

## روشی نوین برای کنترل UPFC به کمک سوئیچینگ باند هیستریزیس

وحید رسولی دیسفانی<sup>۱</sup> حسین عسکریان ایبانه<sup>۲</sup> رضا محمدی<sup>۳</sup>  
فرزاد رضوی<sup>۴</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران  
[vrdisfani@gmail.com](mailto:vrdisfani@gmail.com)

۲- استاد دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران  
[askarian@aut.ac.ir](mailto:askarian@aut.ac.ir)

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران  
[reza\\_mohamadi@aut.ac.ir](mailto:reza_mohamadi@aut.ac.ir)

۴- استادیار دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تفرش - تفرش- ایران  
[razavi.farzad@taut.ac.ir](mailto:razavi.farzad@taut.ac.ir)

**چکیده:** طراحی و استفاده مناسب از UPFC که توانایی کنترل سطح ولتاژ باس بار و فلوی توان را بصورت هم‌زمان و مستقل از یکدیگر دارد، شرایط را برای تقویت سیستم‌های تجدید ساختار یافته فراهم می‌سازد. در این مقاله با بهره‌گیری از سوئیچینگ باند هیستریزیس، روشی برای کنترل UPFC معرفی شده است که از چهار درجه آزادی برای کنترل ولتاژ باس بار، ولتاژ DC و توان اکتیو و راکتیو خط انتقال استفاده می‌کند. ضمناً روش جدیدی برای کنترل شاخه سری ارائه شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی این روش در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC و مقایسه آن با روش‌های دیگر تحت شرایط یکسان، برتری این روش کنترل را بوضوح نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** UPFC، کنترل باند هیستریزیس، FACTS و PSCAD/EMTDC.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۵/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۷/۴/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: حسین عسکریان ایبانه

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان حافظ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده‌ی مهندسی برق

## ۱- مقدمه

به روش PWM انجام شده و پارامترهای کنترلی همان پارامترهای استفاده شده در مرجع [۲] است. مرجع [۶] نیز روش سوئیچینگ و پارامترهای مشابه دو مرجع قبلی را همراه با روش منطق فازی انتخاب نموده است.

برای کنترل UPFC چهار درجه آزادی وجود دارد که این درجات آزادی شامل فاز و دامنه جریان‌های شاخه موازی و سری UPFC هستند [۷]. در مقالاتی که روش باند هیستریزس به عنوان روش سوئیچینگ انتخاب شده است، روش کنترلی، از تمامی چهار درجه آزادی، برای کنترل UPFC استفاده نکرده است. به عنوان مثال، در مرجع [۳] که روش سوئیچینگ هیستریزس مطرح شده است، فقط ولتاژ باس بار با کنترل زاویه جریان خط انتقال تنظیم می‌گردد و هیچگونه کنترلی بر ولتاژ DC و توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط وجود ندارد و تنها از یک درجه آزادی استفاده شده است. در مرجع [۸] از کنترل دامنه جریان شاخه موازی برای تنظیم ولتاژ و از کنترل زاویه فاز جریان شاخه سری برای بهبود پایداری گذرا استفاده شده است که نشان می‌دهد این مرجع از دو درجه آزادی بهره گرفته است.

علاوه بر این مقالات، مقالات دیگری نیز به بررسی اثر UPFC بر روی پایداری [۹] و [۱۰]، امنیت شبکه [۱۱]، افزایش ظرفیت انتقال خط [۱۲] و [۱۳] و پدیده تشدید زیرسکرون [۱۴] پرداخته‌اند ولی هیچ‌یک بهینه سازی کنترل UPFC در استفاده از درجات آزادی آن مورد بررسی قرار نداده و از روش‌های کنترلی موجود برای مدلسازی و تحلیل استفاده نموده‌اند.

از اینرو در این مقاله به کمک نرم‌افزار PSCAD/EMTDC، با طرح یک روش ساده برای سیستم کنترلی شاخه سری و استفاده از چهار درجه آزادی، ولتاژ باس بار و لینک DC و توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال کنترل می‌شود. درجات آزادی استفاده شده در این مقاله، دامنه و زاویه فاز جریان‌های شاخه موازی و خط انتقال می‌باشند. استفاده از چهار درجه آزادی قبلاً در هیچیک از مراجع قبلاً استفاده نشده است.

استفاده از چهار درجه آزادی قابلیت کنترل ولتاژ باس بار، ولتاژ DC و توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط را فراهم می‌کند. به عنوان مثال در خط انتقالی که امپدانس  $0.1 pu$  دارد و دو باس بینهایت با ولتاژهای  $1 pu \angle 0^\circ$  و  $1 pu \angle 30^\circ$  را بهم متصل می‌نماید، در شرایط بهره برداری عادی لزوماً توان اکتیو و راکتیو خروجی از باس بار

اولی بترتیب برابر با  $P = \frac{1}{0.1} \sin 30^\circ = 5 pu$  و

در ضمن در  $Q = \frac{1}{0.1} (1 - \cos 30^\circ) = 1.34 pu$  خواهد بود [۱۵].

این شرایط پروفیل ولتاژ در وسط خط انتقال دارای مقداری برابر با

$V_{min} = 1 \times \cos\left(\frac{30^\circ}{2}\right) = \cos 15^\circ = 0.966 pu$  است [۱۵]. در

کنترل سطح ولتاژ باس بار موضوع بسیار مهمی است که در شبکه‌های قدرت باید مورد توجه قرار گیرد. از طرفی با مطرح شدن بحث تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت نیاز به کنترل توان عبوری از خط انتقال بشدت احساس می‌شود. کاربرد ادوات FACTS در سیستم‌های تجدید ساختار یافته گزینه‌ای است که می‌تواند در این امر کمک کننده بوده و شرایط را برای تقویت سیستم‌های تجدید ساختار یافته فراهم سازد. UPFC یکی از این ادوات است که می‌تواند جبران‌سازی سری و موازی را بطور همزمان و مستقل انجام دهد. این عنصر ترکیبی از یک STATCOM و SSSC می‌باشد که بوسیله یک اتصال DC بهم متصل می‌شوند و علاوه بر جذب و تزریق توان راکتیو امکان عبور توان اکتیو را فراهم می‌کند [۱]. همچنین توانایی کنترل سطح ولتاژ باس بار و فلوی توان را بصورت همزمان و مستقل از یکدیگر دارد.

