

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تعاريف توان

و

مکانیزم فیزیکی انتقال آن

نویسنده:

پروفیسور الکساندر ایگلس امانوئل

ترجمہ:

دکتر عباس کتابی

(دانشیار، دانشگاه کاشان)

مهندس محمد فرشادینیا



انتشارات مرسل

سرشناسه: امانوئل، الگزاندر ایگلس، Alexander Elgeles Emanuel

عنوان و نام پدیدآور: تعاریف توان و مکانیزم فیزیکی انتقال آن

مشخصات نشر: کاشان: مرسل، ۱۳۹۴.

مشخصات ظاهری: ۳۵۶ص: مصور، جدول، نمودار.

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۹۷۲-۴۰۹-۶

وضعیت فهرست‌نویسی: فیبای مختصر.

یادداشت: فهرست‌نویسی کامل این اثر در نشانی: <http://opac.nlai.ir>

قابل دسترسی است.

یادداشت: نمایه

شناسه افزوده: فرشادینا، محمد، مترجم

شناسه افزوده: کتابی، عباس، ۱۳۵۰ -

شماره کتابشناسی ملی: ۳۸۰۳۹۷۵

■ تعاریف توان و مکانیزم فیزیکی انتقال آن

■ دکتر عباس کتابی - مهندس محمد فرشادینا

■ انتشارات مرسل با همکاری انتشارات دانشگاه کاشان

■ چاپ اول / ۱۳۹۴ / ۱۰۰۰ نسخه

■ چاپخانه: نهضت

■ شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۹۷۲-۴۰۹-۶

■ قیمت: ۱۹۰۰۰ تومان

■ حق چاپ محفوظ است و تکثیر کل یا بخشی از این کتاب

شرعاً و قانوناً مجاز نمی‌باشد.



دانشگاه کاشان

۵۹۱



☑ ناشر برگزیده ۲ دوره

☑ نمایندگان بین المللی کتاب تهران (۸۹ و ۱۳۸۴)

☑ ناشر شایسته تقدیر سال ۱۳۹۲

www.morsalpub.com

ص پ: ۸۷۱۳۵/۱۳۳۵

تلفکس: ۰۳۱-۵۵۴۵۴۵۱۳ همراه: ۰۹۱۳ ۱۶۱ ۳۵۴۶

خرید اینترنتی: www.morsalpub.com

انتقادات و پیشنهادات خود را به شماره ۰۵۰۰۱۳۳۳۴۴۴ ارسال نمایید.

تقديم به:

پيشگاه مبارك امام عصر ارواحنا له الفداء

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ط	پیشگفتار مترجمین
ک	پیشگفتار
م	مقدمه
۱	فصل اول: مکانیزم فیزیکی انتقال انرژی الکتریکی
۱۹	۱-۱- تمرین
۲۲	۲-۱- مراجع
۲۳	فصل دوم: سیستم‌های تک‌فاز با شکل موج سینوسی
۲۳	۱-۲- مقاومت
۲۸	۲-۲- سلف
۳۰	۳-۲- خازن
۳۲	۴-۲- بارهای R-L-C
۳۳	۵-۲- توان ظاهری
۳۸	۶-۲- مفهوم ضریب توان و اصلاح ضریب توان
۴۳	۷-۲- توضیحاتی پیرامون ضریب توان
۴۶	۸-۲- سایر روش‌های کنترل و جبران توان راکتیو
۵۱	۹-۲- جبران سری
۵۲	۱۰-۲- توان راکتیو ایجاد شده توسط المان‌های مکانیکی ذخیره کننده انرژی
۵۵	۱۱-۲- تعبیر فیزیکی توان‌های لحظه‌ای به وسیله بردار پوینتینگ
۶۶	۱۲-۲- تمرین
۷۲	۱۳-۲- مراجع
۷۳	فصل سوم: سیستم‌های تک‌فاز با شکل موج‌های غیر سینوسی

۷۴	۱-۳ - مقاومت خطی
۷۹	۲-۳ - سلف خطی
۸۲	۳-۳ - خازن خطی
۸۳	۴-۳ - مدار R-L-C خطی سری
۸۶	۵-۳ - مقاومت غیر خطی
۹۲	۶-۳ - سلف غیر خطی
۹۵	۷-۳ - بار غیر خطی: حالت کلی
۱۰۴	۸-۳ - تمرین
۱۰۸	۹-۳ - مراجع
۱۰۹	فصل چهارم: توان ظاهری در سیستم‌های تکفاز غیر سینوسی
۱۱۱	۱-۴ - روش کنستانتین بودینو
۱۱۶	۲-۴ - روش استانیسلا فریز
۱۱۹	۳-۴ - روش مانفرد دینبراک
۱۲۵	۴-۴ - روش لزگ چارنسکی
۱۲۸	۵-۴ - روش امانوئل (مؤلف کتاب)
۱۳۲	۶-۴ - مقایسه میان روش‌ها
۱۳۹	۷-۴ - جبران ضریب توان
۱۴۹	۸-۴ - توضیحاتی پیرامون اثر پوستی، توان ظاهری و ضریب توان
۱۵۳	۹-۴ - مسئله‌ی جمع‌پذیری
۱۵۸	۱۰-۴ - تمرین
۱۶۱	۱۱-۴ - مراجع
۱۶۵	فصل پنجم: سیستم‌های سه‌فاز با شکل موج‌های سینوسی
۱۶۶	۱-۵ - پیش‌زمینه: سیستم‌های متعادل و متقارن
۱۶۹	۲-۵ - سیستم‌های سه‌فاز نامتعادل
۱۷۲	۳-۵ - معضل ضریب توان
۱۷۸	۴-۵ - توان و مؤلفه‌های متقارن
۱۷۸	۱-۴-۵ - چگونگی تولید مؤلفه‌های متقارن
۱۸۲	۱-۴-۵ - بیان روابط توان بوسیله‌ی مؤلفه‌های متقارن

