تحلیل اثر رفتار مشترکین بر اثربخشی برنامه‌های قیمت‌گذاری اوج بحرانی و قطع یا کاهش بار در خودترمیمی شبکه‌های توزیع هوشمند

صادق کریمی طالخونچه[۱]، علیرضا فریدونیان[۲]، امیر مشاری[۳]

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران

sadeghkarimi94@email.kntu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

fereidunian@eetd.kntu.ac.ir

۳- گروه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت- پژوهشگاه نیرو- تهران- ایران

amoshari@nri.ac.ir

چکیده:

خودترمیمی در شبکه‌های توزیع به دلیل نیاز مشترکین به تامین برق بدون وقفه توسط شرکت‌های توزیع، یکی روش‌های موثر جهت افزایش پایایی (قابلیت اطمینان) این شبکه‌ها است که به صورت «تشخیص اتوماتیک و خودمختار خطا، ایزوله‌کردن خطا و بازیابی خودکار بارها در شبکه حادثه‌دیده» اجرا می‌شود. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، خودترمیمی در شبکه‌های توزیع بهبود یابد. وجود بارهای پاسخ‌گو در شبکه دارای خطا این امکان را به شرکت‌های توزیع می‌دهد تا بدون نقض محدودیت‌های جریان فیدر پشتیبان و از طریق کاهش مصرف مشترکین فیدر خطادار و فیدر پشتیبان، به مشترکین بیشتری خدمت-رسانی کنند. اما یکی از مشکلات موجود هنگام استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، عدم اطمینان از رفتار و تصمیمات مشترکین در مواجهه با سیگنال درخواست کاهش مصرف ارسالی از سوی شرکت‌های توزیع است. در این پژوهش، پس از مدل‌سازی و بهینه کردن خودترمیمی (بازیابی شبکه خطادار) در حضور دو برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی و قطع/کاهش بار، اثر رفتار مشترکین در اثربخشی این برنامه‌ها تحلیل شده‌است. برای واقعی‌تر شدن نتایج، احتمال پاسخگویی مشترکین به سیگنال کاهش مصرف به صورت توزیع نرمال درنظر گرفته‌شده است. نتایج شبیه‌سازی، بهبود شاخص‌های پایایی و همچنین کاهش هزینه‌های شرکت‌های توزیع را به خوبی نشان می‌دهد.

واژه های کلیدی: پاسخگویی بار، خودترمیمی، شبکه هوشمند، قطع/کاهش بار، قیمت‌گذاری اوج بحرانی

نام نویسنده مسئول:دکتر علیرضا فریدونیان

آدرس نویسنده مسئول: تهران، خیابان شریعتی، ضلع جنوب شرقی پل سید خندان، دانشکده مهندسی برق خواجه نصیرالدین طوسی

فهرست علائم اختصاری

$TCIC$: کل هزینه وقفه مشترکین ($\$/yr$)

$TCEC$: کل هزینه تشویقی پرداختی به مشترکین ($\$/yr$)

$TCPC$: کل هزینه تنبیهی دریافتی از مشترکین ($\$/yr$)

LP: مجموعه نقطه بارهای شبکه

EC: مجموعه پیشامدهای شبکه

KLP: مجموعه نوع مشترکین نقطه بارهای شبکه (مسکونی، تجاری، صنعتی، عمومی و حساس)

BR: مجموعه خطوط شبکه مورد مطالعه

P_{ijt}: باراکتیو نقطه‌بار iام ناشی از رخداد خطا در تجهیز j ام در ساعت tام فرآیند بازیابی

P_{ijt}': باراکتیو کاهش‌یافته نقطه‌بار iام ناشی از رخداد خطا در تجهیز j ام در ساعت tام

PE_{it}: مقدار بار اکتیوی که نقطه‌بار iام متعهد شده در صورت رخداد خطا در ساعت tام مصرف نماید

□: نرخ مشارکت مشترکین در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

$prob_{\pi}$: احتمال نرخ مشارکت □ام در برنامه پاسخ‌گویی بار

φ_{iz}: درصد مشترکین نوع z در نقطه بار iام

θ_z: جریمه‌ای که به مشترکین نوع z بابت خاموشی پرداخت می‌شود ($\$/hkW$)

λ_j: نرخ رخداد خطا در تجهیز jام در سال

d_{izt}: مقدار انرژی مصرفی کاهش یافته مشترک نوع zام نقطه بار iام در ساعت tام فرآیند بازیابی

d_{izt}^0: مقدار انرژی مصرفی اولیه مشترک نوع zام نقطه بار iام در ساعت tام فرآیند بازیابی

E_z: مقدار کشسانی مشترک نوع zام

ρ_{iz}: قیمت برق مشترک نوع zام نقطه بار iام بعد از بروز خطا در شبکه

ρ_{iz}^0: قیمت برق مشترک نوع zام نقطه بار iام قبل از بروز خطا در شبکه

enc_z: مبلغ تشویقی که به مشترکین نوع z بابت کاهش مصرف پرداخت می‌شود ($\$/hkW$)

pun_z: مبلغ تنبیهی که مشترکین نوع z بابت عدم کاهش مصرف پرداخت می‌کند ($\$/hkW$)

pn: مقدار تنبیه در نظر گرفته شده به‌ازای عدم کاهش مصرف

en: مقدار تشویق در نظر گرفته شده به‌ازای کاهش مصرف

LPS_{ijt}: متغیر باینری مشخص کننده تاثیرپذیری نقطه‌بار iام در صورت رخداد خطا در تجهیز jام در ساعت tام فرآیند بازیابی

$flag_{ijt}$: متغیر باینری مشخص کننده لزوم کاهش مصرف نقطه‌بار iام در صورت رخداد خطا در تجهیز jام در ساعت tام

DLF_s: ماتریس پخش‌بار توزیع در راهبرد بازیابی sام

I_{ij}: جریان خط iام ناشی از بروز خطا در تجهیز jام

$[\Delta V_j]$: بردار اختلاف ولتاژ شینه‌های شبکه از شینه اصلی ناشی از بروز خطا در تجهیز jام

$[I_{ij}]$: بردار جریان شینه‌های شبکه ناشی از بروز خطا در تجهیز jام

I_{br}^{max}: حداکثر جریان مجاز عبوری از خطوط

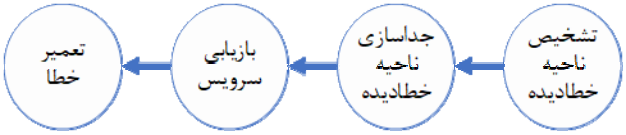
P_{ij}: توان اکتیو خالص مصرفی شینه iام ناشی از بروز خطا در تجهیز jام

Q_{ij}: توان اکتیو خالص مصرفی شینه iام ناشی از بروز خطا در تجهیز jام.

