تعیین استراتژی بهینه برنامه‌ریزی نگهداشت پیشگیرانه در حضور منابع پاسخگوی بار

وحید شریفی، مسعود رشیدی‌نژاد، امیر عبداللهی و مژگان ملاحسنی‌پور

چکیده: در این مقاله روشی نوین به‌منظور برنامه‌ریزی نگهداشت واحدهای تولیدی در محیط رقابتی بازار برق ارائه شده است. مسئله برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی به علت تأثیرگذاری بر روی امنیت و انتشار آلایندگی سیستم و سود تولیدکنندگان یکی از مهم‌ترین موضوعات در محیط تجدید ساختاریافته سیستم قدرت می‌باشد. به‌منظور در نظرگیری ریسک تولیدکنندگان، برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی از دیدگاه تولیدکنندگان با استفاده از تئوری بازی‌های غیر مشارکتی مدل گردیده که به‌منظور دست‌یابی به استراتژی بهینه از تعادل نش بهره برده شده است. از سوی دیگر، بهره‌بردار مستقل سیستم به دنبال دست‌یابی به سطح قابلیت اطمینان مناسب و کاهش آلایندگی است. در این بین برنامه‌های پاسخگوی بار یکی از گزینه‌های اثرگذار بر سیاست‌های حوزه تصمیم‌گیری انرژی می‌باشند. در این مقاله از منابع پاسخگوی بار به‌عنوان منبعی مجازی برای تدارک رزرو سیستم بهره برده شده است. همچنین به‌منظور هم‌سوساختن برنامه نگهداشت تولیدکنندگان با برنامه نگهداشت قابلیت اطمینان- آلایندگی محور از فرایند هماهنگ‌سازی بهره برده شده است. مدل پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۲۴ باس اصلاح‌شده IEEE-RTS پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل، نشان‌دهنده کارامدی روش پیشنهادی است.

کلیدواژه: برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی، تئوری بازی‌های غیر مشارکتی، تعادل نش، پاسخگویی بار.

فهرست علایم

اپراتور

tr: ترانهاده ماتریس

اندیس‌ها

i: تولیدکنندگان

j: واحدهای تولیدی یک تولیدکننده

h: زمان (ساعت)

t: دوره (هفته)

v: تعداد تکرار فرایند هماهنگ‌سازی

پارامترها

$a_{i,j}$: ضریب ثابت هزینه تولید واحد نیروگاهی [$]

$b_{i,j}$: ضریب خطی هزینه تولید واحد نیروگاهی [$/kWh]

$c_{i,j}$: ضریب درجه دوم هزینه تولید واحد نیروگاهی [$/kWh^2]

$\alpha_{i,j}$: ضریب ثابت آلودگی تولید واحد نیروگاهی [mlbs]

$\beta_{i,j}$: ضریب خطی آلودگی تولید واحد نیروگاهی [mlbs/kwh]

$\gamma_{i,j}$: ضریب درجه دوم آلودگی تولید واحد نیروگاهی [mlbs/kwh^2]

H: تعداد ساعت‌ها در یک هفته (۱۶۸ ساعت)

n: حداکثر تعداد تکرار در فرایند هماهنگ‌سازی

N: تعداد تولیدکنندگان

N_i: تعداد واحدهای تولیدی از تولیدکننده iام

$g_{i,j}^{\max}$: حداکثر ظرفیت واحد تولیدی jام از تولیدکننده iام

$g_{i,j}^{\min}$: حداقل ظرفیت واحد تولیدی jام از تولیدکننده iام

$R_{\min}$: حداقل سطح رزرو

T: افق برنامه‌ریزی

$D_{i,j}$: مدت زمان تعمیر و نگهداشت واحد jام تولیدکننده i (هفته)

α_v: ضریب ترم تشویق (جریمه) برای تکرار vام

متغیرها

$m_{i,j}(.)$: هزینه تعمیر و نگهداشت واحد jام تولیدکننده i

$g_{i,j}^{t,h}(.)$: مقدار انرژی تولیدی واحد jام تولیدکننده i در ساعت hام (MWh)

$R^{t,h}$: سطح رزرو محاسبه‌شده در ساعت hام هفته t

$R_{Gen,v-1}^{t,h}$: سطح رزرو محاسبه‌شده از برنامه نگهداشت تولیدی توسط تولیدکنندگان در ساعت hام هفته t برای تکرار $v-1$

$R_{ISO}^{t,h}$: سطح رزرو محاسبه‌شده از برنامه نگهداشت تولیدی توسط ISO در ساعت hام هفته t برای تکرار $v-1$

S_{ISO}: پروفایل استراتژی نگهداشت ISO برای همه واحدهای تولیدی در افق برنامه‌ریزی

S^f: مجموعه تمامی پروفایل‌های ممکن استراتژی نگهداشت برای همه واحدهای تولیدی در افق برنامه‌ریزی

S_i^{Nash}: استراتژی نگهداشت تولیدکننده iام در افق برنامه‌ریزی توسط تعادل نش

S_{-i}^{Nash}: استراتژی نگهداشت تمامی تولیدکنندگان به‌جز تولیدکننده iام در افق برنامه‌ریزی توسط تعادل نش

$X_{i,j}^t(.)$: استراتژی نگهداشت واحد jام تولیدکننده i در هفته t (واحد تحت تعمیر = ۱ و در غیر این صورت = ۰)

$\lambda_v^{t,h}$: ترم تشویق/ جریمه محاسبه‌شده توسط ISO در ساعت hام

این مقاله در تاریخ ۸ اسفند ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۱۱ مهر ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

وحید شریفی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، (email: v.sharifi70@yahoo.com).

مسعود رشیدی‌نژاد (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، (email: mrashidi@uk.ac.ir).

امیر عبداللهی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، (email: a.abdollahi@uk.ac.ir).

مژگان ملاحسنی‌پور، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (email: m.mollahassani@ece.usb.ac.ir).

Archive of SID

www.SID.ir

از هفته tام برای تکرار vام

$\pi^{t,h}(.)$: قیمت تسویه بازار در ساعت hام هفته t (\$/MWh)

$\delta_v^{t,h}$: اختلاف سطح رزرو بین برنامه نگهداشت ISO و برنامه نگهداشت تولیدکنندگان در ساعت hام هفته t برای تکرار v

$\sigma(d,t,h)$: میزان مشارکت DRP، dام در ساعت hام از هفته tام (MW)

$\upsilon(d,t,h)$: استراتژی قیمت‌دهی DRP، dام در ساعت hام از هفته tام

$\lambda(d,t,h)$: هزینه پرداختی به DRP، dام در ساعت hام از هفته tام

$\underline{\sigma}(d,t,h)$: حداقل میزان مشارکت DRP، dام در ساعت hام از هفته tام (MW)

$\underline{\upsilon}(d,t,h)$: استراتژی قیمت‌دهی اولیه DRP، dام در ساعت hام از هفته tام

$\underline{\lambda}(d,t,h)$: حداقل هزینه پرداختی به DRP، dام در ساعت hام از هفته tام

۱- مقدمه

امروز با توجه به روند رو به رشد مصرف انرژی الکتریکی، برنامه‌ریزی سیستم قدرت از مطالعات کوتاه‌مدت تا بلندمدت حایز اهمیت است. در این میان برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت واحدهای تولیدی که به مفهوم زمان‌بندی مناسب خروج واحدهای نیروگاهی به‌منظور تعمیرات می‌باشد، به علت تأثیرگذاری بر سایر برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت سیستم قدرت اهمیت ویژه‌ای دارد. از طرفی با توجه به وقوع تجدید ساختار در صنعت برق، کلیه برنامه‌ریزی‌های سیستم قدرت باید با در نظر گرفتن مقررات جدید سیستم قدرت باشد.

برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا یکی از گزینه‌های اثرگذار بر سیاست‌های حوزه تصمیم‌گیری انرژی می‌باشد. برنامه های پاسخگوی بار (DRP) را می‌توان ایجاد تغییر در مصرف برق توسط مشترکین از حالت طبیعی مصرف آنها در پاسخ به تغییرات قیمت برق در طول زمان تعریف کرد. به طور کلی برنامه های پاسخگوی بار به دو دسته کلی برنامه‌های تشویقی‌محور و برنامه‌های تعرفه زمانی تقسیم می‌شوند که هر یک به زیرگروه‌هایی تقسیم‌بندی می‌گردند [۱]. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار فوایدی از جمله کاهش هزینه، کاهش آلایندگی، بهبود قابلیت اطمینان، کاهش وابستگی به منابع فسیلی و افزایش درآمد ناشی از کاهش سرمایه‌گذاری بر روی احداث نیروگاه‌های جدید را به دنبال خواهند داشت [۲]. در [۳] روشی نوین به‌منظور توانمندسازی مشترکین برای حداکثرسازی سود حاصل از برنامه‌های پاسخگویی بار ارائه شده است. مدلی نوین برای قیمت و تشویق بارهای پاسخگو بر اساس مفهوم انعطاف‌پذیری حساسیت قیمتی تقاضا و تابع سود مشترکین در [۴] ارائه گردیده که به‌منظور بهبود پروفیل بار و ارتقای رضایت‌مندی مشترکین از آن بهره برده شده است.

در محیط رقابتی بازار، تولیدکنندگان به دنبال اتخاذ استراتژی بهینه به‌منظور افزایش سود خود می‌باشند. بنابراین هر تولیدکننده انرژی الکتریکی به‌صورت مستقل بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و امنیت سیستم برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری را با هدف افزایش سود انجام می‌دهد. بر این اساس اپراتور مستقل سیستم با وظیفه مهم هماهنگ‌سازی برنامه‌های تعمیر و نگهداری تولیدی روبه‌رو است [۵]. در مواقع ضروری، ISO این وظیفه را با استفاده از اقدام‌های اجباری به‌منظور اصلاح برنامه تعمیر و نگهداری تولیدکنندگان انجام می‌دهد [۶] تا [۸]. برای مثال، "سیاست ۴ NERC" یک قانون جامع برای هماهنگ‌سازی برنامه نگهداشت واحدهای تولیدی ارائه می‌دهد که توسط اپراتورهای سیستم در آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است [۹].

مطالعات متعددی روی برنامه‌ریزی نگهداشت واحدهای نیروگاهی صورت پذیرفته است. در [۱۰] عدم قطعیت‌های بار و هزینه تولید بر اساس یک روش کاری فازی مدل شده است. مسئله برنامه نگهداشت واحدهای نیروگاهی با بهره‌گیری از یک بازی فازی غیر مشارکتی فازی طراحی و حل شده است. روشی نوین در [۱۱] ارائه شده که برنامه‌ریزی نگهداشت واحدهای تولیدی را بر مبنای یک مسئله چندهدفه پیاده‌سازی کرده است. همچنین بارهای پاسخگو به صورت یک مدل اقتصادی بر اساس الاستیسته تقاضا و سود مشترکین طراحی شده است. یک روش اقتصاد- آلایندگی محور برای برنامه‌ریزی نگهداشت پیشگیرانه بر اساس منابع پاسخگویی بار در [۱۲] ارائه شده که می‌تواند به منظور کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش هزینه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در [۱۳] برنامه‌ریزی نگهداشت واحدهای تولیدی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی طراحی شده است.

مطالعات متفاوتی در زمینه‌هایی از قبیل استراتژی پیشنهاددهی قیمت و استراتژی برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی صورت گرفته است [۱۴] تا [۱۹] و همچنین رفتار استراتژیکی تولیدکنندگان به‌صورت تئوری بازی‌ها مدل شده است. در [۱۸] و [۱۹] فرایند برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت بر اساس تئوری بازی در مدل محیط رقابتی مدل شده است. همچنین در [۲۰] نیز با استفاده از تئوری بازی‌ها از دیدگاه تولیدکنندگان به حل مسئله برنامه‌ریزی نگهداشت پرداخته شده است.

در این مقاله، منابع پاسخگوی بازفروش تقاضا به‌عنوان منابع مجازی رزرو در برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی در نظر گرفته شده است. در این نوع برنامه پاسخ‌گوی بار، فراهم‌کنندگان پاسخ‌گویی بار (DRP) پیشنهادات کاهش توان را به همراه قیمت مربوط به بهره‌بردار مستقل سیستم قدرت ارائه می‌دهند. بهره‌بردار مستقل سیستم قدرت به‌منظور کاهش پیک بار و کاهش آلایندگی، از این پیشنهادها استفاده می‌کند [۵]. از سوی دیگر به‌منظور دست‌یابی تولیدکنندگان به استراتژی بهینه نگهداشت تولیدی، از تئوری بازی‌های غیر مشارکتی پویا بهره برده شده است. از سوی دیگر، بهره‌بردار مستقل سیستم به دنبال دست‌یابی به سطح قابلیت اطمینان مناسب و کاهش آلایندگی است. بدین منظور از فرایند هماهنگ‌سازی به‌منظور هم‌سوساختن برنامه نگهداشت تولیدکنندگان با برنامه نگهداشت قابلیت اطمینان- آلایندگی محور بهره برده شده است.

ادامه مطالب به این صورت طبقه‌بندی شده است: در بخش دوم مسئله تعمیر و نگهداشت پیشگیرانه با استفاده از روش هماهنگ‌سازی در قالب تئوری بازی‌ها تشریح شده است. مطالعات عددی و نتایج در بخش سوم مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در نهایت در قسمت پایانی مقاله به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲- مسئله برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت

۲-۱ برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی از دیدگاه تولیدکنندگان

سود هر تولیدکننده در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت تولیدی وابسته به برنامه تعمیر و نگهداشت دیگر تولیدکنندگان در بازار نگهداشت می‌باشد. با توجه به این شرایط، هر تولیدکننده با انتخاب استراتژی مناسب در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری به دنبال دست‌یابی به حداکثر سود خود

Archive of SID

www.SID.ir

است. بدین منظور با استفاده از مشخصه‌های تصمیم‌گیری، یک مدل رقابتی برای فرایند برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت بر اساس تئوری بازی غیر مشارکتی پویا ارائه شده است. این مدل یک روش کارامد برای ارزیابی رفتار استراتژیک تولیدکنندگان در بازارهای الکتریکی می‌باشد.

مسئله برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی یک فرایند تصمیم‌گیری است که دوره تعمیر و نگهداری واحدهای نیروگاهی را در طی افق برنامه‌ریزی مشخص می‌نماید. بنابراین استراتژی هر شرکت بر اساس نظریه بازی غیر مشارکتی پویا به‌منظور حل مسئله برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی مدل شده است. به‌منظور استفاده از این مدل در مسئله برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی در نظر گرفتن برخی فرضیه‌ها ضروری است، از قبیل:

- بازار لحظه‌ای به‌صورت بازار حراج انرژی ساعتی (HEA) با قیمت یکسان در نظر گرفته شده است.
- استراتژی قیمت‌دهی تولیدکنندگان در بازار HEA در نظر گرفته نشده است.
- هزینه حاشیه‌ای تمامی واحدها به‌عنوان قیمت پیشنهادی آن واحد در نظر گرفته شده است.
- تمامی ظرفیت در دسترس واحدهای تولیدی به بازار HEA پیشنهاد شده است.

سود هر تولیدکننده از مجموع سودهای به‌دست‌آمده از بازارهای HEA در طول دوره مطالعه محاسبه می‌شود. سود تولیدکنندگان از اختلاف بین درآمدها و هزینه‌ها به دست می‌آید که در این مطالعه هزینه تولید و تعمیرات در نظر گرفته شده است. سود تولیدکننده iام در گام tام به‌صورت زیر می‌باشد [۲۱]

$$\prod_i(S)=\sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{N_i}\{(\pi^{t,h}(S).g_{i,j}^{t,h}(S)-C_{i,j}^{t,h}(S))-m_{i,j}.g_{i,j}^{\max}.X_{i,j}^{t}(S)\} \quad (1)$$

در حالی که

$$C_{i,j}^{t,h}(S)=a_{i,j}+b_{i,j}.g_{i,j}(S)+c_{i,j}.(g_{i,j}(S))^{2},\ \forall i\in N,\ \forall j\in N_i,\ \forall S\in S_f \quad (2)$$

هزینه حاشیه‌ای هر تولیدکننده انرژی به‌عنوان قیمت پیشنهادی هر تولیدکننده در نظر گرفته شده که بالاترین قیمت پیشنهادی به‌عنوان قیمت بازار انرژی لحاظ می‌شود

$$\pi^{t,h}(S)\triangleq\max_{i\in N,\,j\in N_i}:\{\pi_{i,j}^{t,h}(g_{i,j}^{t,h}(S)):g_{i,j}^{t,h}(S)>0\} \quad (3)$$