۱۸۷	۵-۵- تفکیک مولفه های توان ظاهری موثر.....
۱۸۷	۵-۵-۱- روش FBD.....
۱۹۵	۵-۵-۲- روش چارنسکی.....
۱۹۷	۵-۵-۳- روش به کار رفته در استاندارد IEEE 1459-2010.....
۱۹۹	۵-۵-۴- مقایسه ی بین دو مکتب فکری عمده ی مهندسی.....
۲۱۵	۵-۶- تمرین.....
۲۱۷	۵-۷- مراجع.....
۲۱۹	فصل ششم: سیستم های سه فاز غیر سینوسی نامتعادل.....
۲۲۰	۶-۱- روش توان ظاهری برداری.....
۲۲۱	۶-۲- روش استاندارد IEEE 1459-2010.....
۲۲۶	۶-۳- روش استاندارد DIN 40110.....
۲۳۱	۶-۳-۱- روش استاندارد IEEE 1459-2010.....
۲۳۲	۶-۳-۲- روش استاندارد DIN 40110.....
۲۳۴	۶-۴- مشاهدات و پیشنهادات.....
۲۳۸	۶-۵- تمرین.....
۲۴۰	۶-۶- مراجع.....
۲۴۳	فصل هفتم: تعاریف توان برای بارهای متغیر با زمان.....
۲۴۵	۷-۱- پیش زمینه: یک مثال ساده.....
۲۴۹	۷-۲- حالت سینوسی تک فاز.....
۲۵۳	۷-۲-۱- معادلات تحلیلی توان ها: حالت سینوسی تک فاز.....
۲۵۴	۷-۳- حالت غیر سینوسی تک فاز.....
۲۵۶	۷-۴- حالت سینوسی نامتعادل سه فاز.....
۲۵۹	۷-۵- سیستم سه فاز در حالت غیر سینوسی نامتعادل.....
۲۶۵	۷-۶- تمرین.....
۲۶۸	۷-۷- مراجع.....
۲۶۹	فصل هشتم: ضمیمه ها.....
۲۶۹	۸-۱- ضمیمه ی ۱: توزیع میدان الکترواستاتیکی در یک کابل کوآکسیال.....
۲۷۲	۸-۲- ضمیمه ی ۲: بردار پوینتینگ ناشی از جریان جابجایی.....

۲۷۳.....	۳-۸- ضمیمه‌ی ۳: میدان الکتریکی ناشی از میدان مغناطیسی متغیر با زمان
۲۷۶.....	۴-۸- ضمیمه‌ی ۴: موج الکترومغناطیسی در امتداد خط سه‌فاز
۲۸۴.....	۵-۸- ضمیمه‌ی ۵: معادله‌ی (۵-۹۹)
۲۸۴.....	۶-۸- ضمیمه‌ی ۶: حداکثر توان اکتیو در سیستم سه‌فاز چهارسیمه
۲۸۹.....	۷-۸- ضمیمه‌ی ۷: توضیحاتی پیرامون نسبت
۲۹۱.....	۸-۸- ضمیمه‌ی ۸: استفاده از وارمترها با حضور ولتاژها و جریان‌های غیر سینوسی و نامتقارن
۳۰۲.....	۹-۸- مراجع
۳۰۳.....	واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی
۳۱۱.....	فهرست نمایه

پیشگفتار مترجمان

کتابی که در پیش رو دارید، ترجمه‌ی کتاب زیر است:
"Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow" by: Alexander Eigeles Emanuel, 2010, Wiley-IEEE Press.

