98-F-SEA-0885

محاسبه قابلیت انتقال توان در دسترس با در نظر گرفتن قیود امنیتی و پایداری ولتاژ بین مناطق مازندران و خراسان

هاشم یوسفی جاوید مجید علومی بایگی هادی یوسفی جاوید
دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده برق و رباتیک، گروه قدرت

واژه‌های کلیدی: قابلیت انتقال توان در دسترس، پخش بار بهینه با قیود امنیتی

چکیده

یکی از نیاز های اساسی بازار برق داشتن اطلاعات قابلیت انتقال توان در دسترس در هر لحظه می باشد. قابلیت انتقال توان در دسترس باید به روشی تعیین گردد که دارای دقت و سرعت مناسب بوده و ملاحظات پایداری ولتاژ نیز مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله یک روش برای محاسبه ظرفیت قابل انتقال در دسترس ارائه شده که علاوه بر قیود امنیتی قید پایداری ولتاژ را در نظر می گیرد.

برای این منظور ابتدا به روش پخش بار بهینه با قیود امنیتی حداکثر بار منطقه مصرف تعیین می گردد. برای آنکه تعیین کنیم آیا در این نقطه کار، قید پایداری ولتاژ رعایت شده است یا خیر، با آزاد سازی قیود حد ولتاژ باسها و حد توان خطوط انتقال، بار منطقه مصرف گام به گام افزایش می یابد و در هر گام مشتق بار مصرفی نسبت به ولتاژ تعیین می شود تا به نقطه بحرانی برسیم. برای لحاظ نمودن حاشیه پایداری ولتاژ بار منطقه مصرف باید ۸۵ درصد بار نقطه بحرانی باشد. حداکثر بار بدست آمده از روش پخش بار بهینه با قیود امنیتی با ۸۵ درصد بار منطقه مصرف در نقطه بحرانی مقایسه می شود. هر کدام که کمتر باشد حداکثر مقدار بار منطقه مصرف است که هم قید پایداری ولتاژ و هم قیود امنیتی را رعایت می کند و لذا مبنای محاسبه ظرفیت قابل انتقال در دسترس قرار می‌گیرد. با کم نمودن حاشیه اطمینان انتقال و حاشیه مفید ظرفیت از افزایش بار منطقه مصرف نسبت به نقطه کار اولیه، ظرفیت قابل انتقال در دسترس محاسبه می گردد. این روش به شبکه ۸ باسه PJM و در انتها به شبکه مازندران – خراسان اعمال و نتایج بررسی شده است.

۱- مقدمه

استفاده از روش مناسب جهت تعیین ظرفیت قابل انتقال در دسترس از اهمیت خاصی برخوردار است. روش مورد استفاده باید دارای سرعت و دقت کافی در محاسبات بوده و از لحاظ پایداری نیز مطمئن عمل کند[۶-۱]. در عمل برای شبکه های واقعی و بزرگ از سه روش پخش بار تکراری (RPF)[1]، پخش بار پیوسته (CPF)[2]، و پخش بار بهینه با قیود امنیتی

1- Repeat Power Flow
2- Continuation Power Flow

(TSCOPF)[1] برای محاسبه ظرفیت قابل انتقال در دسترس استفاده می شود[۲]. روش RPF اطلاعات دقیقی در مورد منحنی های QV , PV می دهد ولی به دلیل پخش بارهای متوالی و حل معادلات پخش بار در هر مرحله، بسیار زمانبر می باشد. بنابر این از این روش به ندرت استفاده می شود. روش CPF بار را به صورت پله ای افزایش می دهد تا به نقطه ناپایداری برسد و در هر مرحله به جای معادلات پخش بار، پاره ای از معادلات ساده شده را حل می کند. بنابراین از لحاظ پایداری مطمئن عمل کرده و دارای سرعت مناسبی است ولی این روش نیز دارای مشکلاتی از قبیل پیچیدگی روندهای پیش‌بینی،تصحیح‌و روش های تعیین اندازه گام می باشد [۳].

روش های مبتنی بر OPF[2] در محیط های متمرکز که دارای دیسپاچینگ مرکزی است کاربرد دارد و برای محیط های غیر متمرکز مناسب نیست. بنابراین از روش TSCOPF که در محیط های غیرمتمرکز مناسب است استفاده می شود[۲].

در روش TSCOPF بر خلاف روش های RPF, CPF که به صورت افزایش پله ای به جواب می رسند، جواب با حل مسئله بهینه سازی (۱) بدست می آید. و دارای دقت و سرعت کافی می باشد ولی اطلاعات درستی در مورد پایداری ولتاژ نمی دهد. روش پیشنهادی که در این مقاله مورد استفاده قرار می گیرد مبتنی بر روش TSCOPF بوده که قید پایداری ولتاژ نیز به آن اضافه شده است. بدین ترتیب در روش پیشنهادی علاوه بر سرعت و دقت، با بدست آوردن منحنی- های ولتاژ- توان و شیب آنها حاشیه پایداری ولتاژ نیز در نظر گرفته می شود [۸].

۲- محاسبه ATC به روش پخش بار بهینه

مسئله محاسبه ATC یک مسئله بهینه سازی است که برای تعیین حداکثر ظرفیت انتقال در دسترس به کار برده می شود. تابع هدف این مسئله توان انتقالی می باشد. قیود مسئله معادلات پخش بار، محدودیت های انتقال توان، محدودیت های تولید توان، محدودیت های بار و محدودیت های ولتاژ می باشد[۱،۲، ۷]. مدلسازی مسئله تعیین ظرفیت قابل انتقال در دسترس با در نظر گرفتن قیود امنیتی به صورت زیر می باشد.

Maximize

F (P_{Gi} ($i \in$ ناحیه تولید) و P_{Dj} ($j \in$ ناحیه مصرف)

((Q_{Dj} ($j \in$ ناحیه مصرف) و

$$= \sum_{i \in \sin K} P_{Di} - \sum_{i \in \sin K} P_{Di}^{\circ}$$

تحت شرایط :

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{n} |U_i||U_j|(G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}) = 0$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{n} |U_i||U_j|(G_{ij}\sin\delta_{ij} + B_{ij}\cos\delta_{ij}) = 0$$

$P_{Gi}^{\circ} \le P_{Gi}$, $i \in$ ناحیه تولید

$P_{Di}^{\circ} \le P_{Di}$, $Q_{Di}^{\circ} \le Q_{Di}$, $i \in$ ناحیه مصرف

$P_{Di} / P_{Di}^{\circ} = Q_{Di} / Q_{Di}^{\circ}$, $i \in$ ناحیه مصرف

$$|U_i|_{MIN} \le |U_i| \le |U_i|_{\max}$$

$$S_{ij} \le S_{ij}^{\max} \qquad (۱)$$

در رابطه(۱) متغیرها به صورت زیر تعریف شده اند.

