بهره‌برداری و نگه‌داری از

توربوژنراتورهای بزرگ

Geoff Klempner

Isidor Kerszenbaum

ترجمه‌ی:

مهندس مهدی شادمند

شرکت مدیریت پروژه‌های نیروگاهی ایران (مپنا)

انتشارات پندار پارس

سرشناسه	:	کلمپنر، جف Klempner, Geoff
عنوان و نام پدیدآور	:	بهره‌برداری و نگه‌داری از توربوژنراتورهای بزرگ/ [نویسندگان جف کلمپنر، ایزیدور کرسنباوم] ؛ ترجمه‌ی مهدی شادمند.
مشخصات نشر	:	تهران : پندار پارس : شرکت مدیریت پروژه‌های نیروگاهی ایران (مپنا)، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	:	۶۰۰ ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	:	۳۵۰۰۰۰ ریال:978-600-6529-47-9
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا ISBN: 0-471-61447-5 -Wiley Publication
یادداشت	:	عنوان اصلی: Operation and Maintenance of Large Turbo-Generator
یادداشت	:	کتابنامه.
موضوع	:	مولدهای توربینی
شناسه افزوده	:	کرسنباوم، ایزیدور
شناسه افزوده	:	Kerszenbaum, Isidor
شناسه افزوده	:	شادمند، مهدی، ۱۳۵۸ -، مترجم
شناسه افزوده	:	گروه مپنا
رده بندی کنگره	:	TK۱۳۹۲۲۷۶۵ ۹ب۸ک/
رده بندی دیویی	:	۳۱۳/۶۲۱
شماره کتابشناسی ملی	:	۳۳۶۸۶۹۵

انتشارات پندارپارس

دفتر فروش: انقلاب، ابتدای کارگرجنوبی، کوی رشتچی، شماره ۱٤، واحد ۱٦ **www.pendarepars.com**

تلفن: ٦٦٥٧٢٣٣٥ - تلفکس: ٦٦٩٢٦٥٧٨همراه: ۰۹۱۲۲٤٥۲۳٤۸ **info@pendarepars.com**

نام کتاب	:	**بهره‌برداری و نگه‌داری از توربوژنراتورهای بزرگ**
ناشر	:	**انتشارات پندار پارس، با همکاری شرکت مپنا**
تألیف	:	Isidor Kerszenbaum ،Geoff Klempner
مترجم	:	**مهدی شادمند**
چاپ نخست	:	**دی‌ماه ۹۲**
شمارگان	:	**۵۰۰ نسخه**
لیتوگرافی، چاپ، صحافی	:	**ترام‌سنج، فرشیوه، خیام**
قیمت	:	**۳۵۰۰۰ تومان** **شابک : ۹-٤۷-٦٥۲۹-٦۰۰-۹۷۸**

***هرگونه کپی برداری، تکثیر و چاپ کاغذی یا الکترونیکی از این کتاب بدون اجازه ناشر تخلف بوده و پیگرد قانونی دارد ***

***** تمامی حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به شرکت مپنا می‌باشد *****

دیباچه

گروه مپنا از آغاز تأسیس در سال۱۳۷۲، با مهندسی، ساخت تجهیزات و احداث نزدیک به ۵۲,۰۰۰ مگاوات پروژه‌های نیروگاهی در قالب پروژه‌های خاتمه یافته، در دست احداث و آتی خود نزدیک به ۸۶ درصد از ظرفیت نصب شده‌ی نیروگاه‌های کشور را ایجاد نموده است. این گروه بیشترین نقش را در توسعه‌ی ظرفیت نیروگاهی به عهده گرفته و از این طریق، امکان رشد و توسعه‌ی صنعتی را فراهم ساخته است. گروه مپنا تنها سازنده‌ی ایرانی توربوژنراتورهای نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، ساده و برقابی با فناوری شرکت‌های معتبر جهانی بوده و به‌عنوان نخستین و بزرگ‌ترین پیمانکار عمومی نیروگاهی در خاورمیانه و غرب آسیا، نخستین و بزرگ‌ترین سازنده‌ی تمامی تجهیزات اصلی نیروگاهی محسوب می‌شود. جذب پیشرفته‌ترین فناوری و دانش فنی در تمامی حوزه‌های فعالیت صنعتی را می‌توان از دستاوردهای گروه مپنا برشمرد.

بیست سال تلاش در زمینه‌ی جذب و تولید تکنولوژی‌های پیشرفته و به‌کارگیری آن برای توسعه‌ی ملی، گروه مپنا را به یک بنگاه اقتصادی دانش بنیان تبدیل کرده است. انتشار کتاب در زمینه‌ی فناوری‌هایی که گروه مپنا در آن سرآمدی ملی و منطقه‌ای دارد ایفای بخشی از رسالت‌های اجتماعی سازمان از طریق نشر دانش است. به همین دلیل است که ترجمه‌ی کتاب معتبر **عملکرد و تعمیرات و نگه‌داری توربوژنراتورهای بزرگ** را در اختیار جامعه علمی و تخصصی کشور قرار می‌دهد. معاونت تحقیق و توسعه‌ی گروه مپنا امیدوار است در انجام این وظیفه از طریق دریافت نظرها و پیشنهادهای متخصصان علمی و صنعتی کشور، در ایفای مسئولیت‌های اجتماعی خویش توفیق بیشتری حاصل نماید.

محسن حامدی

معاونت تحقیق و توسعه گروه مپنا

اسفند ۱۳۹۱

پیش‌گفتار مترجم

امروزه تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز هر کشوری، جزو ضروریات به‌شمار می‌رود. در عصر تکنولوژی، هیچ صنعتی بدون حضور انرژی الکتریکی، قابلیت ادامه‌ی حیات نخواهد داشت. بنابراین شناسایی منابع تأمین انرژی الکتریکی، حفاظت و نگهداری، تعمیرات و بهینه‌سازی آن جزو موارد جدایی‌ناپذیر دولت‌ها در تأمین نیازهای کشور می‌باشد.

امروزه در زمینه‌ی طراحی، مهندسی، شبیه‌سازی و حتی بهره‌برداری از ماشین‌های الکتریکی به‌کار رفته در صنعت تولید انرژی الکتریکی، کتاب‌های بسیاری تألیف و ترجمه شده است. لیکن در بحث تعمیرات، نگهداری و رفع عیب این نوع ماشین‌ها، با کمبود مراجع و کتاب‌های کاربردی مواجه هستیم. کتاب ترجمه شده، شاید یکی از کم‌نظیرترین کتب در زمینه‌ی آشنایی با تکنولوژی‌های ساخت، تعمیرات، نگهداری و تست ژنراتورهای الکتریکی در نیروگاه‌های حرارتی باشد. با توجه به احساس کمبود مرجع مشخص و قابل استفاده در این زمینه‌ها، که یکی از اصلی‌ترین فعالیت‌های شرکت‌های فعال در زمینه‌ی تأمین، احداث، بهره‌برداری، تعمیرات و نگهداری نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی می‌باشد، ترجمه‌ی کتاب در دست انجام قرار گرفت.

اصلی‌ترین مخاطبان این کتاب، شرکت‌های فعال در بحث احداث نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی، شرکت‌های تعمیراتی نیروگاه‌ها، بهره‌برداران نیروگاه‌های حرارتی، دانشجویان رشته‌های برق با گرایش قدرت، مهندسان برق قدرت فعال در زمینه‌ی طراحی و مهندسی ماشین‌های الکتریکی و سازمان‌های دخیل در تست و تحلیل نتایج تست‌های انجام گرفته روی ژنراتورهای نیروگاهی می‌باشند.

این کتاب با لحاظ قابلیت استفاده‌ی عملی و کاربردی در صنعت تولید انرژی الکتریکی برای تمام سطوح دانشی و با رعایت اولویت‌های دانشی، تکنولوژی‌های تولید، مراحل تولیدی، مراحل تعمیرات و روش‌های تست توربوژنراتورهای نیروگاهی تألیف شده است و می‌تواند مرجع مناسبی برای همه‌ی فعالیت‌های مرتبط با تأمین، تجهیز، آماده‌سازی، تولید، بهره‌برداری، تست و رفع مشکلات مربوط به ژنراتورهای نیروگاهی باشد.

فهرست

بخش نخست: تئوری، ساختار و عملکرد

فصل ۱، اصول عملکرد ماشین‌های سنکرون ۳
۱.۱ مقدمه‌ای بر تفکر پایه‌ی انرژی الکتریکی ۳
۱.۱.۱ مغناطیس و الکترومغناطیس ۳
۱.۱.۲ الکتریسیته (Electricity) ۵
۱.۲ تعادل الکتریکی –مکانیکی ٦
۱.۳ جریان‌های متناوب (ac) ٦
۱.٤ مدارهای سه فاز ۱۱
۱.۵ اصول پایه‌ی عملکرد ماشین ۱۳
۱.۵.۱ قانون القاء الکترومغناطیسی فاراده (Faraday's low) ۱۳
۱.۵.۲ قانون نیروی الکترومغناطیسی القائی آمپر-بیوت-ساوارت ۱٤
۱.۵.۳ قانون عمل و عکس‌العمل لنز (Lenz's Law) ۱۵
۱.۵.٤ تبدیل انرژی الکترومکانیکی ۱٦
۱.٦ ماشین سنکرون (The Synchronous Machine) ۱۸
۱.٦.۱ پیش زمینه ۱۸
۱.٦.۲ اصول ساختاری ۲۰
۱.٦.۳ سیم‌پیچی روتور ۲۳
۱.٦.٤ سیم پیچی استاتور ۲٤
۱.۷ اصول عملکرد ماشین سنکرون ۲٤
۱.۷.۱ عملکرد بی باری ۲۷
۱.۷.۲ عملکرد موتور ۳۰
۱.۷.۳ عملکرد ژنراتور ۳۰
۱.۷.٤مدار معادل ۳۱
۱.۷.۵ تلفات ماشین ۳۳
خواندنی‌های اضافی ۳٤
فصل ۲، طراحی و ساختار ژنراتور ۳۵
۲.۱ هسته‌ی استاتور ۳۷
۲.۲ فریم استاتور (Stator Frame) ٤۲
۲.۳ شار و واکنش آرمیچر ٤٤
۲.٤ الکترومغناطیس ٤٦
۲.۵ تأثیرات نواحی انتهایی و شیلدینگ شار ٤۹
۲.٦ نیروهای هسته استاتور و فریم ۵۳
۲.۷ سیم پیچی استاتور ۵۵
۲.۸ گوه‌های سیم پیچی استاتور ٦۳
۲.۹ سیستم ساپورت انتهایی سیم پیچی ٦٤
۲.۱۰ پیکربندی سیم‌پیچی استاتور ٦٦

