

اثر تخصیص UPFC بر تلفات توان سیستم انتقال

چکیده — کنترل کننده‌ی یکپارچه‌ی پخش بار (UPFC)، عضو پیشرفته‌ای از گروه سیستم‌های انتقال AC انعطاف پذیر (FACTS) است. در این مقاله، عملکرد UPFC بررسی می‌شود تا تلفات توان را در خط انتقال با استفاده از تحلیل پخش بار، کمینه سازد. تخصیص تلفات، اهمیت زیادی در تعیین هزینه‌ی انتقال توان است. این مقاله بر روی مدل سازی حالت ماندگار UPFC برای پیاده سازی در الگوریتم پخش بار نیوتون-رافسون (NR)، تمرکز دارد. یک برنامه‌ی MATLAB نیز برای پیاده سازی UPFC در برنامه‌ی پخش بار نیوتون-رافسون (NR)، توسعه داده شده است. مطالعات موردی نیز روی سیستم ۳۰-شینه‌ی IEEE اجرا شده تا تلفات توان انتقال را کمینه سازد. اثرات تخصیص UPFC روی عملکرد حالت ماندگار سیستم، مورد تحقیق قرار گرفته است.

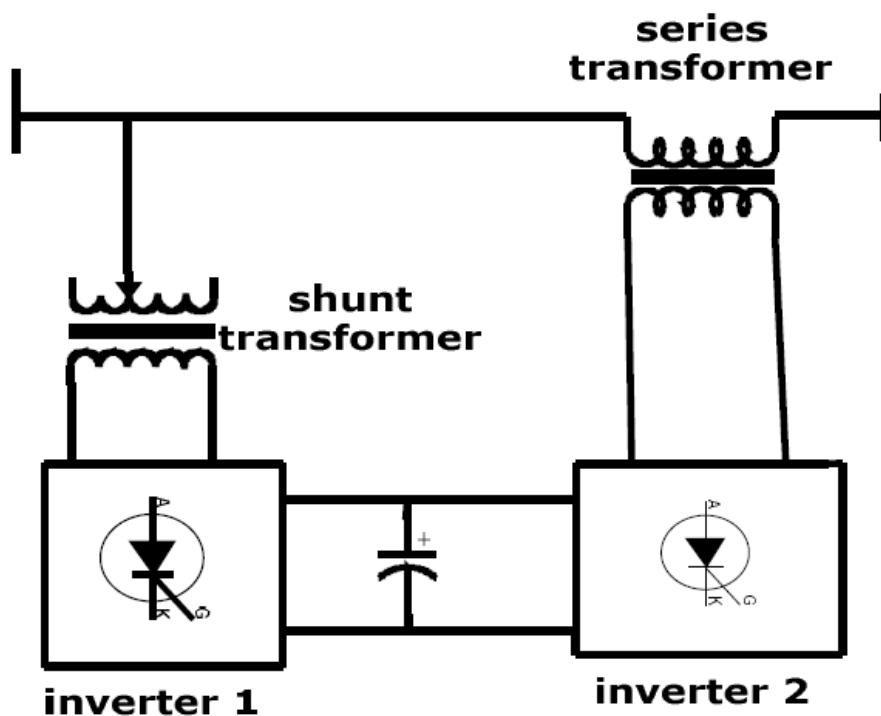
اصطلاحات شاخص — ادوات FACTS، کنترل کننده یکپارچه پخش بار، الگوریتم پخش توان نیوتون-رافسون، پخش بار.

