



## Provide a simple model of the Comprehensive Electric Power Controller

Kiumars Sabzevari

Assistant Professor, Technical and Vocational University of west Islamabad, Technical and Vocational University, Kermanshah, Iran

Received: 01.06.2020 Accepted: 06.14.2020

The Upfc in Power Systems controls the line parameters and the power flow of the lines. On the other hand, controlling the power flow lines parameters in transmission lines, maximizes the capacity of power transmission lines, increases network reliability, reduces line losses, increases power system efficiency, reduces energy loss and consumption management. Therefore, presenting a simple model of UPFC in power systems analysis is of interest to experts. In this paper, a simple model of upfc in steady state is presented. In the proposed model, the converter of the upfc series is modeled with circuit elements. The proposed model will be included in the load distribution program without changing the dimensions of the Jacobine network matrix. To demonstrate the efficiency of the proposed model, the standard 14 bus are simulated.

### Keywords:

FACTS equipment, UPFC, power flow, reactive power control, active power control.

## ارائه مدلی ساده از کنترل کننده جامع توان

### الکتریکی

کیومرث سبزواری\*

استادیار، آموزشکنده فنی و حرفه‌ای اسلام‌آباد غرب، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان کرمانشاه، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۶ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۵

### چکیده

کنترل کننده جامع توان الکتریکی در سیستم‌های قدرت، موجب کنترل پارامترهای خط و توان جاری شده خطوط می‌شود. از سویی کنترل پارامترهای خط و توان جاری شده در خطوط انتقال، سبب بهره‌برداری حداکثری از ظرفیت خطوط انتقال انرژی، افزایش قابلیت اطمینان شبکه، کاهش تلفات خطوط، افزایش بهره‌وری سیستم قدرت، کاهش اتلاف انرژی و مدیریت مصرف می‌شود. ارائه مدل مناسبی از UPFC مورد توجه متخصصان است. در این مقاله مدل ساده‌ای از کنترل کننده جامع توان الکتریکی در حالت ماندگار ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، مبدل سری کنترل کننده جامع توان با عناصر مداری مدل‌سازی شده است. مدل پیشنهادی بدون تغییر ابعاد ماتریس ژاکوبین شبکه، در برنامه پخش بار قرار می‌گیرد. برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی در سیستم چهارده شینه استاندارد شبیه‌سازی شده است.

واژگان کلیدی:

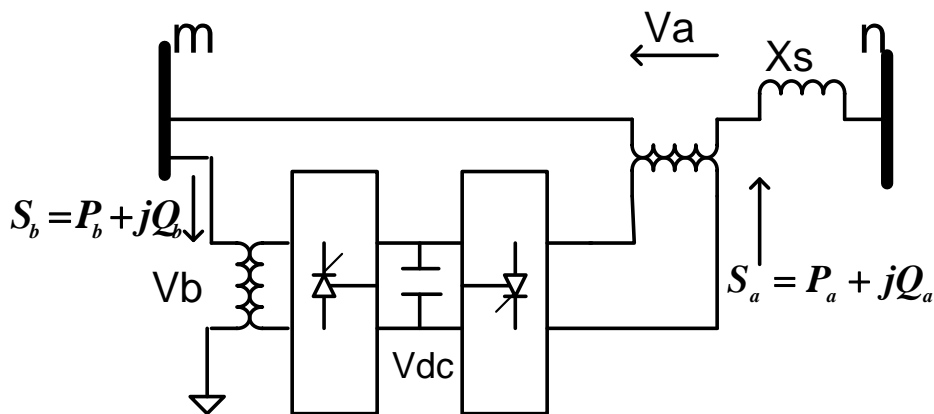
تجهیزات FACTS، UPFC، پخش بار، کنترل توان اکتیو، کنترل توان راکتیو.

۱. مقدمه

امروزه کاربرد ادوات FACTS<sup>۱</sup> به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های بهبود پایداری سیستم قدرت و رفع محدودیت‌های انتقال توان مورد توجه قرار گرفته است [۵-۱]. کنترل‌کننده جامع توان UPFC<sup>۲</sup> واسطه‌ای چندمنظوره در خانواده ادوات FACTS است. کنترل‌کننده جامع توان الکتریکی در شرایط مختلف به‌عنوان جبران‌کننده موازی، سری، تنظیم‌کننده ولتاژ یا جابه‌جاگر فاز و کنترل‌کننده توان با استفاده از کنترل هم‌زمان پارامترهای خط عمل می‌کند؛ از این‌رو قادر به کنترل مستقل و جداگانه توان اکتیو و راکتیو است [۶].

یکی از کاربردهای UPFC، کنترل توان جاری‌شده در خط انتقال و کاهش تلفات توان است. برای بررسی عملکرد سیستم قدرت با حضور کنترل‌کننده جامع توان، در مقاله‌های گوناگون مدل‌های مختلفی از کنترل‌کننده جامع توان ارائه شده است.