۱_ مقدمه

بروز خطا در شبکه‌های توزیع به دلیل شعاعی بودن این شبکه‌ها باعث قطع سرویس‌رسانی به برخی از مشترکین می‌گردد [۱]. این در حالی است که به دلیل افزایش نفوذ برق در زندگی روزمره، قطع برق برای صنایع و مشاغل، خسارت‌های سنگینی را به همراه دارد و علاوه بر این ممکن است جان بیماران بیمارستانی را به خطر اندازد [۲]. از آنجایی که اغلب خطاهای ایجاد شده در شبکه دارای منشا طبیعی هستند و در نتیجه پیش‌بینی‌آنها مقدور نیست، حذف کامل خاموشی‌های شبکه امکان‌پذیر نیست. از این رو برای کاهش خسارات ناشی از قطع برق و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان شبکه توزیع باید زمان رفع خطا تا حد امکان کاهش یابد. با استفاده از زیرساخت‌های شبکه هوشمند می‌توان طرحی با عنوان خودترمیمی را اجرا نمود و با استفاده از آن زمان رفع خطا را کاهش داد [۳].

خود ترمیمی یکی از قابلیت‌های شبکه‌های توزیع هوشمند برق است که باعث بازیابی خودکار شبکه توزیع در صورت بروز یک خطای پایدار و غیرگذرا می‌شود. خودترمیمی با شناسایی و مکان یابی خطای پایدار و غیرگذرا حادث شده شروع می‌شود. بسته به سطح اتوماسیون، طرح‌های خودترمیمی اثر خطاهای پایدار و غیرگذرا را در مناطق خاصی از شبکه محصور کرده و سایر مناطق را از خطا ایزوله نموده و سرویس برق را در سریع‌ترین زمان ممکن و با حداقل مداخله انسانی در مناطق ایزوله شده بازیابی می‌نماید. بازیابی باید به گونه‌ای باشد که هم تعداد کاربرانی که قطع سرویس شده‌اند، به حداقل برسند و هم تضمین کند که توپولوژی جدید، قیود شبکه را در محدوده منطقی آنها حفظ می‌کند [۴]. مراحل مختلف خودترمیمی در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: مراحل مختلف خودترمیمی [۴]

در مقالات مختلف به بررسی خودترمیمی پرداخته شده است که در ادامه به بررسی تعدادی از آنها پرداخته خواهد شد. در مرجع [۵] با استفاده از مدل‌سازی پایایی سیستم‌های کنترلی و همچنین سیستم‌های حفاظتی تاثیر گسترش افزونگی در تقویت‌کننده ترمیم‌گر شبکه‌های هوشمند بررسی شده است. در این مقاله همچنین تاثیر گسترش افزونگی بر هرکدام از سیستم‌ها نیز به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله برای خودترمیمی سه لایه در نظر گرفته شده است که عبارتند از: ۱- لایه تجهیزات ۲- لایه سیستم ۳- لایه اقدامات در جهت ترمیم تجهیزات موجود. در مرجع [۶] نویسنده برای مسئله مکان‌سنجی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترلی یک برنامه‌ریزی خطی ارائه نموده است. این برنامه‌ریزی خطی با استفاده از سه سناریو برای انتخاب بهترین نوع کلیدها و آرایش کلیدها بررسی شده است. مرجع [۴] یک روش دو مرحله به منظور حل طرح خودترمیمی متمرکز برای سیستم های توزیع الکتریکی ارائه کرده است. پیکربندی مجدد شبکه توزیع و در صورت نیاز حذف بار منطقه‌ای و گره، اقداماتی است که در این مرجع برای خودترمیمی درنظر گرفته شده است. روش پیشنهادی از دو مرحله تشکیل شده است. مرحله اول یک مسئله MILP را به منظور به دست آوردن متغیرهای تصمیم‌گیری باینری برای طرح خود ترمیمی (یعنی وضعیت دستگاه کلیدزنی) حل می کند. در مرحله دوم ، یک مسئله برنامه ریزی غیرخطی به منظور تنظیم نقطه عملیاتی پایدار توپولوژی یافت شده در مرحله اول (به عنوان مثال، بهینه سازی حذف بار) حل می شود. مرجع [۷] یک الگوریتم چند عاملی بازیابی بار کاملاً توزیع شده را برای بازیابی بارهای خارج از سرویس پیشنهاد می‌کند. هر عامل، تصمیم‌گیری در مورد بازیابی بار را بر اساس اطلاعات کشف شده هماهنگ می‌کند. به این ترتیب، توان خالص کل، شاخص‌ها و مصرف بارهایی که برای بازیابی آماده هستند را می توان به دست آورد. در مرجع [۸] مولف یک استراتژی دو مرحله‌ای جهت بازیابی شبکه پیاده‌سازی کرده است. یعنی در ابتدا مجموعه‌ای از طرح‌های بازسازی عملی را ایجاد کرده و سپس آنها را بر اساس چهار معیار فازی، آمادگی احتمالی، تعداد کلیدزنی، تعداد و مقدار انتقال بار با توجه به وزن نسبیشان ارزیابی کرده و از میان آنها استراتژی با بالاترین شاخص انتخاب خواهد شد. در مرجع [۹] هدف به حداکثر رساندن سود کلی کاربران در هنگام براورده کردن نیاز برای کاهش بار درخواست شده توسط اپراتور سیستم است. در مرجع [۱۰] برای حل مسئله بازیابی بار، یک مسئله چند هدفه در نظر گرفته شده است. اهداف این مسئله به شرح زیر است: ۱- بیشینه کردن بار کل بازیابی شده ۲- به حداقل رساندن تعداد عملیات کلیدزنی ۳- بیشینه کردن بار بازیابی شده اولویت بالا ۴- به حداقل رساندن حذف بار. برای حل این مسئله مولف از دو روش استفاده نموده است که یکی مبتنی بر تحلیل و دیگری روش هیوریستیک بر اساس نمودار است. مرجع [۱۱] با استفاده از کنترل مستقیم بار و حذف بار در مواقع ضروری به بهبود بازیابی سرویس کمک کرده است. مولف در این مقاله چهار هدف بازیابی مجدد اولویت های بالاتر، بیشینه شدن بار کل بازیابی شده، حداقل تعداد عملیات کلیدزنی و کمینه شدن قطع بار را در نظر گرفته است. در مرجع [۱۲] با استفاده از برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری جایابی بهینه ادوات کنترلی و حفاظتی انجام شده است. هدف این مقاله کمینه‌سازی هزینه وقفه، هزینه سرمایه‌گذاری و نگهداری تجهیزات بوده است. در این مرجع در طول فرآیند بازیابی بار شبکه ثابت فرض شده است. در مرجع [۱۳] برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری جهت تقویت ترمیم‌گر درنظر گرفته شده

