

تعیین حداکثر توان انتقالی با روش ترکیبی نیوتن-رافسون-سایدل و پخش بار هولومورفیک با بهبود محاسبات ماتریسی

مصطفی عیدانی

ششم [۲] مراجعه کرد که جدیدترین کتاب در این زمینه است. همچنین مراجع زیادی به مدل سازی شبکه های AC/DC پرداخته اند. در [۳] روی مدل کنترل اینورتر، کنترل فرکانس، مدل بار وابسته به ولتاژ و فرکانس تأکید شده است. همچنین در [۴]، پخش بار نامتعادل با وجود خطوط HVDC و الگوریتمی برای عملیات و کنترل شبکه با وجود اتصال چندین مرکز کنترل پیشنهاد شده است. در مقاله حاضر از [۵] برای مدل سازی خطوط HVDC استفاده گردیده است.

۱-۲ مفاهیم ATC

محاسبه قابلیت انتقال در دسترس (ATC) از دیرباز مسئله مهمی در عملکرد سیستم قدرت بوده است. با این حال اخیراً محاسبات آنلاین ATC این اطلاعات را جذاب تر کرده است. روش های محاسبه ATC می توان به دو دسته ATC ایستا (SATC) [۶] و ATC پویا (DATC) [۷] تقسیم کرد. برخلاف ATC ایستا، تحلیل پایداری گذرا، تحلیل دینامیک پایداری ولتاژ، محدودیت های غیرخطی و دینامیک در محاسبه ATC پویا در نظر گرفته می شوند [۸].

همچنین سال هاست که پخش بار تداومی (CPF) برای ارزیابی SATC استفاده می شود و با استفاده از روش تکراری کمترین باقیمانده تعمیم یافته (GMRES)، سرعت محاسبات پایداری ولتاژ بهبود یافته است [۹]. در همین راستا روش نیوتن-رافسون (NR) کلاسیک را می توان با روش نیوتن-رافسون-سایدل (NRS) جایگزین کرد تا بتوان سریع تر و دقیق تر، پایداری ولتاژ و SATC را محاسبه کرد [۱۰]. علاوه بر این، ترکیب الگوریتم های DH، NRS، CPF-GMRES و حذف پارامترهای مثلثاتی در پخش بار و ماتریس ژاکوبین می تواند سرعت و دقت محاسبه SATC را افزایش دهد [۱۰].

در [۱۱] روش دیگری برای تعیین DATC پیشنهاد شده که می توان با افزایش تدریجی تولید و مصرف از حالت پایه تا نقطه انشعاب HOPF، با تخمین مقدار ویژه ماتریس حالت، DATC سیستم را به دست آورد و البته این روش برای حالت آنلاین مناسب نیست. همچنین [۱۲]، الگوریتم تکاملی تفاضلی (DEA) را برای سهولت دستیابی به نقطه انشعاب

چکیده: این مقاله ابتدا نشان می دهد که ستون فقرات شبکه انتقال آینده، حتماً خطوط جریان مستقیم با ولتاژ فوق العاده بالا است و سپس معادلات خطوط جریان مستقیم را با معادلات پخش بار جریان متناوب نیوتن-رافسون-سایدل ترکیب می کند. با افزایش ابعاد معادلات پخش بار از روش های ماتریسی برای افزایش سرعت حل معادله پخش بار استفاده شده است. همچنین از آنجایی که پخش بار هولومورفیک برای انجام پخش بار، نیازی به حدس اولیه ندارد و در صورت وجود راه حل، حتماً پاسخ دقیق را محاسبه می کند، از این روش برای تعیین حدس اولیه پخش بار نیوتن-رافسون-سایدل استفاده شده است. با ترکیب این روش ها در این مقاله، روش جدیدی ارائه گردیده که می تواند در شبکه های کوچک و بزرگ با دقت و سرعت مناسب، حداکثر توان انتقالی ایستا را محاسبه کند. در این مقاله از ۵ شبکه ۳۹، ۱۱۸، ۳۰۰ باس IEEE، ۱۴۵ باس ایالت آیوا و شبکه ۱۱۵۳ باس شرق ایران در شبیه سازی استفاده شده است. همچنین از ۴ روش پخش بار متوالی، روش تکراری کمترین باقیمانده تعمیم یافته، روش نیوتن-رافسون-سایدل کلاسیک و روش پخش بار هولومورفیک استاندارد برای مقایسه استفاده گردیده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهند که روش ارائه شده قابل قبول است.

کلیدواژه: توان انتقالی در دسترس، پخش بار هولومورفیک، پخش بار نیوتن، رافسون، سایدل، خط HVDC.

۱- مقدمه

۱-۱ اهمیت شبکه HVDC

از زمانی که رئیس جمهور چین، شی جین پینگ^۱ در شش سال پیش، ایده «اینترنت جهانی انرژی» را در سازمان ملل متحد مطرح کرد، چین تلاش می کند تا جهان را متقاعد نماید که ستون فقرات این شبکه یعنی خطوط جریان مستقیم با ولتاژ فوق العاده بالا (UHVDC) را بسازد. ولی تا کنون طرح گسترش این شبکه بین قاره ای شروع شده در پکن، به جایی نرسیده است. با این حال به نظر می رسد که آینده شبکه قدرت در حال چرخش به سمت ابر شبکه ها است [۱]؛ لذا حل مسائل شبکه قدرت، بدون در نظر گرفتن شبکه HVDC در آینده غیرممکن است. برای مرور اطلاعات پایه مدل سازی خطوط HVDC باید به فصل

این مقاله در تاریخ ۱۶ آبان ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۲۳ دی ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

مصطفی عیدانی، موسسه امنیت انرژی و انرژی پایدار، مشهد، ایران، (email: eidiani@ijesse.net)

4. Available Transfer Capability

5. Static ATC

6. Dynamic ATC

7. Continuation Power Flow

8. General Minimum Residual Method

9. Newton-Raphson

1. Newton-Raphson-Seidel 0

1. Down-Hill 1

1. Differential Evolution Algorithm 2

1. Xi Jinping

2. Global Energy Internet

3. Ultra-High-Voltage Direct Current

حل مسائل تعیین ATC مبتنی بر OPF و برای به حداکثر رساندن انتقال توان بین دو منطقه استفاده می‌شود [۲۳] و در ادامه، SCOPF مبتنی بر پایداری گذرا (TSCOPF) برای غلبه بر معایب SCOPF کلاسیک توسعه داده شده است [۲۴]. روش‌های داده‌محور مانند برآوردهای غیر پارامتری، امکان‌سنجی یک TSCOPF دقیق آنلاین را نشان می‌دهند. همچنین برای تعیین TTC تحت مجموعه‌ای از شرایط احتمالی، SCOPF مبتنی بر امنیت با سیگنال کوچک ارائه شده است [۲۵]. نتایج این روش جدید، محافظه‌کارتر از OPF و SCOPF سنتی است اما محاسبه آنها بیشتر طول می‌کشد.

مرجع [۲۶] یک روش جدید با آگاهی از ریسک با کمک جانشین SA[†] برای تعیین قابلیت انتقال کل (TTC) ارائه کرده که امکان احتمالی برخورد با پاسخ‌های ناقص را کاهش می‌دهد و علاوه بر آن، برنامه برآورد تخمین حالت (SE) را برای یافتن پارامترهای مورد نیاز پخش بار استفاده کرده است.

روش پخش بار هولومورفیک (HEPP[†]) [۲۷] برای انجام پخش بار، نیازی به حدس اولیه ندارد و این مزیت را دارد که در صورت وجود راه حل، پاسخ دقیق را بیابد. از این روش می‌توان در محاسبه ATC ایستا و پویا استفاده کرد. در [۲۸] نشان داده شده که روش پیشنهادی با چند اصلاح کوچک و ترکیب روش‌های قدیمی، سریع‌تر و دقیق‌تر ATC پویا را محاسبه می‌کند.

