

# بررسی رفتار TCSC در فرکانس‌های زیرسنکرون و نقش آن

## در میرا کردن پدیده‌ی تشدید زیرسنکرون

مصطفی پرنیانی (استادیار)

مهران رشیدی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار، ضمن محاسبه‌ی پاسخ فرکانسی جبران خازنی سری کنترل شده با تایریستور<sup>۱</sup> (TCSC)، عملکرد آن را در فرکانس‌های زیرسنکرون بررسی کرده و نشان می‌دهیم که مقاومت ظاهری TCSC در فرکانس‌های زیر سنکرون خاصیت اهمی - القایی دارد. پس از آن شرایط بروز تشدید زیرسنکرون<sup>۲</sup> (SSR) در شبکه‌های جبران شده با خازن سری را بیان کرده و نشان می‌دهیم که برخلاف اثر جبران سری ثابت در ایجاد پدیده‌ی SSR، چنانچه از TCSC برای جبران سری شبکه‌های انتقال استفاده شود عملاً خطر بروز پدیده‌ی SSR از بین می‌رود. همچنین خواهیم دید که با کنترل مناسب TCSC خطرپذیری می‌توان تشدید زیرسنکرون به‌وجود آمده در شبکه‌های جبران شده با خازن ثابت را کاملاً میرا کرد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار PSCAD/EMTDC نیز در هر مورد ارائه می‌شود.

### مقدمه

پدیده استفاده از TCSC است. در مراجع ۱ تا ۳ روش کلاسیک استفاده از TCSC برای مقابله با SSR بیان شده است. در این روش که بر مبنای تغییر مقاومت ظاهری استوار است، مقاومت ظاهری TCSC به‌نحوی تنظیم می‌شود که فرکانس طبیعی سیستم مکمل هیچکدام از حالت‌های پیچشی سیستم توربین - ژنراتور نشود. این روش فقط وقتی مؤثر است که تمام آرایش‌های مخاطره‌آمیز بالقوه‌ی سیستم معلوم باشد و بتوان مطمئنانه آنها را آشکار ساخت. به‌علاوه، تغییر مقاومت ظاهری TCSC ممکن است کار عادی شبکه را مختل کرده و متعاقب آن قابلیت اطمینان سیستم به مخاطره افتد. در این نوشتار برای TCSC به‌منظور مقابله با SSR یک استراتژی کنترلی مناسب ارائه می‌کنیم. این استراتژی کنترلی که بر مبنای طرح NGH استوار است از ولتاژ خازن که یک سیگنال محلی است برای کنترل TCSC استفاده می‌کند. مزیت این استراتژی، دقت بالا، نویز اندک و سادگی اندازه‌گیری آن است.

در برخی مراجع، که به میرائی نوسانات SSR به‌کمک TCSC پرداخته‌اند، فقط از شبیه‌سازی زمانی آن‌هم در وضعیت خاصی از شبکه استفاده شده است.<sup>۱-۳</sup> یعنی پارامترهای شبکه‌ی الکتریکی و سیستم مکانیکی به‌نحوی تنظیم شده‌اند که در یک وضعیت خاص، شبکه با پدیده‌ی SSR مواجه شود. سپس از طریق شبیه‌سازی زمانی نشان داده شده است که چنانچه مقاومت ظاهری TCSC به مقدار مشخصی که متناظر با هیچ یک از آرایش‌های مخاطره‌آمیز بالقوه SSR نباشد تغییر کند، خطرپذیری SSR از بین می‌رود. ولی در این

جبران سری خطوط انتقال، با کاهش مقاومت ظاهری سری و طول الکتریکی و افزایش بار طبیعی خط، تأثیر به‌سزایی در بهبود حد پایداری ماندگار و گذرا داشته و پروفیل ولتاژ را نیز بهبود می‌بخشد. از آنجا که این روش از احداث خطوط انتقال جدید - که پرهزینه بوده و در بردارنده‌ی مسائل زیست‌محیطی و نیاز به حریم‌های گسترده است - اقتصادی‌تر است، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. پدیده‌ی تشدید زیر سنکرون (SSR) اغلب در سیستم‌های جبران شده با خازن سری رخ می‌دهد. SSR پدیده‌ی نوسانی است که طی آن شبکه‌ی الکتریکی و چرخ‌گردان<sup>۲</sup> (روتور) توربین - ژنراتور به‌طور همزمان نوساناتی پیدا می‌کنند که دامنه‌ی آنها رفته رفته افزایش می‌یابد. در صورت عدم کنترل و حفاظت مناسب، این نوسان‌ها می‌تواند موجب خستگی، یا حتی شکستگی روتور شود. یکی از صورت‌های مختلف پدیده‌ی SSR گشتاور گذرا است که در اثر اغتشاش‌های بزرگ در شبکه‌های جبران شده با خازن سری به وجود می‌آید.<sup>۱۱</sup> در این شرایط، عبور جریان‌های گذرا با فرکانس زیرسنکرون  $f_e$  از خط، به ایجاد میدانی با همین فرکانس در استاتور ژنراتور می‌انجامد. این امر موجب ایجاد دو گشتاور نوسانی با فرکانس‌های  $f_m = (f_e \pm f_e)$  در روتور می‌شود. حال چنانچه فرکانس این دو گشتاور نوسانی با یکی از فرکانس‌های پیچشی روتور تقریباً برابر باشد، گشتاورهای روتور به‌سرعت رشد کرده و در نتیجه به محور روتور ضربه می‌زند. یکی از روش‌های مقابله با این