است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، انتخاب راهبردهای بازیابی و همچنین پاداش مشارکت بارهای پاسخگو کاهش یافته است.

در این مقاله تاثیر استفاده از دو برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی و همچنین برنامه قطع یا کاهش بار بر بهبود خودترمیمی در شبکه هوشمند بررسی می‌شود. در این مقاله هدف بازیابی مشترکینی است که به دلیل وقوع خطا، شرکت‌های توزیع توسط فیدر اصلی نمی‌توانند به آن‌ها سرویس‌رسانی نمایند و باید با استفاده از فیدر پشتیبان، به این مشترکین برق‌رسانی شود. در استفاده از فیدر پشتیبان با محدودیت‌هایی نظیر اندازه ولتاژ شینه‌ها و جریان مجاز خطوط مواجه هستیم. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، علاوه بر بازیابی مشترکین، محدودیت‌های شبکه نیز نقض نگردد. یکی از مشکلات موجود هنگام استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، عدم اطمینان از نحوه رفتار مشترکان در هنگام مواجهه با سیگنال کاهش مصرف ارسالی از سوی شرکت‌های توزیع است. در واقع وقتی خطایی در شبکه بوجود می‌آید، تمام راهکارهای بازیابی بیشترین تعداد مشترکین با توجه به محدودیت‌های شبکه نظیر حداکثر جریان عبوری از خطوط و اندازه ولتاژ شینه‌ها شناسایی می‌شوند. سپس از میان راهکارهای شناسایی شده، بهترین راهکار به نحوه‌ی انتخاب می‌شود که بیشترین بار را بازیابی کند. در این مقاله فرض شده است که بار مصرفی نقطه‌بارها در طول فرایند بازیابی شبکه افزایش خواهد داشت. همچنین، کشسانی بارهای مختلف با توجه به نوع بار (اعم از مسکونی، تجاری، صنعتی) مقادیر متفاوتی در نظر گرفته‌شده است و با توجه به ماهیت بارهای حساس و عمومی، کشسانی این نوع بارها صفر در نظر گرفته شده است. برای نزدیکتر شدن نتایج به واقعیت، احتمال پاسخگویی مشترکان به سیگنال کاهش مصرف به صورت توزیع نرمال درنظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی، بهبود شاخص-های پایایی و همچنین کاهش هزینه‌های شرکت‌های توزیع را نسبت به زمانی که از بارهای پاسخ‌گو استفاده نمی‌شود به خوبی نشان می‌دهد.

۲_ مدل‌سازی

در این بخش، مشارکت بارهای پاسخ‌گو و تاثیر حضور آنها بر بهبود خودترمیمی در شبکه توزیع نمونه مدل‌سازی می شود.

۲_۱_ مدل‌سازی برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی

در رابطه (۱) تابع هدف مسئله نشان داده شده است. برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی با استفاده از افزایش قیمت مصرف برق مشترکین را به کاهش مصرف برق سوق می‌دهد به همین دلیل اجرای برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی هزینه‌ای را به شرکت‌های توزیع تحمیل نمی‌کند، تنها هزینه وقفه مشترکین در تابع هدف آورده شده است. رابطه (۲) نحوه محاسبه کل هزینه وقفه مشترکین را مشخص می کند.

$$Min\ Fit = TCIC \quad (۱)$$

$$TCIC = \sum_t \sum_{i\epsilon LP} \sum_{j\epsilon EC} \sum_{z\epsilon KLP} P_{ijt}\varphi_{iz}\theta_z\lambda_j LPS_{ijt} \quad (۲)$$

همچنین در این مقاله برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی به صورت زیر مدلسازی شده است[۱۴]:

$$d_{izt} = d_{izt}^0 * (1 + \frac{E_z[\rho_{iz} - \rho_{iz}^0]}{\rho_{iz}^0}) \quad (۳)$$

فرمول فوق نرخ مشارکت مشترکین در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و احتمال آن را پوشش نمی‌دهد. از این رو در این مقاله از رابطه (۴) استفاده شده است:

$$d_{izt} = d_{izt}^0 * (1 + \frac{E_z[prob_\pi * \pi * \rho_{iz} - \rho_{iz}^0]}{\rho_{iz}^0}) \quad (۴)$$

مفهوم هریک از متغیرهای بکار رفته در عبارات فوق در ابتدای همین مقاله بیان شده است.