در حالی که

$$\pi_{i,j}^{t,h}(g_{i,j}^{t,h}(S))=b_{i,j}+2.c_{i,j}.g_{i,j}^{t,h}\ \forall t\in T,\ \forall h\in H,\ \forall S\in S_f \quad (4)$$

مجموعه‌ای از قیدهای مسئله برنامه تعمیر و نگهداشت از دیدگاه تولیدکنندگان در زیر بیان شده است [۲۰]

$$g_{i,j}^{\min}(1-X_{i,j}^{t}(S))\le g_{i,j}^{t,h}(S)\le(1-X_{i,j}^{t}(S))g_{i,j}^{\max}\ \forall i\in N,\ \forall j\in N_i,\ \forall t\in T,\ \forall h\in H,\ \forall S\in S_f \quad (5)$$

$$\sum_{t=1}^{T}X_{i,j}^{t}(S)=D_{i,j}\ ,\ \forall i\in N,\ \forall j\in N_i,\ \forall S\in S_f \quad (6)$$

$$X_{i,j}^{t}(S)-X_{i,j}^{t-1}(S)<X_{i,j}^{t+D_{i,j}-1}(S)\ \forall i\in N,\ \forall j\in N_i,\ \forall S\in S_f \quad (7)$$

اطلاعات نگهداشت هر دوره برای واحدهای نیروگاهی تولیدکنندگان در S ذکر شده که به‌صورت زیر تشریح می‌شود [۱۰]

$$S_{i,j}^{t}\in\{0,1\} \quad (8)$$

پروفایل استراتژی نگهداشت برای واحد j ام تولیدکننده iام در طول بازه مورد مطالعه به‌صورت زیر است

$$S_{i,j}\triangleq[S_{i,j}^{1},S_{i,j}^{2},\ldots,S_{i,j}^{t}]^{tr} \quad (9)$$

و همچنین استراتژی تولیدکننده iام در بازه زمانی t این گونه می‌باشد

$$S_i^t\triangleq[S_{i,1}^{t},S_{i,2}^{t},\ldots,S_{i,N_i}^{t}]^{tr} \quad (10)$$

و تمامی استراتژی‌های بازی در بازه زمانی tام در زیر آورده شده است

$$S^t\triangleq[S_1^t,S_2^t,\ldots,S_N^t]^{tr} \quad (11)$$

و نهایتاً تمامی استراتژی‌های ممکن در برنامه‌ریزی نگهداشت در زیر مشاهده می‌شود

$$S\triangleq[S_1,S_2,\ldots,S_N] \quad (12)$$

به‌منظور حل این بازی از مفهوم تعادل نش استفاده شده است. تعادل نش به‌صورت گسترده در حل شکل‌های مختلفی از بازی‌ها استفاده می‌شود. مفهوم تعادل نش کامل زیر بازی (SPNE) می‌تواند برای دستیابی به حل بازی پویا مورد استفاده قرار گیرد. برای یافتن SPNE از روش استنتاج وارونه استفاده می‌شود [۲۲]. پروفایل حل برای هر تولیدکننده در این بازی به‌صورت زیر می‌باشد

$$\prod_i((S_i^{Nash})^{tr}S_{-i}^{Nash})\ge\prod_i((S_i)^{tr}S_{-i}^{Nash}),\ \forall i\in N,\ \forall S\in S_f \quad (13)$$

که در آن

$$S^{Nash}\triangleq[S_1^{Nash},S_2^{Nash},\ldots,S_N^{Nash}] \quad (14)$$

و

$$S_{-i}^{Nash}\triangleq[S_1^{Nash},S_2^{Nash},\ldots,S_{i-1}^{Nash},S_{i+1}^{Nash},\ldots,S_N^{Nash}] \quad (15)$$

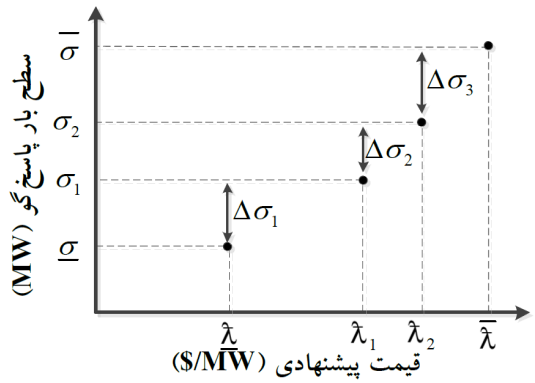
که $\prod_i((S_i)^{tr}S_{-i}^{Nash})$ سود تولیدکننده i که استراتژی S_i را انتخاب کرده است، نشان می‌دهد، در حالی که به‌صورت هم‌زمان تولیدکنندگان دیگر به‌جز تولیدکننده i، S_{-i}^{Nash} را به‌عنوان استراتژی خود انتخاب کرده‌اند. در (۱۳) فرم ریاضی تعادل نش ارائه شده است. در مسئله بازی برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی از روش استنتاج وارونه برای حل (۱۳) استفاده می‌شود.

۲-۲ مسئله ISO

در مدل پیشنهادی برقراری ارتباط بین منابع تولید نیروگاهی و منابع مجازی تولید سمت مصرف حایز اهمیت می‌باشد. سازوکار مدل بدین صورت است که در ابتدا مشخصات واحدهای نیروگاهی، بار و پیشنهادهای سمت تقاضا برای شرکت در برنامه‌های DR در اختیار ISO قرار می‌گیرند. پس از دریافت کلیه اطلاعات، ISO برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت تولیدی در حضور منابع DR را انجام می‌دهد. در ساختار ارائه‌شده، زمان بهینه تعمیرات واحدهای نیروگاهی و میزان مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخگویی بار به نحوی تعیین می‌گردد که در بازه زمانی مورد مطالعه، میزان قابلیت اطمینان سیستم حداکثر و میزان انتشار آلایندگی کمینه گردد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱: استراتژی قیمت‌دهی برنامه‌های پاسخگویی بار.

۲-۲-۱ مدل برنامه پاسخگویی بار

در مقاله حاضر منابع پاسخگویی بار به‌عنوان منبعی مجازی برای تأمین رزرو به کار می‌روند. هر مصرف‌کننده پیشنهاد خود را در راستای کاهش بار و مشارکت در تدارک رزرو با واسطه در اختیار ISO قرار می‌دهد. فراهم‌کننده‌های پاسخگویی تقاضا (DRPs) پیشنهادهای مصرف‌کنندگان را گردآوری می‌کنند و به‌عنوان واسطه بین مصرف‌کنندگان و ISO عمل می‌نمایند. استراتژی قیمت‌دهی قطع بار و مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی مطابق شکل ۱ است [۲۳].

در صورت مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های مدیریتی تقاضا، حداقل میزان مشارکت DRP در هر دوره زمانی $\underline{\sigma}(d,t)$ می‌بایستی از یک مقدار از پیش تعیین‌شده که توسط ISO تعیین می‌گردد بزرگ‌تر باشد. در (۱۶) و (۱۷) مدلی خطی از استراتژی قیمت‌دهی در برنامه‌های پاسخگویی بار ارائه شده است. $\upsilon(v,d,t)$ وضعیت پیشنهاد کاهش بار را با قیمت پیشنهادی در بلوک v یک DRP نشان می‌دهد. در صورت پذیرش قیمت و قطع بار مقدار $\upsilon(v,d,t)$ برابر یک و در غیر این صورت صفر می‌باشد. رابطه (۱۷) نشان‌دهنده میزان مشارکت مصرف‌کنندگان می‌باشد و در (۱۶) هزینه پرداختی به مصرف‌کنندگان ارائه شده است [۱۲]

$$\rho_{DR}(d,t)=\underline{\hat{\lambda}}(d,t)\underline{\sigma}(d,t)\underline{\upsilon}(d,t)+\sum_{v=1}^{N_{SDR}}\hat{\lambda}(v,d,t)\sigma(v,d,t)\upsilon(v,d,t)\ ,\ \forall d,\forall t \quad (16)$$

$$\hbar_{DR}(d,t)=\underline{\sigma}(d,t)\upsilon(d,t)+\sum_{v=1}^{N_{SDR}}\sigma(v,d,t)\upsilon(v,d,t)\ ,\ \forall d,\forall t \quad (17)$$

