

پیک‌سایی با کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه (CVR)

بود [۱]. در گذشته اجرای CVR به دلیل ارزان بودن قیمت سوخت‌های فسیلی مورد توجه نبود. تا زمانی که در دهه‌ی هفتاد میلادی با آغاز بحران سوخت و افزایش قیمت نفت این روش به عنوان روشی کاربردی مورد استقبال قرار گرفت [۱۵]. اولین بار CVR در شبکه برق آمریکا (AEP) در سال ۱۹۷۳ اجرا شده است [۲]. پژوهش‌های بعدی توسط شرکت ادیسون کالیفرنیا (SCE) [۳]، صنعت برق شمال (NU) [۴]، وزارت آب بریتیش کلمبیا [۵]، اتحادیه بهره‌وری انرژی شمال غربی (NEEA) [۶]، هیدرو کبک (HQ) [۷] و نیروی برق حوزه‌ی ویرجینیا [۸] انجام شده است. با اجرای گسترده CVR در کشور استرالیا [۹]، با آزمون CVR کاهش ولتاژ ۲/۵ درصد و صرفه‌جویی انرژی یک درصد حاصل شد. در سال‌های اخیر CVR به عنوان جزیی از کاربردهای شبکه‌های هوشمند در بازارهای آینده انرژی مطرح است [۱۰]. در فصل دوم این مقاله مبانی و مفاهیم CVR ارائه شده است. در فصل سوم به روش‌های انتخاب فیدرهای حساس به ولتاژ اشاره شده است. نحوه‌ی مدل‌سازی بار در فصل چهارم توصیف شده است. در فصل پنجم روش‌های اجرای کاهش ولتاژ معرفی شده است. در فصل ششم به ارتباط بین پاسخ تقاضا و کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه اختصاص دارد. در فصل هفتم روش‌های اجرای CVR معرفی شده است و بالاخره در فصل آخر مطالب جمع‌بندی و نتیجه‌گیری شده است.

۲. مبانی و مفاهیم کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه

۲-۱ تعریف کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه (CVR)

کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه یک روش بهینه‌سازی ولتاژ برای بهبود بهره‌وری است. انجمن استاندارد ملی آمریکا (ANSI) استاندارد C84.1

فاطمه مهربانی / دانشجوی ارشد برق سیستم قدرت، دانشگاه صنعتی سجاد مشهد /

f.mehrabani1992@gmail.com

مصطفی رجبی مشهدی / استادیار دانشگاه صنعتی سجاد مشهد /

m.rajabimashhadi@ieee.org

چکیده

یکی از دغدغه‌های اصلی صنعت برق، کاهش پیک تقاضا و صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌باشد. در طی چند سال اخیر کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه (CVR) یکی از موضوعات جذابی بوده که با هدف پیک‌سایی مطرح شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه (CVR) برای کاهش همزمان پیک تقاضا و مصرف انرژی به طور گسترده در شبکه‌ی توزیع اجرا شده است. در این مقاله روش‌های اجرا، ارزیابی، مزایا و CVR تعیین ضریب CVR مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه، پیک تقاضا، صرفه‌جویی

انرژی، روش‌های پیاده‌سازی CVR

۱. مقدمه

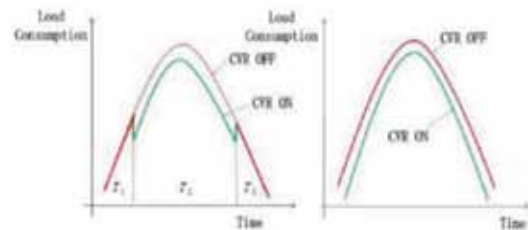
یکی از مقرون به صرفه‌ترین و ارزان‌ترین روش‌ها برای پیک‌سایی و صرفه‌جویی انرژی، کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه (CVR) است. کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه در شبکه توزیع، کاهش پیک تقاضا، کاهش تلفات و صرفه‌جویی انرژی را به دنبال دارد. میزان کاهش ولتاژ برای مصرف‌کننده در سطح مجاز تعیین شده که توسط سازمان‌های نظارتی و استاندارد تعیین شده است خواهد

