

حالت‌های گذرای سیستم‌های کابلی

تئوری، مدل‌سازی و شبیه‌سازی

تألیف:

Akihiro Ametani, Teruo Ohno, Naoto Nagaoka

www.ketab.ir

ترجمه:

حامد حسنوند، بهروز ارشدی، محمدرضا زمانی



فرمانده کل قوا
وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی

سرشناسه	: آمتانی، آکیهیرو
عنوان و نام پدیدآور	: Ametani, Akihiro
مشخصات نشر	: حالت‌های گذرای سیستم‌های کابلی: تئوری، مدل‌سازی و شبیه‌سازی/تألیف [آکیهیرو آمتانی، ترئو اوهنو، ناوتو ناگانوکا]؛ ترجمه حامد حسنون، بهروز ارشدی، محمدرضا زمانی.
مشخصات ظاهری	: تهران: شرکت سهامی برق منطقه‌ای تهران، ۱۳۹۶.
شابک	: ۳۵۱ ص.
وضعیت فهرست نویسی	: ۹۷۸-۶۰۰-۹۰۲۶۰-۵۰۰
یادداشت	: فیفا
یادداشت	: عنوان اصلی: Cable system transients: theory, modeling and simulation.
موضوع	: کتابنامه.
موضوع	: برق‌گذراشیه‌سازی
موضوع	: Transients (Electricity)-Simulation methods
موضوع	: برق-خطوط راهنمای آموزشی
موضوع	: Electric lines - Study and teaching
شناسه افزوده	: اوهنو، ترئو
شناسه افزوده	: Ohno, Teruo
شناسه افزوده	: ناگانوکا، ناوتو
شناسه افزوده	: Nagaoka, Naoto
شناسه افزوده	: ارشدی، بهروز ۴۸-، ج ۱
شناسه افزوده	: حسنون، حامد، ۱۳۶۲ متر
شناسه افزوده	: زمانی، محمدرضا، ۱۳۳۷-، ج ۱
شناسه افزوده	: شرکت سهامی برق منطقه‌ای تهران
رده بندی کنگره	: TK۳۲۲۶/۸ ح ۱۳۹۶۲
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۳۸۷۸۴
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۹۱۵۹۸۱



عنوان کتاب: حالت‌های گذرای سیستم‌های کابلی تئوری، مدل‌سازی و شبیه‌سازی

نام پدیدآورنده: Naoto Nagaoka و Teruo Ohno, Akihiro Ametani

مترجمان: حامد حسنون ۱۳۶۲، بهروز ارشدی ۱۳۴۸، محمدرضا زمانی ۱۳۳۷.

ویراستار: حامد حسنون

طرح جلد: علیرضا ارشدی

ناشر: انتشارات شرکت برق منطقه‌ای تهران

نوبت چاپ: اول

تاریخ: ۱۳۹۶

تیراژ: ۱۰۰۰

تعداد صفحات: ۳۵۱

چاپ و صحافی: زحل

قیمت: ۳۵۰۰۰۰ ریال

نشانی: سعادت آباد-کوی فراز-بلوار برق-شرکت برق منطقه‌ای تهران

شماره شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۰۲۶۰-۵۰۰

امروزه توان مورد نیاز در مناطق پرجمعیت به طور گسترده توسط شبکه های کابلی انتقال می یابد. در سال های اخیر، نصب مزارع بادی در دریا بخصوص در قاره ی اروپا رشد چشمگیری یافته است. هنوز هم بسیاری از این نوع مزارع در حال طراحی و ساخت بوده و توسط خطوط کابلی زیر دریایی به یکدیگر متصل می شوند. کابل های زیر دریایی به منظور انتقال توان از جزیره به خشکی نیز مورد استفاده قرار می گیرند. در دانمارک تمامی خطوط هوایی بالای ۱۰۰ کیلوولت با کابل زمینی جایگزین شده اند. با توجه به موارد مذکور واضح است که مطالعه ی حالت های گذرا در کابل های فشارقوی امری بسیار مهم بوده و همچنین در شبکه های کابلی با طول بلند و ساختار پیچیده، اجتناب ناپذیر است.