P_{Gi} : توان اکتیو تولیدی باس i

P_{Gi}^{o} : توان اکتیو تولیدی حالت پایه باس i

P_{Di} : توان اکتیو مصرفی باس i

P_{Di}^{o} : توان اکتیو مصرفی حالت پایه باس i

Q_{Gi} : توان راکتیو تولیدی باس i

Q_{Di} : توان راکتیو مصرفی باس i

Q_{Di}^{o} : توان راکتیو مصرفی حالت پایه باس i

U_i : ولتاژ باس i

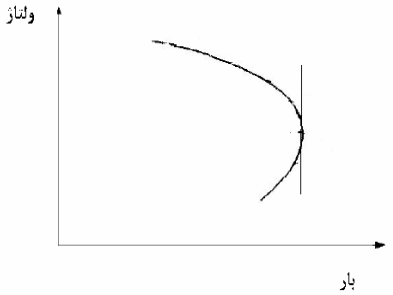
S_{ij} : توان ظاهری خط ij

1 -Transfer Security Constraint Optimal Power Flow

2- Optimal Power Flow

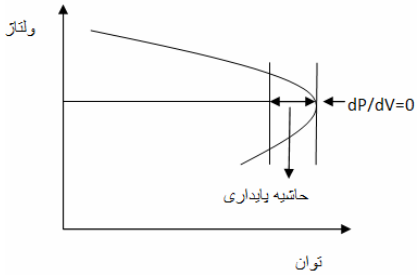
۳- محاسبه ATC به روش الگوریتم پیشنهادی

روش TSCOPF بر اساس روش پخش بار بهینه بوده که قیود امنیتی نیز در آن لحاظ شده است. حدود اندازه ولتاژ، حدود زاویه ولتاژ، حدود ظرفیت حرارتی خطوط و حدود توان تولیدی در TSCOPF لحاظ می گردد. این روش اطلاعات دقیقی در مورد پایداری ولتاژ نمی دهد. الگوریتم پیشنهادی در واقع همان روش TSCOPF است که قید پایداری ولتاژ به آن اضافه شده است. منحنی PV شکل (۱) رادر نظر بگیرید. این منحنی نشان می دهد که در نقطه بحرانی $dP/dV = 0$ است و قبل از نقطه بحرانی شیب منحنی منفی می باشد.



شکل(۱) منحنی ولتاژ- توان

بنابراین برای در نظر گرفتن قید پایداری ولتاژ در محاسبه ظرفیت قابل انتقال باید قید $dP/dV \leq h$ که h یک عدد منفی است لحاظ شود. در شکل (۲) نقطه بحرانی و حاشیه پایداری نشان داده شده است.

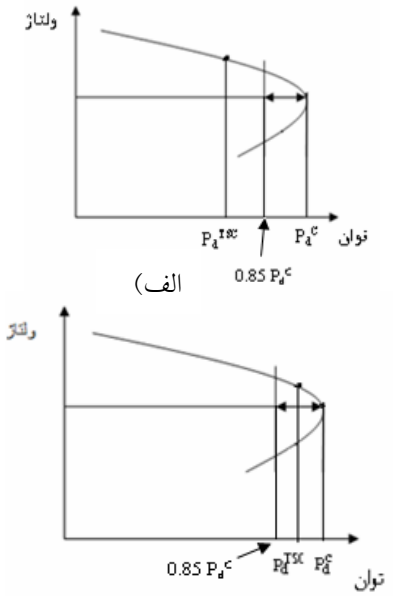


شکل(۲) منحنی ولتاژ- توان با حاشیه پایداری حاشیه نقطه

محاسبه dP/dV به صورت پارامتری و لحاظ آن به صورت یک قید در بهینه سازی مشکل است. لذا باید dP/dV را به صورت عددی تخمین بزنیم. برای این منظور ابتدا با اجرای بهینه سازی (۱) حداکثر بار منطقه مصرف با در نظر گرفتن قیود حد توان خطوط و حد ولتاژ باسها تعیین می شود. این بار را با P_d^{TSC} نمایش می دهیم. سپس بار منطقه مصرف در نقطه بحرانی پایداری ولتاژ محاسبه می شود. بار نقطه بحرانی با P_d^{C} نمایش داده می شود. ما بدنبال حداکثر بار منطقه مصرف که هم حاشیه پایداری ولتاژ و هم قیود امنیتی را رعایت می کند هستیم. برای رعایت حد پایداری ولتاژ بار منطقه مصرف باید کوچکتر یا مساوی با ۰/۸۵ بار نقطه بحرانی باشد. برای رعایت قیود امنیتی بار منطقه مصرف باید کوچکتر یا مساوی P_d^{TSC} باشد. لذا حداکثر بار منطقه مصرف که هم حاشیه پایداری ولتاژ و هم قیود امنیتی را رعایت میکند (P_d^{TSVS}) برابر است با:

$$P_d^{TSVS} = min\{P_d^{TSC}, 0.85\ P_d^{C}\} \qquad (۲)$$

لذا P_d^{TSVS} ملاک محاسبه حداکثر ظرفیت قابل انتقال در دسترس قرار می گیرد. شکل (۳-الف) حالتی را نشان می دهد که $P_d^{TSVS} = {}^{PdTSC}$ بوده و لذا $P_d^{TSC} \leq 0.85\ P_d^{C}$ می باشد. شکل (۳-ب) حالتی را نشان می دهد که $P_d^{TSVS} = 0.85\ P_d^{C}$ بوده و لذا $P_d^{TSC} \geq 0.85\ P_d^{C}$ می باشد.



الف

ب

شکل (۳) منحنی های ولتاژ- توان

الگوریتم روش پیشنهادی برای تعیین P_d^{TSVS} به صورت زیر است.