در فرمول فوق منظور از E_z کشسانی «حساسیت بار نسبت به تغییرات قیمت» [۱۴] است و در این مقاله کشسانی انواع مختلف بار مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که هرچه قدرمطلق کشسانی بیشتر باشد به این معناست که آن بار نسبت به تغییرات قیمت حساسیت بیشتری دارد و در صورت افزایش بهای برق مقدار توان مصرفی خود را بیشتر کاهش می دهد و مقدار صفر به این معناست که آن نوع بار کاملا غیرکشسان است یعنی حتی با افزایش بهای برق و یا پرداخت‌های تشویقی نیز توان مصرفی خود را کاهش نمی دهد. کشسانی بارهای مسکونی با توجه به مرجع [۱۴] در نظر گرفته شده است و برای بارهای تجاری با توجه به اینکه قطع برق بر فروش آنها تاثیرگذار است، تمایل کمی نسبت به کاهش مصرف در صورت افزایش قیمت دارند و در این مقاله برابر ۰٫۰۵ در نظر گرفته‌شده است. کشسانی برای بارهای صنعتی با توجه به اینکه اکثر اینگونه بارها دارای برق اضطراری هستند و در صورت

افزایش برق، این منابع را جایگزین انرژی دریافت شده از شبکه می‌نمایند، از کشسانی بارهای تجاری بیشتر فرض شده است. بارهای عمومی و حساس نیز کاملاً غیرکشسان درنظر گرفته‌شده‌اند.

جدول ۱: کشسانی انواع مشترکین

نوع مشترک	مسکونی	تجاری	صنعتی	عمومی	حساس
کشسانی	-۰,۱۵	-۰,۰۵	-۰,۱۰	۰	۰

۲_۲_ مدل‌سازی برنامه قطع یا کاهش بار

در برنامه قطع/کاهش بار پرداخت‌هایی توسط شرکت‌های توزیع به صورت تشویقی به مشترکین پرداخت می‌شود و از این طریق انها را ترغیب می‌کنند تا در ساعت‌های مورد نظر مصرف برق خود را کاهش دهند. مشترکین شرکت‌کننده در این برنامه با شرکت‌های توزیع قرارداد می‌بندند که هر زمان که این شرکت‌ها بخواهند، مصرف برقشان را قطع کرده و یا تقلیل بخشند. این مشترکین اگر در مواقع لزوم بار خود را قطع نکنند، مشمول جرایمی می‌شوند.

تابع هدف با استفاده از برنامه قطع یا کاهش بار به صورت رابطه (۵) درنظر گرفته شده است که دارای سه قسمت می‌باشد. بخش اول که مطابق برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی است مربوط به هزینه وقفه مشترکین است. بخش دوم مشخص‌کننده میزان پاداش پرداختی توسط شرکت‌های توزیع به مشترکینی است که در یرنامه شرکت کرده‌اند و با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد. یخش سوم نیز مشخص‌کننده جریمه‌ی درنظر گرفته شده برای مشترکینی است که در زمان نیاز مصرف خود را کاهش نداده‌اند و مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$Min\ Fit = TCIC + TCEC - TCPC \quad (۵)$$

$$TCIC = \sum_t \sum_{i\epsilon LP} \sum_{j\epsilon EC} \sum_{z\epsilon KLP} P_{ijt} \varphi_{iz} \theta_z \lambda_j LPS_{ijt} \quad (۶)$$

$$TCEC = \sum_t \sum_{i\epsilon LP} \sum_{j\epsilon EC} \sum_{z\epsilon KLP} prob * (P_{ijt} - P_{ijt}{}') \varphi_{iz} enc_z \lambda_j flag_{ijt} \quad (۷)$$

$$TCPC = \sum_t \sum_{i\epsilon LP} \sum_{j\epsilon EC} \sum_{z\epsilon KLP} (1 - prob) \left(P_{ijt}{}' - PE_{it}\right) \varphi_{iz} pun_z \lambda_j flag_{ijt} \quad (۸)$$

همچنین در این مقاله برنامه قطع یا کاهش بار به صورت رابطه (۹) مدلسازی شده است[۱۵] :

$$d_{izt} = d_{izt}^0 * \left(1 + \frac{E_z[\rho_{iz} - \rho_{iz}^0 + pn + en]}{\dot{\rho}_{iz}}\right) \quad (۹)$$

به منظور درنظر گرفتن نرخ مشارکت مشترکین در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و احتمال آن از رابطه (۱۰) استفاده شده است [۱۶].

$$d_{izt} = d_{izt}^0 * \left(1 + \frac{E_z[\rho_{iz} - \rho_{iz}^0 + prob_\pi * \pi * (pn + en)]}{\dot{\rho}_{iz}}\right) \quad (۱۰)$$

مقدار کشسانی در این حالت نیز مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

۳_ سایر قیود مسئله

برای پیدا کردن بهترین راهبرد در ابتدا باید راهبردهایی که نمی‌توانند قیود مسئله را ارضاء نمایند، کنار گذاشته شوند. این کار با انجام پخش بار در شبکه صورت خواهد گرفت. همچنین انجام پخش‌بار کمک می‌کند تا مشخص شود که چه مقدار مشارکت پاسخ‌گویی بار می‌تواند قیود فنی مسئله را ارضاء نماید. محدودیت‌های فنی مسئله به صورت زیر تعریف شده‌اند[۱۷]:

- ساختار شعاعی شبکه: در طول و همچنین بعد از بازیابی باید ساختار شعاعی شبکه حفظ گردد.
- اندازه ولتاژ شینه‌ها: اندازه ولتاژ شینه‌ها نباید از مقادیر مشخصی کمتر و یا بیشتر گردند. این مقادیر مشخص در این مسئله به صورت زیر مشخص شده‌اند:

$$0.95^{pu} \le |V_{ij}| \le 1.05^{pu} \quad \forall i\epsilon LP. j\epsilon EC \quad (۱۱)$$

