

دانشکده فنی  
گروه مهندسی برق  
گرایش قدرت

بهبود پایداری گذرای سیستم‌های قدرت با استفاده از کنترل غیرخطی TCSC و  
شبکه‌های عصبی

از:  
میلاد آصفی یزدی

استاد راهنما:  
دکتر علی کرمی

بهمن ماه ۱۳۹۲

تقدیم به

سر سلسله همی تداعی های بهاری خزان عمر رفته

مهربان مادرم

و به آنانی که رفتند تا انسانیت بماند...



## تقدیر و تشکر:

آنچه که دوام خاطرات گذشته را بر جریده پر ازدحام روزهای رفته‌ی عالم ماندگار می‌کند، همراهی و همدلی کسانی است که در کشاکش روزهای رفته، رفیق شاطر بوده‌اند و یار غار و نیکوداشت این عزیزان و سپاسگزاری از آن‌ها به خامه و زبان نه تنها حلاوت این ماندگاری را دو چندان می‌کند که مَهریست بر این باور که «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق».

بدین وسیله مراتب قدردانی و تشکر را از کسانی که در دوران تحصیل راهنما و یاری‌گر من بوده‌اند ابراز می‌کنم، باشد این برگه سبز تحفه‌ی درویش، نمی‌ازیمی باشد در جواب زحمت‌های بی‌دریغ این عزیزان.

سپاسی ویژه دارم از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر علی کرمی که راهنمایی‌ها و گره‌گشایی‌های حکیمانان در این پروژه به مثابه فانوسی درخشان بود در ظلمات راه.

و در پایان از همه دوستان عزیزم که در اثنای کار از هیچ کوششی دریغ نرزدند و یاران موافق بودند، تشکر و قدردانی می‌کنم و دست یکایکشان را به گرمی می‌فشارم و امیدوارم در تمامی مراحل زندگی‌شان موفق و موید باشند.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست شکل‌ها.....	خ
چکیده فارسی.....	ر
چکیده انگلیسی.....	ز
<b>فصل اول: مقدمه</b>	
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- هدف و ساختار پایان‌نامه.....	۴
<b>فصل دوم: پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت</b>	
۱-۲- مقدمه.....	۶
۲-۲- پایداری در سیستم‌های قدرت.....	۶
۳-۲- معادلات نوسان.....	۱۰
۴-۲- مدل ریاضی سیستم‌های قدرت.....	۱۳
۱-۴-۲- محاسبه ماتریس ادمیتانس داخلی سیستم.....	۱۳
۲-۴-۲- اعمال خطا در سیستم.....	۲۰
۵-۲- اجرای برنامه بررسی پایداری گذرا در سیستم‌های چندماشینه.....	۲۲
۶-۲- نتیجه‌گیری.....	۲۳
<b>فصل سوم: خازن سری کنترل‌شده با تریستور (TCSC)</b>	
۱-۳- مقدمه.....	۲۵
۲-۳- معرفی TCSC.....	۲۶
۳-۳- محاسبه جریان تریستور.....	۲۷
۴-۳- محاسبه ولتاژ خازن.....	۳۰
۵-۳- امپدانس فرکانس پایه (اساسی) TCSC.....	۳۱
۶-۳- نتیجه‌گیری.....	۳۳