۲.۱۱ اتصالات ترمینال استاتور ٦٧
۲.۱۲ فورج روتور ٦٩
۲.۱۳ سیم‌پیچی روتور ٧٣
۲.۱٤ گوه‌های شیار سیم‌پیچی روتور ٧٧
۲.۱٥ سیم پیچی دمپ کننده ٧٩
۲.۱٦ رینگ‌های نگه‌دارنده (Retaining Rings) ٨٠
۲.۱۷ BORE COPPER و متصل کننده‌های ترمینال ٨٣
۲.۱۸ BRUSH GEAR و رینگ‌های SLIP COLLECTOR ٨٤
۲.۱۹ کوپلینگ شرینک روتور ٨٥
۲.۲۰ turning gear روتور ٨٦
۲.۲۱ یاتاقان‌ها ٨٧
۲.۲۲ خنک‌کاری هوا و هیدروژن ٨٨
۲.۲۳ فن‌های روتور ٩٠
۲.۲٤ محدوده هیدروژن ٩٢
۲.۲٥ کولرهای هیدروژن ٩٥
فصل ۳، سیستم‌های AUXILIARY ژنراتور ۹۷
۳.۱ سیستم روغن‌کاری (lube-oil system) ٩٨
۳.۲ سیستم خنک‌کاری هیدروژن ٩٩
۳.۳ سیستم سیل روغن (SEAL-OIL) ١٠١
۳.٤ سیستم آب خنک‌کاری استاتور ١٠٢
۳.٤.۱ تجهیزات سیستم ١٠٥
۳.٤.۲ ساختار شیمیایی آب خنک‌کاری استاتور ١٠٥
۳.٤.۳ شرایط سیستم آب خنک‌کاری استاتور ١٠٩
۳.٥ سیستم‌های تحریک ١١٠
۳.٥.۱ انواع سیستم‌های تحریک ١١١
۳.٥.۲ مشخصه‌های عملکردی سیستم تحریک ١١٣
۳.٥.۳ تنظیم کننده‌های ولتاژ ١١٥
فصل ۴، عملکرد و کنترل ۱۱۷
٤.۱ پارامترهای پایه‌ی عملکرد ١١٧
٤.۱.۱ مقدار نامی ماشین ١١٧
٤.۱.۲ توان ظاهری ١٢٠
٤.۱.۳ ضریب توان (Power Factor) ١٢٠
٤.۱.٤ توان واقعی (Real Power) ١٢٣
٤.۱.٥ ولتاژ ترمینال ١٢٣
٤.۱.٦ جریان استاتور ١٢٤
٤.۱.۷ ولتاژ میدان ١٢٤
٤.۱.۸ جریان میدان ١٢٤
٤.۱.۹ سرعت ١٢٥

٤.١.١٠ فشار هیدروژن ١٢٦
٤.١.١١ دمای هیدروژن ١٢٦
٤.١.١٢ نسبت اتصال کوتاه ١٢٧
٤.١.١٣ ولت بر هرتز و مسائل شار زیاد (overfluxing) ١٢٨
٤.٢ مدهای عملکردی ١٣٠
٤.٢.١ خاموشی (shutdown) ١٣٠
٤.٢.٢ Turning Gear ١٣٠
٤.٢.٣ Run-up و Run-down ١٣١
٤.٢.٤ اعمال میدان در حالت off-line (مدار باز یا open circuit) ١٣٢
٤.٢.٥ سنکرون شده و بارگذاری شده، حالت On-line ١٣٢
٤.٢.٦ عملکرد راه‌اندازی (Start up) ١٣٣
٤.٢.٧ عملکرد On line ١٣٤
٤.٢.٨ عملکرد خاموش کردن ١٣٤
٤.٣ منحنی‌های ماشین ١٣٥
٤.٣.١ مشخصه‌ی اشباع مدار باز ١٣٥
٤.٣.٢ مشخصه‌ی اشباع اتصال کوتاه ١٣٥
٤.٣.٣ منحنی‌های قابلیت (Capability Curves) ١٣٦
٤.٣.٤ منحنی‌های V شکل (V-Curves) ١٤٠
٤.٤ شرایط عملکردی خاص ١٤٢
٤.٤.١ عملکرد بدون تحریک (شرایط "Loss-of-Field") ١٤٢
٤.٤.٢ جریان‌های مؤلفه منفی ١٤٥
٤.٤.٣ جریان‌های فاقد فرکانس (off-frequency) ١٤٦
٤.٤.٤ دوره‌ی بارگذاری و راه‌اندازی‌های مداوم ١٤٨
٤.٤.٥ بارگذاری اضافی(Overloading) ١٤٩
٤.٤.٦ عملکرد turning-gear بلند مدت ١٤٩
٤.٤.٧ از دست رفتن خنک‌کاری ١٥١
٤.٤.٨ شار اضافی (Overfluxing) ١٥٢
٤.٤.٩ سرعت اضافی (overspeed) ١٥٣
٤.٤.١٠ نداشتن روغن سیستم روغن کاری ١٥٣
٤.٤.١١ سنکرون شدن خارج از مرحله و اتصال کوتاه در فاصله‌ی نزدیک ١٥٤
٤.٤.١٢ ورود روغن سیستم روغن‌کاری و آب خنک‌کاری ١٥٤
٤.٤.١٣ عملکرد زیر و بالای فرکانس (U/F و O/F) ١٥٥
٤.٥ مفاهیم عملکردی پایه ١٥٦
٤.٥.١ عملکرد در شرایط پایا (Steady-State) ١٥٦
٤.٥.٢ دیاگرام برداری و مدار معادل ١٥٨
٤.٥.٣ معادله انتقال قدرت بین آلترناتور و سیستم متصل شده ١٥٩
٤.٥.٤ کار با معادله‌ی مدار پایه‌ای ١٦٠
٤.٥.٥ عملکرد موازی ژنراتورها ١٦٤

٤.٥.٦ پایداری ١٦٦
٤.٥.٧ اتصال کوتاه‌های آنی ١٧٣
٤.٦ بررسی سیستم ١٧٤
٤.٦.١ تغییرات ولتاژ و فرکانس ١٧٦
٤.٦.٢ جریان مؤلفه منفی ١٧٦
٤.٦.٣ جریان بالا (Overcurrent) ١٧٦
٤.٦.٤ جریان‌های گذرا ١٧٧
٤.٦.٥ سرعت بالا (overspeed) ١٧٧
٤.٧ تنظیم ولتاژ و تحریک ١٧٧
٤.٧.١ تحریک کننده (Exciter) ١٧٧
٤.٧.٢ کنترل تحریک ١٧٨
٤.٨ منحنی‌های کاری ١٧٩
٤.٨.١ منحنی تلفات ١٧٩
٤.٨.٢ منحنی بازده ١٧٩
٤.٩ نمونه دستورالعمل‌های عملکرد ژنراتور ١٧٩
دستورالعمل عملکرد ژنراتور ١٨١
I مفهوم ١٨١
II عمومی ١٨١
III عملکرد راه‌اندازی ١٨٢
IV عملکرد خاموشی ١٨٢
V جدا شدن سیستم ١٨٣
VI عملکرد on-line ١٨٣
VII اتصال زمین میدان ١٨٤
VIII پایدارکننده‌ی سیستم قدرت (PSS) ١٨٥
IX تنظیم کننده‌های ولتاژی ١٨٥
X نفوذ رطوبت ١٨٦
XI قوانین توصیه شده ١٨٧
XII رله‌گذاری‌های حفاظتی ١٨٧
XIII بررسی‌های روتین اپراتور ١٩١
فصل ۵ مانیتورینگ و شیوه‌های عیب‌یابی ۱۹۳
۵.۱ فلسفه‌ی مانیتورینگ ژنراتور ١٩٤
۵.۲ سیستم مانیتورینگ ساده با یک محدوده‌ی ثابت از حد نهایی آلارم‌ها ١٩٥
۵.۳ مانیتورینگ دینامیک با محدوده آلارم در بارهای مختلف ١٩٦
۵.٤ سیستم تشخیص هوش مصنوعی ٢٠٠
۵.۵ مقادیر مانیتور شده ٢٠٤
۵.۵.۱ پارامترهای الکتریکی ژنراتور ٢٠٥
۵.۵.۲ بدنه و هسته‌ی استاتور ٢١٠
۵.۵.۳ سیم‌پیچی استاتور ٢١٨

