



## دانشگاه زنجان

دانشکده مهندسی  
گروه برق

پایان نامه کارشناسی  
گرایش قدرت

عنوان:

بررسی و پیاده سازی روش های عددی حل معادله نوسان ماشین سنکرون

استاد راهنما:

آقای دکتر عباس ربیعی

نگارش:

فرهاد نوروزی

بهار ۱۳۹۵

## فهرست مطالب

مقدمه ..... ۱

### فصل اول: آشنایی با سیستم های قدرت و مسئله پایداری

- ۱-۱- معرفی یک سیستم قدرت ..... ۲
- ۱-۲- دینامیک سیستم های قدرت و پایداری ..... ۲
- ۳- ضرورت مطالعه دینامیکی و پایداری سیستمهای قدرت ..... ۳
- ۴- پایداری و تعریف آن در سیستم های قدرت ..... ۳
- ۱-۴-۱- انواع پایداری در سیستم های قدرت ..... ۴
- ۱-۴-۲- پدیده پایداری گذرا ..... ۵
- ۳-۴-۳- پایداری زاویه بار ..... ۶

### فصل دوم: روش های عددی حل معادله دیفرانسیل

- ۱-۲- روش اویلر ..... ۱۰
- ۲-۲- روش اویلر اصلاح شده ..... ۱۱
- ۳-۲- روش رانگ کوتا ..... ۱۱
- ۴-۲- روش مایلن ..... ۱۲
- ۵-۲- روش آدامز بشفورث ..... ۱۳
- ۶-۲- روش آدامز بشفورث مولتن ..... ۱۳

### فصل سوم: طرح و بررسی مسئله ای درباره معادله نوسان ماشین سنکرون

- ۱-۳- طرح مسئله ..... ۱۵
- ۲-۲- حل مسئله ..... ۱۵
- فصل چهارم : برنامه نوشته شده برای حل معادله نوسان و نتایج آن
- ۱-۴- روش اویلر ..... ۱۸

۱۸	۴-۱-۱- کد برنامه
۱۸	۴-۱-۲- پاسخ برنامه
۲۰	۴-۲- روش مایلن سیمپسون
۲۰	۴-۲-۱- کد برنامه
۲۰	۴-۲-۲- پاسخ برنامه
۲۴	۴-۳- روش اویلر اصلاح شده
۲۴	۴-۳-۱- کد برنامه
۲۵	۴-۳-۲- پاسخ برنامه
۲۷	۴-۴- روش آدامز بشفورث
۲۷	۴-۴-۱- کد برنامه
۲۷	۴-۴-۲- پاسخ برنامه
۳۰	۴-۵- روش آدامز بشفورث مولتن
۳۰	۴-۵-۱- کد برنامه
۳۰	۴-۵-۲- پاسخ برنامه
۳۲	۴-۶- روش آدامز بشفورث مولتن
۳۲	۴-۶-۱- کد برنامه
۳۲	۴-۶-۲- پاسخ برنامه
<b>فصل پنجم : مقایسه روش های حل معادله نوسان و نتیجه گیری</b>	
۳۷	۵-۱- پاسخ برنامه برای تغییرات تعداد سیکل های خطا در شبکه
۴۱	۵-۲- پاسخ برنامه به ازای تغییرات ثابت اینرسی و ضریب میرایی
۴۳	۵-۳- نتیجه گیری
۴۴	<b>منابع</b>

## مقدمه :

مجموعه ای از مراکز تولید توان و انرژی الکتریکی (نیروگاه‌ها) که از طریق شبکه‌های انتقال و توزیع به همراه کلیه تجهیزات و ادوات حفاظتی و کنترلی موجود در آن، به مراکز مصرف انرژی در سطوح ولتاژی مختلف متصل می‌گردند یک سیستم قدرت را تشکیل می‌دهند.