تا کنون روش‌های مختلفی برای سوئیچینگ UPFC معرفی شده است که می‌توان آن‌ها را به سه روش سوئیچینگ چند پالس، PWM<sup>3</sup> و هیستریزس تقسیم کرد.

۱- روش سوئیچینگ چندپالس بر اساس خاموش و روشن کردن منظم عناصر الکترونیک قدرت بر روی زوایای تعیین شده کار می‌کند. سوئیچینگ ۶ پالس هارمونیک‌های مرتبه ۵ و ۷ با اندازه زیادی ایجاد می‌کند و با افزایش تعداد پالس‌ها به ۱۲، ۲۴ و ۴۸ پالس در یک سیکل اغتشاشات هارمونیک کمتر شده ولی تعداد ترانسفورماتورهای لازم افزایش می‌یابد [۲].

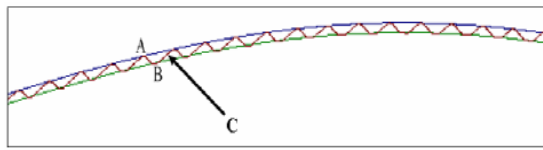
۲- در روش PWM با مقایسه شکل سینوسی مرجع با سیگنال مثلثی فرکانس بالا، زمان سوئیچینگ عناصر الکترونیک قدرت تعیین می‌گردد که این روش نسبت به سوئیچینگ ۶ پالس هارمونیک کمتری ایجاد می‌کند. با استفاده از این روش، تلفات سوئیچینگ زیاد شده و در نتیجه نیاز به عناصر الکترونیک قدرت با سرعت سوئیچینگ بالا مانند IGBT را به همراه دارد [۲].

۳- در روش سوئیچینگ هیستریزس، یک ناحیه عملکرد بصورت یک باند در اطراف شکل موج مرجع تعریف می‌شود و سوئیچینگ GTO<sup>۴</sup> ها بگونه‌ای انجام می‌شود که شکل موج جریان عبوری از مدار مابین مرزهای باند هیستریزس قرار گیرد [۳] و [۴].

از طرفی، کنترل UPFC از نظر روش کنترل و پارامترهای استفاده شده برای کنترل قابل بررسی است. این پارامترها شامل ولتاژ باس بار، ولتاژ DC و توان‌های اکتیو و راکتیو می‌باشد.

در مرجع [۲] علاوه بر اینکه از روش PWM برای سوئیچینگ استفاده شده است، کنترل فلوی توان خط انتقال توسط دامنه و فاز شاخه سری و تنظیم ولتاژ باس بار و ولتاژ DC توسط دامنه و فاز جریان شاخه موازی، با کنترل کننده PI انجام شده است. در مرجع [۵] سوئیچینگ

خاموش تغییر وضعیت می‌دهند تا جریان به محدوده باند هیستریزس بازگردد.



شکل (۳): بخشی از شکل موج جریان حاصل از سوئیچینگ هیستریزس: (A) مرز بالایی باند هیستریزس (B) مرز پایینی باند هیستریزس (C) شکل موج جریان عبوری از مدار.

مزیت این روش بر روش سوئیچینگ چندپالسه این است که هارمونیک‌های فرکانس پایین را در شکل موج جریان به اندازه زیادی کاهش می‌دهد، زیرا GTOها و IGBTها با سرعت بالایی روشن و خاموش می‌شوند و در نتیجه شکل موج خروجی علاوه بر هارمونیک اصلی تنها دارای هارمونیک‌های فرکانس بالا خواهد بود که به راحتی با فیلتر پایین‌گذر قابل حذف خواهد بود. استفاده از روش سوئیچینگ باند هیستریزس هارمونیک‌های مزاحم فرکانس پایین را از مدار قدرت حذف نموده و تأثیرات نامطلوب آن‌ها به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد [۳] و [۴].

در سیستم کنترلی UPFC، کنترل شاخه موازی جریان سمت HV، ترانس شاخه موازی را طوری کنترل می‌کند که با تنظیم دامنه و فاز این جریان بترتیب ولتاژ باس‌بار و سطح ولتاژ DC بر روی مقادیر مرجع کنترل می‌گردد.

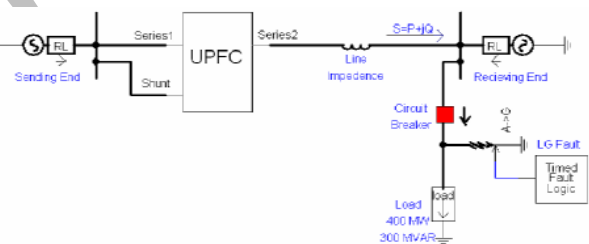
سیستم کنترلی شاخه سری نیز از طریق کنترل جریان خط انتقال مقادیر P و Q را کنترل می‌نماید. همچنین با کنترل هم‌زمان دامنه و زاویه جریان خط توسط سیستم کنترلی شاخه سری، هر دو مقدار P و Q بر روی مقادیر مرجعشان قابل کنترل هستند. در برخی مقالات نیز از کنترل جریان شاخه سری برای کنترل سطح ولتاژ باس‌بار استفاده شده است [۳].

بطور کلی در سیستم کنترل UPFC، چهار درجه آزادی یعنی دامنه و فاز جریان‌های شاخه موازی و سری وجود دارد که می‌توان با استفاده مناسب از این درجات آزادی پارامترهای شبکه را بهتر کنترل نمود.

