



## Provide a Simple Model of the Comprehensive Electric Power Controller

Kiumars Sabzevari<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Technical and Vocational University of west Islamabad, Technical and Vocational University, Kermanshah, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 01.06.2020

**Revised:** 06.04.2020

**Accepted:** 06.14.2020

**Keyword:**

FACTS equipment

UPFC

Power flow

Reactive power control

Active power control

**\*Corresponding Author:**

Kiumars Sabzevari

**Email:**

[k.sabzevari52@gmail.com](mailto:k.sabzevari52@gmail.com)

### ABSTRACT

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.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای  
تکنولوژی و حرفه‌ای

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۱، ۲۶-۱۳

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.112753

20.1001.1.23829796.1399.17.1.1.3



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

## ارائه مدلی ساده از کنترل کننده جامع توان الکتریکی

کیومرث سبزواری\*<sup>۱</sup>

۱- استادیار، آموزشکده فنی و حرفه‌ای اسلام‌آباد غرب، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان کرمانشاه، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
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، مدل 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.	<p>دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۶</p> <p>بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۵</p> <p>پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۵</p> <p><b>کلید واژگان:</b> تجهیزات FACTS UPFC پخش بار کنترل توان اکتیو کنترل توان راکتیو</p>
	<p>*نویسنده مسئول: کیومرث سبزواری پست الکترونیکی: <a href="mailto:k.sabzevari52@gmail.com">k.sabzevari52@gmail.com</a></p>

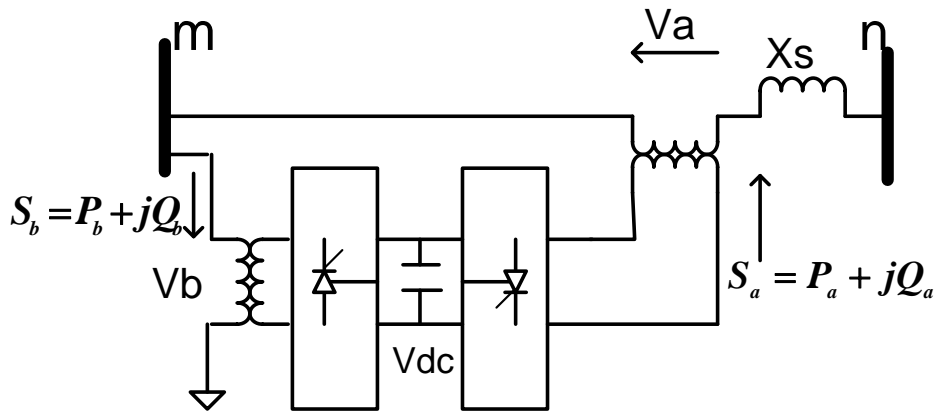


© 2020 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 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 [۱-۵]. 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، هر کدام 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.

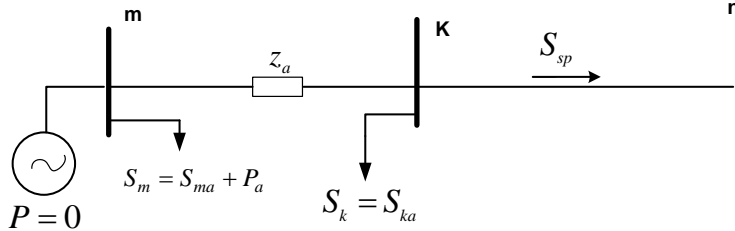


شکل ۱. کنترل‌کننده جامع توان قرارگرفته در سیستم قدرت دو شینه

در مرجع شماره [۷] کنترل‌کننده جامع توان با دو منبع ولتاژ مدل‌سازی می‌شود. عملکرد سری کنترل‌کننده را با منبع ولتاژ سری و عملکرد موازی آن را با یک منبع ولتاژ موازی مدل‌سازی می‌کنند. برای شرکت کردن این مدل در برنامه پخش بار، عملکرد مبدل سری و موازی کنترل‌کننده را با توان مختلط نشان می‌دهند.