پخش بار دینامیکی (DPP[†]) یا پخش بار پویا (DELFP[†]) یک روش نوآورانه برای تبدیل مدل پخش بار به یک مدل پویای ساختگی است. DELFP به جای حل تکراری معادلات پخش بار در مجموعه‌ای از شرایط مشخص، کل تجزیه و تحلیل حوزه زمانی را در یک ساختار پویا حل می‌کند [۲۹] تا [۳۳]. در آخرین تلاش‌ها ابتدا یک الگوریتم تعیین ATC ایستا از طریق روشی به نام تقریب مسیر روش حداقل فاصله (AMD[†]) مشخص می‌شود [۳۲]. در این روش به جای تکرار پخش بار، تنها از سه نقطه عملکرد سیستم استفاده می‌شود. با اصلاح روش سطح مرزی انرژی پتانسیل، پایداری گذرا تعیین شده و با ترکیبی از روش‌های ایستا و پویا، یک رویکرد ترکیبی برای محاسبه ATC پویا ارائه شده است. این مقاله یک روش واقعاً مؤثر و دقیق برای ارزیابی ATC پویا با استفاده از پخش بار دینامیکی و با در نظر گرفتن اولین شرایط احتمالی $(n-1)$ ، پیشنهاد کرده است [۳۳].

مرجع [۳۴]، از پخش بار دینامیکی برای تعیین DATC با حضور یک خط HVDC استفاده کرده و در [۳۵] برتری روش هولوموفیک نسبت به روش NR کلاسیک نشان داده شده است. اگر مدل بار دقیق و ترکیبی از امپدانس ثابت (Z)، جریان ثابت (I) و توان ثابت (P) باشد، به آن مدل بار zip می‌گویند. مقاله [۳۶]، روش هولوموفیک را برای محاسبات پخش بار در حضور بارهای zip بررسی کرده است. بالاخره روش هولوموفیک برای ریزشکته‌های هیبریدی AC/DC جزیره‌ای به عنوان روش مناسبی برای پخش بار پیشنهاد شده است [۳۷].

در ادامه نوآوری و ساختار مقاله آمده است.

HOPF معرفی کرده است. در این مرجع، DATC برای معاملات چندجانبه با استفاده از روش جدید محاسبه شده که همان مشکل مرجع قبلی را دارد.

در سال‌های اخیر و با ظهور هوش مصنوعی (AI)، روش حل الگوریتم پخش بار بهینه (OPF) و به دنبال آن محاسبات ATC بهبود یافته است [۱۳]. برخی از روش‌های برجسته هوش مصنوعی برای بهبود محاسبه ATC عبارت هستند از الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) [۱۴]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) [۱۵]، الگوریتم زنبور عسل، بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)، الگوریتم جستجوی فاخته (CSA) [۱۶] و برنامه‌نویسی تکاملی [۱۳]. لازم به ذکر است که همه روش‌های هوش مصنوعی (AI) به داده‌های زیاد برای آموزش نیاز ندارند. مثلاً GA، الگوریتم زنبور عسل، PSO، GWO و CSA باید به عنوان یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری طبقه‌بندی شوند که نیازی به داده‌های آموزشی ندارد.

DATC همچنین با استفاده از دو روش محاسبه انرژی با پایداری گذرا، یعنی نقطه حداکثر انرژی پتانسیل (POMP) و تجزیه و تحلیل پایداری گذرای ترکیبی (CTSA) نیز محاسبه گردیده است [۱۷]. این روش‌ها سریع‌تر و دقیق‌تر از روش کلاسیک سطح مرزی انرژی پتانسیل (PEBS[†]) هستند. علاوه بر این با تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین برای پایداری ولتاژ و تعیین پایداری گذرا با روش نقطه حداکثر انرژی پتانسیل، DATC را می‌توان با سرعت و دقت قابل قبولی در یک شبکه ۱۴۵ شینه محاسبه کرد [۱۸].

روش رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) [۱۹] را می‌توان به محاسبه DATC اضافه نمود. این روش از PEBS معمولی برای محاسبه پایداری گذرا استفاده می‌کند. با تعیین الگوهای بار مختلف، [۲۰] یک روش تقریبی درجه دوم را برای تعیین نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده (CUEP) و در نتیجه تعیین حد پایداری گذرا معرفی می‌کند. این روش با در نظر گرفتن محدودیت‌های ولتاژ و تولید بر روی چندین شبکه آزمایش شده و نتایج مناسبی داشته است.

ورود منابع عظیم تجدیدپذیر به سیستم‌های قدرت، محاسبات سیستم را سخت‌تر نموده و ماهیت مشکلات را بیشتر احتمالاتی کرده است؛ بنابراین پخش بار احتمالی [۲۱] بر پخش بار معمولی ترجیح داده می‌شود. مرجع [۲۲] یک رویکرد احتمالی جدید را برای ارزیابی (ATC) به نام (PATC) با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار، توان باد و خروج خطوط انتقال پیشنهاد کرده است. مطالعات عددی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی می‌تواند ATC ایستا و توزیع احتمال آن را به طور دقیق محاسبه کند.

روش‌های پخش بار بهینه با محدودیت ایمنی (SCOPF[†]) معمولاً در

1. Artificial Intelligence
2. Artificial Neural Network
3. Particle Swarm Optimization
4. Grey Wolf Optimizer
5. Cuckoo Search Algorithm
6. Point of Maximum Potential Energy
7. Complex Transient Stability Analysis
8. Potential Energy Boundary Surface
9. Support Vector Regression
1. Controlling Unstable Equilibrium Point
1. Probabilistic Approach to Evaluate ATC
1. Security Constrained OPF 2

1. Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow

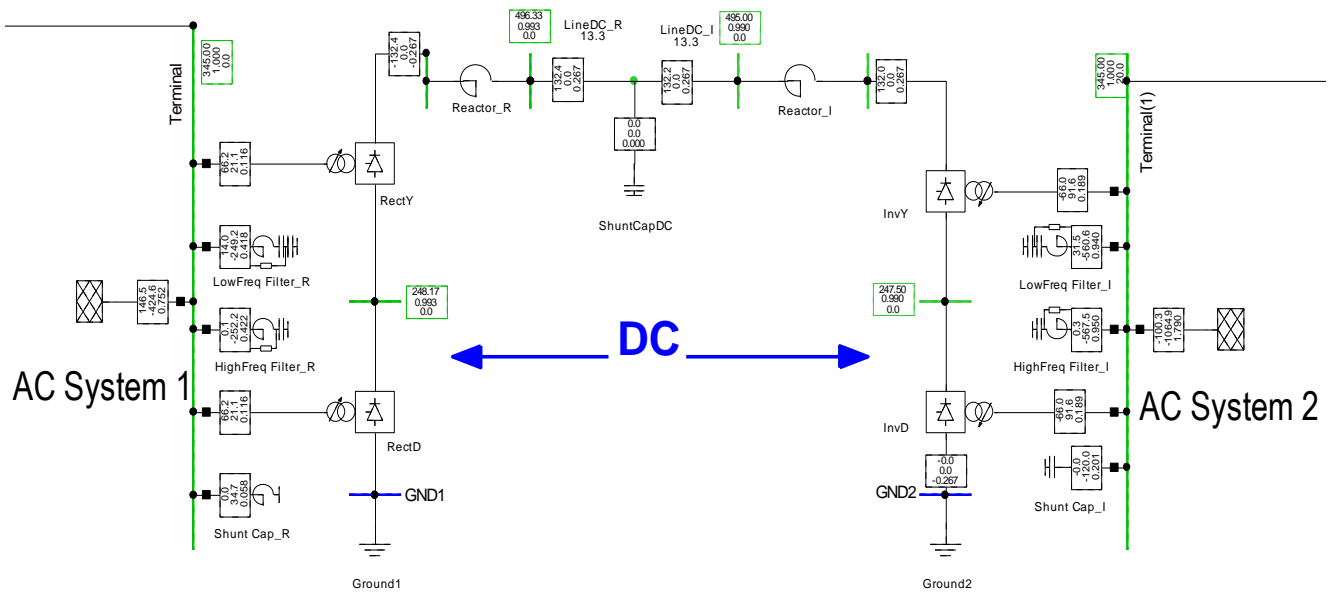
1. Surrogate-Assisted (SA) Risk-Aware Method

1. Holomorphic Embedding Power Flow Method

1. Dynamized Power Flow 6

1. Differential Equation Load Flow 7

1. Approximation of the Path of the Minimum Distance Method



شکل ۱: طرح کلی شبکه DC ۲ ترمیناله [۳۴].

AC/DC با روش سریع و دقیق NRS آمده و در بخش چهارم، الگوریتم تعیین ATC ایستا با روش هولومورفیک آورده شده است. در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی ارائه گردیده است. روش پیشنهادی بر روی سیستم‌های ۳۹، ۱۱۸، ۱۴۵، ۳۰۰ باس و شبکه انتقال شرق ایران با معاملات مختلف چندجانبه و دوطرفه آزمایش شده و نتیجه‌گیری و منابع در انتهای مقاله آمده است.

