

به نام خداوند بخشنده مهربان

# حالات گذرا در سیستم‌های قدرت

تألیف:

پروفسور گنورگ قره‌متیان

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دکتر انوشیروان ابراهیمی

شرکت مدیریت شبکه برق ایران

دکتر محمود نریمانی

شرکت مادر تخصصی مدیریت تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران (توانیر)

سرشناسه : قره‌تپیان، گیورک، ۱۳۴۱،  
عنوان و نام پدیدآور : حالات گذرا در سیستم‌های قدرت / تألیف گئورگ قره‌تپیان، انوشیروان ابراهیمی، محمود نریمانی  
مشخصات نشر : تهران: آروین‌نگار، ۱۴۰۳  
مشخصات ظاهری : ۲۶۰ ص: مصور، جدول، نمودار  
شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۵۷۵۶-۵۷-۱  
وضعیت فهرست نویسی : فیژا  
یادداشت : واژه‌نامه.  
یادداشت : کتابنامه.  
موضوع : برق گذرا، Transients (Electricity)، برق گذرا - الگوهای ریاضی  
Transients (Electricity)-Mathematical models، برق - سیستم‌ها - پایداری  
Electric power system stability  
شناسه افزوده : ابراهیمی، انوشیروان، ۱۳۶۸  
شناسه افزوده : نریمانی، محمود، ۱۳۶۸  
رده بندی کنگره : TK۳۲۲۶  
رده بندی دیویی : ۶۲۱/۳۱  
شماره کتابشناسی ملی : ۹۶۵۷۲۶۰

این اثر مشمول قانون حمایت مؤلفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است. هر کس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر یا مخبر یا بخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.



تلفن: ۶۶۴۱۸۵۱۲

همراه: ۰۹۳۹۱۲۶۱۴۱۹

عنوان کتاب ..... حالات گذرا در سیستم‌های قدرت  
مؤلفین ..... پروفیسور گئورگ قره‌تپیان، دکتر انوشیروان ابراهیمی، دکتر محمود نریمانی  
ناشر ..... انتشارات آروین نگار  
مدیر فنی و ناظر چاپ ..... محرمعلی قاصدی  
شابک ..... ۹۷۸-۶۲۲-۷۵۵۶-۵۷-۱  
طراح جلد ..... علی ذوالفقاری  
نوبت و سال چاپ ..... اول / ۱۴۰۳  
تیراژ ..... ۲۰ نسخه  
قیمت ..... ۵۰۰۰۰ تومان

مرکز پخش: فروشگاه اینترنتی کتاب آرتین [www.artinbook.ir](http://www.artinbook.ir)

فروشگاه اینترنتی گنبد نیلگون آسمان [www.gnapub.ir](http://www.gnapub.ir)

تلفن: ۰۹۱۲۴۱۶۱۹۰۹ - ۶۶۴۸۱۸۷۰

پست الکترونیکی [arvinnegarpub@gmail.com](mailto:arvinnegarpub@gmail.com)

کلیه حقوق این کتاب برای آروین نگار محفوظ است.

## پیشگفتار

سیستم قدرت یکی از پیچیده‌ترین سیستم‌هایی است که توسط مهندسان طراحی، ساخته و بهره‌برداری می‌شود. در جامعه مدرن امروزی، سیستم قدرت نقش اساسی را ایفا می‌کند، و کیفیت زندگی بدون وجود انرژی الکتریکی قابل اعتماد، غیر قابل تصور است. با توجه به عدم امکان ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در مقادیر زیاد، سیستم قدرت باید میزان تولید برق در نیروگاه‌ها و میزان مصرف توسط بارها را متعادل کند تا فرکانس و ولتاژ در محدود مجاز حفظ شوند. در هنگام کار عادی، بارهای شبکه در طول روز به شبکه متصل و از آن قطع می‌شوند. بنابراین تدارک اقدامات کنترلی به طور مداوم ضروری هستند تا پاسخگوی این تغییرات باشند. بطور کلی مطالعات سیستم‌های قدرت حوزه زمانی گسترده‌ای را پوشش می‌دهد. در مقیاس زمانی سال، برنامه‌ریزی برای نصب نیروگاه‌های جدید، احداث خطوط انتقال جدید یا ارتقا خطوط موجود به سطوح ولتاژ بالاتر، موارد مهمی است که باید در نظر گرفته شود. ولی هنگامی که قابلیت اطمینان سیستم یا محاسبات پخش بار تحلیل می‌شود، مقیاس زمانی معمولاً چند ساعت است. اما هنگامیکه پایداری دینامیکی تجزیه و تحلیل می‌شود تا پایداری سیستم پس از یک اختلال بررسی شود، سیستم قدرت با دقت ثانیه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. عملیات کلیدزنی برای به مدار آوردن یا قطع بارها، بی‌برق کردن بخش‌های معیوب پس از بروز اتصال کوتاه و یا برخورد صاعقه به خطوط انتقال یا به مجاورت آنها، مطالعات سیستم قدرت را در بازه زمانی کوچکتر، در محدوده میکروثانیه تا میلی‌ثانیه ضروری می‌کند.