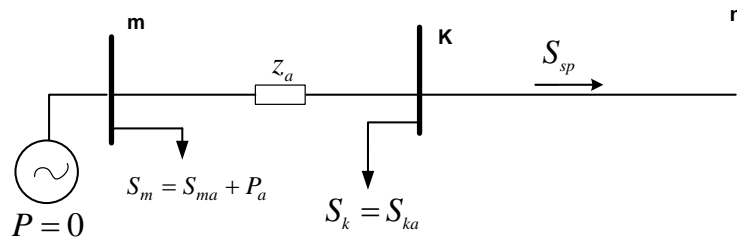
کنترل‌کننده جامع توان مطابق شکل شماره ۱، از دو مبدل سری و موازی تشکیل شده است. مبدل سری با تزریق ولتاژ سری به خط انتقال با دامنه و زاویه فاز قابل کنترل، توان اکتیو و راکتیو به شبکه تزریق می‌کند. مبدل سری توان اکتیو مورد نیاز را از طریق لینک خازنی و مبدل موازی از شبکه تأمین می‌کند. در کنترل‌کننده جامع توان، هرکدام از مبدل‌ها می‌توانند به‌طور مستقل توان راکتیو با شبکه مبادله کنند؛ بنابراین کنترل‌کننده جامع توان با کنترل پارامترهای مؤثر در انتقال توان مانند ولتاژ، امپدانس و زاویه بار، توان جاری‌شده در خط را کنترل می‌کند.



شکل شماره ۱. کنترل‌کننده جامع توان قرار گرفته در سیستم قدرت دو شینه

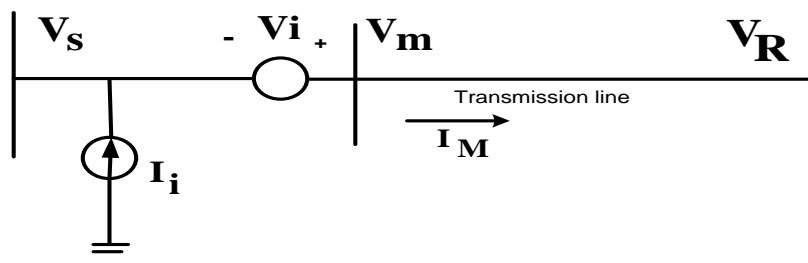
1. Flexible AC Transmission System
2. Unified Power Flow Controller

در مرجع شماره [۱۷] کنترل کننده جامع توان با دو منبع ولتاژ مدل سازی می شود. عملکرد سری کنترل کننده را با منبع ولتاژ سری و عملکرد موازی آن را با یک منبع ولتاژ موازی مدل سازی می کنند. برای شرکت کردن این مدل در برنامه پخش بار، عملکرد مبدل سری و موازی کنترل کننده را با توان مختلط نشان می دهند.



شکل شماره ۲. مدل نهایی UPFC براساس توان مختلط و امپدانس سری [۱۷]

در مرجع شماره [۱۸]، کنترل کننده جامع توان مطابق شکل شماره ۳ با منابع ولتاژ و جریان ایدئال مدل سازی شده است در این مدل، مبدل موازی با یک منبع جریان ایدئال و مبدل سری با یک منبع ولتاژ ایدئال جایگزین شده است.



شکل شماره ۳. مدل UPFC بر مبنای منابع ولتاژ و جریان ایدئال [۱۸]

در مرجع شماره [۷]، کنترل کننده جامع توان الکتریکی براساس رویکرد جداسدنی مدل سازی شده است. این مدل در حالتی که از کنترل کننده جامع توان برای کنترل سه پارامتر ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو استفاده می شود، به کار می رود.

در مراجع [۸ و ۹] مدلی از کنترل کننده جامع توان ارائه شده است. در این مدل، متغیرهای کنترل کننده جامع توان، در برنامه پخش لحاظ شده اند. ایراد این مدل، افزایش اندازه سائز ماتریس ژاکوبین است. در مرجع شماره [۱۰] کنترل کننده جامع توان بر اساس روش تقسیم بندی ماتریس مدل شده است. در مراجع [۱۱ و ۱۳] مدل غیرمستقیم ارائه شده است. در این مدل، تلاش شده است تا

پیچیدگی‌های کدهای توان جاری شده کاهش یابد ولی اندازه ماتریس ژاکوبین به دلیل اضافه کردن متغیرهای حالت، افزایش یافته است. در مراجع [۱۴ و ۱۵] مدل‌هایی برای برخی از ادوات facts پیشنهاد شده است که با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند. در مدل‌هایی که برای کنترل‌کننده جامع توان ارائه شده است، ارتباط بین زاویه آتش مبدل و توان تزریقی مشخص نشده است. در همه مدل‌های موجود، مبدل‌ها با منابع ولتاژ یا جریان جایگزین شده‌اند. مدل نهایی کنترل‌کننده به صورت توان تزریقی به شین نمایش داده می‌شود. استفاده از این مدل‌ها در برنامه‌های پخش بار منجر به تغییر ماتریس ژاکوبین و ساختار برنامه می‌شود. این مقاله، مدل ساده‌ای از کنترل‌کننده جامع توان در حالت ماندگار ارائه می‌کند. در مدل پیشنهادی، توان اکتیو تزریقی مبدل سری با یک مقاومت منفی و توان راکتیو تزریقی مبدل سری با یک راکتانس شبیه‌سازی می‌شوند. همچنین توان راکتیو مبدل موازی به صورت توان متصل به شین نشان داده می‌شود. روابط محاسباتی مقاومت و راکتانس معادل کنترل‌کننده جامع توان در سیستم قدرت تک‌ماشین دوشینه به دست آمده است. مدل ارائه‌شده در سیستم قدرت چهارده شینه شبیه‌سازی می‌شود.

