بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع در حضور پاسخگویی بار

چکیده:

پاسخگویی بار (DR) به عنوان یک بخش جدایی‌ناپذیر از شبکه هوشمند آینده در حال به دست آوردن یک تمرکز بزرگ و فزاینده در حال رشد مورد توجه در صنایع نیروی برق است. با این حال، بسیاری از مزایای بالقوه DR، اگرچه آن‌ها پیش‌بینی شده‌اند قابل‌توجه باشند، هنوز به طور کامل و به طور کمی بررسی نشده اند. DR اپراتور شبکه را با این فرصت برای کاهش نقض محدودیت عملیاتی با تغییر بار در مکان افت بار در زمانی که قابلیت اطمینان شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد، فراهم می‌کند. هدف این مقاله ارزیابی جامع اثرات بالقوه DR بر ویژگی‌های مهم قابلیت اطمینان خدمات در یک شبکه توزیع مسکونی است. برای انجام این کار، ابتدا، پروفایل بار برای وسایل خانگی بزرگ از مصرف کنندگان بزرگ اندازه‌گیری شده استخراج می‌شوند. دوم، انعطاف‌پذیری مرتبط با پروفایل بار فردی با استفاده از داده‌های آماری جمع‌آوری‌شده از طریق نظرسنجی و پرسشنامه تخمین زده می‌شود. سوم اینکه، برای هر احتمال، پروفیل بار در سطح لوازم براساس انعطاف پذیری تغییر داده می‌شود به طوری که حداقل هزینه وقفه ممکن حاصل می‌شود. نتایج بدست‌آمده در نهایت برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان با هم ترکیب شدند. چارچوب پیشنهادی بر روی سیستم توزیع فنلاندی اعمال شده‌است و نتایج به‌دست‌آمده کارایی و قابلیت کاربرد رویکرد پیشنهادی در سیستم‌های دنیای واقعی را نشان می‌دهد.

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، توجه زیادی به نقش پاسخگویی بار (DR)در افزایش کارایی صنعت برق اختصاص‌یافته است. تعداد زیادی از گزارش‌ها پروژه، مقالات و کتاب‌های پژوهشی در این موضوع منتشر شده‌اند که عمدتا بر پتانسیل و مزایای DR متمرکز شده‌اند. از نقطه‌نظر مشتری، برنامه‌های DR فرصتی را برای مدیریت مصرف خود و صرفه‌جویی در هزینه قبض‌های برق فراهم می‌کند [1].از دیدگاه بازار، DR به کاهش خیزش و نوسان قیمت کمک می‌کند و همچنین توان بالقوه قدرت بازار و سوء استفاده را کاهش می دهد. از دیدگاه یک اپراتور شبکه، DR می‌تواند بار پیک را کاهش داده و در نتیجه صرفه‌جویی در هزینه عملیاتی و سرمایه‌ای را تحقق بخشد. این نیاز به کارکردن واحدهای تولید با هزینه بالا را کاهش می‌دهد. همچنین ممکن است نیاز به تقویت شبکه را از بین ببرد یا حداقل آن را متوقف کند. علاوه بر این، بارهای انعطاف‌پذیر توسط DR مکمل کامل به منابع ذاتی متغیر انرژی مانند باد و خورشید می باشد. در نهایت DR ممکن است پروفیل‌های بار را شکل دهد تا از وقوع خاموش شدن گسترده در زمان های بحرانی که قابلیت اطمینان سرویس به خطر افتاده است، جلوگیری شود. ارزش این مزایا، اگر چه ثابت شده‌است که قابل‌توجه است، باید بصورت کمی برای نشان دادن اثربخشی آن‌ها قبل از هر اجرای عملی مورد مطالعه قرار گیرد. در سال های اخیر، تلاش های قابل توجهی برای اندازه گیری پتانسیل ها و مزایای DR اختصاص داده شده است. مروری جامع بر تحقیقات منتشر شده بر روی موضوع DR در [12] ارایه شد که در آن منافع DR و چالش‌های اجرایی مورد بحث قرار گرفتند. بررسی مفهوم DR ، مزایا و هزینه های آن و بعضی از تجربیات دنیای واقعی در آن ارائه شده است.

گزارش شده‌است که برنامه‌های DR که در صنایع بسیار بزرگ اعمال شده‌است ۶,۵ ٪ از قدرت اوج را در ایتالیا نشان می‌دهد. در [۱۰]، گزارش شده است که استفاده از DR باعث کاهش تقاضای بالقوه انگلیس در بیش از ۱۵ درصد می شود. براساس یک نظرسنجی که توسط کمیسیون تنظیم مقررات انرژی فدرال در سال ۲۰۱۲ انجام شد، توان بالقوه USA DR در حدود ۹,۲ درصد از بار اوج ایالات متحده تخمین زده شد.

در [۱۴] ، تخمین زده شد که کارایی انرژی آمریکا و برنامه‌های DR می‌تواند کاهش افزایشی ۰,۴ -۰,۸۵ درصد در نرخ افزایش مصرف برق در سال را درک کند. لویی و سایرین [۵]، با استفاده از یک قاعده سرانگشتی، مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی را با جابجایی دوره بهره‌برداری از لوازم خانگی بزرگ برآورد کردند. تمام آثار گزارش‌شده ارزشمند هستند اما بر روی قابلیت اطمینان خدمات نادیده گرفته می‌شوند. این به رغم

مزایای قابل‌توجه قابلیت اطمینان DR است که شرکت قابلیت اطمینان الکتریکی آمریکای شمالی را متقاعد کرد تا یک سیستم جمع‌آوری داده معمولی و یک گزارش نیمه سالانه برای اندازه‌گیری و اعلام سهم DR برای ارائه خدمات قابلیت اطمینان ارایه نماید.

در ادبیات موجود، مطالعات کمی تاثیرات برنامه‌های DR بر قابلیت اطمینان سرویس را بررسی کرده‌اند. در [۷]، توانایی‌های DR تولیدکننده بزرگ محصولات آلومینیومی در ارائه خدمات قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار گرفت. این مطالعه بر روی یک مشتری واحد با ویژگی‌های مشخص متمرکز بود. در [۸]، میزان مورد نیاز کاهش بار در بارهای مختلف بارگذاری شده، تخمین زده شده است که از فروپاشی ولتاژ جلوگیری می‌شود. در [15]، شاخص‌های قابلیت اطمینان خدمات قبل و بعد از اصلاح یک پروفایل بار در پاسخ به قیمت عمده‌فروشی بازار مقایسه شدند. در حقیقت، این کار بر پتانسیل DR متمرکز است که می‌تواند با قیمت‌های متفاوت به زمان فعال شود، اما نه با کنترل بار مستقیم. تجزیه و تحلیل کیفی تاثیر DR در قابلیت اطمینان سیستم توزیع در [۱۶] ارائه شده است. در [۱۷]، یک مدل DR ساده برای ارزیابی هزینه های غیرقابل اعتماد در مطالعات توسعه انتقال استفاده شد.

بر اساس بحث های فوق، لازم است بینش دقیق تر در مورد این مشکل به دست آید. این مقاله یک چارچوب برای ارزیابی مزایای قابلیت اطمینان از فعال کردن پتانسیل DR ارائه می‌کند. اشاره به این موضوع ارزشمند است که توانایی‌های بالقوه DR پتانسیل مستقیم و غیر مستقیم را به قابلیت اطمینان خدمات برق دارد. DR به اپراتورهای شبکه اجازه می‌دهد تا نقض محدودیت عملیاتی را به جای افت بار در زمانی که قابلیت اطمینان شبکه به خطر افتاده است، کاهش دهند. مقدار کاهش افت بار در طول نقض محدودیت عملیاتی به عنوان مزایای مستقیم DR برای قابلیت اطمینان سرویس یاد می‌شود. از سوی دیگر تحقق DR، با کاهش بار در دوره‌های پیک می‌تواند موجب کاهش استرس گرمایی بر دارایی‌های شبکه شود در نتیجه باعث کاهش تعداد رویداده‌ای قطع برق گردد. نیازی به گفتن نیست، کاهش تعداد حوادث از کار افتادن یک مزیت غیر مستقیم DR به قابلیت اطمینان سرویس است. اگرچه منافع غیر مستقیم نیز می‌تواند قابل‌توجه باشد، اما تمرکز این مقاله تعیین کمیت مزایای مستقیم ناشی از جلوگیری از افت بار در هنگام نقض محدوده‌های عملیاتی شبکه است.