ما در این کتاب در مورد حالت گذرا بحث می‌کنیم. مدت حضور پدیده‌های گذرا در سیستم‌های قدرت بسیار کوتاه است، اما طی یک دوره گذرا، اجزای موجود در سیستم تحت پیک‌های جریان زیاد و ولتاژ بالا قرار می‌گیرند که می‌توانند صدمات قابل توجهی به سیستم قدرت وارد کنند. توجه به این نکته حائز اهمیت است که به دلیل زمان بسیار کوتاه بروز این پدیده‌ها (محدوده میکروثانیه تا میلی‌ثانیه)، سیستم‌های حفاظت و کنترل امکان نشان دادن هیچ عکس‌العملی را ندارند و در کنترل حالات گذرا عملاً بی‌تأثیر هستند. لذا برای به حداقل رساندن ریسک صدمات مذکور باید در مراحل طراحی و بهره‌برداری تمهیدات لازم اندیشیده شود.

در این کتاب پس از معرفی کلی حالات گذرا در سیستم‌های قدرت، مباحث امواج سیار و دیگرام نردبانی به عنوان ابزارهای مطالعاتی و محاسباتی بررسی حالات گذرا ارائه شده‌اند. در ادامه حالت‌های گذرا ناشی از برخورد صاعقه، عوامل مؤثر بر اضافه ولتاژهای ناشی از برق‌دار نمودن خط و حالت‌های گذرا ناشی از باز کردن مدارها ارائه و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. طراحی مطالب مذکور به گونه ای صورت گرفته است که این کتاب می‌تواند مورد استفاده مهندسين صنعت برق و همچنین دانشجویان کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق قدرت قرار گیرد.

سعی بر این بوده است که کتاب حاضر با کمترین نقص و اشتباه در اختیار خوانندگان محترم قرار گیرد. با این وجود، خوشحال خواهیم شد که نواقص احتمالی، انتقادات، نظرات و پیشنهادات خود را از طریق پست الکترونیکی با نگارندگان در میان بگذارید تا در چاپ‌های بعدی کتاب مد نظر قرار گیرند.

grptian@aut.ac.ir

دکتر گنورک قره‌ایمان

anooshirvan.e@aut.ac.ir

دکتر انوشیروان ابراهیمی

m.narimani@aut.ac.ir

دکتر محمود نریمانی

www.ketab.ir

## فهرست

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| فصل اول: مقدمه.....                                                  | ۹  |
| ۱-۱- تعریف.....                                                      | ۱۱ |
| ۲-۱- دسته‌بندی.....                                                  | ۱۲ |
| ۳-۱- ضرورت انجام بررسی حالات گذرا.....                               | ۱۶ |
| ۱-۳-۱- اضافه ولتاژها.....                                            | ۱۷ |
| ۱-۱-۳-۱- اهمیت و ضرورت انجام مطالعات.....                            | ۱۷ |
| ۲-۱-۳-۱- منابع اضافه ولتاژها.....                                    | ۱۷ |
| ۳-۱-۳-۱- ایزولاسیون شبکه در برابر اضافه ولتاژها (هماهنگی عایقی)..... | ۱۸ |
| ۴-۱- اضافه جریان.....                                                | ۱۹ |
| ۵-۱- شکل موج‌های غیرمعمول (کیفیت توان).....                          | ۱۹ |
| ۱-۵-۱- اهمیت مطالعه.....                                             | ۱۹ |
| ۲-۵-۱- دسته‌بندی افتشاش‌ها.....                                      | ۲۰ |
| ۶-۱- روش‌های مطالعه حالات گذرا.....                                  | ۲۱ |
| ۱-۶-۱- مدل‌سازی و شبیه‌سازی.....                                     | ۲۱ |
| ۲-۶-۱- شبیه‌سازی‌ها.....                                             | ۲۲ |
| ۳-۶-۱- نکات مهم در شبیه‌سازی.....                                    | ۲۵ |
| ۷-۱- مراجع.....                                                      | ۲۶ |
| فصل دوم: امواج سیار.....                                             | ۲۹ |
| ۱-۲- معادلات خط انتقال.....                                          | ۳۲ |
| ۱-۱-۲- حالت بی‌اتلاف.....                                            | ۳۷ |
| ۲-۱-۲- حالت با اتلاف.....                                            | ۳۹ |
| ۲-۲- انتشار موج در حالت سینوسی دائم.....                             | ۴۴ |
| ۱-۲-۲- انعکاس در خط انتقال.....                                      | ۴۴ |
| ۲-۲-۲- در انتهای خط.....                                             | ۴۵ |
| ۳-۲-۲- انعکاس در ابتدای خط.....                                      | ۴۹ |
| ۴-۲-۲- توزیع مکانی ولتاژ در طول یک خط بی‌اتلاف.....                  | ۵۱ |
| ۵-۲-۲- تغییر سرعت انتشار موج بر حسب فرکانس.....                      | ۵۵ |
| ۶-۲-۲- تغییرات امپدانس مشخصه‌ی خط با فرکانس.....                     | ۶۰ |
| ۳-۲- امواج سیار در حالت پله.....                                     | ۶۱ |