[۱] محدوده‌ی ولتاژ مجاز را $\pm 5\%$ تعیین کرده است. حد ولتاژ مجاز پایین به این دلیل آن که با کاهش ولتاژ به لوازم مصرفی آسیبی وارد نمی‌شود و نیز آسانتر و ارزانتر کنترل می‌شود مورد استفاده است [۱۱].
CVR در کاهش مصرف انرژی با ضریب تنظیم ولتاژ صرفه‌جویانه (CVR_f) به صورت رابطه (۱) تعریف شده است:

$$CVR_f = \frac{\% \Delta E}{\% \Delta V} \quad (1)$$

که در آن $\% \Delta E$ نشان‌دهنده‌ی درصد کاهش انرژی و $\% \Delta V$ نشان‌دهنده‌ی درصد کاهش ولتاژ است.

در مقالات [۱۳، ۱۲، ۲] میزان تاثیر CVR در کاهش پیک تقاضا و کاهش مصرف انرژی بررسی شده است. در شکل (۱) تفاوت زمانی اجرای کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه با هدف کاهش پیک تقاضا و صرفه‌جویی در مصرف انرژی نشان داده شده است.



شکل (۱): (چپ) کاهش پیک تقاضا و (راست) کاهش انرژی مصرفی

۲-۲ مزایای کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه (CVR)

از دیدگاه مصرف‌کننده، کاهش ولتاژ منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود و از طرفی، میزان تولید توان (و در نتیجه میزان درآمد) واحدهای نیروگاهی کاهش می‌یابد. انجام این کار علاوه بر این که از نقطه نظر کاهش هزینه‌های تأمین توان اکتیو سودمند است، در دید وسیع‌تر، می‌تواند باعث کاهش یا به تعویق انداختن هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نصب واحدهای نیروگاهی جدید یا عدم نیاز به راه‌اندازی نیروگاه‌های فرسوده با بازدهی پایین شود. این مزیت، به خصوص در مورد شبکه‌هایی با رشد بار کم قابل ملاحظه است [۱۴]. از مزایای CVR در صنعت برق، کمک به پیک‌سایی در شبکه توزیع، کاهش تلفات در ترانسفورماتور و شبکه توزیع و افزایش رفاه اجتماعی به دلیل کاهش مصرف سوخت می‌توان نام برد [۱۶].

۳. انتخاب فیدرهای حساس به ولتاژ

یکی از موضوعات اساسی در اجرای طرح CVR، انتخاب باس‌ها یا فیدرهای حساس به ولتاژ است. به عبارت دیگر اثربخشی اعمال CVR، انتخاب فیدرهایی است که با کاهش ولتاژ، بار بیشتری کاهش می‌یابد. تاکنون روش‌های مبتنی بر مقایسه، رگرسیون، ترکیب، شبیه‌سازی و همچنین از ترکیب کردن دو یا چند روش فوق برای انتخاب فیدرها برای اجرای CVR ارایه شده است [۱۶].

۱-۳ روش مبتنی بر مقایسه

ساده‌ترین روش‌هایی که می‌توان برای انتخاب فیدر حساس به ولتاژ نام برد، روش مبتنی بر مقایسه است. در این روش دو فیدر مشابه در دوره کاری یکسان با یکدیگر مقایسه می‌شوند، انتخاب فیدرها باید از لحاظ شبکه‌ای، موقعیت جغرافیایی، وضعیت بار و

