

تأمین پاسخ تقاضا از طریق پیاده‌سازی کنترل مستقیم بارهای تهویه مطبوع خانگی توسط خرده‌فروشان توان

میلاذ ضیایی^۱، احد کاظمی^۲، محمود فتوحی فیروزآباد^۳، مسعود پروانیا^۴

۱ و ۲- قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت-دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران

kazemi@iust.ac.ir, milad_ziai_ziai@yahoo.com,

۳ و ۴- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

fotuhi@sharif.ir, parvania@ee.sharif.edu

چکیده: کنترل مستقیم بار^۱، جنبه‌ای از پاسخ تقاضا^۲ به منزله‌ی ارائه‌ی الگویی برای قطع و وصل یا تغییر در مقادیر تنظیمی ادوات خاصی از مصرف‌کنندگان از سوی بهره‌برداران سیستم قدرت است آن‌چنان که هدف یا اهداف خاصی بهینه شوند. در این مقاله کنترل مستقیم بارهای تهویه مطبوع مصرف‌کنندگان خانگی به خرده‌فروشان^۳ واگذار شده‌است که به عنوان شرکتی ثالث^۴، بین شرکت توزیع^۵ و مصرف‌کنندگان فعالیت کرده و با خرید برق از شرکت توزیع و فروش آن به مصرف‌کنندگان کسب سود می‌نمایند. ضمن آن‌که به آن‌ها این امکان اعطا شده‌است که برای افزایش سود خود بار مصرف‌کنندگان را کنترل نمایند. با فرض وجود زیر ساخت شبکه‌ی هوشمند^۶، این امکان فراهم شده‌است که مصرف‌کنندگان به صورت روزانه سطح مشارکت و مبالغ تشویقی^۷ دلخواه خود را به خرده‌فروشان از طریق واسطی^۸ که در خانه‌ی آن‌ها نصب شده‌است، اعلام نمایند. از آن جایی که مسئولیت تأمین تشویقی مصرف‌کنندگان بر عهده‌ی خرده‌فروشان است، تعیین تعداد بهینه‌ی مصرف‌کنندگان پذیرفته شده و مقطوع به یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته به اعداد صحیح^۹ واگذار شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که روش مزبور توانسته است ضمن حداکثرسازی سود خرده‌فروشان، پیک منحنی بار مجتمع^{۱۰} آن‌ها را جابه‌جا نموده در حالی که تأمین آسایش آن‌ها را با رعایت قیودی تضمین نماید.

واژه‌های کلیدی: کنترل مستقیم بار، پاسخ تقاضا، شبکه‌های هوشمند، خرده‌فروش.

Demand Response Provision via Domestic Air Conditioner Direct Load Control by the Retailers

M. Ziaii, A. Kazemi, M. Fotuhi Firuzabad, M. Parvania

ABSTRACT: Direct load control (DLC), which is an aspect of demand response, is an on-off pattern or a change in set points involved with special devices of customers offered by the system operators in a manner to optimize a number of objectives. In this paper, DLC is in hands of retailers acting as third party firms between the Disco and the customers attaining profit by purchasing power from the Disco and selling it to the customers. The retailers are also able to increase their profit controlling the customers' load. Assuming the smart grid infrastructure it is possible for the customers to announce their contribution levels and incentive bids daily to the retailers by means of interfaces installed in each customer home. Considering the fact that the retailers are responsible to give incentives to the customers, optimizing the number of customers accepted and curtailed in each contribution level and bid is done by a mixed integer linear programming (MILP). The results show that the method is able to maximize the retailer's profit and fairly transfer the aggregated load level peak while warranting customers' conveniences considering some constraints.

Key words: Direct load control (DLC), Demand response (DR), Smart grids, Retailer.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۰/۱۱/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۱/۸/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۲/۷

نام نویسنده‌ی مسئول: میلاذ ضیایی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تهران- نارمک- دانشگاه علم و صنعت ایران- دانشکده‌ی برق.

۱-۳- متغیرها

تعداد مصرف کنندگانی که در هیچ یک از استراتژی‌های کنترلی ثبت نام نکرده‌اند و عنصر تهویه مطبوع آن‌ها از نوع k است.

$$X_0(k)$$

تعداد مصرف کنندگانی که در استراتژی کنترلی s ثبت نام کرده‌اند و عنصر تهویه مطبوع آن‌ها از نوع k است.

$$X(k,s)$$

تعداد مصرف کنندگانی که عنصر تهویه مطبوع آن‌ها از نوع k است و در استراتژی کنترلی s ، کلاس مشارکت cl و مبلغ تشویقی پیشنهادی b پذیرفته شده‌اند.

$$Y(cl,b,k,s)$$

تعداد مصرف کنندگانی که عنصر تهویه مطبوع آن‌ها از نوع k است، در کلاس مشارکت cl و مبلغ تشویقی b پذیرفته شده‌اند و بار تهویه مطبوع آن‌ها در بازه‌ی زمانی z از سوی خرده-فروش مورد قطع قرار خواهد گرفت.

$$W(cl,b,k,z)$$

تعداد کل مصرف کنندگانی که عنصر تهویه مطبوع آن‌ها از نوع k است و در کلاس مشارکت cl و مبلغ تشویقی b مورد پذیرش واقع شده‌اند.

$$U(cl,b,k)$$

کل درآمد خرده‌فروش که از فروش برق به مصرف کنندگان به دست می‌آید.

$$TR$$

کل هزینه‌ای که خرده‌فروش باید بابت خرید برق به شرکت توزیع پردازد.

$$TC_1$$

کل هزینه‌ای که خرده‌فروش باید به عنوان تشویقی به مصرف کنندگان پردازد.

$$TC_2$$

هزینه‌ی تکه‌ای خطی خرید برق خرده‌فروش از شرکت توزیع در بازه‌ی زمانی z .

$$PLC(z)$$

قیمت تکه‌ای خطی خرید برق خرده‌فروش از شرکت توزیع در بازه‌ی زمانی z و تکه‌ی توانی $step$.

$$PLP(z,step)$$

قطعه‌ی توانی خریداری شده در بازه‌ی زمانی z و تکه‌ی توانی $step$.

$$xp(z,step)$$

کل توان مجتمع خرده‌فروش در بازه‌ی زمانی z بعد از اجرای عملیات کنترلی بار.

$$TUC(z)$$

کل توان قابل کنترل خرده‌فروش در بازه‌ی زمانی z اگر هیچ‌گونه عملیات کنترلی بار اجرا نشود.

$$TCNC(z)$$

کل توان مجتمع خرده‌فروش که در بازه‌ی زمانی z توسط عملیات کنترلی بار حذف می‌شود.

$$TW_1(z)$$

کل توان مجتمع خرده‌فروش در بازه‌ی زمانی z که اثر بازگشت بار بازه‌ی قبلی است.

$$TW_2(z)$$

کل توان قابل پیش‌بینی خرده‌فروش در بازه‌ی زمانی z .

$$TF(z)$$

۱- علائم و اختصارات:

۱-۱- اندیس‌ها

k	اندیس الگوهای متفاوت مصرف بار قبل از اعمال هر گونه عملیات کنترلی.
s	اندیس استراتژی‌های مختلف کنترلی بار.
cl	اندیس کلاس‌های مشارکت مختلف.
b	اندیس مبالغ تشویقی مختلف.
z	اندیس بازه‌های زمانی.
$step$	اندیس قطعات توان.
j	اندیس ضرایب بازگشت بار ^{۱۱} .
n	اندیس دوره‌های نمونه‌گیری در معادله‌ی تفاضلی.

۱-۲- ثوابت

z_i (z_f)	اولین (آخرین) بازه‌ی که اعمال کنترل بار روی آن مجاز است.
Δz	امتداد هر بازه‌ی زمانی که در آن وضعیت یک دستگاه روشن یا خاموش در نظر گرفته خواهد شد. (این زمان در این مقاله ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شده است).
T^{uc}	حداکثر زمانی که یک دستگاه تهویه مطبوع می‌تواند خاموش بماند.
T^{oc}	حداقل زمانی که بعد از رفع سیگنال قطع اجباری دستگاه تهویه مطبوع باید روشن باقی بماند.
r_i ($i=1,2,3$)	نقاط شکست قیمت توان.
PL_1	ثابت محدودکننده‌ی نسبی سطح بار.
PL_2	ثابت محدودکننده‌ی مطلق سطح بار.
h	امتداد هر دوره‌ی نمونه‌گیری در حل معادله‌ی تفاضلی.
a	ثابتی که در گسسته‌سازی معادله‌ی دیفرانسیل ظاهر می‌شود.
θ_s	دمای تنظیمی هر دستگاه تهویه مطبوع.
Δ	باند مرده‌ی هر دستگاه تهویه مطبوع.
P	توان نامی هر دستگاه تهویه مطبوع.
$R(^{\circ}C/kW)$	مقاومت حرارتی هر خانه.
$C(kWh/^{\circ}C)$	ظرفیت حرارتی هر خانه.
$C(z)$	پیش‌بینی قیمت خرید برق از شرکت توزیع در بازه‌ی زمانی z .
μ_{step}	ضریبی که برای محاسبه‌ی $PLP(z,step)$ از روی $C(z)$ در نظر گرفته شده است.
N	تعداد کل مصرف کنندگان تحت اختیار خرده‌فروش.
R	قیمت فروش برق از خرده‌فروش به مصرف کنندگان.