به منظور عملی بودن نتایج، درک روشنی از ویژگی‌های بار حیاتی است. از این رو، مصرف روزانه یک گروه بزرگ از مشتریان مسکونی از Kainuu، فنلاند مورد مطالعه قرار گرفته‌است و ویژگی‌های مربوطه استخراج می‌شوند. سپس، ویژگی‌های بدست‌آمده در کنار انعطاف‌پذیری مشتریان، برگرفته از داده‌های نظرسنجی، برای تخمین DR موجود در فواصل زمانی مختلف استفاده شده‌است. پس از آن، برای هر احتمالی، پتانسیل‌های برآورد شده DR به کار گرفته می‌شوند طوری که کم‌ترین هزینه خسارات ممکن حاصل شود. در نهایت، نتایج به دست آمده برای محاسبه شاخص های قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

۲-ارزیابی توانایی DR

آگاهی توانایی DR پیش‌نیاز برای ارزیابی مزایای بالقوه آن است. توانایی DR به عنوان مقدار بار که در مقیاس‌های زمانی مختلف بکار گرفته می‌شود، به طور مستقیم با تمایل مشتریان برای تغییر کاربرد الکتریکی آن‌ها در پاسخ به سیگنال‌های آزاد شده توسط تاسیسات مرتبط است. در گذشته، یک قابلیت محدود DR وجود داشت چرا که مشتریان بازیکنان منفعل با بار انعطاف‌ناپذیر بودند. مشتریان منفعل دستگاه های خود را وصل می‌کنند، برق می‌گیرند و صورتحساب خود را پرداخت می‌کنند.

آن‌ها هیچ علامتی از برنامه خود دریافت نمی‌کنند و بر این اساس به چیزهایی که در تولید برق و سیستم‌های تحویل اتفاق می‌افتد، اهمیت نمی‌دهند. با این حال، به لطف فن‌آوری‌های شبکه هوشمند، مشتریان فعال بیشتری در آینده نزدیک پیش‌بینی می‌شوند. مشتریان فعال به سادگی عملیات تجهیزات پاسخگو خود را براساس دریافت سیگنال از برنامه خود اصلاح می‌کنند. تجهیزات پاسخگو افرادی هستند که زمان بهره‌برداری و یا مصرف انرژی را می توان بدون قربانی کردن آسایش مشتریان تغییر داد. به عنوان مثال، یک ماشین ظرفشویی، که مالک آن عجله‌ای ندارد (بنابراین عملکرد آن می‌تواند به تعویق انداخته شود)، بار پاسخگو است .

www.nn4e.com

توانایی (DR) موجود در یک زمان خاص به لوازمی که در آن زمان فعالیت می‌کنند و انعطاف‌پذیری آن‌ها در عمل بستگی دارد. انعطاف‌پذیری هر دستگاه بستگی به خصوصیات آن و تنظیمات مالک دارد. برای ارزیابی توانایی DR ، باید سه سؤال را که در زیر شرح داده شده است، پاسخ داده شود.

۲-۱- کدام دستگاه‌ها پاسخگو هستند

وسایل ارتباطی بالقوه در نظر گرفتن عملکرد خود، پروفایل استفاده از انرژی و اهداف مورد استفاده قرار می‌گیرند. همانطور که قبلا بحث شد، وسایل پاسخگو در زمان بهره‌برداری و یا استفاده از انرژی انعطاف‌پذیر هستند. به عنوان مثال، زمان عملیات یک ماشین ظرفشویی را می‌توان تا زمانی که چرخه شستشو با وعده غذایی بعدی تکمیل شود، به تعویق انداخت. به عنوان مثال دیگر، یک خشک‌کن لباس را در نظر بگیرید که دوره عملکرد آن می‌تواند با انتخاب برنامه‌ای با دمای مطلوب پایین‌تر به منظور کاهش بار برق، طول بکشد. در نهایت، عملیات یک تهویه مطبوع می‌تواند به سادگی برای یک دوره مشخص قطع شود تا زمانی که دمای اتاق در محدوده مطلوبی قرار دارد. تمام این وسایل در عملیات خود انعطاف‌پذیر هستند در نتیجه آن‌ها پاسخگو هستند.

در مقابل وسایل پاسخگو، عملکرد نرمال برخی از لوازم را نمی توان قطع کرد، و یا حتی در زمان دیگر، از آن جا که ممکن است باعث ایجاد تاثیری منفی بر راحتی مشتریان شود. این‌ها به بارهای غیر پاسخگو منسوب هستند. یک کامپیوتر شخصی، لوازم آشپزی و امکانات سرگرمی نمونه‌هایی برای بارهای غیر پاسخگو هستند.

علاوه بر بارهای ذکر شده که می‌توانند به وضوح برای دو مقوله ذکر شده مشخص شوند، تعداد کمی از لوازم دیگر وجود دارد که عملیات آن‌ها پیچیده‌تر است. در واقع، آن‌ها نه پاسخگو خالص و نه غیر پاسخگو خالص هستند. یخچال و فریزر نمونه‌هایی برای این بارها هستند. برای مثال، یک یخچال معمولی را در نظر بگیرید که پروفایل مصرف انرژی آن در طول یک دوره ۲۴ ساعته در شکل ۱ نشان‌داده شده‌است. همانطور که دیده می‌شود، یخچال برق برای کمپرسور، یخ آب کن و چرخه‌های ساخت یخ را مصرف می‌کند. اگر چه پروفیل بار یخچال به برخی از عوامل کنترل مانند کارایی و شرایط محیط بستگی دارد، همچنین می‌تواند به طور مصنوعی با جابجایی یخ آب کن و چرخه‌های ساخت یخ به طور مصنوعی دستکاری شود. با این حال، قطع کردن عملیات کمپرسور برای مدت طولانی ممکن است بر کیفیت غذا و یا حتی ایجاد فساد تاثیر بگذارد. به عبارت دیگر، بخشی از انرژی مصرف‌شده برای چرخه‌های یخ آب کن و یخ ساز پاسخگو است و باقی مانده پاسخگو نیست. در نتیجه یک یخچال یک دستگاه نسبتا پاسخگو است.

خوانندگان علاقه‌مند به [18] برای داده‌های جامع در مورد عملکرد وسایل خانگی بزرگ ارجاع داده می‌شوند. محبوب‌ترین وسایل نقلیه در این روزها ماشین ظرفشویی، ماشین لباس‌شویی، خشک‌کن لباس، خشک‌کن لباس، سیستم گرمایش و تهویه، فریزر و یخچال است.

۲-۲- زمان عملیات هر دستگاه پاسخگو چیست

از آنجا که تجهیزات پاسخگویی می‌تواند به سیگنال‌های برق در زمانی که فعال هستند پاسخ دهند، آگاهی از زمان عملیات فردی آن‌ها برای بررسی قابلیت DR آن‌ها ضروری است. با این حال زمان عمل یک دستگاه پاسخگو وابسته به عادات و سبک زندگی مالکان است که به طور گسترده در میان مشتریان و نیز در طول زمان متغیر است. بر این اساس ، داده‌های تاریخی را می توان برای بدست آوردن یک بینش عادلانه در زمان عملیات متوسط مورد استفاده قرار داد. تکنیک‌های داده کاوی مانند آنالیز تقاضا مشروط و شبکه عصبی نیز می‌توانند برای استخراج پروفایل های سطح دستگاه از پروفایل های تحت نظارت شده مورد استفاده قرار گیرند.