غیره یکسان باشد. این روش به دو شیوه انجام می‌شود. در شیوه‌ی اول، دو فیدر، یکی برای اجرای کاهش ولتاژ انتخاب می‌شود و با فیدر دیگر در همان زمان، در شرایط عادی ولتاژ مقایسه می‌شود. در شیوه‌ی دوم، آزمون CVR بر روی یک فیدر انجام می‌شود و نتایج آن روی همان فیدر در طی دوره‌ی زمانی دیگر در شرایط عادی شبکه مقایسه می‌شود. در نهایت اثرات CVR بر اساس این مقایسه، محاسبه می‌شود [۱۷]. مشکلی که در این روش وجود دارد، تغییرات بار ناشی از عوامل دیگری غیر از کاهش ولتاژ مانند تفاوت آب‌وهوا و وجود اغتشاش در وسایل اندازه‌گیری است که باعث می‌شود اثرات کوچک CVR در محاسبات دیده نشود [۱۶]. از کاستی‌های دیگر این روش، دقت پایین این روش در تعیین فیدر حساس به ولتاژ است. یکی از کارهایی که برای افزایش دقت انجام می‌گیرد، در نظر گرفتن میانگین ساده از تغییرات آب‌وهوایی است. در این صورت اثرات CVR تنها برای یک روز خاص و در یک دوره خاص بدست نمی‌آید، در نتیجه اثر CVR ماهیت وابسته بودن به زمان را از دست می‌دهد [۱۶].

۲-۳ روش مبتنی بر رگرسیون

در روش مبتنی بر رگرسیون، از مدل خطی بار که وابستگی خطی به ولتاژ، درجه حرارت و دیگر عوامل مؤثر دارد، استفاده می‌شود [۱۷]. با استفاده از این روش اثر CVR بر روی فیدرهای مختلف پیش‌بینی می‌شود. برای تشخیص اثرات CVR، خطاهای تخمین رگرسیون بایستی مورد توجه قرار گیرد [۱۶]. در اغلب پژوهش‌ها، اغلب از نوع خطی مدل رگرسیون استفاده شده است. اگرچه تحولات اخیر روش رگرسیون غیر خطی مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) فرصتی برای تقریب زدن رفتارهای غیر خطی ایجاد کرده است. مدل رگرسیون غیر خطی نتایج تخمین بهتری از اثرات CVR را نسبت به روش مبتنی بر رگرسیون خطی دارد [۱۶].

۳-۳ روش مبتنی بر ترکیب

در این روش، ترکیبی از رفتارهای بار وابسته به ولتاژ برای انواع مصرف‌کننده‌ها از جمله مسکونی، تجاری و صنعتی تخمین زده می‌شود [۱۶]. انواع مصرف‌کننده‌ها رفتار مختلفی را در مقابل کاهش ولتاژ دارند. یکی از مشکلات این روش دشواری دستیابی به اطلاعات بارهای مختلف است [۱۶].

۴-۳ روش مبتنی بر شبیه‌سازی

روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، پتانسیل اعتبارسنجی را نیز دارا می‌باشند. در صورتی روش شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردار است که رفتارهای بار به دقت مدل شده باشد. کاملاً واضح است که اثرات CVR وابسته به زمان است و با گذر زمان تغییر می‌کند، اما مدل‌های جریان بار همگی زمان ثابت‌اند، که ممکن است در نتایج تخمین زده شده‌ی اثرات CVR بر روی فیدرهای مختلف تأثیر بگذارد. بنابراین باید بین تغییرات دینامیکی فیدرها و رفتارهای بار مدل تطبیقی ایجاد شود [۱۶].