مهم ترین تفاوت مابین یک کابل و خط هوایی این است که کابل تک فاز از چندین هادی و یک غلاف فلزی تشکیل شده است در حالی که در یک خط هوایی فقط یک رشته هادی وجود دارد؛ بنابراین یک کابل فشارقوی سه فاز تک هادی در واقع دارای شش هادی است. هنگامی که یک کابل سه فاز داخل یک لوله فلزی محصور شود، تشکیل یک مجموعه با هفت هادی را می دهد؛ بنابراین تحلیل ولتاژ و جریان در یک کابل فشارقوی نیازمند تئوری سیستم های چند هادی است. تفاوت مهم دیگر این است که در اکثر موارد کابل فشارقوی در زمین دفن می شود. این امر موجب کاهش شدید سرعت انتشار مد برگشت زمین در طول یک کابل در مقایسه با خط رایج^۱ که تقریباً نزدیک به سرعت نور در خلأ است می شود. همچنین، سرعت انتشار مد مابین هادی و غلاف فلزی (مد کوآکسیال)^۲ توسط ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی عایق ϵ_i مابین هسته و غلاف و با استفاده از رابطه $c_c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_i}}$ تعیین می شود. ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی عایق عددی مابین دو تا چهار بوده و c_0 سرعت نور و برابر با ۳۰۰ متر بر میکروثانیه است.

امروزه کابل های گوناگونی برای مصارف مختلف طراحی و ساخته می شوند که از میان آنها می توان به مواردی از جمله: ۱- کابل های فشارقوی برای انتقال توان، کابل های محرقاتی و کنتکلی ۲- کابل های دفن شده در زمین یا محصور در تونل، کابل های زیر دریایی و کابل های هوایی مانند کابل باسبار گاز، ۳- کابل های تک هادی کوآکسیال (SC)^۳، کابل های چند رشته و کابل های محصور در لوله (PT)^۴، ۴- کابل های دایروی، استوانه ای و مسطح، ۵- کابل های با هم بندی مستقیم و صلیبی، اشاره نمود. این تنوع منجر به پیچیده شدن تحلیل ولتاژ و جریان در کابل ها در مقایسه با خطوط هوایی می شود. در واقع خطوط هوایی را می توان نوعی کابل دانست که تنها یک هادی دارد.

هدف اصلی این کتاب بررسی حالت های گذرا در یک کابل فشارقوی است. در فصل اول، انواع مختلف کابل هایی که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند معرفی می شوند. فصل دوم به بررسی روابط ریاضی اساسی و ادمیتانس انواع مختلف کابل از جمله کابل های تک هادی کوآکسیال و محصور در لوله می پردازد. در روابط ارائه شده، درس شده است تا علاوه بر دقت، به منظور درک بهتر مفاهیم فیزیکی، از به کار بردن محاسبات پیچیده خودداری شود.

در فصل سوم، تئوری انتشار موج در انواع کابل ارائه می شود. در بخش ۳-۱ مفاهیم اساسی تحلیل سیستم های با چندین هادی توسط فرضیه مدال^۴ مورد بررسی قرار می گیرد. سپس مشخصه های انتشار موج به منظور تعیین حالت های گذرا، برای یک کابل کوآکسیال، کابل محصور در لوله و کابل با هم بندی صلیبی ارائه می شود.