در (۱۸) تابع هدف فراهم‌کننده‌های پاسخگویی تقاضا به‌منظور حداکثرسازی سود برنامه پاسخگویی بار ارائه شده است [۱۲]

$$\text{Maximize}\ \rho_{DR}^{Total}(d,t):\ \sum_{t=1}^{T}\sum_{d=1}^{N_{DRP}}\{\underline{\hat{\lambda}}(d,t)\underline{\sigma}(d,t)\underline{\upsilon}(d,t)+\sum_{v=1}^{N_{SDR}}\hat{\lambda}(v,d,t)\sigma(v,d,t)\upsilon(v,d,t)\} \quad (18)$$

مقدار بار اصلاح‌شده هر ساعت در دوره مورد مطالعه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$P_{D_{t,h}}^{\text{mod}}=P_{t,h}^{demand}-\sum_{d=1}^{N_{DRP}}\hbar_{DR}(d,t)\ ,\quad \forall t\in T\ ,\ \forall h\in H \quad (19)$$

۲-۲-۲ برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار از دیدگاه ISO

معیار و هدف برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی از دیدگاه ISO اصلاح به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود: ترازکردن حاشیه رزرو یا به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری. در این مقاله، معیار برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی ترازکردن حاشیه رزرو که به معنای تضمین حاشیه رزرو در طول دوره مطالعه است و به حداقل رساندن میزان آلایندگی به‌صورت توأمان می‌باشد. تابع هدف برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی به‌صورت زیر است [۲۰]

$$\min\sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H}(w_r(R^{t,h}(S_{ISO})^2+w_e(Emitted_{Pollution})) \quad (20)$$

در حالی که

$$R^{t,h}(S_{ISO})=\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}g_{i,j}^{\max}.(1-X_{i,j}^{t}(S_{ISO}))-P_{D_{t,h}}^{\text{mod}}}{P_{D_{t,h}}^{\text{mod}}} \quad (21)$$

و

$$Emitted_{Pollution}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_i}(\alpha_{i,j}+\beta_{i,j}g_{i,j}^{t,h}(S_{ISO})+\gamma_{i,j}(g_{i,j}^{t,h}(S_{ISO}))^2)}{Emitted_{ref}} \quad (22)$$

مجموعه‌ای از قیدهای مسئله برنامه نگهداشت تولیدی از دیدگاه ISO در زیر بیان شده است

$$R^{t,h}(S_{ISO})\ge R_{\min}\ ,\ \forall t\in T,\forall h\in H \quad (23)$$

قیود نگهداشت (۵) و (۶) را که قبلاً ذکر شده‌اند در این بخش در نظر می‌گیریم. ISO مسئله برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی را با اعمال قیود ذکرشده حل می‌نماید.

۲-۳ فرایند هماهنگ‌سازی

روش هماهنگ‌سازی باعث دستیابی به یک برنامه تعمیر و نگهداشت تولیدی می‌شود که ملاک حداکثرسازی سود تولیدکنندگان را تأمین کند، در حالی که به سطح مطلوبی از رزرو در هر ساعت از سال و در نتیجه به سطح اطمینان مناسب دست یابد. در روش هماهنگ‌سازی ISO سیگنال اصلاح که شامل ترم تشویق/جریمه است را به‌منظور تشویق تولیدکنندگان برای اصلاح برنامه نگهداشت خود ایجاد می‌نماید. مراحل برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی در محیط تجدید ساختاریافته با در نظر گرفتن منابع سمت تقاضا به‌صورت زیر می‌باشد:

۱) هر تولیدکننده مسئله برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی با هدف حداکثرسازی سود را به‌صورت مستقل و با در نظر گرفتن رفتار استراتژیک دیگر تولیدکنندگان حل می‌نماید و سپس برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی پیشنهادی خود را به ISO ارسال می‌کند.

۲) ISO ابتدا اقدام به حداکثرسازی سود منابع پاسخگویی بار با استفاده از اطلاعات در دسترس می‌نماید و سپس با در نظر گرفتن منابع پاسخگویی بار مبادرت به انجام مسئله برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی با هدف دستیابی به حاشیه رزرو مناسب و کاهش آلایندگی می‌نماید.

۳) ISO قابلیت اطمینان برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی تولیدکنندگان

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱: اطلاعات واحدهای تولیدی.

تولیدکننده ۲		تولیدکننده ۱	
دوره تعمیرات (هفته)	واحد	دوره تعمیرات (هفته)	واحد
۳۱–۳۶	۱	۳۵–۴۰	۱
۸–۱۱	۲	۲۷–۳۱	۲
۹–۱۲	۳	۱۷–۲۰	۳
۳۳–۳۶	۴	۱۴–۱۷	۴
۳۸–۴۱	۵	۴۰–۴۳	۵
۱۳–۱۵	۶	۱۳–۱۵	۶
۳۱–۳۳	۷	۳۴–۳۶	۷
۲۵–۲۷	۸	۲۷–۲۹	۸
۱۴–۱۵	۹	۴–۶	۹
۳۱–۳۳	۱۰	۳۸–۳۹	۱۰
۲۶–۲۷	۱۱	۳۱–۳۲	۱۱
۴۱–۴۲	۱۲	۲۹–۳۰	۱۲
		۳۳–۳۴	۱۳
		۱۴–۱۵	۱۴

را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. اگر برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی مورد ارزیابی رضایت‌بخش باشد، آن برنامه به‌عنوان برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی نهایی برای تولیدکنندگان تأیید می‌گردد و در غیر این صورت، فرایند در مرحله ۴ دنبال می‌شود.

۴) ISO برای هر دوره زمانی ترم تشویق/ جریمه (یکسان برای همه تولیدکنندگان) تعریف می‌کند که تولیدکنندگان را ترغیب نماید که زمان نگهداشت تولیدی خود را از دوره‌های با حاشیه رزرو پایین به دوره‌های با حاشیه رزرو بالاتر اصلاح نمایند. ترم تشویق و جریمه به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

اختلاف درجه دوم بین شاخص قابلیت اطمینان هر دو برنامه تعمیر و نگهداری در دوره زمانی t و تکرار v به‌صورت زیر است [۲۱]

$$\delta_v^{t,h} = [R_{Gen,v-1}^{t,h} - R_{ISO}^{t,h}]\left|R_{Gen,v-1}^{t,h} - R_{ISO}^{t,h}\right| \quad , \quad \forall t \in T \ , \ \forall h \in H \qquad (۲۴)$$

باید توجه داشت که $\delta_v(t)$ نمی‌تواند همواره مثبت یا همواره منفی باشد. $\delta_v(t)$ مثبت/منفی به این معنی است که در مرحله متناظر در تمامی دوره‌های زمانی بهترشدن/ بدترشدن شاخص امنیت را به دنبال دارد.

پارامتر نرمالیزه‌شده تشویق/ جریمه به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۱]

$$\lambda_v^{t,h} = \frac{\delta_v^{t,h} + \left|\delta_v^{t,h}\right|}{\sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H}[\delta_v^{t,h} + \left|\delta_v^{t,h}\right|]} - \frac{\left|\delta_v^{t,h}\right| - \delta_v^{t,h}}{\sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H}[\left|\delta_v^{t,h}\right| - \delta_v^{t,h}]} \quad , \quad \forall t \in T \ , \ \forall h \in H \qquad (۲۵)$$

ترم اول سمت راست (۲۵) برای اختلاف‌های درجه دوم منفی صفر می‌شود در حالی که ترم دوم برای اختلاف‌های درجه دوم مثبت صفر می‌گردد. بنابراین جریمه‌های مثبت و منفی به‌صورت مستقل نرمالیزه می‌شوند.

۵) هر تولیدکننده برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی خود را به‌صورت مستقل با در نظر گرفتن تابع هدف اصلاح‌شده که شامل ترم تشویق/ جریمه (سیگنال اصلاح) است، حل می‌نمایند. تابع هدف

جدول ۲: استراتژی قیمت‌دهی منابع پاسخگویی بار.

v	$\sigma(v,d)$	$\lambda(v,d)$
۰	٪۳۳ کل پاسخگویی بار	۱۱
۱	٪۶۶ کل پاسخگویی بار	۱۳
۲	٪۱۰۰ کل پاسخگویی بار	۱۵

اصلاح‌شده به‌صورت زیر می‌باشد

$$\prod_i(S) = \sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{N_i}\{(\pi^{t,h}(S).g_{i,j}^{t,h}(S) - C_{i,j}^{t,h}(S)) - (m_{i,j} - \xi_V\lambda_v^{t,h}).g_{i,j}^{\max}.X_{i,j}^{t}(S)\} \qquad (۲۶)$$

مجدداً هر تولیدکننده برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی اصلاح‌شده را به ISO ارائه می‌دهد.