۴. مدل‌سازی بار

مدل‌سازی بار نقش مهمی در مشارکت فیدرها در تنظیم ولتاژ صرفه‌جویانه دارد. اجرای کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه (CVR)، نیازمند مدیریت فعال دستگاه‌های تنظیم ولتاژ برای افزایش/کاهش تقاضا، پیک‌سایی و ذخیره‌ی سوخت است. از آنجا که پاسخگویی بار وابسته به ولتاژ به طور کامل به ترکیب بار لحظه‌ای وابسته است، دستیابی به

مدل واقعی بار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. باید توجه شود، پایه اصلی اجرای CVR، بارهایی است که با ولتاژ تغییر می‌کند و با کاهش ولتاژ منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود [۱۸]. با توجه به محدوده‌ی استاندارد ANSI با کاهش درصد کمی از ولتاژ فیدر، توان اکتیو (KW)، توان راکتیو (KVAR) و مصرف انرژی (KWh) به همراه بار، برای بیشترین مصرف‌کننده‌ها کاهش خواهد یافت. بارهای مختلفی (روشنایی، موتور، تعبیه، سیستم گرمایشی، تهویه هوا، تلویزیون و...) رفتارهای متفاوتی نسبت به هم دارند برای ارزیابی دقیق، نیازمند یک مدل بار دقیق هستند. مدل قابل قبول برای مهندسی برق مدل ZIP [امپدانس ثابت Z، جریان ثابت I و توان ثابت P] می‌باشد. یکی از معمول‌ترین مدل‌های مورد استفاده برای CVR، مدل ZIP می‌باشد. از آنجا که ترکیب بار برای بیشتر فیدرها با گذر زمان تغییر می‌کند و باعث ایجاد اختلاف زیادی در ارزیابی صرفه‌جویی انرژی با CVR و مقدار دقیق آن می‌شود، لازم است از مدل باری استفاده شود که با کاهش ولتاژ، میزان تغییر در بارهای بخش‌های مسکونی، تجاری و صنعتی را به درستی تعیین کند [۱۹].



۵- روش‌های اجرای CVR

روش‌هایی که برای اجرای کاهش ولتاژ ارایه شده با استفاده از تپ چنجر (LTC)، جبران افت خط (LDC)، کاهش گسترده ولتاژ (VSR) و کاهش مبتنی بر خازن است [۱]. اگر شبکه توزیع به درستی با اصلاح ضریب توان و یا دستگاه‌های تنظیم ولتاژ جبران شود، بدون به خطر انداختن کیفیت توان، کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه (CVR) در پیک‌سای، مؤثر خواهد بود [۲۰].

۵-۱ تپ چنجر

تنظیم تپ چنجر ترانسفورماتورها برای کنترل ولتاژ ثانویه پست‌ها استفاده می‌شود. با توجه به آنکه تپ چنجر در اغلب ترانس‌های شبکه وجود دارد این روش برای اجرای CVR بدون پرداخت هزینه اضافه، قابل استفاده است. با این حال برای اعمال کاهش ولتاژ با LTC، ترانسفورماتورها باید به دقت انتخاب شوند تا با افت ولتاژ بزرگ، از حد کاهش ولتاژ مجاز تخطی نشود [۱۶]. هر چه مصرف‌کننده از ترانسفورماتور LTC فاصله می‌گیرد میزان افت ولتاژ بیشتر می‌شود به همین منظور برای نگر داشتن ولتاژ در محدوده‌ی مجاز، میزان

ولتاژ بایستی از مقدار کمترین ولتاژ مورد نیاز مصرف‌کننده، بیشتر باشد تا برای دورترین مصرف‌کننده، مشکلی ایجاد نشود. باید به این نکته توجه شود که برای اجرای CVR نیازمند اطلاعات دقیق از بار و میزان ولتاژ باشد تا با کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه، ولتاژ برای مصرف‌کننده در حد مجاز باشد [۲۱]. در مقاله [۲۲] از الگوریتم تابع CVR توسعه یافته استفاده شده است که با استفاده از وسایل کنترل (OLTC و SVR) محدوده‌ی عملکردی ولتاژ را در پایین‌ترین حد ممکن نگه می‌دارند و به کمک واحدهای کنترل توان راکتیو (DG و SVC) پروفیل ولتاژ را در حالت مسطح قرار می‌دهند.

