دانشگاه زنجان

دانشکده‌ی مهندسی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی

مهندسی برق - قدرت

بررسی احتمالی تاثیر منابع انرژی تجدیدپذیر در میزان رزرو گردان توسط نرم افزار GAMS

نگارش

مهسا عبادت پرست

استاد راهنما

دکتر عباس ربیعی

شهریور ۱۳۹۶

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب مهسا عبادت پرست متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه با عنوان "بررسی احتمالی تاثیر انرژی‌های تجدیدپذیر در میزان رزرو گردان " حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرکِ هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان)، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه، از اعتبار ساقط خواهد شد. کلیه‌ی حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه زنجان می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو

امضا

تقدیم به :

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم ، والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، هستی و انسان بودن را معنا کردند....

همچین به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند .

قدردانی :

سپاس خـدای را کـه سـخنوران، در سـتودن او بماننـد و شـمارندگان، شـمردن نعمـت هـای او ندانـند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنـان که وجودمان وام‌دار وجودشان است.

با تقدیر و تشکر از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای **دکتر عباس ربیعی** که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند.

چکیده

مشارکت واحدها برای برنامه‌ریزی تولید در زمان پیش‌رو استفاده می‌شود. برنامه‌ریزی اقتصادی برای به مدار آمدن و تولید توان واحدها و همچنین تامین رزرو چرخان، در حالی‌که همه‌ی قیود مربوط به واحدها ارضا می‌شوند، انجام می‌پذیرد. از آن‌جایی که توان الکتریکی را نمی‌توان در مقادیر عظیم ذخیره نمود، سیستم به‌وسیله‌ی واحدهای تولید توان که در مدار هستند این انرژی مورد نیاز را به صورت آنی تامین می‌کند. برای تامین این درخواست با کم‌ترین هزینه، واحدهای تولید باید با یک راه حل مطمئن برنامه‌ریزی شوند.

انرژی باد به‌طور کلی ازنظر مصرف سوخت نوعی انرژی تجدیدپذیر است که به لحاظ زیست محیطی مورد توجه می‌باشد. اگرتوان حاصل از انرژی بادی را بتوان با یک قیمت معقول به مصرف کننده عرضه کرد، بدون آن‌که امنیت سیستم قدرت وقابلیت اطمینان آن کاهش یابد(بدتر شود)، می‌تواند یک تکنولوژی با ظرفیت وسیعی قلمداد شود.

در این پایان‌نامه ما می‌خواهیم به بررسی تاثیرمنابع انرژی تجدید پذیر در میزان رزرو چرخان و بهینه سازی تابع هدف بپردازیم.

کلمات کلیدی: مشارکت واحدها، برنامه‌ریزی اقتصادی، انرژی تجدیدپذیر، رزرو چرخان

فهرست مطالب **صفحه**

۱مقدمه ۱

۱-۱ انرژی تجدیدپذیر ۲

۱-۲ مزیت رزرو چرخان ۲

۱-۳ چگونگی مشارکت واحدها ۲

۱-۴ پیش‌بینی بار ۳

۱-۵ خلاصه‌ای از راه‌کار حل مسئله و اهداف ۴

۲ مدل سازی شبکه‌ی مورد مطالعه ۶

۲-۱ در مدار قرار گرفتن نیروگاه ها ۷

۲-۲ توزیع اقتصادی بار و در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها ۷

۲-۳ قیود موجود در مسئله‌ی در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها ۸