فصل چهارم، به مدل سازی و شبیه سازی گذرای کابل با استفاده از نرم افزار EMTP می پردازد. محاسبه ی امپدانس توالی یک کابل با استفاده از مدل مدار فشرده پی^۱ ارائه می شود. در گام بعد به منظور مدل سازی و بررسی حالت های گذرا، ابتدا مدل خط

^۱ Coaxial mode

^۲ Single core (SC)

^۳ Pipe-enclosed type (PT)

^۴ Modal theory

گسترده دامبل^۲ و سپس مدل وابسته به فرکانس مارتی^۳ و سیملین^۴ ارائه می‌شود. در نهایت مدل وابسته به فرکانس با استفاده از روش برازش بردار توصیف می‌شود.

در فصل پنجم، با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار EMTP، به بررسی حالت‌های گذرای یک کابل تک فاز و تحلیل نتایج تجربی خواهیم پرداخت.

فصل ششم به بررسی عملی حالت‌های گذرا در کابل‌های سه فاز و مقایسه مابین نتایج می‌پردازد. مشخصه‌های هجومی و تأثیر پارامترهای گوناگون توسط شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج برای مدل خط مستقل از فرکانس و وابسته به آن در نرم‌افزار EMTP ارائه می‌شود.

فصل هفتم، حالت‌های گذرای غیرمعمول را در یک کابل فشارقوی که جبران سازی توان راکتیو در آن امری ضروری است ارائه می‌دهد. به دلیل ظرفیت خازنی بزرگ یک کابل با طول بلند و ظرفیت سلفی زیاد یک راکتور موازی، تشدید سری و موازی در این گونه شبکه‌ها ظاهر می‌شود. از دیگر مشکلات مهم در بررسی حالت‌های گذرای کابل، جزیره‌ای شدن، اضافه ولتاژهای با پیشانی کند، قطع جریان پیش فاز، از دست رفتن نقطه‌ی گذر از صفر جریان و تخلیه الکتریکی کابل است که با شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار EMTP تحلیل می‌شوند.

فصل هشتم، به بررسی حالت‌های گذرای یک سیستم قدرت شامل منابع تولید پراکنده و شبکه‌های کابلی می‌پردازد. یک مزرعه بادی و نیروگاه خورشیدی توسط داده‌های ورودی با جزئیات کامل در EMTP مدل شده و حالت‌های گذرای سیستم‌های مذکور بررسی می‌شوند.

اکهپرو آمتانی

مارس ۲۰۱۵

^۱ PI model

^۲ Dommel

^۳ Marti

^۴ Semlyen

فصل ۱

۱-۱-۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱-۱	کابل های زمینی	۲
۱-۲-۱-۱	مقدمه	۲
۲-۲-۱-۱	کابل های XLPE	۳
۳-۲-۱-۱	کابل های SCOF	۷
۴-۲-۱-۱	کابل های HPOF	۹
۳-۱-۱	کابل های زیردریایی	۹
۱-۳-۱-۱	مقدمه	۹
۲-۳-۱-۱	کابل های زیردریایی HVAC	۱۰
۳-۳-۱-۱	کابل های زیردریایی HVDC	۱۰
۴-۱-۱	ساختار لایه ۱	۱۱
۱-۴-۱-۱	شرایط در کابل	۱۱
۲-۴-۱-۱	همبندی غلاف	۱۳

فصل ۲

۱-۲-۱	کابل تک هادی کواکسیال	۱۹
۱-۱-۲-۱	امپدانس	۱۹
۲-۱-۲-۱	ضرایب پتانسیل	۲۲
۲-۲-۱	کابل محصور در لوله	۲۳
۱-۲-۲-۱	امپدانس	۲۳
۲-۲-۲-۱	ضرایب پتانسیل	۲۵
۳-۲-۱	هادی با سطح مقطع دلخواه	۲۷
۱-۳-۲-۱	هادی استوانه ای معادل	۲۷
۲-۳-۲-۱	مثال هایی از روش تقریبی	۲۷
۴-۲-۱	امپدانس لایه نیمه هادی	۲۸
۱-۴-۲-۱	محاسبه ی امپدانس	۲۸
۲-۴-۲-۱	امپدانس هادی دولایه	۳۲
۳-۴-۲-۱	بررسی روابط امپدانس	۳۲
۴-۴-۲-۱	ادمیتانس لایه ی نیمه هادی	۳۵
۵-۴-۲-۱	مشخصه ی انتشار موج در یک کابل با لایه ی نیمه هادی خارجی	۳۵
۶-۴-۲-۱	نتیجه گیری	۳۹