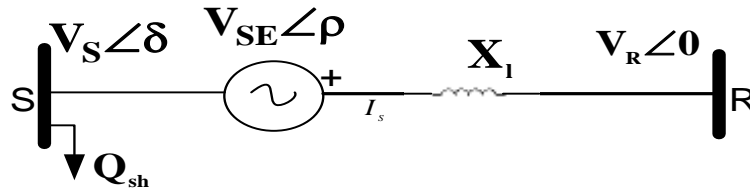
## ۲. مدل پیشنهادی کنترل‌کننده جامع توان الکتریکی در حالت ماندگار

هدف ما در این مقاله ارائه مدل ساده‌ای از کنترل‌کننده جامع توان است. در مدل پیشنهادی مبدل سری کنترل‌کننده جامع توان با یک مقاومت منفی و یک راکتانس سلفی یا خازنی مدل می‌شود. مقاومت منفی بیانگر توان اکتیو تزریقی مبدل سری و راکتانس سلفی یا خازنی بیانگر توان راکتیو مبادله‌شده مبدل سری با شبکه است. همچنین توان راکتیو مبدل موازی به صورت توان متصل‌شده به شین، نشان داده می‌شود. در مدل پیشنهادی فرض می‌شود مقادیر توان اکتیو و راکتیوی که مبدل سری با شبکه مبادله می‌کند، معلوم است. لذا با دانستن دامنه ولتاژ شین‌ها و ولتاژ تزریقی مبدل سری، مقادیر مقاومت و راکتانس معادل مبدل سری به دست می‌آید.

### ۲-۱. مدل‌سازی مبدل سری کنترل‌کننده در حالت ماندگار

برای مدل‌سازی مبدل سری کنترل‌کننده جامع توان در حالت ماندگار، مدل منبع ولتاژی UPFC در سیستم تک‌ماشین دوشینه مطابق شکل شماره ۴ در نظر گرفته شده است. با محاسبه جریان خط، توان اکتیو و راکتیو تزریقی مبدل سری محاسبه می‌شود. سپس توان اکتیو تزریقی مبدل سری با مقاومت منفی و توان راکتیو مبدل سری را با توجه به نوع آن با یک راکتانس خازنی یا سلفی مدل می‌کنیم.

۲-۲. محاسبه توان اکتیو و راکتیو تزریقی مبدل سری



شکل شماره ۴. کنترل کننده جامع توان در شبکه دو شینه

در این مدل  $\phi_{SE} = \delta - \rho$  زاویه آتش مبدل سری است. ابتدا معادله‌های الکتریکی سیستم شکل شماره ۲ را به دست آورده و توان تزریقی مبدل سری را محاسبه می‌کنیم. جریان جاری شده در خط برابر است با:

$$I = \frac{V_S \angle \delta + V_{SE} \angle \rho - V_R \angle 0}{jX_L} \quad (1)$$

که:  $V_S$  و  $V_R$  دامنه ولتاژ شین‌ها،  $\delta$  زاویه بین ولتاژ شین‌ها،  $V_{SE}$  و  $\rho$  دامنه و زاویه ولتاژ تزریقی مبدل سری است. توان تزریقی اکتیو و راکتیو توسط مبدل سری برابر است با:

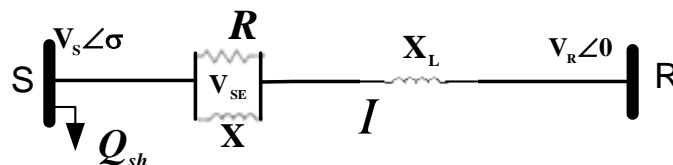
$$S_{SE} = V_{SE} * I \quad (2)$$

با جای‌گذاری رابطه (۱) در رابطه (۲) و بسط آن، توان اکتیو و راکتیو تزریقی مبدل سری به دست می‌آید:

$$P_{SE} = \frac{V_S * V_{SE}}{X_L} \sin(\delta - \rho) \quad (3)$$

$$P_{SE} = \frac{V_S * V_{SE}}{X_L} \cos(\delta - \rho) - \frac{V_R * V_{SE}}{X_L} \cos(\rho) + \frac{V_{SE}^2}{X_L} \quad (4)$$

توان اکتیو مبدل سری با یک مقاومت و توان راکتیو مبدل سری با یک راکتانس مطابق شکل شماره ۵ مدل‌سازی می‌شود.



شکل شماره ۵. مدل‌سازی مبدل سری با مقاومت و راکتانس موازی

در شکل شماره ۵، مقادیر مقاومت و راکتانس به صورت روابط (۵ و ۶) بیان می‌شوند:

$$R = \frac{V_{SE}^2}{P_{SE}} \quad (5)$$

$$S_R = V_R * I^* \quad (6)$$

برای درستی فرض مدل‌سازی، باید توان جذب‌شده در شین R در هر دو سیستم شکل‌های ۴ و ۵، برابر باشد. در مرحله بعد نشان می‌دهیم که توان جذب‌شده توسط شین R در مدل ولتاژی مبدل سری شکل شماره ۴ و مدل ساده مداری پیشنهادی شکل شماره ۵، برابر هستند.