معکوس تایریستورها دو بار، و فقط دو بار، کلیدزنی می‌شوند. وقتی که یکی از تایریستورها روشن است مقاومت معادل اتصال موازی - معکوس تایریستورها را صفر، و وقتی که هر دو خاموش‌اند، این مقاومت معادل را برابر مقدار بسیار بزرگ  $R$  در نظر می‌گیریم (نرم افزارهای حالت گذرا مثلاً PSCAD/EMTDC نیز تایریستور را به این روش مدل می‌کنند). مقاومت معادل تایریستورها در شکل ۱ نشان داده شده است. سری فوریه‌ی مقاومت معادل تایریستورها به صورت زیر است:

$$R(t) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} r_k \exp(jk\omega_p t) \quad (1)$$

$$r_0 = \frac{R}{\pi} (\pi - \sigma) \quad r_k = -\frac{R \sin k\sigma}{k\sigma}$$

در رابطه‌ی فوق،  $\sigma$  زاویه‌ی هدایت تایریستورهاست و چون فرکانس  $i_e(t)$  برابر  $\omega_e$ ، و مقاومت  $R(t)$  نیز دارای فرکانس  $\omega_p$  و مضارب آن است، پس ولتاژ و جریان شاخه‌های مدار شکل ۱ دارای فرکانس‌های زیر خواهد بود: [۲]

$$\omega_m = m\omega_p + \omega_e$$

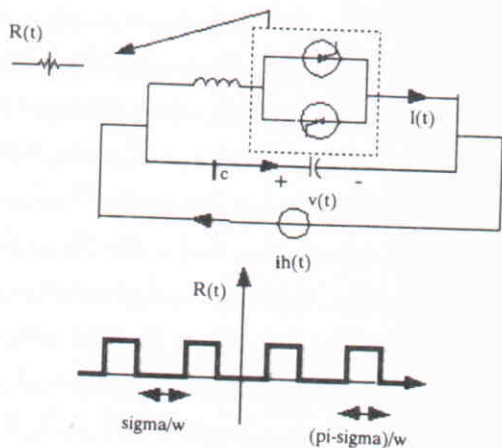
$$\omega'_m = m\omega_p - \omega_e \quad (2)$$

در معادله‌ی بالا  $m$  یک عدد صحیح است. فرکانس‌های  $\omega_m$  و  $\omega'_m$  نیز به صورت  $\omega'_m = -\omega(-m)$  به هم مربوط می‌شوند. بنابراین جریان  $i(t)$  و ولتاژ  $v(t)$  شکل ۱ را می‌توان چنین نوشت:

$$i(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [I_m \exp(j\omega_m t) + I'_m \exp(j\omega'_m t)]$$

$$v(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [V_m \exp(j\omega_m t) + V'_m \exp(j\omega'_m t)] \quad (3)$$

در رابطه‌ی فوق،  $I_m$  و  $V_m$  ضرایب سری فوریه در فرکانس  $\omega_m$  و  $I'_m$  و  $V'_m$  ضرایب سری فوریه در فرکانس  $\omega'_m$  هستند. چون  $i(t)$  و  $v(t)$



شکل ۱. مدار معادل TCSC و مدل کردن تایریستورها به وسیله‌ی مقاومت متغیر با زمان.

نوشتار ابتدا به کمک روابط تحلیلی نشان داده‌ایم که چنانچه فقط از TCSC برای جبران سری شبکه‌های انتقال استفاده شود عملاً خطرپذیری پدیده‌ی SSR از بین می‌رود. همچنین با کنترل مناسب TCSC می‌توان نوسانات SSR به‌وجود آمده در شبکه‌های جبران شده با خازن ثابت را کاملاً میرا کرد. سپس برای نشان دادن صحت روابط تحلیلی، به کمک نرم‌افزار PSCAD/EMTDC از شبیه‌سازی زمانی استفاده کرده‌ایم.