www.mmle.com

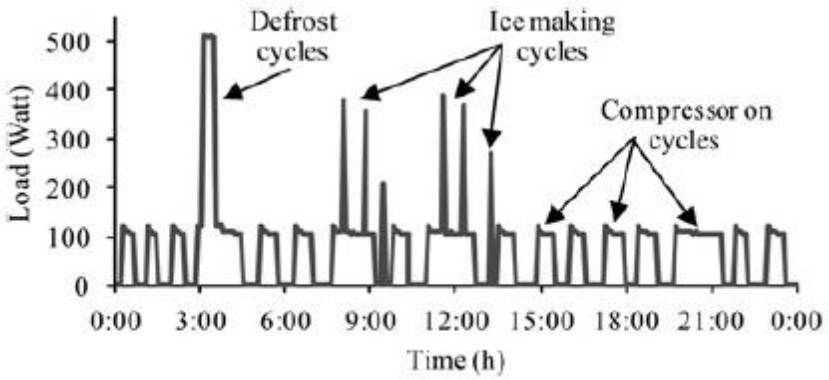

Fig. 1 *Possible electricity use profile for a typical refrigerator*

در این مقاله مصرف ساعتی ۱۶۳۰ از Kainuu، فنلاند برای بازه زمانی از اواسط ۲۰۰۸ تا اواسط ۲۰۰۹ مورد استفاده قرار گرفته‌است. پرسشنامه‌ای برای مشتریانی فرستاده شد که اطلاعات مفیدی در مورد سیستم‌های گرمایش و تهویه، وسایل برقی و عادات مصرف جمع‌آوری شد. روش آنالیز تقاضای شرطی [9] برای داده‌های جمع‌آوری‌شده اعمال شد، و دو پروفایل بار متوسط در هر فصل برای هر نوع تجهیزات اصلی به دست آمد. این دو پروفایل ها مربوط به روزهای هفته و آخر هفته هستند. شکل ۲ و ۳ مصرف انرژی متوسط برای شستشو و گرمایش و تهویه در طول هفته در یک خانه معمولی را نشان می‌دهد. در بالا، تنظیم بار سطح لوازم برای روزهای هفته و اواخر هفته در فصل‌های مختلف به دست می‌آید. واضح است که کل پروفیل بار برای یک مشتری معمولی را می توان با تجمیع پروفایل بار بدست آورد. شکل‌های ۴ و ۵ سهم گروه‌های اصلی را در پروفیل بار کل برای روزهای هفته در تابستان و زمستان نشان می‌دهند. توجه داشته باشید که یخچال و فریزر تجهیزات سرد هستند، در حالی که ماشین ظرفشویی و ماشین‌های شستشوی لباس‌های ، وسایل مرطوب هستند .

با آماده کردن مجموعه داده‌های بالا، پروفیل بار پاسخگو و غیر پاسخگو با استفاده از دستگاه و داده‌های عادات مشتری تعیین می‌شوند . شکل‌های ۶ و ۷ پروفیل بدست‌آمده را در روزهای هفته از تابستان و زمستان نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می شود، DR بسیار بیشتر در فصل سرد در دسترس است دقیقا زمانی که آن را به شدت درخواست می‌شود. این به خاطر این واقعیت است که بخش بزرگی از مصرف برق در طول زمستان برای گرمایش و تهویه در نظر گرفته می‌شود که فرض می‌شود پاسخگو باشد.