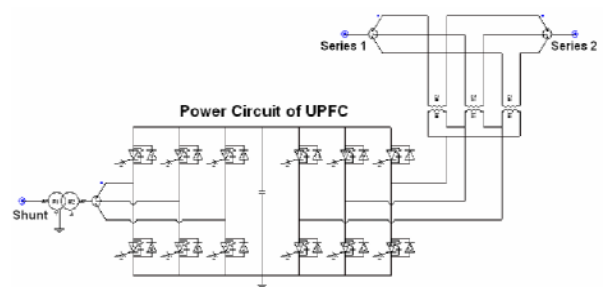
حالی‌که با استفاده از UPFC و روش کنترل مبتنی بر چهار درجه آزادی این قابلیت وجود دارد که توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال بطور مثال در بازه  $pu(6, -6)$ ، در هر لحظه بر روی هر مقداری که مرکز دیسپاچینگ فرمان دهد، کنترل گردد که از نظر کاربرد، مشخصه بسیار خوبی برای سیستم‌های تجدید ساختاریافته می‌باشد. ضمناً در صورت استفاده از UPFC با کنترل چهار درجه آزادی در خط انتقال مطرح شده، پروفیل ولتاژ در بدترین شرایط دارای مقداری برابر  $V_{min} = 1 * \cos(\frac{15}{2}) = \cos 7.5^\circ = 0.991 pu$  است [۱۵] که در مقایسه با شرایط کارکرد بدون UPFC افت ولتاژ در طول خط به شدت کاهش می‌یابد.

## ۲- تئوری روش‌های کنترلی با سوئیچینگ هیستریزس

در شکل ۱ که طرز قرار گرفتن UPFC در شبکه قدرت نشان داده شده است، اتصالات شاخه موازی UPFC از سمت چپ و اتصالات شاخه سری از سمت راست به شبکه قدرت متصل شده است. شکل ۲ نیز مدار داخلی UPFC را نمایش می‌دهد.



شکل (۱): نحوه اتصال UPFC به شبکه



شکل (۲): مدار داخلی UPFC

در روش سوئیچینگ هیستریزس یک ناحیه عملکرد بصورت یک باند در اطراف شکل موج مرجع تعریف می‌شود و سوئیچینگ GTOها بگونه‌ای انجام می‌شود که شکل موج مدار (شکل ۳-C) مابین دو مرز تعریف شده A و B قرار گیرد (شکل ۳). در این روش چنانچه جریان یکی از فازها از محدوده عملکرد باند هیستریزس آن فاز خارج گردد، فرمان GTOهای فاز مربوطه از خاموش به روشن و از روشن به

### ۳- شرح مسئله

#### ۱-۳- عدم استفاده چهار درجه آزادی موجود برای

#### کنترل UPFC همراه با سوئیچینگ هیستریزس

در کنترل UPFC، چهار درجه آزادی وجود دارد که با استفاده از آنها ولتاژهای باس بار و لینک DC و توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال بصورت هم‌زمان قابل کنترل هستند. در مقالاتی که به روش باند هیستریزس کلیدزنی می‌شوند، اولاً از تمام درجات آزادی موجود برای کنترل UPFC استفاده نشده است و ثانیاً در این مقالات، کنترلی بر روی فلوی توان عبوری از خط وجود ندارد.

به عنوان مثال، در مرجع [۸] که روش سوئیچینگ هیستریزس را بررسی نموده است، سیستم کنترلی شاخه موازی تنها دامنه جریان شاخه موازی را کنترل می‌کند و این جریان هم‌فاز با ولتاژ باس بار فرستنده به شبکه تزریق می‌گردد. در این حالت، زاویه جریان توسط زاویه ولتاژ باس بار تعیین می‌گردد و سیستم کنترلی UPFC نقشی در این زمینه ندارد. در سیستم کنترلی شاخه سری این مقاله، مقدار دامنه جریان شاخه سری بر روی مقدار ثابتی کمتر از حد گرمایی خط انتقال تنظیم شده و تنها فاز این جریان است که توسط یک کنترلر PID برای برابر کردن سرعت زاویه‌ای شفت ژنراتور با سرعت سنکرون کنترل می‌گردد. در این مقاله تنها از دو درجه آزادی برای کنترل ولتاژ باس بار و تنظیم توان اکتیو برای بهبود پایداری گذرا در سیستم قدرت استفاده شده است و سایر درجات آزادی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند.

در سیستم کنترلی مرجع [۳] برای کنترل ولتاژ، جریان خط انتقال کنترل می‌شود به این صورت که دامنه جریان خط برابر مقدار ثابتی کمتر از حد گرمایی خط انتخاب شده و زاویه جریان خط با یک کنترلر PID با تغییرات سطح ولتاژ به اندازه‌ای تغییر می‌نماید تا ولتاژ بر روی یک پریونیت کنترل گردد. در این مقاله تنها هدف استفاده از UPFC کنترل ولتاژ می‌باشد و از سایر توانایی‌های UPFC برای کنترل توان اکتیو و راکتیو خط استفاده نشده است. سیستم کنترلی این مقاله فقط از فاز جریان خط انتقال به عنوان یکی از درجات آزادی کنترل UPFC بهره گرفته است.

#### ۲-۳- نوسانات توان در صورت عملکرد نادرست

#### سیستم کنترلی شاخه موازی

در مقالات برای کنترل شاخه سری، یک سیستم کنترل مانند PI و فازی استفاده نموده‌اند. در این روش‌ها برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو خط، فرض بر این است که سیستم کنترل موازی وظیفه تنظیم ولتاژ را بخوبی انجام می‌دهد. ولی اگر شاخه موازی نتواند وظیفه‌اش را به درستی انجام دهد یا در مواردی از فاز کار اصلی خود خارج شود، سیستم‌های کنترل موجود برای کنترل شاخه سری دچار نوساناتی

می‌شوند. این نوسانات سیستم کنترل ممکن است افزایش جریان عبوری از خط انتقال و یا عبور توان‌های اکتیو و راکتیو نامناسب از خط انتقال را دربرداشته باشد که بترتیب صدمات عایقی خط و نوسانات شدید ولتاژ را در شبکه منجر خواهند شد.