|          |                                                                        |
|----------|------------------------------------------------------------------------|
| ۶۱.....  | ۱-۳-۲ حل معادلات در حالت پله                                           |
| ۶۹.....  | ۲-۳-۲ معادلات جریان (حل دالامبر)                                       |
| ۷۰.....  | ۳-۳-۲ امواج پیشرو و پسرو                                               |
| ۷۳.....  | ۴-۳-۲ قوانین انعکاس در حالت پله                                        |
| ۷۷.....  | ۵-۳-۲ اثر تلفات خط در حالت موج پله                                     |
| ۷۹.....  | ۴-۲ مراجع                                                              |
| ۸۱.....  | <b>فصل سوم: دیاگرام نردبانی و مفاهیم کاربردی آن</b>                    |
| ۸۳.....  | ۱-۳ رابطه شکل زمانی و مکانی موج سیار                                   |
| ۹۰.....  | ۲-۳ اتصال کابل به خط هوایی                                             |
| ۹۷.....  | ۳-۳ مقاومت وصل کلیدهای قدرت                                            |
| ۹۷.....  | ۱-۳-۳ مقاومت داخلی منبع                                                |
| ۹۹.....  | ۲-۳-۳ اتصال خط برق‌دار به خط بی‌برق                                    |
| ۱۰۴..... | ۴-۳ انعکاس موج گذرا در انشعاب چند خط                                   |
| ۱۰۵..... | ۵-۳ اثر خازن در انتهای خط انتقال                                       |
| ۱۱۰..... | ۶-۳ اثر سلف در انتهای خط انتقال                                        |
| ۱۱۳..... | ۷-۳ اثر خازن و سلف موازی در انتهای خط                                  |
| ۱۱۷..... | ۸-۳ اثر خازن و سلف سری در انتهای خط انتقال                             |
| ۱۲۰..... | ۹-۳ اثر ترکیب سلف و خازن در میان خط انتقال                             |
| ۱۲۲..... | ۱۰-۳ مراجع                                                             |
| ۱۲۵..... | <b>فصل چهارم: حالت‌های گذرای ناشی از برخورد صاعقه</b>                  |
| ۱۲۷..... | ۱-۴ مقدمه                                                              |
| ۱۳۴..... | ۲-۴ مشخصات عمومی صاعقه                                                 |
| ۱۳۶..... | ۳-۴ انواع برخوردها                                                     |
| ۱۳۶..... | ۱-۳-۴ برخورد مستقیم به هادی فاز                                        |
| ۱۳۸..... | ۲-۳-۴ برخورد به هادی زمین یا دکل                                       |
| ۱۴۰..... | ۳-۳-۴ برخورد غیرمستقیم                                                 |
| ۱۴۱..... | ۴-۴ پاسخ سیستم به شکل موج ولتاژ دلخواه (صاعقه)                         |
| ۱۴۳..... | ۵-۴ بررسی حالات گذرای ناشی از صاعقه به کمک دیاگرام نردبانی             |
| ۱۴۸..... | ۶-۴ مراجع                                                              |
| ۱۵۱..... | <b>فصل پنجم: عوامل مؤثر بر اضافه ولتاژهای ناشی از برق‌دار نمودن خط</b> |
| ۱۵۳..... | ۱-۵ اثر منبع                                                           |
| ۱۵۴..... | ۱-۱-۵ اتصال منبع پله از پشت سلف                                        |