پیک‌های جانبی در مصرف مجموعه‌ای از ادوات مورد کنترل شود که از آن به " بازگشت بار " تعبیر می‌شود.

طرح نظریه‌ی شبکه‌های هوشمند اهمیت دو چندانی به برنامه‌های پاسخ تقاضا من جمله کنترل مستقیم بار داده‌است. برنامه‌های پاسخ تقاضا می‌توانند به دو دسته‌ی عمده تقسیم شوند [1]: در برنامه‌های پاسخ تقاضای مبتنی بر زمان، قیمتی که با آن برق به مصرف‌کنندگان فروخته می‌شود، همگام با تغییرات قیمت بازار تغییر می‌کند. این در حالی است که در برنامه‌های پاسخ تقاضای مبتنی بر تشویقی مصرف-کنندگانی که مصرفشان را در دوره‌های مورد نیاز یا استرس سیستم کاهش می‌دهند، مورد تشویق واقع خواهند شد. کنترل مستقیم بار با در نظر گرفتن این تقسیم‌بندی در رده‌ی برنامه‌های پاسخ تقاضای مبتنی بر تشویقی قرار می‌گیرد. در شبکه‌های هوشمند از یکسو گستردگی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر با توجه به ماهیت تصادفی این منابع، لزوم وجود پاسخ از سمت تقاضا را پررنگ می‌کند. از سوی دیگر امکانات سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و ارتباطی موجود در شبکه‌های هوشمند، انعطاف و گستردگی این برنامه‌ها را امکان‌پذیر خواهد کرد.

کنترل مستقیم بار برای نخستین بار در سال ۱۹۸۳ ارائه شد. [2] در این مقاله در ابتدا مدلی برای مصرف مجموعه‌ای از آبگرمکن‌ها در حضور استراتژی‌های کنترلی ارائه شده‌است. در ادامه تعدادی الگوی روشن و خاموش به عنوان استراتژی‌های کنترلی معرفی شده و تعیین تعدادی از عناصر که باید با هر یک از استراتژی‌های کنترلی مورد کنترل واقع شوند به برنامه‌ریزی خطی واگذار شده‌است. برخی روش‌های دیگر مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی در مقالات دیگر [3,4] موجوداند. در [5,6] تعیین بخشی از بار که باید با عملیات کنترلی مورد حذف واقع شود به همراه برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها دیده شده است. روش به کار رفته در این مقالات برنامه‌ریزی دینامیکی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌هاست. در [7] قیود حداکثر زمان خاموشی یک گروه بار و حداقل زمان روشن بودن آن بعد از حذف فرمان قطع برای تأمین آسایش مصرف‌کنندگان لحاظ شده‌اند. روش‌های فازی برای پیاده‌سازی آسایش مصرف‌کنندگان در [8,9] و مدیریت بارهای قابل قطع در کنار کنترل مستقیم بار در [10] دیده شده‌اند. در [11,12] برای توزیع یک پروفیل بار مقطوع در میان مجموعه‌ای از مصرف‌کنندگان، آن‌چنان که آسایش هر مجموعه از مصرف‌کنندگان تضمین شده و توزیع حتی‌الامکان یکنواختی فراهم آید، از روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شده‌است.

در شبکه‌های الکتریکی هوشمند به دلیل استفاده‌ی گسترده از منابع انرژی توزیع شده و بارهای قابل کنترل، مراکز خدمات عمومی^{۱۳} برای پیاده‌سازی برنامه‌های پاسخ تقاضا به طور مستقیم با تک‌تک مصرف‌کنندگان روبرو نخواهند شد. بلکه به منظور افزایش رؤیت‌پذیری و قابلیت مدیریت این بارها به صورت مجتمع در نظر گرفته خواهند شد. [13] بدین معنا که برای اموری چون فراهم کردن واسط، دریافت

$ACC(k, z)$ بار نرمالیزه شده‌ی تهویه مطبوع نظیر یک مصرف‌کننده از نوع k در بازه‌ی زمانی z در صورتی که هیچ عملیات کنترلی به اجرا نرسیده باشد.

$a_f(k, z)$ نسبت بار بازگشت داده شده به بازه‌ی $z+j$ در اثر قطع بار در بازه‌ی z به بار مقطوع در بازه‌ی زمانی z که برای عنصر تهویه مطبوعی با نوع بار k در نظر گرفته شده است.

$FDC(z)$ توان قابل پیش‌بینی نرمالیزه شده به ازای یک مصرف‌کننده در بازه‌ی زمانی z .

$bid(b)$ مبلغ تشویقی اعطا شده به مصرف‌کننده در ازای واحد بار مقطوع با تشویقی مشخص شده با اندیس b .

$\theta(n, h)$ دمای داخلی خانه در دوره‌ی نمونه‌گیری n ام.

$\theta_a(n, h)$ دمای محیطی در دوره‌ی نمونه‌گیری n ام.

$c(n, h)$ فرمان دودویی خرده‌فروش زمانی که بار طبق فرمان باید خاموش شود. (می‌تواند روشن بماند) این متغیر برابر 0 (۱) است.

$w(n, h)$ فرمان دودویی ترموستاتی که بر حسب دمای داخلی خانه و فاصله‌ی این دما با دمای تنظیمی ترموستات، وضعیت روشن و خاموش دستگاه تهویه مطبوع را مشخص می‌کند. این متغیر در زمانی که دستگاه باید خاموش شود (می‌تواند روشن بماند) برابر 0 (۱) است.

$V(n, h)$ عددی تصادفی با میانگین صفر که نویز حرارتی را مدل می‌کند.

۲- مقدمه

آن دسته از ادوات مصرف‌کنندگان که ماهیتاً دارای الگوی مصرف دوره‌ای هستند، گزینه‌های مناسبی برای اعمال برنامه‌های کنترلی بار می‌باشند. عناصر تهویه مطبوع جز این دسته از ادوات بوده که بار آن‌ها درصد چشم‌گیری از مصرف را تشکیل می‌دهد. کنترل مستقیم بار به منزله‌ی اعمال سیگنال‌های کنترلی روشن و خاموش یا سیگنال‌های تنظیمی از سطحی بالاتر از سطح مصرف به این‌گونه بارهاست آن‌چنان که هدف یا اهداف خاصی برای این مجموعه از بارها بهینه شود.

کنترل مستقیم بار با این توصیف با محدودیت‌هایی روبروست. از یکسو این‌گونه بارها در ارتباط مستقیم با مصرف‌کنندگان بوده و هر گونه تغییر در آن می‌تواند آسایش مورد انتظار مصرف‌کنندگان را خدشه‌دار کند. از سوی دیگر با وصل شدن مجموعه‌ای از ادوات که سابقاً مورد کنترل بوده‌اند، ادوات با اتاقتی روبرو خواهند بود که دمای آن نسبت به دمای تنظیمی فاصله‌ی بیشتری دارد. این پدیده می‌تواند باعث رخداد

کنندگان پذیرفته شده و قطع شده در هر یک از سطوح مشارکت و مبالغ تشویقی پیشنهادی از روش برنامه‌ریزی آمیخته به اعداد صحیح استفاده شده‌است.

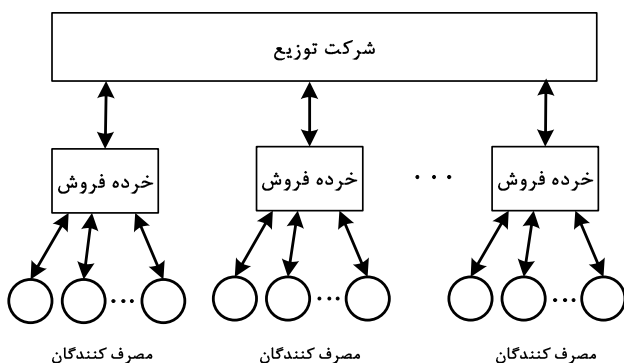
در این مقاله برای مدل‌سازی پدیده ی بازگشت بار از محاسبه ی ضرایب بازگشت بار استفاده شده است. [22] منظور از این مدل‌سازی آن است که تعیین شود با قطع بار در هر بازه، باری که به بازه‌های بعدی اضافه می‌شود چقدر است. روش ارائه شده در این مدل‌سازی علاوه بر سهولت پیاده‌سازی، قابلیت خوبی برای ترکیب با روش‌های بهینه‌سازی گوناگون دارد.

ساختار مقاله‌ی حاضر به شرح زیر است: در بخش سوم مدلی برای پیاده‌سازی کنترل بار ارائه خواهد شد. این بخش شامل بررسی توصیفی این مدل، روابط ریاضی و قیود سمت مصرف‌کنندگان و تابع هدف و قیود مرتبط با خرده‌فروش است. در بخش چهارم روابطی برای مدل‌سازی رفتار دستگاه‌های تهویه مطبوع در حضور عملیات کنترلی بار ارائه شده‌است. در بخش پنجم شبیه‌سازی روش پیشنهادی ارائه شده و نهایتاً بخش ششم را نتیجه‌گیری مقاله تشکیل می‌دهد.