٥.٥.٤ روتور ٢٣٢
٥.٥.٥ سیستم تحریک ٢٤٥
٥.٥.٦ سیستم خنک‌کاری هیدروژن ٢٤٧
٥.٥.٧ سیستم روغن کاری (Lube-Oil) ٢٥٢
٥.٥.٨ سیستم سیل روغن (Seal-Oil) ٢٥٤
٥.٥.٩ سیستم آب خنک‌کاری استاتور ٢٥٨
فصل ۶، حفاظت ژنراتور ۲۶۷
٦.١ بحث مقدماتی حفاظت ٢٦٧
٦.٢ توابع حفاظتی ژنراتور ٢٦٩
٦.٣ شرح خلاصه‌ای از توابع حفاظت ٢٧٣
٦.٣.١ رله‌های سنکرون و بازرسی حالت سنکرون (توابع ١٥ و ٢٥ جدول ٦.١) ٢٧٤
٦.٣.٢ حفاظت در برابر اتصال کوتاه (توابع ٢١،٥٠،٥١،51V و ٨٧) ٢٧٥
٦.٣.٣ حفاظت ولتاژ/فرکانس (تابع ٢٤) ٢٧٧
٦.٣.٤ حفاظت اضافه ولتاژ و ولتاژ پائین (تابع ٥٩ و ٢٧) ٢٧٧
٦.٣.٥ حفاظت توان معکوس (تابع ٣٢) ٢٧٨
٦.٣.٦ حفاظت فقدان میدان (تابع ٤٠) ٢٧٨
٦.٣.٧ حفاظت در مقابل جریان نامتقارن استاتور (تابع ٤٦) ٢٧٩
٦.٣.٨ حفاظت حرارتی روتور و استاتور (تابع ٤٩) ٢٨١
٦.٣.٩ حفاظت توازن ولتاژ (تابع ٦٠) ٢٨٣
٦.٣.١٠ حفاظت زمان اضافه‌جریان برای نمایش خطاهای Turn To Turn ٢٨٤
٦.٣.١١ حفاظت در برابر خرابی یا عدم عملکرد صحیح Breaker (تابع 62B) ٢٨٥
٦.٣.١٢ حفاظت خطای زمین روتور (تابع 64F) ٢٨٥
٦.٣.١٣ حفاظت فرکانس بالا و پایین (تابع ٨١) ٢٨٧
٦.٣.١٤ عملکرد ناپیوسته (آسنکرون) تابع ٧٨ ..... ٢٨٨
٦.٤ طرح‌های حفاظت ویژه (انحصاری مخصوص به یک موضوع) ٢٨٩
٦.٤.١ حفاظت در مقابل تحریک تصادفی (برق‌دار شدن تصادفی) ٢٨٩
٦.٤.٢ تشخیص زمین میدان DC ٢٩٠
٦.٤.٣ ملاحظات نوسانات ٢٩٤
٦.٥ روش‌های ارسال هشدار یا باز دارنده ٢٩٦
بخش دوم: بازرسی، تعمیرات - حفاظت و تست
فصل ۷، نحوه‌ی بازرسی، روش و اسلوب آن ۳۰۳
٧.١ اقدامات مقدماتی (آماده سازی) در سایت ٣٠٣
٧.١.١ ممنوعیت ورود مواد خارجی به درون ماشین ٣٠٣
٧.٢ مهارت و آموزش ٣٠٨
٧.٣ روش کار ایمن –در فاصله‌ی هوایی الکتریکی ٣٠٩
٧.٤ زمان انجام بازرسی دوره‌ای ٣١٣
٧.٥ امکان دسترسی به ژنراتور ٣١٤
٧.٦ ابزار مورد نیاز بازرسی ٣١٥

۷.۷ فرم‌های بازرسی ۳۲۱
گزارش تست و بازرسی توربو ژنراتور ۳۲۲
فرم ۱: اطلاعات اولیه ۳۲۲
فرم ۲: اطلاعات روی پلاک ۳۲۲
فرم ۳: فرم آمادگی برای بازرسی ۳۲۳
فرم ٤: موارد بازرسی استاتور ۳۲۳
فرم ٥: بازرسی روتور ۳۲٥
فرم ٦: بازرسی سیستم تحریک ۳۲۷
فرم ۷: نظرات و یا مغایرت‌ها ۳۲۸
فرم ۸: بررسی وضعیت گوه‌ها ۳۲۹
فرم ۹: داده‌های تست‌های الکتریکال ۳۳۱
فرم ۱۱: جابه‌جایی جاروبک‌ها ۳۳٥
فصل ۸، بازرسی استاتور ۳۳۷
۸.۱ فریم و کیسینگ استاتور ۳۳۷
۸.۱.۱ تجهیزات خارجی ۳۳۷
۸.۱.۲ قسمت‌های داخلی ۳٤۸
۸.۲ هسته‌ی استاتور ۳٥۳
۸.۲.۱ آلودگی حفره‌ی استاتور ۳٥۳
۸.۲.۲ داکت‌های بسته شده در مسیر خنک‌کاری ۳٥٤
۸.۲.۳ رسوب اکسید آهن ۳٥٥
۸.۲.٤ شل شدن هسته‌ی آهنی و خطاهای بین ورقه‌ها ۳٥٦
۸.۲.٥ ورقه‌های خم شده / شکسته در حفره‌ی استاتور ۳٦٤
۸.۲.٦ ساپورت بلوک‌ها (Space Block) و جابه‌جایی ۳٦٦
۸.۲.۷ جابه‌جایی ورقه‌ی شکسته‌ی هسته و ورق‌های باریک space block ۳٦۷
۸.۲.۸ برآمدگی ورقه‌های هسته در مسیر جریان هوا ۳٦۸
۸.۲.۹ رسوب گریس/ اکسید روی بولت‌های هسته ۳٦۹
۸.۲.۱۰ ورق‌های پرسی هسته ۳۷۱
۸.۲.۱۱ شیلد شار انتهایی هسته و شانت‌های شار ۳۷۲
۸.۲.۱۲ اتصالات (Belly) پرسی فریم به هسته ۳۷۳
۸.۲.۱۳ سوختگی پشت هسته (back of core burning) ۳۷۳
۸.۳ سیم‌پیچی استاتور ۳۷٦
۸.۳.۱ آلودگی کویل/شینه استاتور (عدم پاکیزگی) ۳۷٦
۸.۳.۲ مهار کردن انتهای سیم‌پیچی و قابلیت حرکت آن ۳۷۷
۸.۳.۳ رینگ‌های ساعقه (surge-rings) ۳۷۹
۸.۳.٤ شرایط عایقی رینگ صاعقه (Surge-Ring) ۳۸۰
۸.۳.٥ ساختارهای ساپورت انتهای سیم‌پیچی ۳۸۱
۸.۳.٦ سخت‌افزار ساپورت انتهای سیم‌پیچی کمکی ۳۸۳
۸.۳.۷ تراوش آسفالت / نقاط نرم ۳۸٤

۸.۳.۸ جدا شدن نوار/ ترک‌های محیطی (Girth Cracking).....۳۸۸
۸.۳.۹ ساییدگی عایق / تنگی پشت شیار (necking beyond slot) ۳۹۰
۸.۳.۱۰ شکم دادن عایق به درون داکت‌های خنک‌کاری ۳۹۱
۸.۳.۱۱ شرایط عایق ۳۹۲
۸.۳.۱۲ فعالیت‌های کرونا ۳۹۳
۸.۳.۱۳ گوه‌های استاتور ۳۹۸
۸.۳.۱۴ جابه‌جایی انتهای سیم‌پیچی به بیرون از شیار ۴۰۱
۸.۳.۱۵ فیلرهای کناری شیار (Side Packing Fillers).....۴۰۲
۸.۳.۱۶ نشتی‌های سیم‌پیچی استاتور آب –خنک ۴۰۴
۸.۳.۱۷ موریانه‌های مغناطیسی (magnetictermites) ۴۰۵
۸.۳.۱۸ محدودیت جریان آب در سیم‌پیچی استاتور آب –خنک ۴۰۷
۸.۴ ترمینال و اتصالات فاز ۴۰۹
۸.۴.۱ عایق باس محیطی ۴۰۹
۸.۴.۲ چکاننده‌های فاز (Dropper).....۴۱۲
۸.۴.۳ بوشینگ‌های ولتاژ بالا ۴۱۳
۸.۴.۴ مقره‌های اتکایی ۴۱۴
۸.۴.۵ مجاری بوشینگ ۴۱۵
۸.۴.۶ مقره‌های Bushing-well و شرایط سیل کردن H2.....۴۱۷
۸.۴.۷ ترانس‌های جریان ژنراتور (CTs) ۴۱۷
۸.۵ کولرهای هیدروژن: تمیزی و نشتی‌های مبدل‌های حرارتی ۴۱۹
فصل ۹، بازرسی روتور ۴۲۳
۹.۱ تمیزی روتور ۴۲۳
۹.۲ رینگ‌های نگه‌دارنده ۴۲۵
۹.۲.۱ رینگ‌های نگه‌دارنده‌ی غیر مغناطیسی (5-18) و (18-18).....۴۳۱
۹.۳ ساییدگی/ جابه‌جایی در سطوح اشتراک گوه‌ها و رینگ‌ها ۴۳۳
۹.۳.۱ ترک‌های دندانه‌ها ۴۳۳
۹.۴ رینگ‌های مرکزی (بالانس) ۴۳۷
۹.۵ فن رینگ‌ها یا هاب (HUB) ۴۳۷
۹.۶ پره‌های فن ۴۳۸
۹.۷ یاتاقان‌ها و ژورنال‌ها.....۴۴۱
۹.۸ وزنه‌ها و بولت‌های بالانس ۴۴۳
۹.۹ گوه‌های انتهایی و سیم‌پیچی دمپ کننده.....۴۴۵
۹.۱۰ دیگر گوه‌ها ۴۵۰
۹.۱۱ سیم‌پیچی انتهایی و رابط‌های اصلی ۴۵۱
۹.۱۲ کلکتور رینگ‌ها (Collector Rings) ۴۵۷
۹.۱۳ عایق کلکتور رینگ.....۴۶۲
۹.۱۴ مس حفره(شفت) و رابط‌های اتصال‌دهنده‌ی ترمینال شعاعی (عمودی) ۴۶۴
۹.۱۵ فشار فنرهای براش‌ها و شرایط کلی ۴۶۸