۳۹	۵-۲- تحلیل روابط ارائه شده
۳۹	۵-۲-۱- بررسی روابط
۴۱	۵-۲-۲- پارامترهای تأثیرگذار بر امپدانس و ادمیتانس
۴۵	۶-۲- جعبه ابزار ثابت کابل و پارامترهای کابل در نرم افزار EMTP
۴۵	۶-۲-۱- خط هوایی
۴۵	۶-۲-۲- کابل هوایی/زمینی

فصل ۳

۵۵	۳-۱- تئوری مدال
۵۵	۳-۱-۱- مقادیر ویژه و بردارهای ویژه
۵۷	۳-۱-۲- محاسبه ی توابع ماتریسی توسط مقادیر ویژه و بردارهای ویژه
۵۷	۳-۱-۳- کاربرد تئوری مقادیر ویژه در سیستم های چند هادی
۵۸	۳-۱-۴- تئوری مدال
۶۰	۳-۱-۵- روابط ولتاژ و جریان در سیستم های چند هادی
۶۱	۳-۱-۶- شرایط مرزی و تئوری مدال
۶۶	۳-۱-۷- مسائل
۶۷	۳-۲- مشخصه ی انتشار موج در کابل تک فاز تک هادی کواکسیال
۶۷	۳-۲-۱- مشخصه های انتشار در مطالعه ی حالت های گذر
۷۰	۳-۲-۲- مشخصه های وابسته به فرکانس
۷۱	۳-۲-۳- پاسخ حوزه ی زمان
۷۲	۳-۳- کابل زمینی سه فاز کواکسیال
۷۲	۳-۳-۱- اثر متقابل فازها
۷۴	۳-۳-۲- ماتریس تبدیل
۷۵	۳-۳-۳- سرعت انتشار و ثابت تضعیف
۷۶	۳-۳-۴- امپدانس مشخصه
۷۸	۴-۳- تأثیر پارامترهای مختلف بر مشخصه های انتشار کابل تک هادی کواکسیال
۷۹	۳-۴-۱- عمق دفن h
۷۹	۳-۴-۲- مقادیر ویژه ی زمین ρ_e
۷۹	۳-۴-۳- ضخامت غلاف d
۷۹	۳-۴-۴- مقاومت ویژه ی غلاف ρ_s
۷۹	۳-۴-۵- آرایش کابل تک هادی کواکسیال سه فاز
۸۰	۳-۵- کابل با هم بندی صلیبی
۸۰	۳-۵-۱- معرفی کابل با هم بندی صلیبی

- ۸۲-۲-۵-۳- فرمول بندی تئوری کابل با هم بندی صلیبی
- ۸۹-۳-۵-۳- مدل همگن یک کابل با هم بندی صلیبی
- ۹۲-۴-۵-۳- تفاوت مابین کابل دفنی و کابل نصب شده در تونل
- ۱۰۰-۶-۳- کابل محصور در لوله
- ۱۰۰-۱-۶-۳- معرفی کابل محصور در لوله
- ۱۰۱-۲-۶-۳- کابل محصور در لوله با ضخامت لوله ی محدود
- ۱۰۸-۳-۶-۳- تأثیر عدم هم مرکزی هادی های داخلی
- ۱۱۱-۴-۶-۳- تأثیر ضریب نفوذ پذیری الکتریکی عایق داخل لوله
- ۱۱۱-۵-۶-۳- کابل محصور در لوله ی هوایی
- ۱۱۳-۷-۳- مشخصه ی انتشار مدهای بین غلاف
- ۱۱۳-۱-۷-۳- تحلیل تئوری مدهای بین غلاف
- ۱۲۰-۲-۷-۳- حالت های گذرا در یک کابل با هم بندی صلیبی
- ۱۳۴-۳-۷-۳- مدار گشت زمین
- ۱۳۷-۴-۷-۳- نتیجه گیری