در ادامه رفتار TCSC در فرکانس‌های زیر سنکرون و نحوه‌ی کنترل آن برای مقابله با SSR را به‌طور دقیق‌تر بررسی می‌کنیم. بدین منظور، ابتدا با استفاده از روابط تحلیلی مقاومت ظاهری TCSC در فرکانس‌های زیر سنکرون را به‌دست می‌آوریم و نشان می‌دهیم که TCSC در فرکانس‌های زیر سنکرون خاصیت اهمی - القایی و در فرکانس‌های فوق سنکرون خاصیت اهمی - خازنی دارد. براساس این نتیجه شرایط بروز SSR در شبکه‌های جبران شده‌ی سری را بررسی کرده و با استفاده از روابط تحلیلی نشان می‌دهیم که چنانچه از خازن ثابت به‌عنوان جبران‌ساز خط استفاده شود، امکان بروز SSR وجود دارد؛ اما چنانچه از TCSC به‌عنوان جبران‌ساز استفاده شود، شبکه‌ی الکتریکی در برابر SSR کاملاً ایمن می‌شود. همچنین انتخاب جبران‌ساز به‌صورت ترکیبی از خازن ثابت و TCSC می‌تواند خطرپذیری SSR را کاهش دهد. برای تأیید روابط تحلیلی گفته شده در این بخش، از شبیه‌سازی زمانی نیز استفاده می‌کنیم. در پایان نشان می‌دهیم که با استفاده از روش کنترلی مبتنی بر طرح NGH می‌توان برای میرایی نوسانات SSR توسط TCSC استفاده کرد.

### تحلیل پاسخ فرکانسی TCSC

برای بررسی رفتار TCSC در برابر پدیده‌ی SSR و سایر پدیده‌های دینامیکی، لازم است بدانیم که مقاومت ظاهری معادل یک TCSC در فرکانس‌هایی غیر از فرکانس نامی شبکه چقدر است. بدین منظور، منبع جریان سینوسی با فرکانس  $\omega_e$  را به‌صورت  $i_e = I_e \cos(\omega_e t)$  در نظر می‌گیریم. به کمک اصل جمع آثار می‌توان تأثیر جریان  $i_e$  را با مدار باز کردن بقیه‌ی منابع جریان بررسی کرد. در اینجا باید دقت کرد که اگرچه بقیه‌ی منابع جریان مدار باز فرض شده‌اند، زمان روشن شدن تایریستورها با توجه به عبور از صفر مؤلفه‌ی اصلی ولتاژ یا جریان که فرکانسی برابر با فرکانس سیستم دارد مشخص می‌شود. در این حالت اگر فرکانس نامی سیستم  $\omega$  باشد، اتصال موازی معکوس تایریستورها را می‌توان همانند مقاومتی در نظر گرفت که با فرکانس  $\omega_p = 2\omega$  صفر (برای روشن بودن حداقل یکی از تایریستورها) یا بی‌نهایت (برای خاموش بودن هر دو تایریستور) می‌شود زیرا در هر چرخه‌ی متناظر با فرکانس  $\omega$  اتصال موازی -

با توجه به معادلات ۵ و ۹ می‌توان فازورهای ولتاژ و جریان یک جریانی زیر سنکرون ۴۷ هرتز به یک TCSC که در فرکانس ۶۰ هرتز ( $f_p = 120 \text{ Hz}$ ) کار می‌کند، تزریق شود. بنابراین ولتاژ دو سر TCSC دارای هارمونیک‌های  $47 \pm 120 \text{ m}$  هرتز خواهد شد. معادله‌ی KVL در شکل ۱ به صورت زیر است:

$$v(t) = L \left[ \frac{di}{dt} \right] + R(t)i(t) \quad (4)$$

معادله‌ی فوق در حوزه‌ی فرکانس به صورت زیر خواهد شد (دقت کنید که معادل حاصل ضرب در حوزه‌ی زمان، عمل کانولوشن در حوزه‌ی فرکانس است):

$$V_m = j\omega_m L I_m + \sum_{i=-\infty}^{\infty} r_i I_{m-i} \quad (5)$$

$$V'_m = j\omega'_m L I'_m + \sum_{i=-\infty}^{\infty} r'_i I'_{m-i} \quad (5)$$

همچنین با توجه به معادله‌ی KCL در شکل ۱ خواهیم داشت:

$$i_e(t) = i(t) + \int_{-\infty}^t Y_C(t-\tau)V(\tau)d\tau \quad (6)$$

در معادله‌ی بالا، جریان خازن را به صورت انتگرال کانولوشن نوشته‌ایم، یعنی فرض کرده‌ایم که وقتی ولتاژ اعمالی به خازن به صورت ضربه است جریان آن برابر  $Y_C$  است. برای اینکه معادله‌ی ۶ را به حوزه‌ی فرکانس ببریم سمت چپ آن را به صورت زیر می‌نویسیم:

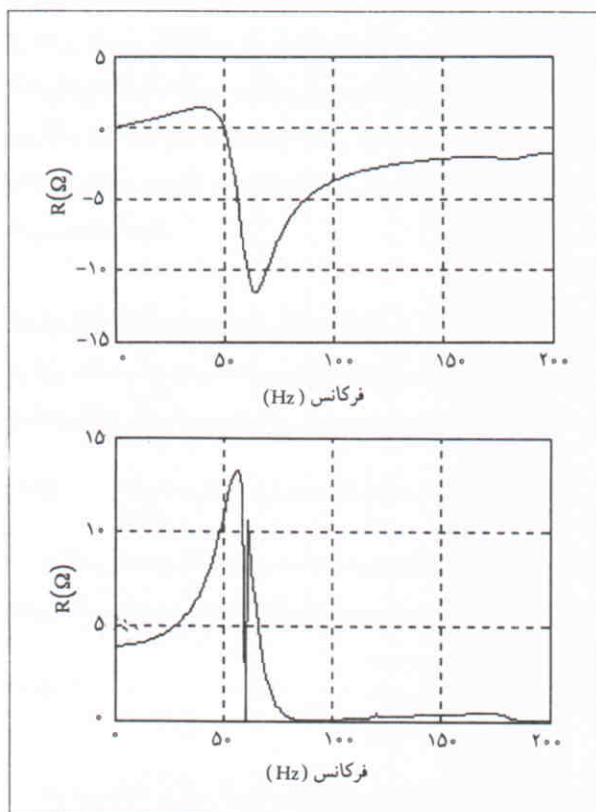
$$i_e(t) = I_e \cos(\omega_e t) = \frac{1}{\sqrt{2}} I_e \exp(j\omega_e t) + \frac{1}{\sqrt{2}} I_e \exp(-j\omega_e t) \quad (7)$$

سمت راست معادله‌ی ۶ در حوزه‌ی فرکانس را نیز می‌توان با توجه به معادله‌ی ۳ چنین نوشت:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[ I_m \exp(j\omega_m t) + I'_m \exp(j\omega'_m t) \right] + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[ j\omega_m C V_m \exp(j\omega_m t) + j\omega_m C V'_m \exp(j\omega'_m t) \right] \quad (8)$$

با مقایسه‌ی روابط ۷ و ۸ خواهیم داشت:

$$I_m + j\omega_m C V_m = \begin{cases} \frac{I_e}{\sqrt{2}} & m=0 \\ 0 & m \neq 0 \end{cases}$$

$$I'_m + j\omega'_m C V'_m = \begin{cases} \frac{I_e}{\sqrt{2}} & m=0 \\ 0 & m \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$


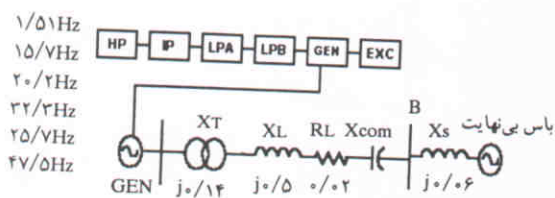
شکل ۲. مقاومت و مقاومت واکنشی TCSC در فرکانس‌های مختلف به ازای  $\alpha = 135^\circ$   $f = 60 \text{ Hz}$

همواره یک فرکانس زیر سنکرون است و می‌تواند مکمل یکی از فرکانس‌های پیچشی روتور شده و باعث بروز SSR شود. مقاومت واکنشی خازنی  $X_c$  که می‌تواند منجر به بروز SSR شود از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

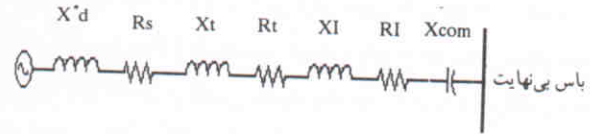
$$X_c = \left[ X_d'' + X_t + X_l \right] \left[ \frac{f_0 - f_m}{f_0} \right]^2 \quad (12)$$

$f_m$  می‌تواند هر کدام از فرکانس‌های پیچشی روتور باشد. با توجه به معادله‌ی (۱۲) مشخص است که درصد‌های جبران‌سازی بزرگ‌تر، باعث تحریک فرکانس‌های پیچشی کوچک‌تر می‌شود. چون فرکانس‌های پیچشی در گستره‌ی وسیعی در محدوده‌ی زیر سنکرون توزیع شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که احتمال بروز پدیده‌ی SSR در خطوط جبران شده با خازن ثابت<sup>۶</sup> زیاد است و تغییر آرایش سیستم (مثلاً ورود و خروج اضطراری خط، ترانسفورماتور، نیروگاه و...) و یا طرح‌های توسعه می‌تواند خطرپذیری SSR را افزایش دهد. برای شبیه‌سازی و تأیید روابط تحلیلی فوق، از مدل شاخص شماره‌ی یک IEEE استفاده کرده‌ایم. مدار معادل این مدل که توسط IEEE برای شبیه‌سازی رایانه‌ی پدیده‌ی SSR ارائه شده در شکل ۴ نشان داده شده است. اطلاعات الکتریکی و مکانیکی مربوط به این مدل در مرجع ۵ قابل دسترسی است.