- جریان مجاز خطوط: این قید مهم‌ترین محدودیت فنی در طول فرایند بازیابی شبکه است. که در این مسئله به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود:

$$I_{ij} \le I_{br}^{max A} \quad \forall i\epsilon BR. j\epsilon EC \quad (۱۲)$$

با انجام پخش‌بار محدودیتهای فنی مسئله بررسی می‌گردند. پخش‌بار نیوتن رافسون و گاوس ساید برای استفاده در شبکه‌های توزیع مناسب نیستند؛ زیرا شبکه‌های توزیع ساختار شعاعی دارند و به خاطر نسبت X/R نسبتاً زیاد در این نوع شبکه ها جزء شبکه‌های بدرفتار هستند [۱۸]. پخش‌بار استفاده شده در این مقاله پخش‌بار تنگ است که هم سرعت همگرایی مناسبی دارد و همچنین استفاده از آن در پخش‌بار آنلاین نتایج خوبی به همراه

خواهد داشت. معادلات پخش‌بار تنگ به صورت زیر تعریف می-شوند[۱۹]:

$$[\Delta V_j] = DLF_s[I_{ij}] \qquad \forall s\epsilon SC_j.j\epsilon EC.i\epsilon B \qquad (۱۳)$$

$$I_{ij} = \left(\frac{P_{ij}+Q_{ij}}{V_{ij}}\right)^* \qquad \forall s\epsilon SC_j.j\epsilon EC.i\epsilon B \qquad (۱۴)$$

۴_ سیستم آزمون

برای ارزیابی روش‌های پیشنهادی جهت بهبود خودترمیمی در شبکه‌های توزیع، شینه شماره‌ی ۴ سیستم تست روی - بیلینتون استفاده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، این شبکه دارای ۳ پست فوق توزیع با ولتاژ ۳۳ کیلوولت، هفت فیدر ۱۱کیلوولت، ۳۸ نقطه‌بار ۴۱۵ ولت و ۴۷۷۹ مصرف‌کننده است. این شبکه دارای کلیدهای کنترل‌پذیر از راه دور با نرخ خرابی صفر است که زمان عملکرد این تجهیزات ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. متوسط بار این شبکه ۲۴,۵۸ مگاوات و بار پیک این شبکه ۴۰ مگاوات است. در این مقاله فرض بر این است که بار در ساعات بازیابی شبکه افزایش می‌یابد. این شبکه ۵ نوع مشترک دارد که عبارتند از: مسکونی، تجاری، صنعتی،عمومی و حساس [۱۷].

همچنین در شبکه نمونه مقاومت و راکتانس خطوط به ترتیب ۰,۳۰۷ و ۰,۶۲۹۵ اهم بر مایل است. حداکثر جریان مجاز عبوری از خطوط همانطور که در قسمت قبل بدان اشاره شده ۵۳۰ آمپر است و حداقل و حداکثر ولتاژ مجاز باسها به ترتیب ۰,۹۵ و ۱,۰۵ پریونیت در نظر گرفته شده است[۱۳].

آهنگ خرابی خطوط، برابر ۰,۰۶۵ خطا در هرکیلومتر در سال و آهنگ خرابی شینه بارها و ترانسفورماتور ها به ترتیب ۰,۰۰۱ و ۰,۰۱۵ خطا در سال در نظر گرفته شده است. زمان تعمیر خطوط پس از وقوع خطا در شبکه، دو ساعت فرض شده است. زمان تعمیر خطای شینه بار ۳ ساعت درنظر گرفته شده است. همچنین به دلیل اینکه برای تعمییرات ترانسفورماتور زمان بسیار زیادی نیاز است (در حدود ۵۰ تا ۲۰۰ ساعت)، در اینجا فرض شده است که در صورت خرابی ترانسفورماتور، آنرا با ترانس رزرو تعویض می کنند که این فرایند ۵ ساعت به طول می انجامد [۱۳].

در جدول ۲ جریمه‌ای که شرکت توزیع باید در صورت قطع برق هریک از انواع مشترکین به آنها پرداخت نمایید، آمده است. همانطور که مشاهده می شود، بیشترین جریمه در قبال بارهای حساس باید پرداخت شود. بارهای حساس بارهایی هستند که قطعی در برقشان پیامدهای جبران ناپذیری به همراه خواهد آورد. ازجمله مصرف کنندگان حساس، بیمارستانها، مراکز پلیس، ایستگاه‌های آتش‌نشانی و ... هستند.

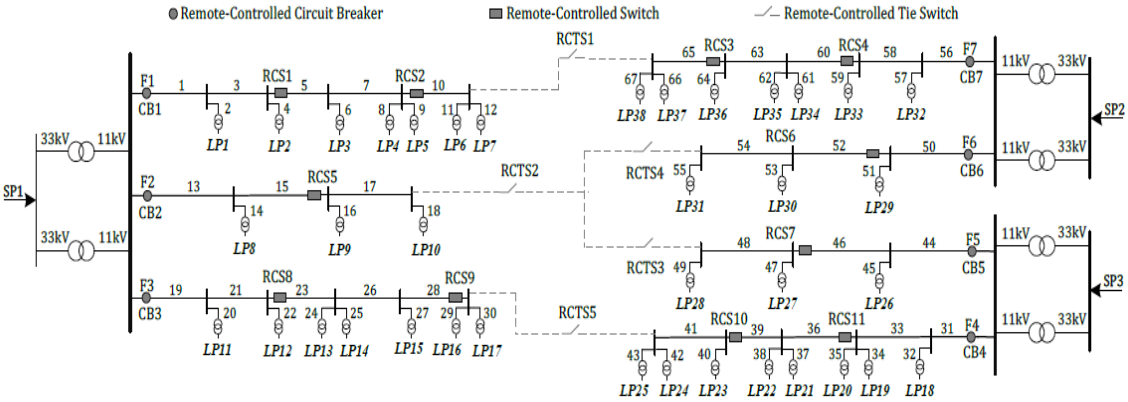
جدول ۲: جریمه عدم تامین برق مشترکین [۱۷]

نوع مشترک	حساس
جریمه($\frac{\$}{KWh}$)	۶۳,۸

۵_ نتایج شبیه‌سازی

برای شبیه سازی برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی، قیمت بار پایه مطابق با [۱۴] در نظر گرفته شده است و فرض می‌شود که قیمت برق در زمان بحرانی (بروز خطا در شبکه) به پنج برابر قیمت بار پایه افزایش خواهد یافت. همچنین با توجه به این که میزان بار مصرفی نقطه‌بارها در زمان بازیابی از کمترین مقدار مصرف به بیشترین میزان مصرف خواهد رسید، شکل ۳ میزان مجموع مصرف در ساعات بازیابی در حالت‌های مختلف اعمال برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی و بدون اعمال آن را نشان می‌دهد.