۶) ISO برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی اصلاح‌شده تولیدکنندگان را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و اگر شاخص قابلیت اطمینان را تأمین کرد فرایند تکرارشونده خاتمه می‌یابد. در غیر این صورت، فرایند به مرحله ۴ باز می‌گردد.

در شکل ۲ فرایند کاری برنامه نگهداشت تولیدی بر اساس روش هماهنگ‌سازی به صورت خلاصه بیان شده است.

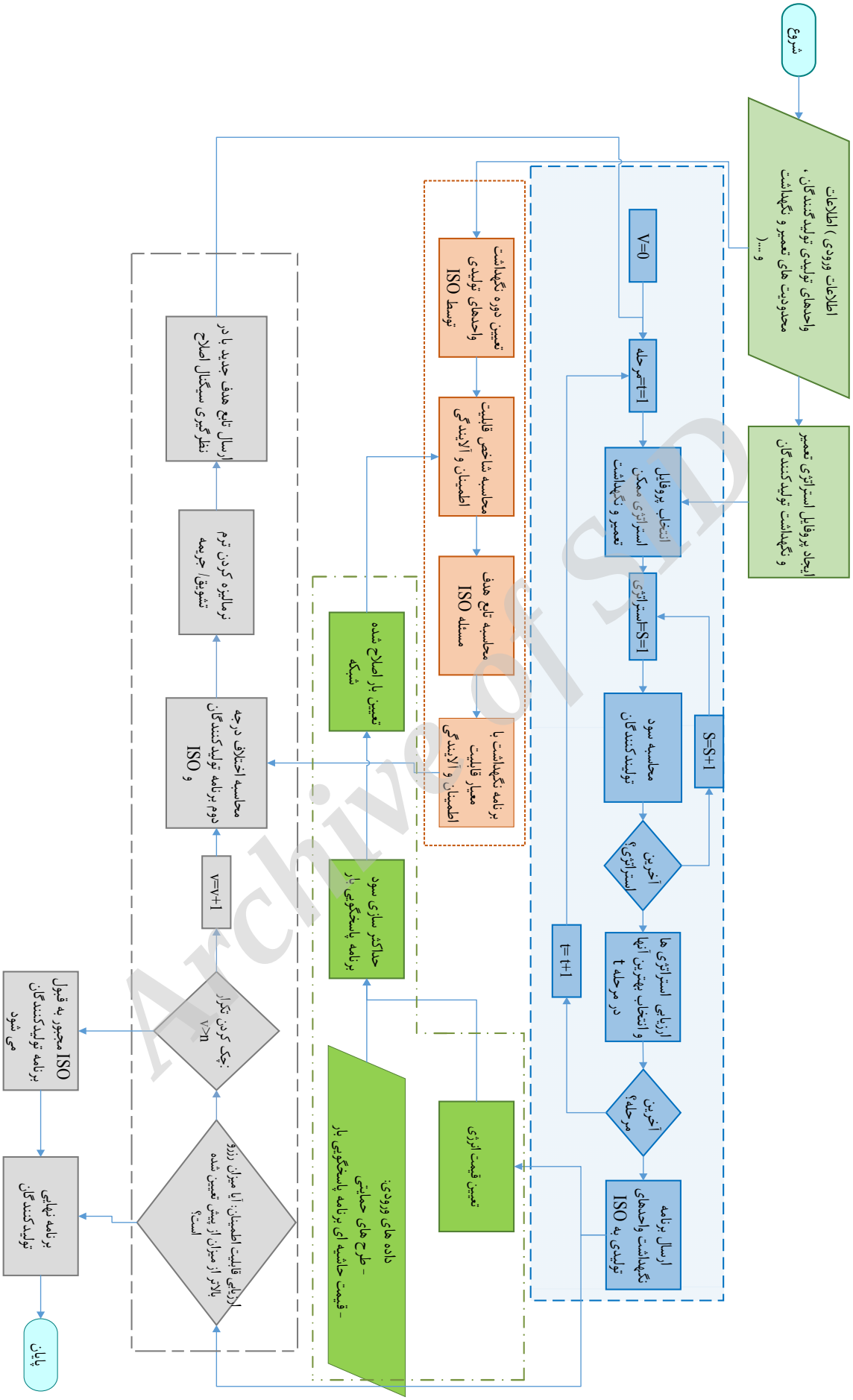
۳- مطالعات عددی و نتایج

مدل پیشنهادی بر روی سیستم IEEE-RTS ۲۴ باس اصلاح‌شده که شامل GENCO ۲ می‌باشد اعمال گردیده است. افق زمانی مورد مطالعه یک سال و پیک بار MW ۲۱۰۰ می‌باشد. اطلاعات مربوط به ۲۶ واحد نیروگاهی در جدول ۱ مشاهده می‌شود [۲۴]. در این مطالعه، حاشیه رزرو برابر مقدار ٪۲۰ بار شبکه در نظر گرفته شده است. حداکثر بار قابل قطع در هر باس برابر با ٪۵ بار کل باس مورد نظر در سال لحاظ گردیده و همچنین استراتژی قیمت‌دهی مربوط به برنامه‌های پاسخگویی بار در جدول ۲ آورده شده است. میزان هزینه قابل پرداخت به مشتریان در ازای قطع بار در هر ساعت برابر با ٪۳۰ قیمت بازار انرژی در نظر گرفته شده و در این مطالعه، سطح بار مجاز انرژی تأمین‌نشده نیز صفر لحاظ گردیده است. در [۲۳] تابع آلایندگی مربوط به واحدهای تولیدی در شبکه IEEE-RTS را به‌صورت تقریبی از تابع سوخت در نظر گرفته است. میزان انتشار گازهای SO_2 و NO_x در نیروگاه‌ها به ترتیب برابر ۰٫۲ و ۰٫۵ در نظر گرفته شده‌اند. بر طبق جدول ۱ تولیدکننده ۱ دارای ۱۴ واحد تولیدی و تولیدکننده ۲ دارای ۱۲ واحد تولیدی می‌باشد که تولیدکننده ۱ و تولیدکننده ۲ هر کدام به ترتیب در هر هفته 2^{14} و 2^{12} استراتژی برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی دارند. اگرچه تولیدکنندگان می‌توانند استراتژی برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی خود را از استراتژی‌های امکان‌پذیر انتخاب کنند. به‌صورت هم‌زمان، تولیدکننده ۱ و تولیدکننده ۲ وضعیت واحدهایشان را که به ترتیب به‌صورت $\{x_{1,1}, x_{1,2}, \ldots, x_{1,14}\}$ و $\{x_{2,1}, x_{2,2}, \ldots, x_{2,12}\}$ نشان داده می‌شوند تعیین می‌کنند. در هفته اول، تولیدکننده ۱، 2^{14} گزینه موجود دارد که از این بین می‌تواند استراتژی‌های امکان‌پذیر را برای واحدهای تولیدی خودش انتخاب نماید. وضعیت واحدهایی که در هفته اول تحت تعمیر می‌باشند بر روی تصمیم‌گیری تولیدکننده ۱ در انتخاب استراتژی هفته دوم تأثیر می‌گذارد.

