



دانشگاه صنعت آب و برق
(شهید عباسپور)

اصول مهندسی فشار قوی

مؤلف:

دکتر حمید جوادی

دانشیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

۱۳۸۳

جوادی جهانی، حمید، ۱۳۳۶ -

مبانی فشار قوی / مؤلف حمید جوادی. - تهران: دانشگاه صنعت آب و برق
(شهید عباسپور)، ۱۳۸۲.

۲۴۴ ص.: مصور، جدول.

ISBN 964-93442-8-4

فهرست نویسی براساس اطلاعات فیبا.

۱. برق - مهندسی. ۲- فشار قوی (برق).

۲. الف. دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).

ب. عنوان.

۶۲۱/۳۱

TK۱۴۵/ج۹م۲

۱۳۸۲

۸۲-۱۵۰۲۰

کتابخانه ملی ایران

اصول مهندسی فشار قوی

مؤلف: دکتر حمید جوادی، دانشیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

نوبت چاپ: اول

شمارگان: ۲۰۰۰ جلد

سال انتشار: ۱۳۸۳

اجرا: واحد مستندسازی گروه مهندسی آب دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

امور فنی و نظارت چاپ: نشر شیوه ۶۴۶۱۵۷۷

چاپ: خورشید

صحافی: شکیب

مرکز پخش:

۱- فلکه چهارم تهرانپارس - بزرگراه وفادار - بلوار شهید عباسپور - دانشگاه صنعت آب و

برق (شهید عباسپور)، تلفن: ۷۳۹۳۲۳۷۳، داخلی ۲۳۷۳، دورنگار: ۷۳۱۰۴۲۵

۲- خ انقلاب - خ اردیبهشت - بعد از لبافی نژاد - روبروی املاک مجیدیان - پلاک ۱۲۶ -

مؤسسه انتشاراتی فدک، تلفن: ۶۴۶۵۸۳۱

پیشگفتار

در سال ۱۳۵۱ به منظور افزایش مهارت فنی تکنسین‌های شاغل در صنعت برق، مرکز آموزش تخصصی برق در شمال شرق تهران فعالیت خود را آغاز کرد.

در سال ۱۳۵۹، توجه خاص شهید دکتر حسن عباسپور وزیر وقت نیرو به آموزش و تربیت نیروی انسانی، منجر به تبدیل مرکز آموزش تخصصی برق به مجتمع آموزشی و پژوهشی (شهید عباسپور) شد که علاوه بر برگزاری دوره‌های کوتاه مدت، برگزاری دوره‌های بلندمدت کاردانی و مهندسی کاربردی آب و برق در مقطع کارشناسی را نیز در برنامه خود داشت.

این مجتمع در کمتر از ده سال و با توسعه کمی و کیفی دامنه فعالیت‌های آموزشی، تجهیزات آزمایشگاهی و کارگاهی و با درخشش فارغ‌التحصیلان خود در صنعت، در سال ۱۳۷۰ مجوز تبدیل به دانشکده صنعت آب و برق و در سال ۱۳۸۳ مجوز تبدیل به دانشگاه صنعت آب و برق را از وزارت فرهنگ و آموزش عالی دریافت داشت و با پذیرش ۲۵۰ دانشجوی کارشناسی در پنج رشته مهندسی بهره‌برداری از سد و شبکه‌های آبیاری، سازه‌های آبی، آب و فاضلاب، مکانیک نیروگاه و توزیع و انتقال برق مرحله جدیدی از فعالیت خویش را پی گرفت.

با توجه به مطالب ارزشمندی که براساس تجربه طولانی اعضای هیئت علمی این دانشگاه در موضوعات تخصصی مورد نیاز صنعت آب و برق کشور جمع‌آوری شده، انتشارات دانشگاه شروع به نشر این مطالب در قالب کتاب نمود که پس از انتشار چند اثر قبلی که لیست آنها در صفحات پایانی آمده، کتاب حاضر گام دیگری در راه رشد و استقلال علمی کشور است که به جامعه دانش‌پژوهان تقدیم می‌گردد.

انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق

(شهید عباسپور)

پیشگفتار مؤلف

در اواخر قرن نوزدهم اولین نیروگاههای تامین کننده مصرف برق روشنایی بطور بسیار محدود تاسیس و مورد بهره برداری قرار گرفت این نیروگاهها در نزدیکی مراکز مصرف استقرار یافته و با ولتاژ پائین (فشار ضعیف) انرژی الکتریکی را تولید می کردند. با گسترش روز افزون مصارف الکتریکی بویژه در صنایع مختلف و شهرها، موجب شد تا مراکز تولید برق از مناطق صنعتی و شهرها فاصله پیدا نمایند و این ضرورت ایجاد شبکه های بزرگ بهم پیوسته را جهت انتقال انرژی الکتریکی موجب گردید در همین ارتباط تامین نیروی برق مورد نیاز مصرف کنندگان بطور اقتصادی و انتقال آن با تلفات کمتر یک ضرورت جدی محسوب شده و کاوشهای علمی مرتبط با آن مبنای علم مهندسی فشار قوی قرار گرفته است.

مهندسی فشار قوی کلیه مسائل فیزیکی مربوط به تولید و انتقال انرژی الکتریکی از جمله شناسایی فیزیکی عایقها، بررسی و تجزیه تحلیل شکست الکتریکی در آنها و چگونگی ارزیابی کمی و کیفی عایقها در رژیمهای مختلف کاری را پوشش می دهد. کتاب حاضر تلاش دارد از این جنبه اصول مهندسی فشار قوی را ارائه نماید. در فصل یک و دو کتاب تعاریف، اصول و قوانین مرتبط با ایجاد میدان و پتانسیل الکتریکی تشریح شده است. امروزه یکی از تجهیزات مهم در چرخه تولید و مصرف انرژی الکتریکی، خطوط انتقال انرژی (انواع هوایی و زمینی) می باشند همواره در این تجهیزات توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی یکی از پارامترهای مهم طراحی آنها محسوب شده و بدین خاطر در فصل سوم روابط مورد نیاز برای تجزیه تحلیل این پارامترها مطرح و چگونگی توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی بر اساس روشهای تحلیلی برای نمونه هانی از خطوط انتقال انرژی ارائه شده است.

تجزیه و تحلیل میدان و پتانسیل الکتریکی در تجهیزات فشار قوی که قابل مدلسازی در سیستم یک بعدی نیستند بسیار پیچیده و دشوار بوده و از آنجا که روشهای تحلیلی جزء برای حالت های خیلی خاص کارائی لازم را ندارند عموماً نیاز است برای حل میدان الکتریکی در تجهیزات برقی از روشهایی تجربی و عددی استفاده گردد که خوشبختانه با گسترش روز افزون دانش کامپیوتر این استفاده خیلی گسترده تر و کار آتر شده و امروزه بسته نرم افزارهای پر

قدرتی تهیه شده که در زمان بسیار کوتاه نتایج محاسبه و توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در تجهیزات را استخراج می‌نمایند، بدین منظور در فصل چهارم اصول این روشها تشریح شده است. یکی از کاربردهای اصلی تجزیه تحلیل میدان الکتریکی در مرحله طراحی تجهیزات می‌باشد تا کمیت و کیفیت عایق بخوبی مشخص گردد اما پس از مرحله طراحی وقتی تجهیزات فشار قوی به مرحله ساخت و تولید انبوه می‌رسند اطمینان از صحت عملکرد آنها بویژه وقتی که تحت پتانسیل الکتریکی قرار می‌گیرند نیاز است یعنی لازم است کلیه تجهیزات قبل از نصب در سیستمهای قدرت و تحت ولتاژ قرار گرفتن در یک سیستم آزمایشگاهی (که شرایط واقعی بهره برداری را مشابه سازی می‌نمایند) مورد ارزیابی و کنترل کیفی قرار گیرند لذا در فصل پنجم و ششم روشهای تولید انواع ولتاژهای بالا و اندازه گیری آنها تشریح شده است. در تجهیزات سیستمهای انتقال و توزیع انرژی الکتریکی عایقهای متعددی از نوع گاز، مایع و جامد استفاده می‌شوند عایق هوا در دسترسترین و ارزاترین این عایقها می‌باشد که در طول هزاران کیلومتر خطوط انتقال و توزیع هوایی استفاده شد است بدین جهت فصل هفتم به شناخت از اصول مکانیزم شکست الکتریکی در عایقها بویژه در عایق هوا اختصاص یافته است.