۵-۲ جبران افت خط

اغلب جبران افت خط با تنظیم ولتاژ در پست برای نگر داشتن حداقل میزان ولتاژ قابل قبول در قسمت‌های دور از دسترس برای کنترل استفاده می‌شود. LDC راهی آسان برای کنترل ولتاژ است ولی تعیین تنظیمات LDC بسیار مشکل است و نمی‌تواند با ماهیت پویای بارهای توزیع و تغییرات پیکربندی شبکه تطبیق پیدا کند [۱۶]. ویژگی تنظیمات LDC این است که، سطح ولتاژ در طول یک فیدر را در حداقل سطح ولتاژ قابل قبول حفظ می‌کند، در نتیجه بهینه‌سازی پروفیل ولتاژ در سراسر شبکه توزیع انجام می‌شود. برای موفقیت در استفاده از تنظیمات LDC برای اجرای کاهش ولتاژ طولانی مدت در یک شبکه توزیع، توجه دقیق باید به تنظیمات مورد استفاده در برابر بار و ویژگی‌های الکتریکی لحاظ شود. نظارت بر ولتاژ برای تأیید تنظیمات LDC در حال کار، به صورت دائم توصیه می‌شود [۲۳].

۵-۳ خازن

خازن‌ها جبران‌کننده توان راکتیو در CVR هستند. سوئیچ خازن‌ها با روش‌های کنترل ولتاژ در کنترل ولت/وار (VVC) برای پیاده‌سازی CVR ارایه می‌شوند. قرار دادن خازن‌ها در مکان‌های مختلف، مسطح شدن پروفیل ولتاژ، اصلاح ضریب قدرت و کاهش تلفات را به دنبال دارد. برای فیدرهایی بدون LTC یا تنظیم‌کننده ولتاژ، بانک‌های خازنی برای کاهش ولتاژ به طور مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرند و معمولاً درصد کاهش ولتاژ در فیدر را فراهم می‌کنند [۱۶]. یکی از روش‌های ارایه شده استفاده از چند بانک خازنی در فیدر توزیع برای رسیدن به ولتاژ مسطح مورد نیاز برای اجرای موفقیت‌آمیز کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه است. بیشترین کاهش کیلووات معمولاً در ۱۵ دقیقه اول اجرای CVR گزارش می‌شود که برای پیک‌سای قابل توجه است [۲۰].

۶- پاسخگویی بار و CVR

تغییرات تصادفی و سریع در میزان تقاضا همراه با عدم قطعیت در تولید، چالش‌های جدیدی را برای شبکه موجود ایجاد کرده است. افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب، خواستار تغییر تعریف سناریو «تولید به دنبال تقاضا» به «تقاضا به دنبال تولید» است. با تغییر در الگوی مصرف برق با کاهش و یا تغییر در زمان تقاضای برق لحظه‌ای، تعریف جدیدی به نام پاسخگویی بار (DR) مطرح شده است [۲۴]. ایده اصلی این روش آن است که تقاضا را می‌توان تا حدی توسط تغییر ولتاژ تنظیم کرد. با این وجود در صنعت برق این روش با توجه به خطر انحراف ولتاژ فراتر از محدوده‌ی مورد نظر مصرف‌کننده، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، عدم برآورد دقیق از وابستگی ولتاژ به بارها، موانع بیشتری

تا (۴) ویژگی‌های هر کدام از روش‌های انتخاب فیدرهای حساس به ولتاژ، روش‌های اجرا برای مشترکان به تعرفه‌های مختلف و در فصول مختلف عملیاتی را نمایش داده است.

جدول (۲): ارزیابی انتخابی فیدرهای حساس به ولتاژ [۱۶]

کشور / منطقه	EST	ویژگی‌ها	
Snohomish	CO	(+) آسان و سر راست	۰.۵۰
NU	CO	(-) وابسته به گروه کنترلی	۱.۰۰
		(-) آسیب‌پذیری از نوبز	
AEP	RE	(+) مفهوم فیزیکی مشخص (+) قابلیت پیش‌بینی اثرات CVR (-) خطای رگرسیون (-) خطی بودن مدل بار	۰.۶۲
California	RE		۱.۰۰
NEEA	RE		۰.۶۱
Avista	RE		۰.۸۴
BC Hydro	RE		۰.۷۰
SCE	RE		۱.۰۰
BPA	SY		(+) تخمین و پیش‌بینی سریع اثرات CVR
Australia	SY	(-) سخت بودن جمع‌آوری داده‌های صحیح بار	۰.۴۰
EPRI	SI	(+) دقت تقریباً بالا	۰.۷۰
Taipower	SI	(-) سخت بودن مدل‌سازی دقیق بار (-) زمان ثابت بودن مدل بار	۰.۵۷

EST بیانگر روش‌های تخمین، CO بیانگر روش مقایسه، RE بیانگر روش رگرسیون، SY بیانگر روش ترکیبی و SI بیانگر روش شبیه‌سازی است.

جدول (۳): ضرایب CVR برای مشتریان با تعرفه‌های مختلف [۱۶]

کشور / منطقه	مسکونی	تجاری	صنعتی
California	۰.۷۵	۰.۹۹	۰.۴۱
BPA	۰.۷۷	۰.۹۹	۰.۴۱
AEP	۰.۶۱	۰.۸۹	۰.۳۵
CPUC	۱.۱۴	۰.۲۶	N/A
SCE	۱.۳۰	۱.۲۰	۰.۵۰
Snohomish	۰.۶۸-۰.۳۳	۱.۱۰-۰.۸۹	N/A
HQ	۰.۶۷-۰.۰۶	۰.۹۷-۰.۸۰	۰.۱۰
NEEA	۱.۱۴	۰.۲۶	N/A
Detroit	۱.۱۱-۰.۹۶	۰.۸۰-۰.۷۵	۰.۸۳-۰.۵۰

۸ نتیجه‌گیری

کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه انجام یک روش کم هزینه برای پیک‌سایی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی است که نتیجه آن به تعویق انداختن

برای پذیرش آسان آن ایجاد کرده است [۲۴]. در سال‌های اخیر با توسعه زیرساخت‌های اندازه‌گیری هوشمند (AMI) استفاده از DR شتاب بیشتری داشته است [۲۴]. پتانسیل پاسخگویی بار با تنظیم ولتاژ (VCDR) به شدت متکی به کنترل ولتاژ است. تخمین دقیق ولتاژ برای استفاده بالقوه‌ی VCDR، برای جلوگیری از افزایش/کاهش از محدوده مجاز امری ضروری است [۲۴].

جدول (۱): روش‌های کاهش ولتاژ در مناطق کشورهای مختلف [۱۶]

کشور / منطقه	روش اجرا	ویژگی‌ها	درصد عملکرد
California	LTC	(+) آسان و اقتصادی (-) کاهش ولتاژ کم (-) احتمال کاهش ولتاژ در صورت نبودن فیدبک ولتاژ	۲.۵٪
		(+) کنترل ولتاژ انتهای خط LT (+) کاهش ولتاژ بیشتر از (-) تنظیمات پیچیده (-) بدون فیدبک ولتاژ	۳.۹-۲٪ ۳٪ ۲.۵٪
Duke	LDC	(-) ناسازگاری با تغییرات دینامیکی	۲٪
Snohomish	LDC, CA	(+) کنترل ولتاژ انتهای خط DT (+) کاهش ولتاژ بیشتر از (+) تلفات توان کمتر، پروفیل ولتاژ صاف‌تر و ضریب توان بهتر (-) پیچیده بودن مکان‌یابی خازن (-) بدون فیدبک ولتاژ (-) عدم هماهنگی بین LD و CA (-) قیمت بالا (-) ناسازگاری با تغییرات دینامیکی	۲.۱٪ ۴.۶٪ ۳٪ ۴.۱٪

