مقاله علمی-مروری

یافته‌های گذشته و مسیرهای آینده روش‌های تعیین قابلیت انتقال توان در دسترس
بخش نخست: مفاهیم و روش‌های ایستا

مصطفی عیدیانی، دانشیار، دانشکده مهندسی، موسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران، eidiani@khorasan.ac.ir

چکیده

با توجه به ترویج بازار برق به‌صورت پایدار و رقابتی در اغلب کشورها، تحقیقات درباره توانایی انتقال توان در دسترس به‌شدت افزایش‌یافته است و با توجه به افزایش مصرف و عدم گسترش شبکه انتقال، بیشتر اجزاء سیستم قدرت در مرز محدوده‌های مجاز خود قرار دارند که موجب کاهش کارایی آن‌ها می‌شود، از این‌رو تعیین مقدار دقیق قابلیت انتقال توان در دسترس (ATC) برای برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و کنترل سیستم قدرت بسیار مهم می‌شود که باعث شده است؛ روش‌های متعددی برای محاسبه ATC ارایه شود. الگوریتم‌های ارایه‌شده یا سریع هستند و دقیق نیستند و یا دقیق هستند و سرعت کافی ندارند. این مقاله، یک بررسی جامع از روش‌های مختلف برای تعیین ATC را در دو حالت ایستا و پویا ارایه می‌دهد. ابتدا مفاهیم و تعاریف مختلف موردنیاز برای درک بهتر ATC ارایه می‌شود سپس در دو قسمت مجزا، ابتدا روش‌های ایستا و سپس روش‌های پویا بررسی می‌شوند. این بررسی‌ها نشان می‌دهدکه همزمان با توسعه روش‌های استاتیکی، روش‌های دینامیکی نیز گسترش پیدا کرده‌اند. این مقاله هم برای کسانی که در این زمینه کار می‌کنند مفید است و هم برای کسانی که می‌خواهند به این حوزه تحقیقاتی وارد شوند.

کلمات کلیدی: قابلیت انتقال توان در دسترس، توانایی انتقال توان، پایداری ولتاژ، مفاهیم ATC

Past Findings and Future Directions of Available Transfer Capability
Part One: Static Concepts and Methods

Mostafa Eidiani, Associate Professor, Faculty of Engineering, Khorasan Institute of Higher Education, eidiani@khorasan.ac.ir

Abstract

Due to the development of electricity market in a sustainable and competitive way in most countries, investigating the ability to transfer power has increased dramatically. Also, the increasing consumption and the lacking expansion of the transmission network have left most components of the power system within their authorized limits, which reduces the efficiency. Therefore, determining the exact amount of available transfer capability (ATC) is crucial for planning, operating and controlling the power system. There are many ways to calculate the ATC. The algorithms are either fast but not precise or accurate but not fast enough. This paper provides a comprehensive review of the various methods for determining ATC

in both static and dynamic methods. First, the concepts and definitions essential to a better understanding of ATC are presented then in two separate parts the, static methods and dynamic methods are examined. These studies show that simultaneously with the development of static methods, dynamic methods have been also developed. This paper is useful both for those who already work in this field and also those willing to enter the field.

Keywords: ATC, power transfer, voltage stability, ATC concepts

۱- مقدمه

از زمانی که در تمام دنیا بازار برق شکل گرفت؛ رقابت در سطوح مختلف خدمات انرژی گسترش یافت. تمام ذی‌نفعان سعی می‌کنند بیشترین سود را از این تجارت کسب کنند که این کار باعث افزایش تراکم سیستم انتقال شده و به طبع آن باعث نقض محدودیت‌های ولتاژ، پایداری ولتاژ، محدودیت‌های حرارتی و... می‌شود و در نتیجه امنیت سیستم را تهدید می‌کند[۱]. بنابراین برای حل این مشکلات باید قابلیت انتقال توان در دسترس (ATC[۱]) با بیشترین دقت و کمترین زمان، تخمین و محاسبه شود. تخمین بیش‌ازحد باعث ناپایداری شبکه می‌شود و تخمین کمتر ATC، باعث از دست رفتن سرمایه موجود می‌شود. به‌عنوان مثال، خاموش شدن شمال ایالت متحده و انتاریو در سال ۲۰۰۳ به دلیل تخمین بیش‌ازحد ATC بود. بنابراین نتایج برآورد بیشتر و یا کمتر ATC، اثرات نامطلوبی برای شبکه دارد.

روش‌های تعیین ATC به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: ایستا و پویا. در روش‌های ایستا، تغییرات زمانی متغیرهای سیستم در نظر گرفته نمی‌شود و در روش‌های پویا، از مدل‌های دینامیکی و استاتیکی سیستم قدرت، به‌طور همزمان استفاده می‌شود. برای هرکدام از این روش‌ها، ماشین محاسبه[۲]، معیارهای توقف، مزایا، معایب و نقایص آن‌ها آورده شده است. بعضی از این ماشین‌های محاسبه عبارت‌اند از: پخش بار متوالی، پخش بار بهینه و تحلیل حساسیت. به تمام حدودی که باعث توقف افزایش توان انتقالی در هنگام تعیین ATC می‌شوند معیار توقف گفته می‌شود. بعضی از این محدودیت‌ها عبارت‌اند از: حد حرارتی خطوط، حد پایداری استاتیک، واگرایی پخش بار DC و AC، حد ولتاژ در باس، ناپایداری دینامیکی ولتاژ و ناپایداری گذرا[۱].

برای درک بهتر روش‌های تعیین ATC، ابتدا در بخش دوم این مقاله، مفاهیم و تعاریف مختلف از پارامترهای وابسته به ATC به‌طور خلاصه آورده شده است تا با اصطلاحات تعیین ATC آشنا شوند. سپس در بخش سوم مقاله، روش‌های تعیین ATC ایستا و مراجع مربوط به بهبود ATC آورده شده است. در مقاله بعدی ATC پویا بررسی می‌شود[۱].

۲- تعاریف مربوط به ATC

به‌طور خلاصه در این بخش، مفاهیم مرتبط با ATC آورده شده است که به‌طورکلی از گزارش‌های ATCWG[۳] و یا NERC[۴] گرفته شده‌اند [۲-۷].

۲-۱- قابلیت انتقال[۵]

قابلیت انتقال مقدار توانی است که با حفظ محدودیت‌های شبکه، خطوط و تجهیزات موجود در شبکه از یک ناحیه به ناحیه دیگر منتقل می‌شود. قابلیت انتقال یک کمیت جهت‌دار است یعنی قابلیت انتقال از ناحیه A به ناحیه B، همیشه مساوی قابلیت انتقال از ناحیه B به A نمی‌باشد.

۲-۲- ظرفیت انتقال[۶]

ظرفیت انتقال، نرخ تحمل تجهیزات موجود در شبکه می‌باشد و برخلاف قابلیت انتقال، ظرفیت انتقال یک کمیت بدون جهت است و به‌طورکلی، ظرفیت انتقال یک خط نمی‌تواند نشان‌دهنده قابلیت انتقال آن خط باشد.

۲-۳- محدودیت‌های قابلیت انتقال

به محدودیت‌های شبکه، خطوط و تجهیزات موجود در شبکه معیار توقف گفته می‌شود که عبارت‌اند از محدودیت‌های حرارتی، محدودیت‌های ولتاژ، محدودیت‌های پایداری (ایستا و پویا) و نیازهای قراردادی. بین بعضی از فراهم‌کنندگان انتقال[۷]، موافقت‌هایی به‌صورت قراردادی وجود دارد و در هنگام محاسبه قابلیت انتقال، این موافقت‌ها باید در نظر گرفته شود.

۲-۴- مبدأ و مقصد در تعیین قابلیت انتقال

برای تعیین قابلیت انتقال، مبدأ و مقصد را به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌نمایند: باس به باس: برای بستن قراردادهای دوطرفه بین یک مصرف‌کننده و یک تولیدکننده، گروه به باس: بین چند تولیدکننده و یک مصرف‌کننده، باس به گروه: برای یک تولیدکننده و چند مصرف‌کننده و گروه به گروه: بین دو ناحیه.

۲-۵- مسیرهای موازی

به مسیرهای غیرمستقیم بین دو ناحیه که توان انتقالی از آن‌ها نیز عبور می‌نماید مسیرهای موازی[۸] گفته می‌شود.

۲-۶- اصول ATC

این اصول به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته نخست اصولی که توسط NERC تصویب شده و دسته دوم اصولی است که هر ناحیه، مستقل از نواحی دیگر تصویب نموده و فراهم‌کنندگان انتقال همان ناحیه، ملزم به رعایت آن‌ها می‌باشند.

۲-۶-۱- اصول مشترک ATC

محاسبات ATC باید یک شاخص قابل‌اعتماد و معقولی از قابلیت انتقال توان را برای بازار برق ارایه دهد.

در محاسبه ATC باید شارهای متغیر با زمان کل شبکه انتقال در نظر گرفته شود علاوه بر این، باید تأثیر انتقال توان به‌صورت همزمان[۹] و غیرهمزمان[۱۰] از مسیرهای موازی نیز در نظر گرفته شود.

هنگام محاسبه ATC باید وابستگی آن به نقاطی که توان به آن‌ها تزریق و یا در آن‌ها مصرف می‌شود در نظر گرفته شود به همین دلیل باید، همه اطلاعات کافی برای محاسبه ATC فراهم شود.

برای ارسال و دریافت اطلاعاتی که مقدار ATC شبکه انتقال را مشخص می‌کند؛ یک هماهنگی منطقه‌ای لازم است.