۱. مقدمه

پس از توسعه‌ی سیستم قدرت و بویژه باز شدن بازار انرژی الکتریکی، کنترل پخش بار در خط انتقال بیش از پیش اهمیت یافته است. سیستم انتقال AC انعطاف پذیر، یک فناوری در حال تکامل مبتنی بر پاسخ بوده که به شبکه‌های برق کمک می‌کند تا بطور کامل از تجهیزات انتقال خود استفاده کنند. مفهوم اولیه‌ی آن توسط N.G.Hingorani [۱] معرفی شد. از آن زمان، انواع مختلف ادوات FACTS پیشنهاد شده است. این تجهیزات می‌توانند ابزاری برای کاهش جریان‌های عبوری در خطوط با بارهای سنگین شوند که منجر به افزایش قابلیت بار، تلفات کم در سیستم و بهبود پایداری شبکه می‌گردد. آنها می‌توانند پخش بار را در شبکه کنترل کنند. از میان آنها، UPFC تطبیق پذیرترین و کارآمدترین تجهیز است که توسط L.Gyugyi [مراجع ۲ و ۳] پیشنهاد شد. UPFC یک تجهیز پیشرفته در سیستم قدرت است که قادر به آرایه‌ی کنترل همزمان دامنه‌ی ولتاژ، پخش بارهای اکتیو و راکتیو در خط انتقال توان می‌باشد. به منظور بررسی کارآمدی اثر UPFC روی سیستم‌های قدرت، فرمول بندی مدل صحیح و مناسب آنها، ضروری است. در زمینه‌ی تحلیل پخش بار، مدل‌های گوناگونی از UPFC منتشر شده است. مدل منبع ولتاژ برای مطالعه‌ی رفتار UPFC در تنظیم توان اکتیو، توان راکتیو و پروفایل ولتاژ، کاربرد دارد. یک روش تزریق توان حالت ماندگار برای UPFC، همراه با روش نیوتون رافسون در پخش بار، توسط A.M.Vural [۵] بررسی شده است. برای مطالعه‌ی پایداری سیستم قدرت، از مدل تزریق توان UPFC استفاده می‌شود؛ این روش عملکرد دینامیکی سیستم را بهبود می‌بخشد.

۲. اصل عملیاتی UPFC

کنترل کننده‌ی یکپارچه پخش توان (بار)، تشکیل شده از دو مبدل منبع ولتاژ بوده که یکی مبدل سری و دیگری مبدل شنت است که از طریق یک لینک dc که با یک خازن ذخیره ساز dc ایجاد شده، به صورت back-to-back به هم مرتبط می‌باشند (شکل ۱). دو ترانس تزویج نیز برای ایزوله کردن مبدل از خط اصلی، مورد نیاز است. ترانسفورماتور سری به مبدل ۲ متصل بوده و ترانسفورماتور موازی به مبدل ۱ متصل است که در شکل نیز مشاهده می‌کنید. ترانسفورماتور، سطوح ولتاژ را بین شبکه‌ی برق و ولتاژ تولیدی توسط مبدل ها، تطبیق می‌دهد. دامنه و فاز ولتاژ خروجی هر دو مبدل را می‌توان کنترل کرد. توان حقیقی می‌تواند آزادانه در هر یک از جهات بین ترمینال‌های ac دو مبدل، جریان یابد. در اینجا، مبدل ۲ کار اصلی را با تزریق ولتاژ متناوب V_{se} با فرکانس سیستم و دامنه‌ی متغیر $|V_{se}|$ ، $(|V_{se}| \leq 0 \leq |V_{se}|_{max})$ و زاویه فاز $(0 \leq \gamma \leq 2\pi)$ بصورت سری با خط، انجام می‌دهد. از سویی دیگر، کاربرد اصلی مبدل ۱ برای آرایه‌ی توان حقیقی مورد نیاز مبدل ۲ در لینک dc مشترک می‌باشد. او همچنین می‌تواند توان حقیقی را بطور کنترل پذیری تولید یا جذب کند و جبران‌سازی راکتیو شنت مستقل برای خط، آرایه دهد. مبدل ۲ توان راکتیو مورد نیاز را به صورت محلی تولید یا جذب می‌کند و توان فعال را در نتیجه‌ی ولتاژ تزریقی سری، تبادل می‌کند.



شکل ۱. مدار ابتدایی UPFC

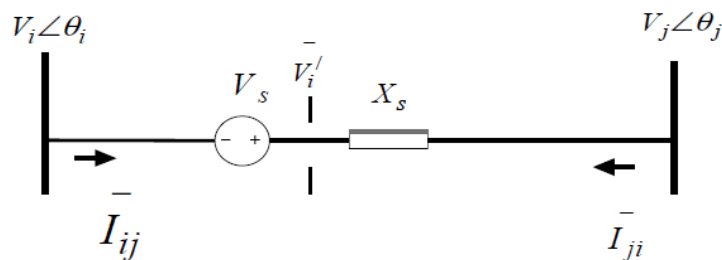
۳. مدل تزریق UPFC برای مطالعات پخش بار

در این بخش، یک مدل از UPFC که مدل تزریق UPFC نامیده می‌شود، بدست خواهد آمد.