۲-۳-۱ قید ذخیره‌ی چرخان ۸

۲-۳-۲ قیود واحدهای حرارتی ۹

۲-۴ مشخصات واحدهای بخاری ۱۰

۲-۴-۱ منحنی ورودی ـ خروجی ۱۱

۲-۴-۲ مشخصه ی نرخ خالص حرارتی ۱۱

۲-۴-۳ مشخصه نرخ افزایشی حرارتی ۱۲

۲-۵ منحنی بار ۱۲

۲-۶ بار پایه ، بار متوسط و بار ماکزیمم (پیک) ۱۳
۲-۷ تعریف مسئله ۱۴
۲-۷-۱ داده های ورودی و خروجی ۱۴
۲-۷-۲ ساختار شبکه و مدل مورد بررسی ۱۵
۲-۷-۳ مجموعه‌های تعریف شده در مسئله ۱۵
۲-۷-۴ متغییرهای مسئله ۱۶
۲-۷-۵ پارامترها و جداول ۱۷
۲-۸ حل مسئله ۱۹
۲-۸-۱ مرحله‌ی اول ـ حل مسئله‌ی UC با تابع درجه‌ی دوم (معادلات غیرخطی) ۱۹
۲-۸-۲ مرحله‌ی دوم ـ حل مسئله‌ی UC با تابع هدف خطی شده ۲۵
۲-۸-۳ مرحله‌ی سوم ـ حل مسئله‌ی UC با درنظر گرفتن قیود پخش بار DC ۲۸
۲-۸-۴ مرحله‌ی چهارم ـ پخش‌بارDC ، با درنظر گرفتن قیود رزرو چرخان ۳۱
۲-۸-۵ مرحله‌ی پنجم ـ بررسی مسئله با ورود یک واحد تجدیدپذیرغیرقطعی (بادی) به شبکه ۳۳
۲-۸-۶ مرحله‌ی ششم ـ بررسی مسئله با ورود سه واحد تجدیدپذیرغیرقطعی (بادی) به شبکه ۳۸
۳ شبیه سازی و نتایج عددی ۴۱
۳-۱ نتایج حاصل از اجرای برنامه در مرحله‌ی اول: تابع هدف غیرخطی ۴۲
۳-۲ نتایج حاصل از اجرای برنامه در مرحله‌ی دوم : تابع هدف خطی شده ۴۴
۳-۳ نتایج حاصل از اجرای برنامه در مرحله‌ی سوم : اعمال قیود پخش‌بارDC ۴۴
۳-۴ نتایج حاصل از اجرای برنامه در مرحله‌ی چهارم : اعمال قیود رزرو چرخان ۴۹

۳-۵ نتایج حاصل از اجرای برنامه در مرحله پنجم : حضور یک واحد بادی در شبکه.....۵۲
۳-۶ نتایج حاصل از اجرای برنامه در مرحله ششم: حضور سه واحد بادی در شبکه ۵۷
۴ نتیجه‌گیری ، جمع بندی و پیشنهادات **۶۲**
۴-۱ نتیجه‌گیری : ۶۳
۴-۲ جمع بندی ۶۳
۴-۳ پیشنهادات.....۶۴
فهرست مراجع **۶۵**

فهرست اشکال :