این کتاب به دلایل زیر برای ترجمه انتخاب شده است:

- قیمت‌گذاری انرژی و قراردادهای خرید و فروش برق بر مبنای اندازه‌گیری مولفه‌های مختلف توان بوده و لذا اهمیت تعریف درست و اندازه‌گیری دقیق توان از دیدگاه اقتصادی، روشن است.
- نویسنده ضمن بررسی سابقه شکل‌گیری تئوری‌های توان و توصیف کامل نظریه‌های مربوط به دو استاندارد اصلی: IEEE 1459-2010 و DIN 40110-2:2002-11 به تحلیل و مقایسه‌ی این دو استاندارد در اندازه‌گیری مولفه‌های مختلف توان پرداخته است.
- توضیح فیزیکی چگونگی انتقال توان الکتریکی تحت شرایط مختلف شبکه (تک فاز و سه فاز، سینوسی و غیر سینوسی، متعادل و نامتعادل) و معرفی مفاهیم جدید "توان غیر اکتیو" و "توان تصادفی".
- شروع مباحث با ارائه‌ی روابط ریاضی مربوط، از سطح ساده و سپس پرداختن به مطالب پیچیده‌تر.
- این کتاب براحتی قابل فهم بوده و هر فصل با تمرین‌های مرتبط و لیستی از مراجع مرتبط با موضوع، پایان می‌یابد. تمام مباحث همراه با ارائه‌ی مثال یا نتایج عملی توضیح داده شده که باعث فهم بهتر مطالب خواهد شد.
- نویسنده کتاب، فردی خبیره و معروف در زمینه‌ی توان راکتیو و اندازه‌گیری توان بوده و دارای مقالات متعددی در ژورنالها و کنفرانسهای بین المللی می‌باشد.

این کتاب برای مهندسان و مشاوران برق که در حوزه‌ی انرژی، کیفیت توان، اندازه‌گیری تبادل انرژی، طراحی و تولید دستگاه‌های اندازه‌گیری، مقررات مربوط به انرژی‌های نو و شبکه‌های هوشمند، و قیمت گذاری انرژی فعالیت میکنند، سودمند است.

همچنین این کتاب بعنوان مرجع برای اساتید، پژوهشگران دانشگاهی و دانشجویانی مرتبط با مباحث کنترل توان راکتیو، کیفیت توان، یا شبکه‌های هوشمند، مفید و قابل استفاده است.

اگرچه با مرور چندباره‌ی مطالب سعی شده است تا اشتباهات تایپی به حداقل ممکن برسد، اما از خوانندگان عزیز بویژه از اساتید و دانشجویان گرامی خواهشمندیم که هرگونه اصلاح یا پیشنهاد خود را جهت پربارتر شدن چاپ‌های بعدی کتاب برای مترجمین ارسال نمایند.

از معاونت پژوهشی و مدیریت انتشارات دانشگاه کاشان که با حمایت مالی امکان چاپ این اثر را فراهم نموده است، تشکر و قدردانی می‌گردد.

دکتر عباس کتابی - مهندس محمد فرشادینیا

دانشگاه کاشان، بهار ۱۳۹۴

پیشگفتار

امروزه سیاست‌گذاری در حوزه انرژی به یک اولویت ملی تبدیل شده است. حفظ منابع طبیعی، منابع انرژی تجدیدپذیر و جایگزینی سوخت‌های فسیلی با الکتریسیته در حمل و نقل، مهمترین فعالیت‌های این حوزه هستند. بنابراین، هم‌اینک مناسب‌ترین زمان برای ارائه تفسیری صریح و قاطع از مفهوم «توان» و نحوه محاسبه و اندازه‌گیری مؤلفه‌های آن می‌باشد. پروفیسور الکس امانوئل در این کتاب به انجام این مهم پرداخته است. این کتاب، با جمع‌آوری مطالب و معرفی گویای سیر تکاملی پر فراز و نشیب در تفسیر مفهوم "حاصل ضرب V-I"، خدمت بزرگی به حرفه‌ی مهندسی کرده است. تمایل روز افزون به استفاده از انرژی برق و همچنین بهره‌گیری از مبدل‌های الکترونیک قدرت که با ایجاد هارمونیک همراه هستند، منجر به بررسی موشکافانه و دقیق‌تر مفهوم «توان» و نحوه اندازه‌گیری آن شده است. پیشنهادها، اظهار نظرها و نقدهای مرتبط با این موضوع، منجر به معرفی یک سری از استانداردهای IEEE و DIN شده که به تأثیرات ناشی از تکنولوژی‌های جدید پرداخته و تأکید بیشتری بر افزایش دقت از نگاه اقتصادی داشته‌اند. با توجه به تجدید ساختار در صنعت برق امروزی که دارای بازارهای زمان حقیقی است، دورنمای قیمت‌گذاری انرژی، معرفی یک زیرساخت پیشرفته اندازه‌گیری، دقیق بودن اندازه‌گیری‌ها، و تفسیر داده‌های توان، امری حیاتی می‌باشد.

هدف پروفیسور امانوئل در این کتاب «درک عمیق مکانیزم فیزیکی حاکم بر انتقال توان» است. او این کار را با توصیف بنیادین توان با استفاده از بردار پوینتینگ آغاز کرده، سپس با دقت و به صورت منطقی به سیستم‌های فیزیکی فشرده گذر می‌کند. کم‌کم و با کامل‌تر شدن مباحث، در نهایت به کلیه مؤلفه‌های «توان» مربوط به حاصل ضرب V-I در سیستم‌های سه فاز چهار سیمه‌ی نامتعادل با جریان‌ها و ولتاژهای غیر سینوسی، پرداخته می‌شود. در این بین، او بر پایه تحقیقات صورت گرفته توسط محققانی چون بودینو، فریز، دینبراک و زارنکی -پیشگامان تلاش در یافتن تفسیری منطقی برای حاصل ضرب جریان در ولتاژ- به انجام این مهم می‌پردازد. همچنین مقایسه‌های صورت گرفته توسط

او بین روش‌های پیشنهادی این محققان و استاندارد اخیر IEEE 1459-2010 بسیار جالب توجه می‌باشد.