۲- مدل ریاضی شبکه AC/DC

شکل ۱، شبکه DC مورد استفاده در این مقاله را نشان می‌دهد. در دو طرف این خط DC (فرستنده و گیرنده)، فیلترهای فرکانس پایین^۱ و فرکانس بالا^۲؛ خازن‌های جبران‌کننده راکتیو^۳، راکتورهای هموارساز^۴ کانورتر، فیلتر DC^۵، رکتیفایر و اینورتر گردیده می‌شوند.

برای شبکه AC می‌توان معادلات را به صورت زیر خلاصه کرد

$$F(x) = \begin{bmatrix} P - P_p \\ Q - Q_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

که

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = P_{Gi} - P_{Di} + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) = P_i + jQ_i \quad (2)$$

$$f_{P_i}(V, \delta) = V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{j \neq i}^n V_j (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (3)$$

$$f_{Q_i}(V, \delta) = -V_i^2 B_{ii} + V_i \sum_{j \neq i}^n V_j (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (4)$$

1. LowFreq Filter (R,S)
2. HighFreq Filter (R,s)
3. Shunt Cap. (R,s)
4. Reactor (Smoothing) (R,S)
5. Shunt Cap. DC
6. Rectifier and Inverter

۳- نوآوری و ساختار مقاله

با بررسی روش‌های مختلف محاسبه ATC به این نتیجه می‌رسیم که این روش‌ها در آینده نه تنها به دقت و سرعت بیشتری نیاز دارند، بلکه باید ویژگی‌های زیر را نیز داشته باشند:

- ۱) محاسبه DATC باید به صورت آنلاین انجام شود.
- ۲) DATC باید شامل قراردادهای بین منطقه‌ای هم باشد.
- ۳) در آینده، هیچ سیستم قدرتی بدون تولید پراکنده (DG) و نیروگاه‌های تجدیدپذیر وجود نخواهد داشت؛ بنابراین روش‌های آینده باید بتوانند با وجود این نیروگاه‌ها، ATC را محاسبه کنند.
- ۴) با مدیریت داده‌ها باید کارایی روش‌های هوش مصنوعی افزایش یابد.
- ۵) در آینده، همه سیستم‌های متمرکز با سیستم‌های غیر متمرکز جایگزین می‌شوند و بنابراین روش‌های ATC آینده باید با این نوع سیستم‌ها کار کنند.

۶) استخوان‌بندی اصلی شبکه انتقال آینده، حتماً خطوط HVDC است و باید در محاسبات آینده ATC، مدل‌های مختلف خطوط HVDC لحاظ شده باشد.

تأکید این مقاله بر گزینه ۶ توصیه‌های بالا است. به طور خلاصه ویژگی‌های بارز این مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- روش پیشنهادی، توانایی تعیین ATC ایستا را با وجود مزایای بادی در مقیاس بزرگ دارد.
 - روش پیشنهادی از سرعت، دقت و استحکام بالایی برخوردار است.
 - روش پیشنهادی از چهار روش بهبودیافته استفاده کرده و آنها را با هم ترکیب می‌کند.
 - روش پیشنهادی برای چهار شبکه استاندارد و یک شبکه واقعی، نتایج قابل قبولی را به همراه داشته است.
 - روش پیشنهادی در ترکیب روش‌های NRS، DH، HEPF و روش معکوس ماتریس با خط انتقال HVDC برای بهبود محاسبات پخش بار و تعیین ATC ایستا پیشگام بوده است.
- بخش دوم، مدل ریاضی شبکه HVDC و نحوه ترکیب معادلات آن را با شبکه AC نشان می‌دهد. در بخش سوم، نحوه حل معادله پخش بار

این روش از مراحل حدس و تصحیح مانند روش CPF استفاده نمی‌کند. ماتریس ژاکوبین در این روش بزرگتر از روش NR معمولی است ولی مشکل واگرایی در گره زمین در آن حذف گردیده است. با استفاده از این روش می‌توان قسمت زیر منحنی ولتاژ- توان (P-V) را نیز به دست آورد. این روش هم برای شبکه‌های توزیع و هم شبکه‌های انتقال کاربرد دارد [۱۰] و [۲۸].

در مقاله حاضر، این معادلات برای شبکه AC/DC به صورت زیر تغییر می‌کند

$$\Xi(\xi) = \begin{bmatrix} (J - \lambda * I) * v \\ \|v\| - 1 \\ F(X) - y - p * \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\xi = \begin{bmatrix} X \\ v \\ \alpha \end{bmatrix}$$

و برای حل به مشتق معادله بالا نیاز است

$$\Xi_{\xi}(\xi) = \frac{\partial \Xi(\xi)}{\partial \xi} = \begin{bmatrix} \Xi_{\xi_{11}} & \Xi_{\xi_{12}} \\ \Xi_{\xi_{21}} & \Xi_{\xi_{22}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Xi_{\xi_{11}} = \frac{\partial^T F}{\partial X^T} * \text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (10)$$

$$\Xi_{\xi_{12}} = \begin{bmatrix} J - \lambda * I & \cdot \\ v' & \cdot \\ \|v\| & \cdot \end{bmatrix}$$

$$\Xi_{\xi_{21}} = \frac{\partial F}{\partial X} \quad (11)$$

$$\Xi_{\xi_{22}} = [0 \quad -p]$$

در این قسمت می‌توان از روش DH برای افزایش سرعت همگرایی نیز استفاده کرد [۱۰]

$$\xi^{r+1} = \xi^r - D_h \times \text{inv}([\Xi_{\xi}(\xi^r)]) \Xi(\xi^r) \quad (12)$$

که D_h ضریب همگرایی این روش است. این روش از $D_h = 1$ شروع می‌کند. اگر $\|\Xi(\xi^r)\| \leq \|\Xi(\xi^{r+1})\|$ ، آن گاه مقدار D_h نصف شده و مقدار جدید متغیر محاسبه می‌گردد. این کار تا $\|\Xi(\xi^r)\| \geq \|\Xi(\xi^{r+1})\|$ ادامه پیدا می‌کند و حداقل مقدار D_h نیز مشخص است ($\epsilon_{D_h} \leq D_h$).

همچنین قابل توجه است که زمان محاسبه معکوس ماتریس ژاکوبین با افزایش ابعاد آن به صورت نمایی افزایش می‌یابد. می‌توان ثابت کرد که به جای معکوس کردن مستقیم ماتریس ژاکوبین اصلی شبکه AC/DC با وارونه کردن زیر ماتریس آن، زمان محاسبه معکوس ماتریس ژاکوبین به میزانی قابل توجه کاهش می‌یابد؛ همچنین این روش معکوس از روش‌های دیگری مثل جداسازی LU هم سریع‌تر است. اگر ماتریس (۹) و (۱۰) معکوس داشته باشند آن گاه می‌توان معکوس ماتریس ژاکوبین اصلی را به صورت زیر محاسبه کرد

$$\text{inv}([\Xi_{\xi}(\xi)]) = \begin{bmatrix} \Xi_{\xi_{11}}^{-1} + \Xi_{\xi_{11}}^{-1} \Xi_{\xi_{12}} \Xi_Z \Xi_{\xi_{21}} \Xi_{\xi_{11}}^{-1} & -\Xi_{\xi_{11}}^{-1} \Xi_{\xi_{12}} \Xi_Z \\ -\Xi_Z \Xi_{\xi_{21}} \Xi_{\xi_{11}}^{-1} & \Xi_Z \end{bmatrix} \quad (13)$$

که

$$\Xi_Z = \text{inv}(\Xi_{\xi_{22}} - \Xi_{\xi_{21}} \Xi_{\xi_{11}}^{-1} \Xi_{\xi_{12}}) \quad (14)$$

که P_{Gi}, Q_{Gi} توان تولیدی و خروجی ژنراتور، P_{Di}, Q_{Di} توان مصرفی بار، P_i, Q_i توان تزریقی به باس i ، G_{ij}, B_{ij} کدوکتانس و سوسپیتانس خط ij ، δ_i زاویه ولتاژ بین باس i و n تعداد باس شبکه AC تعریف می‌شود. حال اگر یک خط HVDC بین باس i و j متصل گردد، معادله پخش بار (۱) به (۵) تغییر می‌کند [۵]

$$\Delta P_i = P_i - f_{P_i} - V_{dk} I_{dk} \text{sign}(i) = \cdot \quad (5)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - f_{Q_i} - V_{dk} I_{dk} \tan \varphi_k = \cdot$$

که V_{dk} ولتاژ خط DC، I_{dk} جریان خط DC و φ_k زاویه ضریب قدرت است. هر دو رکتیفایر و اینورتر، توان رکتیو مصرف می‌کنند. رکتیفایر، توان اکتیو مصرف می‌کند؛ پس $\text{sign}(i) = 1$ و اینورتر، توان اکتیو را تأمین می‌کند؛ پس $\text{sign}(i) = -1$.