در جدول ۳ نتایج دوره نگهداشت تولیدی برای تولیدکنندگان بدون در نظر گرفتن فرایند هماهنگ‌سازی بر اساس تئوری بازی‌های پویا مشاهده می‌شود. همچنین در شکل ۳ شاخص قابلیت اطمینان برنامه نگهداشت تولیدی برای تولیدکنندگان بدون در نظر گرفتن فرایند هماهنگ‌سازی

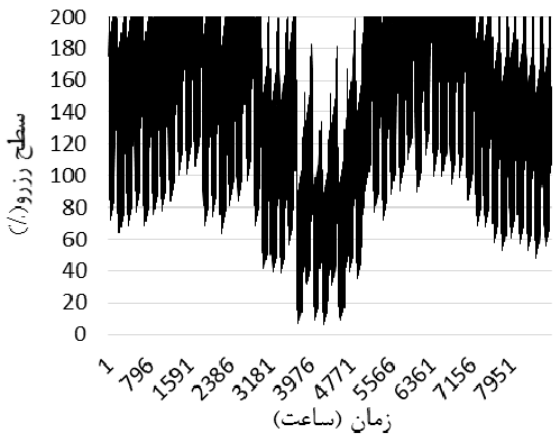
Archive of SID

www.SID.ir

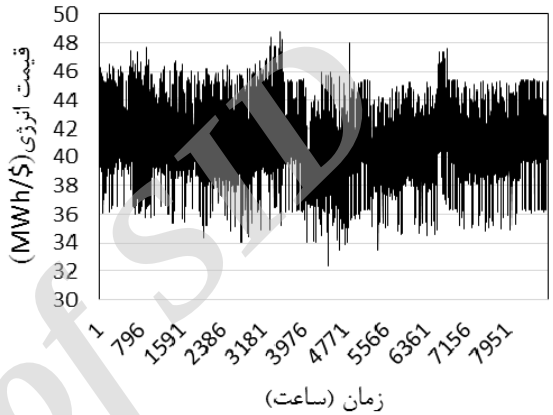


شکل ۲: دیاگرام کلی برنامه نگهداشت واحدهای تولیدی.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۳: سطح رزرو برنامه نگهداشت تولیدکنندگان بدون فرایند هماهنگ‌سازی.

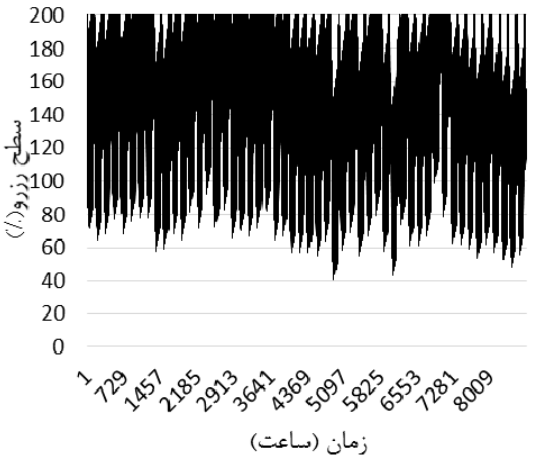


شکل ۴: قیمت انرژی برای برنامه نگهداشت تولیدکنندگان بدون فرایند هماهنگ‌سازی.

جدول ۳: نتایج دوره نگهداشت تولیدکنندگان بدون فرایند هماهنگ‌سازی.

تولیدکننده ۲		تولیدکننده ۱	
دوره تعمیرات (هفته)	واحد	دوره تعمیرات (هفته)	واحد
۲۵–۳۰	۱	۲۳–۲۸	۱
۲۸–۳۱	۲	۱۹–۲۳	۲
۱۲–۱۵	۳	۳۲–۳۵	۳
۱۸–۲۱	۴	۲۶–۲۹	۴
۲۳–۲۷	۵	۱۲–۱۵	۵
۴۶–۴۸	۶	۲۳–۲۵	۶
۲۱–۲۳	۷	۱۲–۱۴	۷
۳۹–۴۱	۸	۱۲–۱۴	۸
۱۹–۲۰	۹	۲۶–۲۸	۹
۱۵–۱۶	۱۰	۲۱–۲۲	۱۰
۱۱–۱۲	۱۱	۳۱–۳۲	۱۱
۳۳–۳۴	۱۲	۲۹–۳۰	۱۲
		۲۰–۲۱	۱۳
		۳۳–۳۴	۱۴

مشاهده می‌شود. نتایج برنامه نگهداشت تولیدی حاکی از آن است که اکثر واحدهای تولیدی در طول هفته‌های ۲۳–۲۸ که مطابق شکل ۴ دارای کمترین میانگین قیمت انرژی می‌باشند تحت تعمیر قرار گرفته است. شکل ۳ حاشیه رزرو برنامه نگهداشت تولیدی تولیدکنندگان را نشان داده که در برخی از دوره‌های مشخص شاخص رزرو کمتر از مقدار ۲۰٪ بار سیستم شده است. بنابراین ISO باید سیگنالی اصلاحی ایجاد نماید که برنامه‌ریزی نگهداشت واحدها را به‌سوی هفته‌هایی با بار کمتر سوق دهد.



شکل ۵: سطح رزرو برنامه نگهداشت تولیدی از دیدگاه ISO با معیار قابلیت اطمینان– آلایندگی.

جدول ۴: نتایج دوره تعمیرات واحدهای نیروگاهی با معیار قابلیت اطمینان– آلایندگی.

تولیدکننده ۲		تولیدکننده ۱	
دوره تعمیرات (هفته)	واحد	دوره تعمیرات (هفته)	واحد
۳۶–۴۱	۱	۹–۱۴	۱
۱۵–۱۸	۲	۲۷–۳۱	۲
۳۴–۳۷	۳	۳۱–۳۴	۳
۳۰–۳۳	۴	۳۳–۳۶	۴
۹–۱۲	۵	۳۷–۴۰	۵
۲۶–۲۸	۶	۴۳–۴۵	۶
۲۵–۲۷	۷	۳۹–۴۱	۷
۸–۱۰	۸	۲۵–۲۷	۸
۲۰–۲۱	۹	۴۶–۴۸	۹
۱۲–۱۳	۱۰	۳۵–۳۶	۱۰
۱۰–۱۱	۱۱	۸–۹	۱۱
۱۶–۱۷	۱۲	۱۱–۱۲	۱۲
		۳۷–۳۸	۱۳
		۲۶–۲۷	۱۴

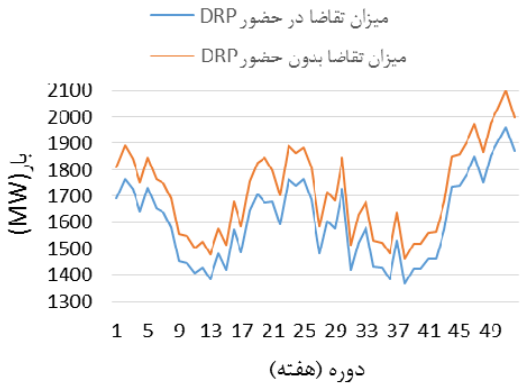
در جدول ۴ و شکل ۵ به ترتیب دوره تعمیرات و حاشیه رزرو محاسبه‌شده بر مبنای معیار قابلیت اطمینان– آلایندگی نشان داده شده است که حاشیه رزرو در تمامی هفته‌های سال بالاتر از ۲۰٪ بار سیستم می‌باشد. با توجه به در نظرگیری ملاحظات قابلیت اطمینان– زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی نگهداشت واحدهای تولیدی در حضور منابع پاسخگوی بار شاخص قابلیت اطمینان نسبت به برنامه نگهداشت تولیدکنندگان تغییر کرده است. همچنین کران پایین شاخص سطح رزرو در این حالت از میزان تراز مطلوب‌تری نسبت به حالت قبل برخوردار است. همچنین مشاهده می‌شود واحدهایی با میزان آلایندگی کمتر که در جدول ۴ مشخص شده‌اند، در بازه‌های زمانی متفاوت تحت تعمیر قرار گرفته‌اند. این امر موجب می‌شود در طول بازه برنامه‌ریزی امکان بهره‌برداری از نیروگاه‌هایی با آلایندگی کمتر وجود داشته باشد. ISO برنامه نگهداشت تولیدی تولیدکنندگان را با برنامه نگهداشت تولیدی قابلیت اطمینان– آلایندگی محور مقایسه می‌کند.

همچنین در شکل ۶ تأثیر برنامه‌های DR بر روی پروفیل بار نشان داده شده است. میزان بار قطع‌شده در هر دوره به میزان هزینه پرداختی به مشترکین بستگی دارد.

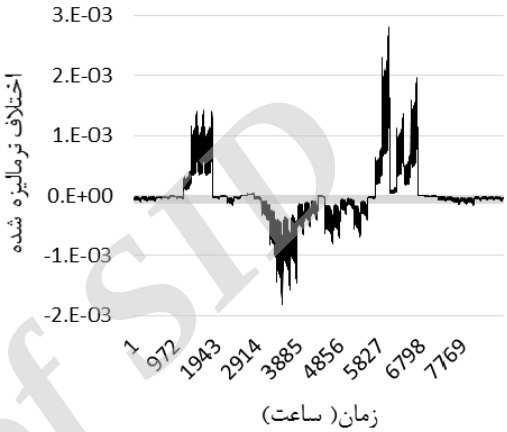
با توجه به این که حاشیه رزرو برنامه نگهداشت تولیدی تولیدکنندگان

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۶: پروفیل بار در حضور منابع پاسخگویی بار.

