

# ارائه روشی جدید جهت ایجاد هماهنگی بین دو تجهیز ULTC و STATCOM

محمدرضا احمدی نیا<sup>۱</sup>، رضا قاضی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد، mohammadreza.ahmadinia@stu.um.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد، rghazi@um.ac.ir

چکیده - در این مقاله یک روش جدید جهت ایجاد هماهنگی بین دو تجهیز STATCOM و ULTC ارائه شده است. هر دو تجهیز از تجهیزات کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه هستند. STATCOM بر خلاف ULTC یک تجهیز سریع بوده و اصلی ترین وظیفه آن تامین توان راکتیو در شرایط اضطراری سیستم است. اگر عملکرد دو تجهیز با یکدیگر هماهنگ نباشد، به دلیل سرعت عملکرد بالاتر، همواره در تغییرات ولتاژ این STATCOM است که ابتدا پاسخ می دهد، از این رو معمولاً ظرفیت آن پر بوده و نمی تواند در شرایط اضطراری عملکرد مناسبی داشته باشد. در این مقاله با اعمال تغییراتی در سیستم کنترل STATCOM و ایجاد یک ولتاژ مبنای متغیر، روشی ساده و جدید جهت هماهنگی ULTC و STATCOM ارائه شده است. مزیت اصلی روش پیشنهادی نسبت به روش های قبلی این است که در روش پیشنهادی تنها سیستم کنترل STATCOM تا حدی تغییر می کند و کنترل ULTC بدون تغییر و به صورت متداول صورت می گیرد. نتایج شبیه سازی دقت و قدرت روش پیشنهادی را نشان می دهد.

کلید واژه- کنترل هماهنگ، ترانسفورماتور با قابلیت تغییر تپ زیر بار یا ULTC، جبران کننده استاتیکی سنکرون یا STATCOM

## ۱- مقدمه

بین دو تجهیز ULTC و STATCOM ارائه شده است. در مرجع [۳] از شبکه عصبی جهت ایجاد هماهنگی بین دو تجهیز استفاده شده است. در روش ارائه شده در این مقاله ابتدا STATCOM به تقاضای توان راکتیو پاسخ می دهد، سپس با استفاده از شبکه عصبی و در راستای مینیمم کردن توان راکتیو خروجی STATCOM تپ بهینه ترانسفورماتور به ازای شرایط کاری و توپولوژی های مختلف سیستم بدست آمده و به ULTC اعمال می شود.

در روش ارائه شده در مرجع [۴]، با استفاده از یک کنترل کننده، ولتاژ مبنای ULTC با توجه به توان راکتیو خروجی STATCOM تعیین می گردد. در ساختار این کنترل کننده از یک بلوک غیرخطی dead zone استفاده شده است، این بلوک باعث می شود در زمانهایی که توان راکتیو خروجی STATCOM در محدوده مجاز است تغییری در ولتاژ مبنای ULTC ایجاد نگردد و در غیر اینصورت ولتاژ مبنای ULTC اصلاح می شود که منجر به تغییر تپ مناسب در ULTC گردد. در مرجع [۵]، روشی جدید جهت هماهنگی STATCOM با سایر تجهیزات گند نظیر ULTC و خازن ارائه شده و در مرجع [۶] نیز روشی جامع جهت هماهنگی تجهیزات سریع کنترل ولتاژ (SVC) و STATCOM با تجهیزات گند کنترل ولتاژ (ULTC و خازن) ارائه شده است.

همانگونه که گفته شد ایجاد هماهنگی بین ULTC و سایر ادوات FACT نیز در مراجع مختلف مطرح شده است. در مراجع

در سالهای اخیر با افزایش استفاده از ادوات FACT، جهشی در بهره برداری از سیستم قدرت حاصل گردید [۱]. البته رو آوردن به سمت این ادوات مشکلاتی را نیز به همراه داشت، یکی از این مشکلات بحث تداخل این ادوات با سایر تجهیزات سیستم قدرت است. یکی از موارد تداخل، عدم هماهنگی بین دو تجهیز ULTC و STATCOM است. ULTC یک تجهیز الکترومکانیکی با عملکرد کند و گسسته است و در عین سادگی ساختمان، دلیل وجود بخش های غیر خطی و عملکرد تاخیری تجهیز پیچیده ای بوده و وظیفه آن تنظیم ولتاژ است [۲].