در این حالت جبران‌ساز را به صورت یک خازن ثابت با  $X_{FSC} = 55 \Omega$  که معادل با ۲۵ درصد جبران سری است در نظر گرفته‌ایم. فرکانس تشدید سری سیستم، برابر با ۲۷/۷ هرتز خواهد شد که مکمل فرکانس پیچشی ۳۲/۳ هرتز روتور است. تغییرات گشتاور مکانیکی روتور پس از بروز یک خطای سه‌فاز روی باس B در لحظه‌ی ۱/۵ ثانیه و رفع آن پس از ۰/۷۵ ثانیه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود پدیده‌ی SSR رخ داده و دامنه‌ی گشتاورهای روتور بسیار زیاد شده و به چندین برابر مقدار نامی خود رسیده است که چنانچه با روش مناسبی کنترل نشود می‌تواند باعث صدمه به روتور شود. بنابراین درصد‌های پایین جبران‌سازی به وسیله‌ی خازن ثابت نیز می‌توانند منجر به بروز پدیده‌ی SSR شوند.



شکل ۴. مدار معادل مدل شماره یک IEEE.



شکل ۳. شبکه‌ی تک ماشینه‌ی متصل به باس بی‌نهایت.

### شرایط بروز SSR در شبکه‌ی جبران‌شده‌ی سری

همان‌طور که قبلاً گفتیم، در پدیده‌ی SSR، فرکانس تشدید سری شبکه‌ی الکتریکی ( $f_e$ ) و فرکانس نوسان‌های پیچشی روتور ( $f_m$ ) مکمل هم هستند یعنی  $f_e = f_0 - f_m$ . فرکانس نوسان‌های پیچشی روتور ( $f_m$ ) اغلب در محدوده‌ی زیر سنکرون قرار دارند به‌طور مثال فرکانس‌های پیچشی یک واحد نمونه‌ی ۹۰۰ مگاواتی که با فرکانس ۵۰ هرتز کار می‌کند به صورت زیر است:<sup>[۴]</sup>

$$f_m = 6/28, 12, 16, 17/3, 37/7, 40, 41/9 \text{ Hz}$$

بنابراین چنانچه فرکانس تشدید سری شبکه‌ی الکتریکی ( $f_e$ ) نیز کمتر از فرکانس سنکرون سیستم باشد، احتمال بروز پدیده‌ی SSR وجود دارد. برای بررسی این موضوع، سیستم تک‌ماشینه‌ی متصل به باس بی‌نهایت (شکل ۳) را در نظر می‌گیریم. جبران‌ساز سری خط را یک بار خازن ثابت، یک بار TCSC و یک بار هم ترکیبی از خازن ثابت و TCSC در نظر گرفته و فرکانس تشدید سری شبکه‌ی الکتریکی ( $f_e$ ) را محاسبه می‌کنیم. در این شکل  $X_d''$  مقاومت واکنشی زیر گذر ژنراتور،  $X_t$  مقاومت واکنشی ترانسفورماتور،  $X_l$  مقاومت واکنشی خط و  $X_{com}$  مقاومت واکنشی جبران‌ساز خط در فرکانس نامی سیستم است.

### جبران خط انتقال به وسیله‌ی خازن ثابت

در این حالت  $X_{com} = X_c = \frac{-j}{C\omega}$  است؛ بنابراین مقاومت ظاهری شبکه‌ی الکتریکی از دید ژنراتور به صورت زیر خواهد شد:

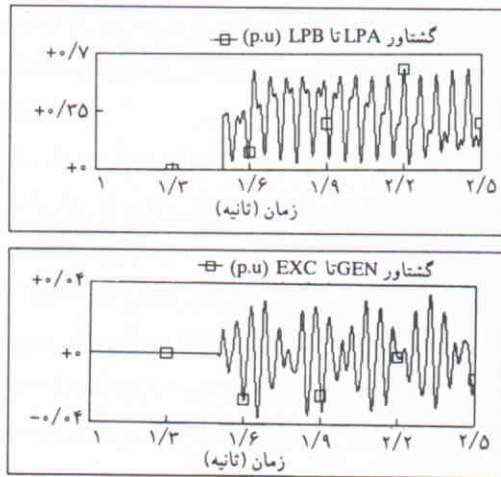
$$Z_a = R_s + R_t + R_l + j \left[ L_d'' \omega + L_t \omega + L_l \omega - \frac{1}{C\omega} \right] \quad (10)$$

فرکانس تشدید الکتریکی شبکه‌ی فوق ( $f_e$ ) با مساوی صفر قرار

دادن بخش موهومی مقاومت ظاهری به دست می‌آید:

$$f_e = f_0 \sqrt{\frac{X_c}{X_d'' + X_t + X_l}} \quad (11)$$

در این رابطه  $X_d''$ ،  $X_t$ ،  $X_l$ ،  $X_c$  مقاومت‌های واکنشی معادل فرکانس  $f_0$  هستند. چون درصد جبران سری خط  $(\frac{X_c}{X_l})$  همواره کوچک‌تر از ۱۰۰ است، فرکانس تشدید شبکه‌ی الکتریکی ( $f_e$ )



شکل ۶. گشتاورهای مکانیکی محور توربین - ژنراتور.