این کتاب اقتباس از مطالبی است که چندین سال متوالی به صورت جزوه برای تدریس درس اصول مهندسی فشارقوی در دانشکده صنعت آب و برق ترجمه، گردآوری و تالیف کرده ام لذا از آندهسته از دانشجویانی که در تکمیل مطالب و اصلاح نگارشی فصلهای کتاب اینجانب را کمک نمودند تشکر می‌نمایم و از تلاش و کوشش همکاران خود در دفتر انتشارات دانشکده و واحد مستندسازی که مسئولیت چاپ کتاب را نیز بهمهده گرفتند قدردانی و سپاس خود را اعلام نموده و از هم اکنون آماده پذیرش انتقادات و اصلاحات سازنده شما همکاران محترم، افراد و کلیه دانشجویانی که این کتاب را استفاده خواهند نمود می‌باشم.

دکتر حمید جوادی

دانشیار گروه مهندسی برق

مهرماه ۱۳۸۳

فصل اول: کلیات و تعاریف

- ۱-۱- توجیه استفاده از ولتاژهای فشار قوی..... ۱
- ۲-۱- آنالیز برداری..... ۳
- ۱-۲-۱- سیستمهای مختصات..... ۳
- ۲-۲-۱- نمایش بردارها و عملیات برداری..... ۳
- ۳-۲-۱- نمایش المانهای طولی، سطحی و حجمی..... ۴
- ۴-۲-۱- دیورژانس یک تابع برداری..... ۵
- ۵-۲-۱- گرادینت یک تابع اسکالر..... ۶
- ۶-۲-۱- لاپلاسین..... ۶

فصل دوم: میدان الکتریکی

- ۱-۲- تعریف و قوانین اصلی..... ۹
- ۲-۲- محاسبات کلاسیک میدان..... ۱۰
- ۱-۲-۲- شدت میدان یک دو قطبی الکتریکی..... ۱۱
- ۲-۲-۲- اختلاف پتانسیل..... ۱۲
- ۳-۲- چگالی شار الکتریکی..... ۱۳
- ۴-۲- ضریب شوایگر (Schwaiger) یا ضریب راندمان میدان الکتریکی..... ۱۵
- ۵-۲- محاسبه توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی..... ۱۶
- ۱-۵-۲- میدان الکتریکی یک گوی کروی توخالی با بار الکتریکی Q^+ ۱۷
- ۲-۵-۲- میدان الکتریکی یک گوی توپر با بار Q^+ ۱۸
- ۳-۵-۲- میدان همگن..... ۱۸
- ۴-۵-۲- میدان الکتریکی استوانه با بار q ۲۰
- ۵-۵-۲- میدان الکتریکی دو گوی هم مرکز با بار مخالف..... ۲۱
- ۶-۵-۲- میدان الکتریکی دو قطب سوزن-سوزن..... ۲۲
- ۶-۲- میدان الکتریکی بار خطی محدود..... ۲۳

فصل سوم: پتانسیل و میدان الکتریکی در کابلها و خطوط هوایی

۳۵	۱-۳- مقدمه
۳۶	۲-۳- معادلات حاکم بر میدانهای الکتریکی
۳۷	۳-۳- محاسبه میدان و پتانسیل الکتریکی در کابل
۴۳	۴-۳- میدان الکتریکی (متناوب)
۴۴	۱-۴-۳- میدان الکتریکی یک سیم طولانی
۴۶	۲-۴-۳- میدان الکتریکی خطوط انتقال نیرو
۴۹	۳-۴-۳- خطوط انتقال یک فاز، یک مداره با هادی ساده
۵۱	۴-۴-۳- خطوط انتقال یک فاز، یک مداره با هادی باندل
۵۲	۵-۴-۳- خطوط انتقال یک فاز، دو مداره با هادی ساده
۵۴	۶-۴-۳- خطوط انتقال یک فاز، دو مداره با هادی باندل
۵۴	۷-۴-۳- خطوط انتقال سه فاز، یک مداره با هادی ساده
۵۶	۸-۴-۳- خطوط انتقال سه فاز، یک مداره با هادیهای باندل
۵۷	۹-۴-۳- خطوط انتقال سه فاز، دو مداره با هادی ساده
۵۹	۱۰-۴-۳- خطوط انتقال سه فاز، دو مداره با هادی باندل
۵۹	۵-۳- پتانسیل الکتریکی
۶۰	۱-۵-۳- پتانسیل ناشی از یک سیم طولانی
۶۱	۲-۵-۳- پتانسیل ناشی از خطوط انتقال نیرو
۶۲	۳-۵-۳- خطوط انتقال یک فاز، یک مداره با هادی ساده
۶۳	۴-۵-۳- خطوط انتقال یک فاز، یک مداره با هادی باندل
۶۳	۵-۵-۳- خطوط انتقال یک فاز، دو مداره با هادی ساده
۶۳	۶-۵-۳- خطوط انتقال یک فاز، دو مداره با هادی باندل
۶۳	۷-۵-۳- خطوط انتقال سه فاز، یک مداره با هادی ساده
۶۴	۸-۵-۳- خطوط انتقال سه فاز، یک مداره با هادیهای باندل
۶۴	۹-۵-۳- خطوط انتقال سه فاز، دو مداره با هادیهای ساده
۶۵	۱۰-۵-۳- خطوط انتقال سه فاز، دو مداره با هادیهای باندل
۶۵	۶-۳- مثالهای نمونه
۶۵	۱-۶-۳- برج N

۶۸..... ۲-۶-۳-۲-۳ NN برج

۷۰..... ۳-۶-۳-۲-۳ S2EL برج

فصل چهارم. محاسبه پتانسیل و میدانهای الکتریکی در سیستمهای دو بعدی

۷۳..... ۱-۴-۱- تجزیه و تحلیل میدانهای الکتریکی توسط روشهای تجربی

۷۳..... ۴-۱-۱- ترسیم میدان با دست

۷۴..... ۴-۱-۲- میدان یکنواخت در محورهای مختصات کارتزین

۷۵..... ۴-۲-۲- ترسیم میدان بین دو استوانه هم مرکز در محورهای مختصات استوانه‌ای

۷۷..... ۴-۱-۴- ترسیم میدان با مواد عایقی مختلف

۷۸..... ۴-۲- شبکه امپدانس

۷۹..... ۴-۲-۱- هدایت الکتریکی تشابهی

۸۰..... ۴-۲-۲- ظروف الکترولیت

۸۰..... ۴-۲-۳- روش کاغذ نیمه هادی

۸۱..... ۴-۳- روشهای تحلیلی حل معادلات الکترواستاتیک

۸۲..... ۴-۳-۱- انتگرالگیری از معادلات لاپلاس

۸۳..... ۴-۳-۲- حل معادله لاپلاس در میدانهای یک بعدی

۸۳..... ۴-۳-۳-۱- جواب معادله دیفرانسیلی لاپلاس در سیستم کارتزین (یک بعدی)

۸۵..... ۴-۳-۳-۲- جواب معادله دیفرانسیلی در سیستم مختصات قطبی (یک بعدی)

۸۶..... ۴-۳-۳- حل معادلات لاپلاس در میدانهای دو بعدی

۸۶..... ۴-۳-۱- استفاده از توابع مجزا

۸۷..... ۴-۳-۳- حل یک مثال نمونه به روش توابع مجزا

۹۲..... ۴-۳-۴- تبدیل کنفورم

۹۶..... ۴-۴- روشهای عددی حل معادلات الکترواستاتیک

۹۷..... ۴-۴-۱- روش تفاضل محدود

۹۹..... ۴-۴-۲- اصول حل معادلات دیفرانسیل با روش عددی تفاضل محدود (FDM)

