

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تعاریف توان

و

مکانیزم نیزیکی انتقال آن

لویسانا

پروفیسور الکساندر ایکلس

ترجمہ

دکتر عباس کتابی

(دانشیار دانشگاه کاشان)

مہدیس محمد فرشادلیا



انتشارات مرسل

سرشناسه: امانوئل، الکساندر ایگلس Alexander Elgeles Emanuel

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

مشخصات نشر: کاشان، مرسل، ۱۳۹۴.

مشخصات ظاهری: ۳۳۶ص: مصور، جدول، نمودار.

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۹۷۲-۴۰۹-۶

وضعیت فهرست‌نویسی: فیبای مختصر.

یادداشت: فهرست‌ویسی کامل این اثر در نشانی: <http://opac.nlal.ir>

قابل دسترسی است.

یادداشت: نمایه

شناسه افزوده: فرشادیا، محمد، مترجم

شناسه افزوده: کتابی، عباس، ۱۳۵۰ -

شماره کتابشناس ملی: ۳۸۰۳۹۶۰

■ تعاریف توان و مکانیزم فیزیکی انتقال آن

■ دکتر عباس کتابی - مهندس محمد فرشادیا

■ انتشارات مرسل با همکاری انتشارات دانشگاه کاشان

■ چاپ اول / ۱۳۹۴ / ۱۰۰۰ نسخه

■ چاپخانه: نه

■ شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۹۷۲-۴۰۹-۶

■ قیمت: ۱۹۰۰۰ - ۱

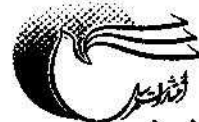
■ حق چاپ محفوظ است و تکثیر کل یا بخشی از این کتاب

شرعاً و قانوناً مجاز نمی‌باشد.



شاه کاشان

۵۱



انتشارات مرسل

✉ ناشر برگزیده ۲ دوره

مؤبشگاه بین المللی کتاب تهران (۸۹ و ۱۳۸۴)

✉ ناشر شایسته تقدیر سال ۱۳۹۲

www.morsalpub.com

ص پ: ۸۷۱۳۵/۱۳۵

تلفنکس: ۰۳۱-۵۵۴۵۴۵۱۳ همرا: ۲۵۴۴ ۱۶۱ ۰۹۱۳

خرید اینترنتی: www.morsalpub.com

انتقادات و پیشنهادات خود را به شماره ۰۵۰۰۱۳۳۳۴۴۴ ارسال نمایید.

فهرست مطالب

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

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

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 پیشنهادها
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 غیرسینوسی 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 Egeles 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، شامل IEEE 1459-2011 و DIN 40110-2:2002-11 به تحلیل و مقایسه‌ی این دو استاندارد در اندازه‌گیری مولفه‌های مختلف توان پرداخته است.
- توضیح فیزیکی چگونگی استن توار 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، سطح ساده و سپس پرداختن به مطالب پیچیده‌تر.
- این کتاب پراحتی قابل فهم بوده و هر فصل با تمرین‌های مرتبط و ارجاع از مراجع مرتبط با موضوع، پایان می‌یابد. تمام مباحث همراه با ارائه‌ی مثال یا نتایج کمی توضیح داده شده که باعث فهم بهتر مطالب خواهد شد.
- نویسنده کتاب، فردی خیره 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، شک 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 حوزه 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 "اصل ضرب $V-I$ "، خدمت بزرگی به حرفه‌ی مهندسی کرده‌است. تمایل روز افزون به استفاده از انرژی برق، همچنین بهره‌گیری از مبدل‌های الکترونیک قدرت که با ایجاد هارمونیک همراه هستند، منجر به بررسی و شکافانه و دقیق‌تر مفهوم «توان» و نحوه اندازه‌گیری آن شده است. پیشنهادها، اظهار نظرها و سندهای 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 تسلط 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 است 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 جبراً 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 ریزانرژی‌های 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 باشد. انرژی را فراهم نماید که تعیین دقیق نرخ انتقال انرژی و کیفیت آن، پخش بهینه‌ی توان، و برنامه‌ریزی کارآمد و نگهداری را ممکن سازد. وسایل اندازه‌گیری انرژی - 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 مؤلفه‌ها که از حدود یک قرن پیش آغاز شده، هنوز به نتیجه‌ای نرسیده است. من خود به شخصه 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 راه.