.الف) با اجرای بهینه سازی (۱) P_d^{TSC} تعیین می شود

ب) مقدار P_d^{C} به روش زیر تعیین می شود

ب-۱) مقدار شمارنده گام حرکت (k) برابر با یک قرار داده می شود

ب-۲) حد بالای P_d برابر با $P_d + ks$ قرار داده می شود و قیود ولتاژ وحد توان خطوط آزاد می شود. s گام حرکت بوده و یک مقدار کوچک می باشد.

ب-۳) بهینه سازی (۱) اجرا شده و k افزایش می یابد $(k = k + 1)$.

ب-۴) مشتق dP_d/dV برای $k \geq 2$ به صورت تقریبی بین دو مرحله k و $k-1$ به صورت زیر محاسبه می شود.

$$dP_d/dV = (P_d^{(k)} - P_d^{(k-1)})/(V^{(k)} - V^{(k-1)})$$

ب-۵) اگر $dP_d/dV \geq -\varepsilon$ است الگوریتم متوقف می‌شود در غیر اینصورت به مرحله (ب-۲) بروید.

ب-۶) آخرین مقدار بدست آمده از بهینه سازی برای P_d برابر با مقدار بحرانی P_d (P_d^c) می باشد.

ج) با استفاده از رابطه (۲) حداکثر مقدار بار منطقه مصرف که هم حاشیه پایداری ولتاژ و هم قیود امنیتی را رعایت میکند (P_d^{TSVS}) را محاسبه کنید.

د) ظرفیت قابل انتقال در دسترس به صورت زیر محاسبه میشود:

$$ATC = (P_d^{TSVS} - P_d^{0}) - TRM - CBM \qquad (۳)$$

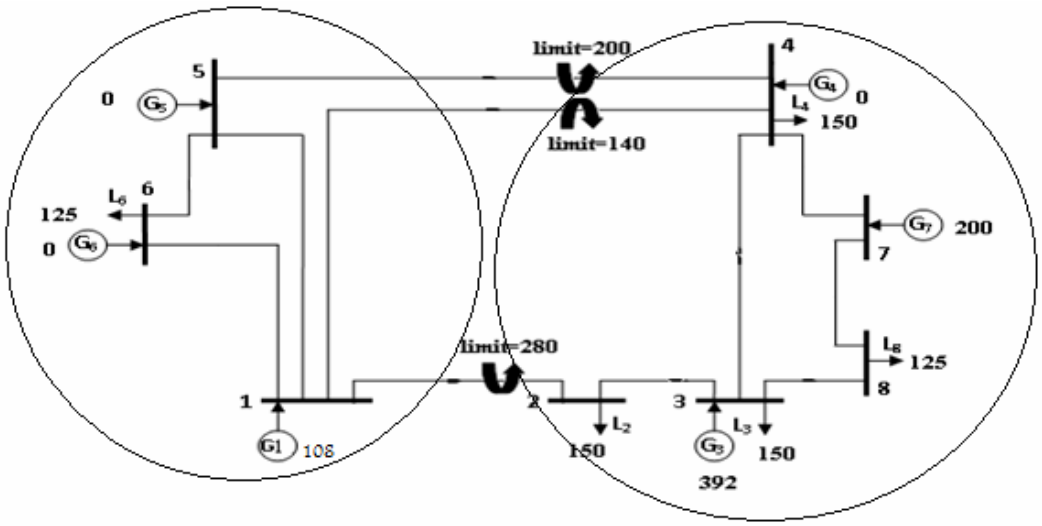
TRM : حاشیه اطمینان انتقال- CBM : حاشیه مفید ظرفیت

۴- محاسبه ATC شبکه هشت باسه PJM به روش الگوریتم پیشنهادی

سیستم ۸ باسه پنسیلوانیا- نیو جرسی- مریلند (PJM) که دارای ۷ ژنراتور و ۵ بار است را در نظر بگیرید. دیاگرام تک خطی شبکه ۸ باسه مورد مطالعه در شکل (۴) آورده شده است. پارامترهای خطوط انتقال این شبکه در جدول (۱) درج شده است. نقطه کار اولیه (پایه) سیستم در جدول (۲) داده شده است.

جدول(۱) پارامترهای خطوط انتقال شبکه ۸

Line No.	From Bus No.	To Bus No.	Reactance (ohm)	Limit (MW)
1	1	2	0.03	280
2	1	4	0.03	140
3	1	5	0.0065	380
4	2	3	0.01	120
5	3	4	0.03	230
6	4	5	0.03	200
7	5	6	0.02	300
8	6	1	0.025	250
9	7	4	0.015	250
10	7	8	0.022	340
11	8	3	0.018	240



شکل(۴) شبکه ۸ باسه مورد آزمایش

جدول (۲) مقادیر حالت پایه شبکه ۸ باسه

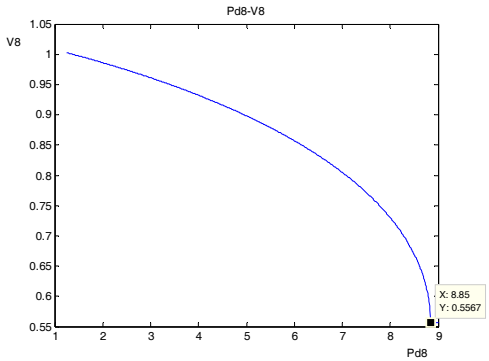
باس	$P_g(MW)$	$P_d(MW)$	$Q_g(Mvar)$	$Q_d(Mvar)$
1	1.08	0	0	0
2	0	1.5	0	0.4
3	3.92	1.5	1.17	0.4
4	0	1.5	0	0.4
5	0	0	0	0
6	0	1.25	0.65	0.4
7	2	0	0	0
8	0	1.25	0.4	0.4

این شبکه شامل ۲ منطقه می باشد. منطقه اول شامل باسهای ۱، ۵، ۶ و منطقه دوم شامل باسهای ۲، ۳، ۴، ۷ و ۸ می باشد. هدف محاسبه ظرفیت قابل انتقال در دسترس از منطقه ۱ به باسهای ۳، ۴ و ۸ در منطقه ۲ می باشد. جهت محاسبه حداکثر توان قابل انتقال از منطقه اول به منطقه دوم، بار منطقه اول و تولید منطقه دوم ثابت نگه داشته می شود. با ماکزیمم سازی بار در منطقه دوم، تولید در منطقه اول افزایش می یابد. افزایش تولید در منطقه اول تا جایی که محدودیت ها اجازه دهند ادامه می یابد. در حداکثر سازی بار منطقه دوم فرض می شود که بار باس های ۳، ۴ و ۸ از منطقه دوم به نسبت مقادیر اولیه خود افزایش می یابند. خطوط ۲-۱ ، ۴-۱ و ۴-۵ خطوط بین منطقه ای سیستم ۸ باسه می باشند که در حقیقت محاسبه ATC روی این سه خط انجام می شود. ظرفیت حرارتی خطوط در جدول (۱) مشخص شده اند.