با توجه به رابطه (۸) برای شبیه‌سازی برنامه قطع یا کاهش بار، قیمت برق در دو حالت اولیه و ثانویه یکسان درنظر گرفته شده است و میزان پاداش و جریمه نیز برابر قیمت برق فرض شده است. در این حالت نیز میزان مصرف نقطه بارها از کمترین میزان به بیشترین میزان در طول فرایند بازیابی افزایش خواهد یافت. همچنین در برنامه قطع یا کاهش بار، احتمال پاسخگویی مشترکین به سیگنال کاهش مصرف به صورت توزیع نرمال درنظر گرفته شده است. برای بررسی تاثیر این مورد بر خودترمیمی درصدهای مختلف پاسخ‌گویی مشترکین درنظر گرفته شده است که در ادامه نتایج شبیه‌سازی آورده شده است.



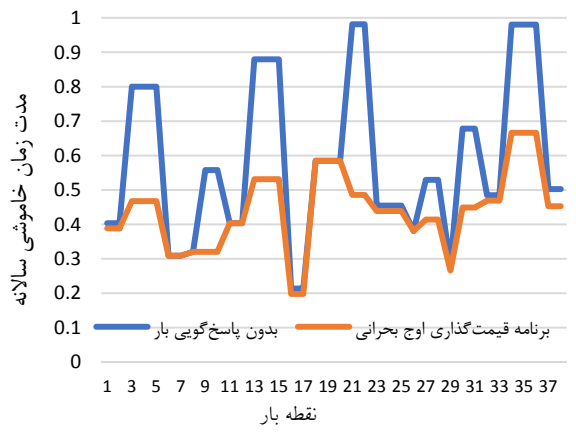
شکل ۲: شینه شماره‌ی ۴ سیستم تست روی - بیلینتون [۱۶]

در جدول ۳ مقایسه‌ای بین هزینه وقفه مشترکین و شاخص‌های قابلیت اطمینان در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار با مشارکت صد درصد مشترکین و بدون حضور این برنامه‌ها انجام شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، هزینه وقفه مشترکین و شاخص‌های قابلیت اطمینان بهبود یافته است. اما شاخص SAIFI که شاخص میانگین تعداد وقفه‌های مشترکین است، تغییری نداشته است. علت عدم بهبود در این شاخص این است که، این شاخص به تعداد خاموشی مشترکین در سال و همچنین تعداد مشترکین وابسته است که برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تاثیری بر این دو ندارند.

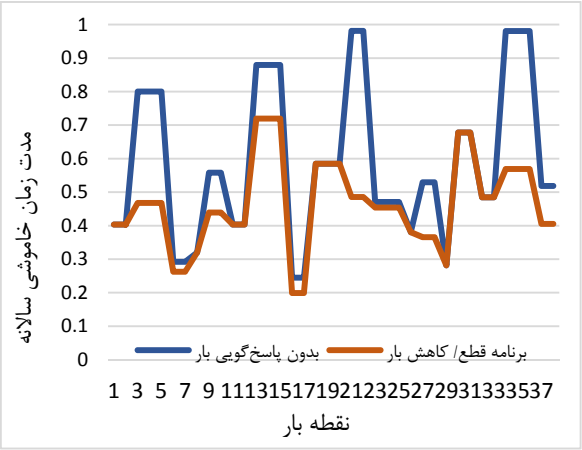
جدول ۳: نتایج حاصل از اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

حالت	هزینه $\frac{\$}{yr}$	*SAIFI*	*SAIDI*	*CAIDI*
بار پایه	۱۷۱۰۱۹,۳۸	۰,۵۷۴۳	۰,۶۸۸۱	۱,۱۹۸۲
قیمت‌گذاری اوج بحرانی	۱۲۱۸۶۵,۶۲	۰,۵۷۴۳	۰,۵۱۳۹	۰,۸۹۵۰
قطع یا کاهش بار	۱۲۷۷۸۲,۳۰	۰,۵۷۴۳	۰,۵۳۷۴	۰,۹۲۱

شکل ۳ و ۴ تاثیر برنامه‌های قیمت‌گذاری اوج بحرانی و قطع یا کاهش بار بر وقفه تجربه شده توسط نقطه‌بارها در سال مشاهده می‌شود. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که برخی از نقطه بارها زمان وقفه یکسانی را در حضور و عدم حضور برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی تجربه می‌نمایند. به عنوان مثال در هزینه و زمان وقفه نقطه‌بارهای ۱ و ۲ تغییری ایجاد نشده است زیرا در صورت بروز خطا در تمام تجهیزاتی که بین قطع‌کننده کنترل‌پذیر از راه دور RCCB1 و کلید کنترل‌پذیر از راه دور RCS1 هستند، به دلیل اینکه نمی‌توان این دو نقطه‌بار را از خطای بوجود آمده ایزوله نمود پس این دو نقطه بار به ازای اینگونه خطاها و حتی در حضور برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی نیز امکان بازیابی ندارند، از این رو حضور برنامه پاسخ‌گویی بار در مدت زمان خاموشی این نقطه‌بارها تاثیری ندارد. همچنین به ازاء خطا در تمام تجهیزات بین RCS1 و RCTS1 نقطه‌بارهای ۱ و ۲ بدون برنامه پاسخ‌گویی بار نیز بازیابی می‌شوند. لذا برنامه پاسخ گویی بار بر روی نقطه‌بارهای یک و دو تأثیری ندارد. مطالب بیان شده در خصوص شکل ۳ در مورد شکل ۴ نیز صادق است.