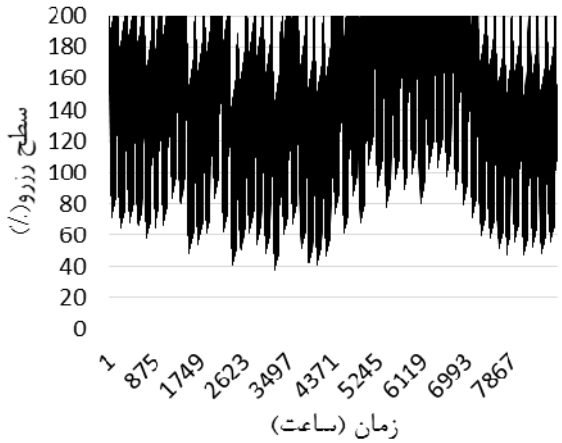


شکل ۷: اختلاف نرمالیزه‌شده بین برنامه نگهداشت تولیدکنندگان و ISO.

در برخی از دوره‌های شاخص رزرو کمتر از مقدار ۲۰٪ بار سیستم شده است، ISO ملزم به ایجاد سیگنال اصلاحی می‌باشد که برنامه‌ریزی نگهداشت واحدها را به سوی هفته‌هایی با بار کمتر سوق دهد. به‌منظور ایجاد سیگنال اصلاح، ISO اختلاف بین سطح رزرو برنامه نگهداشت تولیدی تولیدکنندگان و برنامه نگهداشت تولیدی با معیار قابلیت اطمینان محور را با یکدیگر مقایسه می‌کند. در شکل ۷ اختلاف $\lambda_1^{t,h}$ که در اولین فرایند هماهنگ‌سازی محاسبه شده است مشاهده می‌شود. تمامی تولیدکنندگان سیگنال اصلاح $\xi_1.\lambda_1^{t,h}$ را دریافت می‌کنند و سپس برنامه نگهداشت تولیدی اصلاح‌شده خود را به ISO ارسال می‌نمایند. فرایند هماهنگ‌سازی تا هنگامی که تمامی برنامه نگهداشت تولیدی تولیدکنندگان معیار قابلیت اطمینان را تأمین نمایند تکرار می‌شود. در این مطالعه، تعداد تکرار مورد نیاز به‌منظور رسیدن به برنامه نگهداشت تولیدی نهایی، ۳ تکرار بود. همچنین مقدار بهینه ξ برابر با ۸۵۰ می‌باشد.

در جدول ۵ نتایج برنامه‌ریزی نگهداشت تولیدی نهایی با اعمال فرایند هماهنگ‌سازی ارائه شده است. دوره تعمیرات غالب واحدهای تولیدی تولیدکنندگان با اعمال فرایند هماهنگ‌سازی به دوره دیگر انتقال پیدا کرده است. به عنوان مثال، دوره تعمیرات واحد تولیدی g_{11} و g_{21} به ترتیب از هفته‌های ۲۳-۲۸ و ۲۵-۳۰ که دارای میزان تقاضا بالایی می‌باشند به ترتیب به هفته‌های ۱۵-۲۰ و ۱۰-۱۵ که دارای پیک باری کمتری می‌باشد انتقال پیدا کرده است. شکل ۸ سطح رزرو برنامه نگهداشت نهایی تولیدکنندگان را نشان می‌دهد که حاشیه رزرو در تمامی هفته‌های سال بالاتر از ۲۰٪ بار سیستم می‌باشد.

در جدول ۶ سود تولیدکنندگان در GMS بدون در نظرگیری فرایند هماهنگ‌سازی و GMS با درنظرگیری فرایند هماهنگ‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین در جدول ۷ میزان تشویق/ جریمه برای هر



شکل ۸: سطح رزرو برنامه نگهداشت تولیدی نهایی.

جدول ۵: نتایج دوره نگهداشت تولیدی نهایی.

تولیدکننده ۲		تولیدکننده ۱	
دوره تعمیرات (هفته)	واحد	دوره تعمیرات (هفته)	واحد
۱۰-۱۵	۱	۱۵-۲۰	۱
۴-۷	۲	۲۴-۲۸	۲
۹-۱۲	۳	۴۶-۴۹	۳
۱۴-۱۷	۴	۳۵-۳۸	۴
۴۲-۴۵	۵	۲۰-۲۳	۵
۱۰-۱۲	۶	۹-۱۲	۶
۴۱-۴۳	۷	۲۴-۲۶	۷
۲۱-۲۳	۸	۴۰-۴۲	۸
۱۵-۱۶	۹	۳۳-۳۵	۹
۲۲-۲۳	۱۰	۴۵-۴۶	۱۰
۳۳-۳۴	۱۱	۳۳-۳۴	۱۱
۳۹-۴۰	۱۲	۳۳-۳۴	۱۲
		۴۰-۴۱	۱۳
		۹-۱۰	۱۴

تولیدکننده نمایش داده است. با توجه به جداول ۶ و ۷ می‌توان پی برد که تولیدکننده ۱ (تولیدکننده ۲) با دریافت تشویق (تشویق) میزان سودش در برنامه GMS نهایی نسبت به برنامه GMS اولیه کاهش (افزایش) یافته است. جداول ۸ و ۹ به ترتیب میزان انتشار آلودگی در GMS با معیار قابلیت اطمینان- آلایندگی از دیدگاه ISO و GMS نهایی را در عدم حضور منابع پاسخگوی بار و در حضور منابع پاسخگوی بار نشان می‌دهد. با توجه به جداول آلایندگی مشاهده می‌شود میزان آلایندگی در برنامه نهایی نگهداشت واحدهای نیروگاهی در حضور منابع پاسخگویی بار نسبت به عدم حضور برنامه‌های پاسخگوی بار کاهش چشمگیری دارد.

٤- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از منابع سمت تقاضا به عنوان منبعی مجازی برای تدارک رزرو مورد نیاز سیستم استفاده شده و همچنین اثرات زیست‌محیطی منابع پاسخگوی بار بر برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت واحدهای نیروگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین با ارائه مدلی قابلیت اطمینان- زیست‌محیطی محور، اثرات منابع پاسخگویی بار بر برنامه‌ریزی نگهداشت پیشگیرانه بررسی می‌شود. از سوی دیگر به‌منظور آنالیز رفتار استراتژیک تولیدکنندگان، برنامه نگهداشت واحدهای نیروگاهی از دیدگاه تولیدکنندگان با استفاده از تئوری بازی‌های غیر مشارکتی پویا مدل شده

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۶: نتایج سود تولیدکنندگان.

تولیدکننده	سود بدون فرایند هماهنگ‌سازی [M$] (A)	سود با فرایند هماهنگ‌سازی [M$] (A)	اختلاف [M$] (A-B)
تولیدکننده-۱	۳۴۴٫۵۶	۳۴۳٫۸۷	۰٫۶۹
تولیدکننده-۲	۲۷۸٫۸۲	۲۸۱٫۳۸	-۲٫۵۶

جدول ۷: ترم تشویق/ جریمه هر تولیدکننده.

تولیدکننده	تشویق/ جریمه [M$]	درصد (٪)
تولیدکننده-۱	۴٫۶۲۳۹	۱٫۳۵
تولیدکننده-۲	۷٫۶۳۹۹	۲٫۷۲

جدول ۸: میزان انتشار آلایندگی برنامه نگهداشت در عدم حضور منابع پاسخگویی بار.

نوع آلاینده	برنامه GMS قابلیت اطمینان- آلایندگی محور	برنامه GMS نهایی
SO_2 (mlbs/years)	۳۷٫۵۸۶	۳۸٫۶۸۳
NO_x (mlbs/years)	۹۳٫۹۶۵	۹۶٫۷۰۷۵

جدول ۹: میزان انتشار آلایندگی برنامه نگهداشت در حضور منابع پاسخگویی بار.