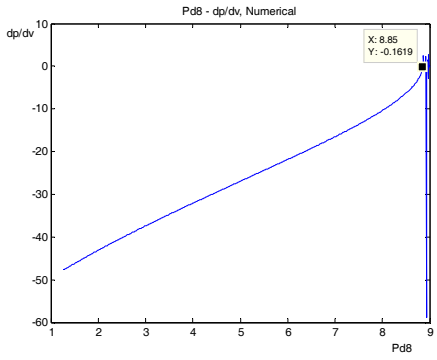
معادلات پخش بار و شروط افزایش بار به نسبت مقادیر اولیه به عنوان قید مساوی در نظر گرفته می شوند. محدودیت های انتقال توان خطوط، محدودیت های تولید توان، محدودیت-های بار، و محدودیت های اندازه و زاویه ولتاژ به عنوان قید نا مساوی تعریف می شوند. با اجرای TSCOPF حداکثر مقدار بار منطقه ۲ با در نظر گرفتن قیود امنیتی محاسبه می-گردد. نقطه کار بهینه بدست آمده از TSCOPF در ستون دوم جدول (۳) درج شده است. با توجه به نقطه کار پایه جدول-(۲) توان ۱۷ مگاوات در حالت پایه از ناحیه ۲ به ناحیه ۱ ارسال می شود. با توجه به نقطه کار بدست آمده از TSCOPF ستون دوم جدول(۳) مجموع بار باسهای ۳، ۴و۸ برابر با ۹۳۴/۲ مگاوات و ظرفیت قابل انتقال در دسترس از ناحیه به باسهای ۳، ۴ و ۸ در منطقه دوم برابر است با

$$ATC = (P_{d3} + P_{d4} + P_{d8} - P_{d30} - P_{d40} - P_{d80}) - TRM - CBM = 471.8\ MW$$

در معادله فوق TRM برابر با چهار درصد حداکثر توان انتقالی از منطقه ۱ به باسهای ۳، ۴ و ۸ در منطقه ۲ در نظر گرفته شده است و از CBM صرفنظر شده است. با دقت در ستون دوم جدول (۳) مشاهده می شود که حد توان خط ۱-۴ محدود کننده ظرفیت قابل انتقال در دسترس از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ می باشد. برای بدست آوردن نقطه بحرانی قیود حد ولتاژ و حد خطوط انتقال آزاد شده و حد توان مصرفی باسهای ۳، ۴ و ۸ گام به گام افزایش می یابد و در هر گام پس از اجرای بهینه سازی مشتق و توان مصرفی حساس ترین باس منطقه ۲ یعنی باس شماره ۸ نسبت به ولتاژ آن محاسبه می-گردد. هرگاه که dP/dV به حد کافی به صفر نزدیک شد در نزدیکی نقطه بحرانی می باشیم. منحنی PV باس شماره ۸ در شکل (۵) ومنحنی dP/dV باس شماره ۸ در شکل (۶) رسم شده است.



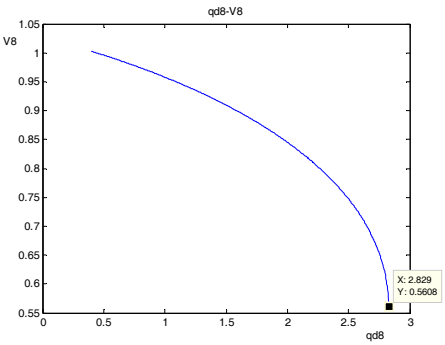
شکل (۵) منحنی ولتاژ- توان در باس ۸



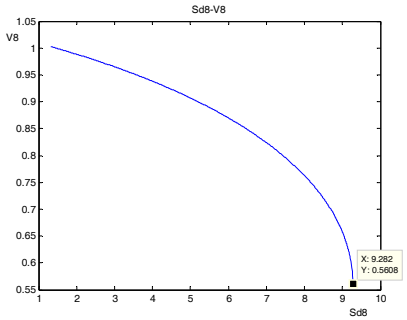
شکل (۶) منحنی مشتق توان نسبت به ولتاژ در باس ۸

نقطه کار بحرانی در ستون سوم جدول (۳) درج شده است. با توجه به ستون سوم جدول (۳) مجموع بار باسهای ۳، ۴ و ۸ در حالت بحرانی برابر با ۳۰۰۵/۸ مگاوات می باشد. برای در نظر گرفتن حاشیه پایداری مجموع بار باسهای ۳، ۴ و ۸ باید کوچکتر یا مساوی ۸۵ درصد بار نقطه بحرانی یعنی کوچکتر یا مساوی ۲۵۵۴/۹ مگا وات باشد. نقطه کار متناظر با حداکثر بار باسهای ۳، ۴ و ۸ با در نظر گرفتن حاشیه پایداری ولتاژ در ستون چهارم جدول (۳) درج شده است.