فصل چهارم: خطی سازی فیدبک مستقیم (DFL) و اعمال آن به سیستم های قدرت

۳۵	۱-۱-۴- مقدمه.....
۳۵	۲-۴- ابزار ریاضیات.....
۳۷	۱-۲-۴- دفیومورفیزم و انتقال حالت.....
۳۹	۳-۴- خطی سازی ورودی-حالت سیستم های SISO.....
۳۹	۱-۳-۴- شرایط لازم برای خطی سازی ورودی-حالت سیستم های SISO.....
۴۰	۲-۳-۴- طراحی کنترل کننده بر اساس خطی سازی ورودی-حالت.....
۴۲	۳-۳-۴- الگوریتم خطی سازی ورودی - حالت سیستم های SISO.....
۴۲	۴-۴- خطی سازی ورودی - خروجی سیستم های SISO.....
۴۳	۱-۴-۴- به دست آوردن رابطه ورودی - خروجی خطی.....
۴۳	۱-۱-۴-۴- حالتی که درجه نسبی سیستم معین است.....
۴۴	۲-۱-۴-۴- حالتی که درجه نسبی سیستم نامعین است.....
۴۴	۲-۴-۴- فرم های نرمال.....
۴۵	۳-۴-۴- الگوریتم خطی سازی ورودی - خروجی سیستم های SISO.....
۴۶	۵-۴- خطی سازی ورودی- خروجی سیستم های MIMO.....
۴۸	۱-۵-۴- فرم های نرمال در حالت MIMO.....
۴۹	۶-۴- اعمال روش DFL به یک سیستم قدرت شامل TCSC (بدون در نظر گرفتن تحریک).....
۴۹	۱-۶-۴- مدل سیون توان توسط TCSC.....
۵۰	۲-۶-۴- مدل سیستم.....
۵۱	۳-۶-۴- خطی سازی ورودی - خروجی.....
۵۳	۷-۴- اعمال روش DFL به یک سیستم قدرت شامل TCSC (با در نظر گرفتن تحریک).....
۵۷	۸-۴- حل تحلیلی معادلات حالت پس از رفع خطا.....
۵۷	۱-۸-۴- سیستم درجه دوم.....
۶۰	۲-۸-۴- سیستم درجه سوم.....
۶۱	۱-۲-۸-۴- محاسبه مقادیر ویژه.....
۶۳	۲-۲-۸-۴- محاسبه $A_1$ و $A_2$ و $A_3$ .....

۶۴ ..... ۹-۴- نتیجه گیری

### فصل پنجم: معادل دوماشینه سیستم های قدرت

۶۶ ..... ۱-۵- مقدمه

۶۶ ..... ۲-۵- مدار معادل دوماشینه سیستم قدرت

۶۸ ..... ۳-۵- محاسبه پارامترهای مدار معادل

۶۸ ..... ۱-۳-۵- محاسبه  $|E_j|$ ،  $\delta_j$  و  $x_e$

۶۹ ..... ۲-۳-۵- محاسبه  $M_j$  و  $D_j$

۷۰ ..... ۴-۵- تخمین حداقل مربعات

۷۱ ..... ۱-۴-۵- حل LSE

۷۲ ..... ۲-۴-۵- تخمین حداقل مربعات بازگشتی (RLSE)

۷۴ ..... ۳-۴-۵- تخمین حداقل مربعات بازگشتی با فاکتور فراموشی متغیر

۷۵ ..... ۱-۳-۴-۵- الگوریتم RLS با فاکتور فراموشی متغیر

۷۶ ..... ۵-۵- نتایج شبیه سازی

۷۹ ..... ۶-۵- نتیجه گیری

### فصل ششم: تخمین مقدار مناسب بهره TCSC با استفاده از شبکه های عصبی

۸۱ ..... ۱-۶- مقدمه

۸۱ ..... ۲-۶- مروری کوتاه بر شبکه های عصبی مصنوعی

۸۲ ..... ۱-۲-۶- شبکه های عصبی چندلایه

۸۳ ..... ۲-۲-۶- الگوریتم پس انتشار خطا (BP)

۸۶ ..... ۳-۶- استفاده از شبکه های عصبی در تخمین ضریب بهره TCSC

۸۶ ..... ۱-۳-۶- به دست آوردن الگوهای آموزشی شبکه عصبی

۸۹ ..... ۲-۳-۶- نتایج شبیه سازی شبکه عصبی آموزش دیده

۹۲ ..... ۴-۶- نتیجه گیری

### فصل هفتم: نتایج شبیه سازی ها

۹۴ ..... ۱-۷- مقدمه

۲-۷- سیستم درجه ۲..... ۹۴

۳-۷- سیستم درجه ۳..... ۹۶

### فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۱-۸- نتیجه گیری..... ۱۰۰

۲-۸- پیشنهادها..... ۱۰۰

فهرست مراجع..... ۱۰۳



## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲) قیاس مکانیکی پایداری گذرای سیستم قدرت.....	۷
شکل (۲-۲) نمایش شماتیکی یک سیستم قدرت چندماشینه.....	۱۳
شکل (۳-۲) نمایش سیستم قدرت با مدل ژنراتورهای سنکرون.....	۱۵
شکل (۴-۲) نمایش سیستم قدرت کاهش یافته.....	۱۸
شکل (۵-۲) دیاگرام تک‌خطی سیستم ۳۹ شینه IEEE.....	۲۲
شکل (۶-۲) زوایای رتور.....	۲۳
شکل (۱-۳) ساختمان فیزیکی یک فاز از TCSC استفاده شده در پست اسلات.....	۲۶
شکل (۲-۳) مدار معادل TCSC.....	۲۶
شکل (۳-۳) مدل الکتریکی معادل TCSC.....	۲۷
شکل (۴-۳) پالس نامتقارن جریان تریستور TCSC.....	۲۸
شکل (۵-۳) شکل موج ولتاژ و جریان سلف.....	۳۱
شکل (۶-۳) شکل موج ولتاژ و جریان در خازن.....	۳۱
شکل (۷-۳) راکتانس معادل در فرکانس پایه TCSC نصب شده در پست کایتا.....	۳۳
شکل (۱-۴) خطی‌سازی ورودی حالت.....	۴۱
شکل (۲-۴) سیستم معادل دوماشینه.....	۴۹
شکل (۳-۴) منحنی توان اکتیو- زاویه.....	۵۰
شکل (۱-۵) نمایش شماتیکی سیستم قدرت چند ماشینه کاهش یافته به شین‌های ژنراتوری.....	۶۷
شکل (۲-۵) معادل دو ماشینه سیستم قدرت از دید شین داخلی ژنراتور $\Delta$ م.....	۶۷
شکل (۳-۵) معادل دو ماشینه سیستم قدرت از دید ترمینال ژنراتور $\Delta$ م.....	۶۷
شکل (۴-۵) سیستم معادل تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت.....	۶۸
شکل (۵-۵) دیاگرام تک‌خطی سیستم قدرت ۹ شینه IEEE.....	۷۶
شکل (۶-۵) زاویه رتور ژنراتور مرجع.....	۷۷
شکل (۷-۵) اندازه ولتاژ ترمینال ژنراتور مرجع.....	۷۷

- شکل (۸-۵) زاویه ولتاژ ترمینال ژنراتور مرجع ..... ۷۷
- شکل (۹-۵) راکتانس معادل  $X_e$  ..... ۷۷
- شکل (۱۰-۵) اندازه ولتاژ ژنراتور معادل ..... ۷۷
- شکل (۱۱-۵) زاویه ولتاژ ژنراتور معادل ..... ۷۷
- شکل (۱۲-۵) توان اکتیو ..... ۷۸
- شکل (۱۳-۵) توان راکتیو ..... ۷۸
- شکل (۱۴-۵) ثابت اینرسی سیستم معادل ..... ۷۸
- شکل (۱۵-۵) زوایای نسبی ..... ۷۸
- شکل (۱۶-۵) فاکتور فراموشی متغیر ..... ۷۸
- شکل (۱۷-۵) ثابت میرایی سیستم معادل ..... ۷۸
- شکل (۱۸-۵) زاویه نسبی رتور ..... ۷۹
- شکل (۱۹-۵) سرعت زاویه‌ای رتور ..... ۷۹
- شکل (۲۰-۵) توان اکتیو ..... ۷۹
- شکل (۲۱-۵) توان راکتیو ..... ۷۹
- شکل (۱-۶) ساختار یک شبکه عصبی مصنوعی چندلایه (دولایه) ..... ۸۴
- شکل (۲-۶) سیستم معادل SMIB سیستم ۹ شینه IEEE شامل TCSC ..... ۸۸
- شکل (۳-۶) شبکه عصبی پیشنهادی ..... ۸۹
- شکل (۴-۶) منحنی یادگیری شبکه عصبی با ۲ ورودی و  $MSE=0.001$  ..... ۹۰
- شکل (۵-۶) خطای نسبی بین مقدار واقعی و مقدار تخمینی  $k_2$  برای تمامی الگوهای تست ..... ۹۰
- شکل (۶-۶) خطای نسبی بین مقدار واقعی و مقدار تخمینی  $k_2$  برای ۱۰۰ الگوی اول تست ..... ۹۱
- شکل (۷-۶) مقایسه بین مقدار واقعی و مقدار تخمینی  $k_2$  برای ۵۰ الگوی اول تست ..... ۹۱
- شکل (۱-۷) زاویه رتور ژنراتور ..... ۹۴
- شکل (۲-۷) سرعت زاویه‌ای رتور ژنراتور ..... ۹۴
- شکل (۳-۷) توان الکتریکی بدون در نظر گرفتن TCSC ..... ۹۴
- شکل (۴-۷) توان الکتریکی به سبب حضور TCSC ..... ۹۴
- شکل (۵-۷) توان الکتریکی معادل سیستم ..... ۹۵

- شکل (۶-۷) راکتانس معادل TCSC ..... ۹۵
- شکل (۷-۷) توان الکتریکی سیستم با کنترل Bang-Bang ..... ۹۶
- شکل (۸-۷) زاویه رتور ژنراتور ..... ۹۷
- شکل (۹-۷) سرعت زاویه‌ای رتور ژنراتور ..... ۹۷
- شکل (۱۰-۷) توان الکتریکی بدون در نظر گرفتن TCSC ..... ۹۷
- شکل (۱۱-۷) توان الکتریکی به سبب حضور TCSC ..... ۹۷
- شکل (۱۲-۷) توان الکتریکی معادل سیستم ..... ۹۷
- شکل (۱۳-۷) راکتانس معادل TCSC ..... ۹۷
- شکل (۱۴-۷) ولتاژ داخلی ژنراتور ..... ۹۸
- شکل (۱۵-۷) ولتاژ تحریک ژنراتور ..... ۹۸

## بهبود پایداری گذرای سیستم‌های قدرت با استفاده از کنترل غیرخطی TCSC و شبکه‌های عصبی

میلاذ آصفی یزدی

نیاز روز افزون به انرژی الکتریکی و همچنین مشکلات اقتصادی و زیست محیطی موجب شده است که سیستم‌های قدرت امروزی تحت شرایط پرفشار و نزدیک به حدود پایداری خود مورد بهره‌برداری قرار بگیرند. در واقع این امر باعث شده است سیستم‌های قدرت مدرن بسیار آسیب‌پذیر باشند. می‌توان نشان داد، با افزایش میزان توان قابل انتقال در خطوط انتقال انرژی، پایداری گذرای سیستم‌های قدرت بهبود می‌یابد. برای تحقق این هدف، عناصر FACTS و به خصوص انواع سری آن راه حل مناسبی به‌نظر می‌رسند. در این پایان‌نامه از خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC) که امروزه مورد توجه خاصی است، برای بهبود پایداری گذرای سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود. در استفاده از TCSC برای بهبود پایداری گذرای سیستم‌های قدرت لازم است راکتانس این عنصر FACTS متناسب با تغییر رفتار سیستم در طی شرایط گذرا، تغییر نماید. در این پایان‌نامه از یک روش کنترل غیرخطی به نام خطی‌سازی فیدبک مستقیم (DFL) برای کنترل و تغییر راکتانس TCSC طوری استفاده می‌شود که نوسانات ایجاد شده در اثر وقوع یک خطا، هرچه سریع‌تر میرا شوند. از طرفی برای اعمال روش DFL در سیستم‌های قدرت معمولاً از مدل تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت (SMIB) برای سیستم استفاده می‌شود. ولی در عمل، اغلب سیستم‌ها چندماشینه هستند و استفاده مستقیم از روش DFL در سیستم‌های قدرت چندماشینه کار دشواری است. بنابراین برای غلبه بر این مشکل، در این پایان‌نامه ابتدا با اجرای یک روش دو مرحله‌ای، مدار معادل SMIB یک سیستم قدرت چندماشینه به‌دست می‌آید و سپس روش DFL به مدار معادل SMIB به‌دست آمده، اعمال می‌شود. در مرحله اول از روش مذکور؛ دامنه ولتاژ داخلی، زاویه ولتاژ داخلی و راکتانس بقیه سیستم متصل به یک ژنراتور خاص، محاسبه می‌شوند و در مرحله دوم نیز ثابت میرایی و ثابت اینرسی این ژنراتور معادل با استفاده از یک روش مبتنی بر حداقل مربعات خطای بازگشتی (RLSE) تخمین زده می‌شوند. سپس سیستم دوماشینه حاصل به یک سیستم SMIB تبدیل می‌شود. همچنین برای تخمین بهنگام ضرایب بهره (گین) کنترل‌کننده DFL طرح شده، از یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) استفاده می‌شود. روش طرح شده بر روی یک سیستم تست چندماشینه با موفقیت پیاده‌سازی می‌شود و نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. همچنین مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست آمده از کنترل‌کننده پیشنهادی (DFL) با روش کنترل Bang-Bang صورت می‌گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** پایداری گذرا، خازن سری کنترل شده با تریستور، خطی‌سازی فیدبک مستقیم، مدل تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت، شبکه عصبی

## Abstract

### **Power System Transient Stability Enhancement using a Nonlinear TCSC Controller and Neural Networks**

**Milad Assefi yazdi**

The growing need toward electrical power along with the economic and environmental issues have brought about the nowadays power systems to be under high Stressed Conditions and also be exploited close to their stability limits. This has led to high vulnerability of power systems. The transient stability of power systems would be enhanced through proliferating the transmitting power within the power transmission lines. In order to obtain this, FACTS in particular series types seem to be suitable solutions. In this thesis thyristor controlled series capacitor (TCSC), which nowadays have received much attention, have been applied to enhance transient stability. While applying TCSC to enhance the transient stability of power systems, it is crucial to adapt the reactance of the TCSC in compatible with the transient conditions. A nonlinear control method have been applied in this thesis known as direct feedback linearization (DFL) to control and change the reactance of the TCSC in a way that the fluctuations caused by the faults would disappear immediately. To apply the DFL method in power systems, the Single-machine infinite bus is usually adopted. In spite of the fact that applying the DFL method in multi-machine power systems is of intricate nature, in practice, the systems are often multi-machine ones. To overcome this problem in this thesis, initially a two-step procedure is followed to obtain the SMIB equivalent circuit of a multi-machine power system, and the DFL method is applied to this equivalent circuit. In the first step of the mentioned method, internal voltage amplitude, internal voltage angle, and the reactance of the rest of the system\_ which is connected to a certain generator\_ are calculated. In the second step, the equivalent generator's damping and inertia coefficients are estimated using the Recursive Least Square Error method. Then, the identified two-machine system is transformed into a SMIB system. For the online estimation of gains coefficients, of the employed DFL controller, a multi-layer perceptron neural network is used. The devised method is successfully employed on a multi-machine test system and the results of the run simulations are analyzed. A comparison is also made between the results gained by the proposed DFL controller and the Bang-Bang control method.

**Key words:** Transient stability, Thyristor controlled series capacitor, Direct feedback linearization, Single-machine infinite bus model, Neural network



# فصل اول

مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

با توجه به گسترش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی در جوامع بشری و به تبع آن نیاز به تولید بیشتر این نوع انرژی، نیروگاه‌های تولید برق بسیار توسعه یافتند. از طرفی برای رعایت مسایل زیست‌محیطی این نیروگاه‌ها باید دورتر از شهرها ساخته می‌شدند که این مساله موجب احداث خطوط انتقال طولانی و پرهزینه برای رساندن انرژی الکتریکی به مراکز مصرف انرژی گردید. از این رو مطالعات بر روی کاهش هزینه احداث خطوط آغاز گردید و استفاده از جبران‌سازی سری خازنی در خطوط انتقال به عنوان یکی از راه‌های موثر برای غلبه بر این مشکل مطرح شد. این خازن‌های سری از طریق کاهش راکتانس موثر خط، توان انتقالی عبوری از آن را به نحو چشمگیری افزایش داده و جایگزین مناسبی برای احداث خطوط انتقال جدید و پرهزینه (و دارای مشکلات احداث فراوان نظیر مسیر احداث، حق راه و ...) بودند. از طرفی میزان انتقال توان توسط یک سیستم قدرت وابسته به پایداری زاویه رتور، دامنه ولتاژ، حد حرارتی، پایداری گذرا و پایداری دینامیکی است. این قیود در عمل ماکزیمم توان قابل انتقال توسط یک سیستم را مشخص می‌نمایند.

با توجه به ظهور ادوات FACTS<sup>۱</sup> در دهه‌های آخر قرن بیستم و رشد روز افزون کاربرد آن‌ها، مطالعات گسترده‌ای به سمت این تجهیزات معطوف شد. یکی از پرکاربردترین این ادوات، TCSC<sup>۲</sup> (خازن سری کنترل شده توسط تریستور) می‌باشد که در حقیقت خازنی سری است که به وسیله کلیدزنی تریستورهایی که ظرفیت راکتانس سلفی موازی با آن را تغییر می‌دهند به یک خازن سری هوشمند (البته به شرط اعمال روش‌های کنترل مناسب) با راکتانس متغیر تبدیل می‌شود. این عنصر معمولاً برای بهبود پایداری گذرا و در عین حال رفع مشکلات ناشی از به‌کارگیری خازن سری ثابت بکار می‌رود و در بهبود مشخصات دینامیکی سیستم قدرت و نیز تخفیف و حتی جلوگیری از وقوع پدیده تشدید زیرسنکرون<sup>۳</sup> (SSR) نیز می‌تواند نقش بسزایی داشته باشد.

تاکنون روش‌های مختلفی برای کنترل راکتانس TCSC پیشنهاد شده است، مانند روش کنترل Bang-Bang، روش‌های مبتنی بر خطی‌سازی حول نقطه کار، روش تابع انرژی و غیره [۷و۶]. ولی از آنجاییکه سیستم‌های قدرت دارای ماهیت غیرخطی هستند، در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به روش‌های مبتنی بر کنترل غیرخطی سیستم صورت گرفته است [۴]. در این پایان‌نامه از یک

1 Flexibe AC Transmission System

2 Thyristor Controlled Series Capacitor

3 Sub-Synchronous Resonance (SSR)

روش کنترل غیرخطی به نام «خطی‌سازی فیدبک مستقیم»<sup>۱</sup> یا به اختصار DFL برای کنترل راکتانس TCSC استفاده می‌شود. روش DFL پایداری یک سیستم غیرخطی را به صورت کلی<sup>۲</sup> و بدون خطی‌کردن معادلات حاکم بر سیستم حول یک نقطه کار خاص، مورد بررسی قرار می‌دهد و بنابراین دارای محدودیت‌های روش‌های خطی‌سازی مرسوم نمی‌باشد. در واقع با استفاده از روش کنترل DFL بررسی پایداری یک سیستم غیرخطی پیچیده به بررسی پایداری یک سیستم ساده خطی‌سازی شده تبدیل می‌شود که در آن می‌توان از قوانین کنترل خطی استفاده کرد. اساس روش DFL آن است که با فیدبک گرفتن از حالت‌های سیستم و اعمال یک تغییر متغیر، عوامل غیرخطی بودن سیستم در هر لحظه خنثی می‌شود. سپس با استفاده از قانون کنترل فیدبک حالت می‌توان قطب‌های سیستم خطی‌سازی شده را به مکان‌های مطلوب انتقال داد و سیستم را پایدار نمود [۹ و ۸]. در این پایان‌نامه برای انتخاب بهنگام بهره‌های کنترل‌کننده پیشنهادی از یک شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است.

در سال‌های اخیر مطالعات گوناگونی در زمینه کاربرد شبکه‌های عصبی برای حل مسائل مربوط به سیستم‌های قدرت صورت گرفته است. این شبکه‌ها به صورت موفقیت آمیزی در محاسبات پایداری گذرا، پیش‌بینی کوتاه مدت بار<sup>۳</sup>، مدل‌سازی ماشین‌های سنکرون و مسائل گوناگون دیگر به کار گرفته شده‌اند [۱۱ و ۱۲]. این شبکه‌ها می‌توانند در حالت نابهنگام<sup>۴</sup> آموزش داده شوند تا بتوانند نگاشت‌های<sup>۵</sup> بسیار پیچیده و غیرخطی را یاد بگیرند. اما پس از آموزش، شبکه‌های عصبی قادر خواهند بود تقریباً به طور آنی نگاشت‌هایی مشابه را انجام دهند.

از طرفی برای اعمال روش DFL در سیستم‌های قدرت معمولاً از مدل تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت<sup>۶</sup> (SMIB) برای سیستم استفاده می‌شود. ولی در عمل اغلب سیستم‌ها چندماشینه هستند و سیستم SMIB وجود خارجی ندارد. بنابراین برای غلبه بر این مشکل در این پایان‌نامه روشی برای معادل‌سازی سیستم قدرت و به دست آوردن سیستم معادل SMIB یک سیستم قدرت چندماشینه پیشنهاد می‌شود. در این روش سیستم قدرت به دو ناحیه داخلی و خارجی تقسیم می‌شود و ناحیه خارجی با استفاده از یک ماشین سنکرون بزرگ و یک راکتانس سری مدل می‌شود. این معادل‌سازی اولین بار و در سال ۱۹۷۹ در مقاله‌ای مطرح گردید

---

1 Direct Feedback Linearization

2 Global

3 Short Term Load Forecasting

4 Off-Line

5 Mapping

6 Single-Machine Infinite Bus



که در آن برای محاسبه پارامترهای ماشین معادل سیستم خارجی از تحلیل‌های دینامیکی استفاده شده و با به‌کارگیری دیگرام هفرون-فیلیپس به محاسبه پارامترهای سیستم معادل پرداخته است [۳۱]. در سال ۱۹۹۳ و در مقاله دیگری از همین سیستم معادل استفاده شده است با این تفاوت که پارامترهای ماشین معادل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در خطوط انتقال محاسبه شده است [۲۹]. عیب این روش آن است که این داده‌ها همیشه و به‌سرعت در دسترس نیست. در این پایان‌نامه ابتدا با اعمال یک خطا در ناحیه داخلی و با کمک یک برنامه بررسی پایداری گذرای چندماشینه مرسوم، معادلات حاکم بر سیستم به روش عددی حل می‌شوند و اطلاعات مورد نیاز ثبت می‌شوند. سپس با فرض اینکه بتوان سیستم خارجی را با یک ژنراتور سنکرون با دامنه و زاویه ولتاژ و همچنین راکتانس داخلی، ثابت میرایی و ثابت اینرسی مشخصی مدل‌سازی نمود، مقادیر پارامترهای محاسبه شده از سیستم چندماشینه، با پارامترهای مربوط به یک سیستم دوماشینه با هم تطبیق داده می‌شوند و با استفاده از یک روش دو مرحله‌ای، پارامترهای سیستم SMIB محاسبه می‌شود. روش طرح شده با موفقیت بر روی سیستم ۹ شینه IEEE اجرا شده و مدار معادل SMIB آن به دست می‌آید.

پس از محاسبه سیستم معادل SMIB و افزودن TCSC به آن، برای بررسی کارایی کنترل‌کننده غیرخطی پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی‌ها بررسی می‌شوند.

## ۲-۱- هدف و ساختار پایان‌نامه

هدف از این پایان‌نامه ارائه روشی برای بهبود پایداری گذرای سیستم‌های قدرت با استفاده از کنترل پارامترهای TCSC است. برای این منظور در ادامه و در فصل دوم تعاریف مربوط به پایداری گذرای سیستم‌های قدرت و محاسبات مورد نیاز ارائه می‌شود. سپس در فصل سوم، ادوات FACTS و به ویژه TCSC بطور خلاصه معرفی می‌شوند. روش کنترلی DFL و استفاده از آن در سیستم‌های قدرت در فصل چهارم مطرح می‌گردد. در فصل پنجم، روش پیشنهادی برای معادل‌سازی سیستم‌های قدرت مطرح می‌شود. در فصل ششم، شبکه‌های عصبی مصنوعی معرفی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در فصل هفتم ارائه می‌شود. در انتها و در فصل هشتم، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای ادامه کار مطرح خواهد شد.



## فصل دوم

پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی رفتار یک سیستم قدرت پس از بروز یک اغتشاش بزرگ مانند یک خطا<sup>۱</sup> در سیستم می‌پردازیم. بروز یک خطا موجب می‌شود تعادل بین توان مکانیکی ورودی به ژنراتورها و توان الکتریکی خروجی آن‌ها به هم خورده و برخی از ژنراتورها شتاب بگیرند در حالیکه برخی دیگر کند شوند. در نتیجه زاویه رتور ژنراتورها دستخوش تغییرات شدید شده و ممکن است در طی این فرآیند همزمانی<sup>۲</sup> سیستم از دست برود. در بخش (۲-۲) مسئله پایداری در سیستم‌های قدرت با بیان تعریف ریاضی تشریح می‌شود. در بخش (۳-۲) معادلات نوسان ژنراتورها<sup>۳</sup> به دست می‌آیند. در بخش (۴-۲) مدل ریاضی سیستم‌های قدرت جهت بررسی پایداری گذرا ارائه شده و سپس مدل کاهش یافته سیستم به دست می‌آید. در این بخش چگونگی شبیه‌سازی خطا در سیستم‌های قدرت هم تشریح خواهد شد. در بخش (۵-۲) الگوریتم ارائه شده بر روی یک سیستم قدرت نمونه پیاده سازی می‌شود. سرانجام در بخش (۶-۲) از مباحث مطرح شده، نتیجه‌گیری می‌شود.

## ۲-۲- پایداری در سیستم‌های قدرت

پایداری یک سیستم قدرت یک ویژگی از سیستم است که تضمین می‌نماید سیستم تحت شرایط کاری نرمال و غیرنرمال در نقطه تعادل<sup>۴</sup> خود باقی می‌ماند. پایداری سیستم‌های قدرت به دو نوع پایداری مانا<sup>۵</sup> و یا دینامیک<sup>۶</sup> و پایداری گذرا تقسیم‌بندی می‌شود. اغتشاش‌هایی که موجب تغییر نقطه کار حالت مانای یک سیستم قدرت می‌شوند ممکن است کوچک و تدریجی بوده (مانند تغییر کنترل‌شده توان‌های ورودی و خروجی ژنراتورها) و یا بزرگ و ناگهانی (مانند بروز یک خطا در سیستم) باشند. فرض کنید که یک سیستم قدرت در یک نقطه کار خاص و در حالت مانا در حال کار باشد. اگر برای تغییرات کوچکی در شرایط سیستم، وقتی که زمان به سمت بی‌نهایت میل می‌کند ( $t \rightarrow \infty$ )، حالت‌های سیستم به مقادیر مانا برگردند، در اینصورت نقطه کار فوق پایدار مانا است [۱۳].

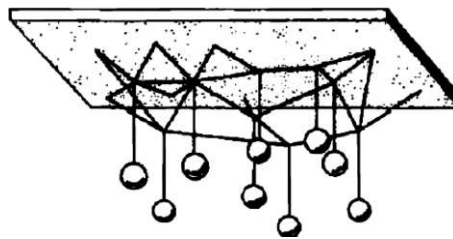
اما همان‌طوری که قبلاً اشاره شد، پایداری گذرای سیستم‌های قدرت مربوط می‌شود به توانایی سیستم در حفظ همزمانی در هنگام بروز یک اغتشاش بزرگ در سیستم. برای یک سیستم تک‌ماشینه پایداری گذرا می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

---

1 Fault  
 2 Synchronism  
 3 Swing Equation  
 4 Equilibrium  
 5 Steady State Stability  
 6 Dynamic

«اگر به یک ماشین سنکرون که در حالت تعادل مانا قرار دارد خطای بزرگی اعمال شود که موجب شود ماشین نوسان نموده و زاویه رتور آن از چهارچوب مرجع سنکرون منحرف گردد، در اینصورت این ماشین از نظر گذرا پایدار گفته می‌شود، هرگاه زاویه رتور آن سرانجام به یک مکان تعادل پایدار<sup>۱</sup> دست پیدا کند». پایداری گذرا برای یک سیستم قدرت چندماشینه به صورت زیر تعریف می‌شود: «اگر هر کدام از ماشین‌های موجود در یک سیستم قدرت چندماشینه در حالت مانا در حال کار باشند و سپس اغتشاشی در سیستم اتفاق افتد، در اینصورت سیستم از نظر گذرا پایدار است اگر هر کدام از ماشین‌ها نوسان نموده و پس از نوسان سرانجام به یک نقطه تعادل پایدار<sup>۲</sup> (SEP) نشست<sup>۳</sup> نماید [۱۳].

الگرد<sup>۴</sup> مقایسه جالبی بین مسئله پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت و پایداری یک سیستم مکانیکی صورت داده است [۱۴]. همان‌گونه که در شکل (۱-۲) مشاهده می‌شود، تعدادی جرم که نشان‌دهنده ماشین‌های سنکرون موجود در یک سیستم قدرت هستند به کمک شبکه‌ای شامل رشته‌های کشسانی که به منزله خطوط انتقالی انرژی هستند، به هم متصل شده‌اند (متناظر با حالتی که هر خط انتقال در کمتر از حد پایداری ایستای خود در حال بهره برداری است).



شکل (۱-۲) قیاس مکانیکی پایداری گذرای سیستم قدرت

حال فرض کنید که یکی از رشته‌های فوق بطور ناگهانی بریده شود (متناظر با خروج ناگهانی یک خط انتقال انرژی از سیستم)، این امر منجر به بروز نوسانات گذرای بین جرم‌های مختلف خواهد شد و در ضمن نیروهای کششی نگه دارنده جرم‌ها نیز دچار تغییر خواهند شد. در اینصورت سیستم سرانجام به یک نقطه کار جدید شامل مجموعه جدیدی از نیروهای وارد بر رشته‌ها می‌رسد و یا اینکه رشته و یا رشته‌های دیگری پاره شده و در نتیجه شبکه باز هم ضعیف‌تر می‌شود، که این امر سرانجام می‌تواند به فروپاشی سیستم بیانجامد. یعنی برای یک اغتشاش وارد شده به سیستم، سیستم از نظر گذرا یا پایدار باقی می‌ماند و یا ناپایدار می‌شود.

1 Stable Equilibrium Position  
2 Stable Equilibrium Point (SEP)  
3 Settle Down  
4 Elgerd