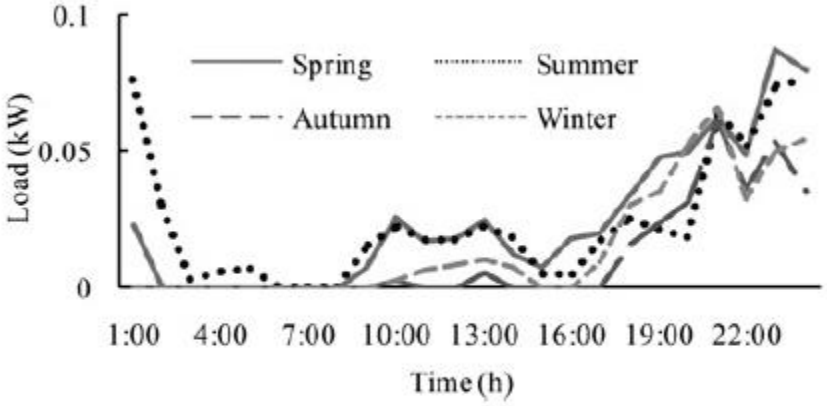

Fig. 2 *Weekdays load profile for dish washing in a typical house*

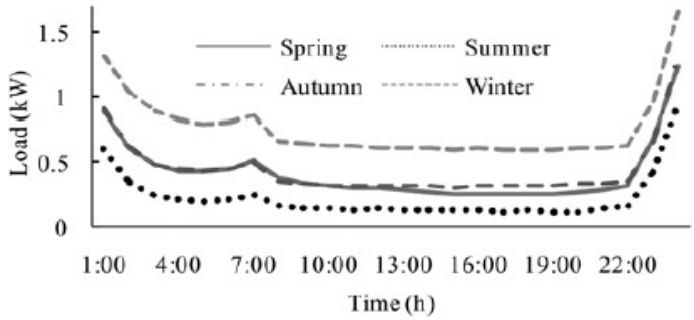

Fig. 3 *Weekdays load profile for heating and ventilation*

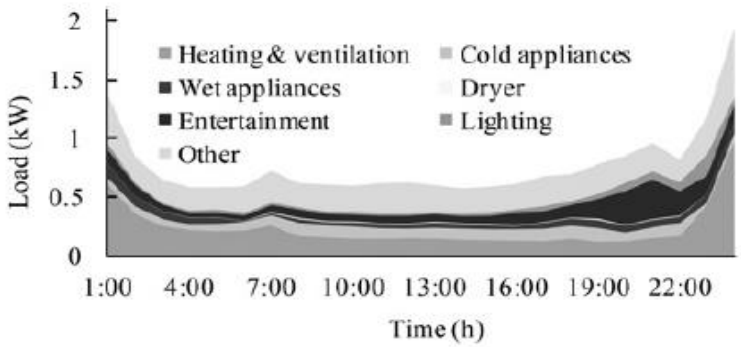

Fig. 4 *Appliance level load profiles (summer weekdays)*

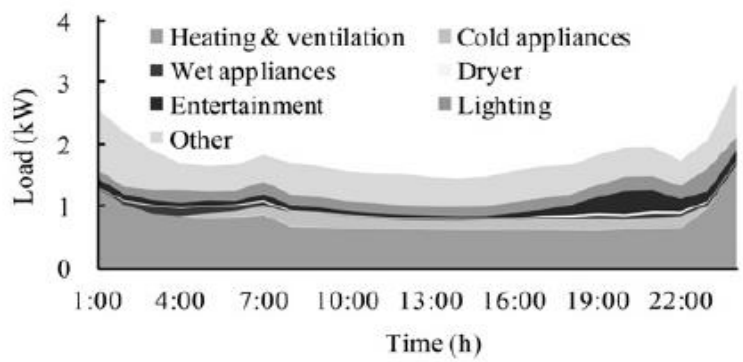

Fig. 5 *Appliance level load profiles (winter weekdays)*

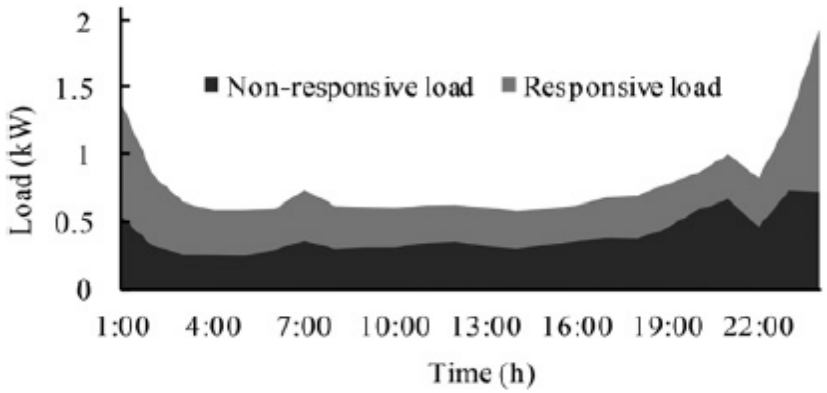

Fig. 6 *Responsive and nonresponsive load profiles (summer weekdays)*

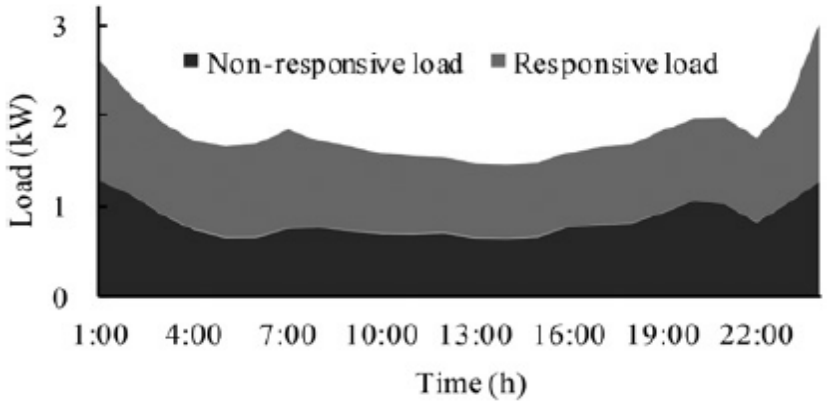

Fig. 7 *Responsive and nonresponsive load profiles (winter weekdays)*

۲-۳- هر دستگاه پاسخگو چقدر انعطاف‌پذیر است ؟

تجهیزات پاسخگو احتمالی و قابلیت دسترسی آن‌ها مشخص شد. انعطاف‌پذیری تجهیزات پاسخگو، به عنوان یک پارامتر دیگر موثر بر توانایی DR، در این بخش مورد بحث قرار گرفته‌است. در این مقاله، انعطاف‌پذیری توسط زمان تاخیر پذیری مشتری (ADT) و سطح نفوذ مشتری فعال مدل‌سازی شده است. ADT بیانگر حداکثر دوره زمانی است که عملیات یک دستگاه را می توان بدون فدا کردن آسایش مشتری به تعویق انداخت. واضح است که ADT برای بارهای غیر پاسخگو صفر است چون تاخیر در عملیات آن‌ها مشتریان را آزار می‌دهد. به طور کلی، ارزشADT بین مشتریان و تجهیزات تفاوت دارد. اما به دلیل کمبود اطلاعات و به منظور اجتناب از پیچیدگی‌های محاسباتی، مقادیر میانگین ADT بر روی مشتریان می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اطلاعات در مورد مقادیر ADT برای وسایل مختلف را می توان از داده‌های بررسی برآورد کرد. استامینگر [18] همچنین مقادیر ویژه ADT برای وسایل خانگی بزرگ فراهم می‌کند. جدول ۱ مقادیر ADT مورد استفاده در این مطالعه را ارایه می‌دهد.

Table 1 ADT value (minute) for the responsive appliances

Appliance	ADT	Appliance	ADT
heating and ventilation	120	dishwasher	300
clothes dryer	40	freezer	25
clothes washer	90	refrigerator	30

سطح نفوذ مشتری فعال نشان دهنده تمایل مشتریان برای پاسخ دادن است و نسبت مشتریان فعال به تعداد کل مشتریان است. فقدان سیستم های اتوماسیون مؤثر و دانش در میان مشتریان در مورد نحوه پاسخ دادن، مانع عمده ای است که مشتریان را قادر می سازد تا فعال شوند[1]. اگر چه سطح نفوذ این روزها کوچک است، اما از فناوری های شبکه هوشمند، سطح بالاتری در آینده نزدیک در نظر گرفته شده است.

۳- روش ارزیابی قابلیت اطمینان

این بخش الگوریتم مورد استفاده برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع را ارایه می‌دهد. فلوچارت الگوریتم در شکل ۸ نشان‌داده شده‌است. روشی که در این شکل ابداع شد به شرح زیر است.

مرحله ۱ : گام اول جمع‌آوری اطلاعات درباره شبکه تحت مطالعه و منطق‌های عملیاتی آن است. دستورالعمل‌های عملیاتی باید به وضوح برای شرایط مختلفی که ممکن است در شبکه رخ دهد، شناخته شده باشد.

مرحله ۲ : این الگوریتم یک حلقه دارد که بر روی مجموعه سناریوهای خطای احتمالی پیش می‌رود. یک سناریوی اشتباه، در این مقاله، مکان خطای مربوطه و زمان را مشخص می‌کند. زمان خطا بسیار مهم است چون بار سیستم و توانای DR در طول زمان یکسان نیستند .

مرحله ۳ : تحلیل پیکربندی مجدد شبکه در نظر گرفته می‌شود که موقعیت خطا، موقعیت عملکرد نرمال و نوع وسایل سوئیچینگ، زمان کلیدزنی و زمان تعمیر را در نظر می‌گیرد. این شبکه به گونه‌ای پیکربندی شده‌است که تعداد نقاط بار که خدمات آن‌ها متاثر از خطا است به حداقل رسانده شده‌است. در این مرحله، تنظیمات شبکه قبل و بعد از زمان سوئیچ، و بعد از زمان تعمیر خطوط معیوب تعیین می‌شوند. به عبارت دیگر، ارزش $b^{t}_{i,i'};\ \forall i,\ i' \in I,\ \forall t \in T$ در این مرحله تعیین می‌شود.

مرحله ۴ :تحلیل جریان قدرت انجام می‌شود. اگر هر گونه نقض در شرایط عملیاتی شبکه، برای مثال، اضافه‌بار و /یا تحت ولتاژ، به رسمیت شناخته شود، اقدامات اصلاحی مناسب انجام می‌شود که در آن افت بار آخرین راه‌حل است. لازم به ذکر است که در مورد ولتاژهای تحت ولتاژ، اگر زیاد جدی نباشند به گونه‌ای که بارها بتوانند به درستی کار کنند، هیچ اقدام اصلاحی نباید در نظر گرفته شود. در موارد جدی‌تر، تنظیم کنندگان توان راکتیو می‌تواند برای کاهش موارد نقض ولتاژ به عنوان یک اقدام درمانی موثر مورد استفاده قرار گیرد .

DR به عنوان یک اقدام اصلاحی تنها باید بعد از این مرحله از آن استفاده شود. هدف اقدامات اصلاحی به حداقل رساندن هزینه خسارت کل افت بار است. این روش با یک مساله بهینه‌سازی شبیه‌سازی شده‌است که هدف آن یافتن بار بهینه شکل‌دهی و حذف است. فرمول‌بندی مساله بهینه‌سازی در ادامه این بخش ارائه شده‌است.

مرحله ۵ :هنگامی که مراحل بالا بر روی مجموعه احتمالات محتمل تکرار می‌شوند، شاخص‌های قابلیت اطمینان را می توان محاسبه کرد.

www.nn4c.com - گروه تلفن

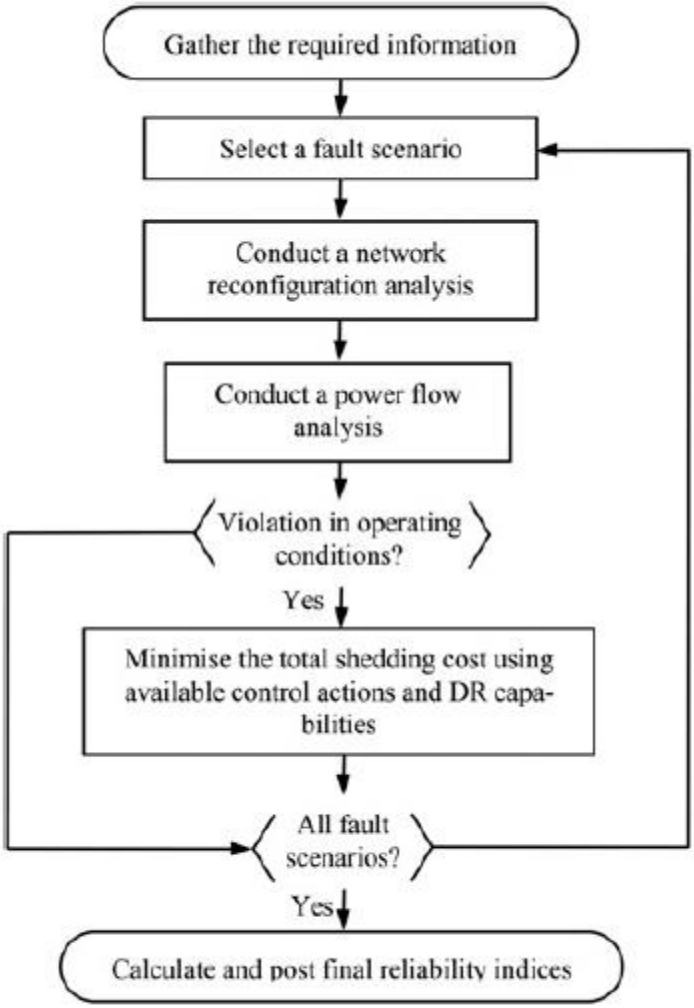

Fig. 8 *Flowchart of the algorithm used for network reliability*

۳-۱- فرمول بندی

مساله بهینه‌سازی که در مرحله ۵ معرفی شد به شرح زیر فرموله شده‌است:

$$\text{Minimize} \sum_{i} \sum_{t} \text{VOLL}_i PC_{i,t}^{\text{NR}} + \sum_{i} \sum_{t} \sum_{a} \text{VOLL}_i PC_{i,t}^{R,a} \tag{1}$$