۷ روش‌های اجرا شده CVR

پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی اجرای CVR ویژگی‌ها و مزایا و معایبی که هر کدام از روش‌ها نسبت به یکدیگر دارند، در انتخاب روش اجرای CVR نقش بسزایی دارد. مورد بررسی و مقایسه قرار بگیرد. در جدول (۱) ویژگی‌های روش‌های کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه مختلف در مناطق یا کشورهای مختلف و میزان درصد کاهش ولتاژ اعمالی آمده است. در جدول (۲) مقایسه روش‌های CVR و نقاط مثبت و منفی در آن نشان شده است. جدول (۳) نشان‌دهنده‌ی ضرایب کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه است که مشتریان را با کلاس‌های مختلف لحاظ شده است. جدول (۴) نشان‌دهنده‌ی بررسی کلاس‌های مختلف مشتریان با در نظر گرفتن آب و هوا یا فصل‌های مختلف می‌باشد. جدول (۱)

[7] S. Lefebvre et al, "Measuring The Efficiency of Voltage Reduction at Hydro-Québec Distribution", IEEE Conference on Power and Energy Society, pp. 1-7, 2008.

[8] Melissa A. Peskin, Phillip W. Powell and Edmund J. Hall, "Conservation Voltage Reduction With Feedback From Advanced Metering Infrastructure", IEEE Conference and Exposition on Transmission and Distribution, pp. 1-8, 2012.

[9] W. Ellens, A. Berry and S. West, "A quantification of The Energy Savings by Conservation Voltage Reduction", IEEE International Conference on Power System Technology, pp. 1-6, 2012.

[10] Pankaj K. Sen; Keun Hyuk Lee, "Conservation Voltage Reduction Technique: An Application Guideline for Smarter Grid", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, pp. 2122-2128, 2016.

[11] B. W. Kennedy and R. H. Fletcher, "Conservation Voltage Reduction (CVR) at Snohomish County PUD", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 986-998, 1991.

[12] V. J. Warnock and T. L. Kirkpatrick, "Impact of Voltage Reduction on Energy and Demand: Phase II", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, No. 2, pp. 92-95, 1986.

[13] J. C. Erickson and S. R. Gilligan, "The Effects of Voltage Reduction on Distribution Circuit Loads", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 7, pp. 2014-2018, 1982.

[14] ر. نژادسلیمانی "کنترل بهینه ولتاژ و توان راکتیو در شبکه های توزیع با استفاده از اینورترهای هوشمند فتوولتائیک با ضریب نفوذ بالا"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، صفحات ۱ الی ۸۳، ۱۳۹۳.

[15] م. درفشیان، م. رجبی مشهدی، ا. مذکور، م. کبیری کوچکسرای، ن. امجدی، "بررسی اثرات کاهش ولتاژ صرفه جویانه در سطح شبکه انتقال"، سی و یکمین کنفرانس بین المللی برق، آبان، ۱۳۹۵.

[16] Z. Wang; J. Wang, "Review on Implementation and Assessment of Conservation Voltage Reduction", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, pp. 1306-1315, 2014.

[17] Z. Wang; J. Wang, "Time-Varying Stochastic Assessment of Conservation Voltage Reduction Based on Load Modeling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, pp. 2321-2328, 2014.

[18] F. Lamberti; C. Dong; V. Calderaro; L.F. Ochoa, "Estimating the load response to voltage changes at UK primary substations", IEEE PES ISGT Europe, pp. 1-5, 2013.

[19] A. Vukojevic; P. Frey; M. Smith; J. Picarelli, "Integrated volt/var control using single-phase capacitor bank switching", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), pp. 1-7, 2013.

[20] W. Sun; Q. Zhou; E. Leebens; K. Nelson; C. Sandness; Damber, "Voltage regulation for energy conservation: a utility case study", Clemson University Power Systems Conference (PSC), pp. 1-5, 2015.