مهندسان کمی مانند پروفیسور امانوئل دارای صلاحیت لازم برای بر عهده گرفتن کار پر اهمیت نوشتن این کتاب هستند. او تمام زندگی حرفه‌ای خود را به مطالعه مسائل مرتبط با انرژی پرداخته، و یک متخصص و مدرس پیشرو در زمینه سیستم‌های قدرت می‌باشد. واضح است که نوشتن این کتاب حاصل علاقه‌ی او بوده و ما جامعه‌ی مهندسين، مدیون پروفیسور امانوئل به خاطر ثمره‌ی حاصل از این تلاش هستیم.

ژان. ج. کاساکیان

پروفیسور مهندسی برق و کامپیوتر

آزمایشگاه الکترومغناطیس و سیستم‌های الکترونیکی

مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT) - آمریکا

مقدمه

امروزه چگونگی پیاده‌سازی یک «زیرساخت پیشرفته اندازه‌گیری» تابعی از تکنولوژی تولید «وسایل اندازه‌گیری هوشمند» می‌باشد. تلاش برای تحقق وسیله اندازه‌گیری هوشمند، جزئی از مسیر دستیابی به شبکه‌های هوشمند و مدیریت انرژی است. زمانی که انرژی الکتریکی عبوری و مصرفی توسط وسایل اندازه‌گیری هوشمند پایش شود، تولیدکننده انرژی الکتریکی با استفاده از داده‌های زمان حقیقی، اطلاعاتی را بدست می‌آورد که قابلیت‌های: کنترل از راه دور مصرف‌کننده‌ها، تنظیم پاسخگویی به تقاضا، مدیریت دارایی‌ها، پیاده‌سازی برنامه‌های قیمت‌گذاری متغیر، و امکانات زیاد دیگری را فراهم می‌آورد که منجر به کاهش تلفات توان و کاهش تعداد سطوح منحنی بار شده و در نتیجه راندمان انتقال انرژی بهبود می‌یابد. وسایل اندازه‌گیری هوشمند با افزایش قابلیت اطمینان تغذیه و همچنین امکان پایش میزان مصرف و هزینه انرژی، برای مصرف‌کنندگان نیز مفید می‌باشند. این فناوری موجب انگیزه‌ی مضاعفی برای انجام تغییرات رفتاری لازم در شبکه شده که می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه میزان مصرف انرژی گردد.

طراحی یک وسیله اندازه‌گیری به گونه‌ای است که با تعریف ریاضی کمیت الکتریکی مورد اندازه‌گیری هم‌خوانی داشته باشد؛ همچنین، تعریفی که طراحی چنین وسایل اندازه‌گیری هوشمندی بر پایه آن بنا نهاده شده بایستی با قوانین فیزیک هم‌خوانی کامل داشته و اطلاعاتی را فراهم نماید که تعیین دقیق نرخ انتقال انرژی و کیفیت آن، پخش بهینه‌ی توان، و برنامه‌ریزی کارآمد تعمیر و نگهداری را ممکن سازد. وسایل اندازه‌گیری امروزی - حتی برخی از مدرن‌ترین وسایل اندازه‌گیری الکترونیکی - بر پایه روش‌هایی طراحی شده‌اند که به دهه ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ باز می‌گردد. وسایل اندازه‌گیری که انرژی (kWh) و توان اکتیو (kW) را اندازه می‌گیرند، اندازه‌گیری‌های دقیقی را حتی در شرایط نامتعادل و غیر سینوسی فراهم می‌آورند؛ با این حال، وسایل اندازه‌گیری استفاده شده برای توان ظاهری (kVA) و توان غیراکتیو (kvar) در صورتی که شکل موج ولتاژ و جریان دارای اغتشاش باشد، دارای خطاهای قابل توجهی می‌گردند. چنین خطاهایی ریشه در تعاریف ناکافی توانی دارد که در طراحی مفهومی چنین وسایل اندازه‌گیری استفاده می‌شود. واضح است که چنین شرایطی منجر به جستجو برای راه حلی کاربردی

می‌شود. اقدامات انجام شده برای ارائه تعاریف قابل پذیرش از سوی همگان، کند بوده و مانع آن هم عوامل اقتصادی مربوط به وجود زیرساخت‌های فعلی است که در محدودی بزرگی اجرا شده و تغییر آن هزینه زیادی خواهد داشت. بحث بر سر تعاریف توان ظاهری و تفکیک آن به مولفه‌ها که از حدود یک قرن پیش آغاز شده، هنوز به نتیجه‌ای نرسیده است. من خود به‌شخصه در این بحث ادامه‌دار مشارکت فعال داشته و مشاهده کرده‌ام که چگونه تلاش شدید در این زمینه منجر به پیدایش دو استاندارد مهم شده است:

۱- استاندارد IEEE 1459-2010: تعاریفی برای اندازه‌گیری کمیت‌های توان الکتریکی تحت شرایط سینوسی، غیر سینوسی، متعادل، و یا نامتعادل.