TCSC صورت گیرد، اساساً پدیده‌ی SSR به وجود نخواهد آمد. برای شبیه‌سازی و تأیید روابط تحلیلی فوق، از مدل شاخص شماره‌ی یک IEEE استفاده کرده‌ایم. بدین منظور خازن ثابت  $X_{FSC}$  بخش قبل را با یک TCSC با  $X_{CSC} = 55 \Omega$  جایگزین کرده‌ایم. تغییرات گشتاور مکانیکی روتور پس از بروز یک خطای سه‌فاز روی باس B در لحظه‌ی  $1/5$  ثانیه و رفع آن پس از  $0.75$  ثانیه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود خطرپذیری SSR از بین رفته و دامنه‌ی این گشتاورها بسیار کاهش یافته است. یعنی نسبت به پدیده‌ی SSR کاملاً ایمن است و باعث بروز SSR نمی‌شود.

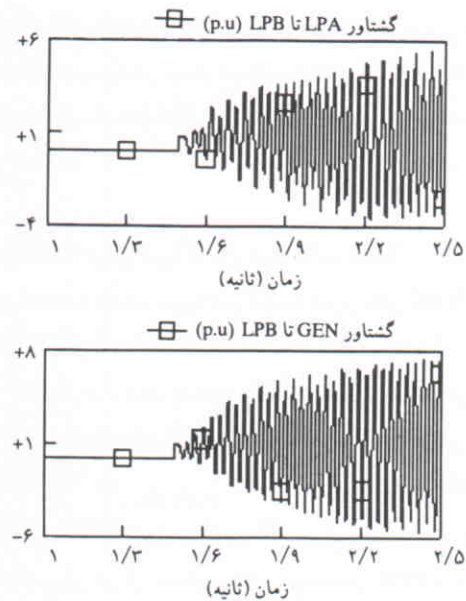
جبران خط انتقال به وسیله‌ی ترکیبی از خازن ثابت و TCSC در اینجا بخشی از جبران‌ساز را به صورت ثابت و بخش دیگر آنرا TCSC در نظر می‌گیریم. در این صورت می‌توان با کم‌ترین هزینه هم از مزایای TCSC (مثلاً میرا کردن نوسانات توان، مقابله با SSR، تقسیم انعطاف‌پذیر بار بین خطوط موازی، بهبود پایداری گذرا) و هم از مزایای خازن ثابت (مثلاً افزایش حد انتقال توان و بهبود پایداری) استفاده کرد. [۷۶]

در این حالت مقاومت ظاهری شبکه‌ی الکتریکی از دید ژنراتور به صورت زیر است:

$$Z_a = R_s + R_l + R_f + R(\alpha, \omega) + j \left[ L_d'' \omega + L_l \omega + L_f \omega + X(\alpha, \omega) - \frac{1}{C_1 \omega} \right] \quad (15)$$

فرکانس تشدید الکتریکی شبکه‌ی فوق از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$L_d'' \omega_e + L_l \omega_e + L_f \omega_e + X(\alpha, \omega) = \frac{1}{C_1 \omega_e} \quad (16)$$



شکل ۵. گشتاورهای مکانیکی محور توربین - ژنراتور.

### جبران خط انتقال به وسیله‌ی TCSC

در مطالب بالا نشان دادیم که مقاومت ظاهری TCSC در فرکانس‌های مختلف شامل یک مؤلفه‌ی مقاومتی و یک مؤلفه‌ی راکتیو است؛ یعنی  $Z_{TCSC}(\alpha, \omega) = R(\alpha, \omega) + jX(\alpha, \omega)$  پس در این حالت مقاومت ظاهری شبکه‌ی الکتریکی از دید ژنراتور به صورت زیر خواهد شد:

$$Z_a = R_s + R_l + R_f + R(\alpha, \omega) + j(L_d'' \omega + L_l \omega + L_f \omega + X(\alpha, \omega)) \quad (13)$$

فرکانس تشدید الکتریکی شبکه‌ی فوق  $\left[ f_e = \frac{\omega_e}{2\pi} \right]$  را می‌توان با صفر قرار دادن بخش موهومی رابطه‌ی ۱۳ به دست آورد:

$$L_d'' \omega_e + L_l \omega_e + L_f \omega_e + X(\alpha, \omega_e) = 0 \quad (14)$$

مشکلی که در اینجا وجود دارد فقدان رابطه‌ی تحلیلی است که بتواند مقاومت ظاهری TCSC را به صورت تابعی از فرکانس و زاویه‌ی آتش بیان کند. ولی پیش از این نشان دادیم که مقاومت ظاهری TCSC در محدوده‌ی پایینی فرکانس‌های زیر سنکرون خاصیت اهمی - القایی، در فرکانس‌های فوق سنکرون خاصیت اهمی - خازنی و در فرکانس سنکرون خاصیت خازنی دارد (باید توجه داشت که زاویه‌ی آتش TCSC در شرایط عادی برای کار در حالت تقویت خازنی تنظیم می‌شود). بنابراین فرکانس تشدید که از معادله‌ی ۱۴ به دست می‌آید معمولاً یک فرکانس فوق سنکرون است و در نتیجه نمی‌تواند مکمل هیچکدام از فرکانس‌های پیچشی روتور شود. بنابراین در صورتی که جبران سری تنها توسط

گشتاور الکتریکی افزایش یافته و پدیده‌ی SSR رخ می‌دهد ولی مقاومت‌های موجود در مدار (مقاومت TCSC در فرکانس زیر سنکرون + مقاومت خط انتقال و...) تا حدی باعث میرایی دامنه‌ی این گشتاور شده‌اند.