تنظیم ولتاژ، بهبود پایداری گذرا و میرایی نوسانات توان سه مورد از اصلی ترین وظایف STATCOM در شبکه قدرت می باشد [۱]. اگر STATCOM در شبکه قدرت در مجاورت تجهیزات گند کنترل توان راکتیو نظیر ULTC قرار گیرد، به دلیل سرعت عملکرد بالا سریعاً به تقاضای توان راکتیو (مثبت یا منفی) پاسخ داده و این مساله به پر شدن ظرفیت STATCOM منجر می شود. بنابراین این تجهیز نخواهد توانست در شرایط اضطراری سیستم عملکرد قابل قبولی داشته و به وظایف اصلی خود عمل نماید [۳]. از این رو ایجاد هماهنگی در عملکرد این دو تجهیز امری اجتناب ناپذیر است.

در مراجع مختلف روشهای متفاوتی جهت ایجاد هماهنگی

[۷] و [۸] روشهایی جهت ایجاد هماهنگی بین ULTC و SVC پیشنهاد شده است.

در STATCOM بر خلاف SVC تامین توان راکتیو (مثبت یا منفی) بدون استفاده از خازن و راکتور و با استفاده از کنورتور سوئیچ شونده صورت می‌گیرد. به دلایل متعدد در حال حاضر استفاده از کنورتورهای منبع ولتاژی به نوع جریانی ترجیح داده می‌شود [۱].

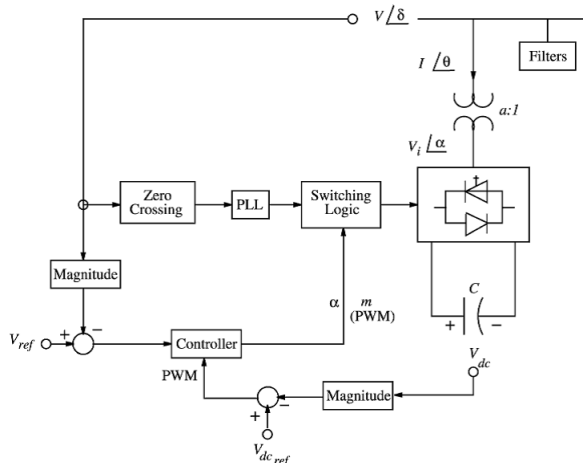
مقدار و زاویه ولتاژ خروجی دو پارامتری هستند که جریان اکتیو و راکتیوی را که کنورتور می‌کشد را تعیین نموده و در نتیجه مشخص کننده توان اکتیو و راکتیوی هستند که کنورتور با سیستم ac مبادله می‌کند. در شکل ۱ بلوک دیاگرام STATCOM که در آن کنترل ولتاژ با استفاده از روش PWM صورت می‌گیرد نشان داده شده است.

## ۲- مدلسازی تجهیزات

جهت نمایش نحوه پیاده‌سازی روش پیشنهادی ابتدا لازم است تا مدل مناسبی برای دو تجهیز ULTC و STATCOM ارائه گردد. این مدل‌ها در بخش‌های ۲-۱ و ۲-۲ معرفی شده‌اند.

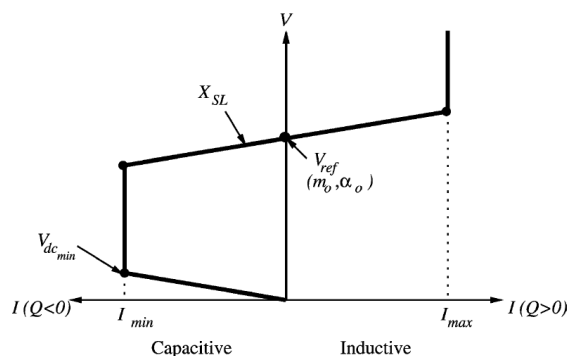
۲-۱- مدل سازی ULTC

در یک ULTC تعداد تپ‌ها بطور گسسته به نحوی تغییر می‌کند که ولتاژ در سمت ثانویه در محدوده تعیین شده باقی بماند. در صورت خارج شدن ولتاژ از محدوده تعیین شده پس از یک تاخیر زمانی ناشی از دستگاه‌های اندازه‌گیری و عملکرد موتور، تپ ترانسفورماتور تغییر خواهد نمود. معادلات حاکم بر عملکرد ULTC به شرح زیر خلاصه شده‌اند [۴].



