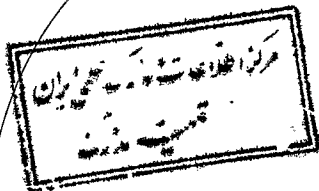


۱۳۷۸ / ۷ / ۹۲



جایابی بهینه پایدارکننده‌های مبتنی بر *FACTS*  
در سیستم‌های قدرت چندماشینه

غلامحسن ابراهیمی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
مهندسی برق - قدرت

استاد راهنما:

دکتر حیدرعلی شایانفر

3913 / ۲

بهمن‌ماه ۱۳۷۷

لا اله الا الله محمد بن عبد الله

تقديم به :

پدرم . مادرم  
و تمام خانوادهام  
که از صميم قلب دوستشان دارم .

اولین و عمومی‌ترین روش در بهبود نوسانات فرکانس پائین سیستم‌های قدرت استفاده از پایدارکننده‌های سیستم قدرت یا PSS هاست که در مورد نوسانات مربوط به مدهای بین‌ناحیه‌ای سیستم‌های بزرگ جواب خوبی نمی‌دهد و لذا نیاز به انواع دیگری از پایدارکننده‌ها در کنار PSS ها مشهود است. پیشرفت الکترونیک قدرت و امکان استفاده از امیدانس‌های متغیر در سیستم‌های قدرت ایده اصلی در توسعه پایدارکننده‌های مبتنی بر *FACTS* می‌باشد که به این منظور بکار گرفته می‌شوند. از تصمیمات اولیه در طراحی این پایدارکننده‌ها، انتخاب محل نصب و سیگنالهای کنترلی آنهاست که بسته به شرایط باری و وضعیت سیستم متفاوت خواهند بود. چون در این مرحله، پارامترها و ساختار پایدارکننده‌ها، دقیقاً مشخص نبوده و امکان تشکیل سیستم حلقه بسته وجود ندارد؛ طراحی‌ها روی سیستم حلقه باز انجام می‌گیرند و لذا تحلیل مدال می‌تواند برای این منظور بکار رود. روش معمول این تحلیل که برپایه محاسبات روی مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس حالت کامل سیستم می‌باشد، در سیستم‌های قدرت بزرگ با مشکل مواجه می‌باشد؛ چراکه محاسبات روی ماتریسهای بزرگ غالباً با دقت کافی همراه نبوده و حتی مرسومترین روشها همچون *QR* نیز جوابهای قابل اعتماد نخواهند داد. برای غلبه بر این مشکل، شکل مرتبه کاسته‌ای از تحلیل مدال بدست آمده و توسعه یافته است که ضمن داشتن دقت کافی، میزان محاسبات لازم را نیز به شکل قابل توجهی کاهش می‌دهد. این روش روی یک سیستم نمونه به منظور انتخاب بهترین محل نصب و سیگنالهای کنترلی دو نوع کاربردی پایدارکننده‌های مبتنی بر *FACTS* تشریح شده است.

## تقدیر و تشکر

پس از حمد و ثنای حضرت حق که توفیق دانش‌اندوزیم عطا فرمود، لازم می‌دانم از زحمات دکتر شایانفر که در انجام این پروژه در کنار راهنمایی‌های ارزنده‌شان با فراهم‌سازی امکانات مورد نیاز، بهبود هرچه بیشتر پروژه را باعث شدند و همچنین از اعضای هیأت داوران، دکتر پارسا مقدم و دکتر کلانتر به‌خاطر حضور در جلسه دفاعیه تشکر و قدردانی نمایم.

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	- مقدمه .....
۵	۱- پایدارکننده‌های مبتنی بر <i>FACTS</i> .....
۶	۱-۱- مقدمه .....
۷	۱-۲- <i>FACTS</i> و تعاریف آن .....
۷	۱-۲-۱- تعاریف مقدماتی .....
۸	۱-۲-۲- تعاریف پایدارکننده‌های مبتنی بر <i>FACTS</i> .....
۸	۱-۲-۲-۱- پایدارکننده‌های موازی .....
۱۰	۱-۲-۲-۲- پایدارکننده‌های سری .....
۱۱	۱-۲-۲-۳- پایدارکننده‌های مرکب .....
۱۲	۱-۳- کاربردهای فعلی پایدارکننده‌های مبتنی بر <i>FACTS</i> .....
۱۳	۱-۳-۱- جبران‌کننده‌های استاتیک توان راکتیو .....
۱۳	۱-۳-۲- خازنهای سری کنترل‌شده با تریستور .....
۱۴	۱-۴- سیگنالهای ورودی و خروجی این پایدارکننده‌ها .....