۹.۱٦ رابط براش (BRUSH-RIGGING) ٤٦٩
۹.۱۷ براش‌های تخلیه (اتصال زمین) ولتاژ شفت ٤٧٠
۹.۱۸ سیل کردن رابط اصلی سیم‌پیچی روتور نسبت به هیدروژن ٤٧١
۹.۱۹ شیارهای محیطی قطب‌ها (شیارهای انعطاف دهنده‌ی بدنه) ٤٧٢
۹.۲۰ سوراخ‌های جریان‌های شعاعی (خنک‌کاری) بسته شده‌ی روتور ٤٧٣
۹.۲۱ کوپلینگ‌ها و بولت‌های کوپلینگ ٤٧٥
۹.۲۲ عایق یاتاقان ٤٧٥
۹.۲۳ سیل‌های هیدروژن ٤٧٩
۹.۲٤ رینگ‌های ناحیه‌ی بدنه‌ی روتور ٤٧٩
فصل ۱۰، بازرسی لوازم جانبی ۴۸۱
۱۰.۱ سیستم روغن روان‌ساز ٤٨١
۱۰.۲ سیستم خنک‌کاری هیدروژن ٤٨٢
۱۰.۲.۱ جاذب رطوبت/خشک کننده‌ی هیدروژن ٤٨٢
۱۰.۳ سیستم روغن سیل ٤٨٣
۱۰.٤ سیستم آب خنک‌کاری استاتور ٤٨٤
۱۰.٥ تحریک‌ها ٤٨٥
۱۰.٥.۱ بازرسی سیستم‌های چرخان ٤٨٥
۱۰.٥.۲ بازرسی سیستم‌های بدون براش ٤٨٦
۱۰.٥.۳ آیتم‌های بازرسی خاص ٤٨٦
فصل ۱۱، تست‌های نگه‌داری ژنراتور ۴۹۳
۱۱.۱ تست‌های مکانیکی هسته‌ی استاتور ٤٩٣
۱۱.۱.۱ استحکام (Tightness) هسته ٤٩٣
۱۱.۱.۲ تست نوسانات هسته و فریم ٤٩٤
۱۱.۲ تست‌های الکتریکی هسته‌ی استاتور ٤٩٦
۱۱.۲.۱ تست EL-CID ٤٩٦
۱۱.۲.۲ تست شار نامی به‌وسیله‌ی اسکن مادون قرمز ٥٠٧
۱۱.۲.۳ تست تلفات هسته ٥١٤
۱۱.۲.٤ مقاومت عایقی بولت‌های میان‌گذر (Throgh-Bolt) ٥١٥
۱۱.۲.٥ مقاومت عایقی اسکرین‌های شار ٥١٥
۱۱.۳ تست‌های مکانیکی سیم‌پیچی استاتور ٥١٥
۱۱.۳.۱ سفتی گوه‌ها ٥١٥
۱۱.۳.۲ نوسانات انتهای سیم‌پیچی استاتور ٥١٨
۱۱.٤ تست‌های سیم‌پیچی استاتور آب خنک ٥١٩
۱۱.٤.۱ افت فشار هوا ٥١٩
۱۱.٤.۲ گازهای رسام (ردیاب) ٥٢١
۱۱.٤.۳ افت خلاء ٥٢١
۱۱.٤.٤ افت فشار ٥٢١
۱۱.٤.٥ تست شارش ٥٢٢

۱۱.٤.٦ الگوبرداری خازنی ٥٢٢
۱۱.٥ تست‌های الکتریکی سیم‌پیچی استاتور ٥٢٢
۱۱.٥.۱ نیازمندی‌های تست‌های اولیه ٥٢٣
۱۱.٥.۲ مقاومت سیم‌پیچی سری ٥٢٤
۱۱.٥.۳ مقاومت عایقی (IR) ٥٢٤
۱۱.٥.٤ اندیکس پلاریزاسیون (PI) ٥٢٥
۱۱.٥.٥ میزان جذب دی‌الکتریک در طول به‌کارگیری ولتاژ DC ٥٢٧
۱۱.٥.٦ نشتی DC یا ولتاژ شیب‌دار (Ramped) ٥٢٩
۱۱.٥.۷ تست ولتاژ بالای DC (dc Hi-Pot) ٥٣٠
۱۱.٥.۸ تست ولتاژ بالای ac (ac Hi-Pot) ٥٣٠
۱۱.٥.۹ تست off-line اندازه‌گیری تخلیه جزئی (PD) ٥٣٢
۱۱.٥.۱۰ اندازه‌گیری ظرفیت خازنی ٥٣٥
۱۱.٥.۱۱ تست فاکتور توان/پراکندگی ٥٣٥
۱۱.٥.۱۲ تست tip-up نسبت پراکندگی به ضریب توان ٥٣٦
۱۱.٦ تست مکانیکی روتور ٥٣٧
۱۱.٦.۱ نوسانات روتور ٥٣٧
۱۱.٦.۲ تکنیک‌های بازرسی تستی غیر مخرب روتور ٥٣٨
۱۱.٦.۳ برخی دستورالعمل‌های NDE اضافی برای روتور ٥٤٥
۱۱.٦.٤ تست فشار هوای حفره‌ی روتور ٥٤٩
۱۱.۷ تست الکتریکی روتور ٥٥٠
۱۱.۷.۱ مقاومت سیم‌پیچی ٥٥٠
۱۱.۷.۲ مقاومت عایقی (IR) ٥٥١
۱۱.۷.۳ اندیکس پلاریزاسیون (PI) ٥٥١
۱۱.۷.٤ تست ولتاژ بالای dc (dc Hi-Pot) ٥٥٢
۱۱.۷.٥ تست ولتاژ بالای ac (ac Hi-Pot) ٥٥٢
۱۱.۷.٦ تشخیص دورهای اتصال کوتاه شده –کلی ٥٥٢
۱۱.۷.۷ تشخیص دورهای اتصال کوتاه شده با RSO ٥٥٤
۱۱.۷.۸ شناسایی دورهای اتصال یافته به روش تست مدار باز ٥٥٧
۱۱.۷.۹ شناسایی دورهای اتصال یافته به‌وسیله‌ی امپدانس سیم‌پیچی ٥٥٨
۱۱.۷.۱۰ شناسایی دورهای اتصال کوتاه شده، با تست هسته‌ی "C" شکل ٥٥٩
۱۱.۷.۱۱ شناسایی دورهای اتصال کوتاه شده با دیتکتور آنها ٥٦١
۱۱.۷.۱۲ تشخیص اتصال زمین سیم‌پیچی میدان به‌وسیله‌ی تست تقسیم ولتاژ ٥٦١
۱۱.۷.۱۳ تشخیص اتصال زمین به‌وسیله‌ی تست عبور جریان از فورج ٥٦٢
۱۱.۷.۱٤ ولتاژ شفت و اتصال زمین ٥٦٣
۱۱.۸ سیل‌های هیدروژن ٥٦٤
۱۱.۸.۱ NDE ٥٦٤
۱۱.۸.۲ مقاومت عایقی ٥٦٤
۱۱.۹ یاتاقان‌ها ٥٦٤

۱۱.۹.۱ NDE ٥٦٤
۱۱.۹.۲ مقاومت عایقی ٥٦٤
۱۱.۱۰ تست حساسیت حرارتی و آنالیز آن ٥٦٥
۱۱.۱۰.۱ پیش زمینه ٥٦٥
۱۱.۱۰.۲ تست حساسیت حرارتی نوعی ٥٦٨
فصل ۱۲، تعمیرات ۵۷۱
۱۲.۱ فلسفه‌ی تعمیرات کلی ٥٧١
۱۲.۱.۱ تعمیرات تخلیه الکتریکی ٥٧٢
۱۲.۱.۲ تعمیرات برنامه‌ریزی شده ٥٧٣
۱۲.۱.۳ تعمیرات پیش‌گویانه ٥٧٣
۱۲.۱.٤ تعمیرات بر اساس شرایط (CBM) ٥٧٤
۱۲.۲ تاریخچه‌ی تعمیرات و نگه‌داری ٥٧٤
۱۲.۳ بازه‌های زمانی/فرکانس تعمیرات ٥٧٥
۱۲.٤ نوع تعمیرات ٥٧٦
۱۲.٤.۱ میزان تعمیرات ٥٧٦
۱۲.٤.۲ تعمیر یا جایگزینی ٥٧٧
۱۲.٤.۳ توان بخشی/به‌روز کردن/افزایش توان ٥٧٩
۱۲.٤.٤ موقعیت سایت کار ٥٨٢
۱۲.٤.٥ نیروی کار ٥٨٣
۱۲.٥ لوازم یدکی ٥٨٤

بخش نخست

تئوری، ساختار و عملکرد

فصل ۱

اصول عملکرد ماشین‌های سنکرون

ژنراتورهای الکتریکی سنکرون (با نام آلترناتور نیز نامیده می‌شوند)، جزو خانواده‌ی ماشین‌های الکتریکی چرخان می‌باشند. دیگر اعضای خانواده، ژنراتور یا موتورهای جریان مستقیم (DC)، ژنراتور یا موتورهای القایی، و تعدادی از مشتقات این سه گروه می‌باشد. آنچه که میان تمامی اعضای این خانواده مشترک می‌باشد، عملکرد فیزیکی در تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به انرژی مکانیکی و عکس آن می‌باشد. بنابراین برای درک فیزیکی اصول عملکرد ماشین‌های الکتریکی چرخان، می‌بایست برخی اصول مقدماتی مهندسی برق و مکانیک را درک کرد.

بخش ۱، برای اشخاصی که درگیر اپراتوری، نگهداری و رفع مشکلات ژنراتورهای الکتریکی، و برای کسانی که خواستار درک بهتر از اصول طراحی و عملکرد ماشین می‌باشند، اما پیش زمینه‌ی مهندسی برق را ندارند نوشته شده است. این بخش با معرفی اصول ابتدایی الکتریک و مغناطیس شروع می‌شود و بی‌درنگ به توضیح قوانین پایه‌ی عملکرد ماشین‌های سنکرون می‌پردازد.