شکل ۱: بلوک دیاگرام جبران ساز استاتیکی، سنکرون [۹]

در بسیاری از کاربردها جبران‌ساز استاتیکی سنکرون به عنوان یک تنظیم‌کننده کامل ولتاژ ترمینال بکار نمی‌رود، بلکه متناسب با جریان جبران‌سازی تا اندازه‌ای مجاز به تغییر است [۱]. در شکل ۲ مشخصه  $V-I$  جبران‌ساز استاتیکی سنکرون در حالت ماندگار نشان داده است.



شکل ۲: مشخصه  $V-I$  جبران ساز استاتیکی، در حالت ماندگار [۹]

$$n(t+1) = n(t) - d.f(e(t), \tau(t)) \quad (1)$$

$$\tau(t+1) = g(e(t), \tau(t)) \quad (2)$$

$$f(e, \tau) = \begin{cases} 1 & \text{if } e > +\varepsilon \text{ and } \tau > T_d \\ -1 & \text{if } e < -\varepsilon \text{ and } \tau < -T_d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$g(e, \tau) = \begin{cases} \tau + 1 & \text{if } e > +\varepsilon \text{ and } \tau \geq 0 \\ \tau - 1 & \text{if } e < -\varepsilon \text{ and } \tau \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\ast)$$

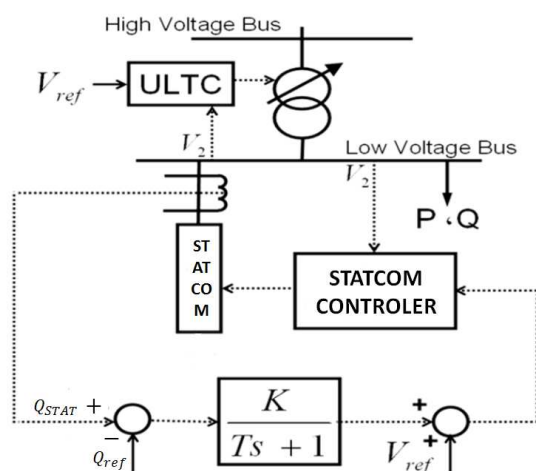
$$e = V - V_{ref} \quad (5)$$

در معادلات فوق  $n$  موقعیت تب ULTC،  $d$  گام تغییر در تب،  $e$  خطای ولتاژ،  $T_d$  تاخیر زمانی ULTC،  $V$  ولتاژ کنترل شده،  $\mathcal{E}$  آستانه تنظیمی ولتاژ،  $\tau$  شمارنده و  $V_{ref}$  ولتاژ مبنا می‌باشد. زمانی که ولتاژ کنترل شده به اندازه  $\mathcal{E}$  از مقدار مبنای تنظیمی کمتر یا بیشتر شود، پس از گذشت زمان  $T_d$  به اندازه  $d$  به مقدار تب  $n$  افزوده یا از آن کاسته می‌شود.

### ۳- روش پیشنهادی

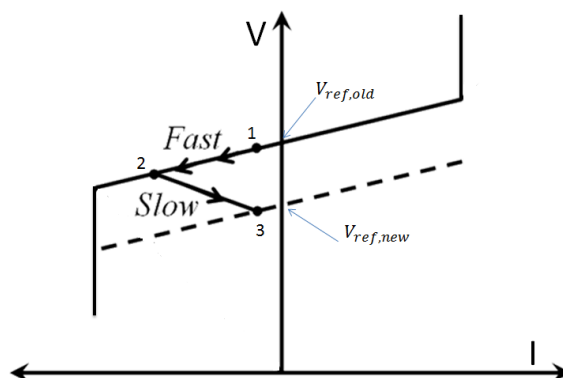
بدیهی است زمانی ولتاژ مبنا تغییر خواهد کرد که توان راکتیو تولیدی با مقدار مبنای مطلوب فاصله داشته باشد. در اینجا کنترل کننده تناسبی وظیفه تقویت سیگنال خطا و ایجاد تاخیر لازم را عهده‌دار است.