برای در نظر گرفتن قیود امنیتی مجموع بار باسهای ۳، ۴ و ۸ باید کوچکتر یا مساوی ۹۳۴/۲ مگاوات باشد(نقطه کار بهینه بدست آمده از TSCOPF) لذا برای در نظر گرفتن حاشیه پایداری ولتاژ و قیود امنیتی مجموع بار این سه باس باید کوچکتر یا مساوی ۹۳۴/۲ باشد. لذا ظرفیت قابل انتقال در دسترس از ناحیه ۱ به باسهای ۳، ۴ و ۸ در ناحیه ۲ برابر با ۴۷۱/۸ مگا وات می باشد. در این سیستم و در این نقطه کار، قیود امنیتی محدود کننده تر از قید پایداری ولتاژ است. و لذا ظرفیت قابل انتقال در دسترس بدست آمده از TSCOPF به عنوان ظرفیت قابل انتقال در دسترس استفاده می شود. در همه سیستمها چنین نیست و ممکن است قید پایداری ولتاژ محدودکننده تر از قیود امنیتی باشد. منحنی SV , QV باس شماره ۸ در شکل های (۷) و (۸) درج شده است. همچنا نکه شکل های (۵) الی (۸) نشان می دهند چنا نکه ولتاژ باس ۸ از ۰/۵۶ پریونیت کمتر شود فروپاشی ولتاژ رخ خواهد داد.



شکل (۷) منحنی ولتاژ- توان راکتیو در باس ۸



شکل (۸) منحنی ولتاژ- توان ظاهری در باس ۸

جدول (۳) مقادیر متغیرها را در سه حالت زیر نشان میدهد.

حالت اول : حداکثر با منطقه مصرف با در نظر گرفتن قیود امنیتی (TSCOPF). حالت دوم : حالت بحرانی (قیود در این حالت آزاد شده است). حالت سوم : منظور نمودن حاشیه پایداری (بار منطقه مصرف ۰/۸۵ درصد بار نقطه بحرانی است). ۵- محاسبه قابلیت انتقال توان در دسترس بین شرکت های برق منطقه ای مازندران و خراسان

در این بخش ظرفیت قابل انتقال در دسترس بین شرکت های برق منطقه ای مازندران و خراسان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی بخش۳ محاسبه می شود. برای بالا بردن سرعت محاسبات، شبکه مازندران – خراسان کاهش مرتبه داده می-شود. کاهش باسهای شبکه به روش معمول سبب گم شدن خطوط بین منطقه ای شده و محاسبه ظرفیت قابل انتقال بین نواحی را با مشکل مواجه می سازد. بنابر این یک روش برای کاهش باسهای شبکه با حفظ خطوط بین منطقه ای ارائه شده است. برای این منظور ابتدا خطوط بین منطقه ای حذف می-گردد. ماتریس ادمیتانس هر یک از مناطق بطور جداگانه محاسبه می شود. در هر یک از مناطق باسهای ژنراتوردار و باسهای مرزی حفظ و باسهای دیگر حذف شده و ماتریس ادمیتانس کاهش یافته با استفاده از روش کرون محاسبه می-گردد. سپس خطوط بین منطقه ای اضافه شده و ماتریس ادمیتانس کاهش یافته کل شبکه محاسبه می شود. بدین ترتیب ضمن حفظ خطوط بین منطقه ای باسهای غیر ضروری حذف می شوند. دیاگرام تک خطی شبکه های مازندران و خراسان در شکل (۹) نشان داده شده است.طبق روش گفته شده ابتدا

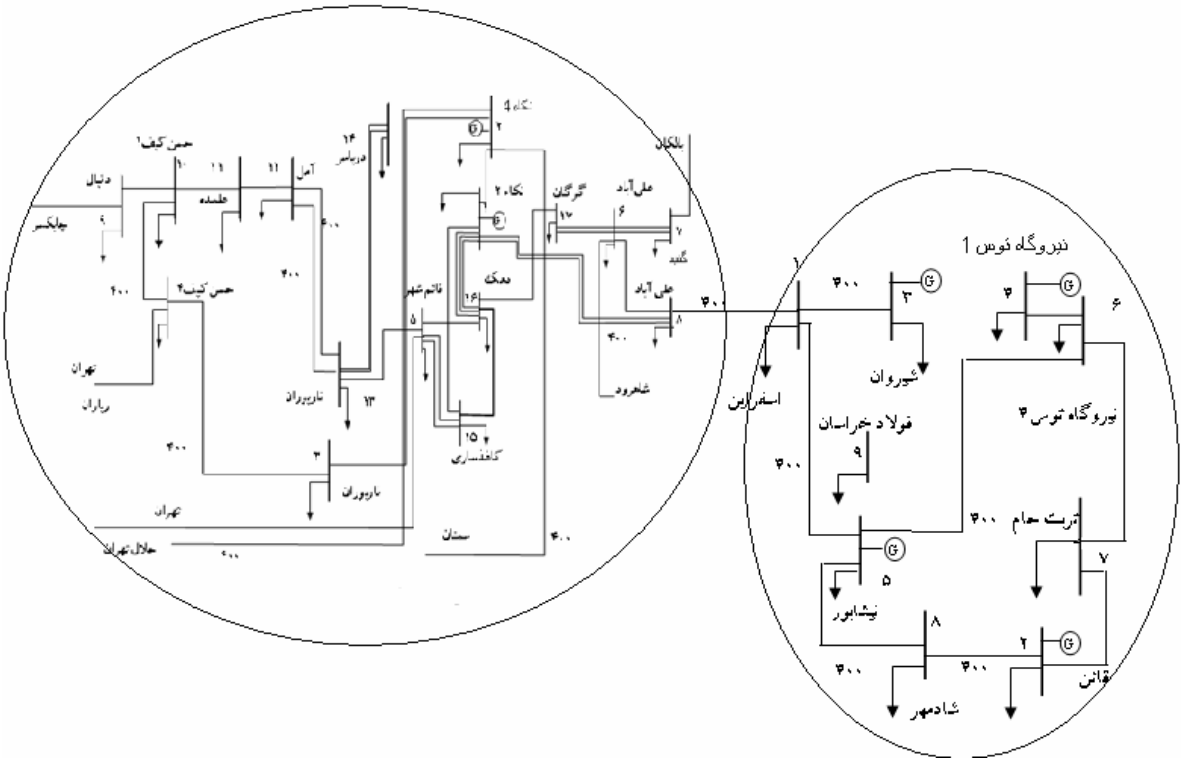
خط انتقال بین مناطق مازندران و خراسان حذف گردیده و ماتریس ادمیتانس کاهش یافته مناطق مازندران و خراسان محاسبه می شود.. سپس ماتریس ادمیتانس کاهش یافته شبکه مازندران با خراسان ترکیب شده و ماتریس ادمیتانس کاهش یافته ترکیب دو منطقه مازندران و خراسان بدست می آید. این ماتریس در جدول (۴) درج شده است. درایه هایی که با اضافه کردن خط بین منطقه ای تغییر می کند یعنی درایه های $Y_{8,8}$ ، $Y_{10,10}$ $Y_{10,8}$ $Y_{8,10}$ در جدول مشخص شده اند. شماره گذاری باس های شرکت های برق منطقه ای مازندران و خراسان پس از کاهش مرتبه مطابق جدول (۴) می باشد.