حال می‌توان معادلات شبکه DC را به صورت (۶) خلاصه کرد [۵]. $\Delta d_{rk}, \Delta d_{vk}$ معادلات ولتاژ کانورتر، $\Delta d_{rk}, \Delta d_{vk}$ معادلات شبکه DC و $\Delta d_{rk}, \Delta d_{vk}$ معادلات کنترل است. k_{Tk} نسبت ترانسفورماتور کانورتر، θ_{dk} زاویه کنترل کانورتر، φ_k زاویه ضریب قدرت کانورتر k و X_{ck} راکتانس معادل ترانسفورماتور k است. g_{dkj} عنصر متناظر ماتریس کدوکتانس شبکه، k_{γ} ضریب جابه‌جاگر و n_c مجموعه باس‌های DC تعریف می‌شود [۵]

$$\begin{cases} \Delta d_{vk} = V_{dk} - k_{Tk} V_i \cos \theta_{dk} + X_{ck} I_{dk} \\ \Delta d_{rk} = V_{dk} - k_{\gamma} k_{Tk} V_i \cos \varphi_k \\ \Delta d_{rk} = \text{sign}(k) I_{dk} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{dkj} V_{dj} \quad , k = 1 : n_c \\ \Delta d_{rk} = d_{rk}(I_{dk}, V_{dk}, \cos \theta_{dk}, k_{Tk}) \\ \Delta d_{bk} = d_{bk}(I_{dk}, V_{dk}, \cos \theta_{dk}, k_{Tk}) \end{cases} \quad (6)$$

محدودیت‌های عمومی شبکه AC و DC را می‌توان به صورت محدودیت ماکسیمم و مینیمم متغیرهای $I_i, V_i, P_{Gi}, Q_{Gi}, I_{dk}, V_{dk}$ اعمال کرد. اکنون می‌توان معادلات یکپارچه پخش بار شبکه AC/DC را حل نمود. چنانچه $X_{AC} = [\delta, V]$ متغیرهای شبکه AC، $X_{DC} = [V_{dk}, I_{dk}, \theta_{dk}, k_{Tk}, \varphi_k]$ متغیرهای شبکه DC و $X = [X_{AC}, X_{DC}]$ متغیر اصلی معادله پخش بار یکپارچه باشد، مشابه معادلات پخش بار AC می‌توان معادلات پخش بار شبکه AC/DC را به صورت (۷) مدل کرد

$$\begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} & J_{PX_{DC}} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} & J_{QX_{DC}} \\ J_{d\theta} & J_{dV} & J_{dX_{DC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta X_{DC} \end{bmatrix} \quad (7)$$

که در آن ΔF تغییرات توابع توان در شبکه AC و DC، J ماتریس ژاکوبین کل و ΔX تغییرات متغیرهای شبکه AC و DC است. حال می‌توان معادله (۷) را با پخش بار معمولی NR حل کرد؛ ولی در این مقاله از روش NRS استفاده می‌گردد که در بخش بعدی در محاسبه ATC ایستا بیان شده است.

۳- حل معادله پخش بار AC/DC

برای حل معادله پخش بار از روش NRS استفاده می‌شود [۱۰] و [۲۸] که مزیت اصلی این روش، عدم واگرایی در نقطه مرز پایداری ولتاژ است.

جدول ۱: قراردادهای دوجانبه و چندجانبه در شبکه‌های مختلف برای محاسبه ATC ایستا.

شبکه	قرارداد	خرید	فروش	شبکه	قرارداد	خرید	فروش
	۱۱	۳۰	۳		۲۱	۸۹	۷۵
-۱	۱۲	۳۰	۴	-۲	۲۲	۸۹	۸۳
۳۹ باس IEEE	۱۳	۳۰	۷	۱۱۸ باس IEEE	۲۳	۸۹	۲۳
	۱۴	۳۰-۳۱	۱۸-۲۰		۲۴	۸۹-۸۷	۲۳-۸۳
	۳۱	۹۱	۲۷		۴۱	۱۳۲	۱۲
-۳	۳۲	۱۰۸	۲۵	-۴	۴۲	۱۳۹	۲۳
۱۴۵ باس ایالت آیوا	۳۳	۱۴۹	۱۰۹	۳۰۰ باس IEEE	۴۳	۱۴۲	۵۴
	۳۴	۲۰-۶۳	۷۰۰۳-۷۰۰۲		۴۴	۱۴۱-۱۴۳	۳۴-۳۵
شبکه	قرارداد	خرید	فروش	شبکه	قرارداد	خرید	فروش
-۵	۵۱	F۴۰۰	F۱۳۲	-۵	۵۳	T۴۰۰	D۱۳۲
شبکه ۱۱۵۳ باس شرق ایران	۵۲	SH۴۰۰	B۱۳۲		۵۴	T۴۰۰، F۴۰۰	S۱۳۲، B۱۳۲

۶) اگر تمام رخدادهای در نظر گرفته شده است، مرحله بعد وگرنه مرحله ۳ تکرار شود.

۷) اگر تمام قراردادهای بررسی شده است، مرحله بعد وگرنه مرحله ۲ تکرار شود.

در ادامه، الگوریتم فوق برای مثال‌های مختلف، بررسی و با روش‌های دیگر هم مقایسه گردیده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در مقاله حاضر از ۵ شبکه زیر برای مقایسه روش‌های مختلف استفاده شده است: (۱) شبکه ۳۹ باس IEEE [۳۸]، (۲) ۱۱۸ باس IEEE [۳۸]، (۳) ۳۰۰ باس IEEE [۳۸]، (۴) شبکه ایالتی آیوا (۱۴۵ باس) [۱۸] و (۵) شبکه فشرده شرق ایران با ۱۱۵۳ باس. همچنین ۵ روش مختلف برای مقایسه انتخاب شده‌اند: (۱) روش پخش بار متوالی (CPF) استاندارد [۶]، (۲) روش CPF ترکیبی با GMRES [۹]، (۳) روش NRS استاندارد [۱۰]، (۴) روش پخش بار هولومورفیک (HEPF) استاندارد [۲۷] و (۵) روش پیشنهادی در این مقاله.

به منظور مقایسه بهتر برای هر شبکه، هم قرارداد دوجانبه و هم قرارداد چندجانبه در نظر گرفته شده است (جدول ۱). همچنین در بزرگ‌ترین شبکه (شبکه ۵)، در دو حالت با و بدون خط HVDC هم این روش با روش دقیق مقایسه گردیده است. برای مقایسه زمان محاسبات از پارامتر سرعت نسبی محاسبات (RSC) مانند (۱۷) استفاده شده است. در (۱۷) تا (۱۹)، i شماره روش محاسباتی (۵ روش)، j شماره شبکه مورد مطالعه (۵ شبکه) و k شماره قرارداد (۴ قرارداد) است

$$RSC_{ijk} = \frac{CTM(i) - CTM_5}{CTM(i)} \times 100 \quad (17)$$

$CTM = \text{Calculation time of Method}$

همچنین مقدار خطای هر روش با روش دقیق و کند پخش بار متوالی استاندارد مانند (۱۸) مقایسه گردیده و برای مقایسه دقیق‌تر خطا از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مانند (۱۹) برای ۴ قرارداد در هر شبکه استفاده شده است

$$Er_{ijk} = \left| \frac{ATC_{Method(i)} - ATC_{Method(j)}}{ATC_{Method(i)}} \times 100 \right| \quad (18)$$

1. Relative Speed of Calculations
2. Root Mean Square Error

اثبات معکوس (۱۳) در پیوست و الگوریتم تعیین ATC ایستا در بخش بعدی آمده است.