#### ۴- روش جدید

#### ۱-۴- استفاده از چهار درجه آزادی برای کنترل

#### UPFC

در این مقاله برای کاهش اغتشاشات هارمونیکی روش باند هیستریزس به عنوان روش سوئیچینگ انتخاب شده است. در طراحی سیستم کنترلی، کنترلر PID انتخاب شده است و در کنترل شاخه موازی بر اساس مدل ارائه شده در مرجع [۲] از دو درجه آزادی مربوط به جریان شاخه موازی استفاده شده و ولتاژ باس بار با تنظیم دامنه جریان شاخه موازی و ولتاژ DC با تنظیم زاویه فاز این جریان کنترل می‌گردد. در کنترل شاخه سری نیز با استفاده از دامنه و فاز جریان خط انتقال دو درجه آزادی دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین در این مقاله از چهار درجه آزادی استفاده گردیده که قبلاً بطور مجتمع استفاده نشده است.

#### ۲-۴- سیستم کنترل شاخه سری

در سیستم کنترل شاخه سری روش جدیدی ارائه می‌گردد. در این روش از دو درجه آزادی دیگر که مرتبط با جریان خط انتقال است استفاده شده بدین صورت که برای تنظیم توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط دامنه و زاویه فاز جریان سری چنان کنترل می‌شوند که P و Q بر مقادیر  $P_{ref}$  و  $Q_{ref}$  ثابت گردند. لازم بذکر است که برای کنترل هم‌زمان دو پارامتر بهتر است دو ترکیب مستقل و متعامد از آن دو پارامتر کنترل گردند. در این روش، از میان ترکیب‌های مستقل پارامترهای تحت کنترل یعنی P و Q، دامنه و فاز توان ظاهری خط که دو بردار عمود برهم هستند، برای کنترل توان عبوری استفاده شده است و مقادیر  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  و  $\frac{Q}{P}$  که بترتیب شاخص‌هایی برای دامنه و فاز فلوی توان هستند، برای تثبیت P و Q بر روی مقادیر مرجع کنترل می‌گردند.

در مورد توان عبوری از خط داریم:

$$S = V \cdot I^* = (|V| \angle \delta_v) \cdot (|I| \angle \delta_i)^* = |V| |I| \angle (\delta_v - \delta_i) \quad (1)$$

اگر زاویه ولتاژ را برابر با صفر فرض کنیم و همچنین مقدار ولتاژ را برابر ۱ pu فرض کنیم:

$$S = P + jQ = |I| \angle -\delta_i \Rightarrow \begin{cases} |I| = |S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \\ \delta_i = -\text{Arc tan } \frac{Q}{P} \end{cases} \quad (2)$$

#### ۴-۳- تصحیح عملکرد سیستم کنترلی شاخه سری

برای حل مشکل نوسانات توان، یک کنترل کننده اضافی به مدار کنترل اندازه دامنه جریان اضافه شده است که بمحض قرار گرفتن توان مختلط عبوری از خط در محدوده توان مختلط مرجع، این بخش کنترلی شروع بکار کند تا توان مختلط عبوری از خط را بطور دقیق بر مقدار موردنظر منطبق نماید. استفاده از این بخش کنترلی باعث می-شود که در صورت عملکرد نادرست شاخه موازی و نوسانات ولتاژ، سیستم کنترل شاخه سری، اولویت را به کنترل شاخه موازی داده و بخش اضافه شده را از مدار کنترل خارج می کند تا شاخه موازی بتواند کنترل مناسبی بر ولتاژ باس بار داشته باشد. بعد از تنظیم ولتاژ توسط کنترل شاخه موازی، بمحض قرار گرفتن مقادیر توان های اکتیو و راکتیو در محدوده توان مختلط مرجع، مجدداً بخش اضافه شده، وارد مدار کنترل می شود تا فلوی توان عبوری از خط را دقیقاً بر مقدار مرجع کنترل کند.

بطور کلی در سیستم کنترل UPFC، چهار درجه آزادی وجود دارد که در روش جدید، در سیستم کنترل شاخه موازی دو درجه آزادی یعنی دامنه و فاز جریان شاخه موازی و در سیستم کنترل شاخه سری دو درجه آزادی دامنه و فاز جریان عبوری از خط انتقال مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۵- شبیه سازی

برای مقایسه روش کنترل ارائه شده با روش های قبلی، علاوه بر شبیه سازی روش جدید، روش های ارائه شده در مقالات مربوط به سال های ۲۰۰۰ [۵] و ۲۰۰۲ [۸] شبیه سازی شده است. برای سادگی کار، از این پس مدار پیشنهاد شده در این مقاله را روش جدید و مدارهای شبیه سازی شده از دو مرجع دیگر را برترتیب روش قدیم ۱ و روش قدیم ۲ می نامیم.

#### ۵-۱- مدار نمونه ۱

در مرجع [۵] علاوه بر اینکه از روش PWM برای سوئیچینگ استفاده شده است، کنترل فلوی توان خط انتقال توسط دامنه و فاز شاخه سری و تنظیم ولتاژ باس بار و ولتاژ DC توسط دامنه و فاز جریان شاخه موازی انجام شده است.

جهت مقایسه روش جدید با روش قدیم ۱، با شبیه سازی روش کنترل و سوئیچینگ استفاده شده در مرجع [۵] یک ماژول UPFC استخراج نموده ایم. این ماژول و ماژول UPFC با روش کنترل جدید در دو بررسی جداگانه به مدار شکل ۲ اعمال شده اند که در این بررسی ها ولتاژ مرجع باس بار برابر ۱ pu یعنی ۴۰۰ kV و مقدار مرجع توان های اکتیو و راکتیو خط انتقال برترتیب ۴۸۵ MW- و ۴۵ MVAR انتخاب

$$S_{ref} = P_{ref} + jQ_{ref} \Rightarrow \begin{cases} |S_{ref}| = |I_{ref}| = \sqrt{P_{ref}^2 + Q_{ref}^2} \\ \delta_{I_{ref}} = -\text{Arc tan} \frac{Q_{ref}}{P_{ref}} \end{cases} \quad (3)$$