### ۲-۳. محاسبه توان اکتیو و راکتیو جذب‌شده توسط شین R در مدل منبع ولتاژی کنترل‌کننده جامع توان

توان دریافتی شین R در شکل شماره ۴ عبارت است از:

$$S_R = V_R * I^* \quad (7)$$

با قراردادن رابطه (۱) در رابطه (۷) داریم:

$$I_L = \frac{V_{SE} \angle \rho}{jX} \quad (8)$$

با بسط رابطه (۸)، توان اکتیو و راکتیو دریافتی شین R، طبق روابط (۹ و ۱۰) به دست می‌آید:

$$P_R = \frac{V_S * V_R}{X_L} \sin(\delta) + \frac{V_R * V_{SE}}{X_L} \sin(\rho) \quad (9)$$

$$Q_R = \frac{V_S * V_R}{X_L} \cos(\delta) - \frac{V_R * V_{SE}}{X_L} \cos(\rho) - \frac{V_R^2}{X_L} \quad (10)$$

### ۲-۴. محاسبه توان اکتیو و راکتیو دریافتی شین R در مدل پیشنهادی

جریان جاری‌شده در سیستم دو شینه شکل شماره ۵ برابر است با:

$$I = I_R + I_L \quad (11)$$

$$I_L = \frac{V_{SE} \angle \rho}{jX} \quad (12)$$

$$I_R = \frac{V_{SE} \angle \rho}{R} \quad (13)$$

با قراردادن (۱۲) و (۱۳) در رابطه (۱۱):

$$I = \frac{V_{SE} \angle \rho}{R} + \frac{V_{SE} \angle \rho - 90}{X} \quad (14)$$

با بسط رابطه (۱۴) داریم:

$$I = \frac{V_{SE}}{R} \cos \rho + \frac{V_{SE}}{X} \sin \rho + j \frac{V_{SE}}{R} \sin \rho - j \frac{V_{SE}}{R} \cos \rho \quad (15)$$

با قراردادن رابطه (۱۵) در رابطه (۷) داریم:

$$S_R = \frac{V_{SE} V_R}{R} \cos \rho + \frac{V_{SE} V_R}{X} \sin \rho - j \frac{V_{SE} V_R}{R} \sin \rho + j \frac{V_{SE} V_R}{R} \cos \rho \quad (16)$$

توان اکتیو و راکتیو دریافتی شین R برابر است با:

$$P_R = \frac{V_{SE} V_R}{R} \cos \rho + \frac{V_{SE} V_R}{X} \sin \rho \quad (17)$$

توان راکتیو جذب شده توسط شین R:

$$Q_R = -\frac{V_{SE} V_R}{R} \sin \rho + \frac{V_{SE} V_R}{X} \cos \rho \quad (18)$$

با قراردادن روابط (۵) و (۶) در (۱۷) و (۱۸) داریم:

$$P_R = \frac{V_S V_R}{X_L} \sin \delta + \frac{V_{SE} V_R}{X_L} \sin \rho \quad (19)$$

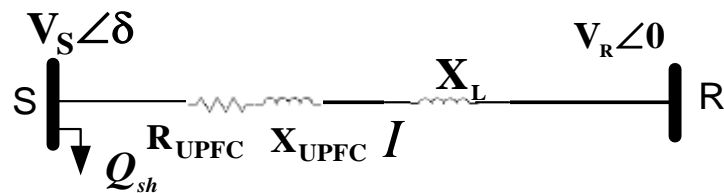
$$Q_R = \frac{V_S V_R}{X_L} \cos \delta + \frac{V_{SE} V_R}{X_L} \cos \rho - \frac{V_R^2}{X_L} \quad (20)$$

با مقایسه روابط (۹)، (۱۰)، (۱۹) و (۲۰) می توان گفت توان اکتیو و راکتیو جذب دریافتی شین R در سیستم دو شینه شکل ۲ و ۳ برابر است؛ بنابراین صحت فرض مدل سازی اثبات می شود. با جای گذاری روابط (۹) و (۱۰) در روابط (۵) و (۶) مقادیر مقاومت و راکتانس معادل مبدل سری برابر است با:

$$R = F(V_S, V_R, V_{SE}, \delta, \rho) \quad R = \frac{V_{SE} X_L}{V_S \sin(\delta - \rho) + V_R \sin \rho} \quad (21)$$

$$X = F(V_S, V_R, V_{SE}, \delta, \rho) \quad X = \frac{V_{SE} X_L}{V_S \cos(\delta - \rho) - V_R \cos \rho + V_{SE}} \quad (22)$$

به منظور استفاده از مدل پیشنهادی در برنامه های پخش بار به کار رود، عناصر موازی معادل مبدل سری به عناصر سری تبدیل می شوند.