۲- استاندارد DIN 40110-2:2002-11: کمیت‌های استفاده شده در تئوری جریان متناوب^۱ - بخش دوم: مدارهای چند فازه.

هر دو استاندارد، تعاریف بهبود یافته‌ای از توان ارائه می‌کنند که توسط تعداد زیادی از متخصصان به دقت مورد بررسی و تایید قرار گرفته و در مقالات متعددی به آن‌ها پرداخته شده است. خواستگاه اصلی این کتاب مبتنی بر استاندارد IEEE 1459-2010 می‌باشد. بسیاری از خوانندگان این استاندارد از نامفهوم بودن آن شکایت داشته و به دنبال توضیحات بیشتر هستند. انگیزه‌ی مهم دیگر برای نگارش این کتاب، ناشی از علاقمندی به داشتن سهمی کوچک در گسترش وسایل اندازه‌گیری هوشمند است. اهداف اصلی این کتاب عبارتند از:

۱- تفهیم مکانیزم فیزیکی حاکم بر انتقال انرژی الکتریکی تحت شرایط مختلف شبکه: تک فاز و سه فاز، سینوسی و غیر سینوسی، متعادل و نامتعادل.

۲- ایجاد قابلیت ارائه و توجیه تعاریف جدیدی از توان که تنها بر مبنای روابط ریاضی نبوده بلکه مبتنی بر مفاهیم واقعی و درک صحیح اثرات متقابل بین منابع انرژی، بارها، تجهیزات، و محیط باشد. چنین تعاریفی باید بر اساس درک صحیح مشخصات فیزیکی مؤلفه‌های مختلف توان باشند.

۳- توضیح، بحث، و معرفی تعاریف توانی که نقشی مهمی در تاریخچه‌ی موضوع ایفا کرده و مسیر را برای رسیدن به دو استاندارد مورد اشاره، هموار کرده‌اند.

۴- مقایسه دو استاندارد.

1 - Alternating current theory

این کتاب شامل هشت فصل می‌باشد. فصل اول به تشریح نحوه انتقال انرژی می‌پردازد. در این فصل مفهوم توان به عنوان نرخ انتقال انرژی مطرح شده و بر این اصل تاکید می‌گردد که انرژی الکتریکی توسط یک موج الکترومغناطیسی منتقل می‌شود که توسط چگالی توان (W/m^2) توصیف شده و تابعی از زمان و مکان می‌باشد. چنین امواج الکترومغناطیسی در طول هادی‌ها حرکت کرده (لغزیده) و حاوی چندین مؤلفه هستند. در این کتاب، ابزار اصلی به منظور تعیین ویژگی‌هایی که به تفکیک مؤلفه‌های اصلی انرژی کمک می‌کند، بردار پوینتینگ می‌باشد. به کمک مثال‌هایی ساده نشان داده می‌شود که برخی مؤلفه‌ها، اکتیو بوده و انرژی را به صورت یک‌طرفه از منبع به بار منتقل می‌کنند. دیگر مؤلفه‌ها نیز بین بار و منبع نوسان کرده و تأثیری در انرژی خالص منتقل شده نداشته، اما باعث افزایش تلفات توان در هادی‌های اتصال دهنده بار به منبع می‌شوند. در انتهای این فصل کلیدی، نتیجه‌گیری می‌شود که بردار پوینتینگ ابزار بسیار مناسبی برای تجسم چگونگی توزیع توان عبوری در مکان و زمان بوده؛ و از همه مهم‌تر، به تعیین درست مؤلفه‌های انرژی و توان مربوط به توان ظاهری کمک می‌کند. بنابراین این ابزار منجر به تعاریف توانی منطبق بر قوانین طبیعی می‌گردد.

فصل دوم این کتاب به سیستم تک فاز با شکل موج سینوسی می‌پردازد. علاوه بر معرفی تعاریف جدیدی نظیر توان ذاتی، به مرور تعاریف پایه توان نیز پرداخته می‌شود. در این فصل به طور مفصل به مفهوم توان ظاهری پرداخته شده و نشان داده می‌شود که این توان، کمیتی کلیدی بوده که دارای نقشی اساسی در اندازه تجهیزات، تلفات تجهیزات، و پیری تجهیزات و طول عمر آن‌ها می‌باشد. در ادامه نیز مفهوم ضریب توان به تفصیل ارائه می‌گردد. بخش بزرگی از این فصل به بحث در خصوص نوسانات توان بین بار و منبع پرداخته و روابط مربوط به توان‌های راکتیو و غیر اکتیو معرفی می‌گردند. در این فصل نشان داده می‌شود که توان راکتیو لزوماً تنها توسط بارهای سلفی و خازنی تولید نشده، بلکه می‌تواند توسط هر مبدل انرژی که قابلیت ذخیره و باز پس دادن انرژی را دارد، تولید گردد. همچنین نشان داده می‌شود که بردار پوینتینگ می‌تواند به عنوان وسیله‌ای کارآمد جهت تفکیک و دسته‌بندی مؤلفه‌های مختلف توان‌های لحظه‌ای اکتیو و غیر اکتیو، نمایش ریاضی آن‌ها، و تعبیر فیزیکی آن‌ها به کار رود.