۱۰۰..... ۴-۴-۲-۱- تعریف چهارگوشه ها

۱۰۱..... ۴-۴-۲-۲- نوشتن معادلات اختلاف محدود (FDM) در مختصات کارتزین

۱۰۶..... ۴-۴-۲-۲-۱- تقارن نسبت به محور X ها

- ۳-۷-۵- آنالیز مدارهای سری ژنراتور ضربه (نوع R-L-C)..... ۱۴۱
- ۴-۷-۵- آنالیز مدار ضربه RC..... ۱۴۲
- ۵-۷-۵- تقریب‌های استفاده شده جهت محاسبه زمانهای پیشانی و پشت موج..... ۱۴۷
- ۶-۷-۵- ژنراتور ضربه چند مرحله‌ای..... ۱۴۸
- ۷-۷-۵- تولید جریان ضربه فشار قوی..... ۱۵۱

فصل ششم. اندازه‌گیری ولتاژهای بالا

- ۱-۶- اندازه‌گیری ولتاژ فشار قوی..... ۱۵۵
- ۲-۶- اندازه‌گیری ولتاژ دائم (d.c)..... ۱۵۶
- ۱-۲-۶- مقاومت اهمی بزرگ سری با میکرو آمپر متر..... ۱۵۷
- ۲-۲-۶- مقسم پتانسیل مقاومتی برای ولتاژ فشار قوی d.c..... ۱۵۸
- ۳-۲-۶- ولتمترهای تولیدی..... ۱۶۰
- ۳-۶- اندازه‌گیری ولتاژ متناوب فشار قوی..... ۱۶۳
- ۱-۳-۶- ولتمترهای ابعادنس سری..... ۱۶۳
- ۲-۳-۶- مقسم پتانسیل..... ۱۶۶
- ۳-۳-۶- ترانسفورمر ولتاژ خازنی (C. V. T)..... ۱۶۸
- ۴-۳-۶- ترانسفورمرهای ولتاژ (نوع القایی یا مغناطیسی)..... ۱۷۴
- ۵-۳-۶- ولتمترهای الکترواستاتیک..... ۱۷۵
- ۶-۳-۶- اندازه‌گیری حداکثر ولتاژ متناوب بوسیله دو الکتروود کروی..... ۱۷۷
- ۷-۳-۶- اندازه‌گیری حداکثر فشار الکتریکی متناوب بوسیله روش Chubb & Fortescue..... ۱۸۲
- ۴-۶- اندازه‌گیری فشار ضربه..... ۱۸۴
- ۱-۴-۶- مقسم پتانسیل برای ولتاژ ضربه فشار ضعیف..... ۱۸۵
- ۲-۴-۶- مقسم ولتاژ برای اندازه‌گیری ضربه فشار قوی..... ۱۸۷
- ۳-۴-۶- مقسم ولتاژ خازنی..... ۱۸۹
- ۴-۴-۶- مقسم پتانسیل ابعادنس..... ۱۸۹
- ۵-۴-۶- اندازه‌گیری حداکثر فشار ضربه..... ۱۹۰
- ۵-۶- توزیع ولتاژ بر روی زنجیره مفره..... ۱۹۲
- ۴-۵-۶- روشهای متداول برای یکنواخت کردن توزیع پتانسیل بر روی مفره ها..... ۱۹۷

فصل هفتم. شکست الکتریکی در گازها

- ۲۰۵..... ۱-۷- گازها به عنوان مواد عایقی
- ۲۰۶..... ۲-۷- پروسه یونیزاسیون Ionization Process
- ۲۰۸..... ۳-۷- انواع یونیزاسیون و مبانی فیزیکی آن
- ۲۱۲..... ۴-۷- معادله تانزند برای رشد جریان تخلیه Townsend's Growth Equation
- ۲۱۳..... ۵-۷- ضریب دوم یونیزاسیون تانزند (γ)
- ۲۱۵..... ۶-۷- معیارهای تانزند برای شکست الکتریکی
- ۲۱۷..... ۷-۷- قانون پاشن Paschen's Law
- ۲۱۸..... ۸-۷- قانون پاشن با استفاده از چگالی نسبی
- ۲۲۰..... ۹-۷- تئوری شکست Streamer در گازها
- ۲۲۲..... ۱۰-۷- زمان تاخیر برای شکست Time Lags for Breakdown
- ۲۲۴..... ۱۱-۷- محاسبه و تعیین ضرایب α و γ بطور تجربی
- ۲۲۷..... مراجع