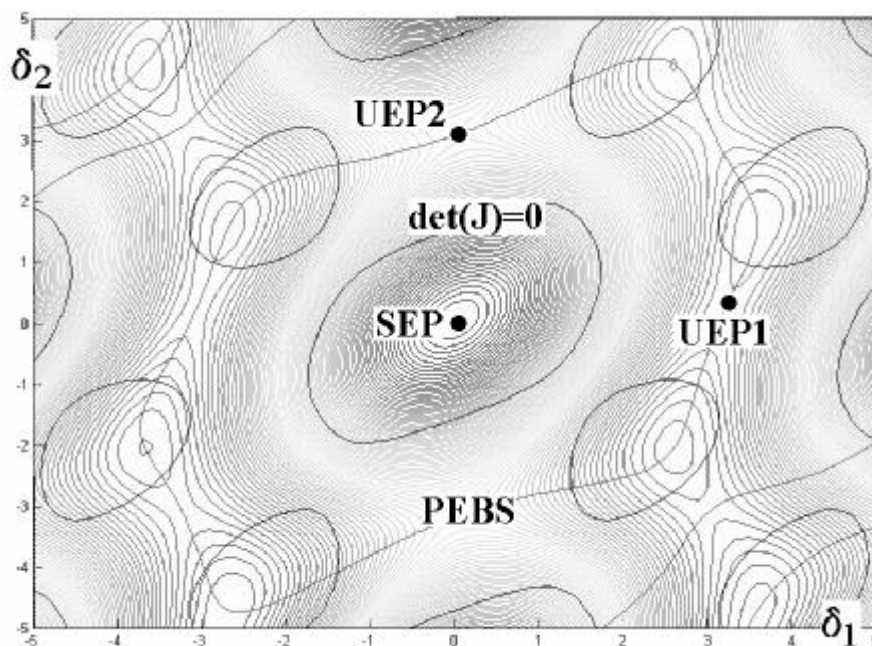
همچنین ماتریس ژاکوبین سیستم فوق به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \frac{\partial f_1}{\partial v} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \delta} & \frac{\partial f_2}{\partial v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{12}v \cos(\delta) & B_{12} \sin(\delta) \\ B_{12}v \sin(\delta) & -2B_{22}v - B_{12} \cos(\delta) \end{bmatrix}$$

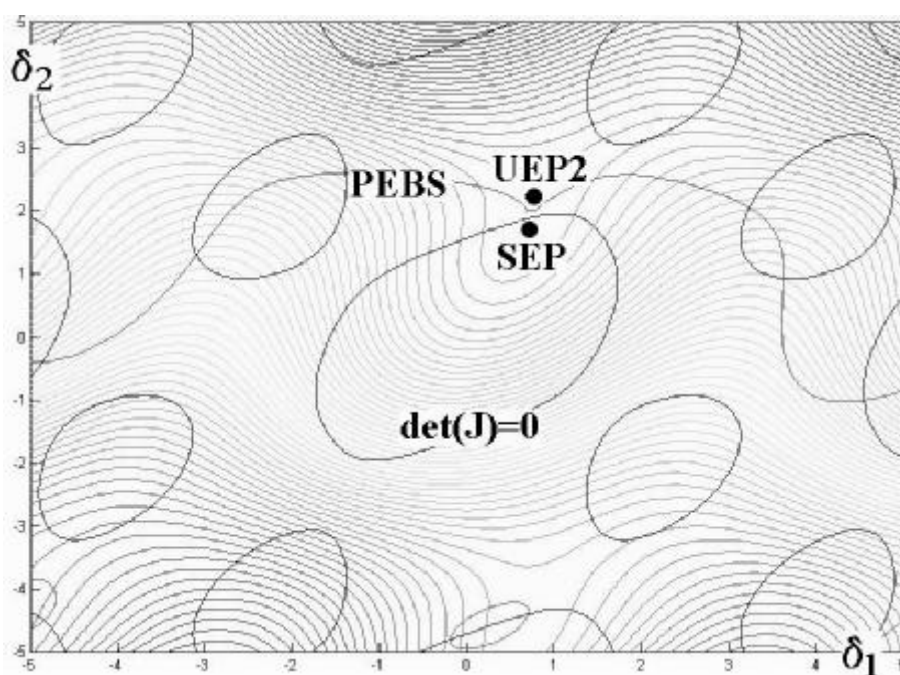
مانند بخش قبلی، $\det(J)=0$ مرز نقاط تعادل پایدار سیستم را مشخص می‌کند (در این مثال مرز پایداری ولتاژ) و سطح مرزی انرژی پتانسیل با مشتق‌گیری از انرژی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$PEBS(\delta, v) = f_1(\delta, v)(\delta - \delta^S) + \frac{f_2(\delta, v)}{v}(v - v^S) \quad (16)$$

