بهینه سازی هزینه تجهیزات حفاظتی شبکه‌های توزیع الکتریکی

علیرضا حاتمی[۱] ،علی یزدیان[۲] ،عبدالامیر یاقوتی[۱]، کاظم زارع[۱] ،ایرج احمدی[۱] ،تقی بارفروش[۱]

۱: دانشجوی دکترای دانشگاه تربیت مدرس؛۲: عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت مدرس

کلمات کلیدی: شبکه‌های توزیع الکتریکی، تجهیزات حفاظتی ، برنامه ریزی دینامیکی

چکیده

هدف اصلی شرکتهای برق ، ارائه خدمات به مشترکین با کیفیت و قابلیت اطمینان مطلوب و حداقل هزینه می باشد. جایابی و تنظیم بهینه تجهیزات حفاظتی بیشترین تاثیر را در بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع می‌گذارند، بهمین دلیل اکثر شرکتهای توزیع برق با استفاده از تجربیات عملی خود به تدوین استانداردهایی برای استفاده از تجهیزات حفاظتی در شبکه های توزیع پرداخته‌اند که اجراء آنها ممکنست لزوماً منتهی به جواب بهینه نشود. در کارهای انجام شده، تجهیزات حفاظتی شبکه از لحاظ «نوع،تعداد،مکان» برای مینیمم کردن اندیس(SAIFI)طراحی شده اند؛ اما این نوع اندیسها- اندیسهای متناظر بامشترکین- برای اندازه گیری و نحوهٔ کاهش هزینه خروج مشترکین کارایی لازم را نداشته و مناسب نمی باشد.

دراین مقاله روشی جدید برای جایابی بهینه تجهیزات حفاظتی از نظر«نوع،تعداد،مکان»جهت بهبود شاخص قابلیت اطمینان ومینیمم کردن تابع هزینه(شامل هزینه خروج مشترکین وهزینه تجهیزات حفاظتی) با استفاده از روش برنامه ریزی دینامیکی ارائه شده است. روش پیشنهادی روی یک شبکه توزیع واقعی، قسمتی از شبکه توزیع تهران، مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج حاکی از مطلوب بودن روش پیشنهادی است.

۱- مقـــــدمه

بررسی آمارها نشان می دهد که بیشترین خاموشیهای مشترکین شرکتهای توزیع نیروی برق ناشی از خطاها و حوادث شبکه توزیع می باشد[۱]. با بهبود قابلیت اطمینان شبکه می توان خدمات مطلوبتری به مشترکین ارائه داد .در شبکه های توزیع الکتریکی، تجهیزات حفاظتی بیشترین اثر را در بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع بر عهده دارند؛ در نتیجه کارهای زیادی برای بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع به کمک تجهیزات حفاظتی ارائه شده است. مرجع [۲] به بررسی جایابی بهینه سکشنالایزرها در شبکه توزیع پرداخته است.در مراجع [٤-۳] به تعیین تعداد، نوع و محل تجهیزات حفاظتی برای مینیمم کردن شاخص قابلیت اطمینان«SAIFI»(متوسط فرکانس قطع سیستم) اشاره شده است. مرجع [٥] به بحث درباره تعیین تعداد، نوع و مکان تجهیزات حفاظتی برای مینیمم کردن شاخصهای قابلیت اطمینان SAIFI و MAIFI(متوسط فرکانس قطع لحظه ای سیستم) و همچنین برقراری مصالحه ای بین آنها پرداخته است.گرچه در بررسیهای انجام شده، مشخص شده بیشترین شاخصهایی که توسط شرکتهای بهره بردار استفاده می شوند، شاخصهای قابلیت اطمینان متناظر با مشترکین می باشد[٦]؛ اما واقعیت اینستکه هیچگونه ارتباط مستقیمی بین این نوع شاخصها و هزینه خروج سیستم وجود ندارد و این نوع شاخصها

راهکاری برای کاهش هزینه خروج ارائه نمی دهند. به نظر می رسد معیاری که هم هزینه خروج مشترکین و هم هزینه تجهیزات حفاظتی را در بر داشته باشد ،معیاری مناسب برای جایابی تجهیزات حفاظتی می باشد.

