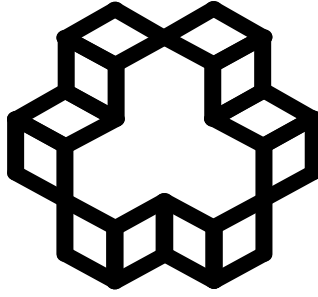


اللَّهُمَّ احْمِزْنِي بِرَحْمَتِكَ



تأسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق

مهندسی برق - قدرت پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

کنترل STATCOM با استفاده از مدل میانگین تحت مدولاسیون

فضای برداری سوئیچینگ

استاد راهنما: دکتر محمد توکلی بینا

دانشجو: سعید حق نظری

تیر ۱۳۸۹

## چکیده

استفاده از جبران‌سازهای استاتیکی می‌تواند بعضی از مشکلات را در کنترل و بهره‌برداری از سیستم قدرت بهبود دهد. جبران‌ساز استاتیکی سنکرون (STATCOM) برای کنترل توان راکتیو، حذف هارمونیک‌ها و عدم تعادل در سیستم‌های انتقال و توزیع بکار می‌رود. برای دستیابی به این اهداف، داشتن یک سیگنال مرجع جبران‌سازی ضروری است. این سیگنال مرجع معمولاً به شکل جریانی و با استفاده از تئوری شناخته شده‌ی توان تولید می‌شود. استفاده از روش‌های کنترل جریانی مستلزم فرکانس سوئیچینگ بالاست که خود منجر به تلفات توان قابل ملاحظه‌ای می‌شوند که در کاربردهای سیستم قدرت نامطلوب است. از طرف دیگر فرکانس‌های سوئیچینگ بالا و متغیر باعث بروز اثرات نامطلوب دیگری همچون تداخل الکترومغناطیسی (EMI) می‌شوند. تولید سیگنال‌های مرجع ولتاژی می‌تواند یک راه‌حل برای دستیابی به فرکانس‌های سوئیچینگ ثابت و کم باشد. بدین منظور روش‌های مدولاسیون مختلفی همچون SPWM و مدولاسیون فضای برداری (SVM) را می‌توان بکار برد. برخلاف مرجع جریانی، مرجع ولتاژی بسادگی قابل تولید نیست. در این پایان‌نامه می‌خواهیم از مدل متوسط برای کنترل STATCOM بر اساس مرجع سیگنال ولتاژی استفاده کنیم. ورودی‌های مدل متوسط، ولتاژهای سیستم قدرت و توابع سیکل وظیفه می‌باشند. در کارهای قبلی توابع سیکل وظیفه برای STATCOM با مدولاتور SPWM برحسب زاویه بین ولتاژهای سیستم قدرت و ولتاژهای خروجی اینورتر STATCOM ( $\alpha$ ) محاسبه و در کنترل STATCOM با مدولاتور SPWM استفاده شده‌اند. در این پایان‌نامه رابطه‌ی بین توابع سیکل وظیفه و  $\alpha$  برای STATCOM با مدولاتور SVM پیشنهاد شده‌اند و براساس یک طرح کنترلی پیشنهادی که در آن از مدل متوسط استفاده شده است، STATCOM با مدولاتور SVM کنترل گردیده است. نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار MATLAB بیانگر درستی روابط بدست آمده و کارایی سیستم کنترلی پیشنهاد شده، می‌باشند.

