کنترل خازنهای نصب شده در سیستم های توزیع با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مبتنی بر توابع پایه شعاعی

محمد فرخی
farrokhi@iust.ac.ir

ابوالفضل سلامی
abl_salami@yahoo.com

دانشکده مهندسی برق
دانشگاه علم و صنعت ایران
نارمک - تهران

کلمات کلیدی : سیستم توزیع، برنامه‌ریزی خازنها، شبکه‌عصبی مصنوعی، توابع پایه شعاعی

چکیده

این مقاله یک سیستم کنترل خازنهای نصب شده در سیستم توزیع را با استفاده از روش هوشمند شبکه‌های عصبی مصنوعی مبتنی برتوابع پایه شعاعی ارائه می‌کند. کنترل مورد نظر به منظور کاهش تلفات سیستمهای توزیع با کنترل بهینه‌توان راکتیو صورت می‌پذیرد. شبکه عصبی بکار گرفته شده در این مقاله یکی از مناسبترین شبکه‌های عصبی در مسائل مختلف است که نسبت به شبکه پرسپترون چند لایه دارای عملکرد بهتری می‌باشد. با توجه به سادگی این روش و سرعت بالای آن، روش بکار برده شده می‌تواند راهکار مناسبی برای حل مساله کنترل توان راکتیو سیستمهای توزیع به صورت وصل- خط باشد. برای نشان دادن کارآیی‌روش، روش پیشنهادی بر روی شبکه نمونه‌ای که داده‌های آن معلوم هستند اجرا گردید و مشاهده شد که نتایج مطلوبتری حاصل می‌گردد.

۱- مقدمه

با توجه به رشد روز افزون شبکه های قدرت و به دلیل بهم پیوستگی مناطق همجوار و گسترده بودن شبکه های توزیع، بررسی این شبکه‌ها با توجه به اهداف گوناگونی همچون کنترل وحفاظت دارای اهمیت فراوانی است. کنترل توان راکتیو درسیستمهای توزیع به عنوان‌یک‌عامل‌مهم‌درطراحی و بهره برداری سیستمهای قدرت همواره مورد توجه بوده است. علاوه بر اجزا شبکه توزیع، اغلب بارهای الکتریکی نیز توان راکتیو مصرف می‌کنند که این توان راکتیو مورد نیاز باید از محلی تامین گردد. اگر انتقال توان راکتیو به راحتی امکان پذیر نباشد باید در محل مورد نیاز آن را تولید کرد. در سیستم های توزیع از خازنهای موازی برای بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش بارگیری خط و کاهش تلفات همراه با اصلاح ضریب توان استفاده می‌شود.

مسئله کنترل خازنهای نصب شده بر روی شبکه های توزیع برای کاهش تلفات سیستم توزیع از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. مسئله مورد نظر در واقع تنظیم خازنهای موجود با توجه به تغییرات زمانی بار است.

روشهای متعددی برای کنترل توان راکتیو در سیستم های توزیع ارائه شده است که هر یک سعی در رسیدن به‌حل بهینه همراه با افزایش سرعت محاسبات‌رادارند. بسیاری از روشهای ارائه شده برای کنترل خازنها همراه با مسئله جایابی بهینه خازنها هستند که در سطوح مختلف بار،عملیات جایابی بهینه خازنها انجام شده و بر این اساس برنامه کنترلی بنا‌ده می‌شود

بعضی از روشهای ارائه شده همراه‌با تقریبهایی مسئله را حل می‌کنند [۱] و بعضی دیگر نیزبا توجه به در نظر گرفتن حل همزمان دو مسئله جایابی و کنترل دارای دقت مطلوب نیستندو با این‌کارسرعت محاسبات‌را نیزکاهش می‌دهند [۲] بیشتر روشهای ارائه شده برای کنترل خازنها دارای محاسبات طولانی و زمانبر هستند. بنابراین، هدف اساسی تنظیم‌خازنهابه صورت بهینه و مبتنی بر تعداد محدودی اندازه گیری است که در کمترین زمان با دقت کافی جواب مطلوب را نتیجه دهد.

امروزه توجه خاصی به استفاده از روشهای هوشمند در سیستم های قدرت شده است و در این زمینه کارهای زیادی نظیربهبود عملکرد سیستم های کنترل اتوماتیک، کاربرد در قابلیت اطمینان سیستمهای قدرت و استفاده در مباحث‌حفاظت سیستم‌های قدرت انجام پذیرفته است. مرجع[۳] روشهای مختلف هوش مصنوعی بکار گرفته‌شده، برای مسئله جایابی بهینه خازنها و کنترل مناسب آنها در سیستم‌های توزیع را مورد بررسی قرار داده است.

استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی می‌تواند تا مقدار زیادی سرعت محاسبات را بالا ببرد. در این شبکه‌ها با استفاده از پیش الگوهای تهیه شده(نمونه‌های‌آموزش)، می‌توان عمل تعلیم را انجام داد و سپس بامقادیر جدید(نمونه های آزمایش)و شبکه طراحی شده،جوابها را درکمترین زمان بدست آورد. دراین زمینه می‌توان از انواع الگوریتم‌های موجود درشبکه‌های‌عصبی‌استفاده‌کرد. یکی‌ازشبکه‌های به‌کاررفته برای این‌منظورشبکه عصبی‌پرسپترون‌چند لایه است [۴] که نتایج مطلوبی‌نیز از آن حاصل شده است. نتایج‌تحقیقات‌گوناگون‌نشان‌داده اند که شبکه های عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی در بسیاری از کاربردهای سیستم‌های قدرت دارای عملکرد بهتری نسبت به شبکه عصبی‌پرسپترون‌چند لایه هستند [۵]. در این مقاله، تنظیم خازنها با استفاده از شبکه عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی انجام شده و سپس نتایج آن با نتایج شبکه عصبی‌پرسپترون‌چند لایه مقایسه‌می‌شود

درادامه، ابتدا فرمول بندی مسئله کنترل توان راکتیو در سیستمهای توزیع ارائه خواهد شد و سپس مختصری از طراحی شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر توابع پایه شعاعی بیان می‌شود. سپس شبکه کنترلی برای تنظیم خازنها ارائه می‌شود و در انتها نیز، نتایج اجرای برنامه‌ها بررسی خواهند شد.

۲- فرمول‌بندی مسئله کنترل‌توان‌راکتیو در سیستمهای توزیع

هدف از کنترل توان راکتیو،بهینه، بهبود بخشیدن پروفیل ولتاژ و حداقل سازی تلفات‌سیستم توزیع است. هدف از نصب خازنها در سیستم های توزیع، کاهش تلفات است. با توجه به تغییرات بار در طول روز مطلوب است که مقدار خازنهای نصب شده نیز بر اساس این تغییرات تغییر یابد. با توجه به حد بالا و پایین سطوح بار موجود و فواصل میان آنها، می‌توان با در نظرگرفتن تنظیم خازنها برای سطوح محاسبه شده، با انتخاب تعداد تپ مشخصی، تعدادی مقدار گسسته معین برای خازنها بدست آورد.

در ابتدا باید با توجه به مقادیر اندازه گیری شده برای توانهای اکتیو و راکتیو و ولتاژ در باسها و با استفاده از پخش بارهای مناسب سیستم های توزیع در حالات گوناگون، مقادیر خازنها را طوری معین کرد که تابع هدف مسئله، که همان تابع هزینه می‌باشد و مطابق زیر تعریف می‌گردد،حداقل شود

$$S = k_p P_{loss} + k_e E + k_c Q(c) \qquad (1)$$

در این معادله

k_p ضریب تبدیل معادل برای تبدیل حداکثر تلفات به هزینه

k_e :ضریب تبدیل معادل برای تبدیل تلفات انرژی به هزینه

P_{loss} : حداکثر تلفات توان حقیقی در سیستم توزیع

E : تلفات انرژی در سیستم توزیع

k_c : ضریب هزینه خازنها

$Q(c)$: مقدا رخازن نصب شده درسیستم توزیع هستند.

با استفاده از روشهای گوناگون جایابی بهینه خازنها می‌توان مقادیر خازنها را برای سطوح مختلف بار تعیین کرد. سپس بر اساس مقادیر تنظیم شده موجود با توجه به سطوح بار در نظرگرفته شده میتوا ن روشهای مناسب هوشمند را در نظر گرفته و بر اساس آنها مقدار خازنها را کنترل کرد.

۳- شبکه های عصبی مصنوعی مبتنی بر توابع پایه شعاعی

شبکه های عصبی مصنوعی قادرند که پیچیدگی مسئله را تجزیه کنند و نقشه های ورودی و خروجی غیر خطی را که همچون بخشهایی برای کنترل خازنها هستند را به صورت ساده آشکار کنند. شبکه های عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی‌گونه‌ای‌ازشبکه‌های‌عصبی‌پیشخورد هستند که در لایه مخفی آنها از توابع پایه شعاعی استفاده شده است. بر خلاف شبکه‌های دیگر که تمام نقاط فضای ورودی را یکسان در نظر می‌گیرند، در این شبکه ها فقط محدوده هایی از فضای ورودی‌را در نظر می‌گیرند که در آن محدوده‌ها تجمعی از داده‌ها وجود داشته باشد. با توجه به ساختارشبکه، در ابتدا داده های ورودی به عنوان لایه ورودی برای شبکه در نظر گرفته‌می‌شوند و سپس یک لایه مخفی شامل واحدهای پردازش غیر خطی و یک لایه خروجی از وزنهای‌خطی‌منظورمی‌شود. سپس با محاسبه خروجیها و حداقل کردن اختلاف بین خروجیهای دلخواه و خروجیهای واقعی می‌توان نگاشت خروجی - ورودی مورد نظر را بدست آورد. روشهای متفاوتی برای تعیین پارامترهای شبکه مبتنی بر تابع پایه شعاعی وجود دارد که با این روشها می‌توان پارامترهای مورد نیاز را تنظیم کرد. در این مقاله نیز با استفاده از روش بیان شده، مسئله کنترل خازنهای نصب شده درسیستم های‌توزیع حل می‌گردد.

شبکه های عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی با شبکه های پرسپترون چند لایه از چند جهت با هم اختلاف دارند. شبکه های عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی یک لایه مخفی تنها دارند درحالی که شبکه های پرسپترون چند لایه، ممکن است یک یا چند لایه مخفی داشته باشند. در شبکه های عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی توابع انتقال بین لایه ورودی و لایه مخفی غیر خطی هستند و توابع انتقال بین لایه مخفی و لایه خروجی خطی هستند اما درشبکه های‌پرسپترون‌چند لایه،توابع انتقال هرلایه‌مخفی و لایه قبلی اش غیرخطی هستند و توابع انتقال لایه خروجی ممکن است خطی یا غیر خطی باشند. هر دو شبکه موجود نگاشتی از ورودی - خروجی ارائه می‌دهند که این نگاشت در دو مرحله انجام می‌گیرد:

۱- تبدیل غیر خطی از فضای ورودی به فضای مخفی ۲- تبدیل خطی از فضای مخفی به فضای‌خروجی

۴- طراحی شبکه کنترل خازنها

به طور کلی سرعت همگرایی فرآیندیادگیری یک شبکه عصبی مصنوعی به درجه غیر خطی بودن ارتباط بین خروجی و ورودی بستگی دارد. اگر این درجه غیرخطی بودن بین خروجی و ورودی زیاد باشد، خطای بدست آمده در خروجی شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند زیاد باشد. شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده بر اساس ارتباط غیرخطی بین پروفیل‌باروتنظیم‌خازنها طراحی می‌گردد.

۱- ۴ انتخاب ورودی

ورودی به شبکه عصبی، سطوح بار از تمام سیستمهای فرعی یا زیرسیستمها است. درصورت‌معین‌نبودن‌سطوح بار،عملیات‌پیش بینی باربه عنوان مرحله‌ای دیگر به ساختار شبکه کنترلی اضافه می‌شود. تعیین زیر سیستمها در هر شبکه توزیع به ساختار شبکه وابسته است. معمولا حالتهای متفاوتی را می‌توان برای تعیین زیر سیستمها در نظر گرفت. بر اساس دیاگرام تک خطی شبکه توزیع می‌توان شاخه اصلی را یک زیرسیستم و هر شاخه فرعی را زیرسیستم دیگری درنظر گرفت. روش دیگر مبتنی برمکان خازنهای نصب شده و تلفیق آن با روش قبلی است،که در هر زیر سیستم یک خازن قرار گیرد. با توجه به اینکه محل نصب وسایل اندازه‌گیری در سیستمهای توزیع بر اساس ناحیه‌بندی سیستم تعیین می‌گردد، بهترین روش انتخاب زیر سیستمها بر اساس نواحی معین شده است.

۲- ۴ انتخاب خروجی

خروجی‌سیستم کنترل کننده‌خازنهای‌نصب شده را تنظیم می‌کند. در این مسئله فرض شده است هر خازن دارای تعدادی تپ است که این تپها خروجی هر شبکه عصبی مصنوعی را تعیین می‌کند. مقادیر انتخاب تپهای خازنی بر اساس اجرای تعیین مقادیر بهینه خازنها بر اساس سطوح بار مختلف انجام پذیرفته است.

۵- اجرای سیستم کنترلی طراحی شده

الگوریتم بیان شده در بخشهای قبلی در شبکه توزیعی با ۳۰ باس که در شکل (۱) نشان داده شده است به کار می‌رود. این سیستم مورد نظرشبکه‌نمونه‌ای است‌که درمراجع دیگرنیزاز آن برای‌حل مسئله کنترل بهینه توان راکتیودرسیستمهای توزیع استفاده شده است[۶] همانطور که در شکل نشان داده شده است شبکه‌توزیع مورد نظر به ۶ زیر ناحیه تقسیم شده است که محل وسایل اندازه گیری و ۵ خازن نصب شده نیز در آن معین شده است.

شکل(۱) دیاگرام تک خطی سیستم توزیع نمونه انتخابی

هدف، تنظیم خازنها با توجه به سطوح بار موجود درمحل اندازه‌گیری است. حداقل مقدار خازنی تنظیم شده، نزدیکترین خازن استاندارد با توجه به خازن بدست آمده، متناسب با حداقل پروفیل بار است. حداکثر مقدار استاندارد نیز متناسب با حداکثر پروفیل بار تعیین شده است. بین حداقل و حد اکثر مقدار موجود برای خازنها در سیستم مورد نظر، ۲ تنظیم دیگر طوری طراحی شده اند که اختلاف بین ۴ مقدار یکسان باشد. در جدول (۱) وضعیت خازنهای موجود بیان شده است

جدول (۱) وضعیت تنظیم خازنهای موجود

شماره تپ	خازن۱ در باس۱۳	خازن۲ در باس۱۵	خازن۳ در باس ۱۹	خازن۴ در باس ۲۲	خازن۵ در باس ۲۵
۱	۸۷۵	۸۷۵	۵۰۰	۷۵۰	۶۰۰
۲	۷۰۰	۷۰۰	۴۲۵	۷۵۰	۵۲۵
۳	۵۲۵	۵۲۵	۳۵۰	۷۵۰	۴۵۰
۴	۳۵۰	۳۵۰	۲۷۵	۷۵۰	۳۷۵

با توجه به جوابهای موجود برای تنظیم بهینه خازنها [۴]، که برای ۲۰ حالت از مقادیر مختلف، مقادیر واقعی خازنها تعیین شده است، برای آموزش شبکه عصبی فقط به این ۲۰ الگو اکتفا گردید که ۱۵ حالت اول برای آموزش شبکه و ۵ حالت بعدی برای تست شبکه عصبی طراحی‌شده به کارگرفته شد. نتایج موجود درمرجع[۴]، که با تعداد زیادی الگوی آموزشی بدست آمده است در جدولهای (۲)و(۳) نشان داده شده است.

جدول(۲) تخمین مقادیر با شبکه پرسپترون چند لایه [۴]

حالت	c1	c2	c3	c4	c5
۱۶	۳۵۰	۳۵۰	۲۷۵	۷۵۰	۵۲۵
۱۷	۸۷۵	۸۷۵	۵۰۰	۷۵۰	۶۰۰
۱۸	۳۵۰	۵۲۵	۴۲۵	۷۵۰	۶۰۰
۱۹	۳۵۰	۸۷۵	۵۰۰	۷۵۰	۶۰۰
۲۰	۵۲۵	۸۷۵	۵۰۰	۷۵۰	۶۰۰

جدول(۳) خطای بین مقادیرتخمینی بامقادیر واقعی برای شبکه پرسپترون چند لایه [۴]

حالت	c1	c2	c3	c4	c5
۱۶	۴۲	۳۸	۹	۰	۳۷
۱۷	۸۶	۰	۰	۰	۰
۱۸	۸۵	۳۰	۲۴	۰	۰
۱۹	۱۲۵	۴۵	۰	۰	۰
۲۰	۲۵۵	۴۵	۰	۰	۰
خطا بله خطی	۱۷۵	۱۷۵	۷۵	۰	۷۵

برای ارزیابی شبکه عصبی‌مبتنی بر توابع پایه شعاعی ، با توجه به الگوهای محدود تهیه شده برای سیستم توزیع مورد نظر با استفاده ازجوابهای مرجع[۴]، نتایج اجرای برنامه برای‌دوشبکه پرسپترون چند لایه و توابع‌پایه شعاعی به ترتیب درجدولهای(۴)،(۵)،(۶)و(۷)داده شده‌است. منظور از تخمین مقادیر، تنظیم مقادیر تعیین‌شده به نزدیکترین مقدار استاندارد است.

جدول(۴) تخمین مقادیر با شبکه پرسپترون چند لایه با الگوهای محدود

حالت	c1	c2	c3	c4	c5
۱۶	۳۵۰	۳۵۰	۲۷۵	۷۵۰	۶۰۰
۱۷	۷۰۰	۸۷۵	۵۰۰	۷۵۰	۶۰۰
۱۸	۵۲۵	۳۵۰	۵۰۰	۷۵۰	۶۰۰
۱۹	۵۲۵	۸۷۵	۵۰۰	۷۵۰	۶۰۰
۲۰	۷۰۰	۸۷۵	۳۵۰	۷۵۰	۶۰۰

جدول(۵): خطای بین مقادیرتخمینی بامقادیر واقعی برای شبکه پرسپترون چند لایه با الگوهای محدود

حالت	c1	c2	c3	c4	c5
۱۶	۴۲	۳۸	۹	۰	۳۸
۱۷	۸۹	۰	۰	۰	۰
۱۸	۹۰	۱۴۵	۹۹	۰	۰
۱۹	۵۰	۴۵	۰	۰	۰
۲۰	۸۵	۴۵	۱۵۰	۰	۰
طول پایه مجازی	۱۷۵	۱۷۵	۷۵	۰	۷۵

جدول(۶): تخمین مقادیر با شبکه مبتنی برتوابع پایه شعاعی با الگوهای محدود

حالت	c1	c2	c3	c4	c5
۱۶	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۷۵۰	۶۰۰
۱۷	۸۷۵	۸۷۵	۵۰۰	۷۵۰	۶۰۰
۱۸	۳۵۰	۵۲۵	۴۲۵	۷۵۰	۵۲۵
۱۹	۵۲۵	۷۰۰	۵۰۰	۷۵۰	۶۰۰
۲۰	۸۷۵	۷۰۰	۵۷۵	۷۵۰	۶۰۰

جدول(۷): خطای بین مقادیرتخمینی بامقادیر واقعی برای شبکه مبتنی برتوابع پایه شعاعی با الگوهای محدود

حالت	c1	c2	c3	c4	c5
۱۶	۴۲	۳۸	۶۶	۰	۳۸
۱۷	۸۶	۰	۰	۰	۰
۱۸	۸۵	۳۰	۲۴	۰	۷۵
۱۹	۵۰	۱۳۰	۰	۰	۰
۲۰	۹۵	۱۳۰	۷۵	۰	۰
طول پایه مجازی	۱۷۵	۱۷۵	۷۵	۰	۷۵

جوابهای شبکه پرسپترون چند لایه در [۴]با ۵شبکه مجزا و ۶ ورودی، ۱ لایه مخفی با۳۲ سلول و ۴ خروجی برای هر شبکه در اینجا تکرار شده است،که تعداد سلولها وانتخاب تابع بهینه با سعی وخطا انجام پذیرفته است و برای آموزش از تعداد زیادی الگو استفاده شده است. جوابهای شبکه پرسپترون چند لایه(تعداد الگوهای محدود) با ۲ لایه مخفی سیگموئید وبه ترتیب با ۱۰ و۸ سلول وخروجی سیگموئید داده شده است،که تعداد سلولها وانتخاب تابع بهینه با سعی وخطا انجام پذیرفته است. روش مبتنی‌برتوابع‌پایه شعاعی (تعداد الگوهای محدود) با ۶ سلول مخفی وتابع پایه از نوع گوشی انجام شده است.

با مقایسه خطای روش مرجع[۴]و نتایج دو روش در جدولهای(۳)،(۵)و(۷) مشاهده می‌شود که اگر هر حالت خطای بیشتر ازطول پله خارجی به عنوان‌یک‌امتیازمنفی تلقی‌شود، در این‌صورت شبکه پرسپترون چند لایه(تعداد الگوهای محدود) دارای ۲ امتیاز منفی به عنوان شاخص عملکرد است و جوابهای مرجع [۴] با تعداد زیادتر الگوی آموزشی دارای ۱ امتیاز منفی می‌باشد، در حالیکه شبکه مبتنی‌برتوابع‌پایه شعاعی امتیاز منفی ندارد. اگر زمان اجرای دو برنامه نوشته شده در شرایط یکسان مقایسه گردد می‌توان مشاهده نمود که شبکه مبتنی برتوابع‌پایه شعاعی تقریبا ۲۰ برابر سریعتر ازشبکه پرسپترون چند لایه عمل می‌کند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله سیستمی با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی مبتنی بر توابع پایه شعاعی برای حل مسئله کنترل خازنهای نصب شده در سیستم های توزیع به کار گرفته شد. برای تعیین برنامه‌ریزی کنترل خازنهای نصب شده ابتدا اطلاعات ورودی بار برای ورودی شبکه تهیه شده و در خروجی مقدار تنظیم خازنهای نصب شده بدست می‌آید.

برای تست روش پیشنهادی از اطلاعات خروجی مقاله‌ای که مبتنی بر شبکه پرسپترون چند لایه بود استفاده گردید و مشاهده گردید با توجه به این‌که از تعداد خیلی محدودتری داده های آموزشی استفاده شده است نتایج بهتری در مقایسه با حالت بهینه بدست می‌آید. برای ارزیابی بهتر، شبکه کنترلی توسط دو روش پس- انتشار خطا و استفاده از توابع پایه شعاعی آموزش داده شد و مشاهده گردید که شبکه عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی دارای شاخص عملکرد بهتر و سرعت بالاتری درمقایسه باشبکه‌های پرسپترون چند لایه می‌باشد ومی‌تواند به صورت وصل- خط مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] M. M. M. Salama and A. Y. Chikhani, "A simplified network approach to the var control problem for radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Delivery*,vol. 8,no. 3,July 1993, pp. 1529-35.

[2]Y. Y. Hsu and C. C. Yang, "A hybrid artifical neural network- dynamic programing approach 9,no. 2,May.1994, pp. 1069-75.for feeder capacitor scheduling,"*IEEE Trans. Power System*,vol.

[3]H. N. Ng , M. M. M. Salama and A. Y. Chikhani, "A survey of the application of AI in capacitor allocation and control,"*IEEE conference power* ,1997, pp. 161-64.

[4] N. I. Santoso and O. T. Tan, "Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems,"*IEEE Trans. Power Delivery*,vol. 5,no.1,Jan.1990, pp. 266-72.

[5] D. K. Ranaweera, N. F. Hubele and A. D. Paplexopoulos, "Application of radial basis function neural network model for short-term load forecasting," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 1995, 142, (1), pp. 45-50.

[6] G. Ramakrishna, N. D. Rao, "Fuzzy inference system to assist the operator in reactive power -control in distribution systems," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 1998, 145, (2), pp. 133 138.