فصل ۴

- ۱۴۱-۱-۴- امیدانس های توالی و مدل مدار فشرده PI
- ۱۴۱-۱-۱-۴- کابل با هم بندی مستقیم
- ۱۴۴-۲-۱-۴- کابل با هم بندی صلیبی
- ۱۴۵-۳-۱-۴- تحلیل روابط امیدانس های توالی
- ۱۵۰-۲-۴- مدل سازی کابل برای شبیه سازی حالت های گذرا
- ۱۵۰-۳-۴- مدل دامل
- ۱۵۲-۴-۴- مدل وابسته به فرکانس سیمین
- ۱۵۲-۱-۴-۴- مدل سیمین
- ۱۵۳-۲-۴-۴- مدل خطی
- ۱۵۳-۵-۴- مدل مارتی
- ۱۵۳-۶-۴- جدیدترین مدل های وابسته به فرکانس
- ۱۵۳-۱-۶-۴- برازش بردار
- ۱۵۵-۲-۶-۴- الگوریتم تقسیم فضای فرکانسی

فصل ۵

- ۱۶۱-۱-۵- کابل تک هادی کواکسیال
- ۱۶۱-۱-۱-۵- نتایج تجربی
- ۱۶۱-۲-۱-۵- شبیه سازی حالت های گذرا

۱۶۵	۳-۱-۵- تحلیل تئوری
۱۷۳	۴-۱-۵- ارزیابی تحلیلی پارامترها
۱۷۴	۵-۱-۵- محاسبه تحلیلی ولتاژهای گذرا
۱۸۰	۶-۱-۵- نتیجه گیری
۱۸۱	۲-۵- کابل محصور در لوله- اثر عدم هم مرکزی
۱۸۱	۱-۲-۵- مدل مدار برای شبیه سازی توسط نرم افزار EMTP
۱۸۱	۲-۲-۵- نتایج شبیه سازی با اعمال منبع ولتاژ پله
۱۸۴	۳-۲-۵- شبیه سازی با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه ی زمان
۱۸۴	۴-۲-۵- تحلیل تئوری
۱۹۱	۵-۲-۵- نتیجه گیری
۱۹۲	۳-۵- تأثیر لایه ی نیمه هادی بر رفتار گذرای کابل
۱۹۲	۱-۳-۵- اعمال ولتاژ پله یک کابل با طول دو کیلومتر
۱۹۲	۲-۳-۵- اعمال ولتاژ صریح به ۲۷۰ کرا ثانیه به یک کابل ۴۰ کیلومتری

فصل ۶

۱۹۷	۱-۶- کابل با هم بندی صلیبی
۱۹۷	۱-۱-۶- آزمون عملی یک کابل پر روش ۱۱۰ کیلوولتی
۱۹۸	۲-۱-۶- تأثیر هم بندی صلیبی
۲۰۱	۳-۱-۶- تأثیر پارامترهای مختلف
۲۰۲	۴-۱-۶- مدل همگن (بخش ۳-۵-۳ را ببینید)
۲۰۵	۲-۶- کابل ۲۷۵ کیلوولتی نصب شده در تونل
۲۰۶	۱-۲-۶- آرایش کابل
۲۰۶	۲-۲-۶- تأثیر پارامترهای هندسی بر انتشار موج
۲۰۸	۳-۲-۶- آزمون عملی کابل ۲۷۵ کیلوولتی XLPE
۲۱۴	۴-۲-۶- نتیجه گیری
۲۱۴	۳-۶- کابل نصب شده در زیر پل
۲۱۵	۱-۳-۶- مدل سیستم
۲۱۶	۲-۳-۶- تأثیر کابل هوایی و پل فلزی
۲۱۹	۳-۳-۶- تأثیر خطوط هوایی بر گذرای کابل
۲۲۴	۴-۶- مدل سازی کابل برای شبیه سازی در نرم افزار EMTP
۲۲۴	۱-۴-۶- مدل های دامل و مارتی
۲۲۵	۲-۴-۶- مدل کابل همگن (بخش ۳-۵-۳ را ببینید)
۲۲۵	۳-۴-۶- تأثیر کابل نصب شده در تونل