ATC باید با معیارها و اهداف برنامه‌ریزی قابلیت اطمینان سیستم و خط‌مشی بهره‌برداری NERC در نواحی، زیر نواحی، سیستم تبادل اشتراکی و سیستم‌های خصوصی منطبق باشد.

باید در تعیین ATC، عدم قطعیت‌های معقول در متغیرهای سیستم در نظر گرفته شود تا یک برنامه‌ریزی قابل‌انعطاف و مطمئن از

بهره‌برداری شبکه فراهم شود.

۲-۶-۲- اصول ATC مربوط به نواحی

مسوولیت محاسبه ATC با در نظر گرفتن همه شرایط سیستم، با فراهم‌کنندگان انتقال می‌باشد.

اعضای یک ناحیه، مسوولیت هماهنگی برای تعیین ATC و ارسال اطلاعات به شبکه را بر عهده دارند.

ATC محاسبه‌شده باید در دسترس نواحی دیگر و مشتریان قرار گیرد.

۲-۷- فرآیند هماهنگی ATC

فراهم‌کنندگان انتقال، ملزم به محاسبه ATCی مسیرهای ارسالی، به‌روزرسانی و ارسال آن‌ها برای مشتری‌ها می‌باشند. برای به‌روز رساندن این اطلاعات، مسیرهای ارسالی به دو دسته مسیرهای محدودیت‌دار و مسیرهای بدون محدودیت تقسیم می‌شوند. در مسیرهای محدودیت‌دار، ارسال اطلاعات به‌صورت ماهیانه انجام می‌شود و برای مسیرهای بدون محدودیت، ارسال ATC به‌صورت روزانه، روز آینده و ۶ روز بعد از آن انجام می‌شود.

۲-۸- تعریف مفاهیم مختلف ATC

۲-۸-۱- قابلیت انتقال غیر همزمان

قابلیت انتقال غیرهمزمان، به قابلیت انتقال بین دو ناحیه‌ای گفته می‌شود درصورتی‌که بین نواحی دیگر، تبادل توان وجود نداشته باشد.

۲-۸-۲- قابلیت انتقال همزمان

قابلیت انتقال همزمان، به قابلیت انتقال بین دو ناحیه، درصورتی‌که بین نواحی دیگر، تبادل توان وجود داشته باشد؛ گفته می‌شود.

۲-۸-۳- قابلیت انتقال کل[11] (TTC)

قابلیت انتقال کل، به مقدار توان الکتریکی گفته می‌شود که می‌تواند در یک مسیر خاص و شرایط زیر تعیین شود: قابلیت اطمینان بالا، حفظ شرایط بهره‌برداری عادی، امکان حذف نوسانات توان، حفظ نرخ بارگذاری همه تجهیزات، در نظر گرفتن محدودیت‌های حرارتی، محدودیت‌های ولتاژ، محدودیت‌های پایداری و محدودیت‌های ناشی از موافقت‌های قراردادی.

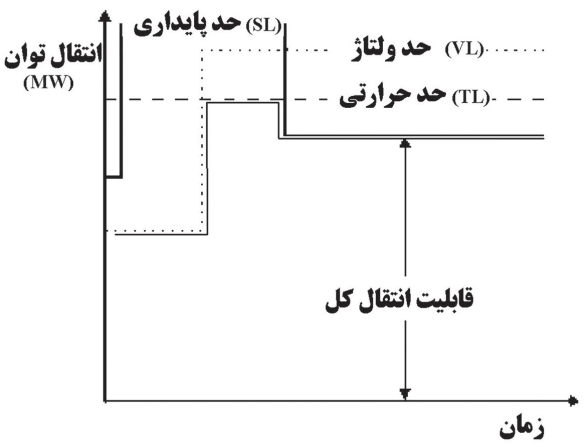
قابلیت انتقال کل را می‌توان از رابطه زیر و شکل (۱) به دست آورد:

در شکل (۱)، فقط محدودیت ولتاژ، حد حرارتی و پایداری در نظر گرفته شده است.

$$TTC = Min\{TL, VL, SL\} \quad (۱)$$

۲-۸-۴- حاشیه اطمینان انتقال[12] (TRM)

حاشیه اطمینان انتقال، مقدار قابلیت انتقالی است که همیشه باید در سیستم باقی بماند تا در هنگام بهره‌برداری و مواجه‌شدن با عدم قطعیت‌های موجود در سیستم، امنیت سیستم تضمین شود. عدم قطعیت‌ها عبارت‌اند از: خطای پیش‌بینی بار، خطای توزیع بار، تغییر بارگذاری تجهیزات به علت متعادل کردن تولید و مصرف در یک ناحیه کنترلی، پیش‌بینی عدم قطعیت‌ها در توپولوژی سیستم، تأثیر مسیرهای موازی، عکس‌العمل خطوط بر یکدیگر، تغییر در توزیع تولید، عملکرد کوتاه‌مدت اپراتورها[13].



شکل ۱ : محاسبه قابلیت انتقال کل [۱]

۲-۸-۵- حاشیه مفید ظرفیت[14] (CBM)

به مقدار قابلیت انتقالی که توسط نهادهای تأمین‌کننده بار، به‌منظور اطمینان از دریافت توان تولیدی در شبکه به‌هم‌پیوسته، به‌صورت ذخیره در نظر گرفته می‌شود شاخص CBM گفته می‌شود که به‌صورت محلی ارزیابی می‌گردد.

۲-۸-۶- افق بهره‌برداری و برنامه‌ریزی

منظور از افق بهره‌برداری[15]، برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت برای یک ساعت تا ۳۱ روز آینده است و منظور از افق برنامه‌ریزی[16]، برنامه‌ریزی بلندمدت برای یک تا ده سال آینده است.

۲-۸-۷- ذخیره و برنامه‌ریزی قابل قطع و غیرقابل قطع

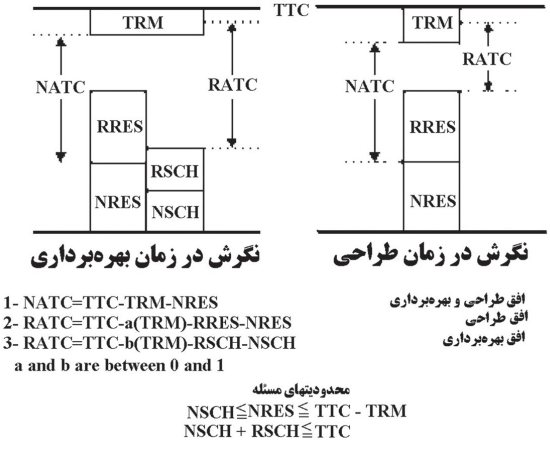
سرویس‌های انتقال شامل ذخیره غیرقابل قطع (NRES)[17]، ذخیره قابل قطع (RRES)[18]، برنامه‌ریزی غیرقابل قطع (NSCH)[19] و برنامه‌ریزی قابل قطع (RSCH)[20] می‌باشند. به مقداری از ظرفیت موجود که برای استفاده یک ناحیه نگه‌داشته می‌شود توان ذخیره گفته می‌شود و به مقدار توانی که از شبکه انتقال عبور خواهد کرد و با توجه به شرایط موجود در شبکه، مقدار بار شبکه و تولید هر ناحیه تعیین شود؛ توان برنامه‌ریزی‌شده می‌گویند.

۲-۸-۸- قابلیت انتقال در دسترس (ATC)

ATC، مقدار توان باقی‌مانده در سیستم انتقال بین دو ناحیه می‌باشد که با حفظ محدودیت‌های شبکه، خطوط و تجهیزات موجود در شبکه مبادله می‌شود. قابلیت انتقال در دسترس، از نظر ریاضی به‌صورت قابلیت انتقال کل، منهای حاشیه اطمینان انتقال، منهای مجموع تعهدات سیستم انتقال (که خود شامل حاشیه مفید ظرفیت نیز می‌باشد) تعریف می‌شود. در این تعریف تعهدات موجود[21] (EC) شامل همه قراردادهای بلندمدت و کوتاه‌مدت قابل قطع می‌باشد. بنابراین داریم:

$$ATC = TTC - TRM - CBM - EC \quad (۲)$$

این تعریف کلی ATC می‌باشد که خود به انواع دیگری تقسیم می‌شود.



شکل ۲: خلاصه تمام مفاهیم ATC و مقایسه آن‌ها [۱]

۲-۸-۸-۱- قابلیت انتقال افزایشی در نخستین پیشامد[۲۲] (FCITC)

FCITC، قابلیت انتقالی است که می‌تواند از سیستم انتقال پیش از خطا با حفظ قابلیت اطمینان شبکه عبور کند به شرطی که در مقابل آشفتگی‌های موجود، بعد از قطع یکی از عناصر سیستم، پایدار بماند.

۲-۸-۸-۲- قابلیت انتقال کل در نخستین پیشامد (FCTTC)

FCTTC، ماکزیمم توانی است که بین دو ناحیه، با حفظ قابلیت اطمینان و شرایط FCITC، مبادله می‌شود و یا به توانایی انتقال کلی گفته می‌شود که توان بحرانی مربوط به نخستین اتفاق از آن کاسته شده باشد [۸]

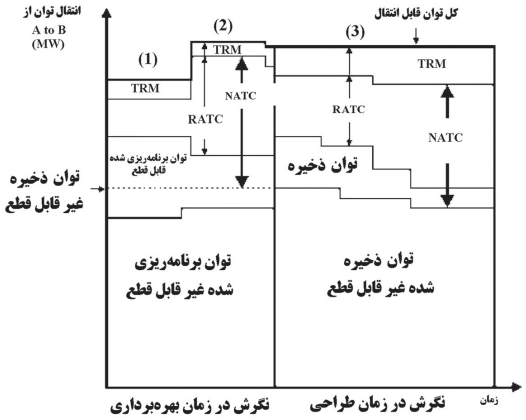
۲-۸-۸-۳- قابلیت انتقال در دسترس غیرقابل قطع[۲۳] (NATC)

NATC، از نظر ریاضی به‌صورت قابلیت انتقال کل، منهای حاشیه اطمینان انتقال، منهای سرویس‌های ذخیره قابل قطع (که شامل حاشیه مفید ظرفیت نیز می‌باشد) تعریف می‌شود (شکل ۲).