بخش‌های اول و دوم در (۱) به ترتیب نشان‌دهنده هزینه قطع بار برای بارهای پاسخگو و غیر پاسخگو هستند. دو مجموعه معادلات زیر برای اطمینان از تعادل قدرت سطح باس در نظر گرفته می‌شوند.

$$PD_{i,t}^{\mathrm{NR}} + \sum_{a} PD_{i,t}^{R,a} + \sum_{a} \sum_{t'} PS_{i,t',t}^{R,a} + \sum_{i'} P_{i,i'}^{t}$$
$$= PC_{i,t}^{\mathrm{NR}} + \sum_{a} PC_{i,t}^{R,a} + \sum_{a} \sum_{t'} PS_{i,t,t'}^{R,a}; \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \tag{2}$$

$$QD_{i,t}^{\mathrm{NR}} + \sum_{a} QD_{i,t}^{R,a} + \sum_{a} \sum_{t'} QS_{i,t',t}^{R,a} + \sum_{i'} Q_{i,i'}^{t}$$
$$= QC_{i,t}^{\mathrm{NR}} + \sum_{a} QC_{i,t}^{R,a} + \sum_{a} \sum_{t'} QS_{i,t,t'}^{R,a}; \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \tag{3}$$

معادلات زیر برای محاسبه جریانهای جریان خط فعال و راکتیو استفاده می شود.

$$P_{i,i'}^{t} = b_{i,i'}^{t} G_{i,i'} V_{i}^{t2} + b_{i,i'}^{t} V_{i}^{t} V_{i'}^{t} G_{i,i'} \cos(\delta_{i}^{t} - \delta_{i'}^{t})$$
$$+ b_{i,i'}^{t} V_{i}^{t} V_{i'}^{t} B_{i,i'} \sin(\delta_{i}^{t} - \delta_{i'}^{t}); \quad \forall i \in I, \quad \forall i' \in I, \quad \forall t \in T \tag{4}$$

$$Q_{i,i'}^{t} = -b_{i,i'}^{t} B_{i,i'} V_{i}^{t2} + b_{i,i'}^{t} V_{i}^{t} V_{i'}^{t} G_{i,i'} \sin(\delta_{i}^{t} - \delta_{i'}^{t})$$
$$- b_{i,i'}^{t} V_{i}^{t} V_{i'}^{t} B_{i,i'} \cos(\delta_{i}^{t} - \delta_{i'}^{t}); \quad \forall i \in I, \quad \forall i' \in I, \quad \forall t \in T \tag{5}$$

سه مجموعه ای از اصطلاحات زیر برای اطمینان از این که ضریب توان ثابت باقی می ماند زمانی که یک قسمت از بار به یک زمان دیگر محدود می شود یا تغییر می کند.

$$PC_{i,t}^{\mathrm{NR}} = PQR_{i,t}^{\mathrm{NR}} QC_{i,t}^{\mathrm{NR}}; \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \tag{6}$$

$$PS_{i,t}^{R,a} = PQR^{R,a} QS_{i,t}^{R,a}; \quad \forall i \in I, \quad \forall a \in A, \quad \forall t \in T \tag{7}$$

$$PC_{i,t}^{R,a} = PQR^{R,a} QC_{i,t}^{R,a}; \quad \forall i \in I, \quad \forall a \in A, \quad \forall t \in T \tag{8}$$

محدودیت‌های ولتاژ باس به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\underline{V} \le V_{i}^{t} \le \overline{V}; \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \tag{9}$$

مجموعه ای از محدودیت های زیر موجب محدود شدن جریان خط می شود

$$-\overline{S_{i,i'}} \le S_{i,i'}^{t} \le \overline{S_{i,i'}}; \quad \forall i \in I, \quad \forall i' \in I, \quad \forall t \in T \tag{10}$$

$$S_{i,i'}^{t} = \sqrt{P_{i,i'}^{t2} + Q_{i,i'}^{t2}}; \quad \forall i \in I, \quad \forall i' \in I, \quad \forall t \in T \tag{11}$$

محدوده محدود سازی بار گسترش‌یافته در ارتباط با بارهای غیر پاسخگو و پاسخگو به شرح زیر اعلام شده‌است :

$$0 \le PC_{i,t}^{\mathrm{NR}} \le PD_{i,t}^{\mathrm{NR}}; \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \qquad (12)$$

$$0 \le PC_{i,t}^{R,a} \le PD_{i,t}^{R,a}; \quad \forall i \in I, \quad \forall a \in A, \quad \forall t \in T \qquad (13)$$

مجموعه حالت‌های زیر مقدار بار جابجا شده توسط حد مربوطه را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، حد برابر با پاسخگویی بار مشتریان فعال در زمان و زمان مربوطه است .

$$0 \le \sum_{t'} PS_{i,t,t'}^{R,a} \le PL_i PD_{i,t}^{R,a}; \quad \forall i \in I, \quad \forall a \in A, \quad \forall t \in T \qquad (14)$$

مجموعه بعدی معادلات برای اطمینان از اینکه هیچ بار پاسخگویی به زمان قبلی تغییر نکرده است ، در نظر گرفته می‌شود.

$$PS_{i,t,t'}^{R,a} = 0; \quad \forall i \in I, \quad \forall a \in A, \quad \forall t' < t \qquad (15)$$

مشکل بالا برای موارد احتمالی که در آن حداقل نقض در شرایط عملیاتی رخ داده است، ایجاد و حل می شود. مقدار بارهای مختل شده و تغییر یافته، نتیجه ها مشکل است.

۳-۲- شاخص های قابلیت اطمینان

مجموعه شاخص‌های قابلیت اطمینان محاسبه‌شده در این مطالعه عبارتند از: شاخص بارگذاری وقفه در سیستم (SAIFI) ، شاخص زمان وقوع وقفه در سیستم (SAIDI) ، انرژی مورد انتظار (EENS) و هزینه وقفه خرابی(EIC) . خوانندگان علاقه‌مند برای فرمول ریاضی شاخص‌های بالا به [20] ارجاع داده می‌شوند. در نهایت، اگرچه توانایی DR در کاهش نیازهای بارگذاری بار موثر است، قطع و یا تعویق عملیات بار پاسخگو نیز از دیدگاه قابلیت اطمینان نامطلوب است. بارهای پاسخگویی معمولا به منظور کاهش ظرفیت و / یا نقض ولتاژ دارای سطح اطمینان ضعیف است. بر این اساس، به منظور نشان دادن کیفیت خدمات برای بارهای پاسخگو، انتظار می‌رود فرکانس وقفه مورد انتظار (EIF)، مدت وقفه مورد انتظار (EID) و انرژی منتقل شده (EPE) برای وقفه بار پاسخگو نیز محاسبه می‌شوند. EIF میزان وقفه متوسط بارهای پاسخگو است. EID متوسط زمان وقوع بارهای به تعویق افتاده را نشان می‌دهد. EPE نشان دهنده انرژی مورد انتظار از بارهای معلق است.