۳- برنامه‌ی کنترلی بار

۳-۱- توصیف مدل

ساختار کلی کنترل بار پیشنهادی در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده‌است. جمع‌کنندگان پاسخ تقاضا در این مقاله همان شرکت-هایی هستند که مسئول تأمین برق مصرف‌کنندگان خانگی را عهده دارند. به این شرکت‌ها خرده‌فروش گفته می‌شود. خرده‌فروشان با خرید برق از شرکت توزیع و فروش آن به مصرف‌کنندگان کسب درآمد می‌کنند. ضمن اینکه به آن‌ها اختیار داده شده‌است که برای افزایش دادن سود خود، تحت ضوابطی که میان آن‌ها و شرکت توزیع و مصرف‌کنندگان موجود است بارهای مصرف‌کنندگان را مورد کنترل قرار دهند.



شکل (۱): ساختار کلی و ارتباط بین اجزا در پیاده‌سازی برنامه‌ی کنترل مستقیم بار

اطلاعات، توصیف دسترس‌پذیری و تمایل بارها برای شرکت در برنامه-های پاسخ تقاضا و نیز پیاده‌سازی دستورات کنترلی، شرکت‌های ثالثی تحت عنوان جمع‌کننده^{۱۳} یا تأمین‌کننده ی پاسخ تقاضا^{۱۴} میان مراکز خدمات عمومی و مصرف‌کنندگان فعالیت خواهند نمود. [14] در [13]، مجموعه‌ای از مصرف‌کنندگان خانگی، سوپرمارکت و اداری تحت نظارت یک جمع‌کننده فرض شده‌اند. برای حداقل‌سازی بار مجتمع این مجموعه از بارها در یک بازه‌ی مورد کنترل از برنامه‌ریزی خطی استفاده شده‌است.

در [15] شم کنترل بار با واسطه‌ی شرکت‌های ثالث برای پیاده‌سازی در محیطی با وجود تولیدکننده‌های بادی به کار رفته‌است. در این مقاله تعیین حالت بهینه ی بهره‌برداری واحدها، ذخیره‌ی چرخان و انرژی هر واحد تولیدی و توان کاهش یافته توسط هر یک از عناصر شرکت‌کننده در برنامه‌ی پاسخ تقاضا به برنامه‌ریزی خطی آمیخته به اعداد صحیح واگذار شده‌است. در [16] برای توزیع یک پروفیل بار از پیش تعیین شده بین مجموعه‌ای از چیلرها از مدلی مبتنی بر ارتباط دوطرفه میان مرکز کنترل و مجموعه‌های مصرف‌کنندگان استفاده شده‌است. برنامه‌ریزی به کار رفته در این مقاله به گونه‌ایست که امکان لحاظ آسایش مورد نیاز مصرف‌کنندگان را فراهم خواهد کرد.

در [17,18] چنین فرض شده‌است که نقطه‌ی تنظیم دمایی برای عناصر تهویه مطبوع می‌تواند در پاسخ به تغییرات سیگنال قیمت تغییر نماید. بنا به این فرض روشی مبتنی بر تئوری صف به کار رفته‌است که می‌تواند اثر تغییرات قیمت را بر روی توان مجتمع تقاضای ادوات لحاظ نماید.

در [19-21] برنامه‌دهی بهینه برای مجموعه‌ای از ادوات خانگی برای هر خانه‌ی هوشمند اجرا شده‌است. در [19,20] حداکثرسازی سود مصرف بار برای هر صاحبخانه در نظر گرفته شده‌است. این در حالی است که آن چه در [21] مورد حداقل‌سازی قرار می‌گیرد حداقل سازی هزینه‌ی مصرف برق به همراه هزینه‌ی انتظار متناظر با ادوات خانگی است.

در مقاله‌ی حاضر پیاده‌سازی عملیات کنترلی برای مجموعه‌ای از عناصر تهویه مطبوع متعلق به مصرف‌کنندگان خانگی به شرکت‌های ثالثی که همان خرده‌فروشان هستند واگذار شده‌است. این خرده‌فروشان، توان را از شرکت‌های توزیع خریداری کرده و به مصرف‌کنندگان می‌فروشند. خرده‌فروشان می‌توانند برای افزایش دادن سود خود مبادرت به کنترل بار مصرف‌کنندگان نمایند. مسئولیت تأمین تشویقی مصرف‌کنندگان نیز به عهده‌ی خرده‌فروشان نهاده شده‌است.

در این مقاله با توجه به فرض زیر ساخت شبکه‌های هوشمند، چنین در نظر گرفته شده‌است که هر یک از مصرف‌کنندگان می‌توانند سطح مشارکت دلخواه خود برای شرکت در برنامه‌های کنترلی و مبالغ تشویقی پیشنهادی را به خرده‌فروش اعلام نمایند. در این عبارت منظور از سطوح مشارکت گوناگون، سطوح مختلفی از شدت و ضعف عملیات کنترلی پیاده شده‌است. برای تعیین تعداد بهینه‌ی مصرف-

برنامه‌ریزی بهینه‌سازی است که خرده‌فروش آن را برای روز بعد به اجرا می‌رساند.

پیش‌بینی قیمت روز آتی از شرکت توزیع به خرده‌فروش ارسال می‌شود. خرده‌فروش با در اختیار داشتن مجموعه داده‌هایی که از پیش‌بینی قیمت روز بعد، پیش‌بینی بار مجتمع روز بعد و ثبت‌نام مصرف‌کنندگان در برنامه‌های کنترلی بار به دست آمده‌است، یک برنامه‌ی بهینه‌سازی را چنان اجرا می‌کند که موارد زیر را تعیین نماید:

۱- پیشنهاد کنترل بار چه تعداد مصرف‌کننده با هر توان تهویه مطبوع، تحت کلاس‌های مختلف مشارکت و مبالغ تشویقی را پذیرش نماید در عوض متعهد گردد که مبالغ تشویقی را به آن‌ها اعطا کرده و کنترل بار آن‌ها را تحت کلاس‌های مشارکت حذف بار مزبور انجام داده تا آسایششان مورد خدشه وارد نشود.

۲- از میان مصرف‌کنندگانی که پیشنهاد کنترل بار آن‌ها پذیرفته شده‌است، در هر بازه‌ی زمانی چه تعداد بار تهویه مطبوع باید قطع شود.

برای انعطاف بیشتر مشارکت مصرف‌کنندگان می‌توان این امکان را فراهم کرد که ثبت‌نام آن‌ها در استراتژی‌های کنترلی و نه کلاس‌های مشارکت و مبالغ تشویقی به صورت جداگانه صورت گیرد. هر استراتژی کنترلی می‌تواند شامل یک، دو یا چند ترکیب کلاس مشارکت و مبالغ تشویقی مختلف باشد به این معنا که مصرف‌کننده خواهد پذیرفت کنترل بار او در هر یک از بسته‌های کلاس‌های مشارکت و مبالغ تشویقی پیشنهادی موجود در آن استراتژی صورت بگیرد.

۲-۳- قیود مرتبط با سمت مصرف و ثبت‌نام مصرف-کنندگان

بر اساس مطالب عنوان شده در فصل ۳-۱ یکی از لوازم بهینه‌سازی پایگاه داده‌ی اخذ شده از ثبت‌نام مصرف‌کنندگان است. نمونه‌ای از استراتژی‌های کنترلی در جدول ۱ نشان داده شده‌است. در این جدول کلاس مشارکت بار شاخصی برای نمایش شدت یا ضعف عملیات کنترلی اجرا شده‌است. در جدول ۲ توصیفی از هر کلاس مشارکت بر اساس حداکثر زمان قطع T^{uc} و حداقل زمان وصل T^{oc} ارائه شده‌است. به عنوان مثال در کلاس مشارکت ۳، حداکثر زمان قطع عنصر تهویه مطبوع مورد کنترل برابر ۳۰ دقیقه است. این در حالی است که بعد از رفع قطع اجباری دستگاه مورد نظر باید به مدت حداقل ۱۵ دقیقه روشن باقی بماند. براساس جدول ۲ هر چه کلاس کنترلی بالاتر باشد عملیات کنترلی شدیدتر خواهد بود.

قیمت برق فروخته شده به خرده‌فروش به بازه‌ی زمانی خرید و مقدار توان خریداری شده بستگی دارد. این در حالی است که قیمت فروش برق به مصرف‌کنندگان ثابت فرض شده‌است. علاوه بر آن تأمین مبالغ تشویقی مصرف‌کنندگان که در ازای واحد بار قطع شده به آن‌ها پرداخت می‌شود، بر عهده‌ی خرده‌فروش است.

کنترل بار پیشنهادی در این مقاله به صورت روز بعد پی‌گیری خواهد شد. با توجه به زیرساخت‌های سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و ارتباطی موجود در شبکه‌ی هوشمند، این امکان فراهم خواهد بود که مصرف‌کنندگان به صورت روزانه تمایل یا عدم تمایل خود برای شرکت در برنامه‌های کنترلی بار، مبلغ تشویقی پیشنهادی در ازای قطع بار و نیز کلاس‌های مشارکت خود را به خرده‌فروشان اعلام نمایند. در این عبارت منظور از مبلغ تشویقی پیشنهادی، مبلغی است که در صورت قطع بار مصرف‌کننده در ازای هر واحد توان قطع شده از خرده‌فروشان به مصرف‌کننده پرداخت خواهد شد. کلاس‌های مشارکت، نشان‌دهنده‌ی میزان شدت یا ضعف عملیات کنترلی بار هستند. این شدت و ضعف توسط زمان‌های حداکثر قطع و حداقل وصل (ر.ک. بخش ۳-۲) پیاده خواهد شد. هر چه کلاس بالاتر باشد، شدت اعمال این برنامه‌ها برای مصرف‌کنندگان بیشتر خواهد بود. برقراری چنین ارتباطی میان مصرف‌کنندگان و خرده‌فروشان از مجرای واسط‌هایی امکان‌پذیر خواهد بود که در خانه‌ی هر یک از مصرف‌کنندگان نصب بوده و با هر یک از وسایل قابل کنترل مصرف‌کنندگان در ارتباطاند.