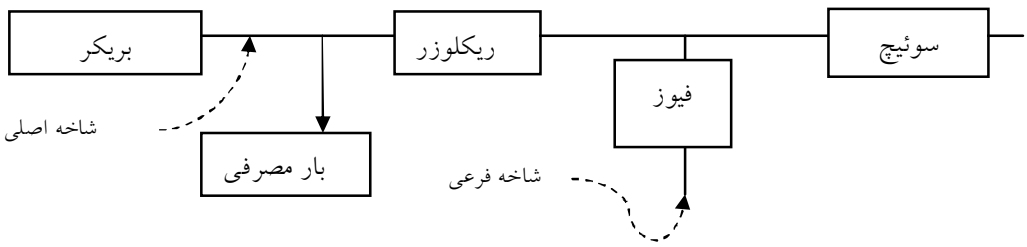
در این مقاله روشی جدید برای بهینه کردن «نوع،تعداد،مکان»تجهیزات حفاظتی با در نظر گرفتن معیاری- که شامل هزینه خروج مشترکین وهزینه تجهیزات حفاظتی باشد- ارائه می شود و سپس روش ارائه شده روی یک شبکه توزیع عملی اجراء شده است ؛نتایج حاصله نشاندهنده مطلوب بودن روش پیشنهادیست.

۲-شبکه های توزیع الکتریکی و تجهیزات حفاظتی

شبکه های توزیع به شکلهای مختلفی نظیر شعاعی، شعاعی حلقه باز، حلقوی و غربالی طراحی و بعضاً بهره برداری می شوند. اکثر شبکه های توزیع موجود از نوع غربالی بوده که همواره به صورت شعاعی مورد بهره برداری قرار می گیرند. شکل (۲) یک نمونه شبکه توزیع را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود هر شبکه شامل یک فیدر اصلی و تعدادی شاخه می باشد که از فیدر اصلی تغذیه می شوند. روی فیدر اصلی و شاخه ها مصرف کنندگان قرار گرفته اند.تجهیزات حفاظتی در روی فیدر اصلی ، شاخه ها و نقاط اتصال بار به فیدر اصلی و شاخه ها نصب می شوند.

سیستم حفاظتی شبکه توزیع شامل بریکر، ریکلوزرهای خط اصلی ، سکشنالایزرها ، سکسیونرها و فیوز می باشند که در طول فیدر اصلی ، شاخه ها و همچنین نقاط اتصال بار به شبکه نصب می شوند. مطابق شکل(۱) ، بریکر معمولاً در ابتدای خط و درون پست فوق توزیع نصب می شود و دارای خاصیت باز بست مجدد برای برطرف کردن خطاهای گذرا می باشد. ریکلوزرها در طول خط اصلی وهمچنین در نقاط اتصال شاخه ها به فیدر اصلی نصب می شوند. عملکرد ریکلوزر همچون بریکربوده، در صورت رخ دادن خطا می تواند بصورت اتوماتیک عمل نموده خطاهای گذرا را سریعاً پاک نماید، همچنین قادر به انجام عمل قطع و وصل مجدد برای دفعات متعدد و با سرعت بالا در زمانهای مشخص می باشد؛ بطوریکه با هماهنگی سکشنالایزر ها قادر به جدا نمودن قسمت خطا دیده شبکه و برقدار کردن قسمتهای سالم می باشد. هزینه زیاد و هماهنگی حفاظتی مهمترین عوامل محدود کننده استفاده از ریکلوزر در شبکه های توزیع می باشند.

سکشنالایزرها در صورت رخداد خطا، قادر به تشخیص خطا نمی باشند اما با توجه به فرمان ریکلوزر قادر به قطع قسمتی از مدار جهت تعیین مکان عیب در شبکه می باشند.سکسیونرها نیز شبیه سکشنالایزر در صورت رخ دادن عیب ، قادر به تشخیص و رفع آن نمی باشند. این نوع تجهیزات بصورت دستی عمل نموده و به کمک آن می توان قسمت آسیب دیده از شبکه را جدا نمود. در صورت استفاده از سکسیونر مدت زمان قطعی مشترکین بیشتر از زمانیست که از سکشنالایزر استفاده می شود.فیوزها نیز یک وسیله حفاظتی می باشند که در صورت وقوع عیب در محدوده حفاظتی خود عمل نموده و از انتشار خطا به دیگر قسمتهای شبکه جلوگیری می کنند اما تا زمانی که فیوز معیوب تعویض نشود برق مشترکین قطع خواهد ماند. از مزایای فیوز قیمت ارزان آن و از عیوب آن عدم تشخیص خطاهای گذرا می باشد که بهمین دلیل از این المان حفاظتی در طول فیدر اصلی استفاده نمی شود.



شکل(۱) : مدل شبکه توزیع و تجهیزات وحفاظتی

۳-اثرات عملکرد تجهیزات حفاظتی بر اندیسهای قابلیت اطمینان

برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه های توزیع اندیسهای زیادی تعریف شده‌اند ؛این اندیسها را می توان به سه دسته ذیل تقسیم کرد.

- اندیسهای نقاط بار
- اندیسهای متناظر با مشترکین
- اندیسهای متناظر با بار

تجهیزات حفاظتی با عملکرد اتوماتیک (نظیر بریکر ،فیوز و ریکلوزر) باعث کاهش تعداد مشترکین متاثر شده از یک خروج می شوند. همچنین باعث کاهش تعداد دفعات و مدت زمان خروج مشترکین می شوند.

بعبارت دیگر استفاده بیشتر از این نوع تجهیزات قابلیت اطمینان سیستم را بهبود می بخشد اما محدودیتهایی نظیر هزینه نصب تجهیزات ، عدم هماهنگی تجهیزات و ... سبب می شود که در استفاده از آنها محدودیت اعمال شود.

تجهیزات حفاظتی با عملکرد دستی مانند سوئیچ و سکسیونر مدت زمان قطع مدار را با جدا کردن تجهیزات آسیب دیده از شبکه کاهش می دهند اما در فرکانس قطع مشترکین تا ثیری ندارند.

تجهیزات حفاظتی با تکنولوژی کنترل از راه دور نظیر سکشنالایزر اجازه می دهند که اپراتور از راه دور قسمت معیوب شبکه را تشخیص و جدا نماید و سایر قسمتهای شبکه را برقدار نماید. بنابراین استفاده ازاین نوع تجهیزات حفاظتی،ابزاری مهم جهت بهبود قابلیت اطمینان شبکه می باشد.

۴-هزینه خروج مشترکین و تجهیزات

در اثر قطع برق در شبکه های توزیع ، هم به مشترکین ،بدلیل عدم تامین برق، و هم به شرکتهای بهره بردار بدلیل عدم فروش انرژی خسارت وارد می شود. در صورت عدم تامین برق برای مشترکین ممکن است وقفه در تولید آنها بوجود آید(مشترکین صنعتی) یا در خدماتی که ارائه می دهند وقفه ایجاد شود(مشترکین تجاری)؛بنابراین میزان ضرر مشترکین به علت قطعی برق بسته به نوع مشترک متفاوت و متغیر بوده،برای مشترکین خانگی این میزان حداقل و برای مشترکین صنعتی حداکثر می باشد.مطابق تحقیقاتی که در ایران انجام شده است [۷] هزینه خاموشی مشترکین مختلف بصورت جدول (۱) می باشد.

جدول(۱) : هزینه انرژی توزیع نشده مشترکین مختلف بر حسب ریال بر کیلووات

مدت خاموشی	هزینه خاموشی مشترکین بر حسب ریال بر کیلووات		
	بار خانگی	بار تجاری	بار صنعتی
۲ ثانیه	--	۱۶/۹۸	۵۳۹/۸۹
۱ دقیقه	--	۱۶/۹۸	۵۳۹/۸۹
۲۰ دقیقه	--	۱۹۳/۷	۹۱۱
یک ساعت	۲۳۸۰	۳۶۴۰	۵۷۶۰
دو ساعت	۷۱۴۰	۱۰۹۲	۱۴۴۰۰

با ملاحظه ارقام جدول (۱) ملاحظه می گردد که خطاهای گذرا نیز برای مشترکین صنعتی حائز اهمیت بوده و می تواند هزینه های سنگینی را به این گروه از مشترکین وارد نماید. در مرجع [۷] نتایج مطالعات مشابه برای کشورهای دیگر آورده شده است که نشان داده شده است با

صنعتی شدن کشورها خسارات وارده به مشترکین صنعتی به شدت افزایش می یابد. هزینه تجهیزات مقدار هزینه ایست که در طول عمر مفید تجهیز صرف آن می شود. برای یک المان، هزینه تجهیز شامل هزینه سرمایه گذاری اولیه و نصب آن و هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه می باشد. هزینه متوسط سالیانه یکی از پارامترهای مهم در انتخاب تجهیزات حفاظتی می باشد. رابطه (۱) نحوه محاسبه بدست هزینه متوسط سالیانه رانشان می دهد.

$$LCC = \frac{IC}{N_y} + MC \qquad (۱)$$

در رابطه(۱)؛ LCC : هزینه متوسط سالیانه تجهیز حفاظتی، IC : هزینه سرمایه گذاری اولیه و نصب تجهیز ، N_y : دوره عمرمفید تجهیز و MC : هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه تجهیز می باشد.

جدول (۲) هزینه سرمایه گذاری اولیه، نصب ، سرویس و نگهداری سالیانه تجهیزات حفاظتی شبکه توزیع را نشان می دهد.

جدول(۲) : هزینه تجهیزات حفاظتی(هزینه به ریال)

نوع تجهیز	هزینه سرمایه گذاری اولیه (IC)	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه(MC)	طول عمر مفید تجهیز(N_y)	متوسط هزینه تجهیز در هر سال(LCC)
ریکلوزر	۱۱۰۰۰۰۰۰۰	٪۲*IC	۲۰	۷۷۰۰۰۰۰
سکسیونر	۲۵۰۰۰۰۰۰	٪۳*IC	۱۵	۲۴۱۰۰۰۰
سکشنالایزر	۵۰۰۰۰۰۰۰	٪۲*IC	۲۰	۳۵۰۰۰۰۰
فیوز	۱۵۰۰۰۰۰	٪۱۰*IC	۱۵	۲۵۰۰۰۰

۵- الگوریتم پیشنهادی

در این تحقیق هدف تعیین«تعداد ، نوع و مکان» تجهیزات حفاظتی در شبکه توزیع برای مینیمم کردن تابع هزینه با توجه به قیود بهره برداری می باشد.در ادامه تابع هزینه ، قیود مسئله بهینه سازی و روش بهینه سازی شرح داده می شود.

۵-۱- تابع هزینه

تابع هزینه‌ای که در نظر گرفته می شود، شامل هزینه خاموشی مشترکین (Outage Cost of Customer) و هزینه تجهیزات حفاظتی – متوسط هزینه سالیانه تجهیزات– (LCC) می باشد؛بنابراین تابع هزینه را می توان به صورت رابطه (۲) نوشت.

$$CF = OCC + LCC \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، CF :تابع هزینه ، OCC :هزینه خاموشی مشترکین ، LCC : هزینه متوسط سالیانه تجهیزات حفاظتی می باشند.

هزینه خاموشیهای مشترکین، با توجه به نوع مشترکین، از رابطه (۳) محاسبه می شود [۸].

$$OCC = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \in m(i)} \lambda_j r_j L_i CIC_i(r_j) \qquad (۳)$$

در رابطه(۳)، n: تعداد نقاط بار شبکه ، λj وr_jبه ترتیب متوسط نرخ خرابی وزمان تعمیر عنصر j ام شبکه ، m(i): مجموعه عناصر شبکه –که خرابی آنها سبب قطع بار نقطه i ام می گردد– ، Li : متوسط بار نقطه i ام برحسب کیلووات و $CIC_i(r_j)$: هزینه خاموشی نقطه بار i ام به سبب خرابی عنصر jام بر حسب ریال بر کیلووات بر دقیقه می باشد.

۵-۲- قیود مسئله

قیودی که در این مسئله بهینه سازی وجود دارد،مربوط به شرایط بهره برداری از شبکه وهماهنگی تجهیزات حفاظتی می باشد [۴-۳]. برخی از قیودی که در مطالعات مد نظر قرار گرفته اند، عبارتند از :

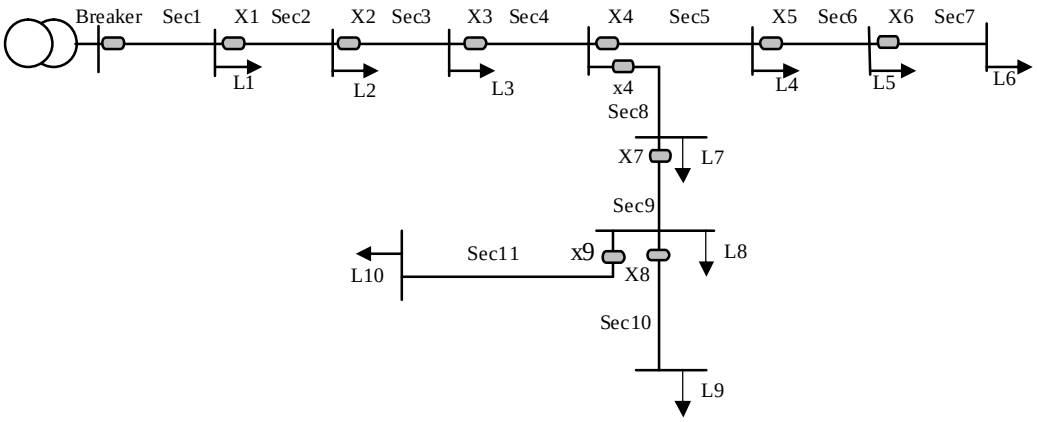
- بریکر تنها در ابتدای فیدر اصلی و در درون پست فوق توزیع نصب می شود.
- فیوز در طول فیدر اصلی نصب نمی شود.
- ریکلوزرها را می توان درطول فیدر اصلی یا نقاط اتصال شاخه ها به فیدر اصلی نصب کرد. تعداد ریکلوزرهای نصب شده بایستی بگونه ای باشد که بین هر نقطه بار و ابتدای فیدر بیش از دو ریکلوزر ، بدلیل مشکلات مربوط به هماهنگی حفاظتی ریکلوزرها، نصب نشود.
- از احتمال عملکرد ناموفق و نرخ خرابی تجهیزات حفاظتی صرفنظر می شود.

۵-۳- روش بهینه سازی

برای جایابی بهینه تجهیزات حفاظتی، از نظر تعداد،مکان و نوع ، از روشهای بهینه سازی مختلفی می توان استفاده کرد. یکی از روشهای مرسوم ، برنامه ریزی پویا(دینامیکی) می باشد.در این روش کلیه حالات ممکن برای نصب تجهیزات حفاظتی مورد بررسی قرار می گیرند. برای یک ترکیب ممکن از تجهیزات حفاظتی ، در صورتیکه قیود مسئله نقض نشود، ابتدا مدهای خطا(کات ستهای مینیمال) مربوط به نقطه بار محاسبه می شود؛ برای هر نقطه بار متناظر با هر مدخطا هزینه خاموشی مربوطه محاسبه می شود؛ از مجموع هزینه های خاموشی –متناظر با مدهای خطا– هزینه خاموشی نقطه باررا می توان بدست آورد؛جمع هزینه های خاموشی نقاط بار ، هزینه خاموشی کل سیستم را بدست می دهد؛ با معلوم بودن هزینه خاموشی شبکه توزیع ونیز ترکیب تجهیزات حفاظتی (از نظر نوع و تعداد) می توان تابع هزینه را محاسبه کرد. در هر تکرار تابع هزینه بدست آمده با حالت قبل مقایسه می گردد و همواره کمترین تابع هزینه و ترکیب تجهیزات حفاظتی متناظر با آن ذخیره می شود.بدین ترتیب می توان بهترین ترکیب ممکن از تجهیزات حفاظتی را برای مینیمم کردن تابع هزینه بدست آورد.

۶- مطالعات عددی

روش پیشنهاد شده بر روی یک فیدر(شکل (۲)) از شبکه توزیع تهران اجراء شده است. در این شبکه کلیه بارها از نوع صنعتی می باشند. نقاط x_1 تا x_9 مکانهای ممکن برای نصب تجهیزات حفاظتی می باشند. در جدول (۳)متوسط نرخ خرابی قسمتهای مختلف (Section) شبکه توزیع ، متوسط زمان تعمیر و متوسط زمان سوییچینگ ،با توجه به آمارهای جمع شده، بیان شده است. جدول (۴) نیز متوسط بار نقاط مختلف شبکه را نشان می دهد.



: مکانهای کاندید جهت نصب تجهیزات حفاظتی

شکل(۲) : شبکه مورد مطالعه

جدول (۳) : متوسط نرخ خرابی ،زمان تعمیر و زمان مانور قسمتهای مختلف شبکه مورد مطالعه

λ(Sec1) [f/yr]	λ(Sec2) [f/yr]	λ(Sec3 [f/yr]	λ(Sec4) [f/yr]	λ(Sec5) [f/yr]	λ(Sec6) [f/yr]	λ(Sec7) [f/yr]	λ(Sec8) [f/yr]	λ(Sec9) [f/yr]	λ(Sec10) [f/yr]	λ(Sec11) [f/yr]
۰	۱	۲/۵	۲	۲	۰/۷۵	۰/۷۵	۲	۱	۱	۳
r= ۵۸ min/f متوسط زمان تعمیرقسمتهای مختلف										
Tsw = ۱۵ min زمان سوییچینگ(سکشنالایزر)						Tsw = ۳۰ min زمان سوییچینگ(سکسیونر)				

جدول (۴) : متوسط بار نقاط مختلف شبکه(برحسب KW)

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
۱۴۰	۴۱۵	۶۹۰	۵۵۰	۴۱۵	۲۸۰	۲۷۰	۵۵۵	۲۷۰	۴۱۵

جدول (۵) ، نتایج حاصل از اجراء روش پیشنهاد شده را نشان می دهد. دیده می شود که استفاده از تجهیزات حفاظتی سبب کاهش هزینه خروج مشترکین می شود؛درصورت عدم نصب تجهیزات حفاظتی مقدار تابع هزینه –که در این حالت برابر هزینه خروج مشترکین است– ۱۵۰٪ بیشتر از حالت بهینه سیستم می باشد. طبق نتایج بدست آمده استفاده از«سه دستگاه ریکلوزر در مکانهای x_3 و x_5 و x_7 ؛ نصب سه دستگاه سکشنالایزر در مکانهای x_6 و x_4(دو دستگاه در x_4)؛ و نصب دو دستگاه فیوز در مکانهایx_8 و x_9 مناسب ترین حالت برای مینیمم کردن تابع هزینه می باشد.

جدول (۵) : نتایج حاصل از روش پیشنهادی

تابع هزینه (برحسب ریال در سال)	تجهیزات حفاظتی نصب شده
۳۵۳۱۱۰۰۰۰	----------
۲۰۵۹۳۳۰۰۰	نصب سه دستگاه ریکلوزر در نقاط x_3، x_5 و x_7 و یک دستگاه سکشنالایزر در x_6 و دو دستگاه سکسیونر در x_4 و دو دستگاه فیوز در نقاط x_8و x_9
۲۰۳۶۲۲۰۰۰	نصب سه دستگاه ریکلوزر در نقاط x_3، x_5 و x_7 و سه دستگاه سکشنالایزر در x_4،x_6 و دو دستگاه فیوز در نقاط x_8و x_9

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشهای مرسوم برای جایابی تجهیزات حفاظتی در شبکه های توزیع الکتریکی مورد بررسی قرار گرفتند و با توجه به نقاط ضعف آنها روشی جدیدوعملی،که مقدار هزینه سیستم را مینیمم می کند، برای جایابی تجهیزات حفاظتی پیشنهاد شده است؛درالگوریتم ارائه شده تابع هزینه ،قیود موجود و روش بهینه سازی- برنامه ریزی دینامیکی- شرح داده شده است؛ سپس روش ارائه شده بر روی یک فیدر شبکه توزیع شهر تهران با استفاده از داده های واقعی اجراء شده و تجهیزات حفاظتی از نظر تعداد ،مکان و نوع بصورت بهینه جایابی شده اند.

۷- مراجع

[1]-R. Billinton and R.N. Allan,Reliability Evaluation of Power Systems,New York:Plenum Prees,1984.
[2]-G. Levitin,S. Mazal-Tov and D. Elmakis,"Optimal Sectionlizer Allocation in Electric Distribution Systems by Genetic Algorithm",Electric Power System Research,Vol. 31,PP. 97-102,1994.
[3]-F. Soudi and K. Tomsovic,"Optimized Distribution Protection Using Binary Programming",IEEE Trans. on Power Delivery,Vol. 13,No. 1,PP. 218-224,Jan. 1998.
[4]- F. Soudi and K.Tomsovic,"Optimal Distribution Protectioin Design:Quality of Soulation and Computational Analysis",Electric Power and Energy Systems 21, PP. 323-335,1999.
[5]- F. Soudi and K.Tomsovic,"Optimal Trade-Offs in Distribution Protection Design",IEEE Trans. on Power Delivery,Vol. 16,No. 2,April 2001.
[6]-IEEE Working Group on System Design,"Trial Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices",Report P1366,Draft 14.

[۷]- شیرانی ع. ،" خسارتهای ناشی از عدم تامین برق در بخشهای خانگی ؛تجاری و صنعتی" ،نشریه علمی برق، سال سیزدهم ،شماره اول (شماره پی درپی ۲۹)،بهار ۱۳۷۹، صفحه ۴۸-۳۹.

[8]- R.L. Chen,K. Allen and R. Billinton,"Value-Based Distribution Reliability Assessment and Planning",IEEE Trans. on Power Delivery,Vol. 10,No. 1,PP. 421-428,Jan. 1995.