|     |                                                  |
|-----|--------------------------------------------------|
| ۱۵۷ | ۵-۱-۲- اتصال منبع سینوسی از پشت سلف              |
| ۱۵۹ | ۵-۱-۳- اتصال خط با منبع قرار گرفته پشت خط دیگر   |
| ۱۶۱ | ۵-۱-۴- اتصال منبع از طریق سلف در جوار خطوط موازی |
| ۱۶۲ | ۵-۲- بسته نشدن همزمان سه فاز                     |
| ۱۶۵ | ۵-۳- جبران سازی راکتیو                           |
| ۱۶۷ | ۵-۴- بارهای باقیمانده در خط                      |
| ۱۷۰ | ۵-۵- تلفات سیستم                                 |
| ۱۷۳ | ۵-۶- اثر محل کلیدزنی                             |
| ۱۷۴ | ۵-۷- نوع تجهیزات در پایانه خط                    |
| ۱۷۸ | ۵-۸- مراجع                                       |

## فصل ششم: حالت های گذرا ناشی از باز کردن مدار..... ۱۸۱

|     |                                        |
|-----|----------------------------------------|
| ۱۸۳ | ۶-۱- ولتاژ بازیافت گذرا                |
| ۱۸۷ | ۶-۱-۱- نرخ افزایش ولتاژ بازیابی        |
| ۱۸۸ | ۶-۱-۲- حل مسئله به روش تزریق جریان     |
| ۱۸۹ | ۶-۱-۳- عوامل مؤثر بر ولتاژ بازیابی     |
| ۱۸۹ | ۶-۱-۳-۱- ضریب قدرت                     |
| ۱۹۰ | ۶-۱-۳-۲- فرکانس طبیعی                  |
| ۱۹۰ | ۶-۱-۳-۳- وجود دو فرکانس طبیعی          |
| ۱۹۳ | ۶-۱-۳-۴- اثر میرایی                    |
| ۱۹۳ | ۶-۱-۳-۵- نوع اتصال کوتاه               |
| ۱۹۴ | ۶-۱-۳-۶- اثر ولتاژ قوس                 |
| ۱۹۴ | ۶-۲- قطع جریان اتصال کوتاه یک خط کوتاه |
| ۱۹۸ | ۶-۳- قطع جریان مغناطیس کننده           |
| ۲۰۰ | ۶-۴- اثر پسماند در جریان هجومی ترانس   |
| ۲۰۳ | ۶-۵- قطع جریان خازنی                   |
| ۲۰۶ | ۶-۶- وصل خازن                          |
| ۲۰۸ | ۶-۷- قطع سکسیونر                       |
| ۲۱۱ | ۶-۸- قطع کلید در مدار DC               |
| ۲۱۱ | ۶-۹- قطع اتصال تکفاز به زمین           |
| ۲۱۳ | ۶-۱۰- مراجع                            |

## فصل هفتم: نفوذ امواج سیار در سیم پیچ ترانسفورماتور..... ۲۱۵

|     |                                                                     |
|-----|---------------------------------------------------------------------|
| ۲۱۸ | ۷-۱- مدل سازی با صرف نظر کردن از القا متقابل سیم پیچ ها و مقاومت ها |
| ۲۲۰ | ۷-۱-۱- توزیع اولیه                                                  |

|     |                                                                           |
|-----|---------------------------------------------------------------------------|
| ۲۲۳ | ۲-۱-۷- ظرفیت معادل سیمپیج در لحظه $t=0$ .....                             |
| ۲۲۳ | ۳-۱-۷- توزیع نهایی.....                                                   |
| ۲۲۴ | ۴-۱-۷- حل رابطه مشتق جزئی اصلی.....                                       |
| ۲۲۷ | ۵-۱-۷- توجیه موج سیار بودن جواب.....                                      |
| ۲۲۸ | ۲-۷- مدل سازی سیمپیج با در نظرگیری القا متقابل سیمپیج ها و مقاومت ها..... |
| ۲۲۹ | ۱-۲-۷- مدل مشروح سیمپیج.....                                              |
| ۲۳۵ | ۳-۷- مراجع.....                                                           |
| ۲۳۷ | فصل هشتم: معرفی نرم افزار EMTP و روش های مدل سازی حالات گذرا در آن.....   |
| ۲۳۹ | ۱-۸- معرفی نرم افزار EMTP.....                                            |
| ۲۴۵ | ۲-۸- روش های مدل سازی حالات گذرا در برنامه (EMTP).....                    |
| ۲۵۵ | ۳-۸- مراجع.....                                                           |
| ۲۵۷ | واژه نامه انگلیسی به فارسی.....                                           |
| ۲۵۹ | واژه نامه فارسی به انگلیسی.....                                           |