۲-۸-۸-۴- قابلیت انتقال در دسترس قابل قطع[۲۴] (RATC)

RATC، از نظر ریاضی به‌صورت قابلیت انتقال کل، منهای حاشیه اطمینان انتقال، منهای سرویس‌های ذخیره قابل قطع (که شامل حاشیه مفید ظرفیت نیز می‌باشد) و منهای سرویس‌های ذخیره غیرقابل قطع، تعریف می‌شود.

حالت‌های مختلفی می‌تواند برای قابلیت انتقال قابل قطع و غیرقابل قطع رخ دهد که در شکل (۳)، سه حالت آن نشان داده‌شده است. این حالت‌ها برای یک‌لحظه از زمان می‌باشند. توان تعیین‌شده توسط برنامه‌ریزی قابل قطع، دارای بالاترین تقدم می‌باشد. این توان نباید قطع شود مگر قابلیت اطمینان سیستم تهدید شود یا سیستم در حالتی باشد که کل توان تعیین‌شده توسط برنامه‌ریزی قابل قطع، مقدار قابلیت انتقال را کاهش دهد. برای همه حالت‌های نشان داده شده در شکل (۳) این موضوع صادق است.



شکل ۳: حالت‌های مختلف قابلیت انتقال قابل قطع و غیرقابل قطع [۱]

۳- روش‌های تعیین ATC ایستا

قدیمی‌ترین روش محاسبه ATC، روش ایستا می‌باشد و مهم‌ترین روش‌های محاسبه، پخش بار، پخش بار بهینه و روش‌های حساسیت (خطی‌سازی) می‌باشند. ابتدا روش‌های بهبود ATC و سپس روش‌های تعیین ATC مرور می‌شوند.

۳-۱-مراجع مربوط به بهبود ATC

در سال ۱۹۹۱، الکساندروف مقاله‌ای تحت عنوان «بهبود راندمان خطوط ۲۵ تا ۲۲۰ کیلوولت» ارایه داد[۹]. در این مقاله بیان شده است که حد نسبت توان انتقالی به ظرفیت خط[۵۲] (SIL) باید کمتر یا مساوی یک باشد. برای این کار از باندل کردن خطوط و کاهش فاصله بین فازها با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان، برای افزایش ظرفیت خطوط ۲۵ تا ۲۲۰ کیلوولت استفاده شده است. در سال ۱۹۹۸ سائر، «ارتباط بین جبران بارگذاری انتقال (TLR[۲۶]) و ATC» را مشخص کرد[۱۰]. وقتی اطلاعات ATC غلط و یا نادرست باشد؛ ایمنی سیستم کاهش می‌یابد و کاربران و طراحان سیستم برای محاسبه TLR به زحمت می‌افتند. در این مقاله علاوه بر مشخص کردن ارتباط بین TLR و ATC ، روش‌های ممکن برای کاهش اثر ATC بر TLR و بهبود سودمندی سیستم انتقال ارایه شده است.

«اجرای کنترل و تحقیق در پخش بار برای بهبود توانایی انتقال و استفاده از UPFC[۲۷] برای بهبود توانایی انتقال» در سال ۱۹۹۸ توسط موریوکا [۱۴] انجام‌شده است. در این مقاله یک نمونه کوچک از UPFC برای مطالعه سیستم مدل زده شده است. ساختار کنترلی مدل، نحوه کنترل و حفاظت آن برای بهبود توانایی انتقال با شبیه‌سازی نشان داده شده است. قسمت‌های سری UPFC از سه بخش کنترل ولتاژ، کنترل امپدانس و کنترل زاویه ولتاژ تشکیل شده‌اند که در کنترل پخش بار و یا پایداری سیستم قدرت استفاده می‌شود. آزمایش‌های مختلفی برای مقایسه این کنترل‌کننده با وسایل کنترلی دیگر انجام‌شده و نشان داده شده است که این کنترل‌کننده نسبت به نوع کنترل آن، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین کنترل‌کننده است.

در همین سال، راجرمان و همکاران مقاله‌ای تحت عنوان «تعیین موقعیت خازن جبران‌ساز برای افزایش توانایی انتقال توان» ارایه کردند[۱۲]. در این مقاله یک روش تحلیلی برای تشخیص موقعیت و مقدار خازن جبران‌ساز سری، برای افزایش توان در سیستم قدرت ارایه شده است. از آنجا که محدودیت انتقال توان خطوط، یکی از معیارهای توقف در تعیین ATC می‌باشد؛ تعیین خطوط بحرانی، تعیین مقدار خازن و مکان آن برای افزایش ATC، از مهم‌ترین کارهای انجام‌شده در این مقاله می‌باشد. روش ارایه شده بر روی یک سیستم کوچک ۶ باسه و دو ژنراتور امتحان شده است.

وانگ در سال ۱۹۹۹، «چگونگی توزیع دوباره تولید برای افزایش حاشیه ایمنی سیستم قدرت» را ارایه کرد[۱۳]. روش ارایه شده در این مقاله علاوه بر افزایش حاشیه ایمنی سیستم قدرت، ولتاژ باس‌ها را نیز، با توزیع دوباره توان ژنراتورها بهبود می‌بخشد. روش ارایه شده بر اساس استفاده از یک بردار نرمال در محدوده فروپاشی ولتاژ و یا محدوده ولتاژ کم (LVB[۲۸]) استوار است. این بردار به‌عنوان شاخصی برای تغییر توان تولیدی ژنراتورها و برای دور شدن از محدوده ولتاژ کم استفاده می‌شود. روش ارایه شده بر روی چندین سیستم آزمایش شده است. همچنین راهنمایی‌های فنی برای چگونگی استفاده از این روش در سیستم دسترسی آزاد آورده شده است.

با بهبود کارایی ادوات فاکتس، بهبود ATC با وجود ادواتی از جمله TCSC[۱۴] و TCR[۱۵] در سال‌های اخیر گسترش یافته است و در جدیدترین مقاله[۱۶]، از تحلیل حساسیت خطی برای تعیین ATC ایستا و از روش (MEEPSO[۲۹]) برای تعیین بهترین مکان ادوات فاکتس برای بهبود ATC استفاده شده است. همچنین نشان داده شده است روش ارایه شده از روش‌های قبلی ACPTDF[۳۰] و DCPTDF[۳۱] در شبیه‌ساز PWS[۳۲] سریع‌تر است.

در ادامه، روش‌های محاسبه ATC آورده می‌شود.

۳-۲- روش‌های محاسبه ATC

۳-۲-۱- ماشین محاسبه روش‌های ایستا

برای همه روش‌های آورده شده در این قسمت، ماشین محاسبه تعیین‌شده است.

۳-۲-۱-۱- پخش بار متوالی CPF

در این روش محاسبه ATC، تولید و مصرف برای هر قرارداد آن‌قدر

افزایش می‌یابد تا یک خط به محدودیت MVA و یا سیستم به هر حد ایستای دیگر برسد. تولید می‌تواند به نسبت اینرسی ژنراتورها افزایش یابد. استفاده از پخش بار و یا پخش بار متوالی برای تعیین توانایی انتقال، از قدیمی‌ترین روش‌های محاسبه ATC به شمار می‌آید. در مراجع قدیمی (تا سال ۱۹۷۲)، روش‌های بهبود پخش بار برای افزایش سرعت و دقت محاسبه توانایی انتقال استفاده شده است [۱۷-۱۸]؛ ولی تاکید بیشتر نویسندگان در سال‌های بعد بر نحوه بارگذاری بوده است؛ به‌طوری‌که بتوان بدون اینکه به محدودیت‌های شبکه رسید؛ بیش‌ترین بارگذاری انجام شود. باآنکه این موضوع به‌طور مستقیم در محاسبه ATC دخالت ندارد؛ ولی روش‌های بکار رفته، بعد از آن برای محاسبه ATC استفاده شده‌اند [۱۹].

در سال ۱۹۹۲ آجاراپو[۲۰]، نخستین روش پخش بار تداومی کلاسیک را تحت عنوان «پخش بار تداومی، یک ابزار برای بررسی پایداری ولتاژ در حالت ایستا» ارایه داد. در این مقاله از روش تداومی پارامتری شده محلی[۳۳] استفاده شده است که در ردیف روش‌های حل معادلات جبری غیرخطی قرار می‌گیرد و به روش‌های دنبال‌کننده مسیر[۳۴] معروف هستند.

الیک در سال ۱۹۹۷ مقاله‌ای تحت عنوان «ATC و مقدار آن در سیستم دسترسی آزاد» ارایه کرد[۲۱]. در این مقاله از نظریه شبکه‌های غیرخطی برای تعیین شرط‌های کلیدی در محاسبه و بررسی ATC استفاده شده است. همچنین برای تعیین ATC ایستا، سیستم‌های قدرت را به دو نوع یکنواخت[۳۵] و غیریکنواخت[۳۶] تقسیم کرده است. در سیستم‌های غیریکنواخت، ATC را نمی‌توان مستقل از بقیه قراردادها در سیستم محاسبه کرد. به‌عبارت‌دیگر، ATC بین یک تولیدکننده و مصرف‌کننده در ازای یک قرارداد خاص، از بقیه قراردادها مستقل نیست. ولی در سیستم‌های یکنواخت، وابستگی بین ATC و قراردادهای مختلف قابل صرف‌نظر کردن است و معادلات آن‌ها را می‌توان به راحتی به دست آورد. در این مقاله، روابط مورد نیاز اثبات و تحلیل شده است و بر روی یک سیستم ۶ باسه، تفاوت تعیین بررسی ATC سیستم‌های یکنواخت و غیریکنواخت نشان داده‌شده است.