چنان که شرکت توزیع تشخیص دهد که اعمال کنترل برای روز d مورد نیاز است، می‌بایست تا زمان مشخصی از روز $d-1$ این امر را به اطلاع شرکت‌های ثالث برساند. هم‌چنین شرکت توزیع موظف است گستره‌ی زمانی اعمال کنترل، کلاس‌های مشارکت حذف بار امکان‌پذیر و مبالغ تشویقی ممکن را به شرکت‌های ثالث خرده‌فروش ارسال نماید. خرده‌فروشان نیز به نوبه‌ی خود موظف‌اند این مطالب را از مجرای واسط ارتباطی، به اطلاع مصرف‌کنندگان برسانند. در مقابل مصرف‌کنندگان می‌توانند تا ساعت معینی از روز $d-1$ ، کلاس‌های مشارکت حذف بار و مبلغ تشویقی پیشنهادی خود را برای کنترل بار به خرده‌فروشان اعلام کرده و بدین ترتیب در هر یک از کلاس‌ها و مبالغ تشویقی دلخواه خود ثبت‌نام کنند. در غیر این صورت در روز آتی حذف بار برای آن‌ها به اجرا نخواهد رسید. در ساعت معینی از روز $d-1$ واسط بسته شده و داده‌های ثبت‌نام مصرف‌کنندگان به خرده‌فروشان ارسال می‌شود.

با توجه به اینکه قیمت متغیر با زمان برق در ساعات پیک بیشتر است، چنین به نظر می‌رسد که حداکثرسازی سود خرده‌فروش قادر باشد با کنترل بار مصرف‌کنندگان بخشی از بار را از ساعات پیک به ساعات غیر پیک منتقل کند. این در حالی است که اعمال کنترل بار بیشتر برای خرده‌فروشان به منزله‌ی اعطای مبالغ تشویقی بیشتر به مصرف‌کنندگان است. مصالحه‌ی میان این دو امر بر عهده‌ی یک

$$U(cl, b, k) = \sum_s Y(cl, b, k, s) \quad , \forall cl, b, k \quad (3)$$

تعداد مصرف کنندگان با بار قطع شده در هر بازه نمی تواند بیش از تعداد مصرف کنندگان پذیرفته شده باشد:

$$W(cl, b, k, z) \leq U(cl, b, k) \quad , \forall z \quad (4)$$

علاوه بر آن قطع بار در خارج از بازه ی مجاز برای کنترل بار قابل اعمال نمی باشد

$$W(cl, b, k, z) = 0 \quad , \forall cl, b, k \quad , z \notin [z_i, z_f] \quad (5)$$

در این مقاله طول بازه های کنترلی (Δz) برابر ۱۵ دقیقه در نظر گرفته می شود. در طول این بازه وضعیت سیستم تهویه مطبوع ثابت (روشن یا خاموش) در نظر گرفته می شود.

برای آن که قطع بار اجرا شده چنان نباشد که به نقض قیود بیان شده در جدول ۲ بینجامد، ملاحظاتی در مقادیر متغیر W به ازای هر یک از کلاس های مشارکت الزامی است. در ضمیمه ۲ این مطلب نشان داده شده است.

برای کلاس مشارکت ۱:

$$W(1, b, k, z) + W(1, b, k, z-1) + W(1, b, k, z-2) \leq U(1, b, k) \quad , \forall b, k, z \quad (6)$$

برای کلاس مشارکت ۲:

$$W(2, b, k, z) + W(2, b, k, z-1) + W(2, b, k, z-2) + W(2, b, k, z-3) \leq 2U(2, b, k) \quad , \forall b, k, z \quad (7)$$

$$W(2, b, k, z) + W(2, b, k, z-2) \leq U(2, b, k) \quad , \forall b, k, z \quad (8)$$

برای کلاس مشارکت ۳:

$$W(3, b, k, z) + W(3, b, k, z-1) + W(3, b, k, z-2) \leq 2U(3, b, k) \quad , \forall b, k, z \quad (9)$$

متغیرهای $Y(cl, b, k, s)$ ، $W(cl, b, k, z)$ و $U(cl, b, k)$ به اعداد صحیح محدود شده اند.

۳-۳- قیود و تابع هدف متناظر با خرده فروش

نظر به مطالب عنوان شده در بخش ۳-۱، تابع هدف خرده فروش می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\max (TR - TC_1 - TC_2) \quad (10)$$

TC_1 هزینه ی خرید برق از شرکت توزیع هم از تابعی از زمان و هم تابع مقدار توان خریداری شده است. برای مدلسازی تبعیت این نرخ از مقدار توان خریداری شده از مدل تکه ای خطی بیان شده در مقاله ی [23] استفاده شده است.

جدول (۱): شرح استراتژی های کنترلی پیشنهادی

مبالغ تشویقی پیشنهادی	کلاس مشارکت	
b_1	۱	استراتژی ۱
b_1	۲	استراتژی ۲
b_2	۳	استراتژی ۳
b_1	۱	استراتژی ۴
b_2	۲	
b_2	۱	استراتژی ۵
b_3	۲	
b_2	۲	استراتژی ۶
b_3	۳	
b_1	۱	استراتژی ۷
b_2	۲	
b_3	۳	

در جدول ۱، b_i ($i=1,2,3$) مبالغ تشویقی پرداخت شده به هر مصرف کننده ی پذیرفته شده به ازای واحد توان قطع شده است. استراتژی های کنترلی متفاوت در بردارنده ی مبالغ تشویقی مختلف به ازای کنترل بار در هر یک از کلاس های مشارکت هستند. به عنوان مثال مصرف کنندگان ثبت نام کرده در استراتژی ۶ انتظار خواهند داشت که در صورت پذیرش در کلاس ۲ (کلاس ۳) رقم تشویقی b_2 (b_3) در ازای واحد توان مقطوع به آن ها پرداخت شود.

تعداد کل مصرف کنندگان پذیرفته شده در هر استراتژی نمی تواند از کل مصرف کنندگان ثبت نام کرده در آن استراتژی بیشتر باشد. به عبارت دیگر:

جدول (۲): توصیف کلاس های کنترلی

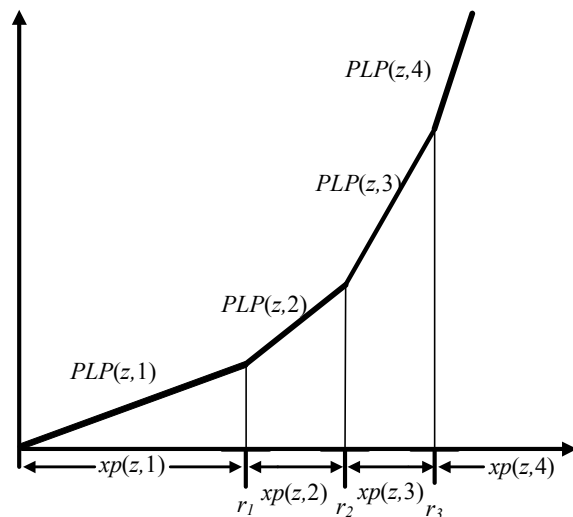
کلاس	$T^{uc}(min)$	$T^{oc}(min)$
۱	۱۵	۳۰
۲	۳۰	۳۰
۳	۳۰	۱۵

$$\sum_{cl} \sum_b Y(cl, b, k, s) \leq X(k, s) \quad , \forall k, s \quad (1)$$

به عنوان مثال بر اساس مطالب مذکور در جدول ۱، اگر ۱۰۰ مصرف کننده در استراتژی ۶ ثبت نام کرده باشند ممکن ۶۰ مصرف کننده در کلاس ۲ و مبلغ تشویقی b_2 و ۲۰ مصرف کننده در کلاس ۳ و مبلغ تشویقی ۳ پذیرفته شده باشند (و ۳۰ مصرف کننده هم اصولاً از پذیرش باز بمانند). علاوه بر این:

$$Y(cl, b, k, s) = 0 \quad \forall k, s \quad (2)$$

(به ازای cl و b هایی که در s مزبور وجود ندارند.)
 $U(cl, b, k)$: به صورت زیر قابل تعریف است:



شکل (۲): ارتباط هزینه ی تکه ای خطی خرید برق با قیمت های تکه ای خطی و قطعات توان

در رابطه ی (۱۳)، $TUC(z)$ می تواند با استفاده از رابطه ی زیر تعریف شود:

$$TUC(z) = TCNC(z) - TW_1(z) + TW_2(z) + TF(z) \quad (15)$$

در این مقاله بارهای عناصر تهویه مطبوع کنترل پذیر نامیده می شود چرا که کنترل بار به آن ها محدود شده است. بار مصرفی سایر ادوات مورد کنترل واقع نشده و از این رو قابل پیش بینی نامیده می شود. سه جمله ی اول طرف دوم رابطه ی (۱۵) بیان کننده ی بخش قابل کنترل بار مجتمع می باشند. بخشی از این بار قابل کنترل توسط عملیات کنترلی بار حذف شده ($TW_1(z)$) و بخشی دیگر توسط عملیات کنترلی بار در بازه های قبلی به بازه ی زمانی z بازگشت داده شده و اضافه می شود. ($TW_2(z)$). بخشی از بار هم غیر قابل کنترل بوده و عملیات کنترلی بار روی آن تاثیری ندارد.