در شکل (۵) سطوح هم انرژی، $PEBS$, $\det(J)=0$ ، نقاط تعادل پایدار و ناپایدار و مسیر نقاط تعادل پایدار و ناپایدار در ازای



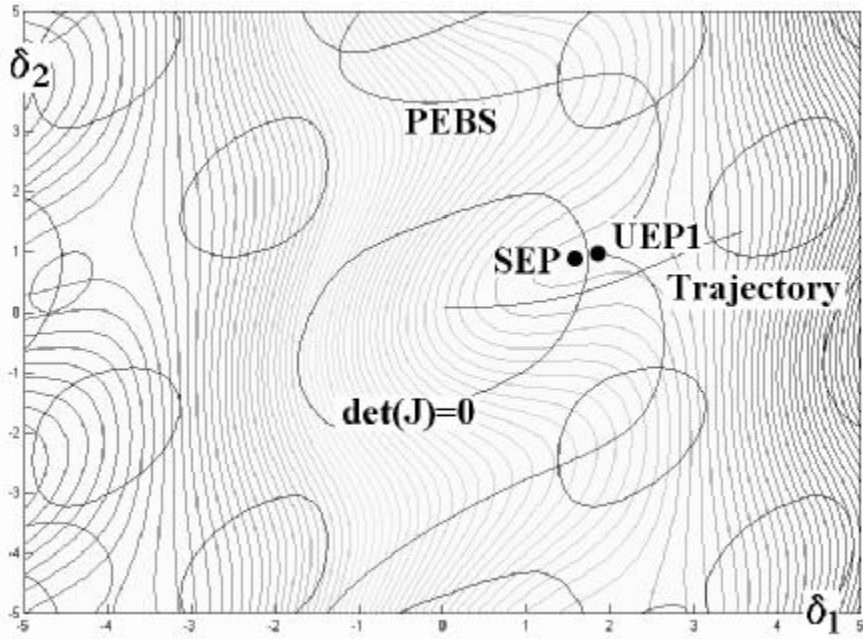
شکل ۲- نمایش نقاط تعادل، مرز PEBS، $\det(J)=0$ در حالت پایه



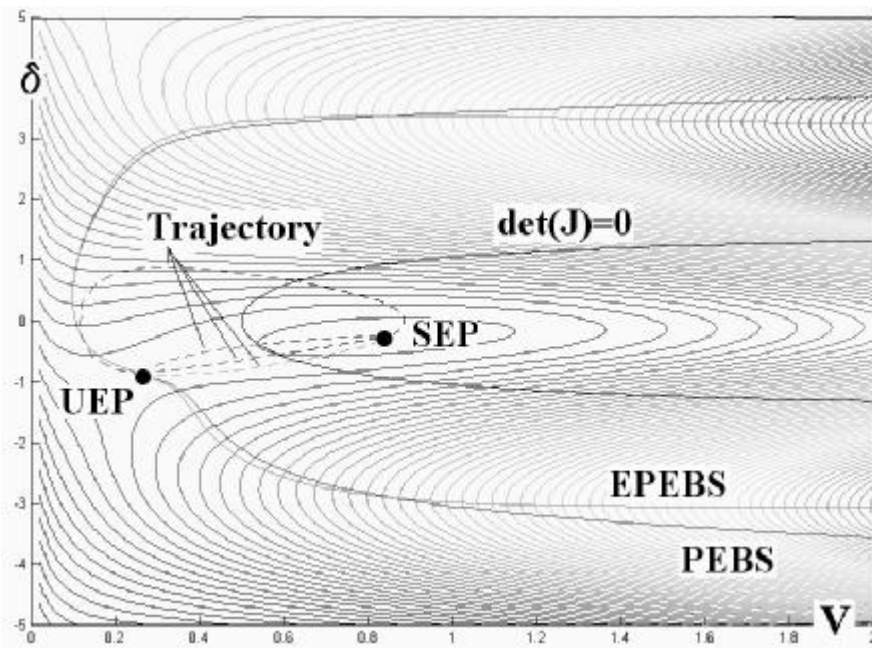
شکل ۳- سیستم تحت فشار در ازای افزایش P_{m2}