این مدل به فهم اثر UPFC روی سیستم قدرت در حالت ماندگار، کمک می‌کند. این مدل را می‌توان در مدل پخش بار حالت ماندگار، جای داد. از آنجا که مبدل منبع ولتاژ سری وظیفه‌ی اصلی UPFC را انجام می‌دهد، بنابراین مدل سازی یک مبدل منبع ولتاژ سری بدست می‌آید.

الف. مدل مبدل منبع ولتاژ با اتصال سری

فرض کنید که یک منبع ولتاژ سری بین نودهای i و j در سیستم قدرت قرار دارد. مبدل منبع ولتاژ سری را می‌توان با یک ولتاژ سری ایده آل \bar{V}_s سری با راکتانس X_s به صورت شکل ۲، مدل کرد.



شکل ۲. نمایی از یک VSC سری.

داریم:

$$\bar{V}_i' = \bar{V}_s + \bar{V}_i \quad (1)$$

که در آن

$$\bar{V}_i' = \text{ولتاژ ساختگی پشت راکتانس سری}$$

$$\bar{V}_s = \text{منبع ولتاژ سری}$$

$$\bar{V}_i = \text{ولتاژ در گره } i\text{-م}$$

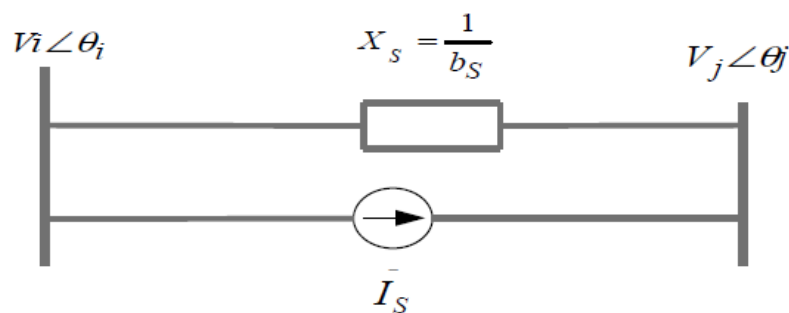
منبع ولتاژ سری \bar{V}_s دارای فاز و دامنه‌ی کنترل پذیر است، یعنی

$$\bar{V}_s = r\bar{V}_i e^{j\gamma} \quad (2)$$

که $r =$ ضریب منبع ولتاژ سری بوده $(0 < r < 1)$ و $\gamma =$ زاویه منبع ولتاژ سری $(0 < \gamma < 2\pi)$

مدل تزریق با جایگزینی مدار معادل منبع ولتاژ سری \bar{V}_s به صورت مدار معادل نیوتون به صورت نشان داده

شده در شکل ۳، بدست می‌آید. که منبع جریان $\bar{I}_s = -jb_s \bar{V}_s$ و $b_s = \frac{1}{X_s}$ ؛