جدول (۳) نتایج محاسبه ظرفیت قابل انتقال برای شبکه ۸ باسه PJM

متغیرها	مقادیر متغیرها پس از حداکثر نمودن بار منطقه مصرف با در نظر گرفتن قیود امنیتی	مقادیر متغیرها در نقطه بحرانی است	مقادیر متغیرها هنگامی که بار منطقه مصرف برابر با ۰/۸۵ بار نقطه بحرانی است	حد پایین متغیرها	حد بالای متغیرها
P_{g1}	1.08	14.62949	8.822114	1.08	10
P_{g3}	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92
P_{g4}	0	0	0	0	0
P_{g5}	5.135084	9.606632	9.527585	0	10
P_{g6}	0	4.987474	5.01903	0	10
P_{g7}	2	2	2	2	2
P_{d2}	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
P_{d3}	3.2970567	10.6088	9.024	1.5	10.8
P_{d4}	3.2970567	10.6088	9.024	1.5	10.8
P_{d6}	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
P_{d8}	2.7475472	8.840669	7.52	1.25	9
Q_{g1}	1.453345	21.19273	11.11015	-10	10
Q_{g3}	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
Q_{g4}	0	0	0	0	0
Q_{g5}	0.3122641	9.770328	4.937112	-10	10
Q_{g6}	0.5362707	0.107161	0.109231	-10	10
Q_{g7}	0	0	0	0	0
Q_{d2}	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Q_{d3}	0.8792151	2.829014	2.4064	-10	10
Q_{d4}	0.8792151	2.829014	2.4064	-10	10
Q_{d6}	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Q_{d8}	0.8792151	2.829014	2.4064	-10	10
V_1	1	1	1	1	1
V_2	0.9781552	0.688952	0.840281	0.95	1.05
V_3	0.9769115	0.625732	0.807031	0.95	1.05
V_4	0.9775596	0.723984	0.852123	0.95	1.05
V_5	1	1	1	1	1
V_6	1	1	1	1	1
V_7	0.9752357	0.646446	0.817071	0.95	1.05
V_8	0.9680224	0.556335	0.770264	0.95	1.05
P_{12}	1.683745	9.654802	7.588144	-2.8	2.8
P_{14}	1.4	8.991917	7.588144	-1.4	1.4
P_{54}	1.875818	9.308045	7.576514	-2	2

جدول(۴) ماتریس ادمیتانس کاهش یافته ترکیب دو منطقه خراسان و مازندران

	نکاء۲	– نکاء۴	ناریوران	حسن کیف	قائم شهر	علی آباد ۲	گنبد	علی آباد۴	دانیال	اسفراین	قائن	شیروان	طوس	نیشابور
۱-نکاء۲	19/713 - 149/394i	-3/488 + 69/756i	0 + 0i	0 + 0i	- 12/886 + 72/211i	-1/216 + 6/664i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
۲- نکاء۴	-3/488 + 69/756i	13/952 - 182/752i	-5/033 + 54/177i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	-5/432 + 59/931i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
۳- ناریوران	0 + 0i	-5/033 + 54/177i	11/21 - 111/046i	-3/301 + 36/773i	-1/255 + 18/182i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	-0/135 + 1/753i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
۴- حسن کیف	0 + 0i	0 + 0i	-3/301 + 36/773i	5/257 - 54/176i	-0/183 + 1/869i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	-1/42 + 15/782i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
۵- قائم شهر	-12/886 + 72/211i	0 + 0i	-1/255 + 18/182i	-0/183 + 1/869i	18/309 - 97/424i	-0/469 + 2/199i	0 + 0i	0 + 0i	-0/369 + 1/844i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
۶- علی آباد ۲	-1/216 + 6/664i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	-0/469 + 2/199i	15/695 - 109/151i	- 10/246 + 60/175i	-1/956 + 39/507i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
۷- گنبد	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	-10/246 + 60/175i	10/246 - 60/114i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
۸- علی آباد۴	0 + 0i	-5/432 + 59/931i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	-1/956 + 39/507i	0 + 0i	9/006 - 115/588i	0 + 0i	-1/619 + 17/741i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
۹- دانیال	0 + 0i	0 + 0i	-0/135 + 1/753i	-1/42 + 15/782i	-0/369 + 1/844i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	2/29 - 19/457i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
۱۰- اسفراین	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	-1/619 + 17/741i	0 + 0i	10/306 - 113/521i	0 + 0i	-5/262 + 60/22i	0 + 0i	-3/425 + 36/856i
۱۱- قائن	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	3/105 - 24/156i	0 + 0i	-0/114 + 3/325i	-1/288 + 22/108i
۱۲- شیروان	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	-5/262 + 60/22i	0 + 0i	5/262 - 60/002i	0 + 0i	0 + 0i
۱۳- طوس	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	-0/114 + 3/325i	0 + 0i	1/481 - 23/367i	-1/177 + 20/353i
۱۴-نیشابور	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	-3/425 + 36/856i	-1/288 + 22/108i	0 + 0i	-1/177 + 20/353i	8/786 - 78/506i