کلیدواژه: STATCOM، مدل متوسط، مدولاسیون SVM، سیگنال مرجع ولتاژی

|   |      |
|---|------|
| فهرست عناوین.....   | صفحه |
| فهرست شکل‌ها و جدول‌ها.....   | IV   |
| فهرست اختصارات.....   | VII  |
| فصل اول : مقدمه.....  | ۱    |
| ۱-۱ اهداف و کلیات.....  | ۲    |
| ۲-۲ تمرکز موضوعی و ساختار پایان‌نامه.....   | ۶    |
| فصل دوم : مروری بر کنترل‌کننده‌های FACTS موازی.....                                 | ۹    |
| ۱-۲ مقدمه.....  | ۱۰   |
| ۲-۲ کنترل‌کننده‌های موازی.....  | ۱۱   |
| ۳-۲ جبران‌کننده‌ی استاتیکی توان راکتیو (SVC).....                                   | ۱۳   |
| ۱-۳-۲ مشخصات جبران‌کننده‌های استاتیک.....   | ۱۳   |
| ۲-۳-۲ انواع SVC.....  | ۱۳   |
| ۳-۳-۲ راکتور قابل کنترل بوسیله‌ی تریستور (TCR).....                                 | ۱۵   |
| ۴-۳-۲ هارمونیک‌ها.....  | ۱۷   |
| ۵-۳-۲ سوابق و کاربردها.....   | ۱۸   |
| ۴-۲ STATCOM.....  | ۱۹   |
| ۱-۴-۲ قواعد اصلی STATCOM.....   | ۲۱   |
| ۲-۴-۲ اصول عملیات STATCOM.....  | ۲۲   |
| ۳-۴-۲ مقایسه‌ی میان STATCOM و SVC.....  | ۲۶   |
| ۱-۴-۳-۲ مشخصه‌های V-Q و V-I.....  | ۲۷   |
| ۲-۳-۴-۲ پایداری گذرا.....   | ۲۸   |
| ۳-۳-۴-۲ زمان پاسخ.....  | ۳۱   |
| ۴-۳-۴-۲ قابلیت تبادل توان حقیقی.....  | ۳۱   |
| ۵-۳-۴-۲ ابعاد فیزیکی و نصب.....   | ۳۱   |
| فصل سوم : مدولاسیون فضای برداری (SVM) برای اینورترهای منبع ولتاژی (VSI) سه‌ساق..... | ۳۳   |

|         |   |
|---------|---|
| ۳۴..... | ۱-۳ اینورتر منبع ولتاژی (VSI) سه ساق.....                           |
| ۳۶..... | ۲-۳ مدولاسیون فضای برداری (SVM).....                                |
| ۴۳..... | ۳-۳ طرح‌های مختلف مدولاسیون فضای برداری (SVM).....                  |
| ۴۳..... | ۱-۳-۳ توالی راستگرد (SVM1).....                                     |
| ۴۴..... | ۲-۳-۳ توالی متقارن (SVM2).....                                      |
| ۴۴..... | ۳-۳-۳ توالی بردار صفر متغیر (SVM3).....                             |
| ۴۵..... | ۴-۳-۳ توالی بیشترین جریان بدون سوئیچینگ (SVM4).....                 |
| ۴۶..... | <b>فصل چهارم : بررسی روش‌های کنترل STATCOM</b> .....                |
| ۴۷..... | ۱-۴ مقدمه.....  |
| ۴۹..... | ۲-۴ روش‌های کنترل STATCOM مبتنی بر مدل.....                         |
| ۴۹..... | ۱-۲-۴ مدل DQ.....   |
| ۶۰..... | ۲-۲-۴ مدل متوسط.....  |
| ۶۶..... | ۳-۴ روش‌های کنترل STATCOM مستقل از مدل.....                         |
| ۶۷..... | ۱-۳-۴ کنترل PI استاتیک.....   |
| ۶۷..... | ۲-۳-۴ روش کنترل جریان هیستریزیس.....                                |
| ۶۹..... | ۳-۳-۴ شبکه‌های عصبی و فازی.....                                     |
| ۷۲..... | <b>فصل پنجم : پیشنهاد مدولاتور SVM برای مدل متوسط STATCOM</b> ..... |
| ۷۳..... | ۱-۵ مقدمه.....  |
| ۷۳..... | ۲-۵ توابع سیکل وظیفه مدل متوسط براساس مدولاسیون SVM.....            |
| ۷۶..... | ۳-۵ نتایج شبیه‌سازی.....  |

|  |     |
|--|-----|
| فصل ششم : کنترل حلقه بسته STATCOM بوسیله مدل متوسط مبتنی بر SVM  | ۸۴  |
| ۱-۶ مقدمه  | ۸۵  |
| ۲-۶ سیستم کنترلی جدید STATCOM با مدولاتور SVM بر مبنای مدل متوسط | ۸۶  |
| ۳-۶ نتایج شبیه‌سازی  | ۸۹  |
| نتیجه‌گیری و پیشنهادات   | ۹۹  |
| منابع و مراجع  | ۱۰۰ |