چنانچه توان های اکتیو و راکتیو خط توسط سیستم کنترلی شاخه سری UPFC بر روی مقادیر مرجع کنترل شوند، خواهیم داشت:

$$\left. \begin{matrix} P = P_{ref} \\ Q = Q_{ref} \end{matrix} \right\} \Rightarrow S = S_{ref} \Rightarrow \begin{cases} |I| = |I_{ref}| \\ \delta = \delta_{ref} \end{cases} \quad (4)$$

در نتیجه:

$$\begin{cases} |I| = |I_{ref}| \Rightarrow |S| = |S_{ref}| \\ \Rightarrow \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P_{ref}^2 + Q_{ref}^2} \end{cases} \quad (5)$$

و همچنین:

$$\begin{cases} \delta_I = \delta_{I_{ref}} \Rightarrow \text{Arc tan} \frac{Q}{P} = \text{Arc tan} \frac{Q_{ref}}{P_{ref}} \\ \Rightarrow \frac{Q}{P} = \frac{Q_{ref}}{P_{ref}} \Rightarrow Q \cdot P_{ref} - P \cdot Q_{ref} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

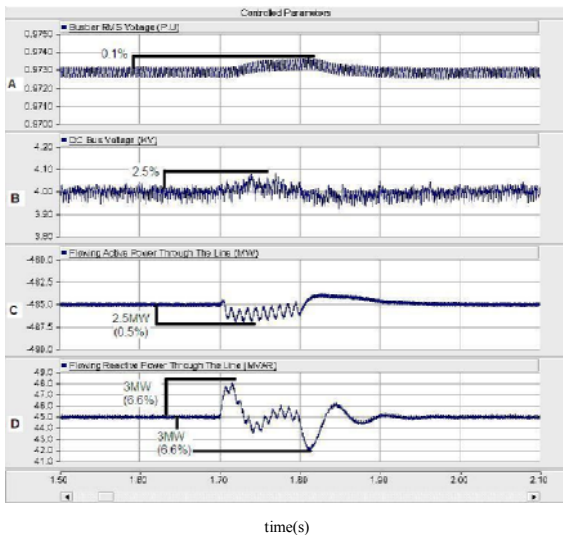
با توجه به محاسبات بالا دامنه توان مختلط عبوری از خط بصورت مستقیم با دامنه جریان، متناسب است و با فرض عملکرد صحیح مدار موازی در کنترل سطح ولتاژ، اندازه دامنه جریان خط با یک ضریب ثابت k با دامنه توان مختلط متناسب می شود که بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$|S| = \sqrt{3} |V_{rms}| |I_{rms}| = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} |V_{rms}| * I_{max} \Rightarrow I_{max} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} |V_{rms}|} * |S| \quad (7)$$

و همچنین،

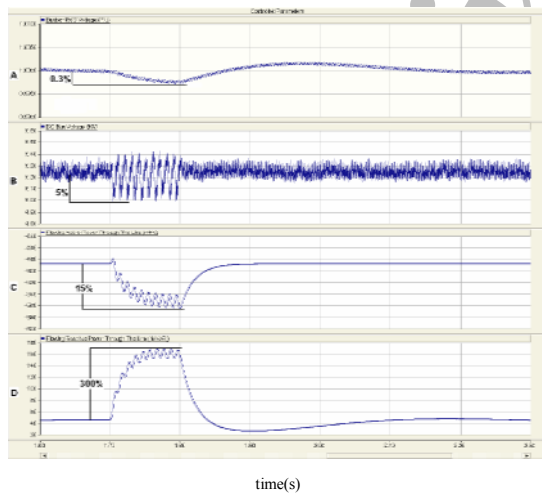
$$\Rightarrow k = \frac{I_{max}}{|S|} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} |V_{rms}|} \quad (8)$$

بر اساس نتایج بدست آمده، برای کنترل توان های اکتیو و راکتیو کافی است پارامترهای  $\sqrt{P^2 + Q^2}$  و  $Q \cdot P_{ref} - P \cdot Q_{ref}$  بر روی مقادیر مرجع خود یعنی  $\sqrt{P_{ref}^2 + Q_{ref}^2}$  و صفر تثبیت گردند. بر همین اساس در این روش برای تنظیم مقادیر P و Q، دامنه و فاز جریان عبوری از خط انتقال کنترل می شود. در این سیستم کنترلی با توجه به مقدار  $S_{ref}$  و ضریب k دامنه جریان بر روی مقدار ثابتی در نظر گرفته می-شود. این روش توان اکتیو و راکتیو تقریباً مناسبی با خطای کمی را تحویل می دهد ولیکن مقدار این توان ها کاملاً به سطح ولتاژ باس بار وابسته می گردد. به همین منظور لازم است تا سیستم کنترلی دیگری به کنترل شاخه سری اضافه شود تا مقدار توان های اکتیو و راکتیو خط را بر روی مقادیر مرجع توان کنترل نماید.



شکل (۵): نتایج شبیه‌سازی روش جدید در زمان وقوع خطا برای مدار نمونه (A: ولتاژ باس (pu) Sending End (B) ولتاژ DC خازن (C) توان اکتیو عبوری از خط انتقال (MW) (D) توان راکتیو عبوری از خط انتقال (MVAR))

همچنین شکل (۵) نشان می‌دهد پس از رفع خطا سیستم کنترلی UPFC، ولتاژ باس بار و ولتاژ DC را در زمانی کمتر از ۰٫۱ ثانیه و توان‌های اکتیو و راکتیو را در ۰٫۱۵ ثانیه پس از رفع خطا، بر روی مقادیر مرجع‌شان کنترل نموده است در حالیکه در روش قدیم ۱ کنترل ولتاژ و توان راکتیو ۰٫۳ ثانیه پس از رفع خطا انجام شده است که از این نظر نیز روش جدید بر روش قدیم ۱ برتری دارد.