شکل ۳. جایگزینی منبع ولتاژ سری با یک منبع جریان

توان تزریق شده به شین i-ام

$$\bar{S}_{is} = \bar{V}_i (\bar{I}_s)^* \quad (3)$$

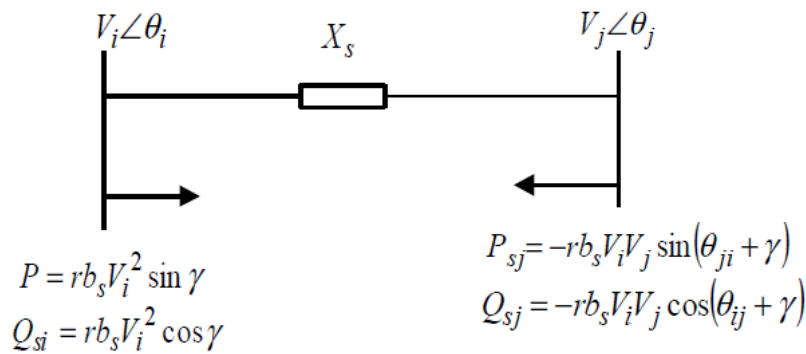
$$\begin{aligned} S_{is} &= \bar{V}_i \left[jb_s \bar{V}_i r e^{j\gamma} \right]^* \\ &= -b_s r V_i^2 \sin \gamma - jb_s V_i^2 \cos \gamma \end{aligned} \quad (4)$$

توان تزریق شده به شین j-ام

$$\bar{S}_{js} = \bar{V}_j (\bar{I}_s)^* \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_{js} &= \bar{V}_j [-jb_s r \bar{V}_i e^{j\gamma}]^* \\ &= b_s r V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) + jb_s r V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \end{aligned} \quad (6)$$

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



شکل ۴. مدل تزریقی برای VSC سری

ب. مدل مبدل منبع ولتاژ شنت

از مبدل ۱ اساساً برای ارایی توان اکتیو استفاده شده که این توان با مبدل ولتاژ سری به سیستم تزریق می‌گردد. با چشم پوشی از تلفات

$$P_{\text{conv1}} = P_{\text{conv2}}$$

توان ظاهری تولید شده توسط مبدل منبع ولتاژ سری، به صورت زیر است

$$S_{\text{conv2}} = \bar{V}_s \bar{I}_{ij}^* = r e^{j\gamma} \bar{V}_i \left(\frac{\bar{V}_i - \bar{V}_s}{jX_s} \right)^* \quad (7)$$

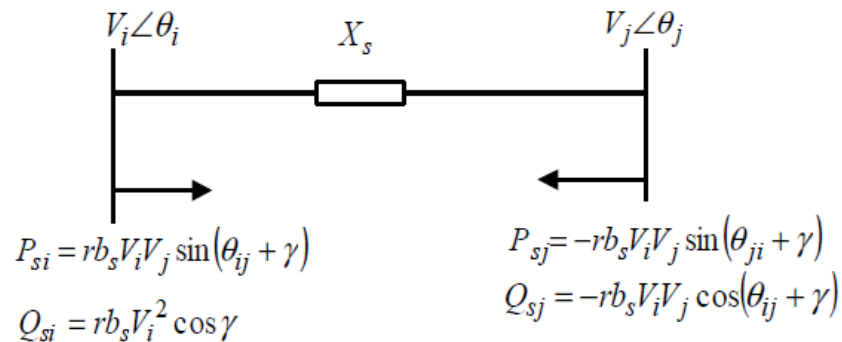
پس از ساده سازی، توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی توسط مبدل ۲ به صورت زیر خواهد شد

$$P_{\text{con2}} = r b_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - r b_s V_i^2 \sin \gamma \quad (8)$$

$$Q_{\text{con2}} = -r b_s V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) + r b_s V_i^2 \cos \gamma + r^2 b_s V_i^2 \quad (9)$$

توان اکتیو تحویل داده شده یا جذب شده توسط مبدل ۱، بطور مستقل توسط UPFC قابل کنترل است و می‌توان آن را به صورت منبع راکتیو شنت کنترل پذیر جداگانه مدل کرد. فرض می‌شود $Q_{\text{conv1}} = 0$ (در بالا، امکان کنترل Q_{conv1} بررسی شده است). در نتیجه مدل تزریق UPFC، از مدل منبع ولتاژ سری (شکل ۵) به علاوه‌ی توان معادل با $(P_{\text{con1}} + j0)$ در گره ۱ بدست می‌آید. مدل زیر نشان می‌دهد که توان اکتیو

تبادل شده‌ی خالص UPFC با سیستم قدرت، صفر است؛ همان طور که برای UPFC بدون تلفات انتظار می‌رود.