شکل شماره ۶. مدل سازی کنترل کننده جامع توان با عناصر مداری موازی در سیستم قدرت دو شینه مقاومت و راکتانس معادل مبدل سری کنترل کننده جامع توان الکتریکی برابر است با:

$$R_{UPFC} = \frac{R * X^2}{R^2 + X^2} \quad (۲۳)$$

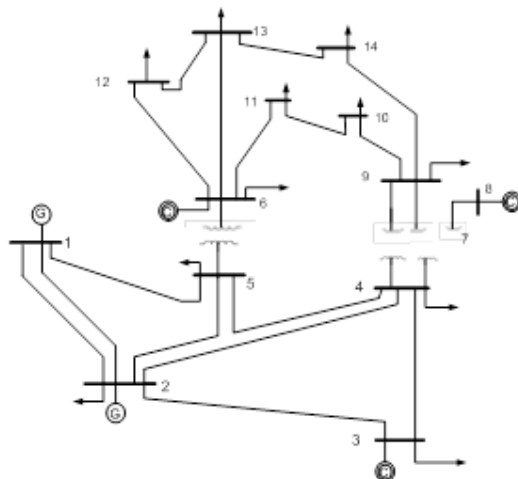
$$X_{UPFC} = \frac{X * R^2}{R^2 + X^2} \quad (۲۴)$$

با معلوم بودن مقادیر ولتاژ شین‌ها، ولتاژ تزریقی مبدل سری و مقدار توان اکتیو و راکتیوی که مبدل سری با شبکه مبادله می‌کند، مقادیر مقاومت و راکتانس به دست آمده و جایگزین مبدل سری می‌شود. توان راکتیو مبدل موازی نیز به صورت توان متصل به شین نشان داده می‌شود.

### ۳. شبیه‌سازی

برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، آن را در سیستم قدرت چهارده شینه استاندارد مرجع شماره [۶] شبیه‌سازی می‌کنیم و نتایج به دست آمده را با مدل تزریقی کنترل کننده جامع توان [۷] مقایسه می‌کنیم. پخش بار به روش نیوتن - رافسون توسط نرم‌افزار متلب، برای مدل پیشنهادی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند شین شماره ۵ دارای کمترین ولتاژ بوده و از نظر ولتاژ، شین ضعیفی است؛ همچنین بیشترین مقدار توان از خط ۱-۵ عبور می‌کند. می‌توان برای کنترل توان و تثبیت ولتاژ از کنترل کننده جامع توان استفاده کرد. در سیستم قدرت مورد نظر، مبدل سری UPFC در خط ۱-۵ قرار داده می‌شود.





شکل شماره ۷. سیستم چهارده شینه

### ۳-۱. نتایج پخش بار بدون حضور کنترل کننده جامع توان

سیستم قدرت بدون حضور کنترل کننده جامع توان شبیه سازی شده و نتایج آن در جداول شماره ۱ و شماره ۲ آمده است.

جدول شماره ۱. دامنه و زاویه ولتاژ باس ها

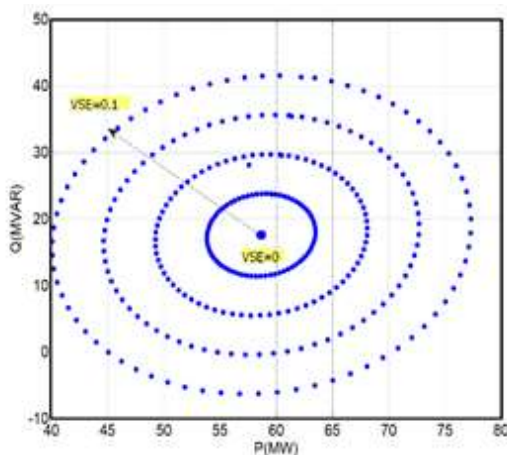
شماره باس	دامنه ولتاژ باس	زاویه ولتاژ باس	شماره باس	دامنه ولتاژ باس	زاویه ولتاژ باس
۱	۱/۰۶	۰	۸	۱/۰۵	-۱۴/۶۸۱
۲	۱	-۵/۰۴۸	۹	۰/۹۹۷	-۱۶/۳۹۲
۳	۰/۹۹۹	-۱۳/۳۸۶	۱۰	۰/۹۹۶	-۱۶/۶۲۲
۴	۰/۹۸۵	-۱۱/۴۶۲	۱۱	۱/۰۰۶	-۱۶/۱۵۳
۵	۰/۹۶۴	-۹/۱۷۴	۱۲	۱/۰۱۲	-۱۶/۳۹۵
۶	۱/۰۲	-۱۵/۲۹	۱۳	۱/۰۰۹	-۱۶/۵۸۴
۷	۱/۰۱۴	-۱۴/۶۸۱	۱۴	۰/۹۹۴	-۱۷/۷۸۱

نتایج نشان می دهند شین شماره ۵ دارای کمترین ولتاژ بوده و از نظر ولتاژ، شین ضعیفی است. همچنین بیشترین مقدار توان از خط ۱-۵ عبور می کند. برای کنترل توان و تثبیت ولتاژ، کنترل کننده جامع توان در خط ۱-۵ قرار داده می شود.