اجیب و همکاران در سال ۱۹۹۸ مقاله‌ای تحت عنوان «محاسبه ATC» ارایه دادند [۲۲]. در این مقاله یک برنامه کامپیوتری برای محاسبه ATC با درنظرگرفتن محدودیت‌های پخش بار AC، اثر توان موهومی، حدود ولتاژ، فروپاشی ولتاژ و حد حرارتی ارایه شده است. در روش ارایه شده، برای محاسبه قابلیت انتقال، از افزایش پله‌ای بار و تولید، تا رسیدن به حدود بیان‌شده در تعریف قابلیت انتقال، استفاده شده است. در این نوع CPF، برای پیدا نمودن طول گام، از شیب منحنی توابع پخش بار نسبت به پارامتر تغییر توان لاندا استفاده شده است. قابلیت انتقال به گونه‌ای تعیین‌شده است که امنیت سیستم با پیشامدهای ممکن در آن تضمین شود. در این مقاله دو روش به نام‌های سری و موازی برای تعیین قابلیت انتقال و بررسی پیشامدهای سیستم ارایه شده است که در روش سری، برای تک‌تک پیشامدها، CPF به‌صورت جداگانه انجام می‌شود و برای هر پیشامد ممکن سیستم، قابلیت انتقال تعیین می‌شود. کمترین قابلیت انتقال به‌عنوان قابلیت انتقال سیستم معرفی می‌شود. در روش موازی بر عکس روش سری، با افزایش یک گام در تولید و مصرف، تمام پیشامدها برای نقطه کار جدید بررسی می‌شوند. این افزایش تولید و مصرف آن‌قدر ادامه می‌یابد تا یکی از پیشامدها به محدودیت برسد. در این مرحله، توان انتقالی همه پیشامدها مقایسه می‌شوند. اگر قابلیت انتقال در پیشامد محدودکننده، از توان انتقالی در پیشامدهای دیگر کمتر باشد؛ این قابلیت انتقال، قابلیت انتقال مطلوب می‌باشد و در غیر این صورت باید مراحل قبل را برای پیشامدهایی که محدودیت ایجاد نمی‌کنند؛ ادامه داد تا قابلیت انتقال محاسبه شود. مزیت این روش، افزایش کارایی روش CPF و ارایه یک الگوریتم جدید برای تعیین ATC ایستا می‌باشد.

همود در سال ۲۰۰۰ مقاله‌ای تحت عنوان «تعیین ATC سیستم انتقال» ارایه داد [۲۳] که در آن یک روش برای تعیین ATC بین دو ناحیه و یا چند ناحیه ارایه شده است. این روش در قالب یک نرم‌افزار تحت عنوان PROCOSE[۷۳] بیان شده است. نرم‌افزار PROCOSE نه تنها برای محاسبه قابلیت انتقال، بلکه برای شناسایی تجهیزاتی که قابلیت انتقال را محدود می‌کنند؛ ابزاری قدرتمند است. این نرم‌افزار از پخش‌بار DC برای محاسبه نقطه کار سیستم استفاده می‌کند و در تحلیل خود، خروج واحدها، پخش‌بار اقتصادی، خروج تجهیزات و محدودیت‌های سیستم را در نظر می‌گیرد. محدودیت‌های شبکه که با پیش‌بینی به دست می‌آیند عبارت‌اند از: محدودیت حرارتی، محدودیت ولتاژ و محدودیت‌های پایداری. در PROCOSE نحوه برنامه‌ریزی واحدها، سطح بار، توپولوژی شبکه و محدودیت‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود.

مزیت PROCOSE برای محاسبه قابلیت انتقال این است که از روش‌های تکرار، استفاده نمی‌نماید و در نتیجه سرعت آن بالا می‌باشد. عیدیانی و همکاران ابتدا پیشنهاد کردند که روش CPF با استفاده از روش حداقل پس‌ماند (GMRES[۳۸]) بهبود یابد تا در تعیین سریع پایداری ولتاژ کمک کند [۲۴]. همچنین به جای استفاده از روش نیوتن‌رافسون معمولی NR، از روش NRS (نیوتن-رافسون-سایدل) استفاده شود که روشی سریع‌تر و دقیق‌تری نسبت به NR است. نشان داده‌شده است که این روش برای تعیین پایداری ولتاژ و ATC ایستا دارای سرعت و دقت بیشتری نسبت به روش‌های قبلی است [۲۵].

در سال ۲۰۱۱، عیدیانی و همکاران [۲۶] روش جدیدی به نام MD[۳۹] برای تعیین پایداری ولتاژ و ATC ایستا ارایه دادند که در آن با سرعت و دقت کافی، فاصله بین نقطه کار تا مرز پایداری سیستم، در هنگام افزایش تولید و مصرف تخمین زده می‌شود.

در همین سال، عیدیانی [۲۷] روشی در تعیین پایداری ولتاژ ارایه داد که می‌توان این روش را برای شبکه‌های توزیع و انتقال به‌طور همزمان استفاده کرد. ترکیب الگوریتم‌های NRS، DH[۴۰]، CPF-GMRES و حذف پارامترهای مثلثاتی در پخش بار و ماتریس ژاکوبین، باعث افزایش سرعت و دقت محاسبات شده است.

در سال ۲۰۱۶، نیرک‌شانا و همکاران [۲۸]، ATC ایستا را با حضور و جایابی ادوات فاکتس محاسبه و افزایش دادند. در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی گربه[۴۱] برای یافتن مکان بهینه ادوات فاکتس استفاده می‌کند. بالاخره در سال ۲۰۲۰ و در مقاله [۲۹]، یک روش جدید در تعیین ارزیابی توانایی انتقال توان احتمالی (PTTC[۴۲]) با وجود انرژی‌های تجدیدپذیر به نام (DDSPCE[۴۳]) ارایه شده است. نشان داده شده است که روش ارایه شده می‌تواند با وجود تعداد زیادی ورودی تصادفی همگرا شود ولی این روش هنوز مشکل افزایش ابعاد مساله را حل نکرده است.

۳-۲-۱-۲- OPF، پخش توان بهینه(بهینه‌سازی خطی و غیرخطی)

برای هر قرارداد، تولید و مصرف به‌صورت بهینه آن‌قدر افزایش می‌یابند تا توان انتقالی بین دو ناحیه به بیشینه خود برسد. مراجع قدیمی این قسمت، بر پخش بار بهینه سیستم قدرت برای کنترل تبادل انتقال توان، توانایی بارگذاری بهینه سیستم و ارتباط بین توانایی انتقال توان و محدودیت پایداری ولتاژ و ... تأکید دارند [۳۰].

در سال‌های اخیر، بر روی محاسبه مستقیم ATC تأکید شده است. «پیشنهادی برای محاسبه حاشیه اطمینان انتقال (TRM) در ATC»، ارایه شده در سال ۱۹۹۸ توسط سائر [۳۱]، یکی از این مقاله‌ها است. ازآنجا که در زمان ارایه مقاله، نظریه‌های توسعه‌یافته برای محاسبه TRM در ATC خیلی کم بوده است؛ چندین روش مختلف برای محاسبه TRM پیشنهاد و ارزیابی شده است. این محاسبات بر اساس یک برنامه OPF انجام‌شده است. نویسنده مقاله، TRM را مقدار عدم قطعیت در شرایط کاری استفاده‌شده در تعیین TTC می‌داند که این عدم‌قطعیت‌ها ممکن است به دلیل وجود عدم قطعیت در پارامترها مانند امپدانس خطوط، خطای پیش‌بینی بار و یا اطلاعات باس‌ها به وجود آمده باشد.

در همین سال، ملیاپالاس [۳۲] مقاله «تخمین احتمالی توانایی انتقال در یک محیط خصوصی شده» را ارایه داد که یک روش احتمالی برای محاسبه ATC می‌باشد. در این مقاله، تمام نواحی به سه گروه تقسیم شده‌اند: (الف) ناحیه مورد مطالعه، (ب) نواحی شرکت‌کننده در انتقال توان و (ج) نواحی خارجی که هیچ‌گونه قرارداد مستقیم یا غیرمستقیمی با ناحیه مورد مطالعه ندارند. همچنین رتبه‌بندی پیشامدها را بر اساس استفاده از یک OPF انجام داده و توزیع احتمالی توانایی انتقال همزمان را بر اساس مدل مارکو محاسبه کرده است؛ که نقطه قوت این مقاله به شمار می‌آید. روش ارایه شده بر روی شبکه ۲۴ باس IEEE و همچنین یک سیستم واقعی دارای ۲۱۸۲ باس و ۸ ناحیه، امتحان شده و نتایج قابل قبولی گرفته شده است.

«محاسبه ATC در سیستم قدرت خصوصی شده» ارایه شده در سال ۱۹۹۸ توسط شبان[۳۳]، یکی دیگر از این نوع مراجع است. در این مقاله، TTC با استفاده از یک نوع OPF محاسبه می‌شود. هدف در پخش بار بهینه، بیشینه کردن مجموع تولید فرستاده شده و بار دریافت شده در باس‌های مشخص می‌باشد. همچنین محدودیت‌هایی از جمله پخش بار AC و حدود بهره‌برداری از سیستم در آن گنجانده شده است. در روش بهینه‌سازی این مرجع، از برنامه‌نویسی درجه دو پی در پی استفاده شده است. روش ارایه شده بر روی سیستم ۳۰ باس IEEE امتحان شده است. نتایج کامپیوتری نشان می‌دهد که روش ارایه شده بسیار مؤثر بوده و همگرایی خوبی دارد.