۴- الگوریتم تعیین ATC ایستا با روش هولومورفیک

روش‌های تکراری مانند NR و NRS به حدس اولیه نیاز دارند. روش‌های زیادی برای بهترین حدس اولیه وجود دارد و در این مقاله از روش HEPF [۲۷] استفاده شده است. این روش برای انجام پخش بار، نیازی به حدس اولیه ندارد و این مزیت را دارد که در صورت وجود راه حل، پاسخ دقیق را بیابد. ثابت شده که از این روش می‌توان در محاسبه ATC ایستا و پویا استفاده کرد [۲۷] و [۲۸]. در این قسمت به طور خلاصه ایده اصلی این روش آمده است. ابتدا هر متغیری مانند (۱۵) به صورت تابعی از متغیر دیگری به نام s تعریف می‌شوند

$$\begin{aligned} V_i(s) &= sV_i \\ P_i(s) &= sP_i \\ Q_i(s) &= sQ_i \end{aligned} \quad (15)$$

سپس این متغیرها مانند (۱۶) به فرم یک سری نامتناهی تبدیل می‌گردند

$$X(s) = \sum_{n=0}^{\infty} X[n](s)^n \quad (16)$$

حال این متغیرهای بسط داده شده در معادله پخش بار قرار داده می‌شوند. با مقایسه ضرایب توان‌های مساوی s^0, s^1, s^2, \dots در دو طرف معادله، به معادلات جدیدی به نام پخش بار هولومورفیک می‌رسیم. ویژگی اصلی تکنیک HEPF شامل یک روش غیر تکراری و استقلال راه حل HEPF در حدس اولیه با استفاده از یک ماتریس تکرار ثابت برای محاسبه ضرایب می‌باشد که این ویژگی، کاربرد این روش را برای یک محاسبه دقیق و سریع ATC مناسب کرده است. برای جزئیات بیشتر به [۲۷] و [۲۸] مراجعه نمایید.

در این قسمت می‌توان الگوریتم روش ارائه شده در این مقاله را به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱) ورود اطلاعات کامل شبکه
- ۲) انتخاب یک قرارداد و تعیین فروشنده و خریدار
- ۳) انتخاب یک رخداد از بین $n-1$ رخداد، خروج خط، ژنراتور یا ترانسفورماتور
- ۴) اجرای پخش بار HEPF برای تعیین بهترین نقطه شروع پخش بار
- ۵) اجرای پخش بار NRS با و بدون خط HVDC و تعیین ATC ایستا در این حالت

جدول ۲: محاسبات ATC ایستا (SATC)، مقایسه زمان محاسبات (RSC)، مقایسه خطای محاسباتی (ER) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای قراردادهای دوجانبه و چندجانبه برای شبکه ۳۹ باس IEEE.

SATC/RSC	روش	RMSE _{ij} /RSC _{ij} Mean	قرارداد ۱۱		قرارداد ۱۲		قرارداد ۱۳		قرارداد ۱۴	
			ATC	Er ₁₁	ATC	Er ₁₂	ATC	Er ₁₃	ATC	Er ₁₄
SATC (p.u)	۱) Standard CPF [۶]	۰/۰	۱/۶۹۶	۰/۰	۱/۰۳۸	۰/۰	۰/۸۱۸	۰/۰	۰/۶۶۰	۰/۰
	۲) CPF-GMRES [۹]	۰/۱۷۳	۱/۶۹۷	۰/۰۶	۱/۰۴۰	۰/۱۹	۰/۸۲۰	۰/۲۴	۰/۶۶۱	۰/۱۵
	۳) Standard NRS [۱۰]	۰/۱۸۴	۱/۶۹۴	۰/۱۲	۱/۰۳۷	۰/۱۰	۰/۸۱۷	۰/۱۲	۰/۶۵۸	۰/۳۱
	۴) HEPF [۲۷]	۰/۱۷۶	۱/۶۹۵	۰/۰۶	۱/۰۳۷	۰/۱۰	۰/۸۱۹	۰/۱۲	۰/۶۵۸	۰/۳۱
	۵) Proposed method	۰/۰	۱/۶۹۶	۰/۰	۱/۰۳۸	۰/۰	۰/۸۱۸	۰/۰	۰/۶۶۰	۰/۰
RSC _{ijk} (%)	RSC ₁₁ Mean	۷۰/۲۶	۶۸ RSC ₁₁ = ۱/۸۹	۷۱ RSC ₁₂ = ۱/۴۱	۶۶ RSC ₁₃ = ۱/۳۲	۷۴ RSC ₁₄ = ۱/۴۱				
	RSC ₂₁ Mean	۶۱/۳۹	۶۲ RSC ₂₁ = ۱/۹۲	۶۱ RSC ₂₂ = ۱/۱۸	۵۹ RSC ₂₃ = ۱/۳۰	۶۲ RSC ₂₄ = ۱/۱۵				
	RSC ₃₁ Mean	۵۲/۷۵	۵۵ RSC ₃₁ = ۱/۷۵	۵۱ RSC ₃₂ = ۱/۳۰	۵۳ RSC ₃₃ = ۱/۱۹	۵۰ RSC ₃₄ = ۱/۷۰				
	RSC ₄₁ Mean	۱۹/۵۸	۲۲ RSC ₄₁ = ۱/۱۴	۱۷ RSC ₄₂ = ۱/۳۷	۲۰ RSC ₄₃ = ۱/۲۵	۱۹ RSC ₄₄ = ۱/۵۱				

جدول ۳: محاسبات ATC ایستا (SATC)، مقایسه زمان محاسبات (RSC)، مقایسه خطای محاسباتی (ER) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای قراردادهای دوجانبه و چندجانبه برای شبکه ۱۱۸ باس IEEE.

SATC/RSC	روش	RMSE _{ij} /RSC _{ij} Mean	قرارداد ۲۱		قرارداد ۲۲		قرارداد ۲۳		قرارداد ۲۴	
			ATC	Er ₂₁	ATC	Er ₂₂	ATC	Er ₂₃	ATC	Er ₂₄
SATC (p.u)	۱) Standard CPF [۶]	۰/۰	۴/۲۸۸	۰/۰	۴/۱۲۲	۰/۰	۴/۰۴۶	۰/۰	۳/۵۱۰	۰/۰
	۲) CPF-GMRES [۹]	۰/۴۸۶	۴/۳۰۹	۰/۴۸۷	۴/۱۱۷	۰/۱۲۱	۴/۰۶۵	۰/۴۶۷	۳/۴۸۶	۰/۶۸۸
	۳) Standard NRS [۱۰]	۰/۲۰۶	۴/۲۸۷	۰/۰۲۳	۴/۱۰۹	۰/۳۱۶	۴/۰۵۳	۰/۱۷۳	۳/۵۰۳	۰/۲۰۰
	۴) HEPF [۲۷]	۰/۰۴۶	۴/۲۸۷	۰/۰۲۳	۴/۱۲۴	۰/۰۴۸	۴/۰۴۴	۰/۰۴۹	۳/۵۰۸	۰/۰۵۷
	۵) Proposed method	۰/۰۱۲	۴/۲۸۸	۰/۰	۴/۱۲۱	۰/۰۲۴	۴/۰۴۶	۰/۰	۳/۵۱۰	۰/۰
RSC _{ijk} (%)	RSC ₁₂ Mean	۹۷/۲۵	۹۶/۸۵	۹۴/۴۳	۹۷/۷۷	۹۸/۶۵				
	RSC ₂₂ Mean	۹۰/۸۱	۹۷/۰۱	۸۳/۷۸	۸۹/۴۴	۹۳/۳۸				
	RSC ₃₂ Mean	۷۸/۳۶	۸۵/۹۴	۷۵/۷۴	۷۵/۸۳	۷۵/۵۱				
	RSC ₄₂ Mean	۲۲/۵۶	۲۱/۰۸	۲۳/۹۰	۲۵/۵۱	۲۱/۶۰				

جدول ۴: محاسبات ATC ایستا (SATC)، مقایسه زمان محاسبات (RSC)، مقایسه خطای محاسباتی (ER) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای قراردادهای دوجانبه و چندجانبه برای شبکه ۳۰۰ باس IEEE.

SATC/RSC	روش	RMSE _{ij} /RSC _{ij} Mean	قرارداد ۳۱		قرارداد ۳۲		قرارداد ۳۳		قرارداد ۳۴	
			ATC	Er ₃₁	ATC	Er ₃₂	ATC	Er ₃₃	ATC	Er ₃₄
SATC (p.u)	۱) Standard CPF [۶]	۰/۰	۱/۱۱۶	۰/۰	۰/۹۰۲	۰/۰	۰/۵۶۱	۰/۰	۰/۴۲۷	۰/۰
	۲) CPF-GMRES [۹]	۲/۰۳۹	۱/۱۰۴	۱/۰۸۷	۰/۹۱۹	۱/۸۵۰	۰/۵۵۱	۱/۸۱۵	۰/۴۴۰	۲/۹۵۵
	۳) Standard NRS [۱۰]	۰/۵۰۳	۱/۱۲۲	۰/۵۳۵	۰/۸۹۹	۰/۳۳۴	۰/۵۵۹	۰/۳۵۸	۰/۴۳۰	۰/۶۹۸
	۴) HEPF [۲۷]	۰/۲۳۸	۱/۱۱۴	۰/۱۸۰	۰/۹۰۰	۰/۲۲۲	۰/۵۶۰	۰/۱۷۹	۰/۴۲۶	۰/۳۳۵
	۵) Proposed method	۰/۰۷۱	۱/۱۱۷	۰/۰۹۰	۰/۹۰۳	۰/۱۱۱	۰/۵۶۱	۰/۰	۰/۴۲۷	۰/۰
RSC _{ijk} (%)	RSC ₁₃ Mean	۸۹/۵۶	۹۲/۵۵	۸۷/۴۰	۸۸/۸۶	۸۹/۵۳				
	RSC ₂₃ Mean	۸۶/۸۰	۹۵/۷۷	۷۶/۵۴	۸۵/۳۳	۸۹/۷۸				
	RSC ₃₃ Mean	۷۱/۰۶	۷۳/۵۷	۷۵/۲۵	۷۱/۴۰	۶۴/۰۶				
	RSC ₄₃ Mean	۲۸/۲۲	۳۱/۳۸	۲۶/۵۲	۲۲/۷۹	۳۱/۸۷				

خطای محاسبات آن بین ۰ تا ۰/۱ درصد می‌باشد که از بقیه روش‌های مدل شده در این مقاله کمتر است و هرچه ابعاد شبکه بزرگ‌تر شود، دقت و سرعت روش پیشنهادی، نتیجه بهتری نسبت به دیگر روش‌ها از خود نشان می‌دهد.

همچنین در مقایسه جدول ۶ با جدول ۷ دیده می‌شود که اولاً با اضافه شدن خط انتقال HVDC بین ۴۰ تا ۶۰ درصد انتقال توان افزایش یافته، ثانیاً دقت محاسبات روش بسیار بیشتر شده و از آنجا که امکان مدل‌سازی خط HVDC در دیگر روش‌ها وجود ندارد، سرعت این روش در حالت وجود HVDC مقایسه نشده است. ولی توانایی این روش در

$$RMSE_{ij} = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (Er_{ijk})^2} \quad (19)$$

خلاصه محاسبات و مقایسه این روش‌ها در جدول‌های ۲ تا ۶ آمده است. در این جدول‌ها محاسبات ATC ایستا (SATC)، مقایسه زمان محاسبات (RSC)، مقایسه خطای محاسباتی (Er) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای قراردادهای دوجانبه و چندجانبه برای شبکه‌های ۳۹، ۱۱۸، ۳۰۰ باس IEEE، ۱۴۵ باس ایالت آیوا و شبکه ۱۱۵۳ باس شرق ایران نشان داده شده است. این جدول‌ها نشان می‌دهند که روش پیشنهادی بین ۲۰ تا ۹۰ درصد در زمان محاسبات صرفه‌جویی کرده و

جدول ۵: محاسبات ATC ایستا (SATC)، مقایسه زمان محاسبات (RSC)، مقایسه خطای محاسباتی (ER) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای قراردادهای دوجانبه و چندجانبه برای شبکه ۱۴۵ باس ایالت آیوا.

SATC/RSC	روش	RMSE _{۱۴۴} /RSC _{۱۴۴Mean}	قرارداد ۴۱		قرارداد ۴۱		قرارداد ۴۳		قرارداد ۴۴	
			ATC	Er _{۱۴۱}	ATC	Er _{۱۴۲}	ATC	Er _{۱۴۳}	ATC	Er _{۱۴۴}
SATC (p.u)	۱) Standard CPF [۶]	۰/۰	۴,۲۰۹	۰/۰	۵,۶۵۸	۰/۰	۶,۱۷۹	۰/۰	۶,۲۱۰	۰/۰
	۲) CPF-GMRES [۹]	۰/۰۲۸۲	۴,۲۱۶	۰/۰۱۶۶	۵,۶۴۳	۰/۰۲۶۶	۶,۱۵۹	۰/۰۳۲۵	۶,۱۸۹	۰/۰۳۳۹
	۳) Standard NRS [۱۰]	۰/۰۱۷۷	۴,۲۰۸	۰/۰۰۲۴	۵,۶۴۴	۰/۰۲۴۸	۶,۱۶۸	۰/۰۱۷۸	۶,۲۲۱	۰/۰۱۷۷
	۴) HEPF [۲۷]	۰/۰۳۷	۴,۲۰۷	۰/۰۰۴۸	۵,۶۵۵	۰/۰۰۵۳	۶,۱۷۹	۰/۰	۶,۲۱۱	۰/۰۱۶
	۵) Proposed method	۰/۰۱۹	۴,۲۱۰	۰/۰۰۳۴	۵,۶۵۹	۰/۰۰۱۸	۶,۱۷۹	۰/۰	۶,۲۱۰	۰/۰
RSC _{۱۴۴k} (%)	RSC _{۱۴۴Mean}	۹۴/۷۹	۹۵,۸۷		۹۳,۲۷		۹۵,۰۱		۹۴,۸۱	
	RSC _{۲۴Mean}	۹۰/۰۷	۹۷,۵۸		۸۴,۸۹		۸۸,۵۶		۸۸,۷۲	
	RSC _{۳۴Mean}	۷۴/۰۷	۸۱,۰۵		۷۹,۰۲		۷۳,۰۹		۶۳,۲۲	
	RSC _{۴۴Mean}	۲۵/۰۷	۲۷,۰۲		۲۵,۲۴		۲۱,۶۲		۲۶,۴۴	

جدول ۶: محاسبات ATC ایستا (SATC)، مقایسه زمان محاسبات (RSC)، مقایسه خطای محاسباتی (ER) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای قراردادهای دوجانبه و چندجانبه برای شبکه ۱۱۵۳ باس شبکه شرق ایران.

SATC/RSC	روش	RMSE _{۱۵۵} /RSC _{۱۵۵Mean}	قرارداد ۵۱		قرارداد ۵۱		قرارداد ۵۳		قرارداد ۵۴	
			ATC	Er _{۱۵۱}	ATC	Er _{۱۵۲}	ATC	Er _{۱۵۳}	ATC	Er _{۱۵۴}
SATC (p.u)	۱) Standard CPF [۶]	۰/۰	۱,۱۶۴	۰/۰	۱,۱۸۸	۰/۰	۰/۷۱۱	۰/۰	۰/۷۶۱	۰/۰
	۲) CPF-GMRES [۹]	۳,۵۹۳	۱,۱۴۳	۱,۸۳۷	۱,۲۲۲	۲,۷۸۲	۰/۶۸۴	۳,۹۴۷	۰/۸۰۱	۴,۹۹۴
	۳) Standard NRS [۱۰]	۲,۷۱۰	۱,۱۸۱	۱,۴۳۹	۱,۱۶۶	۱,۸۸۷	۰/۶۸۹	۳,۱۹۵	۰/۷۳۴	۳,۶۷۸
	۴) HEPF [۲۷]	۰/۲۳۷	۱,۱۶۲	۰/۰۱۷۲	۱,۱۹۰	۰/۰۱۶۸	۰/۷۱۳	۰/۲۸۱	۰/۷۵۹	۰/۲۶۴
	۵) Proposed method	۰/۰۱۳۶	۱,۱۶۲	۰/۰۱۷۲	۱,۱۸۷	۰/۰۰۸۴	۰/۷۱۰	۰/۱۴۱	۰/۷۶۰	۰/۱۳۲
RSC _{۱۵۵k} (%)	RSC _{۱۵۵Mean}	۷۹/۲۲	۸۱,۲۶		۷۹,۴۹		۷۹,۵۰		۷۶,۶۴	
	RSC _{۲۵Mean}	۷۸/۲۷	۷۸,۱۹		۸۳,۶۶		۸۰,۵۲		۷۰,۷۳	
	RSC _{۳۵Mean}	۶۱/۶۳	۶۶,۸۲		۵۰,۲۲		۶۹,۶۵		۵۹,۸۱	
	RSC _{۴۵Mean}	۳۵/۴۴	۲۸,۵۱		۲۷,۷۶		۳۷,۰۳		۴۸,۴۸	

جدول ۷: محاسبات ATC ایستا (SATC) برای شبکه ۱۱۵۳ باس شبکه شرق ایران با حضور خط HVDC.

SATC/RSC	روش	RMSE _{۱۵۵} /RSC _{۱۵۵Mean}	قرارداد ۵۱		قرارداد ۵۱		قرارداد ۵۳		قرارداد ۵۴	
			ATC	Er _{۱۵۱}	ATC	Er _{۱۵۲}	ATC	Er _{۱۵۳}	ATC	Er _{۱۵۴}
SATC (p.u)	۱) Standard CPF [۶]	۰/۰	۱,۹۰۴	۰/۰	۱,۸۳۸	۰/۰	۰/۹۲۸	۰/۰	۱,۲۲۱	۰/۰
	۵) Proposed method	۰/۰۰۷۹	۱,۹۰۳	۰/۰۰۵۳	۱,۸۳۷	۰/۰۰۵۴	۰/۹۲۸	۰/۰	۱,۲۲۰	۰/۰۰۸۲

ترکیب روش‌های تعیین پایداری گذرا با روش تعیین ATC ایستای این مقاله، توان انتقال واقعی شبکه را محاسبه کرد.

حالت بدون خط انتقال HVDC در جدول‌های ۲ تا ۶ نشان داده شده است که توانایی روش پیشنهادی را اثبات می‌کند.

پیوست

اگر ماتریس $A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ و a معکوس‌پذیر باشد، آن گاه ثابت

می‌شود که معکوس ماتریس A به صورت زیر قابل محاسبه است [۳۴]

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} a^{-1} + a^{-1}bz^{-1}ca^{-1} & -a^{-1}bz^{-1} \\ -z^{-1}ca^{-1} & z^{-1} \end{bmatrix} \quad (پ-۱)$$

$$z = (d - ca^{-1}b)$$

دقت شود که به جای معکوس کردن ماتریس A به ابعاد n فقط کافی است که دو ماتریس a و z معکوس شوند. فرض کنید که ابعاد ماتریس A ، ۲۰۰۰ و ابعاد دو ماتریس a و z ، ۱۰۰۰ باشد. ثابت می‌شود اگر زمان متوسط معکوس ماتریس A δ ثانیه باشد، زمان معکوس ماتریس a $۰/۵$ ثانیه است. لذا استفاده از (پ-۱)، δ برابر سریع‌تر از معکوس مستقیم است و هرچه ابعاد شبکه بیشتر شود، این نسبت به صورت نمایی

۶- نتیجه گیری

اضافه شدن خطوط HVDC به تمام شبکه‌های انتقال در آینده نزدیک، امری اجتناب‌ناپذیر است و لذا روش‌های محاسبات انتقال توان باید بتوانند با وجود پیچیده‌تر شدن محاسبات، این شبکه‌های انتقال را تجزیه و تحلیل کنند. در مقاله حاضر با اضافه شدن معادلات شبکه DC به شبکه AC و ترکیب آن با معادلات پخش بار NRS، ابعاد ماتریس ژاکوبین شبکه افزایش یافته است؛ لذا با استفاده از روش جدید معکوس ماتریس ژاکوبین توسعه یافته، سرعت محاسبه پخش بار شبکه افزایش داده شد. سپس برای شروع بهتر از پخش بار هولوموفیک استفاده گردید که با تعیین نقطه مناسب حدس اولیه، سرعت همگرایی پخش بار NRS افزایش یافت. در این مقاله نشان داده شد که سرعت و دقت روش جدید نسبت به روش‌های دیگر بسیار مناسب است. این روش می‌تواند هم در شبکه‌های کوچک و هم در شبکه‌های بزرگ، محاسبات انتقال توان را انجام دهد. چالش بعدی استفاده از این روش برای تعیین ATC پویا است که باید با

- [4] H. Zhang and S. Wang, "A distributed dynamic power flow algorithm for an interconnected system containing two-terminal LCC-HVDC tie-line," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 28673-28683, 2021.
- [5] W. Sicheng and G. Shan, "Available transfer capability analysis method of AC-DC power system based on security region," *J. of Engineering IET*, vol. 2019, no. 16, pp. 2386-2390, Mar. 2019.
- [۶] م. عیدیانی، "یافته‌های گذشته و مسیرهای آینده روش‌های تعیین قابلیت انتقال توان در دسترس، بخش اول، مفاهیم و روش‌های ایستا،" فصل‌نامه عصر برق، انجمن برق و الکترونیک ایران، شاخه خراسان، شماره ۱۵، صص. ۴۹-۴۱، تابستان ۱۴۰۰.
- [۷] م. عیدیانی، "یافته‌های گذشته و مسیرهای آینده روش‌های تعیین قابلیت انتقال توان در دسترس، بخش دوم، روش‌های پویا،" فصل‌نامه عصر برق، انجمن برق و الکترونیک ایران، شاخه خراسان، شماره ۱۶، صص. ۴۲-۴۵، زمستان ۱۴۰۰.
- [8] O. O. Mohammed, M. W. Mustafa, D. S. S. Mohammed, and A. O. Otuozu, "Available transfer capability calculation methods: a comprehensive review," *Int. Trans. on Electrical Energy Syst.*, vol. 29, no. 6, Article ID: e 2846, 24 pp., Jun. 2019.
- [۹] م. عیدیانی، "تعیین پایداری ولتاژ و ATC ایستا با روش نیوتن-رافسون-سایدل توسعه یافته و مقایسه آن با روش حداقل پس‌ماند،" مجله فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، جلد ۳، شماره ۱، صص. ۱۰-۱، زمستان ۱۳۸۸.
- [10] M. Eidiyani, "A reliable and efficient method for assessing voltage stability in transmission and distribution networks," *International J. of Electrical Power and Energy System*, vol. 33, no. 3, pp. 453-456, Mar. 2011.
- [11] I. S. V. Agnes, R. Narmathabanu, D. Devaraj, and M. Karuppasampandian, "Estimation of dynamic ATC including Hopf bifurcation limit using step by step algorithm," *Int. J. of Power and Energy Conversion*, vol. 8, no. 2, pp. 365-369, Jan. 2017.
- [12] I. S. V. Agnes, D. Devaraj, R. B. Namatha, and M. K. Pandiyan, "Differential evolution algorithm for computation of dynamic ATC in deregulated power system," in *Proc. Int. Conf. on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing*, 10 pp., Srivilliputtur, India, 23-25 Mar. 2017.
- [13] S. Sayah and A. Hamouda, "Optimal power flow solution of integrated AC-DC power system using enhanced differential evolution algorithm," *Int. Trans. on Electrical Energy Syst.*, vol. 29, no. 2, Article ID: e2737, 11 pp., Feb. 2018.
- [14] S. Devesh and S. P. Singh, "Real-time estimation of ATC using PMU data and ANN," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 14, no. 17, pp. 3604-3616, Sept. 2020.
- [15] D. Gupta and S. K. Jain, "Available transfer capability enhancement by FACTS devices using metaheuristic evolutionary particle swarm optimization (MEEPSO) technique," *Energies*, vol. 14, no. 4, Article ID: 869, 28 pp., 2021.
- [16] T. L. Duong, T. T. Nguyen, N. A. Nguyen, and T. Kang, "Available transfer capability determination for the electricity market using cuckoo search algorithm," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 10, no. 1, pp. 5340-5345, Feb. 2020.
- [17] M. Eidiyani, "Transient stability constrained available transmission capability (ATC)," *J. of Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Power Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 48-54, 2010.
- [18] M. Eidiyani and M. H. M. Shanechi, "FAD-ATC: a new method for computing dynamic ATC," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 109-118, Feb. 2006.
- [19] A. Velusamy, N. B. Ramu, D. Durairaj, and K. Murugesan, "Differential evolutionary algorithm based optimal support vector machine for online DATC estimation incorporating transmission capacity margins," *Int. Trans. on Electrical Energy Syst.*, vol. 27, no. 7, Article ID: e2331, 12 pp., Jul. 2017.
- [20] M. Shaaban, "Behavior of power system equilibrium points in dynamic available transfer capability calculation," *J. of Applied Science & Process Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 242-248, 2018.
- [21] W. Xiaoting, W. Xiaozhe, S. Hao, and L. Xi, "A data-driven sparse polynomial chaos expansion method to assess probabilistic total transfer capability for power systems with renewable," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 36, no. 3, pp. 2573-2583, May 2020.
- [22] S. Xin, T. Zhongbei, R. Yufei, L. Zhaohui, and T. Pietro, "Probabilistic available transfer capability assessment in power systems with wind power integration," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, no. 11, pp. 1912-1920, Aug. 2020.
- [23] D. Hur, J. K. Park, B. H. Kim, and K. M. Son, "Security constrained optimal power flow for the evaluation of transmission capability on Korea electric power system," in *Proc. Power Engineering Society Summer Meeting*, pp. 1133-1138, Vancouver, Canada, 15-19 Jul. 2001.