نوع آلاینده	برنامه GMS قابلیت اطمینان- آلایندگی محور	برنامه GMS نهایی
SO_2 (mlbs/years)	۳۴٫۹۸۱	۳۵٫۷۱۱
NO_x (mlbs/years)	۸۷٫۴۵۴	۸۷٫۷۷۸

است. فرایند هماهنگ‌سازی بر اساس ارزیابی ترم قابلیت اطمینان طراحی گردیده و سیگنال اصلاح به تولیدکنندگان به‌منظور اصلاح برنامه‌ریزی نگهداشت واحدهای نیروگاهی ارسال می‌شود. فرایند هماهنگ‌سازی مکانیزمی است که دیدگاه‌های تولیدکنندگان انرژی الکتریکی و ISO را در نظر می‌گیرد. نتایج عددی برای یک سیستم شامل ۲ تولیدکننده، امکان دست‌یابی به GMS نهایی برای تولیدکنندگان با استفاده از فرایند هماهنگ‌سازی ادغام‌شده در چارچوب تئوری بازی در حضور منابع مدیریت سمت تقاضا را نشان می‌دهد.

مراجع

[1] FERC, Staff Report, *Assessment of Demand Response and Advanced Metering*, [Online]. Available: http://www.FERC.gov; Aug. 2006, [Accessed 14.08.12].

[2] A. Abdollahi, M. P. Moghaddam, M. Rashidinejad, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Investigation of economic and environmental-driven demand response measures incorporating UC," *IEEE Trans. on Smart Grid,* vol. 3, no. 1, pp. 12-25, Mar. 2012.

[3] E. Lakic, G. Artac, and A. F. Gubina, "Agent-based modeling of the demand-side system reserve provision," *Electric Power Systems Research*, vol. 124, pp. 85-91, Jul. 2015.

[4] M. Parsa Moghaddam, A. Abdollahi, and M. Rashidinejad, "Flexible demand response programs modeling in competitive electricity markets," *Applied Energy*, vol. 88, no. 9, pp. 3257-3269, Sept. 2011.

[5] L. Wu, M. Shahidehpour, and T. Li, "GENCO's risk-based maintenance outage scheduling," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 127-136, Feb. 2008.

[6] PJM Interconnection. *Pre-scheduling Operations*. Available: http://www.pjm.com/w/media/documents/manuals/m10.ashx; 2010, [Accessed14.08.12].

[7] California Independent System Operator. *Outage Coordination Protocol*. Available: http://www.caiso.com/docs/2002/03/20/200203201008509285.pdf; 2002, [Accessed 14.08.12].

[8] New York Independent System Operator. *Outage Schedule Manual*. Available: http://www.nyiso.com/public/webdocs/documents/manuals/opertons/outage_sched_mnl.pdf; 2011 [Accessed 14.08.12].

[9] The North American Electric Reliability Corporation. *Operating Manual*. Available http://www.nerc.com/files/opman_3_2012.pdf> 2012[accessed 14.08.12].

[10] A. Bozorgi, M. M. Pedram, and G. R. Yousefi, "Unit maintenance scheduling: a robust model, based on fuzzy cost factors and peak loads," *Int J. Electr Power Energy Syst*, vol. 79, pp. 142-149, Jul. 2016.

[11] M. Mollahassani-pour, M. Rashidinejad, A. Abdollahi, M. A. Forghani, "Demand response resources' allocation in security-constrained preventive maintenance scheduling via MODM method," *IEEE Syst J.*, vol. 11, no. 2, pp. 1196-1207, Jun. 2017.

[12] M. Mollahassani-pour, M. Rashidinejad, and A. Abdollahi, "Appraisal of eco-friendly preventive maintenance scheduling strategy impacts on GHG emissions mitigation in smart grids," *J. Clean Prod*, vol. 143, pp. 212-223, 1 Feb. 2017.

[13] P. Mazidi, Y. Tohidi, A. Ramos, and M. A. Sanz-Bobi, "Profit-maximization generation maintenance scheduling through bi-level programming," *Eur J. Oper Res*, vol. 264, no. 3, pp. 1045-1057, 1 Feb. 2018.

[14] M. Mahvi and M. Ardehali, "Optimal bidding strategy in a competitive electricity market based on agent-based approach and numerical sensitivity analysis," *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6367-6374, Nov. 2011.

[15] J. Wang, Z. Zhou, and A. Botterud, "An evolutionary game approach to analyzing bidding strategies in electricity markets with elastic demand," *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 3459-3467, May 2011.

[16] A. M. Foley, B. P. O. Gallachoir, J. Hur, R. Baldick, and E. J. McKeogh, "A strategic review of electricity systems models," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 4522-4530, Dec. 2010.

[17] K. Sarica, G. Kumbaroglu, and I. Or, "Modeling and analysis of a decentralized electricity market: an integrated simulation/optimization approach," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 830-852, Aug. 2012.

[18] J. H. Kim, J. B. Park, J. K. Park, and Y. H. Chun, "Generating unit maintenance scheduling under competitive market environments," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 189-194, Mar. 2005.

[19] D. Jia, H. Cheng, W. Zhang, Z. Hu, J. Yan, and M. Chen, "A new game theory-based solution methodology for generation maintenance strategy," *European Trans. on Electrical Power*, vol. 19, no. 2, pp. 225-239, Mar. 2009.

[20] C. G. Min, M. K. Kim, J. K. Park, and Y. T. Yoon, "Game-theory-based generation maintenance scheduling in electricity markets," *Energy*, vol. 55, pp. 310-318, 15 Jun. 2013.

[21] A. J. Conejo, R. Garcia-Bertrand, and M. Diaz-Salazar, "Generation maintenance scheduling in restructured power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 984-992, May 2005.

[22] P. K. Dutta, Strategies and Games: Theory and Practice, the MIT Press, 1999.

[23] M. Parvania and M. Fotuhi-Firuzabad, "Demand response scheduling by stochastic SCUC," *IEEE Trans. on Smart Grid,* vol. 1, no. 1, pp. 89-98, Jun. 2010.

[24] S. J. Wang, S. M. Shahidehpour, D. S. Kirschen, S. Mokhtari, and G. D. Irisarri, "Short-term generation scheduling with transmission and environmental constraints using an augmented Lagrangian relaxation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1294-1301, Aug. 1995.

وحید شریفی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ از دانشگاه شهید باهنر کرمان به پایان رسانده و از سال ۹۷ در دانشگاه شهید باهنر کرمان در مقطع دکترای مهندسی برق مشغول به تحصیل می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت، منابع انرژی تجدیدپذیر، شبکه‌های هوشمند و مدیریت انرژی.

مسعود رشیدی نژاد در سال ۱۳۶۵ مدرک کارشناسی و در سال ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق از دانشگاه صنعتی اصفهان دریافت نمود طی سال های ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۶ نام برده به عنوان مربی به عضویت هیأت علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان درآمده و به تدریس مشغول بود و پس از آن به دوره دکتری در

Archive of SID

www.SID.ir

دانشگاه برونل انگلستان وارد گردید و در سال ۱۳۸۰ موفق به اخذ درجه دکتری و پس از آن درجه پسادکتری از همان دانشگاه در سال ۱۳۸۲ در رشته مهندسی برق گردید. دکتر رشیدی نژاد در حال حاضر استاد بخش برق دانشگاه شهید باهنر کرمان می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان، برنامه‌ریزی توسعه و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، تجدید ساختار سیستم های قدرت، بازار برق، ادوات FACTS و مدیریت انرژی می‌باشد.

امیر عبدالهی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق قدرت، به‌ترتیب در دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۳۸۶ و دانشگاه صنعتی شریف در سال ۱۳۸۸ به پایان رسانده است. وی تحصیلات تکمیلی خود را در مقطع دکتری در دانشگاه تربیت مدرس ادامه داد و در سال ۱۳۹۱ موفق به اخذ مدرک دکتری در رشته مهندسی برق از این دانشگاه گردید. دکتر عبدالهی بلافاصله بعد از اتمام مقطع دکتری در سال ۱۳۹۱ ، به عضویت هیأت علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان درآمده و در حال حاضر دانشیار بخش برق می‌باشد. زمینه‌های علاقمندی ایشان، بازار برق، شبکه‌های هوشمند، برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت، و مدیریت انرژی می‌باشد.

مژگان ملاحسنی‌پور تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق گرایش سیستم‌های قدرت، به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۶ از دانشگاه شهید باهنر کرمان اخذ نمود. از سال ۱۳۹۶، استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سیستان و بلوچستان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، شبکه‌های هوشمند و بازار برق می‌باشند.

Archive of SID

www.SID.ir