برای یک شبکه در حالت عادی می‌توان ولتاژها و جریان‌ها را حساب کرد. اما وقتی بار جدیدی را به شبکه اعمال و یا از آن حذف کنیم و یا اتصال کوتاه در شبکه ایجاد شود، در این حالت تغییراتی در شبکه ایجاد خواهد شد که اگر این تغییرات بطور تدریجی و آهسته باشد ممکن است، شبکه تحمل کرده و به شرایط دیگری از پایداری برسد، ولی اگر شبکه نتواند این تغییرات را تحمل کند، شبکه ناپایدار خواهد شد. همچنین ژنراتورهای موجود در شبکه سنکرون بوده و برای حالت‌های دینامیکی حساس هستند، در نتیجه اگر تغییرات ناگهانی پیش آید، ممکن است ژنراتوری از مدار خارج شود و این موجب خواهد شد توانی مورد نیازی که آن ژنراتور تامین می‌کرد به دیگر ژنراتورها تحمیل شده و زاویه بارها و جریان‌های ژنراتورهای دیگر افزایش یابد. در این حال توان تولیدی دیگر ژنراتورها باید بیشتر شود. افزایش قدرت ژنراتورها در شبکه، با افزایش زاویه بار انجام می‌شود. در این حال اگر زاویه بار به حد بحرانی برسد، با پیشی گرفتن از این مقدار با توجه به رابطه بین توان الکتریکی و زاویه بار، این کار باعث کاهش توان الکتریکی خواهد شد و ژنراتور نتوانست این بار تحمیل شده را تامین کند. پس در چنین زمان‌هایی اگر نتوان پایداری شبکه را تامین کرد، بایستی قسمتی از شبکه را از مدار خارج کرد. در این پروژه به بررسی و حل معادله نوسان ماشین سنکرون پرداخته که می‌توان وضعیت شبکه و تغییرات مقادیر مهمی همچون زاویه بار و توان الکتریکی و ... را حین و پس از رخداد خطا در شبکه ارزیابی کرد، تا به تحلیل درستی از نقاط کار شبکه دست یافت.

## فصل اول : آشنایی با سیستم های قدرت و مسئله پایداری

### ۱-۱- معرفی یک سیستم قدرت الکتریکی

در یک سیستم قدرت الکتریکی ایده آل، ولتاژ و فرکانس در هر نقطه تغذیه ثابت بوده و ولتاژ نقاط تغذیه سه فاز متقارن، جریان ها سه فاز متقارن، ضریب توان واحد و سیستم عاری از هارمونیک است.

ثابت نگه داشتن فرکانس با ایجاد توازن در توان اکتیو بین منبع تولید و مصرف کننده تحقق می یابد و کنترل ولتاژ، با نظارت بر میزان توان راکتیو تولیدی و مصرفی در یک شین صورت می گیرد.

توان راکتیو هنگام نیاز باید تولید شود و چون مصرف بارها در ساعات مختلف شبانه روز تغییر می کند، بنابراین توان تولیدی ژنراتورها نیز باید کنترل شود.

توان خروجی یک ژنراتور با تغییر توان مکانیکی ورودی به آن کنترل می شود. به عنوان نمونه، در یک توربین گازی برای کنترل توان خروجی با باز کردن و یا بستن شیر بخار یا دریچه آب، جریان بخار یا مقدار

آب روی پره های توربین تنظیم شده و باعث کنترل توان مکانیکی و در نتیجه کنترل توان اکتیو خروجی ژنراتور می شود. عدم توازن توان اکتیو، از تاثیر آن بر سرعت یا فرکانس ژنراتور احساس می شود. در صورت

کاهش بار و اضافه بودن تولید، ژنراتور تمایل به افزایش سرعت روتور و فرکانس خود دارد و در حالت افزایش بار و کمبود تولید، سرعت و فرکانس ژنراتور کاهش خواهد یافت.

انحراف فرکانس از مقدار کافی آن به عنوان سیگنالی جهت تحریک سیستم کنترل خودکار انتخاب شده و بدین ترتیب با ایجاد توان اکتیو بین منبع تولید و مصرف کننده فرکانس سیستم ثابت نگه داشته می شود.