- ۱۵-۱- مقایسه میزان اثربخشی پایدارکننده در شرایط مختلف ..... ۱۵
- ۱۵-۱-۱- سیستم مورد آزمایش ..... ۱۵
- ۱۵-۱-۲- معیار مقایسه ..... ۱۶
- ۱۵-۱-۳- نتیجه مقایسه ..... ۱۷
- ۲- جایابی بهینه پایدارکننده‌های مبتنی بر *FACTS* ..... ۱۹
- ۲-۱- مقدمه ..... ۲۰
- ۲-۲- معیارهای مختلف جایابی بهینه ..... ۲۱
- ۲-۳- مقایسه معیارهای مختلف ..... ۲۲
- ۲-۴- نتیجه مقایسه ..... ۲۴
- ۳- تئوری کنترل مدال ..... ۲۵
- ۳-۱- مقدمه ..... ۲۶
- ۳-۲- تحلیل مدال ..... ۲۷
- ۳-۲-۱- ضرائب کنترل‌پذیری و رؤیت‌شوندگی ..... ۲۹
- ۳-۲-۱-۱- کاربردهای ضرائب کنترل‌پذیری و رؤیت‌شوندگی ..... ۲۹
- ۳-۳- مدل دینامیکی هفرون فیلپس ..... ۳۰
- ۳-۳-۱- تأثیر پایدارکننده‌های مبتنی بر *FACTS* روی مدل هفرون فیلپس ..... ۳۳
- ۳-۴- تحلیل مدال مرتبه‌کاسته ..... ۳۴
- ۳-۴-۱- حل معادلات چندمتغیره به روش هوک جیوز ..... ۴۰
- ۳-۴-۲- محاسبه مقادیر ویژه موردنظر سیستم ..... ۴۲

۴۳	..... نتیجه ۳-۵
۴۴	..... پیاده‌سازی الگوریتم مرتبه‌کاسته تحلیل مدال روی شبکه نمونه
۷۶	..... نتیجه‌گیری نهائی و پیشنهادات پروژه ۵-
۷۷	..... نتیجه‌گیری ۵-۱
۷۸	..... پیشنهادات ۵-۲
۷۹	..... پیوست‌ها -
۸۰	..... ضمیمه الف -
۸۳	..... ضمیمه ب -
۸۶	..... منابع و مراجع -



فهرست تصاویر

شماره	عنوان	صفحه
۱-۱	سیستم قدرت نمونه شماره یک	۱۵
۱-۲	تغییرات تأثیرمیراثی SVC و CSC نسبت به تغییر بار عبوری خط	۱۷
۲-۱	سیستم قدرت نمونه شماره دو	۲۲
۳-۱	مدل دینامیکی هفرون فیلیس سیستم قدرت n ماشینه	۳۲
۳-۲	مدل هفرون فیلیس با پایدارکننده مبتنی بر FACTS	۳۲
۳-۳	نحوه جستجو در روش هوک جیوز	۴۰
۴-۱	سیستم قدرت نمونه شماره سه	۴۵
۴-۲	تغییرات زاویه‌های روتورهای G2 و G3 نسبت به G1	۵۹
۴-۳	تغییرات زاویه روتور G2 نسبت به G1 با TCSC روی خط ۵-۷	۶۰
۴-۴	تغییرات زاویه روتور G3 نسبت به G1 با TCSC روی خط ۵-۷	۶۰
۴-۵	تغییرات زاویه روتور G2 نسبت به G1 با TCSC روی خط ۶-۹	۶۱

۶۱	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $TCSC$ روی خط ۹-۶	۴-۶
۶۲	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $TCSC$ روی خط ۹-۸	۴-۷
۶۲	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $TCSC$ روی خط ۹-۸	۴-۸
۶۳	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $TCSC$ روی خط ۹-۶	۴-۹
۶۳	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $TCSC$ روی خط ۹-۶	۴-۱۰
۶۴	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $TCSC$ روی خط ۹-۶	۴-۱۱
۶۴	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $TCSC$ روی خط ۹-۶	۴-۱۲
۶۵	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $TCSC$ روی خط ۹-۶	۴-۱۳
۶۵	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $TCSC$ روی خط ۹-۶	۴-۱۴
۶۶	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با دو $TCSC$	۴-۱۵
۶۶	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با دو $TCSC$	۴-۱۶
۶۷	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۵	۴-۱۷
۶۷	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۵	۴-۱۸
۶۸	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۶	۴-۱۹
۶۸	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۶	۴-۲۰
۶۹	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۸	۴-۲۱
۶۹	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۸	۴-۲۲
۷۰	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۶	۴-۲۳