مختلف سیستم خطادار به دست می‌آید و مسیر این نقاط باید بر سطوح هم انرژی عمود باشد ولی همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود؛ PEBS رسم شده در ازای افزایش ولتاژ باس بار، دارای خطا می‌شود که این مشکل به دلیل غیر متناوب بودن

تغییر توان در باس بار مشاهده می‌شود. مانند مثال قبلی، تمام نقاط تعادل پایدار سیستم در داخل مرز $\det(J)=0$ قرار دارند ولی PEBS به دست آمده با نقاط هم راس انرژی اختلاف دارد. در واقع PEBS در ازای نقاط ماکزیمم انرژی در مسیرهای



شکل ۴- سیستم تحت فشار در ازای افزایش P_{m1}



شکل ۵- انرژی، PEBS، $\det(J)=0$ و مسیر نقاط تعادل سیستم دو باسه

(۱۷)

$$EPEBS(\delta, v) = f_1(\delta, v)(\delta - \delta^S) + \frac{f_2(\delta, v)}{v}(v - v^S).e^{-v}$$

در بخش بعد، الگوریتم کلی روش تعیین ATC آورده شده است و بر اساس آن، ATC سیستمهای متوسط و بزرگ محاسبه شده و در بخش ششم نتایج آن آورده شده است.

رابطه انرژی پتانسیل نسبت به ولتاژ بروز کرده است. به عنوان تقریب بهتری از PEBS، از اثر ولتاژ معادله PEBS در ازای افزایش ولتاژ صرف نظر می شود. لذا معادله زیر به عنوان تقریب بهتری از PEBS با نام $EPEBS^{12}$ تعریف می شود: (در شکل ۵) رسم شده است)

۵- الگوریتم تعیین ATC

در این بخش بر اساس تجربیات روشهای گذشته و رفتار سیستمهای کوچک (بخش ۴) و متوسط، الگوریتم کلی برای تعیین ATC با در نظر گرفتن حدود دینامیکی و استاتیکی آورده شده است. نتایج بخش ششم، مقبولیت این الگوریتم را تایید می‌کند. فرض شده است که زمان قطع خطا (t_{cl}) معلوم است به طوری که تا زمان قطع خطا، خطا ادامه داشته و با قطع و وصل کردن کلیدها (که زمان آن تقریباً صفر فرض شده است) خطا برطرف می‌شود و سیستم قبل و بعد از خطا یکسان فرض شده است. برای تعیین FCTTC، قطع خطا با حذف قسمت آسیب دیده برطرف می‌شود ولی در این مقاله تاکید بر تعیین ATC است. برای وضوح بیشتر الگوریتم به شکل (۶) توجه کنید. در الگوریتم ارائه شده در این بخش، ابتدا با استفاده از روش تقریب دترمینان، حد ATC ایستا مشخص می‌شود که یک حد بالا برای ATC پویاست در واقع به جای افزایش گام به گام از نقطه کار تا حد ATC ایستا، با استفاده از سه نقطه کار و روش تقریب دترمینان، حد ایستا تقریب زده می‌شود. این کار دو مزیت دارد. اولاً باعث افزایش سرعت رسیدن به حد ATC پویا می‌شود و ثانیاً رتبه‌بندی پیشامدها در حد ATC ایستا، بسیار شبیه رتبه‌بندی پیشامدها در حد ATC پویا است در صورتیکه رتبه‌بندی پیشامدها در نقطه کار با رتبه‌بندی پیشامدها در حد ATC پویا متفاوت است، بخش (۴-۱). در قسمت دوم الگوریتم، با استفاده از روش سریع POMP، حد ATC پویا مشخص می‌شود و به جای استفاده از PEBS، از EPEBS استفاده می‌شود، بخش (۴-۲).