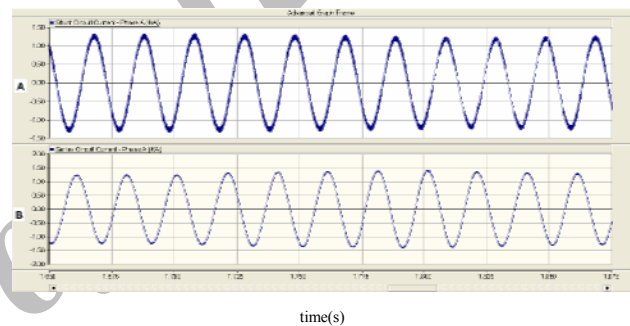


شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی روش قدیم ۱ در زمان وقوع خطا برای مدار نمونه (A: ولتاژ باس (pu) Sending End (B) ولتاژ DC خازن (C) توان اکتیو عبوری از خط انتقال (MW) (D) توان راکتیو عبوری از خط انتقال (MVAR))

شده‌اند. به این ترتیب، شبیه‌سازی‌های انجام شده از نظر سطح ولتاژ مرجع و مقادیر مرجع توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال در شرایط یکسان و برابری قرار دارند.

برای آنکه در زمان وقوع خطا رفتار و سرعت پاسخ UPFC را با این دو روش کنترلی بررسی و مقایسه نماییم، در سمت Receiving End مدار شکل ۲ در لحظه  $t=1/7\text{sec}$  یک خطای تکفاز بر روی فاز A در نظر می‌گیریم که پس از ۰٫۱ ثانیه برطرف می‌گردد. شکل (۴) و شکل (۶) نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد.

شکل (۴) جریان شاخه‌های موازی و سری UPFC را در زمان خطا نمایش می‌دهد. در این شکل به‌وضوح برتری روش سوئیچینگ باند هیستریزس بر سایر روش‌های سوئیچینگ مشاهده می‌شود به این علت که شکل موج‌های جریان، کاملاً سینوسی و فارغ از هارمونیک‌های مرتبه پایین می‌باشند.



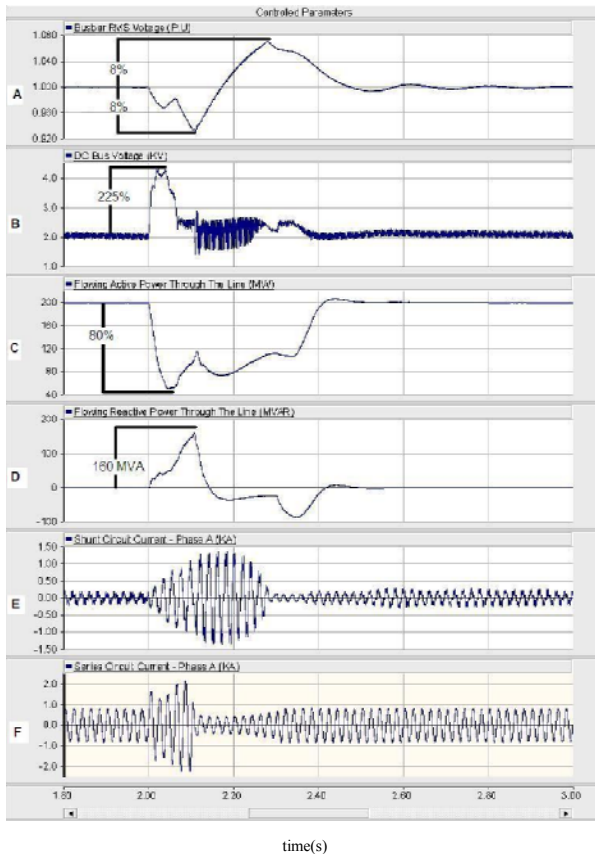
شکل (۴): جریان‌های گذرنده از مدار جدید در زمان خطا (A) جریان شاخه‌های موازی (B) جریان شاخه‌های سری.

در شکل (۵) و شکل (۶) که به ترتیب منحنی تغییرات پارامترهای کنترلی شبکه را در روش جدید و روش قدیم ۱ نشان می‌دهد، می‌بینیم که از نظر ولتاژی بین دو مدار تفاوت زیادی وجود ندارد و تغییرات سطح ولتاژ باس بار در هر دو روش کمتر از ۰٫۵ درصد است (شکل‌های ۵-۵A و ۶-۵A). در روش کنترل جدید ولتاژ DC نوسانات کمتری نسبت به روش قدیم ۱ دارد و با نوسانات ۲٫۵ درصدی نسبت به ولتاژ مرجع ولتاژ DC را کنترل می‌کند در حالی که این مقدار در روش قدیم ۱ دوبرابر روش جدید و برابر با ۵٪ به دست آمده است (شکل‌های ۵-۵B و ۶-۵B). در زمان خطا، نوسان توان اکتیو در روش قدیم ۱ برابر ۷۵ مگاوات (حدود ۰٫۱۵٪) و در مدار جدید برابر ۲٫۵ MW (۰٫۰۵٪) است (شکل‌های ۵-۵C و ۶-۵C). نوسان توان راکتیو نیز در مدار جدید دارای ماکزیمم تغییرات ۳ MVAR (۰٫۶٪) و در مدار قدیم ۱ دارای ماکزیمم تغییراتی برابر ۱۲۵ MVAR (حدود ۰٫۳۰۰٪) است (شکل‌های ۵-۵D و ۶-۵D).

## ۵-۲- مدار نمونه ۲

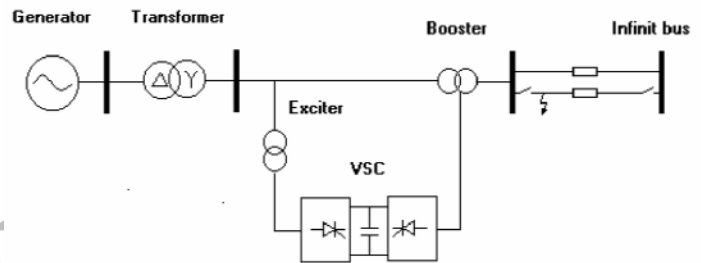
در این بخش، مدار بررسی شده در مرجع [۸] را مطابق شکل ۷ در نرم افزار PSCAD شبیه سازی نموده ایم. در این شبیه سازی، مشخصات شبکه، ژنراتور و ترانسفورماتور به صورت دقیق و بر اساس اطلاعاتی که در این مرجع برای شرایط وقوع خط و پارامترهای ژنراتور و ترانسفورماتور ارائه شده است تنظیم شده اند. اطلاعات مربوط به ژنراتور و ترانسفورماتور در ضمیمه آمده است.