۷۰	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۶	۴-۲۴
۷۱	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۶	۴-۲۵
۷۱	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۶	۴-۲۶
۷۲	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۶	۴-۲۷
۷۲	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $SVC$ روی شین ۶	۴-۲۸
۷۳	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $PSS$ روی $G1$	۴-۲۹
۷۳	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $PSS$ روی $G1$	۴-۳۰
۷۴	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $PSS$ روی $G2$	۴-۳۱
۷۴	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $PSS$ روی $G2$	۴-۳۲
۷۵	تغییرات زاویه روتور $G2$ نسبت به $G1$ با $PSS$ روی $G3$	۴-۳۳
۷۵	تغییرات زاویه روتور $G3$ نسبت به $G1$ با $PSS$ روی $G3$	۴-۳۴

فهرست جداول

<u>شماره</u>	<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
۲-۱	اندازه شاخص‌های مختلف در تعیین محل نصب بهینه SVC .....	۲۳
۴-۱	نتیجه پخش بار سیستم قدرت (۴-۱) .....	۴۶
۴-۲	مقادیر ویژه سیستم حلقه‌باز .....	۴۸
۴-۳	ضرائب کنترل‌پذیری و رؤیت‌شوندگی مدهای نوسانی مفروض .....	۴۹
۴-۴	ضرائب کنترل‌پذیری مدهای نوسانی از موقعیت‌های مختلف نصب TCSC ..	۵۰
۴-۵	ضرائب رؤیت‌شوندگی مدهای نوسانی سیستم از موقعیت ۶-۹ .....	۵۱
۴-۶	ضرائب رؤیت‌شوندگی مدهای نوسانی سیستم از موقعیت‌های مختلف ....	۵۲
۴-۷	ضرائب مانده مدهای نوسانی سیستم از موقعیت‌های مختلف .....	۵۲
۴-۸	مقادیر ویژه سیستم با TCSC نصب شده در موقعیت‌های مختلف .....	۵۳
۴-۹	مقادیر ویژه سیستم با TCSC نصب شده روی خط ۶-۹ .....	۵۴
۴-۱۰	مقادیر ویژه سیستم با دو TCSC روی خطوط ۵-۷ و ۸-۹ .....	۵۴
۴-۱۱	ضرائب کنترل‌پذیری مدهای نوسانی از موقعیت‌های مختلف نصب SVC ..	۵۵

۴-۱۲	ضرائب رؤیت‌شوندگی مدهای نوسانی سیستم با SVC روی شین ۶ .....	۵۵
۴-۱۳	ضرائب رؤیت‌شوندگی مدهای نوسانی سیستم از موقعیت‌های مختلف ....	۵۶
۴-۱۴	ضرائب مانده مدهای نوسانی سیستم با SVC روی شین ۶ .....	۵۶
۴-۱۵	ضرائب مانده مدهای نوسانی سیستم از موقعیت‌های مختلف .....	۵۶
۴-۱۶	مقادیر ویژه سیستم با SVC نصب شده در موقعیت‌های مختلف .....	۵۷
۴-۱۷	مقادیر ویژه سیستم با SVC نصب شده روی شین ۶ .....	۵۷
۴-۱۸	مقادیر ویژه سیستم پس از نصب PSS در موقعیت‌های مختلف .....	۵۸

## لیست علائم

بردار متغیرهای حالت	$X$
بردار ورودی‌ها	$U$
بردار خروجی‌ها	$Y$
ماتریس حالت	$A$
ماتریس ورودی	$B$
ماتریس خروجی	$C$
ماتریس مدال	$M$
مقدار ویژه $i$ ام	$\lambda_i$
بردار ویژه راست مربوط به $\lambda_i$	$V_i$
بردار ویژه چپ مربوط به $\lambda_i$	$W_i$
تغییر خطی جزئی پارامترها	$\Delta$
زاویه بار ژنراتور	$\delta$
سرعت زاویه ژنراتور	$\omega$
ولتاژ داخلی محور $d$	$E'_q$
ولتاژ تحریک	$E_{FD}$
گشتاور الکتریکی ژنراتور	$T_E$
ولتاژ ترمینال ژنراتور	$V_T$
راکتانس محور $q$	$X_Q$
راکتانس محور $d$	$X_D$
راکتانس گذرای محور $d$	$X'_D$
ضریب میرایی ژنراتور	$D$
ثابت اینرسی ژنراتور	$M=2H$
فرکانس کاری سیستم	$\omega_0$
سیگنال خروجی $pss$	$u_p$
سیگنال خروجی پایدارکننده مبتنی بر $FACTS$	$u_F$
ثابت زمانی مدارباز محور $d$	$T_D$ یا $T'_{DO}$
ثابت زمانی و گین مدار سیستم تحریک	$K_A$ و $T_A$
ضرائب هفرون فیلیپس	$K_v, K_q, K_p$ و $K_l$ تا $K_6$

مقدمه