۱.۱ مقدمه‌ای بر تفکر پایه‌ی انرژی الکتریکی

۱.۱.۱ مغناطیس و الکترومغناطیس

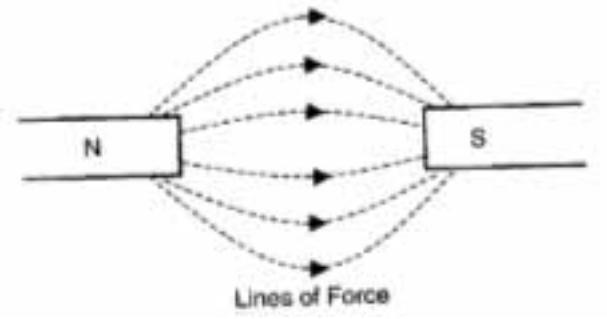
مواد خاصی در طبیعت یافته می‌شود که به‌طور طبیعی همدیگر را جذب و یا دفع می‌کنند که در اصطلاح به آنها به‌دلیل وجود حوزه‌های فلزی در ساختار خود، مگنت (magnet)، و نیز ferromagnetic گفته می‌شود.

مگنت‌ها همیشه دارای دو قطب می‌باشند: یک قطب، شمال و دیگری جنوب نامیده می‌شود. دو قطب شمال، همیشه همدیگر را دفع می‌کنند و دو قطب جنوب نیز بدین گونه عمل می‌کنند. در حالی که قطب شمال و جنوب، همیشه همدیگر را جذب می‌کنند.

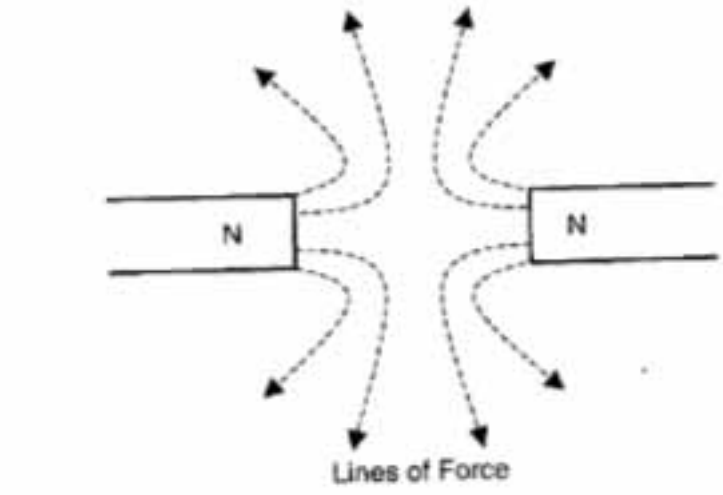
یک میدان مغناطیسی به عنوان یک میدان فیزیکی که میان قطب‌ها وجود دارد تعریف می‌شود. چگالی و جهت آن، نیروهای جاذبه و یا دافعه‌ی موجود میان مگنت‌ها را تعیین می‌کند.

شکل‌های ۱.۱ و ۱.۲ نشان دهنده‌ی قطب‌های در تعامل هم و میدان مغناطیسی میان آنها می‌باشد.

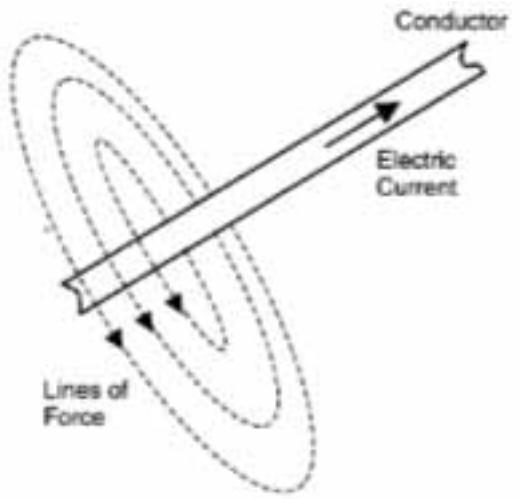
مگنت‌ها، در تمام شکل‌ها و ساختارهای شیمیایی در طبیعت یافت می‌شوند. مگنت‌های مورد استفاده در صنعت، به‌طور مصنوعی ساخته می‌شوند. مگنت‌هایی که خاصیت مغناطیسی خود را برای مدت زمان طولانی حفظ کنند، با عنوان مغناطیس ثابت (Permanent Magnets) نامیده می‌شوند. این مگنت‌ها در انواع مختلف در ماشین‌های الکتریکی کاربرد دارند که ماشین‌های سنکرون نیز جزو آن می‌باشد. با این حال به دلایل مکانیکی، در بهره‌برداری ماشین‌های الکتریکی، مگنت‌های ثابت با توان بسیار پایین‌تر از ژنراتورهای نیروگاهی بزرگ که موضوع این کتاب می‌باشد، استفاده می‌شوند. ژنراتورهای توربینی (توربوژنراتورها) دارای این برتری می‌باشند که میدان‌های مغناطیسی آنها را می‌توان با استفاده از عبور جریان الکتریکی از کنداکتورها ایجاد کرد. شکل ۱.۳ را ببینید.



شکل ۱.۱ : نشان دهنده‌ی دو قطب مغناطیسی با پلاریته معکوس و میدان مغناطیسی بین آنها به‌صورت خطوط نیرو



شکل ۱.۲ : نشان دهنده‌ی دو قطب شمال و میدان مغناطیسی بین آنها. قطب‌های جنوب نیز الگوی مشابهی را ایجاد می‌کنند. اما خطوط نیرو به سمت قطب‌ها خواهند بود

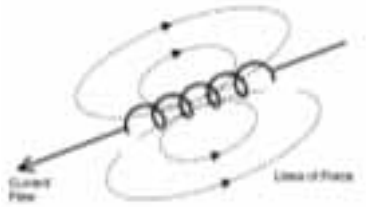


شکل ۱.۳ : نشان دهنده میدان مغناطیسی تولید شده به‌وسیله‌ی عبور جریان از یک هادی. جهت خطوط میدان توسط قانون پیچ گوشتی "screwdriver law" تعیین می‌شود

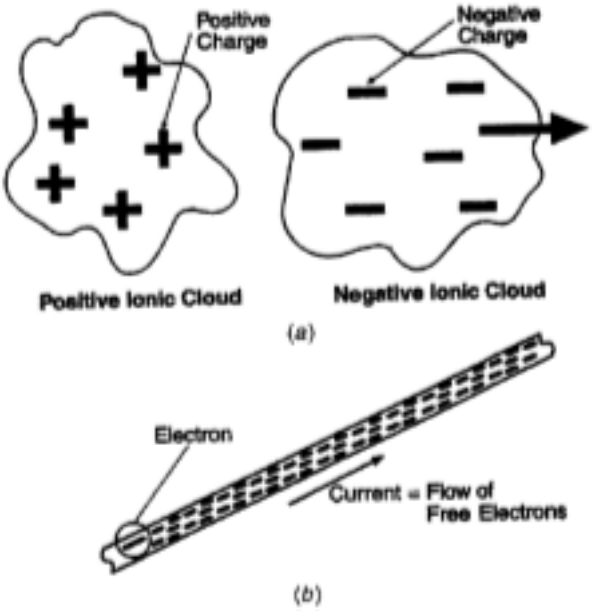
یک پدیده‌ی مفید این است که فرم دادن یک هادی به فرم کویل می‌تواند شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده به‌وسیله‌ی عبور جریان از هادی را تقویت کند. به این روش، هر تعداد که دور به کویل اضافه شود، همان مقدار ثابت جریان، شدت میدان مغناطیسی قوی‌تری را ایجاد می‌کند. به عنوان مثال عملی، تمامی میدان‌های مغناطیسی تولید شده به‌وسیله‌ی جریان در یک ماشین، به‌وسیله‌ی کویل ایجاد می‌شود. شکل ۱.٤ را ببینید.

۱.۱.۲ الکتریسیته (Electricity)

الکتریسیته، شارش بارهای مثبت یا منفی می‌باشد. الکتریسیته می‌تواند در مواد هادی الکتریکی (کنداکتورها) جریان یابد و یا به‌صورت ابر یونی در فضا و گازها جریان یابد. همان‌گونه که در بخش‌های بعدی نشان داده خواهد شد، هر دو نوع هدایت الکتریکی در توربوژنراتورها موجود می‌باشد. شکل ۱.۵ را ببینید.



شکل ۱.۴ : نشان دهنده میدان مغناطیسی تولید شده به‌وسیله‌ی جریان الکتریکی جاری در هادی به فرم کویل می‌باشد



شکل ١.٥ : الکتریسیته. (a) جریان‌های ابری یونی مثبت و منفی . ابرهای مثبت به‌طور نرمال اتم‌هایی هستند که یک یا بیش از یک الکترون خود را از دست داده‌اند، ابرهای منفی، به‌طور نرمال، الکترون‌های آزاد می‌باشند. (b) شارش الکترون‌ها در درون ماده‌ی هادی، مانند مس

١.٢ تعادل الکتریکی – مکانیکی

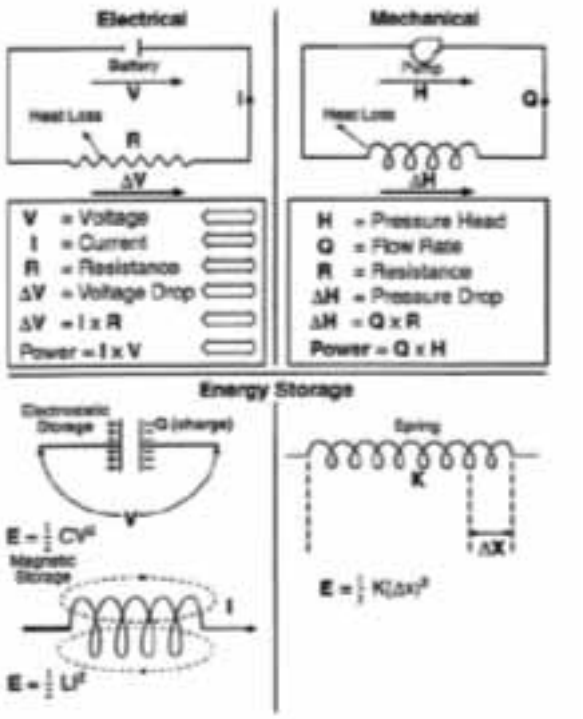
بین پارامترهای توصیف کننده‌ی انرژی به فرم الکتریکی و مکانیکی، تعادل چشم‌گیری وجود دارد. انسان‌ها با داشتن یکی از فرم‌های انرژی مکانیکی یا الکتریکی، این تعادل را در جهت درک صورت دیگر انرژی مفید می‌یابند. شکل ١.٦ فرم‌های مختلف تعادل الکتریکی – مکانیکی را توضیح می‌دهد.