شکل ۳: تاثیر برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی برمیانگین سالانه مدت زمان خاموشی نقطه‌بارها



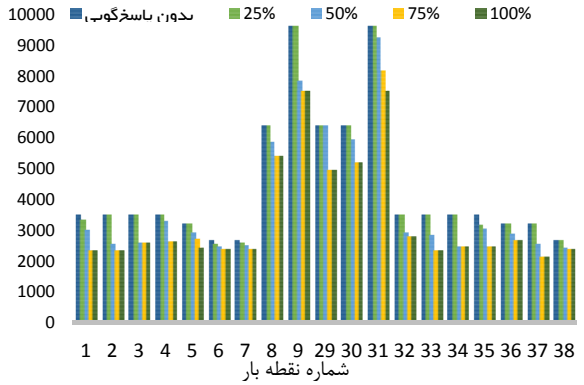
شکل ۴: تاثیر برنامه قطع یا کاهش بار برمیانگین سالانه مدت زمان خاموشی نقطه‌بارها

۶_ تحلیل اثر رفتار مشترکین

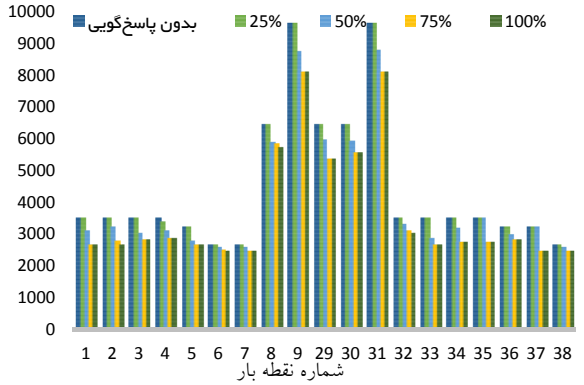
در این بخش اثر رفتار مشترکین بر اثربخشی برنامه‌های قیمت گذاری اوج بحرانی و قطع یا کاهش بار در خودترمیمی شبکه‌های توزیع هوشمند تحلیل و بررسی می‌شود.

در شکل ۵ و ۶ تاثیر برنامه‌های قیمت‌گذاری اوج بحرانی و قطع یا کاهش بار با درصدهای مختلف مشارکت مشترکین بر میزان مصرف نقطه بارها نمایش داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که درصورتی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر کاهش میزان مصرف برق تاثیر بسزایی دارد که بیش از ۵۰ درصد مشترکین به سیگنال‌های کاهش مصرف واکنش نشان دهند. اما

میزان مصرف برق مشترکین در حالت‌های مشارکت ۷۵ درصدی و ۱۰۰ درصدی تفاوت چندانی ندارد.

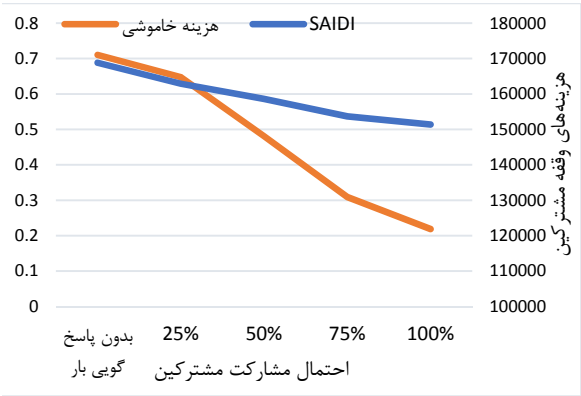


شکل ۵: تاثیر مشارکت مشترکین بر مصرف برق در برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی

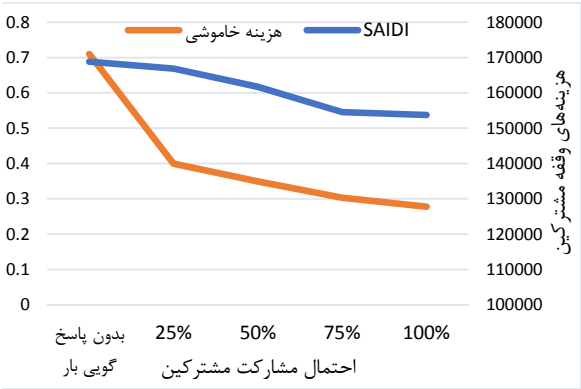


شکل ۶: تاثیر مشارکت مشترکین بر مصرف برق در برنامه قطع یا کاهش بار

شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات شاخص میانگین مدت وقفه مشترکین و میزان هزینه ناشی از خاموشی مشترکین در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (به ترتیب برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی و برنامه قطع یا کاهش بار) با در نظر گرفتن تغییرات میزان مشارکت مشترکین را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که میزان هزینه ناشی از خاموشی مشترکین در حالت استفاده از برنامه قطع یا کاهش بار حتی با مشارکت پایین مشترکین بسیار کمتر از حالت بدون استفاده از پاسخ‌گویی بار است که این امر بخاطر در نظر گرفتن هزینه‌های تنبیهی برای مشترکینی است که برای شرکت در برنامه اعلام آمادگی نموده‌اند اما در زمان ارسال سیگنال کاهش مصرف، مصرف خود را کاهش نمی‌دهند. اما استفاده از برنامه قطع یا کاهش بار زمانی، بر شاخص‌های قابلیت اطمینان تاثیرگذار است که حداقل ۵۰ درصد مشارکت در برنامه وجود داشته باشد.