۴- نتایج عددی

در این بخش، قابلیت های DR و مفروضات مربوطه که از داده های اندازه گیری شده استخراج شده اند و داده های نظرسنجی به یک شبکه توزیع اعمال می شود. بعد از معرفی شبکه تحت مطالعه، تعدادی از احتمالات با جزییات مورد بحث قرار می‌گیرند. سپس، شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم و بار ارائه شده‌است. تحلیل حساسیت در پارامترهای کلیدی آخرین مطالعه این بخش است. دو مطالعه موردی مختلف به عنوان مورد پایه و پرونده فعال DR انجام‌شده و نتایج در مقایسه با آن مقایسه شده‌اند. نیازی به گفتن نیست که توانایی‌های بالقوه DR در مورد پایه فعال نیستند، در حالی که در مورد DR فعال از توانایی‌های بالقوه موجود برای بهبود قابلیت اطمینان سرویس استفاده می‌کند.

www.nmte.com - گروه نامبر

۴-۱- معرفی شبکه

یک شبکه توزیع فنلاندی در اینجا مورد مطالعه قرار گرفته‌است. این شبکه همانطور که در شکل ۹ نشان‌داده‌شده، ۶۱ ایستگاه توزیع (۲۰ / ۰,۴ کیلو ولت) را از طریق دو فیدر شعاعی با یک خط اتصال کاملا باز بین آن‌ها تغذیه می‌کند. هنگامی که قابلیت اطمینان شبکه در معرض خطر باشد، خط اتصال معمولا باز می‌تواند بسته شود. داده‌های فنی شبکه در [21] به صورت آنلاین در دسترس هستند.

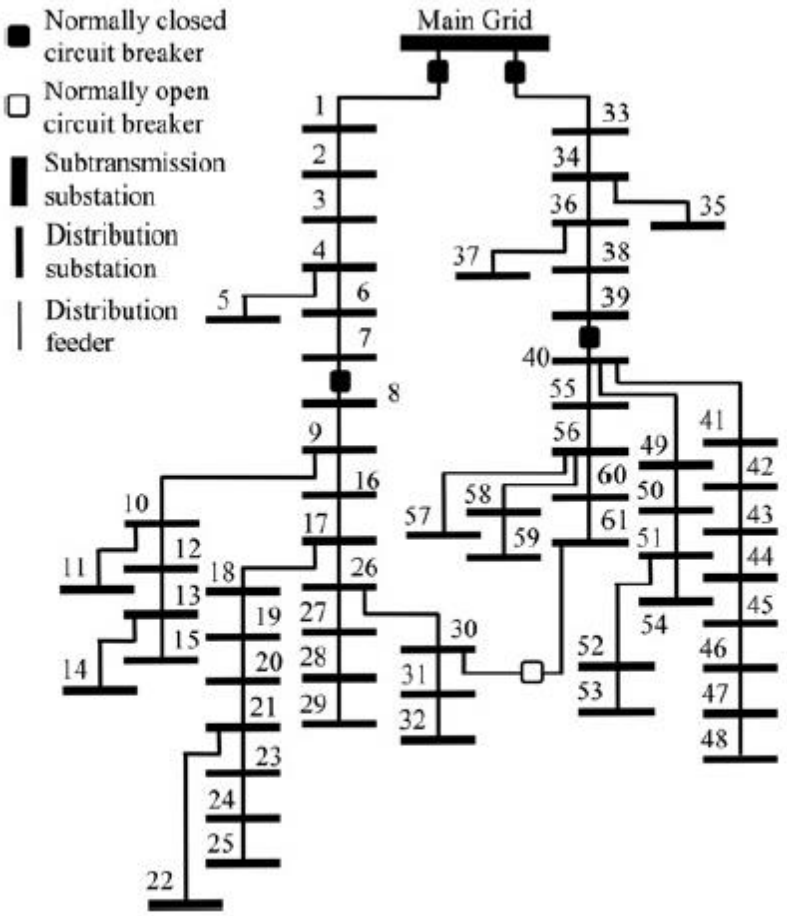

Fig. 9 *Single line diagram of Finnish distribution network under study*

۴-۲- برخی موارد دلخواه

این بخش تعدادی از احتمالات محتمل برای نشان دادن کارایی DR را شبیه‌سازی می‌کند. باید توجه داشت که این احتمالات به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که تاثیر توانمند سازی پتانسیل DR به وضوح نشان‌داده شده‌است.

احتمال وقوع ۱ :یک خطا در خط ۲۶ -۳۰ (شکل ۹ را ببینید)در ساعت ۱۰ صبح در یک روز هفته تابستانی با عملیات یک قطع‌کننده مدار بالادست که منجر به انزوای نقاط بار ۸ -۳۲ می‌شود ، دنبال می‌شود. نقاط بار برای زمان سوئیچ (در اینجا، به ۱ ساعت تنظیم می‌شوند)، یعنی خط سیر باز می‌شود و breaker باز شده و خط اتصال باز معمولی بسته می‌شود. هنگامی که اعمال سوییچینگ انجام شد، نقاط بار ۸ -۲۹ از طریق فیدر اصلی تغذیه می‌شوند در حالی که نقاط بار ۳۰ -۳۲ از درون فیدر مجاور تغذیه می‌شوند. نقطه کار جدید از زمانی که هیچ اضافه بار یا تحت ولتاژ وجود ندارد، سازگار است. در حالت پایه، کل تقاضای برق مشتریان متصل به نقاط بار جدا شده باید برای زمان کلیدزنی محدود شود. با این حال، در مورد DR فعال، مقدار بارهای کاهش‌یافته را می توان با تعویق عملیات بارهای پاسخگو به یک زمان بعد از

بازگشت خدمات کاهش داد. این می‌تواند منجر به افزایش قابل‌توجه قابلیت اطمینان شود. جدول ۲ جنبه‌های قابلیت اطمینان خطاهای مورد بحث را برای این دو مورد مقایسه می‌کند. همانطور که دیده می‌شود، انرژی مصرف‌شده و هزینه‌های مربوطه تا ۳۶ ٪ کاهش می‌یابند، در صورتی که پتانسیل‌های DR فعال شده باشد. نکته تاکید بر این است که توانمندسازی DR تاثیری بر تعداد نقاط بار آسیب‌دیده ندارد و طول وقفه از زمان قطع کردن نقاط بار قطع‌شده در زمانی که خطا رخ می‌دهد و بارهای تحت فشار آن‌ها باید به طور اجتناب‌ناپذیری کاهش یابد. لازم به ذکر است که مزایای قابلیت اطمینان بالا با به تعویق انداختن بار واکنشی ۲۹۰,۷۳ ساعت در حدود ۰,۶۹ ساعت به طور متوسط به دست می‌آیند.

احتمال وقوع ۲ :خط ۸ -۹ به دلیل نقص ساعت ۷ بعد از ظهر در یک روز هفته زمستانی، قطع‌کننده مدار رو به بالا عمل می‌کند و نقاط بار ۸ -۳۲ جدا هستند. در حالت پایه، حتی بعد از زمان سوئیچ، تنها چند نقطه بار مجزا می‌تواند از درون فیدر همسایه تغذیه شود تا از شرایط اضافه‌بار اجتناب شود. در حالت فعال DR، قبل از زمان سوئیچ، انعطاف‌پذیری تقاضا را می توان برای کاهش میزان افت بار استفاده کرد. پس از زمان سوئیچ، نقاط بار بیشتری را می توان از فیدر همسایه تغذیه کرد اگر انعطاف‌پذیری تجهیزات واکنشی برای کاهش شرایط اضافه‌بار مورد استفاده قرار گیرد. جنبه‌های قابلیت اطمینان این دو مورد در طول امکانات مورد بحث در جدول ۳ ارایه شده‌است. همانطور که می توان دید، کاهش قابل‌توجه در طول مدت وقفه، انرژی مورد استفاده قرار نگرفت و هزینه خسارت مربوطه هنگامی حاصل می‌شود که DR فعال شود. انرژی حاصل نشد و هزینه مربوطه به ترتیب ۸۲ و ۷۹ ٪ کاهش یافت. با این حال، تعداد نقاط آسیب‌دیده مورد نظر برای این دو مورد یکسان است چون بارهای پراکنده از نقاط بار جدا شده کاهش‌یافته است .مزایای قابلیت اطمینان توسط تعویق انداختن ۱۱۸۸۰,۸۱ کیلو وات ساعت برابر برای حدود ۱,۵۵ ساعت به طور متوسط به دست می‌آیند.