الگوریتم تعیین ATC را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

الف- با استفاده از تقریب دترمینان، رابطه $\det(J)$ با λ مشخص شده و حد پایداری ولتاژ تعیین می‌شود، بخش (۲-۲).

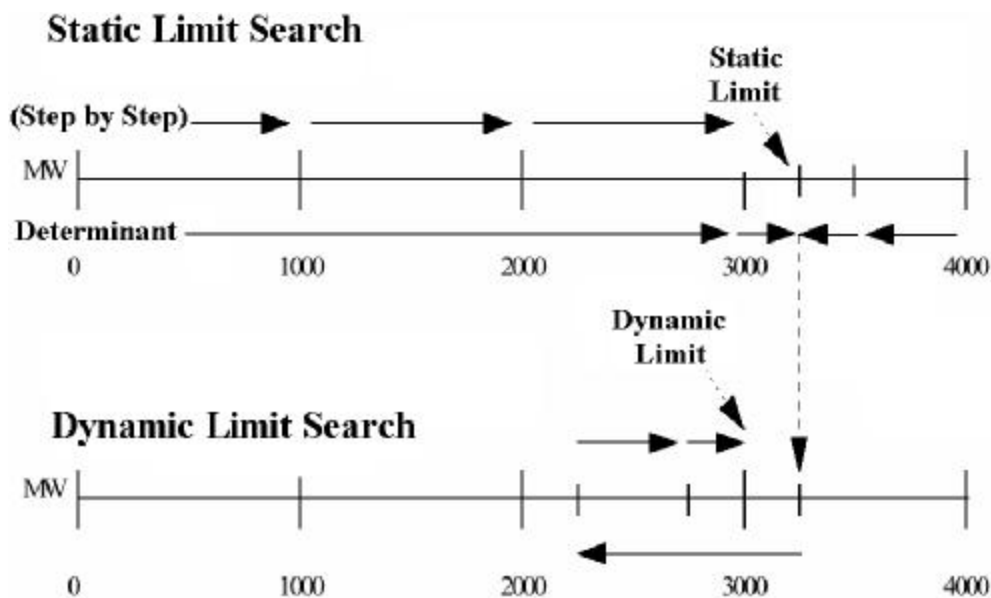
ب- با استفاده از سه نقطه کار و یک معادله درجه سه، مسیر نقاط کار سیستم (نقاط تعادل سیستم) در ازای تغییر توانهای تولیدی و مصرفی، طبق الگوی ATC مربوط، تقریب زده می‌شود.

ج- با استفاده از نقطه تعادل سوم که نزدیکترین SEP به مرز پایداری سیستم در ازای ATC مربوط است؛ خطرناکترین خطا مشخص می‌شود به گونه‌ای که همان متغیری (δ یا V) که شرایط بحرانی دارد (ولتاژ کم و زاویه زیاد) با اتصال کوتاه و یا افزایش بار تشدید می‌شود. ممکن است در این حالت چندین خطا که تعداد آنها محدود است؛ بسته به اینکه ناحیه ATC چند باسه باشد؛ جزو خطرناکترین خطاها در نظر گرفته شوند. اگر ولتاژ یک باس کم باشد در آن باس اتصال کوتاه انجام می‌شود و اگر زاویه ولتاژ زیاد باشد توان مصرفی در آن افزایش می‌یابد.