۲۲۶	۵-۶- کابل محصور در لوله.....
۲۲۶	۵-۶-۱- آزمون عملی یک کابل ۲۷۵ کیلوولتی پر روغن-پرفشار
۲۲۸	۵-۶-۲- نتایج اندازه گیری شده
۲۳۰	۵-۶-۳- شبیه سازی با روش FTP
۲۳۳	۵-۶-۴- پست عایق گازی (GIS)-کابل های هوایی.....
۲۳۴	۵-۶-۱- مشخصه های اصلی یک کابل هوایی
۲۳۵	۵-۶-۲- تأثیر فاصله دهنده در یک شین
۲۴۰	۵-۶-۳- خط سه فاز زمینی-عایق گازی
۲۴۲	۵-۶-۴- موج هجومی کلید زنی در یک پست GIS ۵۰۰ کیلوولتی
۲۴۳	۵-۶-۵- مشخصه های مهم موج هجومی ناشی از کلید زنی، القاشده در کابل های کنترلی

فصل ۷

۲۵۵	۷-۱- جریان سازش توان راکتیو
۲۵۶	۷-۲- اضافه ولتاژهای موقتی.....
۲۵۶	۷-۲-۱- اضافه ولتاژ ناشی از شدید سری
۲۶۵	۷-۲-۲- اضافه ولتاژ تشدید رازی
۲۶۸	۷-۲-۳- اضافه ولتاژ ناشی از برپرهال شدن سیستم
۲۷۰	۷-۳- اضافه ولتاژ با پیشانی کند
۲۷۱	۷-۳-۱- اضافه ولتاژ ناشی از برق دار نمودن خط از یک منبع فشرده
۲۷۹	۷-۳-۲- اضافه ولتاژهای ناشی از برق دار نمودن خط در شبکه ای با منبع مختلط
۲۸۲	۷-۳-۳- تحلیل توزیع آماری اضافه ولتاژها
۲۹۱	۷-۴- قطع جریان پیش فاز.....
۲۹۲	۷-۵- پدیده ی از دست رفتن صفر جریان
۲۹۲	۷-۵-۱- پدیده ی از دست رفتن صفر جریان و روش های پیشگیری از وقوع آن
۲۹۴	۷-۵-۲- کلید زنی ترتیبی
۲۹۶	۷-۶- تخلیه الکتریکی کابل

فصل ۸

۲۹۹	۸-۱- شبیه سازی حالت های گذرا یک مزرعه بادی.....
۲۹۹	۸-۱-۱- مدل مدار
۲۹۹	۸-۱-۲- مدل کابل و فرکانس غالب
۳۰۲	۸-۱-۳- اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه ی پارامترهای کابل
۳۰۵	۸-۱-۴- ساختار داده های EMTP
۳۰۸	۸-۱-۵- نتایج محاسبات اولیه

۳۰۹.....	۸-۱-۶- برق دار کردن کابل
۳۱۷.....	۸-۲- حالت های گذرای نیروگاه خورشیدی
۳۱۷.....	۸-۲-۱- مدل سازی یک نیروگاه خورشیدی
۳۲۲.....	۸-۲-۲- نتایج شبیه سازی
۳۳۶.....	واژه نامه