همچنین در شبیه سازی این مدار نمونه مقادیر مرجع ولتاژ و توان های اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال با شرایط بررسی در مرجع [۸] یکسان بوده به طوری که در این مدار ولتاژ مرجع UPFC برابر  $230\text{ kV}$  یعنی  $1\text{ pu}$  و مقادیر مرجع توان های اکتیو و راکتیو عبوری از خط برابر  $200\text{ MW}$  و صفر مگاوار تنظیم شده اند.



شکل (۸): نتایج شبیه سازی روش جدید در زمان وقوع خطا برای مدار نمونه ۲: (A) ولتاژ باس خروجی ترانسفورماتور (pu) ولتاژ DC خازن (kV) (C) توان اکتیو عبوری از خط انتقال (MW) (D) توان راکتیو عبوری از خط انتقال (MVAR) (E) جریان شاخه موازی UPFC (F) جریان خط انتقال

ماکزیمم تغییرات برای توان اکتیو در روش جدید  $160\text{ MW}$  ( $0.8$ ) و برای توان راکتیو برابر  $160\text{ MVAR}$  است (شکل های C-۸ و D-۸) در حالیکه این مقادیر در روش قدیم ۲ برترتیب  $40\text{ MW}$  ( $0.2$ ) و  $40\text{ MVAR}$  می باشد (شکل های B-۹ و C-۹). با وجود اینکه در روش جدید، توان های اکتیو و راکتیو در زمان وقوع خطا در روش جدید نسبت به روش قدیم ۲ تغییرات بیشتری داشته اند لیکن در روش جدید در طی مدت زمان کوتاه تری بر روی مقدار مرجع خود کنترل شده اند. در مورد سرعت میرایی نوسانات، شکل ۸ بیانگر آن است که نوسانات ولتاژ در روش جدید در زمان  $t=2/8\text{ sec}$  به طور کامل از بین رفته است و نوسانات توان های اکتیو و راکتیو نیز  $0.6$  ثانیه پس از شروع خطا یعنی  $0.3$  ثانیه پس از بازگشت شبکه، به طور کامل میرا شده اند (شکل های C-۸ و D-۸) ولی در روش قدیم ۲ میرایی کامل نوسانات توان تا زمان  $t=4\text{ sec}$  (۲ ثانیه پس از وقوع خطا) به طول انجامیده است (شکل های B-۹ و C-۹). نحوه تغییرات شکل موج های جریان شاخه سری و موازی UPFC نیز از ابتدای وقوع خطا تا میرایی کامل نوسانات برترتیب در شکل های E-۸ و F-۸ نشان داده شده اند.



شکل (۷): مدار شبیه سازی شده برای بررسی پایداری گذرای سیستم در حضور UPFC و مقایسه با مرجع [۸]

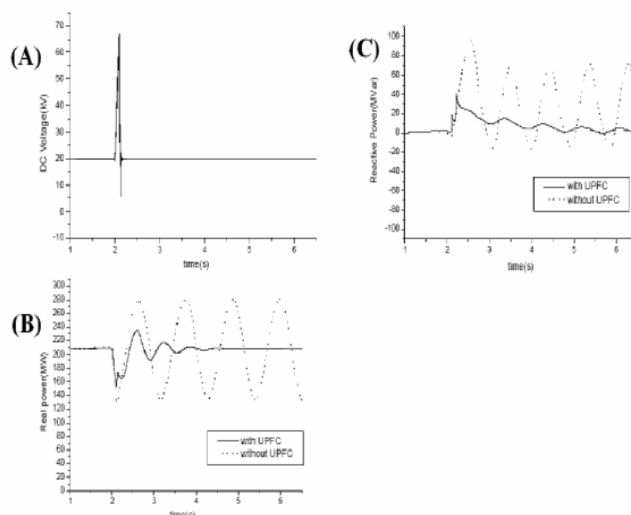
برای بررسی شرایط گذرای شبکه در حضور UPFC با کنترل هیستریزس، در این مدار نمونه بر روی یکی از خطوط متصل به باس بینهایت در زمان  $t=2\text{ sec}$  خطا رخ می دهد و سپس کلیدهای دو سر خط،  $0.1$  ثانیه بعد خط را از مدار خارج می کنند. در نهایت پس از رفع خطا در زمان  $t=2/3\text{ sec}$  کلیدها بسته شده و شبکه به حالت عادی خود باز می گردد.

شکل ۸ نتایج شبیه سازی انجام شده را برای ولتاژهای باسبار و خازن و توان های اکتیو و راکتیو خط و همچنین شکل موج های جریان شاخه سری و موازی UPFC را در زمان وقوع خطا نشان می دهد در شکل ۹ نیز نتایج ارائه شده در مرجع [۸] را برای ولتاژ DC خازن و توان های اکتیو و راکتیو خط نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۸، در زمان وقوع خطا ولتاژ باسبار در محدوده  $0.9\text{ pu}$  تا  $1.1\text{ pu}$  کنترل شده است و شبکه از نظر ولتاژ با مشکل روبرو نشده است (شکل A-۸). همچنین در زمان وقوع خطا افزایش ولتاژ DC برابر با  $225\%$  درصد بوده است (شکل B-۸)، در حالی که در روش قدیم ۲ ولتاژ DC در زمان وقوع خطا با افزایش  $250\%$  درصدی از  $20\text{ kV}$  به  $70\text{ kV}$  رسیده است (شکل A-۹).