$TCNC(z)$ در رابطه ی (۱۵) می تواند توسط رابطه ی زیر مورد محاسبه قرار گیرد:

$$TCNC(z) = \sum_k \sum_s X(k, s).ACC(k, z) + \sum_k X_0(k).ACC(k, z) \quad (16)$$

رابطه ی (۱۶) بار قابل کنترل مصرف کنندگان ثبت نام کرده و ثبت نام نکرده را در نظر می گیرد. $TW_1(z)$ و $TW_2(z)$ می توانند به شرح زیر بیان شوند:

$$TW_1(z) = \sum_{cl} \sum_b \sum_k W(cl, b, k, z).ACC(k, z) \quad (17)$$

$$TW_2(z) = \sum_{cl} \sum_b \sum_k W(cl, b, k, z-1).a_1(k, z).ACC(k, z-1) + \sum_{cl} \sum_b \sum_k W(cl, b, k, z-2).a_2(k, z).ACC(k, z-2) + \sum_{cl} \sum_b \sum_k W(cl, b, k, z-3).a_3(k, z).ACC(k, z-3) \quad (18)$$

$$TC_1 = \sum_{z=1}^{96} PLC(z) \quad (11)$$

در رابطه ی (۱۱) بازه ها از ۱ تا $4 \times 24 = 96$ شماره گذاری شده اند تا تمامی بازه های ۱۵ دقیقه ای را شامل شوند. هزینه ی کل خرید برق از مجموع کل این هزینه ها در بازه های ۱۵ دقیقه ای شبانه روز به دست می آید. $PLC(z)$ خود از رابطه ی زیر قابل محاسبه است:

$$PLC(z) = \sum_{step=1}^4 PLP(z, step).xp(z, step).\Delta z \quad (12)$$

در رابطه ی (۱۲)، متغیرهای قطعه ی توانی $xp(z, step)$ تشکیل دهنده - ی کل بار متناظر خرده فروش در هر بازه ی زمانی هستند:

$$\sum_{step=1}^4 xp(z, step) = TUC(z) \quad (13)$$

برای درک بهتر روابط (۱۲) و (۱۳) به شکل ۲ رجوع شود. در محور افقی این نمودار توان خریداری شده در یک بازه ی z نشان داده شده است. هر یک از خطوط تشکیل دهنده ی نمودار شبیهی برابر $PLP(z, step)$ دارند. توان خریداری شده در هر بازه ی زمانی، قطعات توان را پوشانده و نهایتاً سطح زیر نمودار (ضربدر Δz) بیان گر $PLC(z)$ است. در صورتی که از خاصیت غیر خطی نرخ صرفه نظر می شد این منحنی به جای خطوط شکسته به صورت یک خط نشان داده می شد. قیود زیر برای متغیرهای $xp(z, step)$ معتبراند:

$$\begin{aligned} 0 &\leq xp(z, 1) \leq r_1 \\ 0 &\leq xp(z, 2) \leq r_2 - r_1 \\ 0 &\leq xp(z, 3) \leq r_3 - r_2 \\ 0 &\leq xp(z, 4) \end{aligned} \quad (14)$$

با توجه به اینکه در هر بازه ی زمانی z ، $PLN(z, step+1) > PLN(z, step)$ و نظر به جهت بهینه سازی مذکور در رابطه ی (۱۲)، متغیرهای $xp(z, step)$ از پایین به بالا پر خواهند شد. یعنی متغیر $xp(z, step+1)$ مقداری غیر صفر پیدا می کند که $xp(z, step)$ به حد بالای خود رسیده باشد.

در رابطه‌ی (۲۴)، متغیرهای دودویی $c(n,h)$ و $w(n,h)$ به ترتیب مشخص‌کننده‌ی فرمان خرده‌فروش و ترموستات برای کنترل دستگاه تهویه مطبوع هستند. دو متغیر اخیر در یکدیگر ضرب شده‌اند تا بیان کنند که وضعیت یک عنصر تهویه مطبوع «و منطقی» شده‌ی این دو فرمان است. متغیر a با $a = e^{-\%CR}$ یا $a = 1 - h/CR$ قابل بیان است. وضعیت ترموستات زمانی که دمای داخلی به حد بالا (پایین) خود می‌رسد از خاموش به روشن (روشن به خاموش) تغییر خواهد کرد. مطلب مذکور بر اساس رابطه‌ی زیر قابل بیان است:

$$w[(n+1).h] = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta(n,h) > \theta_s + \frac{\Delta}{2} \\ 0 & \text{if } \theta(n,h) < \theta_s - \frac{\Delta}{2} \\ w(nh) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

با فرض یک پروفیل دمایی خارجی و روابط (۲۴) و (۲۵)، الگوی روشن و خاموش یک عنصر تهویه مطبوع قابل اخذ خواهد بود. بنا به این مدل توان مصرفی یک عنصر تهویه مطبوع در هر بازه‌ی زمانی یکی از دو مقدار صفر و توان نامی خود را اختیار خواهد کرد. در صورتی که این محاسبات برای مجموعه‌ای از عناصر تهویه مطبوع به طور موازی اجرا شود و معادلاً مجموعه‌ای از معادلات تفاضلی با هم مورد حل واقع شوند، منحنی مصرف عناصر تهویه مطبوع برای این اجتماع از مصرف‌کنندگان قابل استحصال خواهد بود. منحنی به دست آمده دارای افت و خیزهایی متناسب با پروفیل دمای محیطی است. [22]

معادله‌ی تفاضلی (۲۴) می‌تواند برای برای مدلسازی پدیده‌ی بازگشت بار نیز به کار رود. برای این منظور $c(n,h)$ متناظر با مجموعه‌ای از بازه‌های گسسته‌سازی شده در معادله‌ی تفاضلی (۲۴) برابر صفر اختیار شده و تاثیر آن را در افزایش توان مصرفی مجتمع در بازه‌های بعدی مشاهده خواهد شد. در [22] با استفاده از همین روش خاصیت‌های همگنی و جمع‌پذیری اثر بازگشت‌بار مورد چالش قرار گرفته‌اند. نتایج حاکی از آن است که این خواص با دقت قابل توجهی برقرار بوده و می‌توان بازگشت‌بار را خطی تلقی کرد. بنابراین می‌توان با اعمال قطع بار به هر بازه‌ی زمانی، بار افزوده شده در بازه‌های بعدی را تطبیق خطی داد و ضرایب بازگشت بار را محاسبه نمود.

۵- شبیه‌سازی و اخذ نتایج

در این فصل روش کنترل مستقیم بار شرح داده شده پیاده‌سازی خواهد شد. در شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار GAMS با حلال CPLEX استفاده شده‌است. چنین فرض شده‌است که تمامی عناصر تهویه مطبوع تحت اختیار خرده‌فروش یکسان بوده و دارای منحنی بارهای نرمالیزه شده‌ی مشابهی هستند.

در شکل ۳ منحنی بار قابل کنترل و بار قابل پیش‌بینی نرمالیزه شده به ازای هر مصرف‌کننده نمایش داده شده‌است. محاسبه‌ی بار قابل کنترل بر اساس تجمیع توان‌های مصرفی محاسبه شده بر اساس رابطه‌ی (۲۴)، داده‌های مذکور در جدول ۳ و دمای پیش‌بینی شده و

در رابطه‌ی (۱۷) بار حذف شده در هر بازه‌ی زمانی توسط عملیات کنترلی تابعی از تعداد مصرف‌کنندگان مقطوع در نظر گرفته شده است. در رابطه‌ی (۱۸)، باری که در هر بازه بازگشت می‌یابد به بار قطع شده در سه بازه‌ی قبلی ارتباط داده شده‌است. این ارتباط توسط ضرایب بازگشت بار $a_j(k,z), (j=1,2,3)$ صورت گرفته‌است. روش محاسبه‌ی این ضرایب در بخش ۴ بیان شده‌است. بار قابل پیش‌بینی برای تمامی مصرف‌کنندگان مساوی در نظر گرفته شده و بر اساس رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$TF(z) = \sum_{n=1}^N FDC(z) \quad (19)$$

TR و TC_2 در رابطه‌ی (۱۰) با استفاده از روابط زیر قابل بیان می‌باشند:

$$TR(z) = \sum_{z=1}^{96} RTUC(z) \cdot \Delta z \quad (20)$$

$$TC_2(z) = \sum_{cl} \sum_b \sum_k \sum_{z=z_f}^{z_f} bid(b) \cdot W(cl, b, k, z) \cdot ACC(k, z) \cdot \Delta z \quad (21)$$

در رابطه‌ی (۲۱) مبالغ تشویقی اعطا شده به مصرف‌کنندگان به ازای واحد توان مقطوع، برای محاسبه‌ی هزینه‌ای به کار رفته است که خرده‌فروش به عنوان تشویقی باید به مصرف‌کنندگان تحت اختیار خود بپردازد. به تاسی از [13] برای محدود کردن پیک‌های جانبی ایجاد شده در نتیجه‌ی بازگشت بار روابط زیر در نظر گرفته شده‌است.

$$TUC(z) \leq PL_1 \cdot (TCNC(z) + TF(z)) \quad (22)$$

$$TUC(z) \leq PL_2 \quad (23)$$

در رابطه‌ی (۲۲) توان مجتمع خرده‌فروش بعد از اجرای عملیات کنترلی به ضریبی از این توان قبل از اجرای عملیات محدود شده‌است. حال آن که در رابطه‌ی (۲۳) محدودیت مطلق برای توان خرده‌فروش بعد از اجرای عملیات کنترلی در نظر گرفته شده‌است. مهم‌ترین متغیر-های تصمیم‌گیری این بهینه‌سازی $Y(cl, b, k, s)$ و $W(cl, b, k, z)$ می‌باشند. با در نظر گرفتن (۱۰) به عنوان تابع هدف و سایر معادلات به عنوان قیود برنامه‌ریزی خطی آمیخته به اعداد صحیح می‌تواند برای بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری به کار رود.

۴- مدل بار قابل کنترل و بازگشت بار

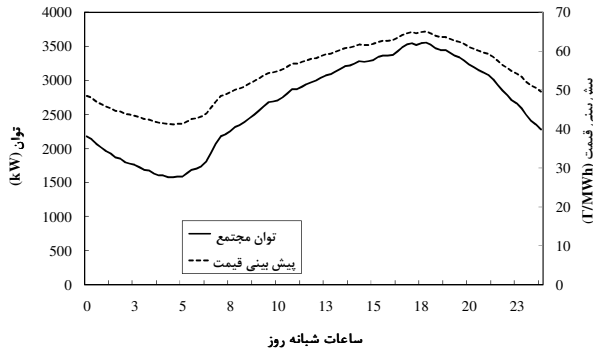
معادله‌ی تفاضلی (۲۴) می‌تواند برای مدلسازی دمای داخلی خانه‌ای با وجود دستگاه تهویه مطبوع به کار رود: [24]

$$\theta[(n+1)h] = a \cdot \theta(nh) + (1-a) \cdot [\theta_a(nh) - c(nh) \cdot w(nh) \cdot R \cdot P] + V(n,h) \quad (24)$$

کنندگان است، مبادله‌ی توان برای خرده‌فروش در بردارنده‌ی ضرر است. برنامه‌ی کنترل بار این ساختار، از تحویل بار در ساعات ضرردار به مصرف‌کنندگان خودداری کرده و در عوض به آن‌ها تشویقی می‌پردازد. به همین دلیل چنان‌که در جدول ۵ نشان داده شده، برنامه‌ی کنترل بار درآمد خرده‌فروش را نیز کاهش داده است. (علت آن است که برنامه‌ی کنترل بار با هدف حداکثر سازی سود اجرا شده و ممکن است به دلیل کاهش فروش برق به مصرف‌کنندگان درآمد خرده‌فروشان را نیز تا حدی کاهش دهد.) مقدار نشان داده شده در سطر سوم جدول تشویقی اعطا شده به مصرف‌کنندگان از سوی خرده‌فروش است که بدون اعمال کنترل بار برابر ۰ خواهد بود. این تشویقی همان مبلغی است که به مصرف‌کنندگان تحت اختیار خرده‌فروش در مقابل حذف بار پرداخت می‌شود.

جدول (۴): تنظیم پارامترها برای شبیه‌سازی کنترل بار

۱۳	زمان آغاز عملیات کنترلی
۲۰:۳۰	زمان پایان عملیات کنترلی
[۳۳۵۰, ۳۰۰۰, ۲۷۰۰]	نقاط شکست نرخ روی محور توان
۶۰	نرخ مطالبه شده از مصرف‌کنندگان (Γ/MWh)
[۲, ۴, ۸]	مبالغ تشویقی پیشنهادی مصرف‌کنندگان (Γ/MWh)
۱.۱	PL ₁ در رابطه‌ی (۲۲)
۳۵۵۰	PL ₂ در رابطه‌ی (۲۳)



شکل (۴): توان مجتمع خرده‌فروش و پیش‌بینی قیمت

در جدول (۶) تعداد مصرف‌کنندگان پذیرفته شده نهایی در هر کلاس مشارکت و مبلغ تشویقی پیشنهادی، و نیز متوسط پرداختی خالص آن‌ها در صورت قطع بار نمایش داده شده‌است. منظور از متوسط پرداختی خالص مصرف‌کنندگان، عبارت است از پرداختی متوسط مصرف‌کنندگان با در نظر داشتن بار کاهش یافته به دلیل کنترل بار منهای مبلغی که به عنوان تشویقی در ازای بار قطع شده به آن‌ها اعطا می‌گردد. مبلغ پرداختی مصرف‌کنندگان در صورت عدم شرکت در برنامه‌ی کنترل بار برابر $\Gamma = 2.717$ است. منحنی مجتمع بار قبل و بعد از اعمال کنترل در شکل ۵ رسم شده‌است.

نمایش داده شده در جدول ۸ است. تنظیمات پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۴ نشان داده شده‌است. در این جدول Γ ، واحد پولی فرضی است. در حالت پایه فرض می‌شود که استراتژی‌های کنترلی بر اساس جدول ۱ بوده و از ۱۴۰۰ مصرف‌کننده‌ی تحت اختیار خرده‌فروش، ۲۰۰ مصرف‌کننده در هر یک از استراتژی‌ها ثبت‌نام کرده‌اند. علاوه بر این چنین فرض می‌شود که پارامترهای $PLP(z, step)$ بر اساس روابط زیر از قیمت پایه‌ی خرید برق از شرکت توزیع، $C(z)$ تبعیت می‌کند.

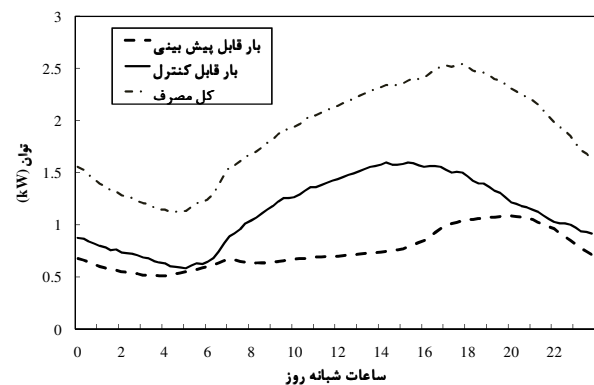
$$PLP(z, 1) = \mu_1.C(z)$$

$$PLP(z, 2) = \mu_2.C(z)$$

$$PLP(z, 3) = \mu_3.C(z)$$

$$PLP(z, 4) = \mu_4.C(z)$$

(۲۷)



شکل (۳): منحنی بار قابل پیش‌بینی و بار قابل کنترل نرمالیزه شده به ازای هر مصرف‌کننده.

جدول (۳): داده‌ها برای محاسبه‌ی مصرف مجموعه‌ای از مصرف‌کنندگان

σ	μ	
۰.۱	۰	V
۰	$20^{\circ}C$	θ_s
۰	$2^{\circ}C$	Δ
۰.۰۵	$0.3 \text{ kWh}^{\circ}C$	C
۲	$10^{\circ}C/kW$	R
۰	2 kw	P

در رابطه‌ی (۲۷) :

$$[\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4] = [1, 1.15, 1.2, 1.35]$$

(۲۸)

روند افزایشی μ_{step} ($step=1,2,3,4$) تضمین خواهد کرد که $PLN(z, step+1) > PLN(z, step)$ باشد.

داده‌های متناظر با پارامتر $C(z)$ در ضمیمه‌ی ۲ و شکل ۴ نشان داده شده‌اند. چنان‌که در شکل نشان داده شده‌است، روند تغییرات $C(z)$ مطابق با تغییرات بار مجتمع خرده‌فروش است.

نتایج حاصل از اجرای این برنامه‌ی کنترل بار در بهینه‌سازی تابع هدف و اجزای آن در جدول ۵ نشان داده شده‌است. بهینه‌سازی اجرا شده توانسته‌است سود خرده‌فروش را حدود ۱۰ درصد افزایش دهد. با توجه به نرخ متغیر با زمان خرید خرده‌فروش از شرکت توزیع، در ساعاتی که نرخ خرید از شرکت توزیع بزرگتر از نرخ مطالبه شده از مصرف-

جدول (۵): تابع هدف خردهفروش و اجزای آن بعد از اجرای بهینه‌سازی (T)

سود خرده فروش	قبل از اعمال کنترل بار	بعد از اعمال کنترل بار
	۱۸۱۰۵۳	۱۹۹۷۶۵
TC_1	۲۶۲۲۸۸۰	۳۵۰۷۵۴۳
TC_2	.	۱۲۵۴۹
TR	۳۸۰۳۹۳۳	۳۷۱۹۸۵۶

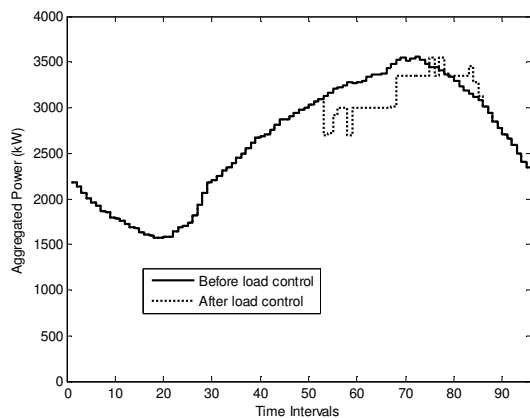
جدول (۶): تعداد مصرف‌کنندگان پذیرفته شده در هر کلاس و مبالغ تشویقی خالص روزانه‌ی آن‌ها.