Table 2 Service reliability improvements realised by DR: Contingency 1

Index	Base case	DR enabled
number of affected load points	25	25
average interruption duration, h	1	1
energy not served, kWh	799.55	508.82
damage cost, €	18 025.63	11 471.27

Table 3 Service reliability improvements realised by DR: Contingency 2

Index	Base case	DR enabled
affected load points	25	25
average interruption duration, h	2.68	1
energy not served, kWh	8310.19	1499.30
damage cost, €	163 496.39	33 801.33

احتمال وقوع ۳ :یک خطا در ساعت ۱ -۲۳ در ساعت ۱ بعد از ظهر در یک هفته فصل بهار با عملیات قطع‌کننده مدار بالادست که منجر به انزوای نقاط بار ۸ -۳۲ می‌شود ، دنبال می‌شود .پس از زمان سوئیچ، زمانی که خط مقصر باز می‌شود، سرویس به نقاط بار ۸ -۲۲ و ۲۶ -۳۲ باز می‌گردد و مشتریان متصل به نقاط بار ۲۳ -۲۵ تا انتهای فرآیند تعمیر خط معیوب باقی می‌مانند. برای مشتریانی که خدمات آن‌ها از طریق اقدامات سوییچینگ بازیابی می‌شود، DR می‌تواند در کاهش مقدار انرژی که خدمت کرده مفید باشد و به همین دلیل هزینه خسارت

مربوطه کاهش خواهد یافت. با این حال، انعطاف‌پذیری تجهیزات پاسخگویی متصل به نقاط بار ۲۳ -۲۳ دیگر مفید نیست چون عملیات آن‌ها را نمی توان تا زمانی به تعویق انداخت که فرآیند تعمیر به پایان برسد. در حقیقت، مقدار ADT برای وسایل پاسخگو بسیار کم‌تر از زمان تعمیر خط معیوب است، یعنی ۶ ساعت. جدول ۴ جنبه های قابلیت اطمینان احتمالی مورد بررسی را برای دو مورد مقایسه می‌کند. با توجه به نتایج، انرژی به کار نمی‌رود و هزینه های مرتبط با آن کاهش می‌یابد ۲۹ و ۳۱ درصد زمانی که پتانسیل DR فعال می شود. این پیشرفت‌ها با به تعویق انداختن بار پاسخگو ۵۶۳,۴۸ ساعت در حدود ۰,۸۵ ساعت به طور متوسط تحقق می‌یابند.

احتمالی ۴: یک خطا در خط ۶-۷ در ساعت ۱۰ بعدازظهر در روز هفته پاییز رخ می دهد، مدار قطع کننده جریان بالا عمل می‌کند و نقاط بار ۱-۳۲ جدا می‌شوند. با برخی از اقدامات سوئیچینگ مناسب، بارهای ۸-۳۲ به فیدر همسایه منتقل می شوند. در مورد پایه، بارهای متصل به نقاط بار ۱-۷ برای زمان سوئیچینگ که در آن خط خطا باز و باز شکن بسته شده است، محدود می شود. همچنین، بخشی از بارهای منتقل شده به فیدر همسایه باید برای جلوگیری از شرایط بارگیری محدود شود. با این حال، در مورد DR فعال، بهره‌برداری از بارهای پاسخگو در نقاط بار ۱ -۷ به منظور کاهش میزان محدود سازی بار به تعویق می‌افتد. همچنین، انعطاف‌پذیری تجهیزات پاسخگو برای کاهش بار بیش از حد و از این رو برای کاهش بار در نقاط بار ۸ -۳۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص‌های قابلیت اطمینان مرتبط با این دو مورد در جدول ۵ ارایه شده‌اند. همانطور که دیده می‌شود، بهبود قابل‌توجهی در عملکرد قابلیت اطمینان شبکه وقتی بدست می‌آید که DR فعال شده باشد. انرژی مورد استفاده قرار نگرفت و هزینه‌های خسارت مربوطه به ترتیب ۹۱و ۸۷ درصد کاهش یافت. توجه داشته باشید که تعداد نقاط تاثیر آسیب‌دیده بهبود یافته‌است. چون برخی از نقاط بار در بین ۸ -۳۲ تنها وقفه‌ای گذرا را تجربه می‌کنند که به عنوان یک وقفه در نظر گرفته نمی‌شود. مزایای قابلیت اطمینان با حذف بار پاسخگو ۳۴۱۴,۷۳ کیلو وات ساعت به طور متوسط برای ۱,۳۷ ساعت به دست می‌آید.

Table 4 Service reliability improvements realised by DR: Contingency 3

Index	Base case	DR enabled
affected load points	25	25
average interruption duration, h	1.60	1.60
energy not served, kWh	1919.00	1355.52
damage cost, €	39 736.03	27 336.51

Table 5 Service reliability improvements realised by DR: Contingency 4

Index	Base case	DR enabled
affected load points	19	7
average interruption duration, h	1.16	1
energy not served, kWh	2387.92	221.00
damage cost, €	43 502.88	5499.09

۴-۳- نتایج کلی

مزایای قابلیت اطمینان (DR)در چند احتمالات فردی در بخش قبلی نشان داده شد. همانطور که مشاهده کردیم، ارزش منافع از یک احتمال به دیگری متفاوت است. هدف این بخش بررسی تاثیر DR بر عملکرد کلی شبکه است. برای انجام این کار، تمام احتمالات معتبر تحلیل می‌شوند و نتایج به‌دست‌آمده برای تخمین نقطه بار و شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم ترکیب می‌شوند. شکل ۱۰ EENS را برای

همه پست‌های توزیع جداگانه در شبکه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که می توان مشاهده کرد، قابلیت اطمینان سرویس در همه پست‌های توزیع بهبود یافته و مقدار بهبود در ایستگاه‌های فرعی مختلف تقریبا مشابه است. این به دلیل این واقعیت است که بخشی از بار در هر نقطه بار پاسخگو است. جدول ۶ شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم را ارایه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تاثیرات بزرگی از توانایی پتانسیل DR بر عملکرد قابلیت اطمینان شبکه است.

با توجه به نتایج، توانایی‌های بالقوه DR می‌تواند باعث افزایش قابلیت اطمینان بالایی شود. با این حال، همانطور که قبلا بحث شد، یک شبکه که بارهای پاسخگو متصل آن معمولا به منظور حفظ آن به تعویق می‌افتد، یک شبکه ایده‌آل از دیدگاه قابلیت اطمینان است. در حقیقت، اگر چه بارهای پاسخگو انعطاف‌پذیر هستند، قطع کردن یا جابجا کردن عملیات آن‌ها مطلوب نیست. جدول ۷ اطلاعات مربوط به پتانسیل DR پیشنهاد شده را در حالت فعال DR فراهم می‌کند. همانطور که می‌توان مشاهده کرد، پیشرفت قابل‌ملاحظه‌ای با عملیات تعویق بارهای پاسخگو در هر نقطه بار به میزان کم‌تر از ۲ ساعت در سال به دست می‌آید. به عبارت دیگر، منافع قابلیت اطمینان را می توان با قطع کردن بارهای موثر تنها برای چند دقیقه در سال به دست آورد. یک مشاهده کلیدی دیگر این است که در حدود ۸۶۱ کیلو وات ساعت برق باید به منظور کاهش EENS با ۵۸۳ کیلو وات ساعت به تعویق بیافتد. این به دلیل مقادیر محدود ADT برای بارهای پاسخگو است.

برای فراهم نمودن اطلاعات دقیق‌تر در مورد چگونگی استفاده از پتانسیل‌های DR مورد استفاده، تابع چگالی احتمال زمان تاخیر در عملکرد بارهای پاسخگو که در شکل ۱۱ نشان‌داده شده‌است. همانطور که می‌توان مشاهده کرد، تقریبا تمامی بارهای پاسخگویی درخواست شده با تاخیر زمانی کم‌تر از ۲ ساعت کار می‌کنند. همچنین، نزدیک به ۶۰ ٪ بارهای به‌تعویق‌افتاده با تاخیر زمانی کم‌تر از ۱ ساعت کار می‌کنند. این مشاهده می‌تواند نگرانی موجود در مورد راحتی مشتریان را هنگامی که DR فعال است کاهش دهد.