Inertia Constant: 3.117s  
 Frequency: 60 Hz  
 Basic Angular Frequency: 376.9911rad/s  
 Potier Reactance: 0.163 p. u.  
 Direct-axis Reactance: 1.014 p. u.  
 Direct-axis Transient Reactance: 0.314 p. u.  
 Direct-axis Sub-transient Reactance: 0.280 p. u.  
 Quad.-axis Reactance: 0.770 p. u.  
 Quad.-axis Sub-transient Reactance: 0.375 p. u.  
 Direct-axis Transient Time Constant: 6.55s  
 Direct-axis Sub-transient Time Constant: 0.039s  
 Quad.-axis Sub-transient Time Constant: 0.071s  
 Armature Time Constant: 0.278s  
 No. of Coherent Machines: 4

## ۲) Step-up Transformer:

Three-phase Rated MVA: 600  
 Frequency: 60Hz  
 Windings: 13.8KV/230KV,  $\Delta/Y$   
 Leakage Reactance: 0.1 p. u.



شکل (۹): نتایج شبیه‌سازی روش قدیم ۲ در زمان وقوع خطا برای مدار نمونه ۲: (A) ولتاژ DC خازن (kV) و توان اکتیو عبوری از خط انتقال (MW) (C) توان راکتیو عبوری از خط انتقال (MVAR) (B) توان اکتیو عبوری از

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده نتیجه می‌شود که روش کنترلی ارائه شده در این مقاله، علاوه بر کنترل ولتاژ DC و توان اکتیو و راکتیو خط انتقال در حالت ماندگار سیستم، کنترل بسیار مناسبی بر روی این پارامترها در در زمان وقوع خطا و بهبود پایداری گذرای شبکه دارد. علاوه بر این یکی از مزیت‌های مهم کنترل UPFC به این روش، میرایی سریع نوسانات در حضور UPFC است که این امر افزایش هرچه بیشتر پایداری شبکه قدرت را در پی خواهد داشت.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش سوئیچینگ هیستریزس و روش جدیدی بمنظور کنترل فلوی توان خط انتقال بکار گرفته شده که از چهار درجه آزادی موجود برای UPFC استفاده می‌کند که تاکنون برای سیستم باند هیستریزس ارائه نشده است. در این روش با کنترل دامنه و فاز جریان عبوری از خط بترتیب دامنه و فاز توان ظاهری خط انتقال کنترل می‌گردد که در نهایت به کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو خط منجر می‌شود و در شرایط گذرا نیز نوسانات توان خط انتقال بطور مناسبی کنترل می‌گردد. طی شبیه‌سازی‌های انجام شده که تحت شرایط یکسان از نظر پارامترهای شبکه تست و مقادیر مرجع ولتاژ و توان UPFC انجام شده است، این روش با روش‌های قدیمی مقایسه شده و نتایج بدست آمده برتری این روش را بر روش‌های ارائه‌شده در گذشته به‌وضوح نشان می‌دهد.

## پیوست :

۱) Synchronous Generator:

Rated Voltage: 7.967 KV

Rated Current: 5.02 KA

## مراجع

- [1] Laszlo Gyugyi, Colin D.Schauder; "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)- Chapter 7: Unified Power Flow Controller"; Published by The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom; Page(s): 268-269; 1999.
- [2] Dong-Jun Won, Seung-II Moon; "A Study on the Dynamic Response of a PWM Based UPFC and Its Application to Power Systems"; IEEE Power Engineering Society Summer Meeting; Volume 3, Page(s):1590-1595; 2000.
- [3] K.L.Mok, D.Sutano, L.A.Snider; "Hysteresis Control Over UPFC"; International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management; Volume 2, Page(s):376-379; 2000.
- [4] D.Sutano, L.A.Snider, K.L.Mok; "EMTP Simulation of a STATCOM using Hysteresis Control"; International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS '99. Proceedings of the IEEE; Volume 1, Page(s):531-535; 1999.
- [5] T.K.Mok, Yixin Ni, Felix F.Wu; "Design of Fuzzy Damping Controller of UPFC through Genetic Algorithm"; IEEE Power Engineering Society Summer Meeting; Volume 3, Page(s):1889-1894; 2000.
- [6] Karl Schoder, Azra Hasanovic, Ali Feliachi; "Power System Damping Using Fuzzy Controlled Unified Power Flow Controller"; IEEE Power Engineering Society Winter Meeting; Volume 2, Page(s):617-622 ; 2001.



- [7] A. Ajami , S.H. Hosseini , S. Khanmohammadi , G.B. Gharehpetian;” Modeling and Control of C-UPFC for Power System Transient Studies”; Elsevier Simulation Modelling Practice and Theory 14; Page(s): 564–576; 2006;
- [8] W.Zhang, T.T.Lie; “Hysteresis Current Forcing Control For UPFC Applications”; Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) ,AUPEC2002, Melbourne, Australia; 2002.
- [9] Ali T. Al-Awami, Y.L. Abdel-Magid, M.A. Abido; “A Particle-swarm-based Approach of Power System Stability Enhancement With Unified Power Flow Controller”; Elsevier Electrical Power and Energy Systems; 2006.
- [10] S. Krishna, K.R. Padiyar; “Discrete Control of Unified Power Flow Controller for Stability Improvement”; Elsevier Electric Power Systems Research 75; Page(s):178–189; 2005.
- [11] K. Visakha, D. Thukaram\*, Lawrence Jenkins; “Application of UPFC for System Security Improvement Under Normal and Network Contingencies”; Elsevier Electric Power Systems Research 70; Page(s):46-55; 2004.
- [12] Harinder Sawhney, B. Jeyasurya; “Application of Unified Power Flow Controller for Available Transfer Capability Enhancement”; Elsevier Electric Power Systems Research 69; Page(s):155-160; 2004.
- [13] Muwaffaq I. Alomoush; “Impacts of UPFC on Line Flows and Transmission Usage”; Elsevier Electric Power Systems Research 71; Page(s):223-234; 2004.
- [14] K.R. Padiyar, Nagesh Prabhu; “Investigation of SSR Characteristics of Unified Power Flow Controller”; Elsevier Electric Power Systems Research 74; Page(s):211-221; 2005.
- [15] N.G.Hingorani, L Gyugyi; “Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems”; IEEE Press; 2000.

زیرنویسها

- 
- <sup>1</sup> Static Synchronous Compensator  
<sup>2</sup> Static Synchronous Series Compensator  
<sup>3</sup> Pulse Width Modulation  
<sup>4</sup> Gate Turn-Off Thyristor