

## مقایسه ترانسفورماتور سن با سایر ادوات انعطاف پذیر قدرت در بهبود پایداری گذرا و پایداری ولتاژ سیستم قدرت

### ۱- مقدمه

تقاضای انرژی الکتریکی در سراسر جهان رو به افزایش است و محل تولید توان، به دسترسی آسان انرژی و شرایط محیطی وابسته است. پایداری شبکه با اضافه بار در خطوط انتقال کاهش می یابد و توان عبوری از خطوط انتقال، تابع امپدانس خط، اندازه ولتاژ و اختلاف زاویه بین ولتاژ باسها می باشد [۱].

یکی از بهترین راه های جبران توان اکتیو، جبران کننده UPFC می باشد که به علت توانایی کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو از دیگر ادوات فکتس سبقت گرفته است. در این مقاله، ترانسفورماتور سن به عنوان یک جبران کننده توان شبکه معرفی شده است به طوری که بیشتر خصوصیات آن مشابه UPFC است و با این تفاوت که هزینه های آن، تقریباً یک پنجم هزینه UPFC است و در ساختار آن، از اجزای الکترونیک قدرت استفاده نشده است، بنابراین یک نوع جبران کننده قدرتی است [۲].

برای نخستین بار این ترانسفورماتور در سال ۲۰۰۳ توسط آقای سن معرفی شد [۳]. عملکرد این ترانسفورماتور بر اساس تپ چنجرهای آن تعیین می شود که هدف آن کنترل توان اکتیو و راکتیو می باشد [۴]. ترانسفورماتور سن یک ترانسفورماتور چهارسیم پیچ است که سیم پیچ اولیه آن به صورت سه فاز ستاره و سیم پیچ ثانویه آن ۹ سیم پیچ دارد. اصول عملکرد ترانسفورماتور سن، بر اساس تنظیم ولتاژ و تنظیم امپدانس می باشد [۳].

تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است بیشتر بر روی ادوات فکتس بوده و کمتر به مقایسه ادوات فکتس و ترانسفورماتور سن پرداخته شده است، از این رو در این مقاله، ابتدا ترانسفورماتور سن در نرم افزار

فرزانه رحیمی / موسسه آموزش عالی خراسان / f.rahimi@khorasan.ac.ir  
مصطفی عیدبانی / موسسه آموزش عالی خراسان / eidiani@khorasan.ac.ir

### چکیده

انتقال توان در یک شبکه قدرت، با محدودیت هایی روبرو است که این محدودیت ها شامل، حد حرارتی، حد ولتاژ، محدودیت های دینامیکی و ... می شود. این محدودیت ها حد توان انتقالی در خط های انتقال را مشخص می کنند. یکی از اهداف اصلی شبکه قدرت، کنترل توان انتقالی در خطوط و در نتیجه، بهره برداری بهینه از شبکه قدرت است. یکی از بهترین راه حل های پیشنهادی، استفاده از ادوات فکتس به منظور جبران سازی و کنترل توان است. در این مقاله، ابتدا ترانسفورماتور سن، به عنوان یکی از ادوات فکتس معرفی شده و با استفاده از نرم افزار دیگسایلنت، شبیه سازی شده است. سپس پایداری گذرا، تلفات شبکه و پایداری ولتاژ در دو شبکه ۹ باسه و ۳۹ باسه IEEE در حضور جبران کننده های سن، SSSC، STATCOM، UPFC و TCSC در خطوط انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر PSS بر پایداری شبکه با وجود جبران کننده های توان بررسی شده و در انتها نشان داده شده است که ترانسفورماتور سن، برتری قابل توجهی نسبت به دیگر ادوات فکتس دارد.

**کلمات کلیدی:** ترانسفورماتور سن، SSSC، STATCOM، TCSC، UPFC

مدل ریاضی ترانسفورماتور سن را می توان از شکل (۱) به صورت زیر خلاصه کرد. برای سادگی فرض شده است سیستم متقارن و متعادل است. بنابراین داریم:

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (۱)$$

$$I_{sa} + I_{sb} + I_{sc} = 0 \quad (۲)$$

$$I_{Ra} + I_{Rb} + I_{Rc} = 0 \quad (۳)$$

معادلات ولتاژ و تپ ترانس ساده شکل (۱) به صورت زیر خلاصه می شود به طوری که  $a_i, b_i, c_i, i = 1, 2, 3$  تپ ترانس در سمت ثانویه ترانس ها می باشند

$$V_a = jX_s I_a + V_{sa} \quad (۴)$$

$$V_b = jX_s I_b + V_{sb} \quad (۵)$$

$$V_c = jX_s I_c + V_{sc} \quad (۶)$$

$$V_{sa} = a_1 V_{sa} + b_1 V_{sb} + c_1 V_{sc} + V_{s'a} \quad (۷)$$

$$V_{sb} = a_2 V_{sa} + b_2 V_{sb} + c_2 V_{sc} + V_{s'b} \quad (۸)$$

$$V_{sc} = a_3 V_{sa} + b_3 V_{sb} + c_3 V_{sc} + V_{s'c} \quad (۹)$$

$$V_{s'a} = jX_L I_{Ra} + V_{Ra} \quad (۱۰)$$

$$V_{s'b} = jX_L I_{Rb} + V_{Rb} \quad (۱۱)$$

$$V_{s'c} = jX_L I_{Rc} + V_{Rc} \quad (۱۲)$$

معادلات جریان سیستم ساده شکل (۱) نیز به صورت زیر خلاصه می شود:

$$I_{sa} = I_{sa} + I_{Ra} \quad (۱۳)$$

$$I_{sb} = I_{sb} + I_{Rb} \quad (۱۴)$$

$$I_{sc} = I_{sc} + I_{Rc} \quad (۱۵)$$

$$I_{sa} - a_1^* I_{Ra} - a_2^* I_{Rb} - a_3^* I_{Rc} = 0 \quad (۱۶)$$

$$I_{sb} - b_1^* I_{Rb} - b_2^* I_{Rb} - b_3^* I_{Rc} = 0 \quad (۱۷)$$

$$I_{sc} - c_1^* I_{Rc} - c_2^* I_{Rc} - c_3^* I_{Rc} = 0 \quad (۱۸)$$

هدف اصلی مساله بهینه سازی، انتقال توان حداکثر با وجود ترانسفورماتور سن از خط می باشد. در واقع باید مقادیر تپ های ترانسفورماتور سن  $(a_i, b_i, c_i, i = 1, 2, 3)$  را به گونه ای پیدا کرد تا توان حقیقی عبوری از خط بیشینه شود.

روش ساده ای که در مقاله حاضر ارائه شده است استفاده از یک متغیر برای کنترل ۹ تپ ترانس است که معادلات آن در ادامه آورده شده است. برتری این روش، تمرکز سیستم بر روی یک متغیر و کنترل سریع تر آن است. فرض می شود علاوه بر اینکه سیستم متقارن و متعادل است، تپ های ترانس با یکدیگر روابط زیر را دارند:

$$a_1 = a \angle 0 \quad (۱۹)$$

$$b_1 = a \angle -120 \quad (۲۰)$$

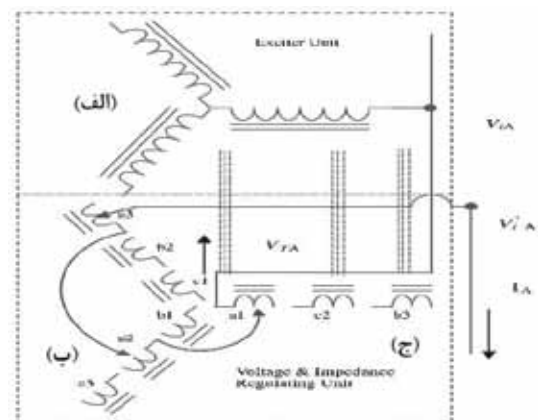
$$c_1 = a \angle 120 \quad (۲۱)$$

دیگسایلنت شبیه سازی شده و سپس با سایر ادوات فکتس و در حضور PSS مقایسه می شوند.

در بخش دوم مقاله ماهیت ترانسفورماتور سن معرفی شده و در بخش سوم، اصول عملکرد این ترانسفورماتور تشریح شده است [۴]. در بخش چهارم مقاله، ترانسفورماتور سن در نرم افزار دیگسایلنت مدل می شود. هم چنین مرور مختصری بر سایر ادوات فکتس شامل UPFC، STATCOM، SSSC و TCSC خواهیم داشت [۵،۶،۷،۸]. در [۹] فقط ترانسفورماتور سن به عنوان یک نوع جدید از ادوات فکتس معرفی شد که در مقاله حاضر به بررسی و مقایسه آن با ادوات فکتس در زمینه پایداری گذرا و پایداری ولتاژ پرداخته شده است. در بخش پنجم، تلفات توان، پایداری گذرا و پایداری ولتاژ در حضور این جبران کننده ها و در دو شبکه ۹ باسه و ۳۹ باسه، با هم مقایسه شده اند و در پایان نیز نتیجه گیری و مراجع آورده شده است.

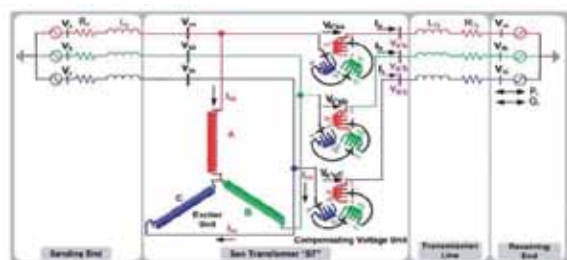
## ۲- ماهیت ترانسفورماتور سن

همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، ترانسفورماتور سن در واقع یک ترانسفورماتور چهارسیم پیچه است که سیم پیچ اولیه آن یک ترانسفورماتور تک فاز (به صورت ستاره) و سیم پیچ ثانویه آن یک ترانسفورماتور ۹ سیم پیچه است [۳]. وظیفه تنظیم ولتاژ و تنظیم فاز را نه سیم پیچ ثانویه  $a_1, c_2, c_3$  در فاز A،  $b_1, a_2, c_3$  در فاز B و  $c_3, c_1, b_1$  در فاز C انجام می دهند.



شکل ۱: ترانسفورماتور سن (ب) تنظیم ولتاژ (ج) تنظیم فاز [۳]  
قاعده عملکرد ترانسفورماتور سن

ترانسفورماتور سن بر اساس ولتاژ جبران سازی  $V_s$ 's عمل می کند. این ولتاژ جبران سازی توسط سیم پیچ های اولیه ایجاد می شود، بنابراین توان اکتیو و راکتیو که با خط مبادله می شود، باید از طریق سیم پیچ اولیه در خط جاری شود. این ولتاژ جبران سازی در هر فاز، از مجموع فازور ولتاژهای سیم پیچ سه فاز تشکیل شده است [۴].



شکل ۲: مدل قرار گرفتن ترانسفورماتور سن [۴]

سن می‌تواند توان انتقالی خط را در تئوری تا بی‌نهایت افزایش دهد و در واقع اثر راکتانس‌های خط را از بین ببرد. با مقدار مناسب  $\alpha$  ، توان انتقالی دو برابر می‌شود و معادله توان جدید به صورت  $a = \frac{1}{3}$  ، توان انتقالی دو برابر می‌شود و معادله توان جدید به صورت  $P_{\text{anew}} = 2 \cdot P_{\text{aold}}$  تبدیل می‌شود که تاثیر زیادی بر پایداری گذرا دارد که در ادامه در نتایج شبیه‌سازی دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) یک مدل اولیه ترانسفورماتور سن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ولتاژ جبران‌سازی توسط واحد تنظیم ولتاژ و واحد تنظیم امپدانس، وارد شبکه می‌شود که باعث تغییر ولتاژ خط و در نتیجه جریان خط می‌شود. [۱]

#### ۴- مدل‌سازی ادوات فکتس

در این بخش به معرفی مدل هر یک از ادوات فکتس موردنظر می‌پردازیم [۸، ۷، ۶، ۵].

##### UPFC •

جبران‌کننده UPFC یکی از محبوب‌ترین ادوات فکتس می‌باشد که علاوه بر کنترل پارامترهای مؤثر بر عبور توان در خط انتقال، توانایی کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو را دارد که این توانایی در دیگر جبران‌کننده‌ها وجود ندارد [۸، ۶].

UPFC از دو ترانسفورماتور تحریک و تزریق و دو مبدل منبع ولتاژ (VSC) که توسط خازن DC به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده است. عملکرد این ترانسفورماتورها به این گونه است که ترانسفورماتور تحریک، توان اکتیو را از منبع می‌گیرد و این توان را به ترانسفورماتور تزریق می‌دهد و در واقع، مبادله توان صورت می‌گیرد [۸، ۶].

##### SSSC •

جبران‌کننده SSSC جبران‌سازی را به صورت سری با خط انتقال انجام می‌دهد. توانایی این جبران‌کننده، تولید ولتاژ جبران‌سازی مستقل از جریان خط است که می‌تواند آن را در محدوده خازنی و القایی کنترل کند. اجزای تشکیل‌دهنده SSSC یک منبع انرژی می‌باشد که به یک مبدل منبع ولتاژ VSC توسط یک خازن DC متصل شده است [۷].

##### TCSC •

این جبران‌کننده از یک راکتور کنترل شونده با تریستور تشکیل شده است. TCSC می‌تواند ولتاژ جبران‌سازی ثابتی را در محدوده‌ای که برای آن تعریف شده، تامین کند. جبران‌ساز TCSC به دلیل اینکه یک جبران‌کننده سری است عامل مؤثری در جبران‌سازی توان راکتیو خطوط انتقال بلند می‌باشد [۷].

##### STATCOM •

این جبران‌کننده از جبران‌کننده‌های موازی است که به‌عنوان یک منبع ولتاژ سنکرون عمل می‌کند. STATCOM می‌تواند به صورت محلی توان راکتیو را کنترل کند، همچنین تنظیم خروجی ولتاژ را به صورت پیوسته انجام می‌دهد. به‌همین دلیل در زمان اختلال‌های ناگهانی یا اغتشاش‌های بزرگ در شبکه قدرت، می‌توان از STATCOM استفاده کرد [۵].

#### ۵- مدل‌کردن ترانسفورماتور سن

در این مطالعه ترانسفورماتور سن با نرم‌افزار دیگسایلنت شبیه‌سازی شده است. از آنجایی که در نرم‌افزار دیگسایلنت ترانسفورماتور چهارسیم پیچیده وجود ندارد، در شبیه‌سازی‌ها به جای یک ترانسفورماتور ۹ سیم پیچیده، از ۹ ترانسفورماتور تک فاز با قابلیت تغییر تپ استفاده کرده‌ایم [۹]. تپ ترانسفورماتور به صورت خودکار تنظیم می‌شود و ولتاژ جبران موردنیاز تولید می‌شود.

$$a_2 = a \angle 120 \quad (22)$$

$$b_2 = a \angle 0 \quad (23)$$

$$c_2 = a \angle -120 \quad (24)$$

$$a_3 = a \angle -120 \quad (25)$$

$$b_3 = a \angle 120 \quad (26)$$

$$c_3 = a \angle 0 \quad (27)$$

پس از ساده‌سازی معادلات بالا داریم:

$$V_{sa}(1 - 3a) = jX_L I_{Rc} + V_{Ra} \quad (28)$$

$$I_a = a \angle 0 I_{Ra} + a I_{Rc} + a I_{Ra} + I_{Ra} = (1 + 3a) I_{Ra} \quad (29)$$

و داریم:

$$V_a = jX_s I_a + \frac{jX_L}{1-3a} I_{Ra} + \frac{V_{Ra}}{1-3a} = \quad (30)$$

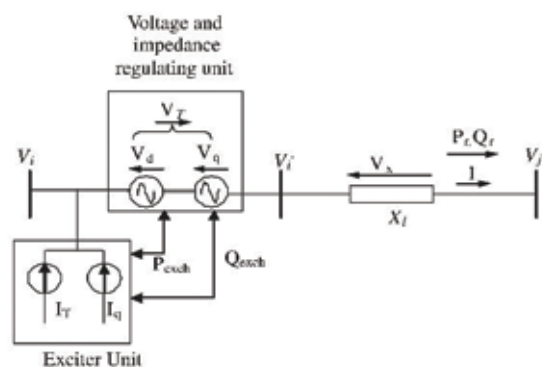
به جای مقدار  $\frac{1}{1-3a}$  مقدار  $k$  و به جای مقدار  $(X_s + \frac{X_L}{1-9a^2})$  مقدار  $X_{\text{new}}$  را قرار می‌دهیم و سپس داریم:

$$I_a = \frac{V_a - kV_{Rc}}{jX_{\text{new}}} \quad (31)$$

حال توان مختلط و سپس توان حقیقی را محاسبه می‌کنیم:

$$S_a = V_a I_a^* = \frac{V_a^2 - K^* V_a V_{Ra} \angle \delta}{-jX_{\text{new}}} \quad (32)$$

$$P_a = \frac{kV_a V_{Ra} \sin(\delta)}{X_{\text{new}}} \quad (33)$$



شکل ۳: مدل ترانسفورماتور سن [۱]

حال با جاگذاری مقادیر  $k$  و مقدار  $a$  را به گونه‌ای می‌یابیم که توان انتقالی از مقدار قبل از وجود ترانسفورماتور سن، بیشتر شود. اگر مقدار تپ یا متغیر  $a=0$  باشد یعنی ترانسفورماتور سن به یک ترانسفورماتور یک‌به‌یک تبدیل می‌شود و توان انتقالی از خط را تغییر نمی‌دهد. در صورتی که مقدار تپ ترانس  $a < \frac{\sqrt{2}}{3}$  شود ترانسفورماتور

## ۶- مقایسه ترانسفورماتور سن با سایر ادوات فکتس

در این مقاله دو شبکه ۹ باسه و ۳۹ باسه IEEE را انتخاب کرده‌ایم و شرایط شبکه را با و بدون جبران‌کننده آنالیز کرده‌ایم. همچنین در چندین شبکه مختلف، حضور ترانسفورماتور سن را مورد بررسی قرار داده‌ایم.

سپس چندین خطای اتصال کوتاه در چند خط مختلف به‌طور تصادفی ایجاد کردیم تا پایداری گذرا، پایداری ولتاژ و تلفات شبکه را بررسی کنیم که برای نمونه نتایج خط ۳ از شبکه ۹ باسه و ۳۹ باسه از شبکه ۳۹ باسه در این مقاله آورده شده است. در هر بررسی هر یک از جبران‌کننده‌های STATCOM، UPFC، SSSC، TCSC و SEN را در شبکه قرار دادیم و پایداری گذرا، پایداری ولتاژ و تلفات شبکه را با حضور جبران‌کننده‌ها مورد مقایسه قرار دادیم. بار دیگر پایداری شبکه را در حضور PSS آنالیز کردیم.

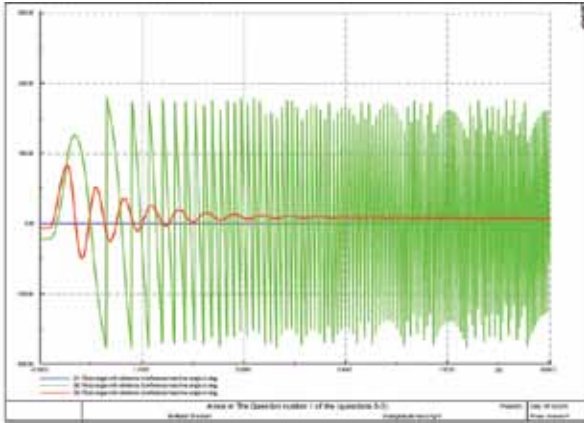
در صورتی که هیچ جبران‌کننده‌ای در شبکه نباشد، تلفات شبکه ۹ باسه ۴۳،۶۴ MW و ۹۲،۲۵ MVAR و تلفات شبکه ۳۹ باسه ۴۳،۷۱ MW و ۱۵۸،۵۳ MAR می‌باشد. حال جبران‌کننده‌ها را وارد شبکه می‌کنیم که تلفات شبکه مطابق جدول یک به‌دست می‌آید.

برای بررسی پایداری گذرا در شبکه ۹ باسه و ۳۹ باسه، چندین خطای اتصال کوتاه در خط‌های مختلف ایجاد کردیم که به‌عنوان نمونه نتایج خط ۳ در شبکه ۹ باسه و ۳۹ باسه در شبکه ۳۹ باسه را بررسی می‌کنیم و هر یک از جبران‌کننده‌ها را وارد شبکه می‌کنیم. در این شبیه‌سازی، زمان شروع اتصال کوتاه را ۰،۱ تعریف کرده‌ایم زمان برطرف شدن خطا را بسته به زمان ناپایداری هر شبکه، آن‌قدر تغییر داده‌ایم تا زمان قطع بحران را به دست بیاوریم. زمان شبیه‌سازی در شبکه ۹ باسه را ۱۰ ثانیه و زمان شبیه‌سازی شبکه ۳۹ باسه را ۲۰ ثانیه تعریف کرده‌ایم. در هر شبیه‌سازی یک‌بار زمان قطع بحران را در حضور جبران‌کننده مورد نظر و بار دیگر در حضور PSS به دست آوردیم. زمان قطع بحرانی در خط ۳ شبکه ۹ باسه بدون جبران‌کننده ۰،۲۴۹۲۹۹۵، در حضور SSSC، ۰،۳۱۴۲۱۲، در حضور STATCOM، ۰،۳۲۳۷۴۶، در حضور TCSC، ۰،۳۱۲۷۲۹، در حضور UPFC، ۰،۳۱۵۴۱ و در حضور ترانسفورماتور سن ۰،۴۲۹۵۶۳ می‌باشد. زمان قطع بحرانی در ۳۹ باسه شبکه ۳۹ باسه بدون جبران‌کننده ۰،۶۵۷۵۹۵، در حضور SSSC، ۱،۱۸۵۲۸، در حضور STATCOM، ۰،۶۶۱۶۸، در حضور TCSC، ۰،۶۵۷۷۸، در حضور UPFC، ۱،۱۹۲۶۵ و در حضور ترانسفورماتور سن ۱،۱۲۱۲۲ می‌باشد. به‌عنوان نمونه، تنها نتایج شبیه‌سازی ترانسفورماتور سن در شکل‌های (۴) تا (۷) آورده شده است.

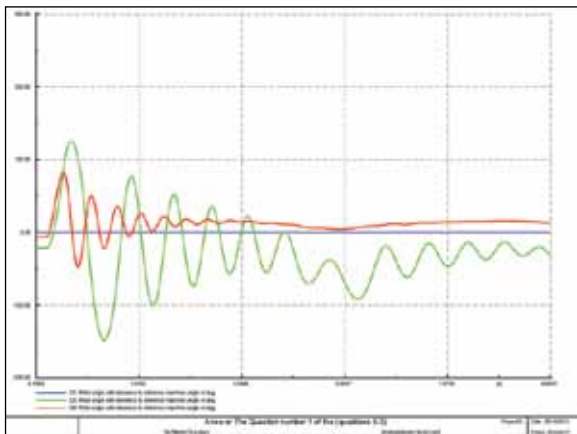
حال نتایج پایداری ولتاژ را بررسی می‌کنیم. ضریب افزایش بارها را برای هر یک از بارها در شبکه ۹ باسه و ۳۹ باسه به‌دست می‌آوریم که این نتایج در جدول (۲) و (۳) نشان داده شده است. همچنین به‌عنوان نمونه نتایج شبیه‌سازی ترانسفورماتور سن در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده است.

جدول ۱: تلفات شبکه در حضور جبران‌کننده‌ها

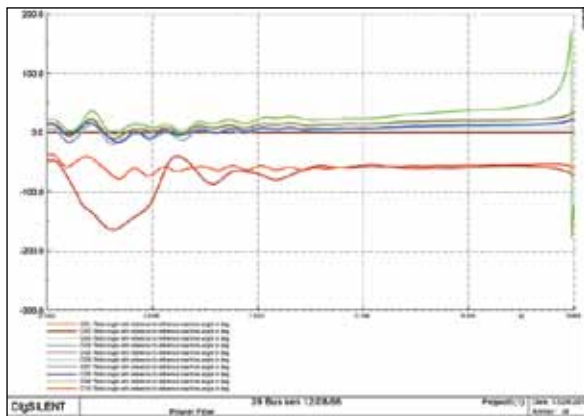
تلفات	SEN	STATCOM	TCSC	UPFC	SSSC
شبکه ۹ باسه	4.12 MW -86.75 MVAR	4.60 MW -93.04 MVAR	4.64 MW -92.25 MVAR	4.61 MW -92.76 MVAR	4.64 MW -92.18 MVAR
شبکه ۳۹ باسه	44.38 MW -142.42 MVAR	43.72 MW -158.12 MVAR	43.71 MW -158.53 MVAR	45.09 MW -133.23 MVAR	45.09 MW -133.33 MVAR



شکل ۴: زمان قطع بحرانی شبکه ۹ باسه در حضور SEN



شکل ۵: برطرف شدن خطای شبکه ۹ باسه در حضور SEN و PSS



شکل ۶: زمان قطع بحرانی شبکه ۳۹ باسه در حضور SEN

جدول ۲: مقادیر ضریب افزایش بار شبکه ۹ باسه در حضور ادوات فکتس

شبکه ۹ باسه	باس ۳	باس ۴	باس ۸
Upfc با	3.256	4.317	3.476
Sssc با	3.248	4.305	4.661
Statcom با	3.28	4.32	4.687
Sen با	1.4912	3.817	2.789
Tcsc با	3.2488	4.308	4.674

با توجه به نتایج جدول، پایداری ولتاژ به دلیل وجود ادوات فکتس در هر دو شبکه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیده شده است. هم‌چنین نقش قابل توجه ادوات فکتس را در کاهش تلفات شبکه و بهبود پایداری گذرا مشاهده می‌کنیم و می‌بینیم که در این بین، ترانسفورماتور سن بسیار بهتر از سایر ادوات فکتس عمل می‌کند. با توجه به این نتایج، می‌توان گفت ترانسفورماتور سن یک کنترل‌کننده منحصربه‌فرد برای کنترل ولتاژ، زاویه فاز و جریان توان در شبکه است. هم‌چنین UPFC و ترانسفورماتور سن کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو را انجام می‌دهند. از برتری‌های ترانسفورماتور سن بر UPFC اجزای تشکیل‌دهنده آن است. از آنجایی که UPFC شامل مبدل منبع ولتاژ VSC می‌باشد و ترانسفورماتور سن از تپ‌چنجرهای بار تشکیل شده است، بنابراین ترانسفورماتور سن یک عنصر قدرتی است. این ویژگی‌ها که برتری ترانسفورماتور سن را بر UPFC نشان می‌دهد، باعث می‌شود که اجزای ترانسفورماتور سن دیرتر مستهلک شود و هزینه‌های آن نیز کاهش یابد. VSCها هزینه نصب، هزینه تلفات و نگهداری، هزینه‌های عملکرد و ... بیشتری دارند، در صورتی که تپ‌چنجرهای بار، هزینه پایین‌تری در مقایسه با VSC دارند. از طرف دیگر، توان در ترانسفورماتور سن فقط در یک مرحله اتفاق می‌افتد؛ در صورتی که در UPFC، دو مرحله تلفات در VSCها و دو مرحله در ترانسفورماتورهای جفت شده داریم.

در کنترل‌کننده‌های سری SSSC و TCSC نیز امکان کاهش تلفات اکتیو وجود ندارد و تنها تلفات راکتیو را می‌توان جبران‌سازی کرد.

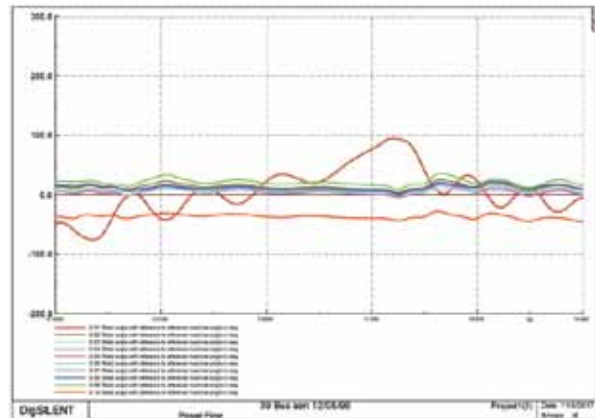
#### ۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه و نتایج مرجع [۹]، مدلی برای شبیه‌سازی ترانسفورماتور سن در نرم‌افزار دیگسایلنت ارائه شده است. سپس در دو شبکه نمونه، تلفات، پایداری گذرا و پایداری ولتاژ در حضور جبران‌کننده‌های توان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل شبیه‌سازی‌ها در این مقاله، برتری ترانسفورماتور سن را در کاهش تلفات و پایداری گذرا بر دیگر ادوات فکتس نشان می‌دهد. همان‌طور که ترانسفورماتورهای سه‌سیم‌پیچ در بسیاری از موارد به‌جای چند ترانسفورماتور دوسیم‌پیچ استفاده می‌شوند؛ ترانسفورماتورهای سه فاز چهارسیم‌پیچ نیز به‌زودی نقش خود را در شبکه قدرت نشان خواهند داد.

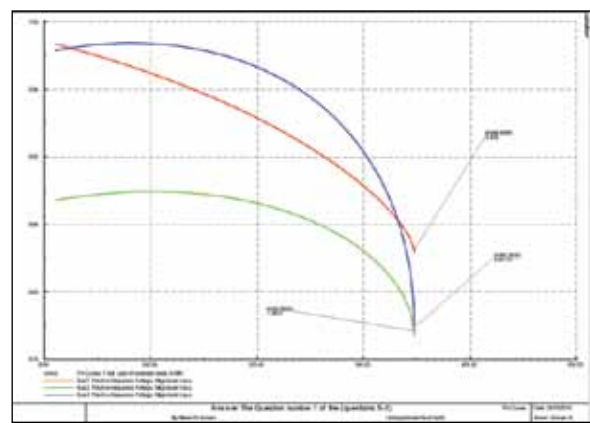
#### مراجع

- [1] P. Yogananda Reddy and R. Giridhar Balakrishna, "Matlab implementation of sen transformer as a FACTS device", International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, No. 5, Vol. 3, pp. 316-326, 2015.
  - [2] K. K. Sen and M. L. Sen, "Comparison of the sen transformer with the unified power flow controller", IEEE Trans. Power Del., Vol. 18, No. 4, pp. 1523-1533, 2003.
  - [3] K. K. Sen and M. L. Sen, "Introducing the family of sen transformers: a set of power flow controlling transformers", IEEE Trans. Power Del., Vol. 18, No. 1, pp. 149-157, 2003.
  - [4] M. O. Faruque and V. Dinavahi, "A tap-changing algorithm for the implementation of sen transformer", IEEE Trans. Power Del., Vol. 22, No. 3, pp. 1750-1757, 2007.
  - [5] K. R. Padiyar, FACTS controllers in power transmission and distribution. New Age International (P) Ltd., pp. 173-213, 2007.
  - [6] K. K. Sen and E. J. Stacey, "UPFC-unified power flow controller: theory, modeling and applications", IEEE Trans. Power Del., Vol. 13, No. 4, pp. 1453-1460, 1998.
  - [7] G. Maddela, "Quantifying losses in power systems using different types of FACTS controllers", Thesis for the M.Sc. Degree University of Saskatchewan, pp. 27-38, 2013.
- [۸] حسن براتی، رضا ساکی، سید سعید اله مرتضوی، "کنترل هوشمند کنترل‌کننده یکپارچه توان جهت بهبود پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت چند ماشینه"، فصل‌نامه پژوهش در مهندسی برق، شماره ۲، بهار ۱۳۸۹، صفحات ۳-۱۱.
- [۹] مصطفی عیدینانی، فرزانه رحیمی، "بهبود پایداری گذرا در حضور ترانسفورماتور سن"، فصل‌نامه علمی-ترویجی عصر برق، شماره ۷، تابستان ۱۳۹۶، صفحات ۲۹-۳۴.

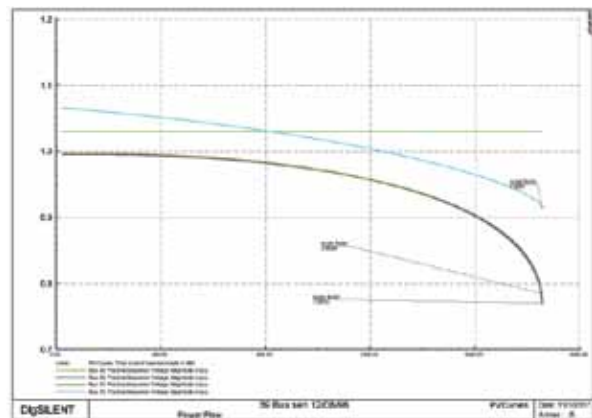
\*\*\*



شکل ۷: برطرف شدن خطای شبکه ۳۹ باسه در حضور PSS و SEN



شکل ۸: پایداری ولتاژ شبکه ۹ باسه در حضور SEN



شکل ۹: پایداری ولتاژ شبکه ۳۹ باسه در حضور SEN

جدول ۳: مقادیر ضریب افزایش بار شبکه ۳۹ باسه در حضور ادوات فکتس

شبکه 39 باسه	باس 39	باس 8	باس 7
با Upfc	1.911	3.6304	6.9784
با Sssc	1.9107	3.629	6.976
با Statcom	2.434	3.755	7.175
با Sen	2.567	3.683	7.063
با Tesc	2.434	3.755	7.1734