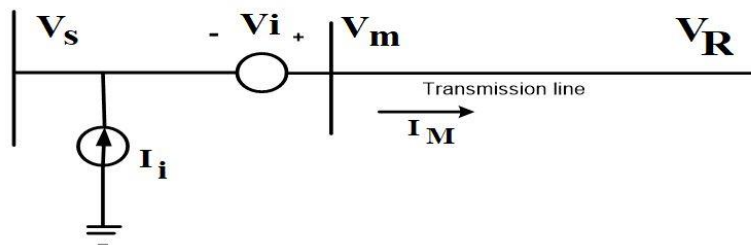
<sup>۱</sup> Flexible AC Transmission System

<sup>۲</sup> Unified Power Flow Controller



شکل ۲. مدل نهایی UPFC براساس توان مختلط و امپدانس سری [۷]

در مرجع شماره [۸]، کنترل کننده جامع توان مطابق شکل شماره ۳ 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 ۳. مدل UPFC بر مبنای منابع ولتاژ و جریان ایدئال [۸]

در مرجع شماره [۹]، کنترل کننده جامع توان الکتریکی براساس رویکرد جداشدنی 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 [۱۰؛ ۱۱] 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 [۱۲] کنترل کننده جامع توان بر اساس روش تقسیم بندی ماتریس مدل شده است. در مراجع [۱۳-۱۵] مدل غیرمستقیم ارائه شده است. در این مدل، تلاش شده است تا پیچیدگی های کدهای توان جاری شده کاهش یابد ولی اندازه ماتریس ژاکوبین به دلیل اضافه کردن متغیرهای حالت، افزایش یافته است. در مراجع [۱۶؛ ۱۷] مدل هایی برای برخی از ادوات facts پیشنهاد شده است که با محدودیت هایی روبه رو هستند. در مدل هایی که برای کنترل کننده جامع توان ارائه شده است، ارتباط بین زاویه آتش مبدل و توان تزریقی مشخص نشده است. در همه مدل های موجود، مبدل ها با منابع ولتاژ یا جریان جایگزین شده اند. مدل نهایی کنترل کننده به صورت توان تزریقی به شین نمایش داده می شود. استفاده از این مدل ها در برنامه های پخش بار منجر به تغییر ماتریس ژاکوبین و ساختار برنامه می شود. این مقاله، مدل ساده ای از کنترل کننده جامع توان در حالت ماندگار ارائه می کند. در مدل پیشنهادی، توان اکتیو تزریقی مبدل سری با یک مقاومت منفی و توان راکتیو تزریقی مبدل سری با یک راکتانس شبیه سازی می شوند. همچنین توان راکتیو مبدل موازی به صورت توان متصل به شین نشان داده می شود. روابط محاسباتی مقاومت و راکتانس معادل کنترل کننده جامع توان در سیستم قدرت تک ماشینه دوشینه به دست آمده است. مدل ارائه شده در سیستم قدرت چهارده شینه شبیه سازی می شود.

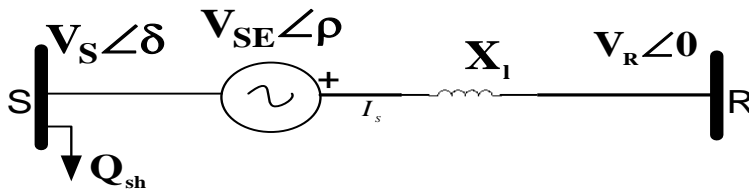
### مدل پیشنهادی کنترل کننده جامع توان الکتریکی در حالت ماندگار

هدف ما در این مقاله ارائه مدل ساده‌ای از کنترل کننده جامع توان است. در مدل پیشنهادی مبدل سری کنترل کننده 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 مبادله شده مبدل سری با شبکه است. همچنین توان راکتیو مبدل موازی به صورت توان متصل شده 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.

### مدل سازی مبدل سری کنترل کننده در حالت ماندگار

برای مدل سازی مبدل سری کنترل کننده جامع توان در حالت ماندگار، مدل منبع ولتاژی UPFC در سیستم تک‌ماشینه دو شینه 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.