در شکل ۵ نیز چگونگی پیاده‌سازی طرح پیشنهادی بر روی یک سیستم شامل ULTC و STATCOM نشان داده است. فرض شده است که هر دو تجهیز در کنار هم و روی یک باس قرار دارند، البته بدلیل اینکه سیستم کنترل پیشنهادی تنها بر روی STATCOM پیاده‌سازی می‌شود، اگر دو تجهیز در کنار یکدیگر نیز نباشند مشکلی در پیاده‌سازی طرح پیشنهادی وجود ندارد.



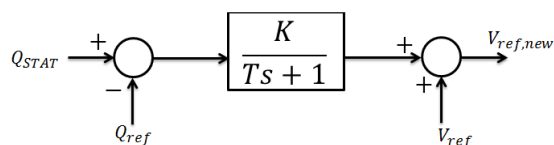
شکل ۵: چگونگی پیاده‌سازی طرح پیشنهادی

در روش پیشنهادی در این مقاله همانگونه که اشاره شد ابتدا به STATCOM اجازه داده می‌شود تا سریعاً توان راکتیو مورد نیاز را تامین نماید. همانگونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، نقطه کار بر روی مشخصه STATCOM از نقطه ۱ به ۲ جابجا خواهد شد. سپس با تغییر مناسب ولتاژ مبنای STATCOM به آرامی ظرفیت STATCOM آزاد خواهد شد و در طی این فرآیند ULTC وادار می‌شود تا با تغییر تپ، توان راکتیو مورد نیاز را تامین نماید.



شکل ۳: چگونگی تغییر نقطه کار در STATCOM

بدین ترتیب نقطه کار به آهستگی از نقطه ۲ به ۳ منتقل خواهد شد. نقطه کار ۳ توان راکتیوی برابر نقطه کار اولیه خواهد داشت، این توان راکتیو همان توان راکتیو مبنایی است که ما بدنبال تامین آن در شرایط نرمال هستیم. مقدار این توان راکتیو باید به نحوی تعیین گردد تا STATCOM ظرفیت آزاد کافی برای عملکرد مناسب در شرایط اضطراری را داشته باشد. جهت پیاده‌سازی روش پیشنهادی از یک کنترل کننده تناسبی مطابق شکل ۴ استفاده می‌شود.



شکل ۴: طرح کنترل کننده پیشنهادی

### ۴- ارزیابی روش پیشنهادی با شبیه‌سازی

جهت ارزیابی قدرت و دقت روش پیشنهادی یک شبکه نمونه در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی استفاده شده است. شبیه‌سازی بر روی یک شبکه نمونه که از مرجع [۴] گرفته شده، در هر دو حالت افزایش بار و کاهش بار صورت می‌گیرد. در بخش ۴-۱ شبکه نمونه معرفی شده و در بخش ۴-۲ نتایج تجربی شبیه‌سازی بررسی می‌گردد.

#### ۴-۱- شبکه نمونه

دیagram تک‌خطی شبکه نمونه در شکل ۶ نشان داده است. یک بار ۳۶ مگاواتی با ضریب قدرت ۰.۹۶۴، پس‌فاز، از طریق یک ULTC با نسبت تبدیل  $120KV/25KV$  به یک شبکه ۱۲۰ کیلوولتی با قدرت اتصال کوتاه ۱۰۰۰ مگاوات-آمپر متصل شده است. همراه با عنوان یا زیرنویس آن را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ابتدا توان راکتیو تولیدی STATCOM با یک مقدار مبنا مقایسه می‌شود، سیگنال خطای حاصل پس از عبور از یک کنترل کننده تناسبی با مقدار ولتاژ مبنا جمع شده و ولتاژ مبنای جدید را جهت اعمال به STATCOM فراهم می‌کند.