### کنترل TCSC برای میرا کردن نوسانات SSR

در این قسمت نشان می‌دهیم که با قرار دادن TCSC در یک شبکه‌ی الکتریکی که با خازن ثابت جبران شده است، و نیز با کنترل مناسب آن می‌توان از بروز پدیده‌ی SSR جلوگیری کرد. بدین منظور همان مدل شماره‌ی یک IEEE را در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم که  $X_{FSC} = X_{C(TCSC)} = \frac{0.472}{2} p.u.$  باشد. TCSC را به صورت طرح NGH کنترل می‌کنیم. این طرح ساختاری شبیه به TCSC دارد ولی در آن به جای راکتور شاخه‌ی TCR از مقاومت استفاده شده است. کنترل TCSC به صورت طرح NGH به این ترتیب است که در حالت عادی، TCSC در حالت خاموش بودن تایریستورها کار می‌کند؛ بنابراین به صورت یک خازن ثابت با مقاومت ظاهری  $X_{C(TCSC)}$  عمل می‌کند. در این حالت فاصله دو عبور از صفر متوالی ولتاژ خازن در فرکانس  $60^\circ$  هرتر برابر  $8/33 \text{ ms}$  (نیم چرخه) است، ولی چنانچه شرایط بروز SSR مهیا شود؛ به علت وجود افست dc، یک نیم چرخه بیش از  $8/33$  میلی ثانیه، و نیم چرخه‌ی بعدی آن کمتر از  $8/33$  میلی ثانیه خواهد شد. در نیم چرخه‌هایی که بیش از  $8/33$  میلی ثانیه‌اند، تایریستورهای مربوطه را روشن می‌کنیم تا انرژی ذخیره شده در خازن به شاخه‌ی TCR منتقل شده و عبور از صفر ولتاژ سریع‌تر اتفاق افتد.

در اینجا باز هم نمی‌توان به طور تحلیلی، فرکانس تشدید سری شبکه را محاسبه کرد، ولی با توجه به معادله‌ی ۱۶ می‌توان نتیجه گرفت که:

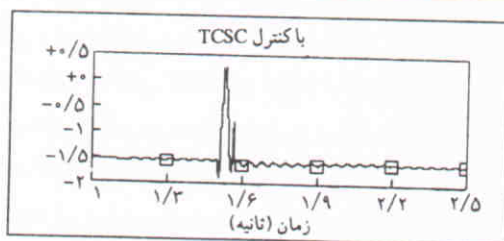
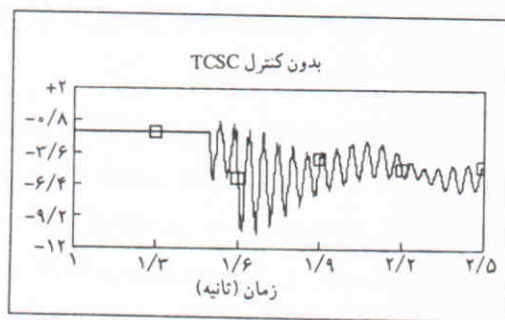
۱. در یک زاویه‌ی آتش ثابت، این شبکه دارای دو فرکانس تشدید است. این امر را می‌توان با توجه به نظریه‌ی شبکه‌ی اساسی مدار نیز به سادگی دریافت.

۲. چون TCSC در فرکانس‌های زیر سنکرون خاصیت اهمی - القایی دارد، پس یکی از فرکانس‌های تشدید، زیر سنکرون است. چنانچه درصد جبران سری خط جبران شده با خازن ثابت، با درصد جبران سری خط هنگام استفاده از ترکیب خازن ثابت و TCSC برابر باشد یعنی  $\frac{X_C}{X_L} = \frac{X_C + X(\alpha, \omega)}{X_L}$  آنگاه فرکانس تشدید مربوط به ترکیب خازن ثابت و TCSC کوچک‌تر از فرکانس تشدید مربوط به خازن ثابت خواهد شد. لذا احتمال تداخل با فرکانس‌های پیچشی پایین تر کاهش می‌یابد.

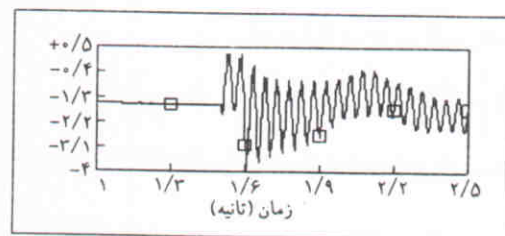
۳. چون TCSC در فرکانس‌های فوق سنکرون، خاصیت اهمی - خازنی دارد پس فرکانس تشدید دیگر شبکه، فوق سنکرون است.