۴-۴- آنالیز حساسیت

سطح نفوذ مشتری فعال به طور قابل‌توجهی به توانایی DR و منافع قابلیت اطمینان بستگی دارد.

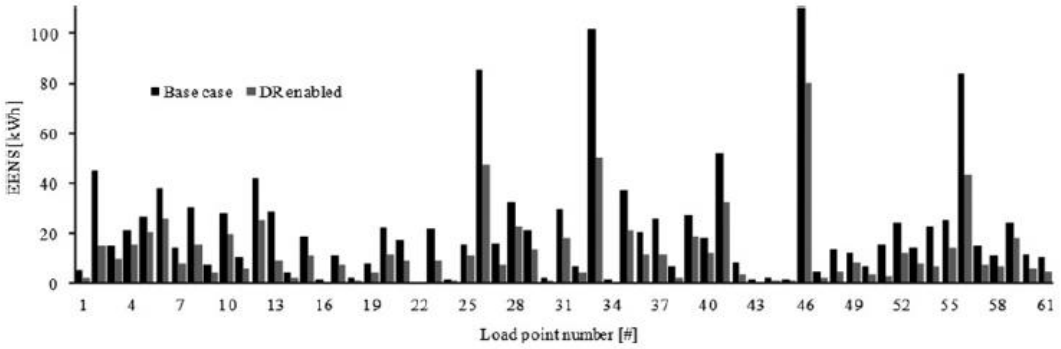

Fig. 10 *EENS for individual load points*

Index	Base case	DR enabled	Improvement, %
SAIFI [int./sub.-year]	0.147203	0.135517	7.94
SAIDI [h/sub.-year]	0.2339	0.2082	10.99
EENS, kWh	1342.49	758.92	43.47
EIC, €	29 224.17	17 169.92	41.25

Table 7 Information on the invoked DR potentials in the DR enabled case

EIF, int./sub.-year	EID, h/int.	EPE, kWh
0.1745	1.79	861.03

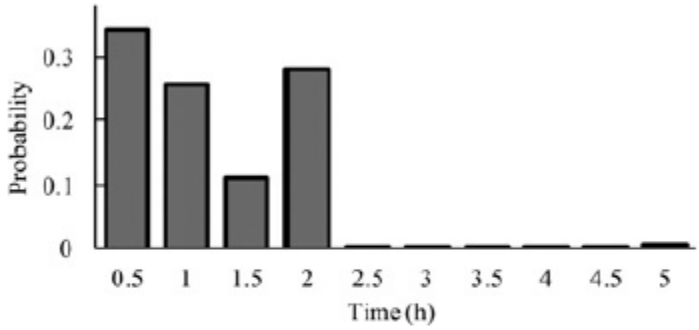

Fig. 11 *Probability density function of delay time in the operation of invoked responsive loads*

فرض می‌شود که سطح در مطالعات فوق ۱۰۰ ٪ باشد و نشان می‌دهد که کل پتانسیل DR موجود است و مشتریان مرتبط در آن شرکت می‌کنند. با این حال، این فرضیه بیش از حد خوشبین است چرا که چندین مانع از قبیل فقدان سیستم‌های اتوماسیون کارآمد و فقدان دانش در میان مشتریان در مورد چگونگی پاسخ، از سطح نفوذ به عنوان یکی از آن‌ها جلوگیری می‌کند. این مساله توسط مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها که در آن سطح نفوذ مشتریان فعال متفاوت است مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج بدست‌آمده در جدول ۸ آمده‌است که از آن دو نتیجه‌گیری مهم را می توان براساس نتایج حاصل نمود. اولی مربوط به این حقیقت است که مزایای قابلیت اطمینان با فعال‌سازی پتانسیل DR به عنوان افزایش سطح نفوذ مشتری فعال تحقق می‌یابد. نکته دوم مربوط به کاهش رفتار سود قابلیت اطمینان نهایی است. به عبارت دیگر، مزیت قابلیت اطمینان ارایه‌شده توسط ۲۵ ٪ اول مشتریان فعال بزرگ‌تر از ۲۵ ٪ دوم است، فایده دومی بزرگ‌تر از سوم و غیره است.

www.nnae.com

Table 8 Reliability indices for different active customer penetration levels

Active customer penetration level	SAIFI, int./ sub.-year	SAIDI, h/ sub.-year	EENS, kWh	EIC, €
0% (base case)	0.147203	0.2339	1342.49	29 224.18
25%	0.141680	0.2237	1169.18	25 681.76
50%	0.138247	0.2173	1019.51	22 610.31
75%	0.136434	0.2124	882.80	19 789.87
100% (DR enabled)	0.135517	0.2082	758.92	17 169.88

Table 9 Aspects of DR invocation for different active customer penetration levels

Active customer penetration level	EIF, int./ sub.-year	EID, h/ int.	EPE, kWh
0% (base case)	0	0	0
25%	0.1856	1.94	240.78
50%	0.1785	1.92	461.51
75%	0.1761	1.87	668.25
100% (DR enabled)	0.1745	1.79	861.03

جدول ۹ جنبه‌های مختلف درخواست DR برای سطوح نفوذ مختلف مشتری را مقایسه می‌کند. مشاهده شگفت‌آور حاصل از نتایج این است که هر دو فرکانس فراخوان DR و افزایش زمان وقفه میانگین به عنوان سطح نفوذ مشتری فعال کاهش می‌یابد. این به این معنی است که ناراحتی مشتریان ناشی از برنامه DR می‌تواند با افزایش تعداد مشتریان فعال کاهش یابد.

۵- نتیجه‌گیری

DR به اپراتورهای شبکه اجازه می‌دهد تا پروفیل بار سیستم را به جای افت بار در زمانی که محدودیت‌های عملیاتی نقض می‌شوند اصلاح کنند و در نتیجه قابلیت اطمینان خدمات برق را بهبود بخشند. مطالعه عمیق و کمی بر روی مزایایی که DR می‌تواند برای صنعت برق به ارمغان بیاورد پیش‌نیاز برای سرمایه‌گذاری عظیم مورد نیاز در فن‌آوری‌های توانمندسازی مورد نیاز است. این مقاله یک مطالعه جامع در مورد اثرات بالقوه یک DR بر روی ویژگی‌های اصلی قابلیت اطمینان خدمات در یک شبکه توزیع خانگی ارائه کرده‌است. برای انجام این کار، مصرف روزانه داده‌ها ساعتی و داده‌های بررسی صدها مشتری از Kainuu، فنلاند اولین مورد بررسی شد و قابلیت DR موجود در ساعات مختلف یک روز و فصل تخمین زده شد. سپس، مدل DR بدست‌آمده در ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه توزیع فنلاندی گنجانیده شده‌است. هر دو شاخص بار و قابلیت اطمینان سیستم برای دو حالت، با و بدون فعال‌سازی پتانسیل DR، مقایسه شدند. نتایج بدست‌آمده تایید می‌کند که مزایای قابلیت اطمینان بالا را می توان با قادر ساختن DR به دست آورد و همچنین نشان داد که مزایای قابلیت اطمینان توسط تنظیمات قابل اغماض در عملیات بارهای پاسخگو بیش از چند دقیقه به دست می‌آیند. شبیه‌سازی‌ها برای سطوح نفوذ مشتری فعال متفاوت تکرار شدند و نشان داده شد که ناراحتی مشتریان به دلیل توانمند سازی مشتریان می‌تواند با تشویق مشتریان بیشتر به فعال شدن برطرف شود. این مطالعه یک شبکه متوازن را فرض کرد که یک شرط ایده‌آل است و برخی محدودیت‌ها را تحمیل می‌کند. این فرض را می توان آزاد کرد و توانایی DR در مدیریت عدم تعادل غالب باید به عنوان یک کار آینده مورد بررسی قرار گیرد. مدیریت عدم تعادل منجر به انتشار ظرفیت بیشتر در احتمالات شبکه می‌شود.