### ۱-۲- دینامیک سیستم های قدرت و پایداری

میرا کردن نوسانات توان در شبکه قدرت ضروری است. در یک شبکه قدرت به دلایل مختلف از جمله بروز خطای اتصال کوتاه و قطع یا ورود ناگهانی بارهای بزرگ به شبکه، نوسانات توان به وجود می آید و این امر

می تواند پایداری شبکه قدرت را با خطرهای جدی مواجه سازد. در صورتی که، این نوسانات هر چه زودتر توسط عاملی میرا شوند، شبکه قدرت به حالت ماندگار خود رسیده و میتوان ضمن داشتن عملکردی مناسب از بروز مشکل برای بارهای صنعتی جلوگیری به عمل آورد.

چون در سیستم های دینامیکی رابطه بین ورودی و خروجی لحظه ای نیست. به این معنی که اگر ورودی سیستم یکباره مثلا دو برابر شود، مدتی طول می کشد تا خروجی به مقدار جدیدی برسد. به عنوان نمونه،

اگر ورودی یک موتور ۲۰٪ افزایش یابد، دور موتور (با فرض خطی بودن سیستم)، مثلا از ۱۵۰۰ دور در دقیقه به ۱۸۰۰ دور در دقیقه می رسد ولی این افزایش دور موتور به آرامی صورت می گیرد. یعنی در

سیستم های قدرت معمولا پس از هر گونه تغییر در ورودی ها و یا هر گونه اغتشاش، نوساناتی در فرکانس، ولتاژ، توان حقیقی و راکتیو بوجود می آید.

علت اصلی دینامیک بودن سیستم ها، عناصر ذخیره کننده انرژی (سلف و خازن) است. برای مقابله با برخی پدیده های ناخواست دینامیکی از سیستم های کنترلی استفاده می شود. سیستم های کنترلی در نیروگاه و انشعاب های عبارتند از گاورنر<sup>۱</sup> و کنترل خودکار ولتاژ<sup>۲</sup> و چند سیستم کنترلی در شبکه های قدرت .

### ۱-۳- ضرورت مطالعه دینامیکی و پایداری سیستم های قدرت

از آنجا که عناصر ذخیره کننده انرژی در مقابل تغییرات، عکس العمل نشان می دهند و برق متناوب نیز دائماً در حال تغییر است، مطالعات دینامیکی در سیستم های برق متناوب نسبت به برق مستقیم بسیار مهمترند.

از آنجا که میزان مصرف برق در مناطق مختلف و در زمان های مختلف متفاوت است، برای بهره برداری بهتر از سرمایه گذاری انجام شده در بخش تولید، بهتر است شبکه های تولید و توزیع برق به هم متصل شوند تا در زمانی که در یک منطقه میزان بار درخواستی بیشتر از توان تولیدی است، یک منطقه بتواند به منطقه دیگر سرویس بدهد. این اتصالات حتی در سطح قاره ای به مقتضیات اقتصادی صورت گرفته ولی در عین حال پایداری را در سیستم ضروری می کند.

سیستم های مدرن قدرت، امروزه بنا به همین مسائل اقتصادی با ظرفیت بالایی تولید می شوند و با توجه به بعد مسافتی برای انتقال به بارها، اثر منفی روی پایداری دارند. باید به این نکته توجه داشت که هر چند اتصال سیستم های کوچک تولید و توزیع به یکدیگر سیستم را در مقابل اغتشاشات کوچک پایدارتر می نماید ولی ایجاد اشکال در یک سیستم بر سیستم های دیگر نیز اثر می گذارد.