شکل ۵. مدل کامل UPFC

۴. اصلاح ماتریس ژاکوبین برای لحاظ کردن UPFC

مدل تزریق UPFC را می‌توان به آسانی در یک برنامه‌ی پخش بار جای داد. اگر UPFC بین گره i و گره j در یک سیستم قدرت وجود داشته باشد، آنگاه ماتریس ژاکوبین روش نیوتون رافسون با اضافه شدن توان‌های تزریقی مناسب، اصلاح می‌شود. مدل خطی پخش بار Z به صورت زیر است

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}$$

پس از لحاظ کردن UPFC، ماتریس ژاکوبین اصلاح شده را می‌توانید در جدول ۱ مشاهده کنید. (بالانویس ۰ نشان دهنده‌ی عناصر ژاکوبین بدون UPFC است).

$H_{(i,i)} = H^{\circ}_{(i,i)} - Q_{sj}$	$N_{(i,i)} = N^{\circ}_{(i,i)} - P_{sj}$
$H_{(i,j)} = H^{\circ}_{(i,j)} + Q_{sj}$	$N_{(i,j)} = N^{\circ}_{(i,j)} - P_{sj}$
$H_{(j,i)} = H^{\circ}_{(j,i)} + Q_{sj}$	$N_{(j,i)} = N^{\circ}_{(j,i)} + P_{sj}$
$H_{(j,j)} = H^{\circ}_{(j,j)} - Q_{sj}$	$N_{(j,j)} = N^{\circ}_{(j,j)} + P_{sj}$
$J_{(i,i)} = J^{\circ}_{(i,i)}$	$L_{(i,i)} = L^{\circ}_{(i,i)} + 2Q_{sj}$
$J_{(i,j)} = J^{\circ}_{(i,j)}$	$L_{(i,j)} = L^{\circ}_{(i,j)}$
$J_{(j,i)} = J^{\circ}_{(j,i)} - P_{sj}$	$L_{(j,i)} = L^{\circ}_{(j,i)} + Q_{sj}$
$J_{(j,j)} = J^{\circ}_{(j,j)} + P_{sj}$	$L_{(j,j)} = L^{\circ}_{(j,j)} + Q_{sj}$

جدول ۱. ماتریس ژاکوبین اصلاح شده

۵. نتایج

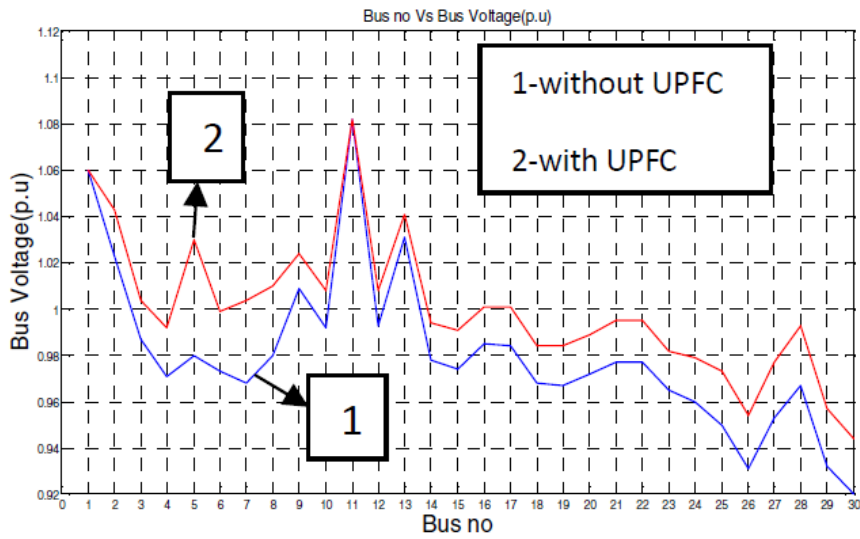
از شبکه‌ی ۳۰-شینه‌ی IEEE برای نشان دادن عملکرد کمی UPFC استفاده شده است. از UPFC برای تنظیم توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط، استفاده شده است. برنامه‌ی MATLAB نیز به منظور نشان دادن تلفات توان اکتیو و راکتیو با و بدون UPFC، استفاده شده است. MVA مبنا برابر با 100 می‌باشد؛

تلفات توان اکتیو بدون UPFC برابر با 19.114MW است؛

تلفات توان راکتیو کل بدون UPFC برابر با 36.09MVA است؛

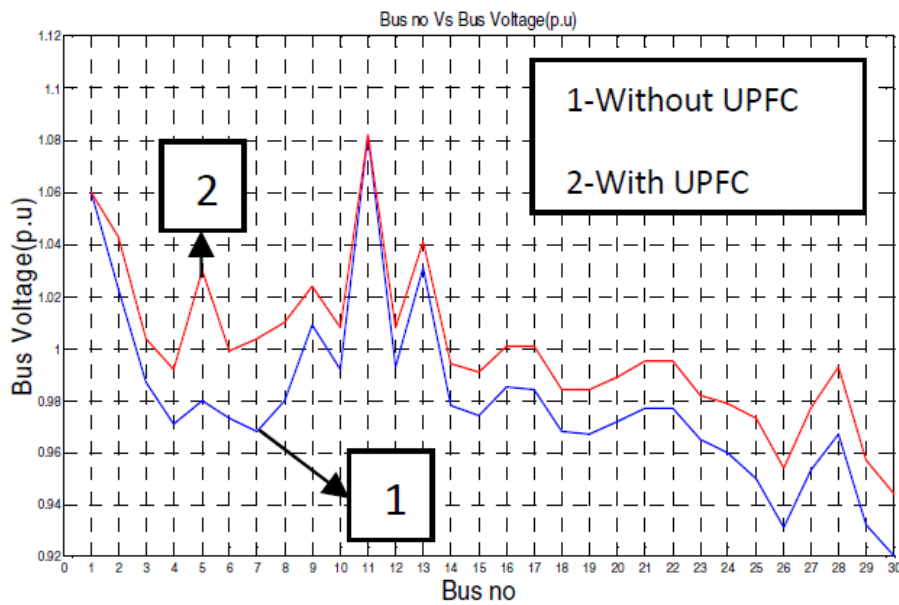
در اینجا X_s برابر با 0.025 pu در نظر گرفته شده است.

شکل ۶ افزایش ولتاژ شین را پس از استفاده از UPFC در شین 6-7 نشان می‌دهد که $r = 0.04$ و $\gamma = 120^\circ$ است.



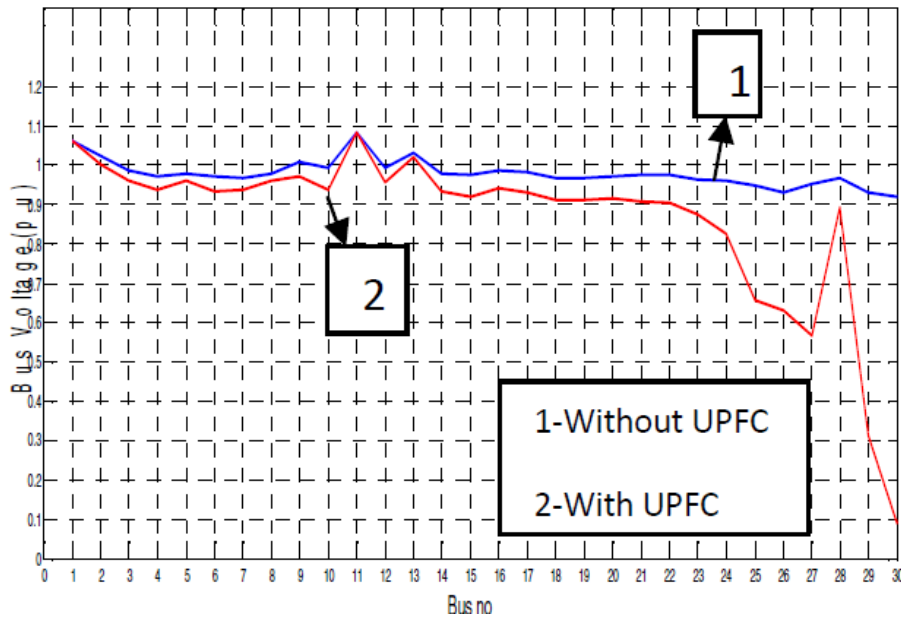
شکل ۶. ولتاژ شین که پس از اعمال UPFC به شین ۶-۷ افزایش یافته است

شکل ۷ ولتاژ افزایش یافته‌ی شین را پس از اعمال UPFC در شین ۱۰-۱۷ نشان می‌دهد که $r = 0.04$ و $\gamma = 120^\circ$ است.



شکل ۷. افزایش ولتاژ شین پس از اعمال UPFC در شین ۱۰-۱۷

از نظر تیوری، UPFC را می‌توان هر جایی در خط انتقال قرار داد. اما گاهی ولتاژ شین به دلیل اعمال UPFC در سیستم قدرت، کاهش می‌یابد. شکل ۸ ولتاژ شین را که پس از اعمال UPFC در شین‌های ۲۹-۳۰ کاهش یافته است، نشان می‌دهد که در آن $r = 0.04$ و $\gamma = 120^\circ$ است.



شکل ۷. کاهش ولتاژ شین پس از اعمال UPFC در شین ۲۹-۳۰

When $r=0.06$ & $\gamma = 120^\circ$		
Line	P_{loss}	Q_{loss}
6-7	18.99	31.688
3-4	18.715	32.65
4-6	19.00	34.932
12-14	18.898	34.367
12-15	19.102	36.05
12-16	N.C	N.C
14-15	N.C	N.C
16-17	N.C	N.C
15-18	18.607	32.898
18-19	18.647	32.474
19-20	N.C	N.C
10-20	19.623	30.923
10-17	19.623	30.937
10-21	19.119	36.118
15-23	244.14	1049.366
23-24	180.880	579.621
22-24	18.691	32.665
25-27	N.C	N.C
24-25	N.C	N.C
25-26	N.C	N.C
8-28	19.109	32.665
6-28	19.115	36.093
25-27	N.C	N.C
28-27	N.C	N.C
27-29	N.C	N.C
27-30	N.C	N.C
6-9	19.11	36.022
4-12	18.764	33.566
29-30	67.595	192.633

جدول ۲. تلفات توان اکتیو و راکتیو به ازای $r = 0.06$ و $\gamma = 120^\circ$ در شین‌های مختلف

When $r=0.04$ & $\gamma = 120^\circ$		
Line	P_{loss}	Q_{loss}
6-7	18.092	31.740
3-4	18.834	33.801
4-6	19.111	36.79
12-14	19.112	36.079
12-15	19.119	36.081
12-16	N.C	N.C
14-15	N.C	N.C
16-17	N.C	N.C
15-18	19.107	36.054
18-19	18.887	34.105
19-20	18.767	33.552
10-20	18.566	33.73
10-17	18.544	33.671
10-21	19.115	36.098
15-23	184.397	585.468
23-24	19.051	35.761
22-24	19.029	35.019
25-27	19.106	36.054

24-25	18.968	34.688
25-26	N.C	N.C
8-28	19.113	36.086
6-28	19.106	36.092
25-27	19.107	36.054
28-27	N.C	N.C
27-29	N.C	N.C
27-30	67.476	194.436
6-9	19.116	36.117
4-12	18.833	333.801
29-30	67.391	193.938

[N.C=not converge]

جدول ۳. تلفات توان اکتیو و راکتیو به ازای $r = 0.04$ و $\gamma = 120^\circ$ در شین‌های مختلف (NC به معنای عدم همگرایی می‌باشد).

۶. نتیجه گیری

ادوات FACTS که کاربرد رایجی در سیستم قدرت برای بهبود پروفایل ولتاژ دارد، پخش بارهای اکتیو و راکتیو را کنترل کرده و قابلیت انتقال را بهبود می‌بخشد. با کمک روش نیوتون رافسون برای پخش بار، مدل

تزریق UPFC حالت ماندگار در سیستم ۳۰-شینه IEEE لحاظ شد. مشاهده شد که تلفات سیستم پس از قرار گرفتن UPFC در سیستم بالا، کاهش یافته است. پروفایل ولتاژ هر شین نیز افزایش یافته است. ولتاژ شین با و بدون UPFC، رسم شده و مقایسه گردیده است.