[21] B. McFetridge, "Zones of voltage regulation the missing zone", IEEE PES General Meeting, pp. 1-7, 2014.

[22] S.-Il Go; S.-Ju Ahn; J.-Ho Choi; W.-Wook Jung; Chul-Min Chu, "Development and test of conservation voltage reduction application for Korean Smart Distribution Management System", IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-5, 2015.

[23] Md Sh. Hossain; B. H. Chowdhury, "Exponential factor dependent ZIP coefficients extraction and impacts of CVR in a utility feeder", North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-6, 2015.

[24] B. P. Bhattarai; B. Bak-Jensen; P. Mahat; J. R. Pillai, "Voltage controlled dynamic demand response", IEEE PES ISGT Europe 2013.

هزینه سرمایه‌گذاری برای واحدهای جدید و یا حتی کاهش هزینه راه‌اندازی نیروگاه‌های فرسوده کم راندمان است. با این روش می‌توان پیک تقاضا را در کوتاه مدت کاهش داد و نیز باعث کاهش تولید گاز CO2 و کاهش تلفات گردید.

در این مقاله روش‌های ارزیابی فیدرهای حساس به ولتاژ از جمله روش‌های مقایسه، رگرسیون، ترکیبی و شبیه‌سازی به همراه مزایا و معایب آن مورد بررسی قرار گرفت.

جدول (۴): محاسبه ضرایب CVR برای فصل‌های مختلف [۱۶]

کشور / منطقه	نوع	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
AEP	R	۰.۷۹	۰.۷۹	۰.۴۵	۰.۸۷
	C	۰.۹۱	۱.۰۱	۰.۶۴	۰.۸۲
	I	۰.۸۹	۰.۸۳	۰.۳۳	۰.۵۳
NEEA	M	۰.۵۷	۰.۷۸	۰.۲۶	۰.۵۱
HQ	R	N/A	۰.۶۷	N/A	۰.۱۲
	C	N/A	۰.۹۷	N/A	۰.۸۰
	I	N/A	۰.۱۰	N/A	۰.۱۰
BC Hydro	M	۰.۶۰	۰.۷۷	N/A	N/A

R نشان‌دهنده بار مسکونی، C نشان‌دهنده بار تجاری، I نشان‌دهنده بار صنعتی و M نشان‌دهنده ترکیبات بار است.

همچنین روش‌های اجرا CVR برای تعرفه‌های مختلف مشترکین و نحوه‌ی محاسبه‌ی ضرایب CVR مورد ارزیابی قرار گرفت. بدیهی است استفاده از روش LTC کم هزینه‌ترین و ساده‌ترین روش برای اعمال CVR است که می‌تواند در شرایط کمبود تأمین پیک تابستان مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] A. Dorrody, "Evaluation of Conservation Voltage Reduction as a Tool for Demand Side Management", Master Of Science in Electrical Engineering, University Of Nevada, Las Vegas, p. 2075, 2014.

[2] R. Preiss and V. Warnock, "Impact of Voltage Reduction on Energy and Demand", IEEE Transactions on Power Application Systems, pp. 1665-1671, 1978

[3] B. R. Williams, "Distribution_Capacitor_Automation Provides_Integrated_Control_of_Customer_Voltage_Levels_and_Distribution_Reactive_Power_Flow", IEEE International Conference on Power Industry Computer Application, pp. 215-220, 1995.

[4] D. M. Lauria, "Conservation_Voltage_Reduction_(CVR)_at_Northeast_Utillities", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2, No. 4, pp. 1186-1191, 1987

[5] A. Dwyer et al, "Load_to_Voltage_Dependency_Tests_at_B.C. Hydro", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 709-715, 1995.

[6] T. A. Short; R. W. Mee, "Voltage_Reduction_Field_Trials_on_Distributions_Circuits", IEEE Conference and Exposition on Transmission and Distribution, pp. 1-6, 2012.