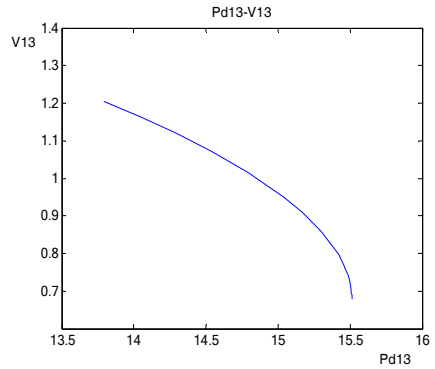


شکل (۹) دیاگرام تک خطی شبکه مازندران- خراسان

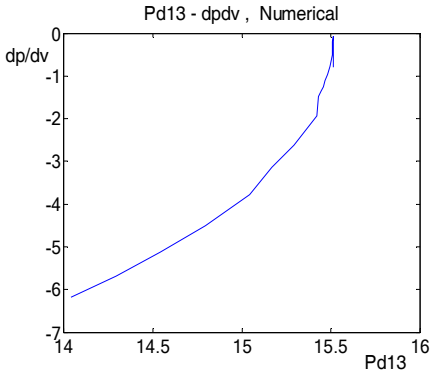
شبکه مازندران دارای ۱۷ باس می باشد پس از کاهش مرتبه تعداد باس های آن به ۹ باس تقلیل می یابد که دو باس آن دارای ژنراتور و ۷ باس مرزی می باشند. همچنین شبکه خراسان دارای ۹ باس می باشد پس از کاهش مرتبه تعداد باس های آن به ۵ تقلیل می یابد که چهار باس آن دارای ژنراتور و یک باس آن مرزی می- باشد. خط انتقال بین باس علی آباد در مازندران و اسفراین در خراسان به عنوان خط بین منطقه ای برای محاسبات ظرفیت قابل انتقال در دسترس مورد بررسی قرار می گیرد. ظرفیت حرارتی این خط انتقال ۷۰۰ مگاوات می باشد. خطوط بین منطقه ای شبکه مازندران (به جز خط بین مازندران و خراسان) با بار یا تولید مدل شده است. در صورتی که توان از مازندران به مناطق دیگر انتقال داده شود مقدار توان انتقالی از این باس ها به مناطق دیگر به عنوان توان مصرفی در باس های مرزی لحاظ می شود اگر مازندران توان الکتریکی از مناطق دیگر دریافت کند مقدار این توان دریافتی به عنوان توان تولیدی در این باس ها لحاظ می شود. هدف محاسبه قابلیت انتقال توان در دسترس از منطقه مازندران (نیروگاه نکاء در باس های نکاء ۱ و ۲) به منطقه خراسان (باس های نیشابور، اسفراین، قائن، شیروان و طوس) می باشد بار باس های ۱ تا ۵ منطقه خراسان شکل ۵-۱ (باس های ۱۰تا ۱۴ شبکه کاهش یافته مازندران و خراسان) با ضریب یکسان نسبت به مقادیر اولیه آنها افزایش می یابد به تبع آن توان تولیدی باس های ۱ و ۲ نکاء نیز افزایش می یابد نتایج حاصل از محاسبات طبق الگوریتم پیشنهادی بخش۳ در جدول (۵) نشان داده شده است. چنانچه بار منطقه خراسان توسط روش TSCOPF با منظور نمودن قیود ولتاژ و حد توان خطوط انتقال حداکثر شود نتایج مندرج در ستون سوم جدول (۵) حاصل خواهد شد مطابق این جدول قابلیت انتقال توان در دسترس از منطقه مازندران به منطقه خراسان فقط با در نظرگرفتن قیود امنیتی برابر است با :

$$ATC=(P_{d10}+P_{d11}+P_{d12}+P_{d13}+P_{d14}) - (P^{o}_{d10}+P^{o}_{d11}+P^{o}_{d12}+P^{o}_{d13}+P^{o}_{d14})-TRM-CBM=23.1013-21.51-(0.04\times23.1013)=0.66723\ pu=66.723\ MW$$

قیود آزاد شده و بار افزایش می یابد تا به نقطه بحرانی برسیم. توان و بار در نقطه بحرانی مطابق ستون چهارم جدول(۵) می باشد. با توجه به این که ولتاژ باس ۱۳ در مقایسه با ولتاژ باسهای دیگر نسبت به تغییر بار منطقه خراسان حساس تر است، معیار توقف (رسیدن به نقطه بحرانی) این است که dP_{d13}/dV_{d13} به صفر نزدیک شود. منحنی ولتاژ توان باس ۱۳ منطقه خراسان در شکل (۱۰) درج شده است. منحنی dP/dV برای باس ۱۳ در شکل (۱۱) درج شده است.



شکل(۱۰) منحنی ولتاژ- توان در باس ۱۳ (باس طوس)



شکل(۱۱) منحنی مشتق ولتاژ- توان در باس ۱۳

با توجه به شکل (۱۰) و جدول (۵) بار این باس در نقطه بحرانی ۱۵۵۱/۲۱ مگا وات می باشد. برای رعایت حاشیه پایداری بار این باس باید کمتر یا مساوی ۸۵٪ بار نقطه بحرانی یعنی کمتر یا مساوی ۱۳۱۸/۵۳ مگاوات باشد. در حالت پایه بار این باس ۱۳۷۵ مگاوات است که حاشیه پایداری ولتاژ را رعایت نمی کند. و باید کاهش یابد. بار باس های ۱۰ تا ۱۴ منطقه خراسان در نقطه کار بحرانی برابر با ۶۲ /۲۴۱۹ مگا وات می باشد. برای در نظر گرفتن حاشیه پایداری بار این باس ها باید کوچکتر یا مساوی ۸۵ درصد بار نقطه بحرانی یعنی کوچکتر یا مساوی ۲۰۵۶/۶۸ مگا وات باشد. قابلیت انتقال در دسترس با در نظر گرفتن حاشیه پایداری برابر است با:

$$ATC=(P_{d10}+P_{d11}+P_{d12}+P_{d13}+P_{d14}) - (P^{o}_{d10}+P^{o}_{d11}+P^{o}_{d12}+P^{o}_{d13}+P^{o}_{d14})\text{-TRM-CBM}=20.5668-21.51-(0.04\times20.5668)=-1.7659\ pu=-176.59\ MW$$

مشاهده می شود که ظرفیت قابل انتقال توان در دسترس با در نظر گرفتن قیود امنیتی برابر ۶۶/۷۲۳ مگاوات و ظرفیت قابل انتقال با در نظر گرفتن حاشیه پایداری ولتاژ برابربا ۱۷۶/۵۹- مگاوات می باشد لذا ظرفیت قابل انتقال در دسترس با در نظر گرفتن قیود امنیتی و حاشیه پایداری ولتاژ ۱۷۶/۵۹- مگا وات می باشد. یعنی در نقطه کار پایه توان عبوری از خط بین ناحیه ای حاشیه پایداری ولتاژ را رعایت نمی کند و باید کاهش یابد. در نقطه کار پایه تولید خراسان ۲۳۰۸ مگاوات و بار خراسان ۲۷۳۳ مگاوات می باشد (بار با احتساب بارهای منظور شده در ماتریس ادمیتانس حساب شده است). لذا در نقطه کار پایه توان ۴۲۵ مگا وات از مازندران به خراسان وارد می- شود برای رعایت حد پایداری ولتاژ این توان باید به میزان ۱۷۶/۵۹ مگاوات کاهش یابد یعنی توان ورودی به خراسان باید از ۴۲۵ مگاوات به ۲۴۸/۴۱ مگاوات کاهش یابد. تمامی مقادیر ولتاژها و توانهای باسها در نمودارهای ولتاژ-توان بر حسب پریونیت هستند.

جدول(۵) نتایج محاسبات قابلیت انتقال توان در دسترس

از شبکه مازندران به شبکه خراسان

متغیرها	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	LB	UB
P_{g1}	2.42	1.2	1.931734	1.2	2.42
P_{g2}	17.2	21.79291	19.58792	8.8	22.2
P_{d10}	2.2	2.362753	2.474737	2.2	2.6
P_{d11}	1.82	1.954641	2.047283	1.82	2.150909
P_{d12}	1.1	1.181377	1.237369	1.1	1.3
P_{d13}	13.79	14.81017	15.5121	13.79	16.29727
P_{d14}	2.6	2.792345	2.924689	2.6	3.072727
Q_{g1}	0	4.010379	4.190456	-40	40
Q_{g2}	0	0.577346	2.735797	-10	10
Q_{d10}	1	1.073979	1.12488	1	100
Q_{d11}	0.91	0.977321	1.023641	0.91	100
Q_{d12}	0.55	0.590688	0.618684	0.55	100
Q_{d13}	6.2	6.658668	6.974259	6.2	100
Q_{d14}	1.3	1.396172	1.462345	1.3	100
δ_1		1.423906	1.077311	-1.5708	1.570796
δ_2		1.495439	1.139226	-1.5708	1.570796
δ_{10}		1.026137	0.718385	-1.5708	1.570796
δ_{11}		0.832066	0.495462	-1.5708	1.570796
δ_{12}		1.024202	0.714261	-1.5708	1.570796
δ_{13}		0.835535	0.393796	-1.5708	1.570796
δ_{14}		0.951326	0.665765	-1.5708	1.570796
V_1		1	1	1	1
V_2		1	1	1	1
V_{10}		1.017625	0.819615	0.9	1.1
V_{11}		1.071406	0.773672	0.9	1.1
V_{12}		1.021298	0.821909	0.9	1.1
V_{13}		1.011502	0.677882	0.9	1.1
V_{14}		1.032097	0.763544	0.9	1.1

حالت اول: حالت پایه سیستم، حالت دوم: حداکثر بار با در نظر گرفتن قیود امنیتی (TSCOPF)،

حالت سوم: حالت بحرانی، UB: حد بالا، LB: حد پایین

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش برای محاسبه ظرفیت قابل انتقال در دسترس با در نظر گرفتن قیود امنیتی و حاشیه پایداری ولتاژ ارائه شده است. در این روش ابتدا حداکثر توان قابل انتقال با توجه به قیود امنیتی محاسبه می گردد. و سپس چک می شود که آیا این مقدار حاشیه پایداری ولتاژ را رعایت می کند یا خیر. برای تعیین نقطه بحرانی با آزادسازی قیود، بار منطقه مصرف از حداکثر بار بدست آمده با رعایت قیود امنیتی گام به گام افزایش می یابد تا به نقطه بحرانی برسیم. با توجه به اینکه فاصله بین حداکثر بار با رعایت قیود امنیتی با نقطه کار بحرانی زیاد نیست با سرعت کافی می توان نقطه کار بحرانی را محاسبه نمود. برای رعایت حاشیه پایداری ولتاژ، بار منطقه مصرف کوچکتر یا مساوی ۸۵ /۰ بار نقطه بحرانی در نظر گرفته می شود. این بار با حداکثر بار با رعایت قیود امنیتی مقایسه و کوچکترین آن ملاک محاسبه ظرفیت قابل انتقال در دسترس قرار می گیرد. روش پیشنهادی به شبکه ۸ باسه و شبکه مازندران- خراسان اعمال و نتایج بررسی شد. قیود امنیتی عامل محدود کننده قابلیت انتقال توان شبکه ۸ باسه و قید پایداری ولتاژ عامل محدود کننده قابلیت انتقال مازندران به خراسان بدست آمد.

۶- مراجع

[1] Power Systems Engineering Research Center, “Electric Power Transfer Capability: Concepts, Applications, Sensitivity, Uncertainty” ,*A national Science Foundation Industry/University Cooperative Research Center* since 1996.

[2] Ou, Y.; Singh, C.,” Assessment of available transfer capability and margins”, *Power Systems, IEEE Transactions on Power System*, Volume: 17 Issue: 2 , May 2002,Page(s): 463 -468

[3] Ajjarapu, V.; Christy, C., "The Continuation Power Flow, A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis" , *IEEE Transaction on Power System* ,pp. 416-423, Feb . 1992.

[4] M. Shaaban, Yixin Ni and F.F.Wu, “Available Transfer Capability Evaluation by Decomposition”, *IEEE Power* Engineering Society Summer Meeting, Vol.2, PP.1122-1126,July 2001

[5] G.Hammoud, “Assessment of Available Transfer Capability of Transmission System”, *IEEE Trans. On Power System*, Vol. 15, No. 1, PP.27-32, Feb.2000.

[6] .S.Grijalva, P.W.Sauer, J.D.Weber, “Enhancement of Linear ATC Calculations By the Incorporation of Reactive Power Flows”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.18, No.2, MAY 2003.

[7] M.Shaaban ,YixinNi and Felix Wu ," Total Transfer Capability Calculations For Competitive Power Networks Using Genetic Algorithms", *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power technologies* ,April 2000,pp.114-118

[۸] هاشم یوسفی جاوید، محاسبه ظرفیت قابل انتقال در دسترس برای شبکه انتقال ایران، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۶.