١.٣ جریان‌های متناوب (ac)

همان‌گونه که در ادامه نشان داده خواهد شد، آلترناتورها با هر دو نوع انرژی متناوب (ac) و جریان مستقیم (DC) کار می‌کنند. پارامتر DC را می‌توان نوع خاصی از پارامتر ac در نظر گرفت که مقدار فرکانس آن برابر با صفر می‌باشد.

فرکانس یک مدار متناوب، بر اساس تعداد دفعات تغییرات جهت (polarity) جریان و یا ولتاژ در واحد زمان اندازه‌گیری می‌شود. Hertz (هرتز) به عنوان واحد بین‌المللی فرکانس شناخته شده است و بر اساس دور بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. یک هرتز، معادل یک دور در ثانیه می‌باشد. جریان و

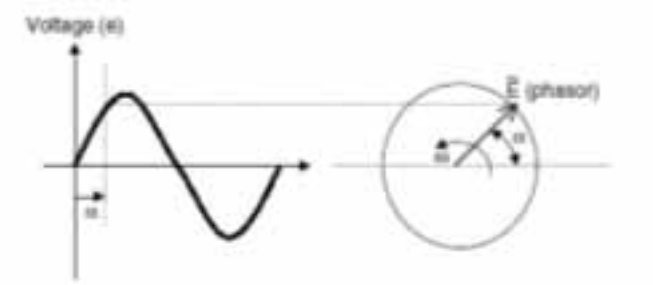
ولتاژ متناوب در دنیای صنعت انرژی الکتریکی برای تمامی موارد با مقدار فرکانس ثابت در نظر گرفته می‌شوند. این نکته‌ی مهمی می‌باشد، زیرا سیستم‌های پریودیک، سیستم‌هایی که دارای فرکانس ثابت می‌باشند، می‌توانند به فرم فازور (phasor) نشان داده شوند.



شکل ۱.۶ : معادل الکتریکی – مکانیکی

یک فازور، یک بردار چرخان می‌باشد. منفعت استفاده از فازورها در آنالیزهای مهندسی برق، این است که محاسبات مورد نیاز برای حل مسائل مدار را بسیار ساده می‌کند.

شکل ۱.۷ نشان دهنده‌ی مقدار فازور E می‌باشد و دنباله‌ی سینوسی نشان دهنده‌ی آن، مقدار لحظه‌ای پارامتر e را نشان می‌دهد. مقدار E، مقدار ماکزیمم پارامتر e را نشان می‌دهد.



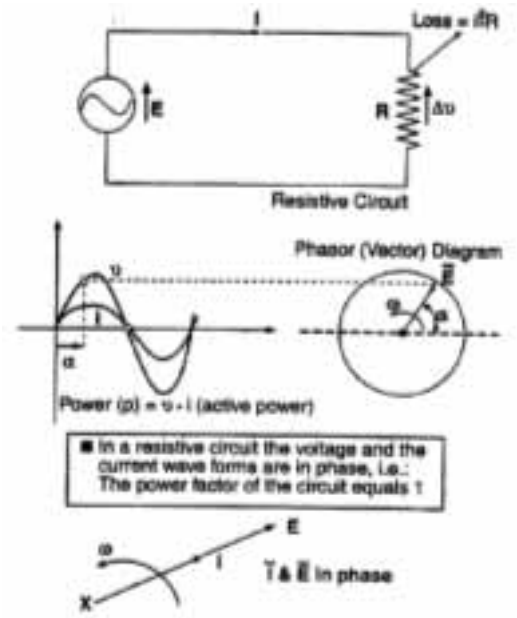
شکل ۱.۷ : فازور E که می‌تواند نشان دهنده‌ی ولتاژ اعمالی به یک مدار باشد. فازور از یک بردار تشکیل شده است که مقدار آن متناسب با مقدار E می‌باشد و با سرعت ثابت ω می‌چرخد. برآیند نهایی فازورهای چرخانی هستند که در جهت عکس عقربه‌های ساعت می‌چرخند. مؤلفه‌ی عمودی فازور منجر به ولتاژ سینوسی e می‌گردد که در هر زمان موجود خواهد بود. در گراف، $\alpha=\omega\times t$ می‌باشد که t زمانی است که از نقطه صفر شروع می‌شود

زمانی که ولتاژ سینوسی به یک مدار بسته اعمال می‌گردد، در آن جریان به‌وجود می‌آید. جریان به‌وجود آمده دارای شکل سینوسی خواهد بود (اصطلاحا مقدار جریان steady-state نامیده می‌شود) و دارای فرکانسی همانند ولتاژ اعمالی خواهد بود. نکته‌ی قابل توجه در مدارهای متناوب این است که زاویه‌ی نهایی بین ولتاژ اعمالی و جریان، وابسته به مشخصه‌های خاصی از مدار می‌باشد. این مشخصه‌ها می‌توانند به فرم مقاومتی (resistive)، خازنی (capacitive) و سلفی (inductive) تقسیم‌بندی شوند. زاویه‌ی میان ولتاژ و جریان در مدار، با عنوان زاویه‌ی توان (power angle) نامیده می‌شود. مقدار کسینوس این زاویه، ضریب توان (power factor) مدار نامیده می‌شود که به فرم کوتاه PF نشان داده می‌شود.

همان‌گونه که در ادامه نشان داده خواهد شد، در ماشین‌های سنکرون، عبارت زاویه‌ی توان، در تعریف مفاهیم مختلفی به کار می‌رود. برای جلوگیری از بروز اشتباه، در این کتاب، زاویه‌ی میان ولتاژ و جریان در مدار، با ضریب توان (power factor) نشان داده خواهد شد.

در مورد مدارهایی که تنها مقاومت دارند، ولتاژ و جریان، هم فاز می‌باشند، به این معنی که زاویه‌ی میان آنها، صفر خواهد بود. شکل ۱.۸ پارامترهای مختلف مربوط به یک مدار مقاومتی را نشان می‌دهد. به این نکته‌ی مهم باید توجه شود که هنگام عبور جریان از مقاومت، مقاومت دارای مشخصه‌ی تولید انرژی حرارتی می‌باشد. مقدار حرارت ایجاد شده، برابر با حاصل ضرب مربع مقدار جریان در مقاومت مدار می‌باشد. زمانی که جریان بر پایه‌ی آمپر و مقاومت بر پایه‌ی اهم سنجیده می‌شود، توان خروجی به فرم حرارت، بر پایه‌ی وات (watt) خواهد بود. این حرارت در ماشین‌های الکتریکی، نشان دهنده‌ی تلفات انرژی می‌باشد. در بخش‌های بعدی نشان داده خواهد شد

که یکی از نیازهای اساسی در طراحی ماشین‌های الکتریکی، خارج کردن مؤثر این تلفات مقاومتی، با هدف محدود سازی افزایش دمای ساختارهای داخلی ماشین می‌باشد.



شکل ۱.۸ : مدارهای متناوب (مقاومتی). شکل نشان دهنده‌ی ولتاژ سینوسی با مقدار E می‌باشد که به یک مقاومت با مقدار R اعمال می‌شود. شکل نشان دهنده‌ی جریان خروجی i به‌صورت همفاز با ولتاژ v می‌باشد. همچنین نشان دهنده‌ی فازور ولتاژ و جریان می‌باشد

در مدارهای مقاومتی، مقدار توان تولید شده‌ی لحظه‌ای از منبع برای بار، برابر با مقادیر ولتاژ و جریان آنی است. زمانی که ولتاژ سینوسی همانند ترمینال‌های مدار با بار اندوکتیو یا خازنی اعمال می‌گردد، جریان steady-state، یک جابه‌جایی زاویه (زمان) نسبت به ولتاژ اعمالی نشان خواهد داد. مقدار زاویه (یا ضریب توان)، وابسته به مقدار بار خازنی و یا اندوکتیو می‌باشد. در یک مدار خازنی خالص، جریان نسبت به ولتاژ دارای زاویه‌ی $90°$ پیش و در یک مدار اندوکتیو خالص جریان نسبت به ولتاژ اعمالی به میزان $90°$ عقب‌تر خواهد بود. (شکل ۱.۹)

یک مدار دارای مشخصه‌ی خازنی یا سلفی، با عنوان یک مدار راکتیو (reactive) نامیده می‌شود. در چنین مداری پارامترهای زیر تعریف می‌شود:

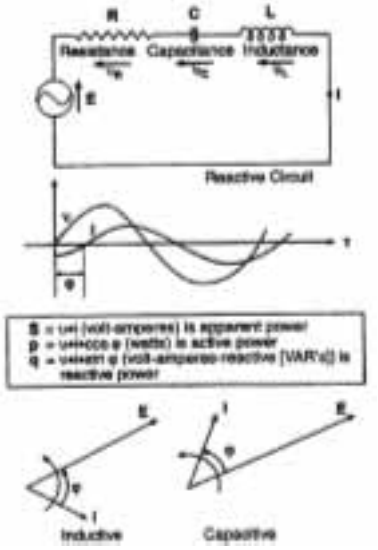
S : the apparent power : $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{I}$, given in unites of voltage-amperes or VA