## فهرست اشکال و جدول‌ها

- شکل ۱-۲: الف-شماتیک جبران کننده استاتیک ب- مشخصه جبران کننده ایده آل (۱۳)
- شکل ۲-۲: جبران کننده راکتور قابل کنترل به وسیله تریستور همراه با خازن ثابت (۱۴)
- شکل ۳-۲: مشخصه‌های ترکیبی SVC (۱۵)
- شکل ۴-۲: الف- عناصر اصلی TCR (۱۵)
- شکل ۴-۲: ب- شکل موج جریان TCR (۱۶)
- شکل ۵-۲: آرایش TCR با ترانسفورمر شامل دو ثانویه با ترتیب ۱۲ پالس (۱۸)
- شکل ۶-۲: مدار معادل و دیاگرام فازی کندانسور سنکرون (۲۱)
- شکل ۷-۲: دیاگرام تک خطی مبدل منبع ولتاژ مستقر در STATCOM (۲۳)
- شکل ۸-۲: دیاگرام فازوری برای مبادلات قدرت در کاربردهای STATCOM (۲۴)
- شکل ۹-۲: مقایسه مشخصه‌های حالت دائمی V-I (۲۵)
- شکل ۱۰-۲: اساس STATCOM با یک اینورتر ۶ پالس ابتدایی (۲۶)
- شکل ۱۱-۲: مشخصه V-I یک STATCOM (الف) و یک SVC (ب) (۲۸)
- شکل ۱۲-۲: مشخصه V-Q یک STATCOM (الف) و یک SVC (ب) (۲۸)
- شکل ۱۳-۲: توان انتقال یافته در برابر زاویه انتقال یک سیستم دوماشینه با نقطه‌میانمی مجهز به STATCOM (الف) و SVC (ب) که در توان‌های نامی متفاوتی به دست آمده‌اند. (۲۹)
- شکل ۱۴-۲: اصلاح پایداری گذرا با استفاده از یک STATCOM (الف) و یا یک SVC (ب) در نقطه‌میانمی و در یک مقدار توان راکتیو نامی معین (۳۰)
- شکل ۱-۳: توپولوژی یک VSI سه ساق (۳۴)
- شکل ۲-۳: هشت آرایش مختلف VSI سه ساق (۳۴)

شکل ۳-۳-۱: آرایش pnn مربوط به VSI سه ساق (۳۸)

شکل ۳-۳-۲: ولتاژ خط در فضای  $\alpha - \beta$  برای آرایش pnn مربوط به VSI سه ساق (۳۹)

شکل ۳-۴: بردارهای ولتاژ خط غیرصفر در فضای  $\alpha - \beta$  (۳۹)

شکل ۳-۵-۱: آرایش ppp و nnn مربوط به VSI سه ساق (۴۰)

شکل ۳-۵-۲: ولتاژهای خط در فضای  $\alpha - \beta$  برای آرایشهای ppp و nnn مربوط به VSI سه ساق (۴۰)

شکل ۳-۶-۱: ولتاژ خروجی مطلوب VSI در میان SSV (۴۱)

شکل ۳-۶-۱: ولتاژ خروجی مطلوب VSI در میان SSV (۴۱)

شکل ۳-۷: بردار ولتاژ خروجی مطلوب VSI در ناحیه ۱ (۴۲)

شکل ۳-۸: طرح مدولاسیون توالی راستگرد (SVM1) (۴۴)

شکل ۳-۹: طرح مدولاسیون توالی متقارن (SVM2) (۴۴)

شکل ۳-۱۰: طرح مدولاسیون توالی بردار صفر متغیر (SVM3) (۴۵)

شکل ۳-۱۱: طرح مدولاسیون توالی بیشترین جریان بدون سوئیچینگ (SVM4) (۴۵)

شکل ۴-۱: بلوک دیاگرام سیستم کنترل STATCOM (۴۷)

شکل ۴-۱: نمایش برداری در فضای d-q (۵۰)

شکل ۴-۲: STATCOM متصل به سیستم قدرت (۵۲)

شکل ۴-۳: مشخصه حالت ماندگار STATCOM برحسب  $\alpha$  (۵۴)

شکل ۴-۴: بلوک دیاگرام کنترلر PI (۵۸)

شکل ۴-۵: STATCOM متصل به شبکه قدرت (۶۲)

شکل ۴-۶: مدل مداری متوسط STATCOM (۶۴)



شکل ۴-۷: کنترل STATCOM با مدولاسیون SPWM با استفاده از مدل متوسط (۶۶)

شکل ۴-۸: کنترل کننده PI استاتیک (۶۷)

شکل ۴-۹: بلوک دیاگرام کنترل کننده هیستریزس (۶۸)

شکل ۴-۱۰: بلوک شماتیک کنترل کننده فازی (۷۰)

شکل ۴-۱۱: مقایسه سطح کنترلی: فازی (شکل سمت راست) و PI (۷۱)

شکل ۵-۱: بردار ولتاژ مرجع بین بردارهای حالت سوئیچینگ (۷۴)

شکل ۵-۲: STATCOM متصل به سیستم قدرت با حضور بار محلی (۷۷)

جدول ۵-۱: مقادیر پارامترهای سیستم شکل (۲-۵) (۷۷)

جدول ۵-۲: مقادیر اختلاف فاز ولتاژ خروجی نسبت به ولتاژ مرجع ( $\mu$ ) به ازای تغییرات  $\alpha$  (۷۸)

شکل ۵-۳: رفتار متغیرهای حالت سیستم واقعی و مدل متوسط STATCOM برای  $\alpha = 1^\circ$  (۷۹)

شکل ۵-۴: رفتار متغیرهای حالت سیستم واقعی و مدل متوسط STATCOM برای  $\alpha = -1^\circ$  (۸۰)

شکل ۵-۵: نمودار جریان سیستم واقعی و مدل متوسط STATCOM به ازای  $\alpha = -0.4^\circ$  برای جبران تاخیر

فاز ثابت (۸۱)

شکل ۵-۶: نمودار جریان سیستم واقعی و مدل متوسط STATCOM به ازای  $\alpha = -0.4^\circ$  برای جبران تاخیر

فاز متغیر (مطابق جدول (۲-۵)) (۸۲)

شکل ۵-۷: رفتار متغیرهای حالت مدل واقعی و مدل متوسط STATCOM به ازای تغییر  $\alpha = -0.8^\circ$  به

$\alpha = 0.9^\circ$  در  $t=1\text{sec}$  (۸۳)

شکل ۶-۱: STATCOM متصل به سیستم قدرت با حضور بار محلی (۸۷)

شکل ۶-۲: سیستم کنترلی STATCOM براساس مدل dq (۸۸)

شکل ۶-۳: سیستم کنترلی جدید STATCOM بر مبنای مدل متوسط (۸۹)

شکل ۶-۴: تامین توان راکتیو 100 Kvar توسط STATCOM با کنترلر مبتنی بر مدل متوسط (۹۰)

شکل ۵-۶: رفتار متغیر کنترلی  $\alpha$  در تامین توان راکتیو 100 KVar توسط STATCOM با سیستم کنترلی مبتنی بر مدل متوسط (۹۱)

شکل ۶-۶: جریان خروجی STATCOM در تامین توان راکتیو 100KVar با سیستم کنترلی مبتنی بر مدل متوسط (۹۲)

شکل ۷-۶: ولتاژ خروجی مبدل STATCOM در تامین توان راکتیو 100KVar با سیستم کنترلی مبتنی بر مدل متوسط (۹۲)

شکل ۸-۶: تغییرات زاویه  $\alpha$  سیستم کنترل بر مبنای مدل متوسط (۹۳)

شکل ۹-۶: تغییرات توان راکتیو سیستم کنترل بر مبنای مدل متوسط (۹۴)

شکل ۱۰-۶: تغییرات جریان منبع سیستم کنترل بر مبنای مدل متوسط (۹۵)

شکل ۱۱-۶: تغییرات ولتاژ خروجی اینورتر سیستم کنترل بر مبنای مدل متوسط (۹۵)

شکل ۱۲-۶: جریان خروجی STATCOM با کنترلر مبتنی بر مدل متوسط (۹۶)

شکل ۱۳-۶: جریان خروجی STATCOM با کنترلر جریان هیستریزیس (۹۷)

شکل ۱۴-۶: تامین توان راکتیو 200 KVar توسط STATCOM با کنترلر مبتنی بر مدل متوسط (۹۷)

شکل ۱۵-۶: تامین توان راکتیو 200 KVar توسط STATCOM با کنترلر جریان هیستریزیس (۹۸)

|         |  |
|---------|--|
| FACTS   | flexible ac transmission system        |
| STATCOM | static compensator                     |
| SPWM    | sinusodial pulse width modulation      |
| PWM     | pulse width modulation                 |
| SVM     | space vector modulation                |
| VSI     | voltage source inverter                |
| HVDC    | high voltage direct current            |
| SVC     | static var compensator                 |
| TCSC    | Thyristor controlled series capacitors |
| SVS     | synchronous voltage source             |
| SSSC    | static synchronous series compensator  |
| UPFC    | unified power flow controller          |
| IPFC    | interline power flow controller        |
| ASVC    | advanced static var compensator        |
| IGBT    | insulated gate bipolar transistor      |
| GTO     | Gate turn-off thyristor                |
| SSV     | switching state vectors                |

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ اهداف و کلیات [۱]

میزان توان اکتیو و راکتیو در خطوط انتقال از امپدانس خطوط، دامنه ولتاژ و اختلاف زاویه‌ی ولتاژ طرفین خطوط تبعیت می‌کند. در نتیجه دامنه و مسیر عبور جریان ناشی از توزیع بار و ساختار شبکه می‌باشد. از طرفی با توجه به محدودیت‌های عبور توان در خطوط که ناشی از محدودیت‌های عمده حرارتی و پایداری است، استفاده کامل از شبکه‌های بهم پیوسته عملی نیست. هر چه شبکه گسترده‌تر گردد، شکاف حدود حرارتی و پایداری بیشتر شده و انتقال و پخش توان متأثر از حدود پایداری خواهد بود که خود شامل پایداری گذرا، دینامیک، پایداری ولتاژ و حتی پایداری حالت ماندگار می‌باشد.

مشکلات موجود در سیستم‌های انتقال توان موجود (فاصله، پایداری و کنترل پذیری عبور توان) که موجب بهره‌برداری نامناسب می‌گردد، به‌همراه تاثیر قابل ملاحظه‌ی جبرانگرهای کنترل شده، منجر به ظهور جبرانگرهای کنترل شده بوسیله‌ی تجهیزات الکترونیک قدرت در اواخر دهه‌ی هفتاد میلادی گردید. موسسه EPRI<sup>۱</sup> پس از سالها تحقیق و مطالعه‌ی تجهیزات الکترونیک قدرت فشار قوی برای استفاده در خطوط انتقال HVDC<sup>۲</sup> و جبرانگرهای خطوط AC، در اواخر دهه‌ی هشتاد میلادی سیستم‌های FACTS<sup>۳</sup> را به دنیا معرفی کرد. این ادوات در تنوع گسترده‌ای قابلیت کنترل شبکه‌های بهم پیوسته را فراهم ساختند و مبتنی بر الکترونیک قدرت، تئوری‌های پیشرفته کنترل و میکرو کامپیوترها می‌باشند.

FACTS عبارت است از بکارگیری کنترل کننده‌های بر مبنای تجهیزات الکترونیک قدرت در سیستم‌های انتقال AC به منظور افزایش کنترل پذیری سیستم و افزایش قابلیت انتقال توان می‌باشد. برای غلبه بر محدودیت‌های موجود در ساختار خطوط انتقال و برای سهولت تبادل توان بین شرکت‌های مختلف، ادوات FACTS در اواخر دهه‌ی هشتاد ابداع گردید و دو هدف اصلی زیر را دنبال می‌کنند :

---

۱- Electric Power Research Institute

۲- High Voltage DC Current

۳- Flexible AC Transmission System

۱- افزایش قابلیت انتقال توان سیستم‌های انتقال

۲- افزایش کنترل‌پذیری شامل کنترل تراکم

هدف اول به این معنی است که اگر پایداری سیستم در هنگام وقوع خطا و پس از آن با اعمال کنترل بلادرنگ توان حفظ شود، می‌توان توان انتقالی را افزایش داد. البته این هدف بدان معنا نیست که خطوط همیشه در حداکثر توان خود کار کنند زیرا تلفات انتقال زیاد و غیرقابل قبول خواهد بود، اما این امر در شرایط اضطراری ممکن است بکارگرفته شود. با استفاده از کنترل‌کننده‌های FACTS بجای در نظر گرفتن حاشیه‌ی پایداری بزرگ، انتقال توان در وضعیت عادی به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت (طبق مطالعات انجام شده در حدود ۵۰٪ [۱]).

هدف دوم بیان می‌دارد که در صورت قابل کنترل بودن جریان خط (مثلاً تغییر امپدانس موثر خط) می‌توان عبور توان را از طریق کریدورهای انتقال دلخواه عبور داده و عبور گردشی توان را محدود کرد. همچنین این هدف بصورت ضمنی بیان می‌دارد که تغییر سریع مسیر عبور توان در صورت وقوع حادثه‌ای باید امکان‌پذیر باشد تا عبور توان در کل سیستم انتقال به شکل دلخواه باشد. واضح است که انجام این دو هدف، بطور قابل ملاحظه- ای بر بهره‌برداری از سیستم‌های انتقال موجود (و آینده) اثر گذاشته و نقش مهمی در تسهیل تحقق سیستم‌های با ساختار نوین رقابتی خواهد داشت.

انجام دو هدف مذکور مستلزم بهبود گسترش کنترل‌کننده‌ها و جبرانگرهای توان بالا می‌باشد. تکنولوژی مورد نیاز برای این مساله در تجهیزات الکترونیکی فشارقوی (چند صد MVA) و کنترل بلادرنگ آنها نهفته است. هنگامیکه تعداد مناسبی از این کنترل‌کننده‌ها و جبرانگرهای سریع در کل سیستم قرار داده شد، کنترل کلی سیستم برای دستیابی به حداکثر مزایای ممکن و جلوگیری از بروز عکس‌العمل‌های نامناسب بین آرایش‌های مختلف سیستم و اهداف مورد نظر، مساله تکنولوژیک مهمی بوجود خواهد آورد. در این میان دستیابی به

استراتژی کنترل بهینه سیستم و پروتکل‌های امنیتی و ارتباطات مخابراتی اهمیت دارد. می‌توان تحقق کنترل بهینه‌ی چنین سیستمی را سومین هدف FACTS به شمار آورد.

تکامل کنترل‌کننده‌های FACTS منجر به پدید آمدن دو روش مختلف شده است. با هر کدام از این روش‌ها، گروهی از کنترل‌کننده‌ها ابداع شده و همگی قادر به برآورده کردن مسائل خطوط انتقال می‌باشند. در گروه اول از امپدانس‌های راکتیو یا ترانسفورماتورهای تغییر دهنده‌ی تپ و کلیدهای تایریستوری برای کنترل استفاده می‌شود. در واقع جبرانگرهایی که بوسیله‌ی تایریستور کنترل می‌شوند از دید سیستم انتقال در حکم یک ادmittانس راکتیو متغیر بوده و عموماً رفتار امپدانس سیستم را تغییر می‌دهند. گروه اول کنترل‌کننده‌ها شامل جبرانگر استاتیکی توان راکتیو (SVC)<sup>۱</sup>، خازن سری کنترل شده بوسیله‌ی تایریستور (TCSC)<sup>۲</sup> و شیف‌دهنده‌ی فاز می‌باشند.

در گروه دوم از مبدل‌های سوئیچینگ منبع ولتاژی با کموتاسیون خودی استفاده می‌شود تا ساخت منابع جریان یا ولتاژ AC سنکرون استاتیکی (SVS)<sup>۳</sup> با کنترل پذیری سریع امکانپذیر شود. این روش در مقایسه با روش‌های جبران مرسوم که در آنها از خازن‌های دارای کلید تایریستوری و راکتورهای کنترل شده‌ی تایریستوری استفاده می‌شود، برتری چشمگیری دارد. با این روش ولتاژ خط انتقال یکنواخت بوده و کنترل کاملی بر امپدانس موثر خط و زاویه‌ی ولتاژ وجود دارد. علاوه بر این‌ها، تبادل مستقیم توان اکتیو با سیستم قدرت امکانپذیر شده و جبران توان راکتیو نیز بطور مستقل می‌تواند انجام گردد. در نتیجه می‌توان به‌سهولت عبور توان و اغتشاش‌های دینامیکی را کنترل کرد و با اغتشاشات مقابله نمود.

منبع ولتاژ سنکرون (SVS) به یک ماشین سنکرون ایده‌آل که مجموعه‌ی متعادلی از ولتاژهای سینوسی (سه فاز) را در فرکانس اصلی سیستم تولید کرده و دامنه و زاویه‌ی فاز آن قابل کنترل است، شبیه می‌باشد. این ماشین

---

۱- Static Var Compensator

۲- Thyristor Controlled Series Capacitors

۳- Synchronous Voltage Source

ایده‌آل دارای اینرسی نبوده و پاسخ آن عملاً لحظه‌ای می‌باشد. علاوه بر این در امپدانس سیستم موجود تغییر چندانی بوجود نیاورده و خود می‌تواند توان راکتیو (هم خازنی و هم سلفی) تولید کند. همچنین در صورت اتصال به یک منبع انرژی مناسب می‌تواند با سیستم AC، توان اکتیو تبادل نماید. می‌توان با استفاده از SVS، ولتاژ معینی را برای ایجاد جریان خط مورد نظر اعمال کرد (یا جریان معلومی را برای ایجاد ولتاژ ترمینال مورد نظر اعمال کرد). برخلاف روش امپدانس کنترل شده، جبران حاصل از SVS تا حد زیادی مستقل از متغیرهای شبکه (ولتاژ و جریان خط و زاویه) بوده و از اینرو در صورت وقوع اغتشاش‌های عمده (نظیر افت ولتاژ شدید، نوسان جریان و زاویه‌ی فاز) از دست نمی‌رود. SVS یک منبع جریان متناوب با خروجی سینوسی است و با ورودی‌های ثابت، فقط در فرکانس اصلی سیستم کار خواهد کرد. از نظر تئوری امپدانس خروجی آن در فرکانس‌های دیگر صفر است (در عمل بدلیل اندوکتانس ناشی ترانسفورماتور کوپل کننده، امپدانس سلفی اندکی دارد). در نتیجه بر خلاف جبرانگرهای امپدانس، SVS قادر به تولید مدار تشدید سری یا موازی (با شبکه‌ی انتقال) نیست.

SVS دارای قابلیت ایجاد عبور توان دوطرفه‌ی توان اکتیو بین ترمینالهای AC و DC خود می‌باشد. از اینرو می‌توان ترمینالهای دو یا چند SVS را با هم تزویج کرده و مسیرهایی برای انتقال توان اکتیو بین شین‌های (خطوط) دلخواه بوجود آورد. با ترکیب مناسب SVSها می‌توان یک کنترل کننده FACTS ساخت که بتواند توان اکتیو و راکتیو را بطور مستقل در خطوط کنترل نموده و عبور توان اکتیو و راکتیو را متعادل نماید.

مجموعه‌ی کنترل کننده‌های FACTS که دارای سوئیچینگ تبدیلی هستند عبارتند از : جبرانگر سنکرون استاتیکی (STATCOM)<sup>۱</sup>، جبرانگر سری سنکرون استاتیکی (SSSC)<sup>۲</sup>، کنترل کننده یکپارچه عبور توان (UPFC)<sup>۳</sup> و کنترل کننده عبور توان بین خطی (IPFC)<sup>۱</sup>. STATCOM با جبران موازی، ولتاژ خط انتقال را

---

۱- Static Compensator

۲- Static Synchronous Series Compensator

۳- Unified Power Flow Controller



کنترل می‌کند. SSSC بوسیله‌ی جبران سری، ولتاژ دو سر امپدانس سری خط انتقال و در نتیجه امپدانس موثر را کنترل می‌کند. UPFC می‌تواند هر سه پارامتر موثر خط انتقال (ولتاژ، امپدانس و زاویه) را با هم یا هر کدام را به تنهایی کنترل کند و یا بطور مستقیم توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط را کنترل کند. IPFC علاوه بر جبران سازی سری، می‌تواند توان اکتیو را بین خطوط عبور داده و بدین ترتیب مدیریت توان اکتیو و راکتیو یک سیستم انتقال با چندین خط را انجام دهد.

## ۱-۲ تمرکز موضوعی و ساختار پایان‌نامه

STATCOM یک جبران‌ساز موازی است و برای کنترل توان راکتیو و تنظیم ولتاژ در باس‌های سیستم قدرت بکار می‌رود. در فصل دوم کنترل‌کننده‌های FACTS موازی تشریح شده‌اند و STATCOM بعنوان یک جبران‌ساز موازی معرفی و با دیگر جبران‌سازهای موازی مقایسه شده است.