د- با شروع از نقطه تعادل سوم، مسیر سیستم خطادار تا زمان قطع خطا (t_{cl})، با انتگرال‌گیری سریع مشخص می‌شود. سپس در زمان برطرف شدن خطا، نقطه ماکزیمم انرژی پتانسیل مسیر سیستم بعد از خطا به روش POMP مشخص می‌شود. با استفاده از سطح مرزی انرژی پتانسیل جدید (EPEBS)، می‌توان فهمید که آیا POMP از مرز پایداری گذشته است یا نه. (معیار PEBS منفی از مرز گذشته و مثبت از مرز نگذشته).

ه- بسته به مقدار معیار PEBS در POMP و علامت آن، با تغییر نقطه کار به سمت مرز پایداری (علامت مثبت) و یا نقطه تعادل پایدار اول (علامت منفی)، دوباره قسمت (د) تکرار می‌شود. این کار آن قدر ادامه می‌یابد تا خطا (مثلاً اندازه معیار PEBS در POMP) به حد مجاز برسد. در این نقطه کار، ATC با در نظر گرفتن تمام حدود استاتیکی و دینامیک سریع به دست آمده است.

با تبدیل معادلات استاتیکی (مانند پخش بار) به معادلات دینامیکی، می‌توان مشکل ترکیب دو نوع معادلات دینامیکی و استاتیکی را حل نمود. نشان داده شده است که مسیر سیستم خطادار و بعد از خطا، نقاط تعادل و ... دو نوع روش حل ADE^{13} و یا ODE^{14} تفاوت ندارد [۲۶] و همچنین حل معادلات ODE سریعتر از حل معادلات ADE انجام می‌شود. لذا در این مقاله، از این روش برای افزایش سرعت حل عددی معادلات دینامیکی استفاده شده است.



شکل ۶- شکل ساده‌ای برای نمایش نحوه عملکرد الگوریتم تعیین ATC

جدول ۱- مقایسه زمان محاسبات، ATC روش جدید، قدیم و دقیق برای سیستمهای مختلف

ATC با حدود ایستا (p.u.)	ATC با حدود دینامیک				ATC بین باسهای		سیستم
	روش قدیم MAT	روش دقیق (شبیه‌سازی)	روش جدید ارائه شده در این مقاله		به	از	
			سرعت روش جدید نسبت به قدیم	ATC (p.u.)			
۱۸	۶/۰۴	۵/۱۰	۱/۰۰	۴/۷۹	۲	۳	۳ باس
۵/۰	۱/۰۴	۱/۴۲	۱/۴۹	۱/۴	۵	۲	۷ باس
۵/۵	۱/۴۲	۱/۵۳	۱/۳۱	۱/۴۴	۵ و ۶	۴ و ۳ و ۲	
۳/۱	۰/۶۰	۰/۸۲	۲/۶۵	۰/۷۷	۹ و ۸	۷ و ۶ و ۵	۱۰ باس
۴/۲	۰/۸۳	۰/۹۲	۵/۱۴	۰/۹۰	۳	۲	۳۰ باس
۳/۸	۰/۶۳	۰/۸۵	۶/۱۱	۰/۷۹	۱۶	۲	
۳/۷	۰/۸۹	۰/۹۵	۶/۱۹	۰/۹۴	۱۸	۲	
۳/۶	۱/۲۵	۱/۱۶	۶/۶۸	۱/۱۰	۲۳	۲	
۳/۱	۰/۸۰	۰/۸۶	۵/۱۸	۰/۸۵	۲۴	۲	
۲/۰۹	۰/۵۰	۰/۶۴	۶/۲۵	۰/۶۰	۳۰	۲	
۶/۵	۱/۶۴	۱/۸۳	۸/۸۸	۱/۷۵	۱۴۱ ۱۴۲ ۱۴۳	۳۵ و ۳۴	۱۴۵ باس

۶- تعیین ATC برای سیستمهای متوسط و بزرگ

سیستمهایی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از:

الف- سیستم سه باسه، ب- سیستم ۷ باسه [۲، ۱۵ و ۱۶]، ج- سیستم ۱۰ باسه CIGREE [۲، ۱۵ و ۱۶]، د- سیستم ۳۰ باسه IEEE [۲ و ۲۷]، ه- سیستم ۱۴۵ باس و ۵۰ ژنراتور دانشگاه ایالتی آیوا^{۱۵} [۲۸]. نتایج تعیین ATC برای سیستمهای فوق در جدول (۱) آورده شده است. زمان قطع خطا برای تمام سیستمها ۵ سیکل در نظر گرفته شده است و سیستم قبل از خطا و بعد از خطا یکسان فرض شده‌اند. اندازه ATC و زمان محاسبات روش ارائه شده در این مقاله (جدید)، روش MAT یا روش قدیم (استفاده از پخش بار متوالی سریع، روش انرژی برای پایداری گذرا و استفاده از رتبه‌بندی پیشامدها در نقطه کار) [۹] و روش دقیق (استفاده از پخش بار متوالی و شبیه‌سازی برای تمام خطاها) در جدول (۱) نشان‌دهنده برتری روش ارائه شده در این مقاله (جدید) است. دقت و سرعت روش تعیین ATC افزایش یافته است و با مقایسه ATC بدون در نظر گرفتن حدود دینامیکی، دیده می‌شود که محدودیت بیشتری برای انتقال توان به وجود آمده است و حدود نصف تا یک سوم حد استاتیکی است. سرعت روش جدید (ارائه شده در این مقاله) به طور

واژه نامه

- | | | |
|---|--|-------------------------------------|
| 1. available transfer capability | 6. first contingency total transfer capability | 10. second kick |
| 2. order | 7. Chiang | 11. estimate of POMP |
| 3. federal energy regulatory commission | 8. potential energy boundary surface | 12. estimate of PEBS |
| 4. open access same-time information system | 9. point of maximum potential energy | 13. algebraic differential equation |
| 5. transient stability constrained maximum allowable transfer | | 14. ordinary differential equation |
| | | 15. Iowa State University |

مراجع

1. The Changing Structure of the Electric Power Ind.: An Update.
۲. عیدینانی، م.، مدیر شانه‌چی، م.ح.، واحدی، ا.، "روش سریع و دقیق برای تعیین ATC با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ"، مجله علمی برق، شماره ۳۵، ص: ۵۶-۶۸، ۱۳۸۱.
3. Kundur, P.Sh., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1996.
4. Hamoud, G., "Assessment of Available Transfer Capability of Transmission Systems," Preprint Order Number: PE-002PRS (09-99), Discussion Deadline: February 2000.
5. Peschon, J. "Interchange Power Systems OPF for System with Area Interchange Control," *IEEE Trans.*

On Power and Apparatus Sys., Vol. T-PAS-72, pp. 898-905, May/June. 1972.

6. Grijalva, S., and Sauer, P.W., "Reactive Power Considerations in Linear ATC Computation," *Proceedings of the Thirty-Second Annual Hawaii Int. On System Sciences*, 1999.
7. Ejebe, G.C., Waight, J.G., Santos-Nieto, M., and Tinny, W.F., "Fast Calculation of Linear ATC," *IEEE Trans. on Power Sys.*, Vol. 15, No. 3, pp. 1112-1116, Aug. 2000.
8. Dai, Y., McCalley, J.D., and Vittal, V., "Simplification, Expansion and Enhancement of Direct Interior Point Algorithm for Power System Maximum Loadability," *IEEE Trans. on Power Sys.*, Vol. 15, No. 3, pp.1014-1021, Aug. 2000.
9. Bettiol, A.L., Wehenkel, L., Pavella, and M., "TSA Constrained Maximum Allowable Transfer," *IEEE Trans. On Power Sys.*, Vol. 14, No. 2, pp. 654-659, May 1999.
10. Schluter, R.A., and Costi, A., "Multiple Contingency Selection for Transmission Reliable and Transfer Capability Studies," *Elec. Machines and Power Sys.*, Vol. 20, NO. 3, pp. 223-237, May 1992.
11. Sauer, P.W., Lesieutre, B.C., and Pai, M.A., "Maximum Loadability and Voltage Stability in Power Systems," *Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 145-154, 1993.
12. Eidiani, M., Shanechi, M.H.M., and Vaahedi, E., "Fast and Accurate Method for Computing FCTTC," PowerCon 2002, IEEE-PES/CSEE, International Conference on Power System Technology, Paper No. 0056, Vol. 2, pp. 1213-1219, Oct. 13-17, Kunming, China, 2002.
13. Eidiani, M., "ATC Evaluation by CTSA and POMP, Two New Methods for Direct Analysis of Transient Stability," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference 2002, Paper No. 5104, Vol. 3, pp. 1524-1529, Asia Pacific, Oct. 6-10, Yokohama, Japan.
14. Overby, T.J., Dobson, I., DeMarco, C.L., "Q-V Curve Interpretations of Energy Measure for Voltage Security," *IEEE Trans. On Power Sys.*, Vol. 9, No. 4, pp. 331-340, Feb. 1994.

۱۵. عیدانی، م.، مدیر شانه‌چی، م.ح.، "کاربرد تابع انرژی برای تشخیص فروپاشی ولتاژ"، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC-98)، ص: ۷۷۲-۷۷۷، ۱۳۷۷.

۱۶. عیدانی، م.، مدیر شانه‌چی، م.ح.، واحدی، ا.، "تعیین FCTTC با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ و پایداری گذرا به

روش انرژی،" دهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، تبریز، مجموعه مقالات قدرت، ص: ۸۶-۹۴، ۱۳۸۱.

17. Chiang, H.D., and Jean-Jumeau, R., "Toward a Practical Performance Index for Predicting VC in Electric Power Systems," *IEEE Trans. On Power Sys.*, Vol. 10, No. 2, pp. 584-590, May 1995.
18. Athay, T., Podmore, R. and Virmani, S., "A Practical Method for Direct Analysis of TS," *IEEE Trans. On Power App. & Sys.*, Vol. PAS-98, No. 2, pp. 584-588, Mar./Apr., 1979.

۱۹. عیدانی، م.، مدیر شانه‌چی، م.ح.، "POMP، نقطه ماکزیمم انرژی پتانسیل، روشی جدید در تشخیص پایداری گذرا به روش مستقیم"، ششمین کنفرانس مهندسی برق ایران، جلد ۵، ص: ۲۳-۲۶، ۱۳۷۷.

20. Fouad, A.A., and Vittal, V., *Power Sys TSA Using the TEF Method*, Prentice-Hall, 1992.
21. FU, C., and Bose, A., "Contingency Ranking Based on Severity Indices in DSA," *IEEE Trans. On Power Sys.*, Vol. 14, No. 3, Aug. 1999.
22. Chiang, H.D., Wu, F. F., and Varaiya, P. P., "A BCU Method for Direct Anal. of Power Sys. TSA," *IEEE Trans. On Power Sys.*, Vol. 9, No. 3, pp. 1194-1208, Aug. 1994.

۲۳. عیدانی، م.، مدیر شانه‌چی، م.ح.، "CTS، روش ترکیبی پایداری گذرا، روشی جدید در تشخیص پایداری گذرا به روش مستقیم"، دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC-97)، ص: ۱۳-۱۸، ۱۳۷۶.

24. Mansour, Y., Vaahedi, E., Chang, A. Y., Corns, B.R., Garrett, B.W., Bemaree, K., Atahy, T., and Cheung, K., "B.C. Hydro's On-line TSA Model Development Anal. and Post-processing," *IEEE Trans. On Power Sys.*, Vol. 10, No. 1, Feb. 1995.
25. Chiang, H. D., and Throp, J. S., "The Closest Unstable Equilibrium Point Method For Power System Dynamic Security Assessment," *Proceeding of the 26th Conference on Decision and Control*, Los Angeles, pp. 72-76, Dec. 1987.
26. Praprost, K. L., and Loparto, A., "An Energy Function Method For Determining Voltage Collapse During a Power System Transient," *IEEE. Trans. On Circuit and System, Fundamental Theory and Applications*, Vol. 41, No. 10, pp. 635-651, Oct. 1994.
27. Saadat, H., *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1999.
28. Available: <http://www.eidiani.com>