در سال ۱۹۹۹، گراوینر و همکاران مقاله‌ای ارایه دادند که در آن بر محاسبه ATC و اجزای تأثیرگذار بر آن -با بیشینه کردن توان انتقالی به وسیله برنامه‌ریزی غیرخطی- تأکید شده است [۳۴]. در این روش برای محاسبه قابلیت انتقال از افزایش پله‌ای بار و تولید، تا رسیدن به حدود بیان‌شده در تعریف قابلیت انتقال استفاده شده است. در این مقاله برای محاسبه قابلیت انتقال، فقط محدودیت‌های حرارتی خطوط و افت ولتاژها در نظر گرفته شده است. ابتدا تولید و مصرف به‌صورت پله‌ای در دو ناحیه افزایش می‌یابد تا وقتی که توان انتقالی خطوط به حد حرارتی برسد. پس از تعیین قابلیت انتقال با توجه به محدودیت‌های حرارتی، محدودیت‌های ولتاژ بررسی می‌شود. درصورتی‌که قابلیت انتقال به دست آمده باعث تجاوز ولتاژ از حد تعیین‌شده نشود؛ این مقدار قابلیت انتقال، قابلیت انتقال دلخواه است. اما اگر قابلیت انتقال به دست آمده باعث افزایش ولتاژ از حدود تعیین‌شده شود؛ این مقدار قابلیت انتقال باید کاهش داده شود تا محدودیت‌های ولتاژ برآورده شود.

در سال ۱۹۹۹، سائر مقاله‌ای ارایه داد که در آن ATC با در نظر گرفتن توان موهومی محاسبه می‌شود [۳۵]. در این مرجع، رابطه بین توان موهومی و انتقال توان سیستم خطی شده آورده شده است. از آنجا که حدود حرارتی خط انتقال به‌صورت ولت-آمپر بیان‌شده و در بقیه روش‌ها با تقریب به‌عنوان حد مگاوات استفاده می‌شود؛ درنظرگرفتن توان موهومی در مقاله جدید، دقت محاسبه ATC را بالا برده است. چرا که در روش‌های قبلی در هنگام تعیین ATC، اثر ولتاژ باس‌ها و توان موهومی خطوط در نظر گرفته نمی‌شود و ATC چنان محاسبه می‌شود که توان حقیقی خطوط به حد حرارتی MVA برسد. در این مقاله بر روی دو سیستم کوچک ۳ و ۷ باسه ولی با اطلاعات کامل، نشان داده‌شده است که دقت این روش از روش‌هایی که توان موهومی را در نظر نمی‌گیرند؛ بیشتر است. این نویسنده روش فوق را برای یک سیستم بزرگ در سال ۲۰۰۳ دوباره امتحان کرده است [۳۶].

مرجع دیگر مورد بررسی در این قسمت، مقاله «توانایی انتقال min-max، یک مفهوم جدید» است که توسط گان در سال ۲۰۰۱ ارایه شده است[۳۷]. در این مقاله یک مفهوم جدید و یک الگوریتم برای توانایی انتقال ارایه شده است. الگوریتم ارایه شده بر اساس جستجوی میانه استوار است و با الگوریتم شاخه و کران[۴۴] که روش استاندارد در حل مساله min-max است؛ مقایسه شده است و نشان داده‌شده است که الگوریتم جدید جستجوی میانه، ساده‌تر و مؤثرتر است. این مساله بر روی سیستم ۱۱۸ باس IEEE امتحان شده است. به نظر نویسندگان، اگر توانایی انتقال در یک محدوده مثل $[P_{min_max}, P_{max}]$ مشخص شود؛ بهتر از مشخص کردن آن با یک عدد مثل Pmax است. حد پایین این فاصله را توانایی انتقال min-max تعریف می‌کنند.

مقاله «محاسبه ATC با محدودیت‌های حالت پایدار با استفاده از تجزیه انحنا[۴۵]» در سال ۲۰۰۳ ارایه شده است [۳۸]. در این مقاله با استفاده از الگوریتم قدیمی تجزیه انحنا، روشی برای تعیین TTC ارایه شده است. روش ارایه شده دارای دقت به نسبت خوبی است و بر روی سیستم‌های ۴ و ۳۰ باسه IEEE امتحان شده است.

در مقاله [۳۹] نشان داده شده است که محاسبه ATC با توجه به ناهمواری در محدودیت‌های پایداری سیگنال کوچک SSSC-ATC[۴۶]، محاسبه ATC ایستا با روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی بسیار دشوار است. از این‌رو در این مقاله از یک روش برنامه‌نویسی درجه دوم به همراه نمونه‌گیری شیب تطبیقی (AGS[۴۷]) استفاده کرده است. نشان داده شده است این روش از تمام روش‌های تکراری دیگر سریع‌تر عمل می‌کند.

اتفاقی که در سال‌های اخیر افتاده است تغییر روند محاسبه پخش بار بهینه معمولی با تکنیک‌های هوش مصنوعی[۴۸](AI) است [۴۰]. روش‌های AI برای جلوگیری از گیرافتادن در یک راه‌حل بهینه محلی، مخصوصاً برای سیستم‌های بسیار غیرخطی استفاده می‌شود. بعضی از روش‌های مختلف AI در تعیین ATC عبارت‌اند از: شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم زنبور عسل (BA)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و برنامه‌ریزی تکاملی (EP)، گرگ خاکستری (GWO[۴۹]) و الگوریتم جستجوی فاخته CSA[۵۰] [۴۱]. مقاله تعیین ATC برای بازار برق با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته در سال ۲۰۲۰ ارایه شد [۴۱]. در این مقاله نشان داده شده است که این روش، از روش‌های تکراری PSO و GWO برای تعیین ATC مناسب‌تر است. در جدیدترین مقاله [۴۲] نیز با کمک شبکه عصبی، ATC ایستا در زمان واقعی محاسبه شده است و برای این کار از اطلاعات برخط PMU استفاده می‌کند و ثابت کرده است این روش برای تخمین ATC ایستا بسیار مناسب است.

با آنکه روش‌های AI بسیار سریع هستند و معمولاً پاسخ بهینه کلی را پیدا می‌کنند ولی این روش‌ها، مشکل بزرگ شدن مسأله و مشکل انتخاب روش مناسب آموزش را دارند همچنین به اطلاعات زیادی

برای آموزش نیاز دارند.

۳-۲-۱-۳- تحلیل حساسیت، خطی‌سازی، پخش بار DC

تمام مراجعی که در این قسمت گردآوری شده‌اند از خطی‌سازی مدل در مساله محاسبه ATC استفاده کرده‌اند. در مراجع قدیمی (تا سال ۱۹۹۶) که هنوز مفهوم ATC مورد توجه مستقیم قرار نگرفته بود؛ مقاله‌ها بر روی توانایی تبادل انتقال توان، تبادل توان بهینه، حداکثر بارگذاری و ... با استفاده از تحلیل حساسیت تأکید داشته‌اند [۴۳]. در بین این مقاله‌های قدیمی، مرجع [۴۴] کاربرد بیشتری پیدا کرده‌اند. این دو مرجع، روش‌های تحلیل حساسیت V-Q و تحلیل مدال V-Q را توصیف کرده‌اند. این دو روش برای تحلیل پایداری ولتاژ سیستم‌ها بکار گرفته می‌شوند. مزایای این روش‌ها این است که ناحیه‌ای را که به‌صورت بالقوه مشکل پایداری دارد؛ مشخص می‌کنند و روش تحلیل مدال این مزیت اضافی را نیز دارد که اطلاعاتی را در خصوص چگونگی ناپایداری به دست می‌دهد.

اولین مقاله در زمینه ATC که از تحلیل حساسیت استفاده می‌کند؛ مقاله آقای گرین و همکاران است که در سال ۱۹۹۷ ارایه شده است [۴۵]. همین روش برای یک سیستم واقعی ۳۳۵۷ باس، دوباره در سال ۱۹۹۹ امتحان شده است [۴۶]. در این مقاله جدید، یک رابطه کارآمد محاسباتی، برای تعیین حساسیت درجه اول توانایی انتقال، نسبت به تغییرات تمام پارامترها، ارایه شده است. روش ارایه شده از پخش بار DC استفاده می‌کند. نشان داده‌شده است که روش فوق سرعت بیشتر و دقت بهتری نسبت به روش‌های قبلی دارد.

گراونر در سال ۱۹۹۹ مقاله‌ای تحت عنوان «توانایی انتقال قابل دسترس و حساسیت درجه اول» ارایه کرد [۴۷] که در این مقاله، اثرات درجه اول تغییرات متغیرهای شبکه در محاسبه ATC شناسایی شده‌اند. همچنین با درنظرگرفتن حدود ولتاژ و حدود حرارتی، از پخش بار خطی و غیرخطی استفاده شده است و مهم‌ترین قسمت مقاله، درنظرگرفتن عدم‌قطعیتهایی مانند خطای پیش‌بینی بار و خطای اطلاعات در محاسبه ATC می‌باشد. همچنین در این مقاله، مفاهیم مختلف ATC به‌طور خلاصه تعریف شده‌اند و یک الگوریتم کلی برای چگونگی جستجوی جواب در پخش بار تداومی ارایه شده است. از آنجا که پیش‌بینی بار از مهم‌ترین عدم‌قطعیتهای سیستم قدرت می‌باشد؛ در این مقاله، خطای پیش‌بینی بار در هنگام تعیین انتقال توان همزمان، بررسی شده است. الگوریتم‌های ارایه شده برای شبکه PJM امتحان شده و نشان داده‌شده است که خطای روش ارایه شده کمتر از ۱۰% است.