جدول شماره ۲. توان اکتیو و راکتیو خطوط انتقال

توان راکتیو (Mvar)	توان اکتیو (MW)	باس انتها	باس ابتدا	توان راکتیو (Mvar)	توان اکتیو (MW)	باس انتها	باس ابتدا
۷/۲	۷/۷۷	۱۱	۶	۷۱/۳۹	۱۶۱/۲۴	۲	۱
۳/۳۴	۷/۷۸	۱۲	۶	۴۰/۶۱	۵۷/۵۵	۵	۱
۹/۰۴	۱۷/۸۳	۱۳	۶	۱۷/۸۵	۷۴/۸۶	۳	۲
۱۶/۵۶	۲۷/۴۴	۹	۷	۲۵/۳۵	۶۳/۸۷	۴	۲
۲۱/۲۸	۰	۷	۸	۳۶/۲۵	۴۰/۸	۵	۲
۰/۷۱	۴/۷۲	۱۰	۹	-۷/۴۶	۱۹/۳۳	۳	۴
۱/۱	۸/۸۸	۱۴	۹	-۲/۴۳	۲۷/۴۴	۷	۴
۵/۱۹	۴/۲۷	۱۰	۱۰	۴/۳۷	۱۵/۶۶	۹	۴
۱/۵۶	۱/۶۸	۱۳	۱۲	-۲۴/۴۱	۴۶/۱۷	۴	۵
۴/۳	۶/۰۱	۱۴	۱۳	۸/۲۱	۴۴/۵۹	۶	۵

با قراردادن کنترل کننده جامع توان بین شین (۱) و (۵) و تغییر دامنه و زاویه ولتاژ تزریقی مبدل سری، توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط ۱-۵ مطابق شکل شماره ۸ تغییر می کند:



شکل شماره ۸. تغییرات توان راکتیو بر حسب اکتیو در خط ۱-۵

با قراردادن کنترل کننده جامع توان در خط ۱-۵ و تغییر ولتاژ تزریقی مبدل سری مطابق شکل شماره ۸، توان اکتیو و راکتیو خط در محدوده ۴۰ تا ۷۸ مگاوات و ۸- تا ۴۲ مگاوار تغییر می کند. با فرض اینکه بخواهیم توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط ۱-۵ مقادیر ۷۵/۲ مگاوات و ۳۹/۸ مگاوار باشد، به ازای دامنه ولتاژ تزریقی مبدل سری ثابت و برابر ۰/۱، زاویه فاز ولتاژ مبدل سری برابر است با:

$$V_{SE} = 0.1 \quad , \quad \rho = -130^\circ$$

به ازای مقادیر دامنه و زاویه ولتاژ تزریقی مبدل سری، مقادیر مقاومت و راکتانس معادل مبدل سری برابر است با:

$$R_{UPFC} = -0.0054 \quad , \quad X_{UPFC} = -0.0982$$

### ۳-۲. نتایج پخش بار با حضور مدل پیشنهادی UPFC و مقایسه آن با مدل تزریقی [۷]

در این بخش سیستم قدرت با حضور مدل پیشنهادی و مدل تزریقی مرجع شماره [۷] کنترل کننده جامع توان شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی در جداول ۳-۶ آمده است.

جدول شماره ۳. دامنه و زاویه ولتاژ باس‌ها با مدل پیشنهادی UPFC

شماره باس	دامنه ولتاژ باس	زاویه ولتاژ باس	شماره باس	دامنه ولتاژ باس	زاویه ولتاژ باس
۱	۱/۰۶	۰	۸	۱/۰۵	-۱۳/۲۵
۲	۱	-۴/۴۸	۹	۱/۰۰۴	-۱۴/۸۹
۳	۰/۹۹	-۱۲/۴۲	۱۰	۱/۰۰۲	-۱۵/۰۹
۴	۱/۰۰۳	-۱۰/۱۸	۱۱	۱/۰۰۹	-۱۴/۵۶
۵	۱/۰۰۳	-۷/۶۲	۱۲	۱/۰۱۲	-۱۴/۷۵
۶	۱/۰۲	-۱۳/۶۳	۱۳	۱/۰۱	-۱۴/۹۴
۷	۱/۰۲	-۱۳/۲۵	۱۴	۰/۹۹	-۱۶/۳۱

جدول شماره ۴. توان اکتیو و راکتیو با مدل پیشنهادی UPFC

باس ابتدا	باس انتها	توان اکتیو (MW)	توان راکتیو (Mvar)	باس ابتدا	باس انتها	توان اکتیو (MW)	توان راکتیو (Mvar)
۱	۲	۱۴۳/۲۵	۷۱/۸۹	۶	۱۱	۸/۳۸	۵/۵۳
۱	۵	۷۵/۱۹	۳۹/۸۸	۶	۱۲	۷/۸۷	۳/۱۱
۲	۳	۷۱/۳۳	۱۷/۳۵	۶	۱۳	۱۸/۱۲	۸/۲۳
۲	۴	۵۷/۸۴	۱۴/۵۳	۷	۹	۲۶/۷۸	۱۷/۰۸
۲	۵	۳۲/۳۷	۱۲/۵۷	۸	۷	۰	۱۶/۶۱
۴	۳	۲۲/۸۶	۲/۷۴	۹	۱۰	۴/۱۱	۲/۲۵
۴	۷	۲۶/۷۸	۲/۳۵	۹	۱۴	۸/۵۱	۲/۱۱
۴	۹	۱۵/۳۳	۶/۳۷	۱۰	۱۰	۴/۸۸	۳/۶۳
۵	۴	۵۴/۷۴	۱/۴۸	۱۲	۱۳	۱/۷۶	۱/۳۳
۵	۶	۴۵/۵۷	۲۶/۴۴	۱۳	۱۴	۶/۳۹	۳/۲۶