افزایش می‌یابد. همچنین ثابت گردیده که این روش معکوس از روش‌های دیگر مثل جداسازی LU هم سریع‌تر است. اگر معکوس ماتریس A ، B باشد آن گاه داریم

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} = B \quad (\text{پ-۲})$$

در نتیجه

$$AB = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aa_1 + bc_1 & ab_1 + bd_1 \\ ca_1 + dc_1 & cb_1 + dd_1 \end{bmatrix} \quad (\text{پ-۳})$$

$$= \begin{bmatrix} I_{n \times n} & \cdot_{n \times m} \\ \cdot_{m \times n} & I_{m \times m} \end{bmatrix} = I_{(n+m) \times (n+m)}$$

که $I_{n \times n} = \text{eye}(n)$ ماتریس واحد و $\cdot_{m \times m} = \text{zeros}(m)$ ماتریس صفر تعریف می‌شوند؛ لذا داریم

$$aa_1 + bc_1 = I_{n \times n} \quad (\text{پ-۴-الف})$$

$$ab_1 + bd_1 = \cdot_{n \times m} \quad (\text{پ-۴-ب})$$

$$ca_1 + dc_1 = \cdot_{m \times n} \quad (\text{پ-۴-ج})$$

$$cb_1 + dd_1 = I_{m \times m} \quad (\text{پ-۴-د})$$

از (پ-۴-ب) داریم

$$b_1 = -a^{-1}bd_1 \quad (\text{پ-۵})$$

این معادله را در (پ-۴-د) قرار می‌دهیم و داریم

$$c(-a^{-1}bd_1) + dd_1 = I_{m \times m} \Rightarrow (d - ca^{-1}b)d_1 = I_{m \times m} \quad (\text{پ-۶})$$

$$\Rightarrow d_1 = (d - ca^{-1}b)^{-1}$$

حالا معادله بالا را در (پ-۵) قرار می‌دهیم و داریم

$$b_1 = -a^{-1}b(d - ca^{-1}b)^{-1} \quad (\text{پ-۷})$$

حال از (پ-۴-الف) داریم

$$a_1 = a^{-1}(I_{n \times n} - bc_1) \quad (\text{پ-۸})$$

با قراردادن (پ-۸) در (پ-۴-ج) داریم

$$ca^{-1} - ca^{-1}bc_1 + dc_1 = \cdot_{m \times n}$$

$$\Rightarrow ca^{-1} + (d - ca^{-1}b)c_1 = \cdot_{m \times n} \quad (\text{پ-۹})$$

$$\Rightarrow c_1 = -(d - ca^{-1}b)^{-1}ca^{-1}$$

در نهایت با قراردادن معادله بالا در (پ-۸) داریم

$$a_1 = a^{-1} + a^{-1}b(d - ca^{-1}b)^{-1}ca^{-1} \quad (\text{پ-۱۰})$$

بالاخره معکوس ماتریس محاسبه می‌شود.

مراجع

- [1] M. Champion, "The Future of Power Is Transcontinental, Submarine Supergrids," Bloomberg Businessweek, <https://www.bloomberg.com/news/features/2021-06-09/future-of-world-energy-lies-in-uhvdc-transmission-lines>, Jun. 2021.
- [2] S. Lumberras, H. Abdi, and A. Ramos, Transmission Expansion Planning: The Network Challenges of the Energy Transition, Springer Nature Switzerland AG, 2021.
- [3] G. D. A. Tinajero, M. Nasir, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Comprehensive power flow modelling of hierarchically controlled AC/DC hybrid islanded microgrids," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 127, Article ID: 106629, 9 pp., May 2021.

- interconnection," *IEEE Systems J.*, vol. 17, no. 1, pp. 1375 - 1382, Mar. 2022.
- [35] O. Olobaniyi, O. Oparinde, and N. Ogundipe, "A comparative study of iterative and non-iterative load-flow methods: a case of newton raphson and holomorphic embedding approaches," *Nigerian J. of Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 64-71, Apr. 2022.
- [36] M. Shamseldeen, "A fast holomorphic embedding power flow approach for meshed distribution networks," *International Trans. on Electrical Energy Systems*, vol. 2022, Article ID: 9561385, 11 pp., 2022.
- [37] M. Y. Morgan, M. F. Shaaban, H. F. Sindi, and H. H. Zeineldin, "A holomorphic embedding power flow algorithm for islanded hybrid AC/DC microgrids," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 13, no. 3, pp. 1813-1825, May 2022.
- [38] <https://www2.kios.ucy.ac.cy/testsystems/>
- [24] Y. Liu, *et al.*, "Online TTC estimation using nonparametric analytics considering wind power integration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 494-505, Jan. 2019.
- [25] M. Kim, D. Hur, Y. Nam, and J. Park, "Total transfer capability computation using small signal stability-based security constrained optimal power flow," *European Trans. on Electrical Power*, vol. 21, no. 1, pp. 877-894, Jan. 2011.
- [26] Q. Gao, *et al.*, "Surrogate-assisted optimal redispatch control for risk-aware regulation of dynamic total transfer capability," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 15, no. 13, pp. 1949-1961, Jul. 2021.
- [27] S. Keshewani, A. Mohapatra, and S. C. Srivastav, "An efficient holomorphic embedded based approach for available transfer capability evaluation," *Int. Electrical Power and Energy Syst.*, vol. 122, Article ID: 106164, 10 pp., Nov. 2020.
- [28] M. Eidiyani, "A reliable and efficient holomorphic approach to evaluate dynamic available transfer capability," *International Trans. on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 11, Article ID: e13031, 14 pp., Nov. 2021.
- [29] Y. Liu and K. Sun, "Solving power system differential algebraic equations using differential transformation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 3, pp. 2289-2299, May 2021.
- [30] Y. Liu and K. Sun, *Differential Transformation of Nonlinear Power Flow Equations*, arXiv preprint arXiv:2004.08017, 5 pp., 2020.
- [31] Y. Liu, K. Sun, and J. Dong, "A dynamized power flow method based on differential transformation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 182441-182450, 2020.
- [32] M. Eidiyani, "A new method of static available transfer capability computation in a high-penetration wind farm," *Majlesi J. of Mechatronic Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 29-38, Jun. 2021.
- [33] M. Eidiyani, "An efficient differential equation load flow method to assess dynamic available transfer capability with wind farms," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 16, pp. 1-13, 7 Dec. 2021.
- [34] M. Eidiyani, "A new hybrid method to assess available transfer capability in AC-DC networks using the wind power plant

مصطفی عیدیان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۳۷۵ از دانشگاه فردوسی مشهد و مقطع دکتری مهندسی قدرت را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران به پایان رسانده است. وی در سال ۱۳۹۵ به درجه دانشیاری و عضو ارشد IEEE ارتقا پیدا کردند. وی ۷ کتاب فارسی، ۱ کتاب انگلیسی با تیلور و فرانسیس، ۹ فصل کتاب در اشپرینگر و الزویر، ۱۱۰ مقالات کنفرانس و ۴۱ مقاله در مجلات علمی انتشار داده است. همچنین نامبرده سردبیر مجله بین‌المللی امنیت انرژی و انرژی پایدار (IJESSE) و دستیار سردبیر سه نشریه نمایه‌شده در اسکوپوس مجله مهندسی برق و فناوری (JEET)، مجله مهندسی (JOE-IET) و مجله بین‌المللی مهندسی برق کاربردی (IJAPE) می‌باشد. وی در حال حاضر عضو هیأت مدیره شرکت تولید برق خراسان است. زمینه‌های تحقیقاتی موردعلاقه ایشان عبارت‌اند از: امنیت انرژی، امنیت سایبری در سیستم قدرت، انرژی‌های تجدیدپذیر، کنترل و پایداری سیستم‌های قدرت، و نرم‌افزارهای سیستم قدرت.