P : the active power : $\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{I} \times \cos\varphi$, where φ is the power angle of the circuit, **P** is given in units of watts

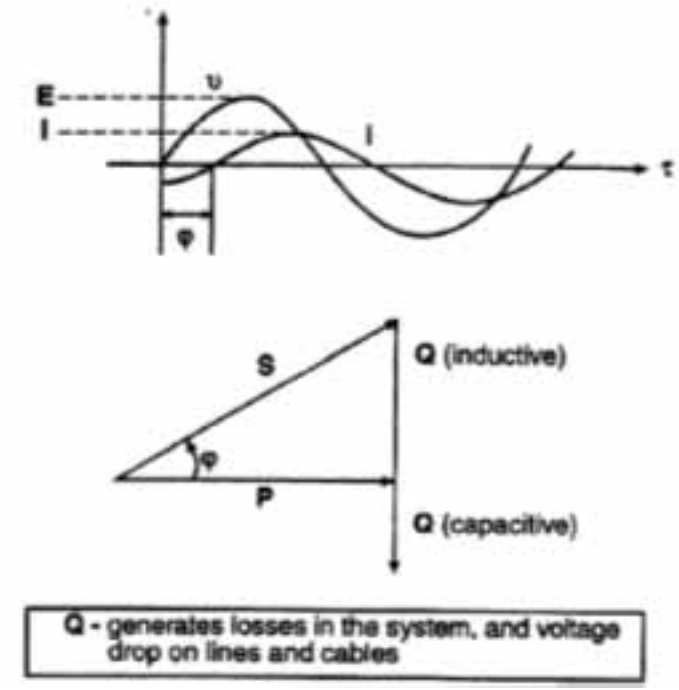
Q : the reactive power: $\mathbf{Q} = \mathbf{E} \times \mathbf{I} \times \sin\varphi$, given in units of volt-amperes-reactive or VAR.

توان اکتیو یک مدار **P**، نشان دهنده‌ی انرژی واقعی می‌باشد. این توانی است که می‌تواند به‌صورت حرارت در مقاومت مصرف شود، یا می‌تواند به انرژی مکانیکی تبدیل شود که بعدا نشان داده خواهد شد. هرچند استفاده از عبارت قدرت "power" در نام‌گذاری S و Q برای سالیان متمادی از روی ناچاری بوده است، بدون اینکه هیچ پس زمینه‌ای از مهندسی الکتریکی داشته باشد. حقیقت این است که توان ظاهری (apparent power) و توان راکتیو (reactive power) هیچ مقدار قابل اندازه‌گیری از انرژی را نشان نمی‌دهند. آنها تنها نشان دهنده‌ی مشخصه‌های راکتیو بار داده شده یا مدار می‌باشند و زاویه‌ی منتجه (ضریب توان) میان جریان و ولتاژ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در ادامه توضیح داده خواهد شد، این زاویه‌ی میان جریان و ولتاژ، عملکرد یک ماشین الکتریکی را به‌طور مشخصی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اکنون اجازه دهید تا پارامتر دیگری از آنالیز مدار ac را معرفی کنیم: مثلث قدرت (power triangle). با توجه به روابط نشان داده شده‌ی بالا میان S، P، Q، E، I و φ، به آسانی می‌توان نشان داد که S، P و Q یک مثلث تشکیل می‌دهند. می‌توان نشان داد هنگامی که مدار سلفی است Q مقدار مثبتی خواهد بود (بالای محور افقی)، و هنگامی که مدار خازنی باشد برعکس خواهد بود. (شکل ۱.۱۰)



شکل ۱.۹ : مدار متناوب (مقاومتی، سلفی و خازنی). در اینجا ولتاژ تناوب E به مدار متشکل از مقاومت، خازن و سلف اعمال می‌گردد. زاویه‌ی منتجه بین جریان و ولتاژ، وابسته به مقادیر مقاومت، خازن و سلف بار است.



شکل ۱.۱۰ : تعریف مثلث قدرت (power triangle) در یک مدار راکتیو

۱.۴ مدارهای سه فاز

مدارهای دو سیمه که در بالا می‌بینید (با نام مدار یا سیستم تک فاز)، به‌طور معمول دارای مصرف خانگی، اقتصادی و کاربردهای صنعتی ولتاژ پایین – توان پایین می‌باشند. با این حال، تمام سیستم‌های انرژی الکتریکی مربوط به ژنراتورهای صنعتی، به سیستم‌های سه فاز متصل می‌باشند. بنابراین هر توضیحی در مورد سیستم قدرت دراین کتاب، مربوط به سیستم‌های سه فاز خواهد بود. افزون بر این، منابع ولتاژ در کاربردهای صنعتی، به دلایل کاربردی، بالانس می‌باشند؛ به این معنی که هر سه ولتاژ سه فاز از نظر دامنه، با هم برابر بوده و به میزان $120°$ الکتریکی از هم مجزا می‌باشند. در موارد نادر که ولتاژها متعادل نمی‌باشند، مفهوم آن در کاربرد ژنراتور، در بخش‌های بعدی این کتاب توضیح داده خواهد شد.

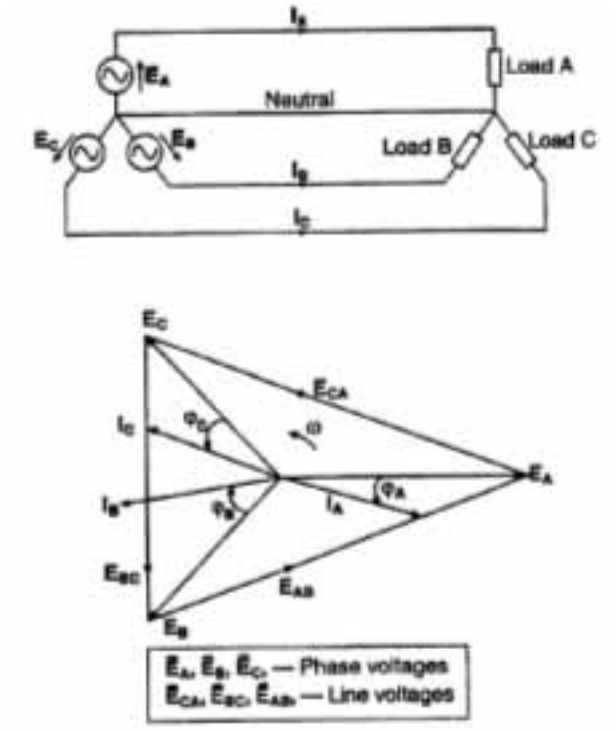
سیستم‌های الکتریکی سه فاز، می‌توانند سیم چهارمی نیز داشته باشند که به نام "زمین" (neutral) نامیده می‌شود. سیم زمین زمانی متصل خواهد شد که منبع یا بار سیستم الکتریکی، نامتعادل باشد.

در سیستم‌های سه فاز، دو مجموعه‌ی ولتاژی و جریانی تعریف می‌شود. این دو مجموعه عبارتند از ولتاژ و جریان فاز و خط.

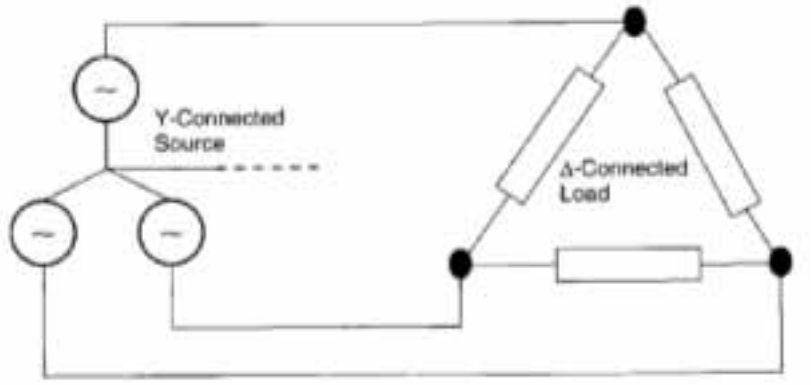
شکل ۱.۱۱ پارامترهای اصلی مدارهای سه فاز را نشان می‌دهد. مدارهای سه فاز می‌توانند دارای منبع یا بار متصل شده به فرم wye (ستاره) و یا مثلث (delta) باشند. (شکل ۱.۱۲ مربوط به اتصال ستاره منبع برای یک بار با اتصال مثلث می‌باشد)

اغلب بدون استثنا، توربین-ژنراتورها، دارای سیم پیچی با اتصال ستاره می‌باشند. دلایل مهمی وجود دارد که چرا توربوژنراتورها به فرم ستاره متصل می‌شوند. این تیپ اتصال به دلیل رعایت موارد حفاظتی مؤثر ماشین انجام می‌گیرد، همان‌گونه که در بحث طراحی رعایت می‌شود (عایق، زمین و ...) این موارد در بخش‌های مربوط به ساختار اتصال ستاره و اپراتوری ماشین توضیح داده خواهد شد.

از سویی دیگر، بارها می‌توانند به فرم ستاره، مثلث و یا ترکیب این دو متصل شوند. این کتاب در باره‌ی حل مدار نیست، بنابرای نوع بار در بررسی‌ها مد نظر نخواهد بود.



شکل ۱.۱۱ : سیستم‌های سه فاز. نشان دهنده‌ی مدار سه فاز دیاگرام برداری (فازی) سه فاز می‌باشد (ولتاژ، جریان و زاویه‌ی میان آنها)



شکل ۱.۱۲ : یک منبع با اتصال ستاره که یک بار با اتصال مثلث را تغذیه می‌کند

۱.۵ اصول پایه‌ی عملکرد ماشین

در بخش ۱.۱، نشان داده شد که جریان الکتریکی در یک هادی چگونه میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند. در این بخش سه اصل مهم الکترومغناطیس ارائه خواهد شد. این قوانین، همراه با قانون اصل بقای انرژی، اصول کلی نحوه‌ی کار هر ماشین الکتریکی را توضیح می‌دهد.