### ۱-۴- پایداری و تعریف آن در سیستم های قدرت

پایداری از مهمترین مشخصه ها و ملزومات در سیستم های دینامیکی است. در مسائل تئوریک، سیستمی پایدار است که به ازای هر ورودی، بازه ی خروجی، محدود باشد و در مسائل فیزیکی، سیستمی ناپایدار است که خروجی از حد قابل قبول خارج شود. از دید مهندسی برق، سیستم وقتی ناپایدار است که سیستم های کنترلی از عهده اغتشاش برنیایند و سیستم های حفاظتی برای حفظ سلامت سیستم وارد عمل می شوند، هر چند ژنراتورها و توربین ها، سیستم های حفاظتی بسیار قوی دارند.

<sup>1</sup> Governor  
<sup>2</sup> AVR

#### ۱-۴-۱- انواع پایداری در سیستم های قدرت

پدیده ها و پایداری در یک شبکه قدرت به شدت اغتشاشات و مدت زمانی که در شبکه باقی میمانند تقسیم بندی شده اند. در تقسیم بندی اول، پایداری در سیستم قدرت به مانا<sup>۱</sup>، دینامیکی<sup>۲</sup> و گذرا<sup>۳</sup> تقسیم می شود.

۱. پایداری شبکه تحت اغتشاشات بسیار کوچک را پایداری مانا می گویند. اگر به یک سیستم قدرت اغتشاشی وارد شود، فرکانس، زاویه بار و ولتاژ تمامی واحدها دچار نوساناتی می شود که معمولاً در طول چند ثانیه از بین می روند و سیستم در شرایط جدید آرام می گیرد، پایداری شبکه تحت اغتشاشاتی که کنترل کننده های نیروگاه ها، مثل کنترل کننده های ولتاژ و گاورنرها برطرف می شود را پایداری دینامیکی می نامند.

۲. به توانایی سیستم در حفظ پایداری و میرا کردن نوسانات پس از یک اغتشاش شدید، پایداری گذرا گفته می شود. یک سیستم واقعی در صورت اعمال خطا، زمانی پایدار است که متغیرهای آن، وقتی که زمان به سمت بی نهایت میل می کند، به مقادیر حالت مانا نزدیک شوند. بررسی پایداری بعد از یک اغتشاش شدید، مطالعات پایداری گذرا نامیده می شود. در تقسیم بندی دیگر بسته به مدت زمانی که پدیده ها در شبکه باقی می ماند به صورت های زیر تقسیم می شوند:

الف) پدیده های موجی:

این پدیده ها به اتفاقاتی مثل رعد برق، کلید زنی، و یا هر تغییر دیگر در خطوط انتقال از یک نقطه به نقطه دیگر مربوطند. سرعت این امواج بسیار بالا و محدوده زمانی آنها حدود میکروثانیه است.

ب) پدیده های الکترومغناطیسی:

وقتی اثر یک اتفاق به سر ژنراتور می رسد، تا با سیم پیچ استاتور و فلوی فاصله هوایی روی روتور و گشتاور الکتریکی اثر بگذارد، زمانی طول می کشد. این زمان از مدت پدیده های موجی بیشتر است و در فاصله میلی ثانیه تا ثانیه است.

ج) پدیده های الکترومکانیکی:

ایجاد تغییرات روی گشتاور الکتریکی باعث تغییر دور روتور و سپس، از طریق گاورنر، باعث تغییر در گشتاور مکانیکی می شود.

این تغییرات آهسته تر از دو پدیده قبلی و در محدوده زمانی یک تا چند ثانیه است. پدیده های نوسانات فرکانس پایین و تشدید زیر سنکرون در این دسته قرار می گیرند. زمان این پدیده ها یک تا چند ثانیه است.

<sup>1</sup> Steady state stability

<sup>2</sup> Dyanmic Stability

<sup>3</sup> Transient Stability

د) پدیده های ترمودینامیکی :

تغییر در گشتاور مکانیکی، باید منجر به تغییر در نقطه کار سیستم تامین کننده انرژی گردد. این تغییر معمولاً بسیار آهسته و در حد چند دقیقه است. به عنوان مثال با افزایش تقاضای بار در نقطه ای از شبکه، این جریان اضافه با سرعت پدیده های موجی به سر ژنراتور می رسد و سپس با سرعت پدیده های الکترومغناطیسی در فاصله هوایی خود را به صورت افزایش گشتاور الکتریکی (مقاوم) نشان می دهد. این افزایش گشتاور الکتریکی باعث افت سرعت روتور می شود و گاورنر را به حرکت وا می دارد و گاورنر نیز با باز کردن دریچه (آب، بخار یا سوخت گاز) باعث زیاد شدن توان مکانیکی در جهت بازگرداندن سرعت روتور به همان سرعت قبلی می شود. به دلیل این که در اکثر نیروگاه ها شیب افقی (یکی از سیستم های کنترلی گاورنر) صفر نیست، تمام افزایش بار درخواستی را عملکرد گاورنر جبران نمی کند. لذا روتور پس از چندین نوسان در سرعت جدیدی مانا می شود. به طور مرسوم، پایداری تحت اختلال های شدید به حالت گذرا یا دوره کوتاه مدت چند ثانیه ای، به دنبال اختلال مربوط می گردد و در تحلیل این نوع پایداری به بررسی پاسخ شبکه به یک خطای شدید مانند اتصال کوتاه خط انتقال پرداخته می شود. شبکه های قدرت طوری طراحی و بهره برداری می شوند تا بتوانند معیارهای قابلیت اطمینان را از نظر پایداری گذرا برآورده کنند.

#### ۱-۴-۲- پدیده پایداری گذرا

پدیده پایداری گذرا اساساً به تغییرات انرژی جنبشی ژنراتورها در دوره اختلال و پس از آن مربوط می باشد که بعنوان پایداری خیز اول ژنراتورها نیز شناخته میشود. دوره پدیده پایداری گذرا در محدوده ۵ تا ۲۰ ثانیه می باشد، که شامل تغییرات نسبتاً زیاد زاویه روتور ژنراتورها است.

عوامل موثر در پدیده پایداری گذرا را می توان بصورت زیر دسته بندی کرد:

۱- شرایط اولیه شبکه مانند میزان بار و الگوهای بار و تولید (آرایش و چینش بار یا تولید بر روی شین های شبکه)

۲- نوع و مدت خطا و محل وقوع و نزدیکی آن به ژنراتورها

۳- ساختار راکتانسی شبکه در دوره قبل از خطا، حین خطا و پس از خطا

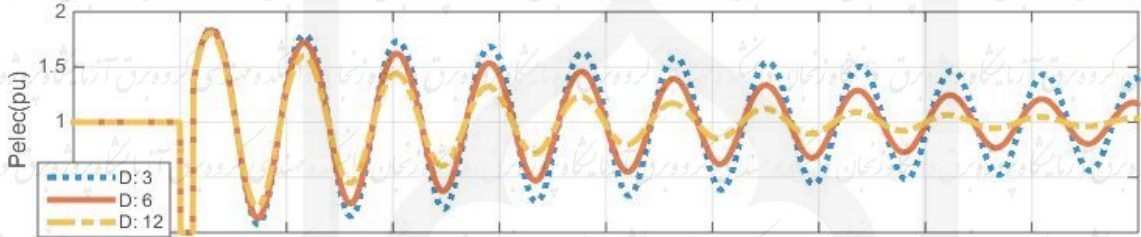
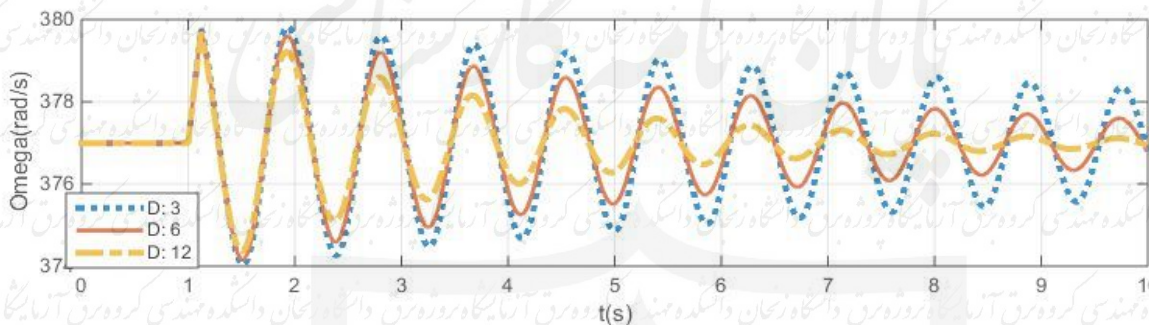
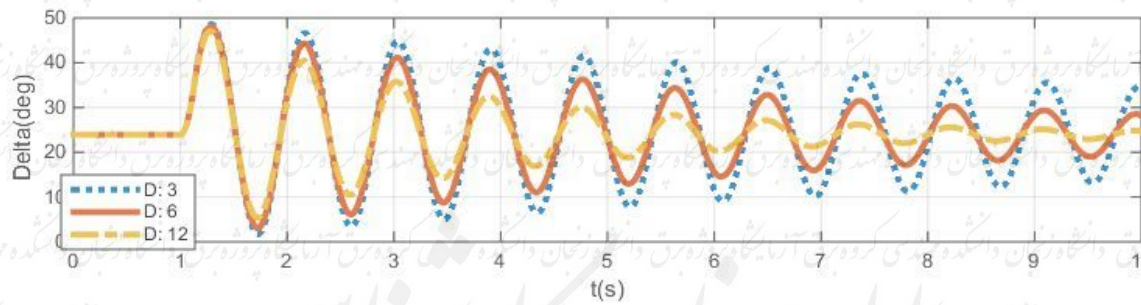
۴- ثابت اینرسی و راکتانس گذرای ژنراتورها

در مطالعات پایداری گذرا برای شبیه سازی یک اغتشاش بزرگ، معمولاً از خطای اتصال کوتاه (سه فاز) استفاده می شود.



دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.



جدول ۵-۸ پاسخ برنامه برای روش رانگ کوتاه به ازای تغییرات ضریب میرایی

### ۵-۱- نتیجه گیری

با بررسی جدول های ۵-۱ و ۵-۲ به دسته بندی متفاوتی از روش های حل مسئله می رسیم. البته در مورد جدول ۵-۲ باید در نظر بگیریم که درست است که زمان ها بسیار کم هستند ولی این زمان ها فقط برای حل یک مسئله هستند و در صورت انجام محاسبات پیچیده تر با افزایش حجم محاسبات، زمان اجرای برنامه برای ما اهمیت بیشتری پیدا می کند.

طبق جدول ۵-۱ در دسته بندی روش ها به ترتیب دقت محاسبه، دیدیم که روش رانگ کوتای مرتبه ۴ از دقت خوبی برخوردار است با وجود این که زمان اجرای این برنامه نسبت به سایر روش ها مقدار جزئی بیشتر است ولی بخاطر دقت بسیار بالاتری که دارد، در مقایسه با سایر روش ها بسیار مناسب تر به نظر می رسد.

## منابع:

- [1] Glover, J.D, Mulukutla, S.S , “Power System Analysis and Design”, Fifth Edition, CENGAGE Learning, 2012
- [2] Suli, Endre, “Numerical solution of Ordinary Differential Equations”, mathematical institute, University Oxford, 2014
- [3] Mathews, John, “Math 340 Numerical Analysis”, Fall semester 2002
- [4] کاظمی، احد، سعادت، هادی، "بررسی سیستم های قدرت"، جلد دوم، نشر دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۳
- [5] دیانی، محمود، چاپمن، استفن، "ماشین های الکتریکی"، نشر نص، ۱۳۸۴
- [6] نیکوکار، مسعود، درویشی، محمد تقی، "محاسبات عددی"، نشر گسترش علوم پایه، ۱۳۸۴