به طور کلی، سیستم STATCOM از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

### ۱- مبدل قدرت

مبدل‌های بکارگرفته شده در فیلترهای اکتیو و کنترلرهای FACTS شامل یک بخش DC و همچنین خروجی AC می‌باشند. خروجی AC حاوی مولفه‌ی پایه‌ای است که دامنه و فرکانس آن قابل تنظیم است. بسته به نوع مبدل (منبع ولتاژ یا منبع جریان)، خروجی AC و بخش DC کنترل و تجهیز می‌شود. در یک مبدل منبع ولتاژ (VSI)<sup>۱</sup>، قسمت DC بصورت خازنی و در مبدل منبع جریان (CSI)<sup>۲</sup> بخش DC سلفی است. برای دستیابی به دامنه و فاز مطلوب خروجی AC لازم است کلیدهای مبدل در زمان‌های مناسب سوئیچ شوند. براساس اینکه خروجی مطلوب از نوع جریان و یا ولتاژ باشد می‌توان از روش‌های مختلف مدولاسیون برای سوئیچینگ مبدل

---

۱- Interline Power Flow Controller

۲- Voltage Source Inverter

۳- Current Source Inverter

استفاده کرد. بعنوان مثال اگر هدف ایجاد یک جریان مرجع در خروجی مبدل باشد، روش هیستریزیس مناسب است و اگر هدف ایجاد یک ولتاژ مرجع در خروجی مبدل باشد، می توان از روش های مدولاسیون پهنای پالس (PWM)<sup>۱</sup> استفاده کرد. در فصل سوم VSI های سه ساق معرفی شده اند و در ادامه روش مدولاسیون فضای برداری (SVM)<sup>۲</sup> برای سوئیچینگ این مبدل ها تشریح گشته است.

## ۲- راکتورهای اتصال

راکتورهای اتصال، سلف ها و مقاومتهای سری هستند که مبدل قدرت STATCOM را به سیستم قدرت متصل می کنند. در یک سیستم با ولتاژ بسیار بالا، اندوکتانس های ناشی ترانسفورماتورهای افزایشده قدرت را می توان به عنوان راکتورهای اتصال به کار برد. هدف اصلی از راکتورهای اتصال فیلتر کردن مولفه های هارمونیک جریان خروجی می باشد که به طور عمده توسط ولتاژ خروجی ضربانی مبدل های قدرت تولید می شود.

## ۳- سیستم کنترل

مهمترین بخش STATCOM، سیستم کنترلی است که کنترل توان راکتیو و تنظیم ولتاژ باس های سیستم قدرت را برآورده می کند. فرآیند کنترل در دو مرحله صورت می گیرد: در مرحله اول ولتاژها و جریان های باسی که STATCOM بدان متصل شده است اندازه گیری شده و با توجه به اهداف کنترلی که مدنظر است، جریان های مرجع STATCOM محاسبه می شوند (کنترل کننده داخلی). در مرحله دوم باید به طراحی کنترلی پرداخت که باعث شود جریان های واقعی STATCOM، مقادیر مرجع را دنبال کنند (کنترل کننده خارجی). روش های کنترلی متعددی وجود دارد که می توان بر مبنای آنها کنترلر طراحی کرد. در این پایان نامه این

---

۱- Pulse Width Modulation

۲- Space Vector Modulation

روش‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند : ۱- روش‌های کنترل بر مبنای مدل STATCOM و ۲- روش‌های کنترل مستقل از مدل STATCOM. در فصل چهارم روش‌های کنترل STATCOM ارائه می‌گردند.

یکی از روش‌های مدلسازی STATCOM، روش مدلسازی متوسط (Average Modeling) می‌باشد که در [۲] معرفی شده و در [۳] برای STATCOM با مدولاسیون SPWM<sup>۱</sup> در روش کنترل بکار رفته است. یکی از ورودی‌های مدل متوسط توابع سیکل وظیفه (Duty Ratio Functions) می‌باشد که در [۲] این توابع برای STATCOM با مدولاسیون SPWM استخراج شده‌اند. در این پایان‌نامه و در فصل پنجم، توابع سیکل وظیفه برای STATCOM با مدولاسیون SVM استخراج می‌شوند و در فصل ششم از این مدل متوسط STATCOM که منطبق بر روش SVM می‌باشد، برای کنترل STATCOM با مدولاسیون SVM استفاده شده است. در فصل پنجم و ششم، نتایج شبیه‌سازی در تایید روابط بدست آمده و سیستم کنترلی پیشنهاد شده بیان می‌گردد.

---

۱- Sinusoidal Pulse Width Modulation

## فصل دوم

مروری بر کنترل‌کننده‌های **FACTS** موازی