کلاس‌ها	مبالغ تشویقی	تعداد مصرف‌کنندگان پذیرفته شده	مبلغ خالص پرداختی روزانه (T)
۱	۱	۶۰۰	۲۶۴۸
۱	۲	۲۰۰	۲۶۷۵
۲	۱	۲۰۰	۲۶۱۵
۲	۲	۲۰۰	۲۶۷۷
۳	۲	۲۰۰	۲۶۲۵

در یکی از بررسی‌های حساسیت به عمل آمده چنین فرض شده‌است که تعدادی از مصرف‌کنندگان از شرکت در برنامه‌های کنترلی بار سرباز زنند. این سناریوها از R_1 تا R_4 نامگذاری شده و تأثیر آن‌ها در تغییر سطوح تابع هدف نهایی همگرا شده و اجزای آن در جدول ۷ نمایش داده شده‌است. با کاهش یافتن تعداد مصرف‌کنندگان ثبت‌نام کرده در هر یک از استراتژی‌ها، منابع خردهفروش برای افزایش تابع هدف سود کاهش پیدا کرده و همگرایی تابع هدف نهایی در سطح پایین‌تری خاتمه خواهد پذیرفت. مقایسه‌ی منحنی مجتمع بار بعد از اعمال کنترل میان دو سناریوی R_1 (حالت پایه) و R_4 (۵۰ مصرف‌کننده‌ی ثبت‌نام شده در هر استراتژی کنترلی) نشان می‌دهد توانایی خرده-فروش در کاهش سطح توان مجتمع و انتقال پیک، با کاهش مصرف-کنندگان ثبت‌نام شده کاهش خواهد یافت. (شکل ۶)

جدول (۷): تغییر تابع هدف و اجزای آن در نتیجه‌ی کاهش تعداد مصرف-کنندگان ثبت‌نام شده در هر استراتژی

	$TC_2(T)$	$TC_1(T)$	$TR(T)$	تابع هدف (سود خرده فروش) (T)	تعداد مصرف‌کنندگان ثبت‌نام شده در هر استراتژی	
R_1	۱۲۵۴۹	۳۵۰۷۵۴۳	۳۷۱۹۸۵۶	۱۹۹۷۶۵	۲۰۰	
R_2	۱۰۷۴۱	۳۵۲۶۰۸۸	۳۷۳۵۰۹۵	۱۹۸۲۶۹	۱۵۰	
R_3	۷۹۳۴	۳۵۵۲۱۳۷	۳۷۵۶۲۳۱	۱۹۶۱۶۰	۱۰۰	
R_4	۴۳۴۲	۳۵۸۰۸۰۰	۳۷۷۸۰۷۷	۱۹۲۹۳۵	۵۰	



شکل (۵): بار مجتمع خرده فروش قبل و بعد از اعمال کنترل بار

۶- نتیجه

در این مقاله، پیاده‌سازی کنترل مستقیم بارهای تهویه مطبوع مصرف-کنندگان خانگی به خردهفروشان توان واگذار شد. همان‌طور که مورد انتظار هم بود، اجرای کنترل بار توسط خردهفروشان بر مبنای سود تمایل خواهد داشت بار مجتمع خردهفروش را در بازه‌هایی که قیمت برق بیشتر است به بازه‌های ارزان‌تر منتقل کرده و از این مجرا ضمن حداکثرسازی سود خردهفروش، بار مجتمع را حتی‌الامکان مسطح کند. پیاده‌سازی عملیات کنترلی توسط خردهفروش مستلزم پرداخت تشویقی به مصرف‌کنندگان است. با توجه به اینکه مسئولیت اعطای این تشویقی‌ها نیز به خردهفروشان که مجری عملیات کنترلی بار هستند واگذار شده است، مصالحه‌ی میان مقدار بار حذف شده و مقادیر تشویقی اعطا شده توسط یک برنامه‌ریزی بهینه‌سازی به اجرا خواهد رسید. در این بهینه‌سازی که توسط برنامه‌ریزی خطی آمیخته به اعداد صحیح مورد حل واقع می‌شود، قیودی در نظر گرفته شده است که می‌تواند آسایش مصرف‌کنندگان را بر حسب کلاس مشارکتی که در آن‌ها ثبت نام کرده‌اند، لحاظ نماید.

تشویقی مالی اعطا شده به مصرف‌کنندگان نقش مهمی در التزام مصرف‌کنندگان به ادامه‌ی شرکت در برنامه‌های پاسخ تقاضا دارد. چنان که در یکی از سناریوها مشاهده شد، کاهش تعداد مصرف-کنندگان ثبت‌نام شده می‌تواند تأثیر نامطلوبی روی تابع هدف نهایی همگرا شده‌ی خردهفروش و منحنی بار مجتمع بعد از اجرای عملیات کنترلی بار داشته باشد.

ارائه‌ی مدلی برای مصرف بارهای تهویه مطبوع که ضمن سهولت پیاده سازی توانایی خوبی در ترکیب با روش‌های مختلف بهینه سازی داشته باشد، از نقاط قوت دیگر این مقاله است. هم‌چنین با توجه به وجود زیر ساخت شبکه‌ی هوشمند، امکان ثبت نام روزانه‌ی مصرف‌کنندگان در استراتژی‌های گوناگون کنترلی که در بردارنده‌ی مبالغ تشویقی و کلاس‌های مشارکت مختلف‌اند فراهم شده‌است.

ضمیمه ۲

در این ضمیمه اثباتی برای روابط (۶) تا (۹) ارائه شده است. به عبارت دیگر تلاش بر آن بوده که نشان داده شود اقناع قیود (۶) تا (۹) باعث خواهد شد موارد مذکور در جدول ۲ برای هر کلاس مشارکت امکان پذیر شود:

یادآوری ۱- اصل لانه‌ی کبوتری- m کبوتر و n لانه مفروض‌اند. اگر $m > n$ آنگاه لاقل یک لانه موجود خواهد بود که شامل بیش از یک کبوتر باشد.

اصل نامبرده در وضعیتی که $m \leq n$ به صورت زیر در می‌آید:

یادآوری ۲- متمم اصل لانه کبوتری- m کبوتر و n لانه مفروض‌اند. اگر $m \leq n$ در این صورت این امکان وجود خواهد داشت که هر لانه حداکثر شامل یک کبوتر باشد.

یادآوری ۳- تعمیم متمم اصل لانه کبوتری- m کبوتر و n لانه مفروض‌اند. اگر $m \leq kn$ در این صورت این امکان وجود خواهد داشت که هر لانه حداکثر شامل k کبوتر باشد.

اثبات- برای سهولت روابط (۷) و (۸) به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

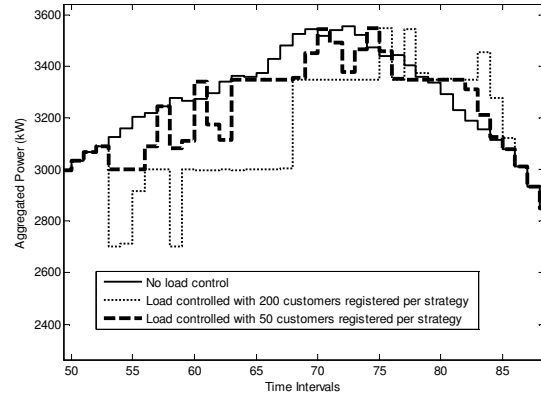
$$W(z) + W(z-1) + W(z-2) + W(z-3) \leq 2U \quad (29)$$

$$W(z) + W(z-2) \leq U \quad (30)$$

جدول (ماتریسی) را در نظر بگیرید که دارای U سطر و ۴ ستون است. سیاه کردن عنصر واقع در سطر i و ستون z (از ۱ تا ۴) یعنی بار مصرف کننده i ام (که در مجموعه‌ی U مصرف کننده‌ی پذیرش شده واقع است، به ترتیب در بازه‌های $z-3$ ، $z-2$ ، $z-1$ و z قطع شود. (و بالعکس سفید بودن خانه یعنی بار مصرف کننده‌ی مزبور وصل باشد) اگر هر یک از سطرهای جدول به مثابه لانه‌ها و هر یک از خانه‌های سیاه به منزله‌ی کبوتران در نظر گرفته شوند، بنا به رابطه‌ی (۲۹) و تعمیم متمم اصل لانه‌ی کبوتری می‌توان در هر سطر حداکثر دو خانه-ی سیاه در اختیار داشت. دو خانه‌ی سیاه مزبور در سطر شامل چهار خانه به صورت‌های نشان داده شده در شکل ۷ قابل نمایش‌اند.