در سال ۲۰۰۰، اجیب و همکاران مقاله‌ای تحت عنوان «محاسبه سریع ATC خطی» ارایه کرده‌اند [۴۸] که در آن از پخش بار خطی استفاده‌شده و با درنظرگرفتن حد حرارتی خطوط و تعداد زیادی از پیشامدها، ATC محاسبه شده است. این روش به «روش حساسیت شبکه[۵۱]» مشهور است. در این مقاله، به کمک یک مثال، اثرات فیزیکی انتقال توان بر روی شبکه بررسی شده است. این روش از ابتدایی‌ترین روش‌های محاسبه قابلیت انتقال می‌باشد و برای محاسبه آن فقط محدودیت‌های حرارتی خطوط انتقال را در نظر می‌گیرد. ولی چون از روش‌های تکراری استفاده نمی‌کند؛ دارای سرعت بالایی می‌باشد. در این مقاله عبارت‌های زیر تعریف‌شده و رابطه ریاضی برای آن‌ها مشخص شده است؛ ضرایب توزیع وقفه‌های خطوط[۵۲]، ضرایب توزیع انتقال توان[۵۳] و ضرایب توزیع وقفه‌های ژنراتور[۵۴]. روش ارایه شده برای سیستم‌های متراکم، که در آن‌ها مصرف‌کننده‌ها و تولیدکننده‌ها به کمک خطوط انتقال به شدت به هم گره خورده‌اند؛ استفاده می‌شود. در چنین شبکه‌هایی، مسیرهای بحرانی انتقال برای یک انتقال خاص قابل تعیین نمی‌باشد و این مسیرها وابستگی شدیدی به شرایط موجود در زمان برنامه‌ریزی انتقال دارند. عیب عمده این روش در این است که محدودیت‌های در نظر گرفته‌شده در این روش، بسیار کم است و با جواب‌های به دست آمده، با در نظر گرفتن محدودیت‌های بیشتر (استاتیکی و دینامیکی) فاصله دارد.

در سال ۲۰۰۰، زیاو و سونگ مقاله‌ای تحت عنوان «ارزیابی ATC به وسیله برنامه‌نویسی تصادفی[۵۵]» ارایه داده‌اند [۴۹] که در آن با مدل تصادفی، عدم‌قطعیت‌های بار، ژنراتور و خط مشخص‌شده وATC محاسبه شده است. روش ارایه شده ترکیبی از دو روش (SPR[۵۶]) و (CCP[۵۷]) می‌باشد که شامل متغیرهای گسسته و متغیرهای پیوسته است. روش ارایه شده بر روی یک سیستم ۲۹ باس و ۶۹ خط امتحان شده است و نشان داده‌شده است که با وجود عدم‌قطعیتهای زیادی که در سیستم وجود دارد؛ روش ارایه شده، جواب قابل قبولی ارایه می‌دهد.

دای و همکاران [۵۰] با استفاده از الگوریتم نقطه درونی[۵۸]، بیش‌ترین توانایی بارگذاری سیستم را محاسبه کرده‌اند. در این مقاله علاوه بر تعریف بیش‌ترین توانایی بارگذاری بر اساس منطقه، روشی ارایه شده است که برای انواع مساله تعیین بیش‌ترین توانایی بارگذاری کاربرد دارد. روش ارایه شده برای سیستم ۶۰ باس IEEE امتحان شده است. در این مقاله روابط بیش‌ترین توانایی بارگذاری توسعه داده‌شده تا برای محاسبه ATC بکار رود. این کار با آزاد گذاشتن تولید در باس منبع و مصرف در باس بار و تثبیت کردن بقیه تولیدات و مصارف، انجام‌شده است. سپس با استفاده از روش برنامه‌ریزی نقطه درونی، مساله بهینه‌سازی بیش‌ترین توانایی بارگذاری حل شده است. از آنجا که روش نقطه درونی در برنامه‌ریزی خطی، روشی جدید و سریع می‌باشد؛ سرعت روش ارایه شده در این مقاله بسیار خوب است.

در سال ۲۰۰۶[۵۱]، نشان داده شد که به دلیل پیچیدگی و وقت‌گیر بودن پخش بار AC، بهتر است از پخش بارDC استفاده شود. در این مرجع از تلفات و توان موهومی صرف‌نظر شده و معادله خطی زیر را برای کل سیستم استفاده می‌کند:

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^{n} B_{ij} (\theta_i - \theta_j)$$

که P_i تونن تولیدی در باس iام، B_{ij} سوسپتانس بین باس i و j و θ_{ij}، اختلاف زاویه بین ولتاژ باس i و j است.

در سال ۲۰۱۱، آقای کوک و همکاران [۵۲] پیشنهاد استفاده از یک روش فازوری خطی را برای جبران مشکلات پخش بار DC، در مقابل پخش بار AC دادند در این روش، از توان اکتیو و راکتیو به‌صورت همزمان استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر به دلیل افزایش عدم قطعیت در تولید به خاطر افزایش تولید بادی، افزایش تعداد خودروهای برقی، و در کل افزایش تعداد منابع تجدیدپذیر هم در سطح انتقال و هم در سطح توزیع، عدم قطعیت در تمام پارامترهای الکتریکی سیستم قدرت بسیار نمایان شده است. در مراجع جدید [۵۳-۵۴] از روش مونت کارلو و یک روش جایگزین تقریب درجه پایین (LRA[۵۹]) برای کاهش محاسبات استفاده شده است. با روش LRA، عدم قطعیت در تولید بادی، بار و خروج تجهیزات به راحتی مدل می‌شود. اثربخشی این روش بر روی شبکه ۱۱۸ باس IEEE تأیید شده است

۳-۲-۲- معیارهای توقف ایستا

در این قسمت معیارهایی آورده شده است که باعث توقف الگوریتم افزایش انتقال توان می‌شود:

۳-۲-۲-۱- محدودیت‌های انتقال توان از خطوط مانند حد حرارتی و حد پایداری ایستا

ساده‌ترین و پرکاربردترین محدودیت در انتقال توان، محدودیت حرارتی خط و حد پایداری استاتیک می‌باشد. از این دو حد، آنکه کمتر باشد به‌عنوان محدودیت اصلی استفاده می‌شود.

۳-۲-۲-۲- واگرایی پخش بار DC

پخش بار DC ساده‌ترین نوع پخش بار می‌باشد و وقتی استفاده می‌شود که بخواهیم با سرعت زیاد، جواب تقریبی برای پخش‌بار داشته باشیم.

۳-۲-۲-۳- واگرایی پخش بار AC (از جمله فروپاشی ولتاژ)

پخش بار DC دارای دقت کافی برای حل دقیق مساله پخش بار نمی‌باشد. اگر در محاسبات انتقال توان بخواهیم از دقت بیشتری در محدودیت پخش بار استفاده کنیم؛ می‌توان از انواع مختلف پخش بار (نیوتن رافسون، جداشده و جداشده سریع) استفاده کرد.

۳-۲-۲-۴- حدود ولتاژ در هر باس

اگر تغییرات ولتاژ در محاسبه انتقال توان در نظر گرفته شود؛ ابتدایی‌ترین حد ولتاژ، حد ولتاژ باس است؛ بطوریکه هر باس از مقدار نامی خود نباید بیشتر از ۵ درصد تغییرات داشته باشد.

۳-۲-۳- مزایا

با آنکه هر روش و هر مقاله‌ای مزایای مربوط به خود را دارد ولی در اینجا، مزایای مشترک روش‌های ایستا آورده شده است و عموماً با روش‌های دینامیکی که در مقاله بعدی آورده می‌شود مقایسه شده‌اند.

۳-۲-۳-۱- سادگی مساله

عدم استفاده از معادلات دیفرانسیل در روش‌های ایستا باعث شده است که قیودی مانند پایداری گذرا و پایداری دینامیکی ولتاژ در نظر گرفته نشوند و لذا در این روش‌ها، مساله محاسبه ATC ساده و زمان لازم برای محاسبه آن کم شده است.

۳-۲-۳-۲- واضح بودن

به همان دلایل فوق، مساله ATC ایستا علاوه بر سادگی، واضح نیز شده است؛ به این معنی که مهندسان، بر روی مساله تسلط بیشتری دارند و امکان دنبال کردن حل مساله و تغییر در مساله برای بهتر شدن جواب، وجود دارد.

۳-۲-۳-۳- انعطاف‌پذیری

روش‌های ایستا انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش‌های دینامیکی در هنگام تغییر سیستم دارند.

۳-۲-۳-۴- سرعت

به همان دلایل فوق، روش‌های ایستا سرعت بیشتری نسبت به روش‌های دینامیکی برای رسیدن به جواب دارند.

۳-۲-۴- معایب و نقایص

در این قسمت نیز مهم‌ترین معایب و نقایص مشترک روش‌های ایستا آورده شده است.

۳-۲-۴-۱- جواب‌های غیردقیق

به دلیل در نظر نگرفتن حدود دینامیکی برای تعیین ATC ، جواب‌های به دست آمده از روش‌های ایستا، همیشه غیر دقیق و خوش‌بینانه می‌باشند (نسبت به روش‌های پویا). به‌عبارت‌دیگر اگر در روش ایستا، ATC در یک سیستم P به دست بیاید حتماً به روش پویا، جواب ATC کمتر از P خواهد بود چرا که حدود بیشتری را در نظر می‌گیرد. همچنین به دلیل ساختار غیرخطی سیستم قدرت، امکان جواب نداشتن بعضی از روش‌های ایستا، برای برخی از سیستم‌ها وجود دارد.