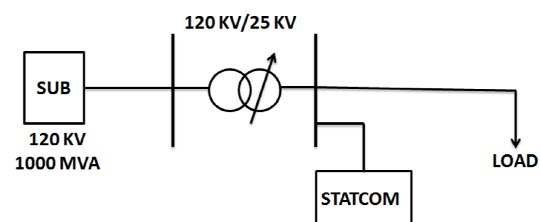
روش پیشنهادی برابر صفر ( $Q_{ref} = 0$ ) در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای کنترل کننده تناسبی نیز به صورت  $K = 0.2$  و  $T = 25s$  در نظر گرفته شده است. تصویر شبکه شبیه سازی شده در بخش سیمولینک نرم افزار MATLAB در شکل ۷ نشان داده است.

#### ۴-۲- نتایج تجربی

در بخش قبل شبکه نمونه معرفی گردید، جهت نشان دادن قدرت و دقت روش پیشنهادی فرض می کنیم که شبکه در حالت ماندگار قرار دارد، یک بار ۱۸ مگاواتی با ضریب قدرت ۰,۹۶۴ در لحظه  $t=20s$  در باس بار سوئیچ می شود و در لحظه  $t=80s$  بار اضافه شده قطع می گردد. مدت زمان شبیه سازی ۱۲۰ ثانیه می باشد و نتایج حاصل در دو حالت ۱. بدون هماهنگی و ۲. روش کنترل پیشنهادی (هماهنگ شده) نشان داده می شود.

در شکل ۸ چگونگی تغییرات تپ ULTC در دو حالت بدون هماهنگی و هماهنگ شده نشان داده شده است. هماهنگی که در شکل دیده می شود، در حالت بدون هماهنگی STATCOM سریعاً به تغییرات ولتاژ پاسخ داده و توان راکتیو مورد نیاز (مثبت یا منفی) را تامین می کند، بنابراین تپ ULTC در طول دوره شبیه سازی ثابت است. اما در روش کنترل پیشنهادی ULTC وادار می شود تا توان راکتیو مورد نیاز را تامین نماید، بنابراین تغییرات تپ آن قابل توجه می باشد.

STATCOM به صورت موازی با بار و در سمت فشار ضعیف ULTC نصب شده است. قدرت نامی ULTC، ۴۷ مگاوات آمپر و اتصال آن به صورت  $\lambda/\Delta$  است. وظیفه ULTC تثبیت ولتاژ ثانویه (باس بار) در مقدار نامی ۲۵ کیلوولت است. تغییرات تپ ULTC از -۸ تا +۸ است که با در نظر گرفتن تپ صفر مجموعاً ۱۷ تپ می باشد. هر تپ نیز اصلاح ولتاژی معادل ۰,۰۱۸۷۵ پریونیت را ایجاد می کند، بنابراین ولتاژ سمت اولیه ULTC می تواند در محدوده ۰,۸۵ پریونیت (۱۰۲ کیلوولت) تا ۱,۱۵ پریونیت (۱۳۸ کیلوولت) تغییر کند.

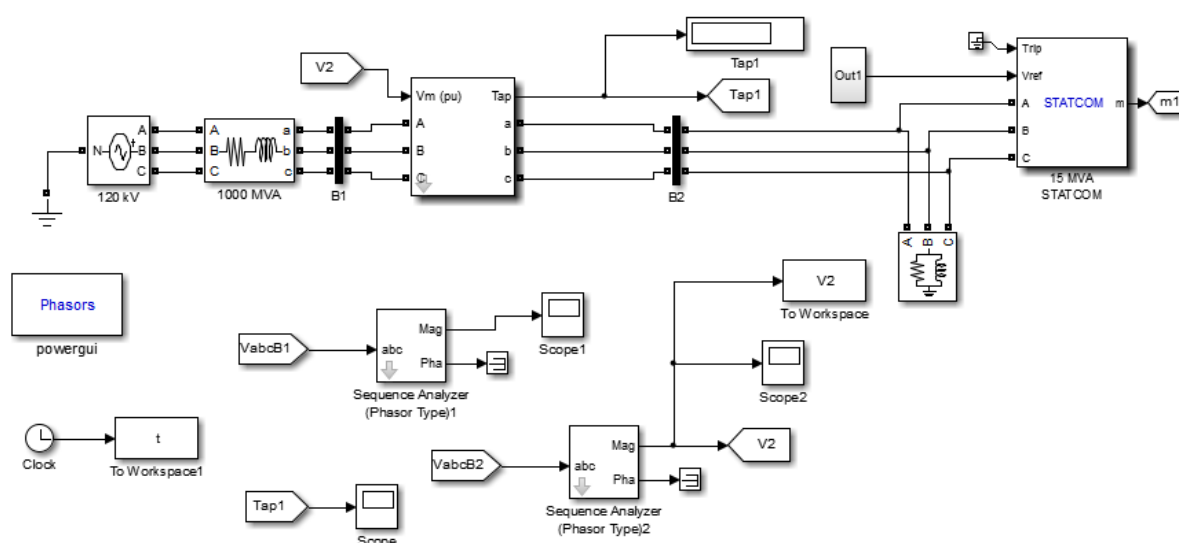


شکل ۶: شبکه نمونه [۴]

برای ULTC مدل متداول اشاره شده در بخش ۲-۱ استفاده شده است، پارامترهای مدل نیز به شرح زیر هستند:

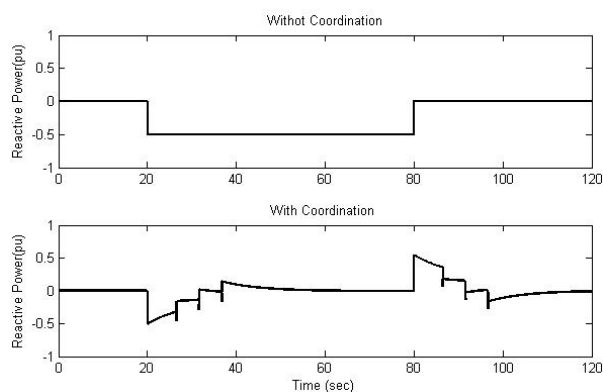
$$T_d = 1s, d = 0.01875 pu, e = 0.01875 pu$$

قدرت نامی STATCOM برابر ۱۵ مگاوات آمپر و شیب مشخصه V-I آن برابر ۳ درصد می باشد. مقدار ولتاژ مبنای ثابت نیز برابر ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است. مقدار توان راکتیو مبنا در



شکل ۷: شبکه نمونه شبیه سازی شده در بخش SIMULINK نرم افزار MATLAB

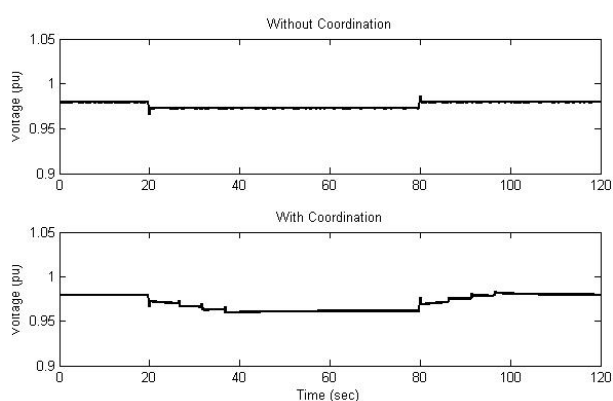
نظر گرفته شده است و بنابراین انتظار می‌رود پس از مدت کوتاهی با تغییر تپ ULTC تامین توان راکتیو توسط آن صورت گرفته و ظرفیت STATCOM آزاد شود. چگونگی تغییرات توان راکتیو خروجی STATCOM در شکل ۱۰ نشان داده است.



شکل ۱۰: چگونگی تغییرات توان راکتیو خروجی STATCOM

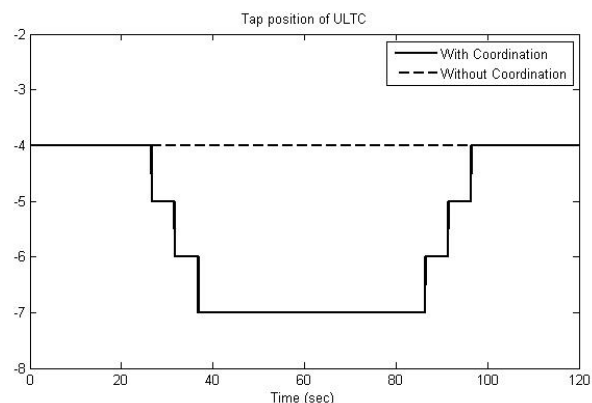
همانگونه که در شکل دیده می‌شود، در حالت کنترل هماهنگ بر خلاف حالت عملکرد بدون هماهنگی، توان راکتیو خروجی همواره نزدیک به مقدار مبنای انتخاب شده باقی می‌ماند و بنابراین همواره ظرفیت آزاد کافی برای شرایط اضطراری در دسترس است.

جهت تثبیت ولتاژ ثانویه ULTC در مقدار ۱ پریونیت باید تپ آن متناسب با ولتاژ اولیه تغییر کند، در بخش قبل بیان شد که محدوده تغییرات ولتاژ اولیه از ۰٫۸۵ تا ۱٫۱۵ پریونیت می‌تواند باشد. در شکل ۱۱ چگونگی تغییرات ولتاژ در سمت اولیه ULTC در دوره شبیه‌سازی نشان داده است.



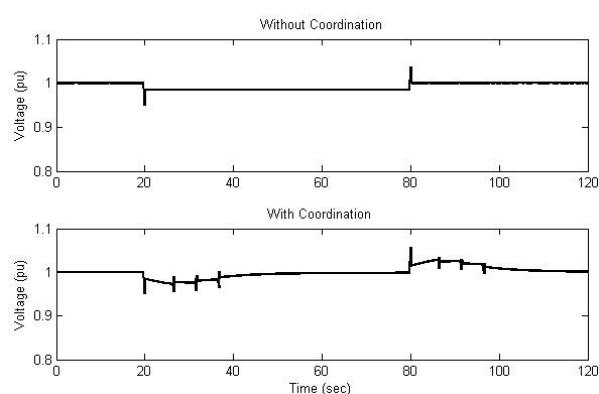
شکل ۱۱: چگونگی تغییرات ولتاژ در سمت فشار قوی ULTC

همانگونه که در شکل دیده می‌شود، در حالت هماهنگ شده که ULTC سهم بیشتری در تامین توان راکتیو دارد نوسانات ولتاژ در سمت فشار قوی ULTC بیشتر است.



شکل ۸: چگونگی تغییرات تپ ULTC در تغییرات بار

همانگونه که بیان شد هدف اصلی ULTC تثبیت ولتاژ باس بار در مقدار ۱ پریونیت است. در حالت هماهنگ نشده و متداول، STATCOM سریعاً به افزایش یا کاهش بار پاسخ داده و با تامین توان راکتیو مورد نیاز از افزایش یا کاهش ولتاژ جلوگیری می‌کند. در حالت هماهنگ شده نیز، ابتدا STATCOM به تغییرات بار واکنش نشان داده و سپس با تغییر مناسب ولتاژ مبنای آن توان راکتیو مورد نیاز توسط ULTC تامین می‌گردد. در شکل ۹ چگونگی تغییرات ولتاژ باس بار در دو حالت بدون هماهنگی و هماهنگ شده نشان داده است، همانگونه که در شکل دیده می‌شود در حالت هماهنگ شده نیز پروفیل ولتاژ شکل مناسبی داشته و ولتاژ همواره در نزدیکی مقدار ۱ پریونیت قرار دارد، تنها در هنگام تغییرات تپ جهش‌هایی در ولتاژ مشاهده می‌شود که البته طبیعی است.



شکل ۹: چگونگی تغییرات ولتاژ در باس بار

همانگونه که بیان شد هدف اصلی ایجاد هماهنگی در عملکرد دو تجهیز ULTC و STATCOM ایجاد حاشیه اطمینان کافی در ظرفیت توان راکتیو STATCOM جهت مواقع اضطراری است. در روش پیشنهادی مقدار مبنای توان راکتیو برابر صفر در

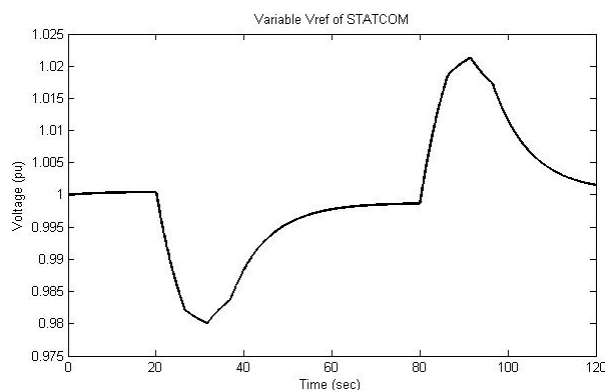
۴. روش پیشنهادی در عین کارآمدی ساده و عملیاتی بوده و به آسانی قابل پیاده سازی است.