اگر در استدلالی مشابه سطرهای جدول به مثابه لانه‌ها و خانه‌های سیاه در دو ستون ۱ و ۳ به منزله‌ی کبوتران در نظر گرفته شوند، مطابق با رابطه‌ی (۳۰) تعداد کبوتران کمتر از تعداد لانه‌هاست. لذا می‌توان در هر سطر و به ازای ستون‌های ۱ و ۳ حداکثر یک خانه‌ی سیاه داشت. نتیجتاً از ترکیبات نشان داده شده در شکل ۷، ترکیبات ۲ و ۵ که قید (۳۰) را برآورده نمی‌کنند قابل اجتناب‌اند. از میان ترکیبات باقی‌مانده، ۱ و ۶ به وضوح هر دو شرط (۲۹) و (۳۰) را برآورده می‌کنند. برای ترکیبات ۳ و ۴ اثبات با شیفت دادن در تعریف z امکان پذیر است.

مشابه‌ی می‌توان نشان داد در نظر گرفتن قیود (۶) و (۹) به ترتیب آن چه را که در سطر اول و سوم جدول ۲ ثبت است امکان پذیر می‌کند.



شکل (۶): تأثیر کاهش ثبت نام مصرف‌کنندگان در تغییر پروفیل بار مجتمع بعد از اعمال کنترل بار

ضمیمه ۱

جدول (۸): برخی از داده‌های مورد استفاده قرار گرفته در مقاله

ساعات شبانه-روز	دمای خارجی (°C)	پروفیل بار قابل پیش بینی نرمالیزه شده به ازای یک مصرف کننده (kW)	پروفیل بار قابل کنترل نرمالیزه شده به ازای یک مصرف کننده (kW)	C(z) (Γ/MWh)
۱	۲۸.۵	۰.۶۸	۰.۸۷۷	۴۸.۴۶۲
۲	۲۷.۶	۰.۶۰	۰.۷۹۷	۴۵.۷۷۹
۳	۲۷.۰	۰.۵۵	۰.۷۳۵	۴۳.۸۹۰
۴	۲۶.۶	۰.۵۲	۰.۶۸۸	۴۲.۶۰۲
۵	۲۵.۸	۰.۵۱	۰.۶۳۴	۴۱.۵۳۲
۶	۲۵.۶	۰.۵۵	۰.۵۸۱	۴۱.۳۰۸
۷	۲۶.۱	۰.۶۰	۰.۶۴۳	۴۳.۱۸۹
۸	۲۸.۲	۰.۶۷	۰.۸۸۷	۴۸.۴۷۰
۹	۲۹.۹	۰.۶۳	۱.۰۴۵	۵۰.۴۵۱
۱۰	۳۱.۴	۰.۶۴	۱.۱۸۲	۵۲.۹۲۵
۱۱	۳۲.۴	۰.۶۷	۱.۲۶۷	۵۴.۸۴۴
۱۲	۳۳.۲	۰.۶۹	۱.۳۵۹	۵۶.۷۳۳
۱۳	۳۴.۱	۰.۷۰	۱.۴۴۱	۵۸.۲۷۵
۱۴	۳۵.۰	۰.۷۲	۱.۵۱۵	۵۹.۸۵۱
۱۵	۳۵.۶	۰.۷۴	۱.۵۷۹	۶۱.۲۷۶
۱۶	۳۵.۹	۰.۷۷	۱.۵۸۵	۶۱.۸۷۰
۱۷	۳۵.۶	۰.۸۵	۱.۵۶۰	۶۲.۷۹۴
۱۸	۳۵.۱	۱.۰۰	۱.۵۳۱	۶۴.۸۳۹
۱۹	۳۴.۴	۱.۰۵	۱.۴۶۷	۶۴.۵۹۹
۲۰	۳۳.۱	۱.۰۷	۱.۳۶۱	۶۳.۱۵۶
۲۱	۳۱.۹	۱.۰۹	۱.۲۱۸	۶۱.۰۹۰
۲۲	۳۰.۹	۱.۰۵	۱.۱۴۹	۵۹.۲۶۰
۲۳	۳۰.۰	۰.۹۶	۱.۰۲۷	۵۵.۶۹۶
۲۴	۲۹.۳	۰.۸۱	۰.۹۷۱	۵۲.۲۲۵

[14] D.S. Callaway, I.A. Hiskens, *Achieving Controllability of Electric Loads*, Proceeding of the IEEE, vol. 99, Issue 1, pp184-199, January 2011.

[15] M. Parvania, M.Fotuhi-Firuzabad, *Integrating Load Reduction into Wholesale Energy Market with Application to Wind Power Integration*, accepted for inclusion in a future issue of IEEE systems journal.

[16] L.Yao, H.R. Lu, *A Two-Way Direct Control of Central Air Conditioning Load Via the Internet*, IEEE Transactions Power Delivery, vol. 24, no.1, pp 240-248. January 2009.

[17] N.Lu, D.P. Chassin, *A State-Queueing Model of Thermostatically Controlled Appliances*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, August 2004.

[18] N.Lu, D.P. Chassin, S.E. Widergren, *Modeling Uncertainties in Aggregated Thermostatically Controlled Loads Using a State Queueing Model*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 2, May 2005.

[19] M. A. Pedrasa, E. D. Spooner, I. F. MacGill, *Improved Energy Services Provision through the Intelligent Control of Distributed Energy Resources*, PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, pp1-8, June-July 2009

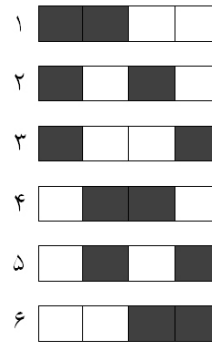
[20] M. A. Pedrasa, T.D. Spooner, I.F. MacGill, *Coordinated Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services*, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 2, September 2010.

[21] A. Mohsenian-Rad, A.L. Garcia, *Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments*, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 2, September 2010.

[22] M. Ziaii, A. Kazemi, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Parvania, *A Method to Calculate the Linear Load Pay Back Factors for Air Conditioners*, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, pp 1-5, 2012

[23] M. Carrión, J.M. Arroyo, *A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 3, August 2006

[24] C. Ucak, R. Calgar, *The Effects of Load Parameter Dispersion and Direct Load Control Actions on Aggregated Load*, International Conference on Power System Technology, vol.1, pp 280-284, August 1998



شکل (۷): ترکیبات قابل نمایش برای تعداد ۲ خانه‌های سیاه در میان ۴ خانه

مراجع

[1] M. Parvania, M.Fotuhi-Firuzabad, *Demand Response Scheduling by Stochastic SCUC*, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1. no.1, pp89-98, June 2010.

[2] H. Lee, C. L. Wilkins, *A Practical Approach to Appliance Load Control Analysis: A Water Heater Case Study*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, pp. 1007-1013, April 1983.

[3] C. N. Kurucz, D. Brandt, S. Sim, *A Linear Programming Model for Reducing System Peak Through Customer Load Control Programs*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 4, pp. 1817-1824, November 1996.

[4] K.H. Ng, G. B. Sheblé, *Direct Load Control—A Profit-Based Load Management Using Linear Programming*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, no. 2, pp. 688-695, May 1998.

[5] Y.Y. Hsu, C.C. Su, *Dispatch of Direct Load Control Using Dynamic Programming*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.6, no.3, pp 1056-1060, August 1991.

[6] D. C. Wei, N. Chen, *Air Conditioner Direct Load Control by Multipass Dynamic Programming*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 307-313, February 1995.

[7] W.C. Chu, B.K.Chen, C.K. Fu, *Scheduling of Direct Load Control to Minimize Load Reduction for a Utility Suffering from Generation Shortage*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 4, pp. 1525-1530, November 1993.

[8] C. C. Su, Y. Y. Hsu, *Fuzzy Dynamic Programming: An Application to Unit Commitment*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no 3, pp 1231- 1237, August 1991.

[9] L. Goel, Q.Wu, P. Wang, *Fuzzy Logic-Based Direct Load Control of Air Conditioner Loads Considering Nodal Reliability Characteristics in Restructured Power Systems*, Electric Power Systems Research, 80 (1), pp. 98-107, 2010.

[10] K. Y. Huang, Y. C. Huang, *Integrating Direct Load Control with Interruptible Load Management to Provide Instantaneous Reserves for Ancillary Services*, IEEE Transactions on Power Systems., vol. 19, no. 3, pp. 1626-1634, August. 2004.

[11] L. Yao, W. C. Chang, R. L. Yen, *An iterative deepening genetic algorithm for scheduling of direct load control*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 3, pp. 1414-1421, August 2005.

[12] L.Yao, T.H. Hsu, C.C. Lin and C.H.Lin. *A Block Deepening Genetic Programming for Scheduling of Direct Load Control*, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, London, UK, pp821-827, April 2007

[13] N. Ruiz, I.Cobelo, J.Oyazabal, *A Direct Load Control Model for Virtual Power Plant Management*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 2, pp.959-966, May 2009.

زیر نویس‌ها

- 1 Direct Load Control (DLC)
- 2 Demand Response (DR)
- 3 Retailer
- 4 Third Party Firm
- 5 Distribution Company (Disco)
- 6 Smart Grid
- 7 Incentive
- 8 Interface
- 9 Mixed Integer linear Programming (MILP)
- 10 Aggregated Load
- 11 Load Pay Back
- 12 Utilities
- 13 Aggregator
- 14 Demand Response Provider