۴- نتیجه

در روش‌های تعیین ATC ایستا، از فرضیات ساده کننده‌ای برای افزایش سرعت محاسبات استفاده شده است و این فرض‌ها همیشه واقع‌گرایانه نیستند و به‌طور معمول هر یک از آن‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر دقت ATC دارند. به همین دلیل، نتایج به دست آمده برای شبکه واقعی مناسب نیست. در مقاله بعدی، روش‌های تعیین ATC پویا بررسی شده است و در آنجا نشان داده می‌شود که روش‌های ATC ایستا را می‌توان به‌عنوان حدس اولیه خوبی در تعیین ATC پویا استفاده کرد.

پی‌نوشت‌ها

1 Available Transfer Capability

۲ به چگونگی تعیین ATC، ماشین محاسبه می‌گوییم.

3 ATC Working Group

4 North American Electric Reliability Council

5 Transfer Capability

6 Transfer Capacity

7 Transmission Provider

فراهم‌کنندگان انتقال، شرکت‌هایی عمومی می‌باشند که یا صاحب تجهیزات انتقال می‌باشند و یا بر تجارت بین منطقه‌ای توان الکتریکی نظارت دارند.

8 Parallel Paths

9 Simultaneous ATC

10 Non-Simultaneous ATC

11 Total Transfer Capability

12 Transmission Reliability Margin

13 Short-Term Operator Response

14 Capacity Benefit Margin

15 Operating Horizon

16 Planning Horizon

17 Non-Recallable Reserved

18 Recallable Reserved

19 Non-Recallable Scheduled

20 Recallable Scheduled

21 Existing Commitment

22 First Contingency Incremental Transfer Capability

23 Non-Recallable Available Transfer Capability

24 Recallable Available Transfer Capability

25 Surge Impedance Loading

26 Transmission Loading Relief

27 Unified Power Flow Controller

28 Low Voltage Boundary

29 Metaheuristic Evolutionary Particle Swarm Optimization

30 AC Power Transfer Distribution Factors

31 DC Power Transfer Distribution Factors

32 Power World Simulator

33 Locally Parameterized

34 Path-Following

35 Monotonic

36 Non-Monotonic

37 The Ontario Hydro's Probabilistic Composite System Evaluation Program

38 General Minimal Residual

39 Minimum Distance

40 Down-Hil

41 Cat optimization algorithm

42 Probabilistic TTC

43 Data-Driven Sparse Polynomial Chaos Expansion

44 Branch and Bound

45 Bender Decomposition

46 ATC with small-signal stability constraint

47 Adaptive Gradient Sampling

48 Artificial Intelligence techniques
49 Grey Wolf Optimizer
50 Cuckoo Search Algorithm
51 Network Sensitivity Method
52 Branch Outage Distribution Factor
53 Power Transfer Distribution Factor
54 Generator Outage Distribution Factor
55 Stochastic
56 Stochastic Programming With Recourse
57 Chance Constrained Programming
58 Interior Point
59 canonical Low-Rank Approximation

مراجع

[1] Olatunji Obalowu Mohammed, Mohd Wazir Mustafa, Daw Saleh Sasi Mohammed, Abdulrahaman Okino Otuoze, «Available transfer capability calculation methods: A comprehensive review", International Transactions on Electrical Energy Systems, pp: 1-24, Feb. 2019.

[2] ATCWG Report to the Engineering Committee on Regional Compliance with NERC's 1996 Available Transfer Capability Definitions and Determination Report.

[3] Available Transfer Capability Definitions and Determination, A Framework for Determining Available Transfer Capabilities of the Interconnected Transmission Networks for a Commercially Viable Electricity Market, June 1996."ftp:// ftp. nerc. com/ pub /sys /all_ updl/ docs /pubs/ atcfinal. pdf"

[4] Summary results ,by Region ,of a recent transmission reliability margin) TRM (and capacity benefit margin) CBM (survey conducted by the ATCWG, "ftp://ftp. nerc.com/pub/sys/all_updl/ac/atcwg/svyrsult.pdf", 1999.

[5] Thomas, B.; Dobson, I.; Alvardo, F.; DeMarco, C.; Rajaraman, R.; Greene, S., "Limitations and Interactions of Bulk Power Transfers in Large Scale Electric Power Systems", 1998 http://www.pserc .wisc.edu/ index_ research. html

[6] Transmission Transfer Capability Task Force, "Transmission Transfer Capability", North American Electric Reliability Council, Princeton, NJ, May 1995.

[7] Transmission Transfer Capability, A Reference Document for Calculating and Reporting the Electric Power Transfer Capability of Interconnected Systems, North American Electric Reliability Council, May 1995.

[8] Eidiani, M., Shanechi, M.H.M. and Vaahedi, E., "Fast and Accurate Method for computing FCTTC (First Contingency Total Transfer Capability)", PowerCon 2002, IEEE-PES/CSEE, Int. Conference on Power System Technology, pp. 1213-1217, Oct. 13-17, Kunming, China, 2002.

[9] Alexandrov, G.N.; Podporkyn, G.V., "Improvement of the Efficiency of 35 to 220 kV lines", IEE AC and DC Power Transmission, pp. 226-231, 1991.

[10] Grijalva, S.; Sauer, P.W., "Transmission Loading Relief (TLR) and Hour-Ahead ATC", Proceedings of the33rd Hawaii International Conference on System Sciences Copyright (c) IEEE, 1998.

[11] Morioka, Y.; Kato, M.; Mishima, Y.; Nakachi, Y.; Asada, M.; Tokuhara, K., "Implementation of Unified Power Flow Controller and Verification for Transmission Capability Improvement", Preprint Order Number: PE-077-PWRS-0-05-1998, Discussion Deadline: October 1998.

[12] Rajaraman, R.; Alvarado, F.; Mainiaci, A.; Camfield, R.; Jalali, S., "Determination of Location and Amount of Series Compensation to Increase Power Transfer Capability", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 13, No. 2, pp. 294-300, May 1998.

[13] Wang, R.; Lasseter, R., "Redispatching Generation to Increase Power System Security Margin and Support Low Voltage Bus", Preprint Order Number: PE-017-PRS (12-99), Discussion Deadline: March 2000.

[14] Rushitkumar K. Bhatt, Jigar. S. Sarda, "Available Transfer Capability (ATC) Enhancement of Transmission Line Using TCSC FACTS Controller", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 6 Issue 04, pp:529-534, April-2017.

[15] Manjula S. Sureban, S.G.Ankaliki, "Enhancement of Available Transfer Capability of Transmission Lines using Thyristor Controlled Reactor", International Conference on Coputation of power, energy information and communication (ICCPEIC), pp. 375-380, 2018.

[16] Divya Gupta, Sanjay Kumar Jain, "Available Transfer Capability Enhancement by FACTS Devices Using Metaheuristic Evolutionary Particle Swarm Optimization (MEEPSO) Technique", Energies, 14, 869, DOI: 10.3390/en14040869, 2021.

[17] Britton, Jay, "Newton's Method Load Flow, Improved Area Interchange Control", IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems, T-PAS-69, pp. 1577-1581, Oct. 1969.

[18] Landgren, G.L.; Terhune, H.L.; Angel, R.K., "Transmission Interchange Capability Analysis by Computer", IEEE Transactions on Power Apparatus and Sys., Vol. PAS-91, No. 6, pp. 2405-2414, Nov/Dec 1972.

[19] Galiana, F.D., "Limitations on Power and Voltage Variables Imposed By Network Structure", IEEE Transactions on Power and Apparatus System, Vol. PAS-95, pp. 1016-1022, Jul/Aug. 1976.

[20] Ajjarapu, V.; Lee, B., "Bibliography on Voltage Stability", IEEE Transactions on Power System, Vol. 13, No. 1, pp.115-125, Feb. 1998.

[21] Ilic, M.D.; Yoon, Y.T.; Zobian, A., "Available Transmission Capacity (ATC) and its Value under Open Access", IEEE Transactions on Power Systems, VOL.12, pp.636-645, May 1997.

[22] Ejebe, G.C.; Tong, J.; Frame, J.; Wang, X.; Tinney, W.F., "Available Transfer Capability Calculations", Preprint Order Number: PE-321-PWRS-0-10-1997, Discussion Deadline: March 1998.

[23] Hamoud, G., "Assessment of Available Transfer Capability of Transmission Systems", Preprint Order Number: PE-002PRS (09-99), Discussion Deadline: February 2000.

[24] Eidiani, Mostafa, "Assessment of voltage stability with NEW NRS", 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), Dec. 1-3, Johor Baharu, Malaysia, pp. 494-496, 2008. DOI: 10.1109/ PECON4762525 .2008 ..

[25] Eidiani, Mostafa, "Exact and Efficient Approach in Static Assessment of Available Transfer Capability (ATC)", IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010), Nov 18-Dec 1, 2010, , pp. 189- 194, Kuala Lumpur, Malaysia. 2010.

[26] Eidiani, Mostafa, "Minimum Distance, a Quick and Simple Method of Determining the Static ATC", Journal of Electrical Engineering: Volume 11, Edition: 2, paper 16, pp. 95-101, 2011.

[27] Eidiani, Mostafa, "A Reliable and efficient method for assessing voltage stability in transmission and distribution networks", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol.33, Issue 3, pp. 453-456, March 2011.