جدول شماره ۵. دامنه و زاویه ولتاژ باس ها با مدل تزریقی UPFC

شماره باس	دامنه ولتاژ باس	زاویه ولتاژ باس	شماره باس	دامنه ولتاژ باس	زاویه ولتاژ باس
۱	۱/۰۶	۰	۸	۱/۰۵	-۱۳/۲۶
۲	۱	-۴/۵	۹	۱/۰۰۵	-۱۴/۹
۳	۰/۹۹	-۱۲/۴۴	۱۰	۱/۰۰۳	-۱۵/۱
۴	۱/۰۰۵	-۱۰/۲۱	۱۱	۱/۰۱	-۱۴/۵۷
۵	۱/۰۰۸	-۷/۶۷	۱۲	۱/۰۱۲	-۱۴/۷۶
۶	۱/۰۲	-۱۳/۶۴	۱۳	۱/۰۱	-۱۴/۹۶
۷	۱/۰۲۳	-۱۳/۲۶	۱۴	۰/۹۹	-۱۶/۲۲

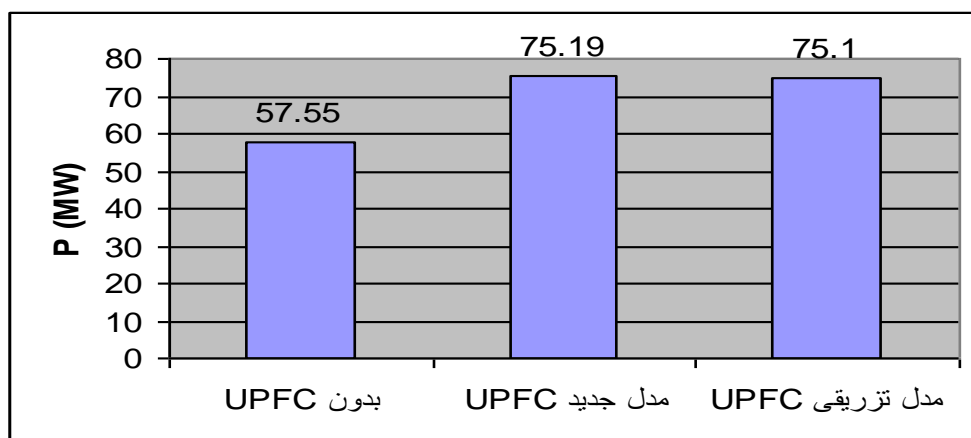
جدول شماره ۶. توان اکتیو و راکتیو با مدل تزریقی UPFC

باس ابتدا	باس انتها	توان اکتیو (MW)	توان راکتیو (Mvar)	باس ابتدا	باس انتها	توان اکتیو (MW)	توان راکتیو (Mvar)
۱	۲	۱۴۳/۸۷	۷۱/۹۴	۶	۱۱	۸/۳۷	۵/۴۲
۱	۵	۷۵/۱	۳۹/۹۸	۶	۱۲	۷/۸۶	۳/۰۸
۲	۳	۷۱/۳۲	۱۷/۳۵	۶	۱۳	۱۸/۱۲	۸/۲۳
۲	۴	۵۸/۰۱	۱۳/۲۲	۷	۹	۲۶/۷۹	۱۷/۱۶
۲	۵	۳۲/۸۳	۱۲/۰۷	۸	۷	۰	۱۶
۴	۳	۲۲/۸۷	۲/۸۴	۹	۱۰	۴/۱۲	۲/۴۵
۴	۷	۲۶/۷۹	۲/۴۵	۹	۱۴	۸/۵۲	۲/۲۴
۴	۹	۱۵/۳۴	۶/۶۴	۱۰	۱۰	۴/۸۷	۳/۴۳
۵	۴	۵۴/۶	۵/۰۱	۱۲	۱۳	۱/۷۶	۱/۳
۵	۶	۴۵/۵۵	۲۸/۹۳	۱۳	۱۴	۶/۳۸	۳/۱۳

نتایج جداول ۷-۳ و شکل شماره ۹ نشان می دهد مدل پیشنهادی در این مقاله مانند مدل تزریقی UPFC قادر به کنترل توان اکتیو و راکتیو خطوط، تثبیت ولتاژ شین ها و استفاده بهینه از خطوط انتقال می شود.