با توجه به مزایای اشاره شده روش پیشنهادی جهت هماهنگی دو تجهیز نسبت به سایر روشهای پیشنهاد شده روشی ساده، کارآمد و عملیاتی می باشد.

## مراجع

- [1] N. G. Hingorane, and L. Gyugy, "Understanding FACTS," Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System. New York: Inst. Elect. Electron. ENG., INC., 2000.
- [2] M. S. Calovic, "Modeling and analysis of underload tap-changing transformer control system," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 7, pp. 1909-1915, 1984.
- [3] G. W. Kim, and K. Y. Lee, "Coordination Control of ULTC Transformer and STATCOM Based on an Artificial Neural Network," IEEE Trans. Power Sys., vol. 20, no. 2, pp. 580-586, May 2005.
- [4] M. Khederzade, "Coordination control of STATCOM and ULTC of power transformer," UPEC Conference, pp. 613-618, 2007.
- [5] J. H. Park, Y. S. Baek, "Coordination Control of Voltage Between STATCOM and Reactive Power Compensation Devices in Steady-State," Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 7, No. 5, pp. 689-697, 2012.
- [6] H. C. Lee, K. S. Jeong, J.H. Park, "A Study on Cooperative Control Method to Secure the Reactive Power in the Power System," Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 4, No. 3, pp. 270-274, 2014.
- [7] K. M. Son, K. S. Moon, S. K. Lee, and J. K. Park, "Coordination of an SVC with a ULTC reserving compensation margin for emergency control," IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 4, pp. 1193-1198, Oct. 2000.
- [8] Mansour H. Abdel-Rahman, Fathi M. H. Youssef, and Ahmed A. Saber, "New Static Var Compensator Control Strategy and Coordination With Under-Load Tap Changer," IEEE Trans. Power Del., VOL. 21, NO. 3, JULY 2006.
- [9] C. A. Conzales, M. Poozi, S. Corsi, "STATCOM Modeling for Voltage and Angle Stability Studies," International Journal of Electrical Power and Energy Systems., Vol. 25, Issue 6, pp. 431-441, Jul. 2003.

در روش پیشنهادی جهت هماهنگی ولتاژ مبنای STATCOM به نحوی تغییر داده می شود که با جابجایی مشخصه V-I در راستای قائم عملکرد هماهنگ و مطلوب حاصل شود. در شکل ۱۲ چگونگی تغییرات ولتاژ مبنا در دوره شبیه سازی نشان داده است.



شکل ۱۲: چگونگی تغییرات ولتاژ مبنا در STATCOM

همانگونه که در شکل ۱۲ دیده می شود، تغییرات ولتاژ مبنای متغیر در محدوده ۰٫۹۸ تا ۱٫۰۲ پریونیت و حول ولتاژ مبنای ثابت (۱ پریونیت) صورت می گیرد و با رسیدن توان راکتیو STATCOM به مقدار مبنای تعیین شده ولتاژ مبنای متغیر نیز برابر مقدار ولتاژ مبنای ثابت خواهد شد.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جدید جهت ایجاد هماهنگی بین دو تجهیز ULTC و STATCOM ارائه گردید. نتایج شبیه سازی بر روی شبکه نمونه نشان دهنده توانمندی روش پیشنهادی در ایجاد هماهنگی بین دو تجهیز است. روش پیشنهاد شده در این مقاله مزایای زیر را دارا می باشد:

۱. محدود نگه داشتن توان راکتیو خروجی STATCOM و در نتیجه ایجاد حاشیه اطمینان کافی برای شرایط اضطراری

۲. تثبیت ولتاژ ثانویه ULTC در مقدار مطلوب

۳. حلقه کنترلی پیشنهادی تنها بر روی STATCOM پیاده سازی شده و کنترل ULTC به شکل متداول و مستقل از STATCOM صورت می گیرد. بنابراین اگر دو تجهیز در مجاورت یکدیگر نباشند نیز این روش به آسانی قابلیت پیاده سازی دارد.