فصل سوم به تشریح سیستم‌های تک فاز با شکل موج‌های غیر سینوسی اختصاص دارد. این فصل در ابتدا به بررسی رفتار بارهای خطی با تحریک غیر سینوسی پرداخته و به تدریج به سراغ بارهای پایه‌ی غیر خطی می‌رود. در نهایت نیز حالتی کلی مورد بررسی قرار می‌گیرد که دید لازم برای فهم و مقایسه دقیق روش‌های مختلف پیشنهاد شده برای تفکیک توان ظاهری را، فراهم می‌آورد. تاکید این فصل بر

لزوم جدا سازی مؤلفه‌ی فرکانس اصلی توان‌های اکتیو و راکتیو (50/60 Hz) از دیگر مؤلفه‌های باقیمانده توان ظاهری است که بخش مهمی از استاندارد IEEE 1459-2010 را تشکیل می‌دهد. بعلاوه، توجه خاصی به مکانیزم تولید و تزریق هارمونیک شده و تأثیر آن بر انتقال توان و تعاریف توان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه چگونگی تبدیل مقدار معینی از مؤلفه اصلی توان تغذیه کننده بار غیرخطی به دسته‌ای از مؤلفه‌های دارای فرکانس بالاتر (هارمونیک) و تزریق آن‌ها به سیستم قدرت بررسی می‌گردد. در ادامه با استفاده از نمودارهایی، مسیرهای انتقال مؤلفه‌های مختلف توان لحظه‌ای تشریح شده و نشان داده می‌شود که نحوه جابجایی توان‌های لحظه‌ای مشابه به نحوه جابجایی مؤلفه‌های بردار پوینتینگ می‌باشد. بنابراین پیش‌زمینه‌ی لازم برای دسته‌بندی و تعریف مؤلفه‌های مختلف توان ظاهری فراهم می‌آید.

هدف از فصل چهارم، آشنایی با اصول پایه مورد نیاز برای درک روش‌های مختلف تعریف توان، خواص آن‌ها، و محدودیت‌های هر یک می‌باشد. تمرکز محتوای این فصل بر تعاریف مختلف توان ظاهری ارائه شده توسط محققانی است که به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم بر نتایج بدست آمده توسط دو استاندارد معرفی شده تأثیر داشته‌اند. این محققان عبارتند از:

C. I. Budeanu (1927)

S. Fryze (1932)

F. Buchholz (1950)

M. Depenbrock (1960)

L. S. Czarnecki (1984)

A. E. Emanuel (1995) (نویسنده این کتاب)

روش‌ها مختلف با استفاده از مثال‌های عددی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

بحث بر روی سیستم‌های سه فاز در فصل پنجم آغاز شده و محدود به شرایط سینوسی متعادل و نامتعادل می‌باشد. در این فصل مفهوم توان ظاهری موثر بوخهلز-گودهو¹ که زیربنای اصلی استاندارد IEEE 1459-2010 است، معرفی شده، سپس به صورت مفصل به زیربنای اصلی استاندارد DIN 40110-2 یعنی روش فریز-بوخهلز-دپنبراک² (FBD) پرداخته می‌شود. در ادامه نیز مسئله ضرب توان به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توضیحات کافی، ثابت می‌شود که توان ظاهری برداری (متداول‌ترین تعریف توان ظاهری) ناکارآمد است. این فصل سپس به مکانیزم تولید توانی‌های مثبت و

1 - Buchholz-Goodhue effective apparent power

2 - Fryze-Buchholz-Depenbrock method

منفی توان می‌پردازد. با استفاده از تعدادی مثال‌های عددی، تعاریف ارائه شده در استانداردهای DIN و IEEE با هم مقایسه شده و در نهایت این چنین نتیجه می‌شود که در عمل در سیستم‌های قدرت، هر دو استاندارد با وجود اینکه خروجی‌های متفاوتی در رابطه با ولتاژ توالی صفر بدست می‌دهند، دارای نتایج بسیار نزدیکی هستند.