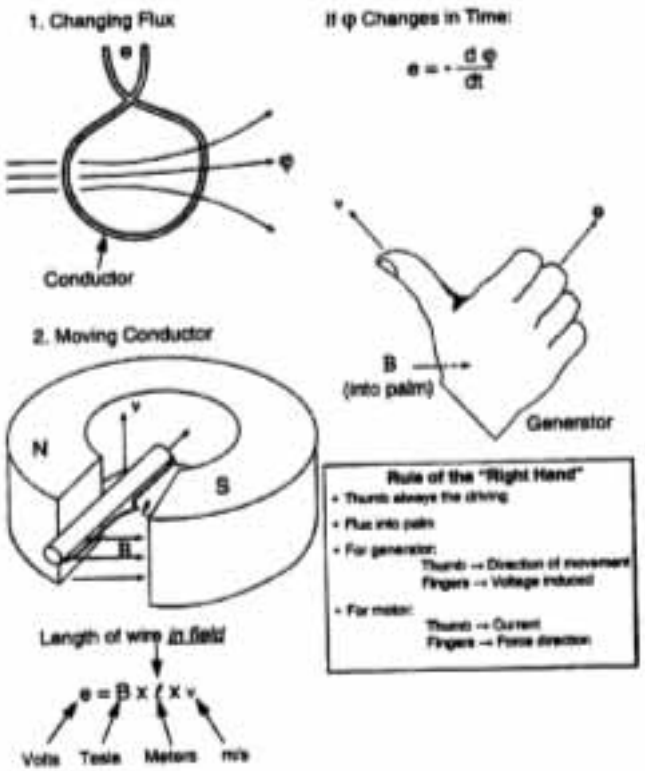
۱.۵.۱ قانون القاء الکترومغناطیسی فاراده (Faraday's low)

این قانون پایه، به احترام شیمیدان و فیزیکدان بزرگ انگلیسی، Michael Faraday (1971 – 1867) به این نام خوانده می‌شود و به دو فرم زیر بیان می‌شود:

۱. یک هادی متحرک که خطوط نیرو (شار) یک میدان مغناطیسی ثابت را قطع می‌کند، ولتاژ معینی در آن القاء خواهد شد.

۲. شار میدان مغناطیسی متغیر در درون یک حلقه که از هادی تشکیل شده است، ولتاژ القاء خواهد کرد.

در هر دو بیان، سرعت تغییر، تعیین کننده‌ی اختلاف پتانسیل ایجاد شده خواهد بود. شکل ۱.۱۳، نشان دهنده‌ی هر دو تیپ القاء الکترومغناطیسی می‌باشد و بیان کننده‌ی رابطه اساسی میان تغییرات شار و ولتاژ القاء شده در حلقه می‌باشد (برای بیان نخست) و بیان کننده‌ی رابطه‌ی میان ولتاژ القاء شده در یک سیم متحرک در میدان مغناطیسی ثابت می‌باشد (برای بیان دوم). شکل مورد نظر همچنین قانون ساده‌ی تعیین جهت ولتاژ القائی در هادی متحرک را نیز نشان می‌دهد.



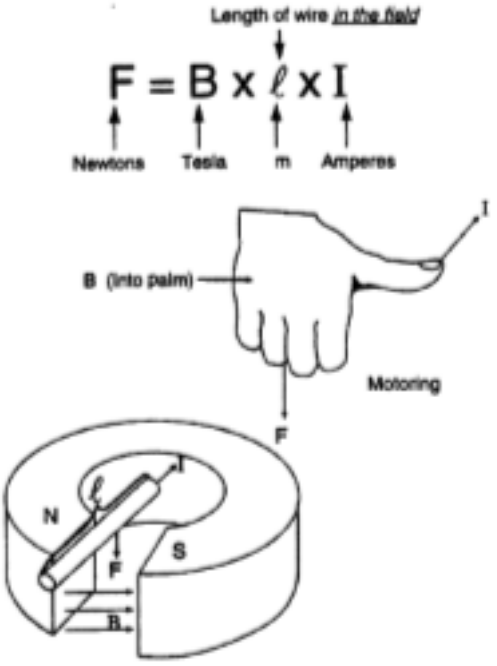
شکل ۱.۱۳ : هر دو فرم قانون پایه‌ی فاراده القاء مغناطیسی. یک قانون ساده (قانون دست راست) که برای تعیین جهت ولتاژ القائی در هادی متحرک که با سرعت معینی در میدان مغناطیسی حرکت می‌کند.

۱.۵.۲ قانون نیروی الکترومغناطیسی القائی آمپر-بیوت-ساوارت[1]

این قانون پایه، به نام فیزیکدان‌های فرانسوی، Jean ،Ander Marie Amper (1775-1836) Baptiste Biot (1774-1862) و Victor Savart (1803-1862) نام‌گذاری شده است. در ساده‌ترین فرم این قانون، می‌توان عکس قانون فاراده را دید. هنگامی که قانون فاراده، ولتاژ القائی در یک هادی متحرک در میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد، قانون آمپر-بیوت-ساوارت، نشان می‌دهد که روی هادی حامل جریان الکتریکی قرار گرفته در میدان مغناطیسی، نیرویی وجود دارد.

[1] (Amper-Biot-Savart's Law

شکل ۱.۱٤ پارامترهای پایه‌ی قانون آمپر-بیوت-ساوارت را در کاربرد ماشین‌های الکتریکی نشان می‌دهد. این شکل همچنین روابط عددی موجود و قانون ساده‌ی دست راست را برای تعیین جهت نیروی منتجه نشان می‌دهد.



شکل ۱.۱۴ : قانون نیروهای القایی الکترومغناطیسی آمپر-بیوت-ساوارت را در یک ماشین الکتریکی چرخان نشان می‌دهد. روابط عددی پایه و یک قانون ساده برای تعیین جهت نیروی القایی را نشان می‌دهد.

۱.۵.۳ قانون عمل و عکس‌العمل لنز (Lenz's Law)

هر دو قانون فاراده و قانون آمپر-بیوساوار، به‌طور مناسبی در قانون لنز که در سال ۱۸۳۵ توسط فیزیکدان اهل استونی Heinrich Lenz (1804 – 1865) نوشته شده است، وجود دارد.

قانون لنز بیان می‌کند که جریان‌های القائی الکترومغناطیسی و نیروهای مربوط، در تلاش نسبت به حذف عوامل به‌وجود آورنده می‌باشند.

برای نمونه، یک هادی که در جهت قطع خطوط نیروی مغناطیسی حرکت داده شود، یک ولتاژ در آن القاء خواهد شد (قانون فاراده). اکنون، اگر انتهای سیم به هم متصل شود، جریان الکتریکی می‌تواند شارش یابد. این جریان القایی، باعث تولید نیرویی روی هادی می‌گردد (قانون آمپر-بیوت-ساوارت).

آنچه که قانون لنز بیان می‌کند، این است که این نیرو در جهتی عمل می‌کند که باعث جلوگیری از حرکت سیم در مسیر اصلی آن گردد.

این در واقع بیان مختصری از مدهای عملکرد موتوری و ژنراتوری ماشین‌های الکتریکی می‌باشد. این قانون بیان می‌کند که چرا وقتی یک ژنراتور تحت بار قرار می‌گیرد (جریان بیشتری از سیم پیچی‌هایی که میدان مغناطیسی را در فاصله‌ی میان روتور و استاتور قطع می‌کنند عبور می‌کند)، نیروی بیشتری لازم است تا توربین چرخاننده‌ی روتور وارد کند تا بار اضافی را تأمین کند. به‌طور مشابه قانون لنز، افزایش جریان منبع موتور برای بار اضافی را توضیح می‌دهد.

۱.۵.۴ تبدیل انرژی الکترومکانیکی

چهارمین و آخرین قانونی که با سه قانون قبلی در درون یک ماشین الکتریکی به طور فیزیکی اتفاق می‌افتد، "اصل تبدیل انرژی" (principle of energy conversion) می‌باشد. در درون دنیای الکترومکانیک یک ماشین الکتریکی دوار، این اصل این‌گونه بیان می‌گردد:

"تمام انرژی الکتریکی و مکانیکی که به درون یک ماشین الکتریکی جاری می‌شود، منهای تمام انرژی مکانیکی و الکتریکی که از ماشین خارج می‌شود و انرژی ذخیره شده در ماشین، برابر انرژی تلف شده در ماشین به صورت حرارت می‌باشد."

این نکته اهمیت دارد که وقتی انرژی الکتریکی و مکانیکی می‌تواند به درون و یا خارج ماشین منتقل شود، حرارت ایجاد شده در ماشین، همیشه یک علامت منفی دارد: به‌طور معمول، گرمای تولید شده در ماشین، همیشه در طول پروسه‌ی تبدیل انرژی تولید می‌شود. علامت مثبت، نشان دهنده‌ی انرژی است که به درون ماشین منتقل می‌شود و علامت منفی، نشان دهنده‌ی انرژی است که از ماشین خارج می‌شود. در خصوص انرژی ذخیره شده (الکتریکی و مکانیکی)، علامت مثبت، نشان دهنده‌ی افزایش انرژی ذخیره شده در ماشین و علامت منفی، نشان دهنده‌ی کاهش در انرژی ذخیره شده در ماشین می‌باشد. بالانس میان فرم‌های مختلف انرژی در یک ماشین الکتریکی، بازده و نیازهای خنک کاری ماشین را تعیین خواهد کرد، که هر دو جزو پارامترهای حدی و تعیین کننده در ساختار ماشین‌های الکتریکی می‌باشند. شکل ۱.۱٦ الگوی تبدیل انرژی قابل کاربرد در ماشین‌های الکتریکی چرخان را نشان می‌دهد.