جدول شماره ۷. مقایسه ولتاژ شین ۵ و توان خط ۱-۵ بدون حضور و با حضور مدل پیشنهادی و مدل تزریقی کنترل کننده جامع توان

	بدون UPFC	مدل پیشنهادی UPFC	مدل تزریقی UPFC
ولتاژ باس ۵ ( pu )	۰/۹۶	۱/۰۰۳	۱/۰۰۸
توان اکتیو خط ۱-۵ (MW)	۵۷/۵۵	۷۵/۱۹	۷۵/۱
توان راکتیو خط ۱-۵ (MVAR)	۴۰/۶۱	۳۹/۸۸	۳۹/۹۸



شکل شماره ۹. مقایسه توان اکتیو عبوری از خط ۱-۵ بدون حضور و با حضور مدل پیشنهادی و تزریقی UPFC

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله مدل ساده‌ای از کنترل کننده جامع توان ارائه شده است. در مدل پیشنهادی مبدل سری کنترل کننده جامع توان با مقاومت و راکتانس سری مدل سازی شده است. مقاومت منفی نشان دهنده تزریق توان و مقاومت مثبت نشان دهنده جذب توان اکتیو توسط مبدل سری کنترل کننده جامع توان الکتریکی است. مقدار راکتانس نشان دهنده میزان توان راکتیو مبادله شده مبدل سری با شبکه است. در صورتی که مبدل سری توان راکتیو به شبکه تزریق کند، راکتانس معادل مبدل سری خازنی و در صورتی که مبدل سری از شبکه توان راکتیو دریافت کند، راکتانس معادل مبدل سری، سلفی است. مدل ارائه شده ماتریس ادمینتانس شبکه را تغییر می دهد اما ابعاد ماتریس ژاکوبین را تغییر نمی دهد؛ بنابراین حجم و زمان محاسبات نسبت به مدل های موجود کمتر است و به سادگی در برنامه های پخش بار قرار می گیرد. نتایج به دست آمده در جداول ۷-۳ و شکل شماره ۹ نشان می دهند مدل پیشنهادی مانند سایر مدل های کنترل کننده جامع توان (مدل تزریقی) قادر به مدیریت توان جاری شده در خط انتقال است.

منابع

۱. فلاح‌نژاد، م.؛ رحیمی، پ (۱۳۹۲)، «بررسی عملکرد جبران‌کننده‌های استاتیکی توان راکتیو (SVC) در شبکه‌های قدرت»، *دوفصلنامه کارآفن*، شماره ۳۵.
۲. علیپور، م. (۱۳۹۶)، «جایابی مکان بهینه SVC و TCSC در شبکه‌های انتقال برق به کمک تخمین‌زن فازی با رویکرد افزایش پایداری استاتیکی ولتاژ»، *دوفصلنامه کارآفن*، شماره ۴۲، صص ۹۵-۱۲۱.
3. Imdadullah; Amrr, S.; Jamil Asghar, M., Ashraf, I.; Meraj, M (2020), "A Comprehensive Review of Power Flow Controllers in Interconnected Power System Networks", in *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 18036-18063.
4. Li, M, et al (2019), "Application of UPFC in Fujian 500 kV power grid", in *The Journal of Engineering*, Vol. 2019, No. 16, pp. 2510-2513.
5. Liu, H.; Li, X., Qin, G.; Hao, S, (2017), "Stability of grid connected system of two types of wind turbines with UPFC", in *The Journal of Engineering*, Vol. 2017, No. 13, pp. 2178-2183.
6. Yong Hua Song (1379), "Flexible AC Transmission Systems", Dr. Mahmood Reza Haghifam & Eng. Mehdi Rasoolzadeh Haghghi, one, iran, Hormozgan University.
7. Nabavi-Niaki A.; Irvani MR (1996), "Steady-state and dynamic models of unified power flow controller (UPFC) for power system studies", *IEEE Trans Power Syst*, 11, pp. 37-43.
8. Acha, E.; Fuerte-Esquivel CR, Ambriz-Perez H, Angeles-Camacho C. (2004), *FACTS: modelling and simulation in power networks*, John Wiley & Sons.
9. Zhang X-P, Rehtanz C.; Pal B, (2012), *Flexible AC transmission systems: modelling and control*, Springer Science & Business Media.
10. Nor KM, Mokhlis H.; Gani TA (2004), "Reusability techniques in load-flow analysis computer program", *IEEE Trans Power Syst*, 19, pp. 54-62.
11. Bhowmick S, Das B, Kumar N. An indirect, (2008), "UPFC model to enhance reusability of Newton power-flow codes", *IEEE Trans Power Delivery*, 23, pp. 79-88.
12. Bhowmick S.; Das B.; Kumar N (2009), "An advanced IPFC model to reuse Newton power flow codes", *IEEE Trans Power Syst*, 24: 5, pp. 25-32.
13. Bhowmick S.; Das B.; Kumar N (2011), "An advanced static synchronous compensator model to reuse Newton and decoupled power flow codes", *Electr Power Compon Syst*, 39: 16, pp. 47-66.
14. Kamel S, Jurado F, Chen Z, (2015), "Power flow control for transmission networks with implicit modeling of static synchronous series compensator". *Int J Electr Power Energy Syst*, 64:9, pp. 11-20.
15. Kamel S, Jurado F, (2014), "Power flow analysis with easy modelling of interline power flow controller", *Electr Power Syst Res*, 108: 2, pp. 34-44.
16. Li, Fangxing, et al, (2010), "Smart transmission grid: Vision and framework", *Smart Grid, IEEE Transaction*, pp. 168-177.
17. Haque, M.H C.; Yam, M (2002), "A simple method of solving the controlled load flow problem of a power system in the presence of UPFC", *Elsevier Science*, Vol. 65 October, pp. 55-62.

18. Haque, M, H. (2004), "Power flow control and voltage stability limit: regulating transformer versus UPFC", *IEEProc-Gener. Transm*, Vol. 151, No. 3, May. pp. 291-304.