در فصل ششم، کلی‌ترین حالت ممکن یعنی سیستم سه فاز تحت شرایط غیر سینوسی نامتعادل مورد بررسی قرار گرفته است. در مقالات متعددی به چنین شرایطی پرداخته شده و تعاریفی ارائه گردیده که در تکمیل یکدیگر برآمده و یا همدیگر را نقض کرده‌اند. این فصل تنها به معرفی متداول‌ترین تعاریف توان می‌پردازد یعنی تعاریفی که توسط سازندگان وسایل اندازه‌گیری برای برآورده کردن نیاز صنایع برق استفاده می‌گردند، و یا تعاریفی که توسط دو استاندارد مطرح شده، توصیه شده‌اند. در این فصل این موضوع محوری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است: استاندارد IEEE 1459-2010 بیان می‌دارد که در حالت ایده‌آل، یک بار سه فاز کاملاً جبران شده دارای جریان‌های توالی مثبت بوده و توان راکتیو آن صفر می‌باشد (مگر اینکه بار به عنوان جبرانگر توان مورد استفاده قرار گیرد). استاندارد DIN 40110-2 اظهار نظر متفاوتی دارد: برای داشتن ضریب توان واحد، شکل موج جریان‌ها باید شبیه به شکل موج ولتاژ خط نسبت به یک نقطه‌ی نول مصنوعی باشند (خط نول اصلی به صورت فاز چهارم در نظر گرفته می‌شود). این بدان معناست که پس از جبران‌سازی، آثار ناچیزی از جریان‌های توالی صفر و توالی منفی باقی خواهد ماند. علاوه بر این، در این فصل مشاهده می‌گردد که در صورت جبران کلیه بارهای متصل به یک پست برق با استفاده از هر یک از این دو روش، نتایج حاصله یکسان می‌باشد، بدین معنا که: جریان‌های توالی مثبت کاملاً سینوسی به همراه ولتاژهای متناظر سینوسی متقارن حاصل می‌گردد. فصل هفتم به معرفی توان غیراکتیو جدیدتری به نام توان تصادفی¹ می‌پردازد. در مواقعی که بار بصورت تصادفی متغیر با زمان بوده و اندازه‌گیری توان در مدت زمان طولانی مد نظر است، زمان مورد نظر به فواصل کوچک‌تری تقسیم می‌شود. اندازه‌گیری صورت گرفته برای هر فاصله زمانی توسط دسته توان‌های اکتیو و غیر اکتیو ثبت شده برای همان فاصله زمانی، تعیین می‌گردد. نشان داده می‌شود که مقادیر معادل توان‌های اکتیو و غیر اکتیو اندازه‌گیری شده در کل زمان مشاهده، برابر با مقدار متوسط توان‌های اکتیو اندازه‌گیری شده در هر فاصله زمانی است. با این حال، این خاصیت در مورد توان ظاهری صدق نمی‌کند و لازم است که توان تصادفی نیز در تعریف توان ظاهری مد نظر قرار گیرد، حتی

1 - Randomness power

در مواقعی که تنها با بارهای مقاومتی خالص سر و کار داریم، این کمیت جدید بویژه زمانی اهمیت پیدا می‌کند که بارهایی نظیر کوره‌های قوس الکتریکی، تجهیزات جوشکاری، آسانسورها، و یا هر نوع بار تصادفی متغیر وجود داشته باشد.

فصل آخر شامل هشت ضمیمه است. هدف از مطالب ارائه شده در این ضمیمه‌ها عبارتند از: کمک به واضح شدن روابط ریاضی پیچیده، آشنایی بیشتر با کاربردهای بردار پوینتینگ، و بدست آوردن اطلاعات مفیدی که علاوه بر نشان دادن محاسن تئوری میدان‌های الکترومغناطیسی، بیان‌گر کاربرد بردار پوینتینگ در تجسم نحوه انتقال انرژی می‌باشد. خواننده‌ی علاقمند روابط ریاضی دقیق‌تر و پیچیده‌تر، کاربرد ضرائب لاگرانژ برای محاسبه حداکثر توان اکتیو را در ضمیمه‌ی بعدی خواهد یافت. یکی دیگر از ضمیمه‌ها به محاسبه تلفات توان در خط انتقال، ناشی از یک بار مشخص، در شبکه‌ی با تعداد زیادی بار می‌پردازد. چنین اطلاعاتی برای تعریف توان ظاهری ضروری می‌باشد. در ضمیمه پایانی نیز لیستی از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط وارمترها در حالت اغتشاش در شکل موج ولتاژها و جریان‌ها ارائه می‌گردد.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از خانم کاترین امرتون که مرا در آشنایی با برنامه‌ی پیچیده LaTeX همراهی کردند، تشکر و قدردانی نمایم. همچنین تشکر ویژه‌ای دارم از پروفیسور دیوید سایگنسکی و آقای رابرت براون که علیرغم مشغله زیاد خود زمانی که رایانه من با مشکل مواجه می‌شد، مرا یاری می‌کردند. دوستی و همراهی آن‌ها مرا در فایق آمدن بر برخی لحظات مشکل در طول نوشتن این کتاب کمک فراوانی کرد. وظیفه خود می‌دانم که از دکتر گرازیا تودشینی به خاطر کار سخت‌کوشانه او تشکر کنم چرا او اولین کسی بود که این کتاب را مطالعه و علاوه بر استخراج اشکال‌های نگارشی و فنی آن، پیشنهادهای برای بهبود آن ارائه کرد. همچنین تشکر ویژه‌ای دارم از گروه تشکیل شده در انتشارات وایلی شامل سیمون تیلور، نیکی اسکینر، لارابل و کلاریسا لیم، که مرا در انتشار این کتاب همراهی کردند. همچنین تمایل دارم از جین اوتینگ به خاطر ویراستاری این کتاب و شلینی شارما در مؤسسه آیتارا برای حروف چینی این کتاب تشکر کنم. من همچنین مدیون بسیاری از دانشجویانم هستم که این موضوعات را همراه با من مطالعه کرده و با طرح سؤالات عمیق و مشکل، الهام بخش من در این زمینه بوده‌اند. در نهایت عمیق‌ترین قدردانی من متعلق به مؤسسه پلی‌تکنیک ورچستر و همکارانم در آنجاست که محیطی را فراهم آورده‌اند که سرشار از خلاقیت و دوستی واقعی است.