[28] Nireekshana, T, Rao, GK, Raju, SS. "Available transfer capability enhancement with FACTS using cat swarm optimization", Ain Shams Eng J. 7(1): 159□ 167, 2016.

[29] Xiaoting Wang, Xiaozhe Wang, Hao Sheng, Xi Lin, "A Data-Driven Sparse Polynomial Chaos Expansion Method to Assess Probabilistic Total Transfer Capability for Power Systems with Renewables", IEEE Transactions on Power Systems, Early Access, DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3034520, 28 October 2020.

[30] Dobson, I.; Lu, L., "Computing an Optimum Direction in Control Space to Avoid Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 37, pp.1616-1620, No. 10, October 1992.

[31] Sauer, P. W., "Alternatives for Calculating Transmission Reliability Margin (TRM) in Available Transfer Capability (ATC) ,"Proceeding of the Thirty-First Annual (1998) Hawaii International Conference on System Sciences ,Vol III ,Kona ,Hawaii ,January ,6-9 p,89. .1998

[32] Meliopoulos ,A.P.S ;.Kang ,S.W ;.Cokkinides ,G" ,.Probabilistic Transfer Capability Assessment in a Deregulated Environment", Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Copyright (c) 1998 Institute of Electrical and Electronics Engineers.

[33] Shaaban, M.; Ni, Y.; Felix, F.Wu., "Transfer Capability Computations in Deregulated Power Systems", Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Copyright (c) 1998 Institute of Electrical and Electronics Engineers.

[34] Gravener, M.H., Nwankpa, C.; Yeoh, T.S., "ATC Computational Issues", Proceeding of the 32nd Hawaii International Conference on System Science, 1999.

[35] Grijalva, S.; Sauer, P,W., "Reactive Power Considerations in Linear ATC Computation" ,Proceedings of the 33rd Hawaii Interna-

ادامه در صفحه ۶۹

جدول۲: خلاصه نتایج حاصل از شبیه سازی با تنظیم زمان وظیفه در (D=0.5)

نوع / مبدل پارامتر	نتایج شبیه‌سازی در فضای سیمولینک	
	مبدل کلاسیک	مبدل پیشنهادی
ولتاژ دو سر سیم‌پیچ اجاق	۲۳۰ولت	۴۵۹ولت
جریان سیم‌پیچ اجاق	۳/۹۹	۷/۵۳
توان اکتیو ورودی به مبدل	۶۴۸وات	۱۹۳۱وات
توان اکتیو انتقالی به سیم‌پیچ اجاق	۴۷۸وات	۱۷۱۵وات
تلفات مبدل	۱۷۰وات	۲۱۶وات
راندمان مبدل	٪۷۳/۸	٪ ۸۸/۸
قدرت مصرفی برای طبخ غذا	P	4P
زمان طبخ غذا	t	t/4
انرژی هدررفته	w=P*t	w=4p*t/4
ارزیابی راندمان	η	1.20 η

مراجع

[1] Mühlbauer, History of Induction Heating and Melting. Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2008

[2] Trentin, P. Zanchetta, J. Clare, and P. Wheeler, “Automated optimal design of input filters for direct ac/ac matrix converters,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 7, pp. 2811–2823, Jul. 2012.

[3] L. Hao Leo, A. P. Hu, and G. A. Covic, “A direct ac-ac converter for inductive power-transfer systems,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 2, pp. 661–668, Feb. 2012

[4] M. K. Kazimierczuk, High-Frequency Magnetic Components. New York: John Willey & Sons, 2009.

[5] F. Dughiero, M. Forzan, C. Pozza, and E. Sieni, “A translational coupled electromagnetic and thermal innovative model for induction welding of tubes,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, pp. 483-486, 2012.

[6] F. Forest, S. Faucher, J.-Y. Gaspard, D. Montloup, J-J Huselstein, and C. Joubert, "Frequency-synchronized resonant converters for the supply of multiwindings coils in induction cooking appliances" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 441-452, February 2007.

[7] F. Forest, E. Labouré, F. Costa, and J.-Y. Gaspard, "Principle of a multiload/single converter system for low power induction heating" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 15, no. 2, pp. 223-230, March 2000.

[8] J. Acero, P. J. Hernández, J. M. Burdío, R. Alonso, and L. A. Barragán, "Simple resistance calculation in litz wire planar windings for induction cooking appliances" IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 4, pp. 1280-1288, April 2005.

[9] H. N. Pham, H. Fujita, K. Ozaki, and N. Uchida, "Estimating method of heat distribution using 3-D resistance matrix for zone-control induction heating systems" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 7, pp. 3374- 3382, July 2012.

[10] H. Pham, H. Fujita, K. Ozaki, and N. Uchida, “Phase angle control of high frequency resonant currents in a multiple inverter system for zone-control induction heating,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 11, pp. 3357-3366, 2011

[11] Sarnago, Hector, et al. "DirectAC–AC resonant boost converter for efficient domestic induction heating applications." IEEE Transactions on Power Electronics 29.3:1128-1139.(2014)

[۱۲] رحیم اسفندیار پور، حسام اسفندیارپور،«مبدل‌های DC-DC رزونانسی با رگولاسیون بار و خط»، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی،دانشگاه استنفورد آمریکا.

***

ادامه از صفحه۴۹

tional Conference on System Sciences Copyright (c) IEEE, 1998.

[36] Zantiago, G., Sauer, P.W., Weber, D., “Enhancement of Linear ATC Calculations by the Incorporation of Reactive Power Flows”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 619-623, May 2003.

[37] Gan, D.; Luo, X.; Bourcier, D.V.; Thomas, R.J., “Min-max Transfer Capability: A New Concept”, Proc. Of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001.

[38] Zan Y., Shaaban, M., Li, M., Liu, H., Ni, Y., Wu, F., “ATC Calculation with Steady-State Security Constraints Using Benders Decomposition”, IEE Proceedings Generation and Transmission Distribution, Vol. 150, No. 5, pp. 611-615, Sep. 2003.

[39] Peijie Li, Ling Zhu, Xiaoqing Bai, Hua Wei, “Available Transfer Capability Calculation Constrained with Small-Signal Stability Based on Adaptive Gradient Sampling”, Advanced Control and Optimization for Complex Energy Systems, doi.org/,10.1155/2020/3912717 .2020

[40] Sayah ,S ,Hamouda ,A" .Optimal power flow solution of integrated AC-DC power system using enhanced differential evolution algorithm”, International Transactions on Electrical Energy Systems, p. e2737, 2018.

[41] T. L. Duong, T. T. Nguyen, N. A. Nguyen, T. Kang, “Available Transfer Capability Determination for the Electricity Market using Cuckoo Search Algorithm”, Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol.10, pp: 5340-5345, doi.org/10.48084/etasr.3338, 2020.

[42] Devesh Shukla, S.P. Singh, “Real-time estimation of ATC using PMU data and ANN”, Vol. 14, Iss.17, pp: 3604 – 3616, DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1260, 2020.

[43] Available Transfer Capability Definitions and Determination, A Framework for Determining Available Transfer Capabilities of the Interconnected Transmission Networks for a Commercially Viable Electricity Market, June 1996. “ftp:// ftp. nerc. com/pub/sys / all_updl /docs /pubs /atcfinal .pdf”

[44] Gao, B., Morison, G.K., Kundur, P., “Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis”, IEEE Transactions, Vol. PWRS-7, No. 4, pp. 1529-1542, Nov. 1992.

[45] Greene, S.; Dobson, I.; Alvarado, F.L.; Sauer, P.W., “Initial Concepts for Applying Sensitivity to Transfer Capability”, NSF Workshop on ATC, Urbana IL, USA, June 1997.

[46] Greene, S.; Dobson, I.; Alvarado, F.L., “Sensitivity of Transfer Capability Margins with a Fast Formula”, Preprint Dec. 1999, Submitted to IEEE Transactions On Power System.

[47] Gravener, M.; Nwankpa, C.O., “Available Transfer Capability And First Order Sensitivity”, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 14, No. 2, pp. 512-518, May 1999.

[48] Ejebe, G.C.; Waight, J.G.; Santos-Nieto, M.; Tinny, W.F., “Fast Calculation of Linear ATC”, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 1112-1116, Aug. 2000.

[49] Xiao, Y.; Song, Y.H., “ATC Evaluation by Stochastic programming”, IEEE Power Engineering Review, pp. 50-52, Sep. 2000.

[50] Dai, Y.; McCalley, J.D.,; Vittal, V., “Simplification, Expansion and Enhancement of Direct Interior Point Algorithm for Power System Maximum Loadability”, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 1014-1021, Aug. 2000.

[51] Van Hertem, D, Verboomen, J, Purchala, K, Belmans, R, Kling, W., “Usefulness of DC power flow for active power flow analysis with flow controlling devices,” in AC and DC Power Transmission”, ACDC 2006. The 8th IEE International Conference on, 2006: 58-62: IET.

[52] Cook, RD, Miller, SS, Shafer, DA, “Available transfer capability applying linear phasor methods to the ac power flow”, in Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES, 1-8, 2011.

[53] Devesh Shukla, Shiv P. Singh, “Aggregated Effect of Active Distribution System on Available Transfer Capability Using Multi-Agent System Based ITD Framework”, IEEE Systems Journal (Early Access), pp: 1 - 12, DOI: 10.1109/JSYST.2020.3000930, 29 June 2020.

[54] Xin Sun, Zhongbei Tian, Yufei Rao, Zhaohui Li, Pietro Tricoli, “Probabilistic available transfer capability assessment in power systems with wind power integration”, IET Renew. Power Gener., Vol. 14 Iss. 11, pp. 1912-1920, doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1383, 2020.

***