### محاسبه توان اکتیو و راکتیو تزریقی مبدل سری



شکل 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:

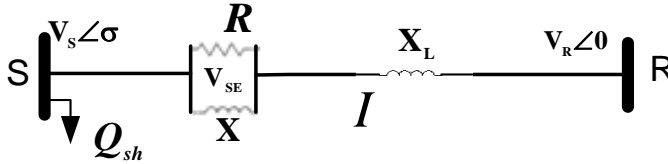
$$S_{SE} = V_{SE} * I \quad (2)$$

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

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

$$P_{SE} = \frac{V_S * V_{SE}}{X_L} \cos(\delta - \rho) - \frac{V_R * V_{SE}}{X_L} \cos(\rho) + \frac{V_{SE}^2}{X_L} \quad (۴)$$

توان اکتیو مبدل سری با یک مقاومت و توان راکتیو مبدل سری با یک راکتانس مطابق شکل شماره ۵ مدل سازی می شود.



شکل ۵. مدل سازی مبدل سری با مقاومت و راکتانس موازی

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

$$R = \frac{V_{SE}^2}{P_{SE}} \quad (۵)$$

$$S_R = V_R * I^* \quad (۶)$$

برای درستی فرض مدل سازی، باید توان جذب شده در شین R در هر دو سیستم شکل های ۴ و ۵، برابر باشد. در مرحله بعد نشان می دهیم که توان جذب شده توسط شین R در مدل ولتاژی مبدل سری شکل شماره ۴ و مدل ساده مداری پیشنهادی شکل شماره ۵، برابر هستند.

**محاسبه توان اکتیو و راکتیو جذب شده توسط شین R در مدل منبع ولتاژی کنترل کننده جامع توان**  
توان دریافتی شین R در شکل شماره ۴ عبارت است از:

$$S_R = V_R * I^* \quad (۷)$$

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

$$I_L = \frac{V_{SE} \angle \rho}{jX} \quad (۸)$$

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

$$P_R = \frac{V_S * V_R}{X_L} \sin(\delta) + \frac{V_R * V_{SE}}{X_L} \sin(\rho) \quad (۹)$$

$$Q_R = \frac{V_S * V_R}{X_L} \cos(\delta) - \frac{V_R * V_{SE}}{X_L} \cos(\rho) - \frac{V_R^2}{X_L} \quad (۱۰)$$

## محاسبه توان اکتیو و راکتیو دریافتی شین R در مدل پیشنهادی

جریان جاری شده 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:

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

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

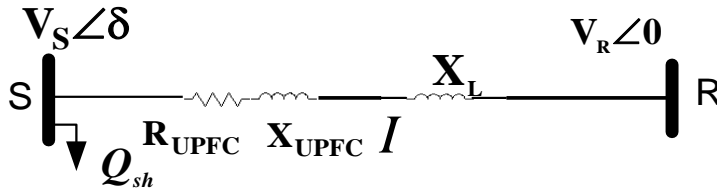
با مقایسه روابط (۹)، (۱۰)، (۱۹) و (۲۰) می توان گفت توان اکتیو و راکتیو جذب دریافتی شین R در سیستم دو شینه شکل ۲ و ۳ برابر است؛ بنابراین صحت فرض مدل سازی اثبات می شود.

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 برنامه‌های پخش بار به کار رود، عناصر موازی معادل مبدل سری به عناصر سری تبدیل می‌شوند.



شکل 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:

$$R_{UPFC} = \frac{R * X^2}{R^2 + X^2} \quad (23)$$

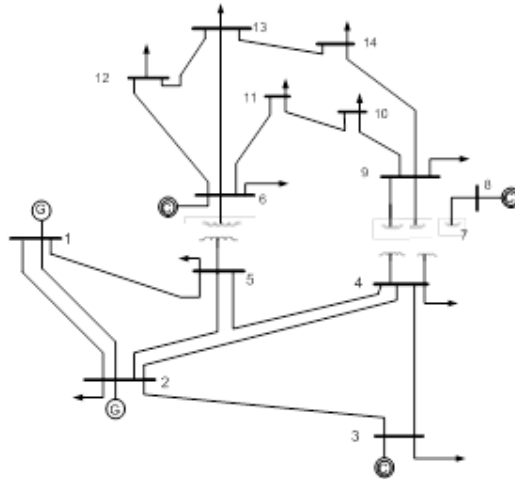
$$X_{UPFC} = \frac{X * R^2}{R^2 + X^2} \quad (24)$$

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.

### شبیه سازی

برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، آن را در سیستم قدرت چهارده شینه استاندارد مرجع شماره [۶] شبیه سازی می‌کنیم و نتایج به دست آمده را با مدل تزریقی کنترل کننده جامع توان [۷] مقایسه می‌کنیم. پخش بار به روش نیوتن-رافسون توسط نرم افزار 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 ۷. سیستم چهارده شینه

### 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 ۱. دامنه و زاویه ولتاژ باسها

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

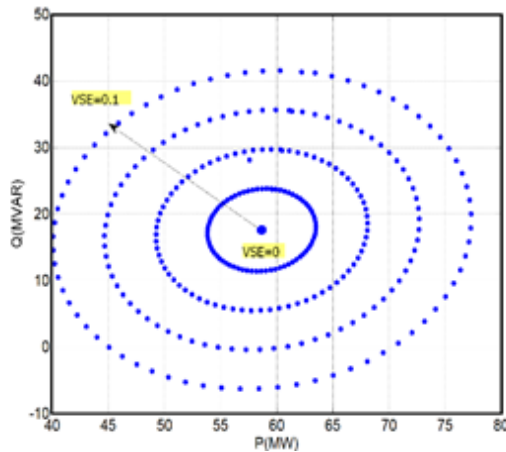
نتایج نشان می دهند شین شماره ۵ دارای کمترین ولتاژ بوده و از نظر ولتاژ، شین ضعیفی است. همچنین بیشترین مقدار توان از خط ۱-۵ عبور می کند. برای کنترل توان و تثبیت ولتاژ، کنترل کننده جامع توان در خط ۱-۵ قرار داده می شود.

جدول ۲. توان اکتیو و راکتیو خطوط انتقال

باس ابتدا	باس انتها	توان اکتیو (MW)	توان راکتیو (Mvar)	باس ابتدا	باس انتها	توان اکتیو (MW)	توان راکتیو (Mvar)
۱	۲	۱۶۱/۳۴	۷۱/۳۹	۶	۱۱	۷/۷۷	۷/۲
۱	۵	۵۷/۵۵	۴۰/۶۱	۶	۱۲	۷/۷۸	۳/۳۴
۲	۳	۷۴/۸۶	۱۷/۸۵	۶	۱۳	۱۷/۸۳	۹/۰۴
۲	۴	۶۳/۸۷	۲۵/۳۵	۷	۹	۲۷/۴۴	۱۶/۵۶

توان راکتیو (Mvar)	توان اکتیو (MW)	باس انتها	باس ابتدا	توان راکتیو (Mvar)	توان اکتیو (MW)	باس انتها	باس ابتدا
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 ۵-۱ مطابق شکل شماره ۸ تغییر می کند:



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

با قراردادن کنترل کننده جامع توان در خط ۵-۱ 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 ۵-۱ 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:

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

نتایج بخش بار با حضور مدل پیشنهادی UPFC و مقایسه آن با مدل تزریقی [۹] در این بخش سیستم قدرت با حضور مدل پیشنهادی و مدل تزریقی مرجع شماره [۹] کنترل کننده جامع توان شبیه سازی شده و نتایج شبیه سازی در جداول ۳-۶ آمده است.

جدول ۳. دامنه و زاویه ولتاژ باس ها 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	-۱۶/۲۱

جدول 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 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

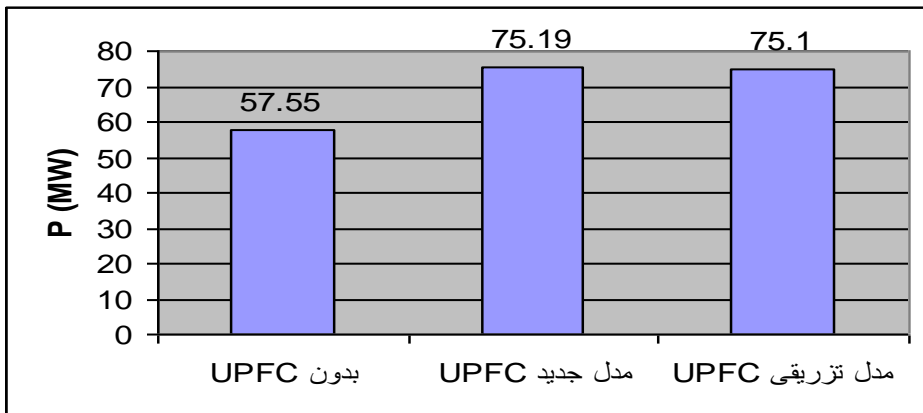
جدول ۶. توان اکتیو و راکتیو با مدل تزریقی UPFC

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

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

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

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



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

## 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.

## References

- [1] Alipour, M. (2017). Optimal allocation of SVC and TCSC in power system by means of fuzzy estimator with the approach of increasing the static stability of the voltage. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 95-121. [https://karafan.tvu.ac.ir/article\\_100507.html?lang=en](https://karafan.tvu.ac.ir/article_100507.html?lang=en)
- [2] Fallahnejad, M., & Rahimi, P. (2014). Investigation of the performance of static SVC reactive power compensators in power networks. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 12(35). <https://www.magiran.com/paper/1727277>
- [3] Imdadullah, Amrr, S. M., Asghar, M. S. J., Ashraf, I., & Meraj, M. (2020). A Comprehensive Review of Power Flow Controllers in Interconnected Power System Networks. *IEEE Access*, 8, 18036-18063. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968461>
- [4] Li, M., Lin, Z., Wu, W., Lin, Y., Jiang, P., Hu, Z., Ye, R., & Du, Y. (2018). Application of UPFC in Fujian 500 kV power grid. *The Journal of Engineering*, 2019(16), 2510 – 2513. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8576>
- [5] Liu, H., Li, X., Qin, G., & Hao, S. (2017). Stability of grid connected system of two types of wind turbines with UPFC. *The Journal of Engineering*, 2017, 2178-2183. <https://doi.org/10.1049/joe.2017.0716>
- [6] Song, Y.-H. (1999). *Flexible ac transmission systems (FACTS)* (A. T. Johns, Trans.). Institution of Engineering and Technology (IET). <https://www.bookdepository.com/Flexible-AC-Transmission-Systems-FACTS-Yong-Hua-Song/9780852967713>
- [7] Haque, M. H., & Yam, C. M. (2003). A simple method of solving the controlled load flow problem of a power system in the presence of UPFC. *Electric Power Systems Research*, 65(1), 55-62. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(02\)00211-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(02)00211-0)
- [8] Haque, M. H. (2004). Power flow control and voltage stability limit: Regulating transformer versus UPFC. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, 151(3), 299-304. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20040379>
- [9] Nabavi Niaki, A., & Irvani, M. R. (1996). Steady-state and dynamic models of unified power flow controller (UPFC) for power system studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(4), 1937-1943. <https://doi.org/10.1109/59.544667>

- [10] Acha, E., Fuerte-Esquivel, C. R., Ambriz-Pérez, H., & Angeles-Camacho, C. (2004). *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=g0Bb-83UdlwC>
- [11] Zhang, X. P., Rehtanz, C., & Pal, B. (2012). *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*. Springer Berlin Heidelberg. <https://books.google.com/books?id=9KzIUkHlSkUC>
- [12] Nor, K. M., Mokhlis, H., & Gani, T. A. (2004). Reusability techniques in load-flow analysis computer program. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(4), 1754-1762. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.835630>
- [13] Bhowmick, S., Das, B., & Kumar, N. (2008). An Indirect UPFC Model to Enhance Reusability of Newton Power-Flow Codes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4), 2079-2088. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.923105>
- [14] Bhowmick, S., Das, B., & Kumar, N. (2009). An Advanced IPFC Model to Reuse Newton Power Flow Codes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(2), 525-532. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2016643>
- [15] Bhowmick, S., Das, B., & Kumar, N. (2011). An Advanced Static Synchronous Compensator Model to Reuse Newton and Decoupled Power Flow Codes. *Electric Power Components and Systems*, 39(15), 1647-1666. <https://doi.org/10.1080/15325008.2011.608770>
- [16] Kamel, S., & Jurado, F. (2014). Power flow analysis with easy modelling of interline power flow controller. *Electric Power Systems Research*, 108, 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.11.017>
- [17] Kamel, S., Jurado, F., & Chen, Z. (2015). Power flow control for transmission networks with implicit modeling of static synchronous series compensator. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 911-920. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.08.013>