امید دارم که این کتاب الهام بخش مهندسان و محققانی باشد که نسل جدید وسایل اندازه‌گیری هوشمند را منطبق بر استانداردهای IEEE 1459-2010 و DIN 40110-2 طراحی می‌کنند؛ همچنین

به جستجو برای یافتن تعریف صحیح‌تر و دقیق‌تری از مفهوم توان ظاهری در قالب روابط ریاضی که توسط کلیه مهندسان برق در چهار گوشه‌ی جهان پذیرفته شود، کمک کند.

الکساندر ایگلس امانوئل

ساوس برگ، ماساچوست

ژانویه 2010

مکانیزم فیزیکی انتقال انرژی الکتریکی

به طور کلی دو مکتب فکری برای تجسم چگونگی انتقال انرژی الکتریکی از منبع به بار و درک روابط اساسی بین ولتاژ، جریان، توان و انرژی وجود دارد. اولین و به ظاهر ساده‌ترین آن‌ها، توضیح بر پایه‌ی عبور بارهای الکتریکی مطابق با شکل ۱-۱ می‌باشد. یک هادی استوانه‌ای با سطح مقطع A و طول ℓ را در نظر بگیرید که حامل ذرات باردار با توزیع یکنواخت بوده و در مجموع بار الکتریکی q را عبور می‌دهد. چگالی بار بر واحد حجم^۱ در این حالت عبارتست از:

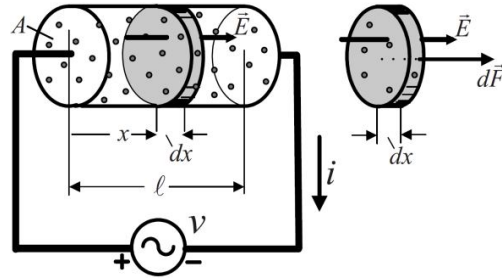
$$\rho_v = \frac{q}{A\ell} \quad (\text{C/m}^3) \quad (1-1)$$

با اعمال ولتاژ V به دو سر این استوانه هادی، میدان الکتریکی یکنواخت E در آن ایجاد شده به گونه‌ای که بردار آن به موازات استوانه واقع شده است:

$$E = \frac{V}{\ell} \quad (\text{V/m}) \quad (2-1)$$

بر هم کنش این میدان با ذرات باردار منجر به حرکت این ذرات در طول هادی می‌گردد. نیروی وارد بر ذرات باردار موجود در برشی باریک از استوانه‌ی هادی به ضخامت dx که دارای بار الکتریکی

1 - Volume charge density



شکل ۱-۱ - جریان بارهای الکتریکی که به صورت یکنواخت در یک هادی همگن پخش شده‌اند.

استوانه برابر است با: $dq = \rho_v A dx$ است، برابر با $dF = Edq$ بوده، در نتیجه نیروی وارده بر تمام بار الکتریکی موجود در

$$F = qE = A \ell \rho_v E = A \rho_v v \quad (\text{N}) \quad (3-1)$$

پس از رسیدن این سیستم به حالت ماندگار، منبع ولتاژ به صورت پیوسته مقدار جریان بار ثابتی را در یک حلقه بسته به استوانه تزریق می‌کند. می‌توان تصور کرد این جریان بار نتیجه اعمال فشار مکانیکی با مقدار $F/A = \ell \rho_v E = \rho_v v$ می‌باشد. چنین رویکردی ما را مستقیماً به مفهوم کار یا انرژی سوق می‌دهد. کار معادل انجام شده برای جابجایی مقدار بار q به اندازه dx ناشی از اعمال نیروی F ، برابر است با:

$$dw = F dx = A \rho_v v dx \quad (\text{J}) \quad (4-1)$$

میتوان فرض کرد که ذرات باردار با یک سرعت رانش^۱ متوسطی برابر با $u = dx/dt$ ، متناسب با اندازه‌ی میدان الکتریکی، حرکت می‌کنند، بنابراین داریم:

$$u = K E \quad (\text{m/s}) \quad (5-1)$$

در این رابطه، K ثابت تحرک ذرات بوده و واحد آن m^2/Vs می‌باشد. کار dw متناسب با سرعت رانش u است که با بازنویسی رابطه (۴-۱) به صورت زیر در می‌آید:

$$dw = A \rho_v v \frac{dx}{dt} dt = A \rho_v v u dt \quad (6-1)$$

سرعت رانش ذرات، $u = dx/dt$ ، با جریان الکتریکی نیز ارتباط دارد:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{\rho_v A dx}{dt} = \rho_v A u \quad (\text{A}) \quad (7-1)$$

با جایگذاری رابطه (۷-۱) در (۶-۱) داریم: