کنترل توان راکتیو در سیستمهای الکتریکی

ویراست دوم

(به همراه تجدیدنظر و ضمائم)

تألیف:

تی. جی. ای. میلر

ترجمه:

دکتر رضا قاضی

(استاد دانشگاه فردوسی مشهد)

نیاز دانش

پیشگفتار

کنترل توان راکتیو بعنوان یک عامل حائز اهمیت در طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت الکتریکی جریان متناوب از دیرباز مورد توجه بوده است. در یک بیان بسیار ساده و کلی می‌توان گفت از آن‌جائی‌که امپدانس‌های اجزاء سیستم قدرت به‌طور غالب راکتیو می‌باشند، انتقال توان اکتیو مستلزم وجود اختلاف زاویه فاز بین ولتاژهای ابتدا و انتهای خط است (که در یک محدوده نسبتاً وسیع عملی است)، در حالی‌که برای انتقال توان راکتیو لازم است که اندازه این ولتاژها متفاوت باشد (که فقط در یک محدوده خیلی کوچک عملی است.)

اما به چه دلیل می‌خواهیم توان راکتیو را انتقال دهیم؟ آیا این یک مفهوم پردردسر نیست که توسط نظریه پردازان به‌وجود آمده است و باید به آن بی‌اعتنا بود؟ جواب این است که نه تنها اغلب اجزاء سیستم توان راکتیو مصرف می‌کنند بلکه اکثر بارهای الکتریکی نیز توان راکتیو مصرف می‌نمایند، بنابراین توان راکتیو مصرفی بایستی از محلی تأمین گردد. اگر قادر نباشیم آن را به سهولت انتقال دهیم آن‌گاه بایستی در محلی که مورد نیاز است آن را تولید نمائیم.

البته همین مطلب در مورد توان اکتیو نیز صادق است، لیکن قیود و محدودیت مربوط به انتقال آن خیلی ضعیف‌تر و مربوط به جایابی (و اندازه) آن شدیدتر است.

درک این موضوع حائز اهمیت است که وقتی راجع به انتقال انرژی الکتریکی صحبت می‌کنیم بایستی راجع به فواصل الکتریکی صحبت کنیم. به‌عنوان مثال، راکتانس ترانسفورماتور می‌تواند به بزرگی راکتانس ۵۰ مایل خط انتقال باشد بنابراین، وقتی فاصله انتقال متوسط در آمریکا را فقط حدود ۱۰۰ مایل درنظر می‌گیریم، واضح است که حقیقتاً ما کاملاً از انتقال اجتناب نمی‌کنیم مگر این‌که تولید توان راکتیو درست در سطح ولتاژی انجام گیرد که مصرف می‌شود. این موضوع نسبتاً این حقیقت را توضیح می‌دهد که می‌توانیم در یک شبکه، جبران موازی را به‌صورت خازن‌های موازی در سیستم توزیع در بین راکتورهای موازی در سیستم انتقال، مشاهده نمائیم.

یک رابطه بنیادی و مهمی بین انتقال توان راکتیو و اکتیو وجود دارد. همان‌طوری که گفتیم انتقال توان اکتیو مستلزم جابه‌جایی فاز ولتاژها می‌باشد. لیکن مقدار ولتاژها نیز به همین میزان حائز اهمیت است. مقدار آن‌ها نه تنها بایستی به قدر کافی بالا باشد که بتواند بارها را حمایت نماید، بلکه لازم است به‌قدر کافی پایین باشد که منجر به شکست عایق تجهیزات نگردد. بنابراین، بایستی در صورت لزوم ولتاژها را در نقاط کلیدی کنترل کرده و یا حمایت یا محدودیتی را بر آن‌ها اعمال کنیم. این عمل

کنترل می‌تواند در سطح وسیعی به‌وسیله تولید یا مصرف توان راکتیو در نقاط کلیدی صورت گیرد.

گرچه این جنبه از توان راکتیو از دیرباز مورد توجه بوده است لیکن امروزه حداقل به دو دلیل زیر اهمیت زیادی پیدا کرده است: دلیل اول مربوط به فشار روزافزون در جهت بهره‌برداری حداکثر ممکن از سیستم‌های انتقال است و دلیل دوم این‌که انواع جدیدی از جبران‌کننده‌های راکتیو استاتیکی قابل کنترل توسعه‌یافته است. در سنوات خیلی دور در روند رشد شبکه‌های قدرت الکتریکی برای حمایت ولتاژ و بهبود توانایی انتقال توان از کندانسورهای سنکرون استفاده گردید. هم‌زمان در سیستم توزیع از خازن‌های موازی برای بهبود پروفایل ولتاژ و کاهش بارگیری خط و تلفات (با اصلاح ضریب توان) استفاده شد. توسعه سریع و اقتصادی بودن خازن‌های موازی منجر به جایگزینی آن‌ها با کندانسورهای سنکرون در سیستم‌های انتقال گردید. ملاحظه گردید که عملاً می‌توان آن‌چه را که کندانسورهای سنکرون انجام می‌دادند از سوئیچ کردن خازن‌های موازی با هزینه‌ای خیلی کمتر به‌دست آورد. هم‌اکنون نشانه‌هایی است که مجدداً شیوه، رجعت یافته و تأمین توان راکتیو قابل کنترل در قالب وسایل استاتیکی مطرح شده است. البته از نقطه نظر اقتصادی، هنوز بایستی یک مهندس سیستم تعیین کند که چقدر از خازن ثابت (یا اندوکتانس ثابت) استفاده گردد و چه مقدار سوئیچ گردد و در نهایت چه مقدار به‌طور پیوسته و سریع کنترل گردد (مثلاً در خلال اغتشاش). البته هنوز این سؤال باقی می‌ماند که چه مقدار توان راکتیو توسط ژنراتورهای سنکرون تأمین گردد.

تاکنون راجع به توان راکتیوی که از شبکه و یا به شبکه تأمین می‌گردد را مورد بحث قرار دادیم. البته در ابتدای این پیشگفتار خاطرنشان کردیم که بخشی از توان راکتیو در عناصر سری شبکه- مثلاً در راکتانس خطوط و ترانسفورماتور- مصرف می‌شود. از این‌رو، یکی از روش‌های مستقیم افزایش توان انتقالی در سیستم انتقال و کاهش افت ولتاژ در سیستم توزیع، جبران بخشی از راکتانس اندوکتیو سری به‌وسیله خازن‌های سری است. البته عموماً این مسأله را از دیدگاه کاهش راکتانس (به‌جای توان راکتیو) مورد عنایت قرار می‌دهند. در کاربرد خازن‌های سری مواجه با مسائل بهره‌برداری هستیم و در سیستم‌های توزیع به ندرت کاربرد دارد، لیکن بهترین شیوه افزایش ظرفیت توان انتقالی در موارد متعدد است. هم‌چنین از آن‌ها در متعادل کردن بارگیری خطوط شبکه استفاده می‌شود. بنابراین در یک شبکه حلقوی بایستی کاربرد خازن‌های سری هماهنگ گردد طوری‌که یک توزیع مناسب بارگیری خطوط به‌دست آید. در حالی‌که کاربرد یک خازن موازی (یا هر وسیله حمایت ولتاژ) می‌تواند منجر به مزایایی در یک نقطه معین گردد.

کتاب حاضر مباحث تئوری و عملی مربوط به کنترل توان راکتیو و جبران‌سازی را در بر می‌گیرد و علاوه بر این یک فصل به هارمونیک اختصاص یافته است. بدون شک موضوع کنترل توان راکتیو اهمیت روزافزون می‌یابد و بنابراین این کتاب به‌خصوص در این زمان مناسب است. نویسندگان این کتاب همگی سال‌ها در زمینه سیستم‌های قدرت و تکنولوژی مربوط به توان راکتیو تجربه کسب کرده‌اند.

C.C. CONCORDIA

مقدمه مؤلف

تقریباً سی درصد منابع انرژی اولیه در جهان برای تولید انرژی الکتریکی به مصرف می‌رسد و تقریباً تمامی این انرژی الکتریکی به‌وسیله جریان متناوب در فرکانس ۵۰ یا ۶۰ Hz انتقال یافته و توزیع می‌گردد. در حال حاضر بیش از هر زمانی طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت با حداکثر بازده و بیشترین میزان قابلیت اطمینان و امنیت حائز اهمیت است. این نیازمندی‌ها انگیزه یک سلسله پیشرفت در تکنولوژی انتقال توان ac گردیده است و هدف این کتاب توصیف پاره‌ای از این پیشرفت‌ها از نظر تئوری و عملی می‌باشد.

به دلیل اهمیت کنترل توان راکتیو و به‌دلیل گستردگی موضوع و هم‌چنین روش بررسی، این کتاب می‌تواند برای بخش وسیعی از مهندسین برق، الکترونیک و کنترل جالب باشد. مهندسین شاغل در مؤسسات برق و مراکز صنعتی، تئوری و توصیف تجهیزات کنترل توان راکتیو را در حل مسائل مربوط به اصلاح ضریب توان، کنترل و تثبیت ولتاژ، متعادل کردن فاز و رفتار هارمونیکی، بسیار باارزش یافته‌اند.

در دانشگاه‌ها نیز این کتاب می‌تواند مبنایی ایده‌آل برای دانشجویان لیسانس و فوق لیسانس در دوره آموزشی آن‌ها باشد و بخش‌های متعددی از آن قبلاً به همین منظور در دانشگاه Wisconsin و در دوره آموزشی سیستم‌های قدرت General Electric استفاده گردیده است.

کنترل توان راکتیو که موضوع این کتاب است، به دلایل متعددی که تعدادی از آن‌ها به اختصار در این‌جا ذکر می‌شود، اهمیت روزافزون یافته است. دلیل اول این‌که با توجه به قیمت سوخت، نیاز به بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های قدرت افزایش یافته است. برای توزیع یک مقدار معین توان، با به حداقل رساندن پخش توان راکتیو کل، تلفات کاهش می‌یابد. این اصل می‌تواند در شکل ساده یک خازن اصلاح‌کننده ضریب توان یک بار اندوکتیو و یا در قالب الگوریتم‌های پیشرفته تشریح شده در فصل ۱۱ که در یک شبکه بزرگ به‌کار می‌روند و توسط کامپیوتر کنترل می‌شوند، در سراسر سیستم اعمال می‌گردد. دلیل دوم این‌که به‌واسطه میزان بالای نرخ سود عموماً و مشکلات مربوط به حریم خطوط انتقال در مواردی خاص، از توسعه و احداث شبکه‌های انتقال حتی‌الامکان جلوگیری می‌شود. در موارد متعددی سعی شده است که با استفاده از وسایل کنترل توان راکتیو و بهبود پایداری، میزان توان انتقالی خطوط موجود را افزایش داد. دلیل سوم این‌که، در بهره‌برداری از متابع آبی، نیروگاه‌های دوردست –نظیر آن‌هایی که در اطراف Hudson Bay و در مناطق کوهستانی آفریقا و آمریکای جنوبی

است- توسعه یافته است. علی‌رغم توسعه تکنولوژی انتقال dc، در بسیاری از این طرح‌ها انتقال ac ترجیح داده شده است. مسائل پایداری و کنترل ولتاژ به مسائل کنترل توان راکتیو ارتباط داشته و راه‌حل‌های زیادی ارائه گردیده است که از کاربرد راکتورها و خازن‌های موازی شروع و تا خازن‌های سری، کندانسورهای سنکرون و جبران‌کننده‌های استاتیکی جدید ادامه می‌یابد. دلیل چهارم این‌که، به‌واسطه مصرف روزافزون وسایل الکتریکی (به‌خصوص کامپیوتر و تلویزیون رنگی) و هم‌چنین رشد صنایع با فرآیند پیوسته، نیاز به داشتن تغذیه با کیفیت بالا افزایش یافته است.

کاهش ولتاژ یا فرکانس اثرات نامطلوبی را برای روی چنین بارهایی اعمال می‌کند و قطع تغذیه می‌توان خیلی صدمه‌آور و پرهزینه باشد. کنترل توان راکتیو یک ابزار اساسی در حفظ کیفیت برق[1] می‌باشد، به‌خصوص برای جلوگیری از اغتشاشات ولتاژ که از عمومی‌ترین نوع اغتشاش می‌باشد. انواع معین از بارهای صنعتی، از آن جمله کوره‌های الکتریکی، دستگاه‌های حفاری و دستگاه‌های جوشکاری با دریافت توان اکتیو و راکتیو از سیستم تغذیه تغییرات سریع و وسیعی را بر آن تحمیل می‌نمایند و اغلب لازم است که با به‌کار گرفتن وسایل تثبیت‌کننده ولتاژ نظیر جبران‌کننده‌های توان راکتیو استاتیکی این تغییرات را کاهش داد. دلیل پنجم این‌که، با توسعه و احداث خطوط انتقال dc کنترل توان راکتیو در طرف ac مبدل‌ها ضرورت پیدا کرد تا بدین‌وسیله ولتاژ تثبیت گردیده و به عمل کموتاسیون مبدل مساعدت گردد.

تمامی این جنبه‌های مهندسی از نقطه نظر تئوری و عملی به بحث کشیده می‌شود. در فصول ۱ الی ۳ راجع به تئوری انتقال ac بحث و بررسی می‌شود. بحث از یک خازن اصلاح‌کننده ضریب توان شروع و به سمت اصولی که بر اساس آن جبران‌کننده‌های استاتیک با پاسخ سریع طراحی می‌شود، پیش می‌رود. در فصل ۲ اصول انتقال توان در ولتاژهای بالا و فواصل طولانی مورد بررسی قرار گرفته و در فصل ۳ جنبه‌های مهم دینامیک سیستم و نقش کنترل توان راکتیو در بهبود رفتار آن بحث و بررسی می‌گردد. در فصل ۲ بر روش عام «جبران‌سازی» تکیه می‌شود و سه روش اساسی جبران یعنی جبران با تقسیم‌بندی خط، جبران امپدانس ضربه‌ای و جبران طول خط تعریف و با یکدیگر مقایسه می‌گردد. در فصل ۱ روش عام جبران بار معرفی می‌گردد و شبکه جبران‌کننده برای اصلاح ضریب توان، تثبیت ولتاژ توصیف می‌شود و نهایتاً خواص شبکه جبران‌کننده به‌عنوان شبکه توالی ثابت مثبت و منفی که قادر است ولتاژ را تثبیت و ضریب توان را اصلاح و فازها را متعادل نماید تشریح می‌گردد. (برحسب مقادیر لحظه‌ای و فازور جریان‌ها و ولتاژها).

در فصل ۴ اصول کار جبران‌کننده‌های استاتیکی جدید شامل راکتور کنترل شده با تایریستور، خازن سوئیچ شده با تایریستور و راکتور قابل اشباع به تفضیل تشریح می‌گردد. توجه خاصی به جنبه‌های کنترلی آن‌ها مبذول می‌گردد و راجع به پدیده سوئیچینگ خازن، در جبران‌کننده خازن سوئیچ شده با تایریستور به‌طور مفصل بحث می‌شود.

[1] Power Quality

در فصول ۵ و ۶ جبران‌کننده‌های استاتیک بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرند. در فصل ۵ کنترلر تایریستوری قدرت- بالا و سیستم‌های مربوط تشریح می‌گردد. در فصل ۶ تأسیسات یک جبران‌کننده جدید به انضمام سیستم کنترل و آزمایش رفتار آن، به‌طور کامل توصیف می‌گردد.

در فصل ۷ خازن‌های سری تشریح می‌گردد. با حل مسأله رزونانس زیر سنکرون (SSR)، و امکان وارد کردن لحظه‌ای مجدد خازن‌ها به مدار به کمک واریستور، خازن‌های سری به عنوان وسیله‌ای مؤثر و اقتصادی در افزایش توان انتقالی و پایداری خطوط طویل محسوب می‌گردند. نحوه کنترل SSR و عملکرد واریستور هر دو در این فصل تشریح می‌شوند.

به‌دلیل اهمیت جبران‌سازی با کندانسور سنکرون، در فصل ۸ این نوع جبران‌کننده شرح داده می‌شود. کندانسور سنکرون به عنوان یک ماشین گردان جایگاه طبیعی و مهمی را در تئوری کنترل توان راکتیو ایفا می‌کند و تعداد زیادی از تأسیسات کندانسور سنکرون جدید بسیار بزرگ و پیشرفته می‌باشند. سیستم‌های تحریک پاسخ سریع و استراتژی‌های کنترل جدید رفتار کندانسور را بهتر نموده است.

در فصل ۹ نقش کنترل توان راکتیو در رابطه با کوره‌های الکتریکی به تفصیل تشریح گردیده است. کوره‌های الکتریکی از بارهایی هستند که مسأله جبران‌سازی بار را به خود اختصاص داده و به‌منظور کاهش دادن مسأله چشمک زدن (فلیکر) نیاز به جبران‌کننده با مقادیر نامی بزرگ و پاسخ خیلی سریع دارند. فصل ۹، به‌خاطر بررسی‌های آن بر روی محدودیت‌های سرعت پاسخ روش‌های مختلف کنترل توان راکتیو، برای عموم مطالعه‌کنندگان جالب خواهد بود. هم‌چنین مزایای جبران‌سازی را در فرآیند تولید فولاد به وضوع نشان می‌دهد طوری که رفتار بار به‌وسیله کنترل توان راکتیو و ولتاژ بهبود می‌یابد حتی وقتی که این عمل برای دلایل دیگری (نظیر کاهش فلیکر) صورت گیرد.

موضع کنترل توان راکتیو ارتباط تنگاتنگی با موضوع هارمونیک دارد زیرا کنترل و جبران توان راکتیو در ارتباط با بارها ضرورت پیدا می‌کند که خود نیز مولد هارمونیک هستند. دلیل دیگری که موجب اهمیت مسأله هارمونیک در یک کتاب مربوط به کنترل توان راکتیو می‌گردد این است که تقریباً جبران‌کننده راکتیو همواره بر روی فرکانس‌های رزونانس سیستم قدرت تأثیر می‌گذارد (حداقل در محل) خازن‌ها، راکتورها و جبران‌کننده‌ها بایستی به طریقی آرایش گردند که از وقوع رزونانس‌های هارمونیک اجتناب گردد. فصل ۱۰ راجع به این موضوعات بحث کرده و با مثال‌های عملی نقش فیلترها را بررسی می‌نماید.

فصل نهایی یعنی فصل ۱۱، راجع به یک موضوع نسبتاً جدیدی تحت عنوان هماهنگی توان راکتیو بحث می‌کند و تعدادی از روش‌های منظم هماهنگ کردن کنترل توان راکتیو در یک سیستم به‌هم پیوسته بزرگ را توصیف می‌نماید. می‌نیمم کردن تلفات سیستم یکی از چندین شرایط بهینه‌ای است که می‌تواند به کمک کنترل و تحلیل کامپیوتری معین گردد. سرانجام خواننده را با این موضوع امیدبخش جدید به آینده می‌سپاریم.

T.J.E. MILLER

مقدمه مترجم

کتاب حاضر ترجمه کتابی است تحت عنوان

Reactive power control in Electric systems
T. J. E Miller

که توسط مؤلف فوق به چاپ رسیده است. این کتاب مشتمل بر یازده فصل است که در به رشته تحریر درآوردن آن، علاوه بر نویسنده فوق، ۸ نویسنده دیگر (که اسامی آن‌ها در ابتدای هر فصل مشخص شده است) مشارکت داشته‌اند. مؤلف و نویسنده اصلی کتاب یعنی T. J. E Miller از اعضاء مرکز تحقیق و توسعه مؤسسه جنرال الکتریک (GEC) است و نویسندگان دیگر نیز همگی از اعضاء فعال مراکز تحقیقاتی مؤسسات مختلف برق و بخش‌های مهندسی متعدد مربوط به آن‌ها هستند. بنابراین از این نقطه نظر این کتاب علاوه بر این‌که می‌تواند برای دانشجویان دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد رشته برق مفید واقع گردد برای مهندسین برق، الکترونیک و کنترل شاغل در مؤسسات برق، مراکز صنعتی و مؤسسات تحقیقاتی (به‌خصوص در مراکز تحقیقاتی وزارت نیرو) قطعاً قابل استفاده و جالب خواهد بود.

به جرأت می‌توان اظهار کرد که این کتاب تنها کتابی است که در زمینه کنترل توان راکتیو تاکنون به چاپ رسیده است. و به‌منظور آشنا شدن به این زمینه که به دلایل متعدد اهمیت روزافزون یافته است (دلایل آن در مقدمه مؤلف آمده است)، بسیار مؤثر خواهد بود. موضوع کنترل توان راکتیو یکی از دروس دوره کارشناسی ارشد برق است که در دانشگاه‌های مختلف ایران تدریس می‌گردد. کتاب فوق می‌تواند یکی از مراجع مهم این درس قرار گیرد که همراه با مقالات انتشار یافته در سال‌های اخیر، دانشجو را با مبحث کنترل توان راکتیو، جبران‌سازی (در سیستم توزیع و انتقال)، انواع جبران‌کننده‌ها به‌خصوص در جبران‌کننده‌های استاتیکی (SVC) کاملاً آشنا می‌سازد. این‌جانب عهده‌دار تدریس درس کنترل توان راکتیو برای دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری در دانشگاه فردوسی مشهد هستم.

با توجه به این‌که در زمینه جبران راکتیو و طراحی و ساخت چند نوع SVC در سال‌های متمادی تجربه کسب نموده و هم‌چنین به تدریس این موضوع پرداخته‌ام، بر خود لازم دانستم که به ترجمه کتاب فوق بپردازم. امیدوارم که برای مهندسین برق و دانشجویان رشته برق قابل استفاده و مفید باشد.

لازم به ذکر است با توجه به پیشرفت‌های حاصل در زمینه الکترونیک قدرت و همچنین در زمینه مدیریت توان راکتیو در سیستم‌های قدرت و اهمیت آن با توجه به تجدید ساختار در سیستم‌های

قدرت، جهت تکمیل کتاب حاضر به ۴ فصل کتاب ضمیمه‌هایی اضافه گردید. در این اضافات سعی شد مثالهایی ارائه شود تا به فهم مسأله کمک بیشتری مبذول گردد.

در خاتمه لازم می‌دانم از مدیریت و مسؤلین محترم انتشارات نیاز دانش جناب آقای مهندس شیرازی، جناب آقای شمس و سرکار خانم رفیعی که وسایل چاپ و نشر کتاب را فراهم نموده‌اند صمیمانه تشکر و قدردانی نموده و از خداوند متعال آرزوی توفیق روزافزون نمایم. از جناب آقای دکتر پرنیانی استاد محترم دانشگاه صنعتی شریف که اغلاط تایپی ویراست اول را به اینجانب منعکس نمودند نهایت تشکر را دارم. از همسرم به‌جهت صبر و شکیبایی و مساعدت در تصحیح این اثر سپاسگزارم.

رضا قاضی
(استاد دانشگاه فردوسی مشهد)

فهرست مطالب

پیشگفتار ۳
مقدمه مؤلف ۵
مقدمه مترجم ۹

۱ تئوری جبران بار ۱۹

۱-۱ مقدمه: ضرورت جبران‌سازی ۲۰
۱-۲ اهداف در جبران بار ۲۱
۱-۳ جبران‌کننده ایده‌آل ۲۳
۱-۴ ملاحظات عملی ۲۴
۱-۴-۱ بارهایی که به جبران‌سازی نیاز دارند ۲۴
۱-۴-۲ استانداردهای مورد قبول برای کیفیت تغذیه ۲۶
۱-۴-۳ مشخصات یک جبران‌کننده بار ۲۶
۱-۵ تئوری اساسی جبران: اصلاح ضریب توان و تنظیم ولتاژ در سیستم تک‌فاز ۲۷
۱-۵-۱ ضریب توان و اصلاح آن ۲۸
۱-۵-۲ تنظیم ولتاژ ۳۱
۱-۶ مشخصه‌های تقریبی توان راکتیو ۳۶
۱-۶-۱ تنظیم ولتاژ با بار القایی متغیر ۳۶
۱-۶-۲ بهبود ضریب توان ۳۸
۱-۶-۳ بایاس کردن توان راکتیو ۴۰
۱-۷ مثال ۴۱
۱-۷-۱ جبران برای ولتاژ ثابت ۴۱
۱-۷-۲ جبران برای ضریب توان واحد ۴۳
۱-۸ جبران‌کننده بار به‌صورت رگولاتور ولتاژ ۴۳

۱-۹ متعادل کردن بارهای نامتقارن و اصلاح ضریب توان ۴۸
۱-۹-۱ شبکه جبران‌کننده ادمیتانسی ایده‌آل ۴۸
۱-۹-۲ جبران بار برحسب مؤلفه‌های متقارن ۵۳
۱-۱۰ نتیجه‌گیری ۵۸
ضمیمه ۶۰
مراجع ۶۲
ضمیمه ۲ ۶۳

۲ تئوری کنترل توان راکتیو در سیستم‌های انتقال الکتریکی در حالت ماندگار ۷۵
۲-۱ مقدمه ۷۷
۲-۱-۱ تاریخچه ۷۷
۲-۱-۲ نیازمندی‌های اساسی در انتقال توان ac ۷۹
۲-۱-۳ فاکتورهای مهندسی که در پایداری و کنترل ولتاژ مؤثرند ۸۱
۲-۲ خطوط انتقال جبران نشده ۸۲
۲-۲-۱ پارامترهای الکتریکی ۸۲
۲-۲-۲ معادله اساسی خط انتقال ۸۳
۲-۲-۳ بار طبیعی یا بار امپدانس موج ضربه‌ای ۸۴
۲-۲-۴ خط مدار باز جبران نشده ۸۶
۲-۲-۵ خط جبران نشده در حالت بارداری: اثر طول خط، بار، ضریب توان بر ولتاژ و توان راکتیو ۹۱
۲-۲-۶ خط جبران نشده در حالت بارداری: حداکثر توان انتقال و ملاحظات پایداری ۹۶
۲-۳ خطوط انتقال جبران شده ۱۰۴
۲-۳-۱ انواع جبران‌سازی: z_c مجازی، θ مجازی و «جبران‌سازی با تقسیم‌بندی خط» ۱۰۴
۲-۳-۲ جبران‌کننده‌های اکتیو و پسیو ۱۰۶
۲-۳-۳ جبران‌سازی ثابت پخش شده یکنواخت ۱۰۸
۲-۳-۴ جبران موازی قابل تنظیم پخش شده یکنواخت ۱۱۵
۲-۴ جبران موازی پسیو ۱۱۸
۲-۴-۱ کنترل ولتاژ مدار باز با استفاده از راکتورهای موازی ۱۱۸
۲-۴-۲ کنترل ولتاژ به‌وسیله سوئیچ کردن جبران‌کننده موازی ۱۲۳
۲-۴-۳ خازن یا راکتور موازی واقع در نقطه میانی خط ۱۲۴
۲-۵ جبران سری ۱۲۸
۲-۵-۱ اهداف و محدودیت‌های عملی ۱۲۸

۲-۵-۲ خط متقارن جبران‌شده با خازن سری نقطه میانی و راکتورهای موازی ۱۲۹
۲-۵-۳ مثال‌هایی از خط جبران شده سری ۱۳۴
۲-۶ جبران با تقسیم‌بندی خط (جبران موازی دینامیک) ۱۳۷
۲-۶-۱ مفاهیم اصلی ۱۳۷
۲-۶-۲ رفتار دینامیکی جبران‌کننده میانی ۱۳۹
۲-۶-۳ مثال خطی که به‌طریق تقسیم‌بندی خط جبران شده است ۱۴۲
مراجع ۱۴۴
ضمیمه ۱۴۵

۳ جبران توان راکتیو و رفتار دینامیکی سیستم‌های انتقال ۱۶۵
۳-۱ مقدمه ۱۶۵
۳-۱-۱ دینامیک سیستم قدرت الکتریکی ۱۶۵
۳-۱-۲ ضرورت جبران راکتیو قابل تنظیم ۱۶۶
۳-۲ چهار مشخصه پریود زمانی ۱۶۷
۳-۲-۱ پریود گذرا ۱۶۹
۳-۲-۲ پریود اولین نوسان و پایداری گذرا ۱۷۱
۳-۲-۳ پریود نوسانی ۱۷۳
۳-۲-۴ جبران‌سازی و دینامیک سیستم ۱۷۵
۳-۳ جبران موازی پسیو ۱۷۵
۳-۳-۱ پریود گذرا ۱۷۵
۳-۳-۲ پریود اولین نوسان ۱۷۸
۳-۳-۳ پریود نوسانی ۱۷۹
۳-۳-۴ خلاصه‌ای از جبران موازی پسیو ۱۷۹
۳-۴ جبران‌کننده‌های استاتیک ۱۷۹
۳-۴-۱ پریود گذرا ۱۸۰
۳-۴-۲ پریود نوسان اول ۱۹۱
۳-۴-۳ اثر جبران‌کننده موازی استاتیک بر پایداری گذرا ۱۹۳
۳-۴-۴ پریود نوسانی ۲۰۲
۳-۴-۵ ممانعت از ناپایداری ولتاژ با استفاده از جبران‌کننده استاتیکی ۲۰۴
۳-۴-۶ خلاصه- رفتار دینامیکی جبران‌کننده ۲۰۶
۳-۵ کندانسور سنکرون ۲۰۷

۳-۵-۱ پریود گذرا ۲۰۸
۳-۵-۲ پریودهای اولین نوسان و نوسانی ۲۰۹
۳-۶ جبران با خازن سری ۲۱۰
۳-۶-۱ پریود گذرا ۲۱۰
۳-۶-۲ پریود اولین نوسان و پایداری گذرا ۲۱۰
۳-۶-۳ پریود نوسانی ۲۱۲
۳-۷ خلاصه ۲۱۳
مراجع ۲۱۴

۴ اصول کار جبران‌کننده‌های استاتیک ۲۱۵
۴-۱ موارد استعمال جبران‌کننده‌ها ۲۱۵
۴-۱-۱ مشخصات جبران‌کننده‌های استاتیک ۲۱۵
۴-۱-۲ انواع اصلی جبران‌کننده ۲۱۷
۴-۲ راکتور کنترل شده با تایریستور کنترل (TCR) و انواع جبران‌کننده مربوط به آن ۲۱۹
۴-۲-۱ اصول کار ۲۱۹
۴-۲-۲ مشخصه ولتاژ- جریان ۲۲۱
۴-۲-۳ هارمونیک ۲۲۲
۴-۲-۴ ترانسفورماتور کنترل شده با تایریستور ۲۲۶
۴-۲-۵ TCR همراه با خازن‌های موازی ۲۲۷
۴-۲-۶ استراتژی‌های کنترل ۲۲۹
۴-۲-۷ مشخصات عملکردی دیگر جبران‌کننده‌های TCR ۲۳۴
۴-۳ خازن سوئیچ شده با تایریستور ۲۳۷
۴-۳-۱ اصول کار ۲۳۷
۴-۳-۲ گذرای سوئیچ کردن خازن و مفهوم سوئیچ کردن بدون گذرا ۲۳۸
۴-۳-۳ مشخصه ولتاژ- جریان ۲۴۵
۴-۴ جبران‌کننده‌های راکتور قابل اشباع ۲۴۶
۴-۴-۱ اصول کار ۲۴۷
۴-۴-۲ مشخصه‌های ولتاژ- جریان ۲۴۹
۴-۵ خلاصه ۲۵۱
۴-۶ پیشرفت‌های آتی و نیازمندی‌ها ۲۵۳
ضمیمه ۲۵۵

۵ طراحی کنترل‌کننده‌های تایریستوری ۲۸۳

۵-۱ تایریستور ۲۸۳
۵-۲ نقش تایریستور به‌عنوان سوئیچ؛ مقادیر نامی ۲۸۳
۵-۳ ملاحظات حرارتی ۲۸۶
۵-۴ توصیف کنترلر تایریستوری ۲۸۷
۵-۴-۱ کلیات ۲۸۷
۵-۴-۲ مدار ضربه‌گیر R-C ۲۹۰
۵-۴-۳ انرژی آتش‌کننده ۲۹۱
۵-۴-۴ حفاظت در مقابل اضافه ولتاژ ۲۹۳
۵-۴-۵ تغییرات تلفات کنترلر تایریستوری در خلال عملکرد آن ۲۹۳
۵-۵ سیستم خنک‌کننده ۲۹۴
۵-۵-۱ سیستم خنک‌کننده با هوای فیلتر شده ۲۹۴
۵-۵-۲ تغییرات سیستم خنک‌کننده با هوای فیلتر شده ۲۹۶
۵-۵-۳ سیستم هوای سیر کوله شده مجدد ۲۹۶
۵-۵-۴ سیستم خنک‌کننده با سیال ۲۹۷
۵-۵-۵ نظریات کلی در کاربرد سیستم‌های خنک‌کننده ۲۹۷
۵-۶ مثالی از کنترلر تایریستوری ۲۹۷
مراجع ۲۹۹

۶ مثالی از جبران‌کننده استاتیک جدید ۳۰۱

۶-۱ مقدمه ۳۰۱
۶-۲ آرایش اصلی ۳۰۱
۶-۳ توصیف اجزاء اصلی ۳۰۳
۶-۴ سیستم کنترل کنترلر تایریستوری ۳۰۸
۶-۵ آزمایش رفتار سیستم ۳۱۰

۷ خازن‌های سری ۳۱۳

۷-۱ مقدمه ۳۱۳
۷-۲ تاریخچه ۳۱۴
۷-۳ طراحی تجهیزات ۳۱۵

۷–۳–۱ واحدهای خازن ۳۱۵
۷–۳–۲ حفاظت با فیوز ۳۱۶
۷–۳–۳ فاکتورهای جبران‌سازی ۳۱۷
۷–۳–۴ آرایش فیزیکی ۳۱۷
۷–۴ وسایل حفاظتی ۳۱۹
۷–۵ روش‌های وارد کردن مجدد خازن ۳۲۴
۷–۶ حفاظت با واریستور ۳۲۵
۷–۷ اثرات رزونانس با خازن‌های سری ۳۲۹
۷–۸ خلاصه ۳۳۲
مراجع ۳۳۳

۸ کندانسورهای سنکرون ۳۳۵

۸–۱ مقدمه ۳۳۵
۸–۲ جنبه‌های طراحی کندانسور ۳۳۶
۸–۳ مشخصه‌های اصلی الکتریکی ۳۳۹
۸–۳–۱ ثابت‌های ماشین ۳۳۹
۸–۳–۲ دیاگرام فازوری ۳۴۰
۸–۳–۳ منحنی – V ۳۴۱
۸–۳–۴ مدار معادل ساده شده ۳۴۲
۸–۴ عملکرد کندانسور ۳۴۳
۸–۴–۱ کنترل ولتاژ سیستم قدرت ۳۴۳
۸–۴–۲ تأمین توان راکتیو اضطراری ۳۴۳
۸–۴–۳ تقلیل نوسانات گذرا ۳۴۶
۸–۴–۴ کاربردهای HVDC ۳۵۰
۸–۵ روش‌های راه‌اندازی ۳۵۱
۸–۵–۱ راه‌اندازی با موتور ۳۵۱
۸–۵–۲ راه‌اندازی با ولتاژ کاهش یافته ۳۵۲
۸–۵–۳ راه‌انداز استاتیکی ۳۵۴
۸–۶ ملاحظات در طراحی پست ۳۵۵
۸–۶–۱ آرایش تک‌خطی ۳۵۵
۸–۶–۲ کنترل و حفاظت ۳۵۶

۸-۶-۳ سیستم‌های کمکی ۳۵۶
۸-۷ خلاصه ۳۵۷
مراجع ۳۵۸

۹ جبران راکتیو و کوره قوس الکتریکی ۳۵۹

۹-۱ مقدمه ۳۵۹
۹-۲ کوره الکتریکی به‌عنوان بار الکتریکی ۳۶۰
۹-۲-۱ کوره الکتریکی در تولید فولاد ۳۶۰
۹-۲-۲ نیازمندی‌های سیستم تغذیه کوره‌های الکتریکی ۳۶۱
۹-۳ فلیکر و اصول جبران‌سازی آن ۳۶۵
۹-۳-۱ ماهیت کلی مسأله فلیکر ۳۶۵
۹-۳-۲ روش‌های جبران‌سازی فلیکر ۳۶۹
۹-۳-۳ انواع جبران‌کننده ۳۷۳
۹-۴ جبران‌کننده‌های کنترل شده با تایریستور ۳۷۴
۹-۴-۱ ارتباط بین توان راکتیو جبران‌کننده و زاویه آتش تایریستور ۳۷۵
۹-۴-۲ تعیین توان راکتیو مورد نیاز ۳۷۹
۹-۴-۳ مثالی از نتایج حاصل از جبران فلیکر با استفاده از TCR ۳۸۰
۹-۵ جبران‌کننده‌های راکتور قابل اشباع ۳۸۱
۹-۵-۱ جبران‌کننده راکتور انشعابی یا دارای تپ/راکتور قابل اشباع ۳۸۱
۹-۵-۲ جبران‌کننده راکتور قابل اشباع چند فازه جبران شده هارمونیکی ۳۸۴
مراجع ۳۸۶

۱۰ هارمونیک ۳۸۹

۱۰-۱ مقدمه ۳۸۹
۱۰-۲ منابع هارمونیک ۳۸۹
۱۰-۳ اثر هارمونیک بر تجهیزات الکتریکی ۳۹۴
۱۰-۴ رزونانس، خازن‌های موازی، و فیلترها ۳۹۶
۱۰-۵ سیستم فیلتر ۴۰۱
۱۰-۶ تداخل تلفنی ۴۰۵
مراجع ۴۰۸