۴. علی‌رغم وجود یک فرکانس تشدید زیر سنکرون باز هم خطر پذیری SSR در این حالت بسیار کمتر از حالت جبران سری خط به وسیله‌ی خازن ثابت است. زیرا در این حالت، TCSC یک مؤلفه‌ی مقاومتی مثبت به شبکه اضافه می‌کند که می‌تواند به همراه مقاومت‌های خطوط، ترانسفورماتور و ژنراتور باعث میرایی نوسانات زیر سنکرون شود. همچنین با کنترل مناسب TCSC می‌توان پدیده‌ی SSR را کاملاً میرا کرد.

برای شبیه‌سازی و تأیید روابط تحلیلی فوق، از مدل شاخص شماره‌ی یک IEEE استفاده کرده‌ایم. در این حالت جبران‌ساز را ترکیبی از خازن ثابت و TCSC در نظر گرفته‌ایم. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این بار به‌ازای ۲۵ درصد جبران سری، پدیده‌ی SSR رخ نمی‌دهد. حال درصد جبران را به ۲۱ درصد کاهش داده و  $(X_{TCSC} = X_{FSC} = \frac{0.105}{2} p.u.)$  در نظر می‌گیریم و خطای سه‌فازی را در باس B ایجاد می‌کنیم. گشتاور الکتریکی ژنراتور در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،



شکل ۸. گشتاور الکتریکی ژنراتور با کنترل و بدون کنترل TCSC.



شکل ۷. گشتاور الکتریکی ژنراتور.

اهمی - خازنی دارد. پس از آن شرایط بروز SSR در شبکه‌های جبران‌شده‌ی سری را بررسی کرده و نشان دادیم که چنانچه از خازن ثابت به‌عنوان جبران‌ساز خط استفاده شود، فرکانس تشدید شبکه‌ی الکتریکی زیر سنکرون شده و ممکن است با فرکانس‌های پیچشی روتور تداخل کند و باعث بروز SSR شود. اما چنانچه از TCSC به‌عنوان جبران‌ساز استفاده شود، شبکه‌ی الکتریکی در برابر SSR کاملاً ایمن می‌شود. انتخاب جبران‌ساز به‌صورت ترکیبی از خازن ثابت و TCSC نیز می‌تواند خطرپذیری SSR را کاهش دهد. در پایان نیز نشان دادیم که چنانچه از روش کنترلی مبتنی بر طرح NGH برای TCSC استفاده شود می‌توان از TCSC برای میرایی نوسانات SSR استفاده کرد.

گشتاور الکتریکی ژنراتور، یک‌بار با کنترل TCSC به روش فوق، و یک‌بار هم بدون کنترل آن در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالتی که TCSC کنترل نشده، دامنه‌ی نوسانات گشتاور الکتریکی افزایش یافته است. در این حالت تداخل فرکانس تشدید الکتریکی سری با مود پیچشی ۱۵/۷ هرتزی باعث بروز SSR می‌شود. ولی کنترل مناسب TCSC توانسته است نوسانات زیر سنکرون را به‌نحو بسیار مطلوبی میرا کند.

### نتیجه‌گیری

در این نوشتار، نشان دادیم که TCSC در فرکانس‌های زیر سنکرون خاصیت اهمی - القایی و در فرکانس‌های فوق سنکرون خاصیت

### پانوش

1. thyristor controlled series capacitor
2. subsynchronous resonance
3. rotor
4. impedance
5. reactance
6. fixed capacitor

### منابع

1. Anderson, P.M. and Farmer, R.G. "Series compensation of power systems", *PBLSH inc* (1996).
2. Daneshpoo, A. and Gole, A.M. "Frequency response of thyristor controlled series capacitor", *IEEE Trans. On power Delivery*, -16, (1), pp 53-58 (Janury 2001).
3. Tae, K. and Oh. "Analysis of thyristor controlled series capacitor for subsynchronous resonance mitigation", *IEEE Conference ISIE Pusan Korea*, pp 369-375 (October 2001).
4. Lombard, X. and Therond, P.G. "Series compensation and subsynchronous resonance details analysis of the phenomenon and of its damping by a TCSC", *IEE AC and DC power Transmission Conference* (April/May 1996).
5. IEEE Committee Report, "First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance", *IEEE Trans. on PAS*, pp 1565-1570 (1977).
6. Hingorani, N.G. and Gyugyi, L. "Understanding FACTS", *IEEE Press* (2000).
7. Song, H. "Flexible AC transmission system", *IEE Press*, (1999).
8. Hingorani, N. G. "A new scheme for subsynchronous resonance damping of tortional torque", *IEEE Trans on PAS*, PAS-100 (4), (April 1981).