شکل ۷: تاثیر مشارکت مشترکین بر هزینه‌های وقفه مشترکین و SAIDI در برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی



شکل ۸: تاثیر مشارکت مشترکین بر هزینه‌های وقفه مشترکین و SAIDI در برنامه قطع یا کاهش

۷_ نتیجه‌گیری

به دلیل خسارت‌هایی که قطع برق بر صنایع و کسب‌وکارها وارد می‌کند و در برخی موارد ممکن است جان بیماران بیمارستانی را به خطر اندازد، نیاز است تا زمان این خاموشی‌ها به حداقل ممکن برسد. با استفاده از زیرساخت‌های شبکه هوشمند می‌توان طرحی با عنوان خودترمیمی را اجرا نمود و با استفاده از آن زمان رفع خطا را کاهش داد. خود ترمیمی یکی از قابلیت‌های شبکه‌های توزیع هوشمند برق است که باعث بازیابی خودکار شبکه توزیع در صورت بروز یک خطای پایدار و غیرگذرا می‌شود. به دلیل قیود شبکه، در بازیابی بارهای قطع‌شده با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستیم. هدف در این مقاله کاهش زمان وقفه مشترکین در عین

ارضای محدودیت‌های فنی شبکه است و برای نیل به این هدف، از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار استفاده گردید و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از برنامه قیمت‌گذاری اوج بحرانی و برنامه قطع/کاهش بار انجام شد و نتایج در قسمت قبل ارائه گردید. همچنین برای نزدیکتر شدن نتایج به واقعیت، احتمال مشارکت مشترکین در برنامه‌ها به صورت توزیع نرمال درنظر گرفته شده است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده به خوبی قابل مشاهده است که استفاده از این برنامه اگرچه مانع بروز خطا در شبکه نمی‌گردد، اما شاخص‌های قابلیت اطمینان را به خوبی بهبود بخشیده است که این موضوع موجب افزایش رضایت مشترکان از عملکرد شرکت‌های توزیع خواهد شد و همچنین هزینه‌های شرکت‌های توزیع را نیز کاهش خواهد داد.

۸_ منابع

[1] R.E. Brown, T.M. Taylor, “Modeling the Impact of Substations on Distribution Reliability,” IEEE Power Engineering Society, New York, NY, USA, USA, Feb. 1999.

[2] A. Golshani, W. Sun, Q. Zhou, Q. P. Zheng, J. Tong, "Two-stage adaptive restoration decision support system for a self-healing power grid", IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 13, no. 6, pp. 2802-2812, Dec. 2017.

[3] B. S. Torres, L. R. Ferreira, A. R. Aoki, “Distributed Intelligent System for Self-Healing in Smart Grids,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, pp. 2394-2403, 2018.

[4] P.L. Cavalcante, J.C. Lopez, J.F. Franco et al., "Centralized self-healing scheme for electrical distribution systems", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 7, no. 1, pp. 145-155, 2016.

[5] A. Shahsavari, A. Fereidunian, H. Lesani, “A healer reinforcement approach to smart grid self-healing by redundancy improvement”, 18th Conf. on Elect. Power Dist. Networks, Kermanshah, Iran, Apr. 2013.

[٦] ع. شهبازیان، ع. فریدونیان، " برنامه‌ریزی خطی و مکان‌یابی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترل از راه دور و کنترل دستی، برای بهبود پایایی شبکه‌های توزیع هوشمند"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۸، شماره ۴، شماره پیاپی۸۶، زمستان ۱۳۹۷.

[7] Y. Xu, W. Liu, “Novel Multiagent Based Load Restoration Algorithm for Microgrids”, IEEE Transactions on Smart Grid, Volume: 2, Issue: 1, March 2011.

[8] S. J. Lee, S. Lim, B. S. Ahn, “Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998.

[9] W. Zhang, Y. Xu, S. Li, M. C. Zhou, W. Liu, Y. Xu, “A Distributed Dynamic Programming-Based Solution for Load Management in Smart Grids”, IEEE Systems Journal, Volume: 12, Issue: 1, March 2018.

[10] M. Gholami, J. Moshtagh, N. Ghadernejad, “Service restoration in distribution networks using combination of two heuristic methods considering load shedding”, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,Volume 3, Issue 4, pp 554–556, December 2015.

[11] M. R. Kleinberg, K. Miu, H. D. Chiang, “Improving Service Restoration of Power Distribution Systems Through Load Curtailment of In-Service Customers”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, NO. 3, August 2011.

[12] S. Heydari, S.M. Mohammadi-Hosseininejad, H. Mirsaeedi, A. Fereidunian, H. Lesani, “Simultaneous placement of control and protective devices in the presence of emergency demand response programs in smart grid”, Int Trans. Electric Energy syst., 2018.

[۱۳] ب. مصطفی‌پور، ع. فریدونیان، ر غنی‌آبادی، ح. لسانی، " بهبود خودترمیمی در شبکه توزیع هوشمند با استفاده از پاسخگویی بار اضطراری" کنفرانس شبکه‌های هوشمند انرژی، ایران، آذرماه ۹۷.

[17] S.M. Mohammadi-Hosseininejad, A. Fereidunian, A. Shahsavari, H. Lesani, “A healer reinforcement approach to self-healing in smart grid by PHEVs parking lot allocation”, IEEE Trans. on Industrial Informatics, Vol. 12, pp. 2020-2030, 2016.

[18] K. Prakash, M. Sydulu, “An effective topological and primitive impedance based distribution load flow method for radial distribution systems”, Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008.

[19] I. Teng, “A Direct Approach for Distribution System Load Solution”, IEEE Trans. on Power Deliver. Vol. 18, No. 3, 2003.

[14] H. A. Aalami, Parsa Moghaddam, G. R. Yousefi, “A MADM-based Support System for DR Programs”, 43rd International universities power engineering conference (UPEC), Padova, Italy, September 2008.

[15] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, G. R. Yousefi, “Demand response modeling considering Interruptible/Curtailable loads and capacity market programs”, Applied Energy, Vol. 87, No. 1, pp. 243-250, Jan. 2010.

[16] P. T. Baboli, M. Eghbal, M. P. Moghaddam, H. Aalami, "Customer behavior based demand response model", *Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting*, pp. 1-7, Jul. 2012.