هر دو استاندارد، تعاریف بهبود یافته‌ای از توان ارائه می‌کنند که توسط تعداد زیادی از متخصصان به دقت مورد بررسی و تأیید 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 توسعه یافته و مسیر را برای رسیدن به دو استاندارد مورد اشاره، هموار کرده‌اند.

۴- مقایسه دو استاندارد.

۱ - 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 برای پوینتینگ ابزار بسیار مناسبی برای تجسم چگونگی توزیع توان عبوری در مکان و زمان بوده؛ و از هر مهم‌تر، به تعیین درست مؤلفه‌های انرژی و توان مربوط به توان ظاهری کمک می‌کند. بنابراین این ابزار مندرجه‌ت‌ایست توانی منطبق بر قوانین طبیعی می‌گردد.

فصل دوم این کتاب، سیستم تک فاز با شکل موج سینوسی می‌پردازد. علاوه بر معرفی تعاریف جدیدی نظیر توان ذاتی، به سرو 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 بری 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 راکتور و غیر اکتیو معرفی می‌گردند. در این فصل نشان داده می‌شود که توان راکتور 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 برای ترمیم جهت تفکیک و دسته‌بندی مؤلفه‌های مختلف توان‌های لحظه‌ای اکتیو و غیر اکتیو، نمایش ریاضی آن‌ها و تفسیر 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 پایه‌ای 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

لزام 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. علاوه، 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 معیاری است که به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم بر نتایج بدست آمده توسط دو استاندارد معرفی شده است. 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) ^۱ (ریسنده 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-گودهو^۱ که زیرای^۱ ملی استاندارد IEEE 1459-2010 است، معرفی شده، سپس به صورت مفصل به زیربنای اصلی استاندارد DIN 40110-2 یعنی روش فریز-بوخهلز-دپنبراک^۲ (FBD) پرداخته می‌شود. در ادامه نیز مسئله ضریب 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

^۱ - Buchholz-Goodhue effective apparent power

^۲ - 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 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 (خرایک 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 نقطه‌ای نه مصنوعی باشند (خط نول اصلی به صورت فاز چهارم در نظر گرفته می‌شود). این بدان معناست که پیر 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 ولتاژی متناظر سینوسی متقارن حاصل می‌گردد. فصل هفتم به معرفی توان غیر اکتیو جدیدتری به نام توان تصادفی 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 گرفت 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

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 ده‌های اندازه‌گیری شده توسط وارمترها در حالت اغتشاش در شکل موج ولتاژها و جریان‌ها ارائه می‌گردد.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از انتم، اترین امرتون که مرا در آشنایی با برنامه‌ی پیچیده LaTeX همراهی کردند، تشکر و قدردانی کنم. همچنین تشکر ویژه‌ای دارم از پروفیسور دیوید سایگنسکی و آقای رابرت براون که علیرغم مشغله زیاد خود، زمان به من با مشکل مواجه می‌شد، مرا یاری می‌کردند. دوستی و همراهی آن‌ها مرا در فایق شدن بر برخی محظرات مشکل در طول نوشتن این کتاب کمک فراوانی کرد. وظیفه خود می‌دانم که از دکتر گران، تودشینی، به خاطر کار سخت‌کوشانه او تشکر کنم چرا او اولین کسی بود که این کتاب را مطالعه و علاوه بر متن، اشکال‌های نگارشی و فنی آن، پیشنهاداتی برای بهبود آن ارائه کرد. همچنین تشکر ویژه‌ای دارم از گروه تکمیل 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 شمارا در تهیه آنتارا برای حروف چینی این کتاب تشکر کنم. من همچنین مدیون بسیاری از دانشجویان سیستم 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 ایگلز امانوئل

ساوس برگ، ماساچوست

ژانویه ۲۰۱۰

www.ketab.ir