

نقش UPFC به عنوان یکی از موثرترین ادوات FACTS در کاهش تلفات خطوط انتقال

ابوذر استبصاری ، احمد غلامی

دانشجوی گرایش قدرت دانشگاه علم و صنعت ، دانشیار دانشکده برق

A_Estebarsari@ee.iust.ac.ir ، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده - بحث کاهش تلفات در سیستم های قدرت ، بحث بسیار مهم و از حیث تحقیقاتی قابل تامل و ملاحظه می باشد. کاهش تلفات کل توان حقیقی در سیستم با کنترل توزیع توان در خطوط انتقال معین، یک هدف مهم و با ارزش تلقی می شود. تلفات خطوط انتقال در یک سیستم قدرت را می توان با جبران توان راکتیو ، کاهش داد. در این مقاله از مدل تزریقی UPFC برای تحلیل حالت ماندگار سیستم قدرت استفاده می کنیم تا تاثیر آن را در پخش بار و کاهش تلفات خطوط انتقال تبیین کنیم. شبیه سازی ها با برنامه نویسی در محیط MATLAB ، بر روی سیستم ۳۰ شینه استاندارد IEEE به عنوان سیستم نمونه انجام گردید. در این شبیه سازی ابتدا تاثیر ولتاژ تزریقی سری با تغییر مشخصه های دامنه و فاز آن بر روی پخش بار و تلفات آن خط و نیز تلفات در کل سیستم بررسی شد و سپس تاثیر شاخه موازی در شرایطی که مشخصه های وابسته به سری بهترین نتایج را داراست ، مورد بررسی قرار گرفت.

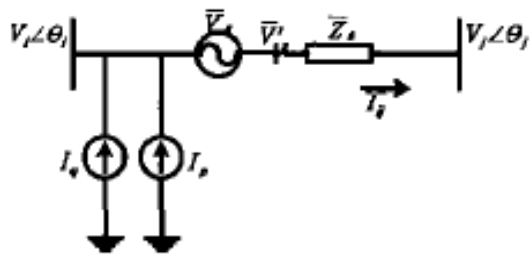
کلید واژه- ادوات FACTS, UPFC ، کاهش تلفات ، پخش بار ، الگوریتم نیوتن _ رافسون

۱- مقدمه

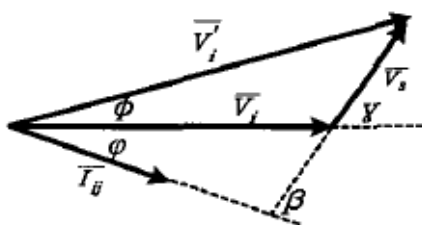
نخستین بار در سال ۱۹۸۸ توسط Hingorani معرفی گردید [۳].

از آن زمان تا کنون انواع مختلف ادوات FACTS عرضه شده که یکی از مفیدترین، موثرترین و جامعترین آنها ، UPFC میباشد که از دو منبع ولتاژ سنکرون (SVS) پشت به پشت (back to back) استفاده میکند و قادر است بطور همزمان یا انتخابی همه پارامترهای تاثیرگذار بر پخش بار در خط (ولتاژ، امپدانس و زاویه فاز) را کنترل کند. به عبارتی دیگر قابلیت کنترل مستقل هر دو توان اکتیو و راکتیو در خط را دارد [۲]. برای بررسی و تحقیق اثر و نقش UPFC در شرایط پایدار یا حالت ماندگار سیستم و پخش بار مدل های مختلفی معرفی شده است که از سال ۱۹۹۱ که توسط Gyugiy اولین مدل عرضه شد تاکنون پیشرفتهای زیادی بویژه در تحلیل بهتر سیستمها صورت گرفته [۲] که ما نیز در این مقاله بدون دستکاری ماتریس ژاکوبین با انتخاب

توان انتقالی از یک خط انتقال AC تابعی از امپدانس خط ، دامنه ولتاژ پایانه های ابتدا و انتهای خط ، و نیز زاویه یا فاز ما بین این ولتاژها می باشد [۱]. افزایش طول خط و گسترش شبکه های انتقال نیرو ، مشکلات خط انتقال را طبعاً افزایش می دهد. یکی از این مشکلات جدی ، بحث تلفات در خطوط انتقال است که از لحاظ اقتصادی بسیار حائز اهمیت می باشد. جبران کننده های سری ، موازی و جابجاگرهای فازی متداول، قادر به کنترل سریع ، لحظه ای و با ظرفیت زیاد کنترل کننده ها نیستند. امروزه با معرفی کنترل کننده های مبتنی بر الکترونیک قدرت ، تجهیزاتی برای کنترل سریع موسوم به ادوات FACTS مورد بررسی، توسعه و استفاده در سیستمهای قدرت، قرار گرفتند. مفهوم سیستمهای انتقال AC قابل انعطاف یعنی FACTS ،



شکل ۲. الف. این مدل UPFC شامل منبع ولتاژ سری و منبع جریان موازی است.

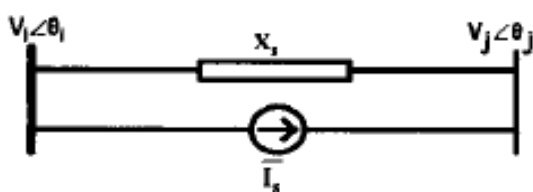


شکل ۲.ب. دیاگرام برداری مدار فوق

در این مدل، جریان های اکتیو و راکتیو شاخه های موازی با I_p و I_q مشخص شده است. امیدانس ترانسفورماتور سری با Z_s مشخص شده است.

۲-۲- مدل شاخه سری

در UPFC، هم دامنه و هم فاز منبع ولتاژ سری قابل کنترل می باشند. فرض کنید منبع ولتاژ بصورت سری در خط ما بین شین های i و j متصل شده باشد. این شاخه سری را می توان به صورت یک منبع ولتاژ ایده آل V_s که با راکتانس خط یعنی X_s سری شده است، مدل کرد [۳].

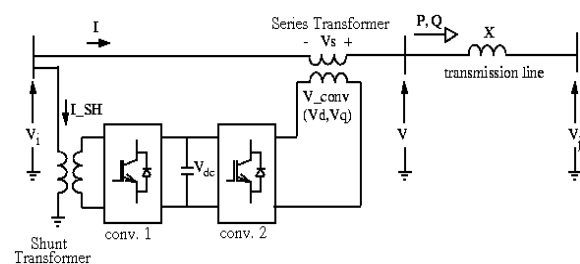


شکل ۳. مدار معادل نرتن شاخه سری مدل شاخه سری

مدلی مناسب برای UPFC، پخش بار انجام می‌دهیم و تلفات نهایی سیستم را نهایتاً محاسبه می‌کنیم.

۲- مفاهیم اساسی و اصول کاربردی UPFC

UPFC از دو مبدل منبع ولتاژ که پشت به پشت از طریق یک خازن به یکدیگر متصل گشته اند ، تشکیل میشود. (شکل ۱)



شکل ۱. دیاگرام تک خطی، UPFC

این تجهیز یک ولتاژ AC سری به خط انتقال تزریق میکند و پخش توان را از طریق کنترل دامنه و فاز ولتاژ تزریقی تنظیم مینماید. کانورتور شنت ، توانهای اکتیو و وراکتیو را با سیستم تبادل میکند و موجب جبران مستقل و خودکار شاخه موازی در سیستم میگردد.

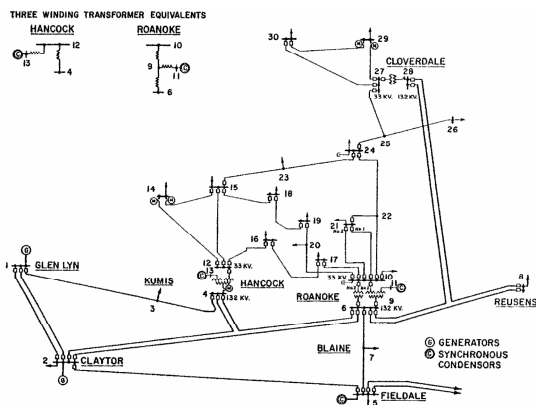
۲-۱-مدل UPFC

در این مقاله الگوی نشان داده شده در شکل ۲.الف به عنوان مدل UPFC استفاده میشود [۲]. این مدل کاربرد وسیعی در تحقیقات و مطالعات بر روی تاثیر UPFC در سیستمها دارد.

در این آرایش چون هر دو مقدار اندازه و زاویه ولتاژ قابل کنترل است. لذا هم توان راکتیو و هم توان اکتیو با خط متبادله می‌کند.

۳- نتایج شبیه سازی

در قسمت قبلی، مدل UPFC برای مطالعات پخش بار، معرفی شده بود. در این بخش برای بررسی تاثیر UPFC در پخش بار و تلفات توان، از این مدل استفاده می کنیم. سیستمی که برای شبیه سازی ها معمولاً استفاده می شود، سیستم ۱۴ شینه IEEE است که برای مطالعات موردی و صرفاً بحث روی موثر بودن اضافه کردن یک تجهیز FACTS بسیار مفید است. اما برای نشان دادن میزان تاثیر اضافه کردن یک تجهیز مثلاً UPFC در تلفات کل و این که در شرایط تنظیمی زیادی، امکان افزایش تلفات در یک خط هم وجود دارد، و همچنین نزدیک تر شدن به سیستمهای گسترده واقعی موجود، علیرغم مشکلات و محدودیت های برنامه، شبیه سازی را بر روی سیستم ۳۰ شینه IEEE انجام دادیم که در شکل ۵ نشان دادیم:



شکل ۵. سیستم ۳۰ شینه IEEE

۳-۱- تاثیر UPFC در پخش بار با تنظیم ولتاژ سری

برای بررسی تاثیر شاخه سری ابتدا با فرض $Q_{shunt}=0$ ، UPFC را بین شین ۲ و ۴ نصب کردیم و V_s سری را تغییر دادیم. این تغییرات به این نحو صورت گرفت که با توجه به این که V_s دارای دامنه و فازی است که طبق روابط بند ۳ به V_i وابسته شدند، لذا برای تغییر

برای بدست آوردن مدل شاخه سری، منبع ولتاژ V_s با منبع جریان $I_s = -jbsV_s$ که با X_s موازی است، جایگزین شده است [۴].

$$\overline{S_{is}} = \overline{V_i}(-\overline{I_s})^* \quad (1)$$

$$\overline{S_{js}} = \overline{V_j}(-\overline{I_s})^* \quad (2)$$

$$\overline{S_{is}} = \overline{V_i}[jb_s r \overline{V_i} e^{j\gamma}]^* = -b_s r V_i^2 \sin \gamma - jb_s r V_i^2 \cos \gamma \quad (3)$$

اگر فرض کنیم:

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$$

آنگاه:

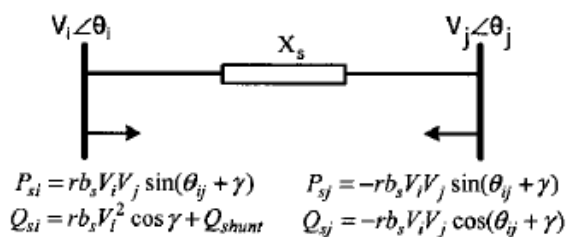
$$\overline{S_{js}} = \overline{V_j}[-jb_s r \overline{V_i} e^{j\gamma}]^* = -b_s r V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) + jb_s r V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \quad (4)$$

$$\overline{V_s} = r \overline{V_i} \quad (5)$$

۳-۲- مدل کلی UPFC

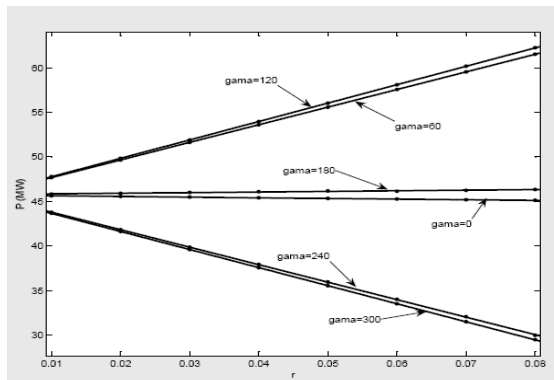
شاخه موازی برای تامین توان اکتیو، که به سیستم تزریق می شود، استفاده شده است. از این رو، این مقدار توان باید به معادله آخر اضافه شود.

توان راکتیو کانورتور شنت بطور مستقل می تواند کنترل گردد و در نتیجه بصورت یک منبع توان راکتیو موازی قابل کنترل مدل می شود. لذا برای بدست آوردن مدل کلی UPFC، توان راکتیو تزریقی به باس ۱، باید به مدل شاخه سری اضافه گردد. مدل کلی که نهایتاً ما در M-file نرم افزار MATLAB در الگوریتم نیوتن رافسون استفاده کردیم که موسوم به مدل تزریقی (Injection model) UPFC است در شکل ۴ آورده ایم:



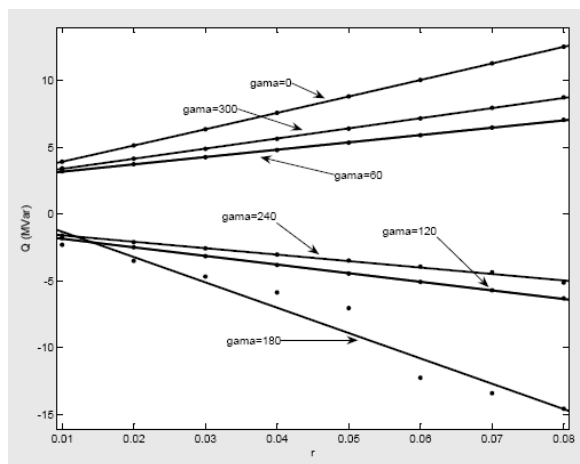
شکل ۴. مدل کامل UPFC

اکتیو را می توان انتقال داد و در مقایسه با حالت بدون UPFC که $\gamma=0$ و $r=0$ است، افزایش چشمگیری دارد:



شکل ۶. تاثیر r و γ شاخه سری UPFC در توان انتقالی از خط ۴_۲

با بررسی نمودار مربوط به تغییرات توان راکتیو این خط به نظر می رسد بدون UPFC وضعیت بهتر است. اما صرفنظر از تغییرات کوچک به هنگام $\gamma=120$ در r های کوچکتر، Q کمتری داریم:



شکل ۷. تاثیر r و γ شاخه سری UPFC در میزان انتقال توان راکتیو خط ۴_۲

حال چنانچه منحنی تغییرات میزان تلفات خط ۴_۲ را نسبت به r رسم کنیم مشاهده می شود $\gamma=240$ موثرتر است و این در حالی است که با این مقدار زاویه ولتاژ تزریقی سری، میزان توان انتقالی از خط کاهش می یابد. پس با یافتن یک نقطه بهینه، با کاهش مقداری از توان انتقالی

دامنه، r و برای تغییر فاز، γ که زاویه ما بین V_s و V_i است (شکل ۲.ب) را تغییر دادیم.

حوزه تغییرات r از 0.01 تا 0.08 و γ از 0 تا 360 به صورت زیر است:

$$r = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08$$

$$\gamma = 0, 60, 120, 180, 240, 300, 360$$

با الگوریتم نیوتن-رافسون با اعمال مدل کلی و تزریقی UPFC (شکل ۴) و تغییرات فوق، توان اکتیو و راکتیو از شین ۲ به ۴، تلفات اکتیو و راکتیو این خط و همچنین تلفات کلی سیستم را در ۵۶ حالت فوق بدست آوردیم:

Power at bus & line flow			--Line loss--		--Total loss--	
MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	MW	Mvar
gamma=0						
45.631	3.915	45.798	1.109	-0.501	17.569	22.214
45.551	5.130	45.839	1.114	-0.480	17.546	22.212
45.474	6.350	45.915	1.120	-0.453	17.531	22.237
45.398	7.576	46.026	1.128	-0.422	17.524	22.291
45.325	8.806	46.172	1.138	-0.385	17.524	22.375
45.253	10.042	46.354	1.149	-0.342	17.532	22.487
45.183	11.284	46.571	1.162	-0.295	17.547	22.629
45.115	12.531	46.823	1.177	-0.241	17.571	22.801
gamma=60						
47.680	3.210	47.788	1.205	-0.210	17.831	23.146
49.651	3.725	49.791	1.309	0.112	18.077	24.098
51.625	4.252	51.799	1.417	0.448	18.339	25.100
53.600	4.790	53.814	1.530	0.797	18.615	26.153
55.579	5.339	55.834	1.647	1.161	18.906	27.257
57.559	5.899	57.861	1.769	1.539	19.212	28.414
59.543	6.471	59.893	1.895	1.931	19.534	29.623
61.528	7.054	61.931	2.027	2.338	19.871	30.886
gamma=120						
47.783	-1.816	47.818	1.220	-0.122	17.959	24.084
49.837	-2.497	49.900	1.327	0.203	18.251	25.112
51.896	-3.165	51.992	1.439	0.545	18.557	26.189
53.959	-3.822	54.094	1.557	0.903	18.878	27.314
56.026	-4.468	56.204	1.680	1.276	19.214	28.488
58.098	-5.102	58.322	1.808	1.666	19.564	29.710
60.175	-5.724	60.447	1.942	2.072	19.929	30.981
62.256	-6.335	62.577	2.081	2.493	20.309	32.301
gamma=180						
45.818	-2.322	45.877	1.121	-0.428	17.721	23.157
45.905	-3.514	46.039	1.127	-0.419	17.767	23.238
45.994	-4.701	46.233	1.134	-0.404	17.820	23.346
46.084	-5.884	46.458	1.143	-0.386	17.880	23.482
46.176	-7.062	46.712	1.153	-0.362	17.947	23.643
46.139	-12.287	47.747	1.218	-0.122	18.300	25.104
46.236	-13.447	48.152	1.237	-0.073	18.382	25.314
46.335	-14.602	48.581	1.257	-0.018	18.470	25.551
gamma=240						
43.771	-1.621	43.802	1.023	-0.725	17.455	22.212
41.812	-2.107	41.865	0.934	-1.004	17.242	21.371
39.854	-2.582	39.938	0.849	-1.270	17.044	20.579
37.899	-3.047	38.022	0.768	-1.523	16.859	19.835
35.947	-3.501	36.117	0.691	-1.762	16.689	19.140
33.996	-3.944	34.224	0.619	-1.987	16.533	18.493
32.048	-4.377	32.346	0.552	-2.200	16.391	17.893
29.950	-5.152	30.390	0.485	-2.413	16.281	17.251
gamma=300						
43.665	3.419	43.798	1.014	-0.797	17.348	21.347
41.622	4.144	41.828	0.928	-1.060	17.111	20.498
39.584	4.881	39.884	0.846	-1.308	16.889	19.696
37.551	5.630	37.970	0.769	-1.540	16.681	18.942
35.522	6.389	36.092	0.698	-1.756	16.488	18.236
33.497	7.161	34.254	0.632	-1.956	16.310	17.578
31.477	7.943	32.464	0.571	-2.140	16.145	16.967
29.462	8.737	30.730	0.515	-2.308	15.996	16.404
gamma=360						
45.631	3.915	45.798	1.109	-0.501	17.569	22.214
45.551	5.130	45.839	1.114	-0.480	17.546	22.212
45.474	6.350	45.915	1.120	-0.453	17.531	22.237
45.398	7.576	46.026	1.128	-0.422	17.524	22.291
45.325	8.806	46.172	1.138	-0.385	17.524	22.375
45.253	10.042	46.354	1.149	-0.342	17.532	22.487
45.183	11.284	46.571	1.162	-0.295	17.547	22.629
45.115	12.531	46.823	1.177	-0.241	17.571	22.801

اگر توان انتقالی از خط _ اکتیو و راکتیو _ را با توجه به نتایج فوق بر حسب r رسم نماییم، مشاهده می شود در این Line در $\gamma=120$ و $r=0.08$ بیشترین میزان توان

۳-۲- تاثیر مدل کامل UPFC در کاهش تلفات توان انتقالی

در این بخش با توجه به این که در قسمت قبلی $\gamma=240$ و $r=0.08$ را مناسب دانستیم، برای بررسی تاثیر شاخه موازی، در دو حالت:

$$Q = -15 \text{ MVar}, Q = +15 \text{ MVar}$$

نتایج Load Flow (پخش بار) را بدست می آوریم:

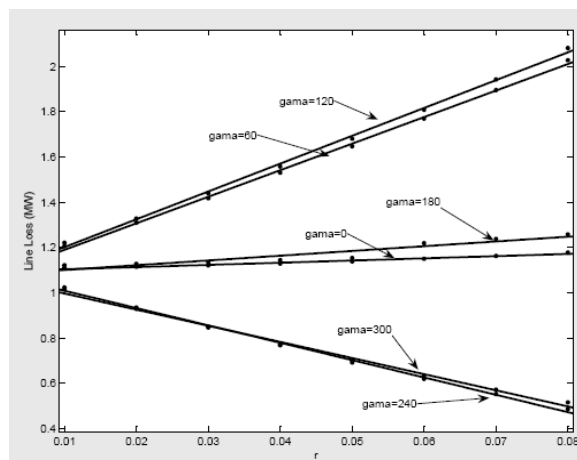
Power at bus & line flow			--Line loss--		--Total loss--	
MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	MW	Mvar
Q=+15MVar						
30.053	-5.902	30.627	0.501	-2.294	16.503	18.651
Q=-15MVar						
29.917	-8.159	31.010	0.499	-2.390	16.277	17.122
Without UPFC						
45.712	2.705	45.792	1.106	-0.517	17.599	22.244

۴- نتیجه گیری

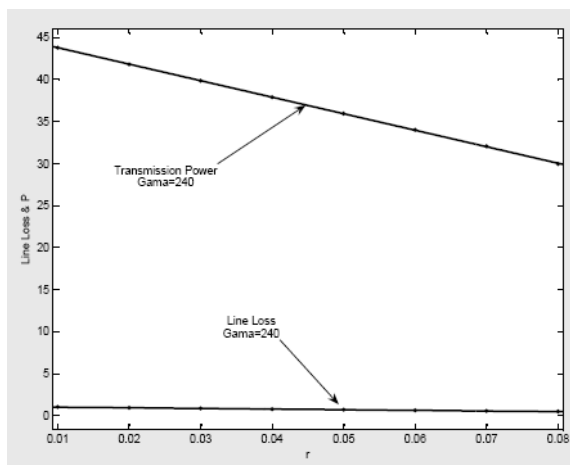
در این مقاله مدل پیشنهادی UPFC مورد استفاده قرار گرفت تا تاثیر آن را بر روی پخش بار در یک سیستم قدرت نشان دهد. در اینجا مدل مطرح شده در واقع به نوعی، بار متغیر برای شین های مورد نظر قلمداد می شود که همانطور که مشاهده می شود و مدل بر این اساس تعریف شده، این بارها به ولتاژ شینها وابسته شدند. برای معادلات پخش بار از الگوریتم نیوتن-رافسون بهره بردیم که نسبت به روش های دیگر چون گوس سایدل مزایای بیشتری دارد، از جمله اینکه مدل کردن UPFC بصورت بارهای متغیر، الگوریتم نیوتن رافسون را زیاد تغییر نمی دهد و در ماتریس ژاکوبین آن دخالت نمی کند، بنابراین پیاده سازی ساده تر است. در حالیکه در روش های دیگری که در مقالات برای بررسی نقش UPFC استفاده می گردد، لازم است عناصر ماتریس ژاکوبین تغییر داده شوند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد مناسبترین مکان نصب UPFC با هدف کاهش تلفات، در خطوط اصلی شبکه می باشد. برای کاهش تلفات در این باب، دو راه وجود دارد: روش اول افزایش توان انتقالی در خطوطی است که امپدانس کمی دارند. این امر با تزریق ولتاژ سری در محل ارسال توان که UPFC در آن شین وصل است، تحقق می یابد. در این روش

بخش زیادی از تلفات خط رفع می گردد و از نظر اقتصادی مناسبتر است. علت این امر نیز بالابودن امپدانس خط است (شکل ۸).

با توجه به این نمودار و محاسبه درصد تغییرات P و Line Loss نتیجه می شود در $\gamma=240$ تنها در بدترین حالت اگر 26% توان انتقالی را کاهش دهیم، 52.6% از میزان تلفات خط مذکور کاسته می شود (شکل ۹).



شکل ۸. تاثیر تغییر و تنظیم مشخصه های منبع ولتاژ سری در میزان تلفات خط ۲-۴



شکل ۹. مقایسه میزان کاهش تلفات و توان اکتیو انتقالی از خط ۲-۴

به دلیل افزایش توان انتقالی اندازه UPFC، باید بزرگتر باشد که در نتیجه آن را گرانتر می کند. روش دیگر، کاهش توان انتقالی در خطوط با امپدانس بالاست که در واقع دارای طول بیشتری نیز هستند. و بالاخره برای کاهش تلفات از حیث اقتصادی چنانچه بخواهیم UPFC نصب کنیم این روش از حیث اقتصادی بهتر می باشد .

سپاسگزاری

از معاونت آموزشی و پژوهشی دانشکده برق (IUST(ee) و صبر، حمایت و تشویق دکتر احمد غلامی قدردانی میگردد. همچنین از راهنماییهای مهندس حسینی، و کمکهای آقای روزبه رجبی و نعمت دولتشا و حیدر داودی در تکمیل کار تشکر می شود.

مراجع

- [1] N.G. Hingorani, "High Power Electronics and Flexible AC Transmission System," *IEEE Power Engineering Review*, Volume: 8 Issue:7, pp.3-4, July, 1998
- [2] L. Gyugyi, "A unified flow control concept for flexible AC transmission systems," *AC and DC Power Transmission, 1991*, International Conference on, pp.19-26, 1991
- [3] C.Fuerte-Esquivel, E.Acha, "A Newton Type Algorithm for the control of power flow in electrical power networks," *IEEE Transactions on power systems*, Volume:12, No.4, pp.1474-1480, November, 1997
- [4] D.J.Gotham, G.T.Heydt, "Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices," *IEEE Transactions on power systems*, vol.13, NO.1, pp. 60-65, February 1998
- [5] M.Noroozian, L.Angquist, M.Ghandhari, G.Anderson, "Use of UPFC for optimal power flow control," *IEEE Transactions on power delivery*, Volume: 12 , Issue: 4 , pp. 1629-1634, Oct. 1997.