شکل ۲-۱: منحنی ورودی ـ خروجی[۳].....۱۱

شکل ۲-۲: نمودار بارمورد مطالعه در۲۴ساعت.....۱۳

شکل ۲-۳ : شبکه ی استاندارد شش شینه [۷] ۱۵

شکل ۲-۴: مشخصه ی ورودی ـ خروجی واحد اول (تقریب تکه ای ـ خطی روی تابع درجه دو) ۲۵

شکل ۲-۵ : توزیع سرعت باد.....۳۵

شکل ۳-۱ : توان تولیدی واحدها در۲۴ ساعت باتوجه به منحنی بار ۴۳

شکل ۳-۲ : مقایسه‌ی توان خروجی واحد۱،درحالت پخش‌بارDC وحالت بدون قیود پخش‌بار ۴۵

شکل ۳-۳ : توان تولیدی واحد اول(A) دربازه‌ی۲۴ساعته وقیمت آن(B) ۴۶

شکل ۳-۴: توان تولیدی واحد دوم (A) دربازه‌ی۲۴ساعته وقیمت آن(B) ۴۶

شکل ۳-۵: توان تولیدی واحد سوم (A)دربازه‌ی۲۴ساعته وقیمت آن(B) ۴۷

شکل ۳-۶ : نمودار تغییرات زاویه‌ی ولتاژ باس‌ها ۴۸

شکل ۳-۷ : رزرو چرخان ساعتی و ده درصد مجموع بار باس‌ها در هر ساعت ۴۹

شکل ۳-۸ : میزان رزرو چرخان ساعتی به تفکیک واحدها.....۵۰

شکل ۳-۹: مقایسه ی قیمت توان واحد دوم در دوحالت تامین رزروچرخان و بدون آن.....۵۱

شکل ۳-۱۰: میزان مشارکت واحدها در تامین رزرو چرخان.....۵۱

شکل ۳-۱۱: مقایسه ی رزرو چرخان ساعتی بعد از ورود نیروگاه بادی به شبکه ۵۲

شکل ۳-۱۲: مقایسه ی هزینه ی تولید توان.....۵۳

شکل ۳-۱۳: اختلاف هزینه های تولید توان با وجود نیروگاه بادی و بدون آن ۵۳

شکل ۳-۱۴: توان خروجی واحد بادی درساعت۱۶ برحسب تعداد تکرارهای مونت کارلو ۵۴

شکل ۳-۱۵: نتیجه ی مقدار هزینه ی توان تولیدی براساس شبیه سازی مونت کارلو ۵۵

شکل ۳-۱۶ : تعداد دفعات خاموش بودن واحد دوم در۲۴ ساعت ۵۶
شکل ۳-۱۷ : مقایسه‌ی رزرو چرخان ساعتی با وجود۳ واحد بادی و ۱ واحد بادی برحسبMW ۵۷
شکل ۳-۱۸: هزینه‌ی تولید توان بر اساس تعداد تکرارهای مونت کارلو.....۵۸
شکل ۳-۱۹: تعداد تکرارهای مربوط به خاموش بودن واحد دوم ۵۹
شکل ۳-۲۰: تعداد تکرارهای مربوط به خاموش بودن واحد سوم.....۵۹
شکل ۳-۲۱: رزرو چرخان کل با وجود سه واحد بادی برحسبMW.....۶۰
شکل ۳-۲۲: رزرو چرخان کل با وجود یک واحد بادی برحسب MW ۶۱

۱ مقدمه

۱-۱ انرژی تجدید پذیر

استفاده از انرژی های تجدیدپذیر خصوصا انرژی باد و آ ن هم در مقیاس وسیع مانند مزارع بادی، مزایای متعددی از جمله استحصال انرژی رایگان و بدون هزینه سوخت، احداث و بهره برداری آسان و سریع ، کاهش تلفات و آزادسازی ظرفیت خطوط انتقال انرژی در صورت استفاده در محل تولید و مهم تر از همه عدم انتشار آلاینده های زیست محیطی و حفظ محیط زیست را در پی دارد. با توجه به پیشرفت قابل ملاحظه فن آوری استحصال این انرژی و قابل رقابت شدن هزینه های کلی نیروگاه های بادی در مقایسه با انواع نیروگاه های با سوخت فسیلی، سرعت نفوذ این نیروگاه ها در شبکه بسیار بالاست[۷].

۱-۲ مزیت رزرو چرخان

رزرو چرخان به اپراتورهای سیستم اجازه می‌دهد که نامتعادلی غیرقابل پیش‌بینی بین بار و توان تولیدی را که به دلیل خروج اتفاقی یک واحد تولیدی، خطاهای پیش‌بینی بار یا تغییرات غیرقابل پیش‌بینی برنامه ریزی تولید واحدهای تولیدتوان، جبران کنند. نظر به این‌که سهم توان تولیدی به‌وسیله‌ی مزارع بادی افزایش یافته‌است، این امر برای پیش‌بینی دقیق مقدار کل توان تزریقی به وسیله ژنراتورها به سیستم قدرت سخت‌تر شده‌است. این امر به غیرقطعی بودن موضوع اضافه می‌شود. تولید توان توسط باد بیشترین منبع استفاده‌شده از انرژی‌های تجدیدپذیر در اکثر کشورها می‌باشد[۸].

۱-۳ چگونگی مشارکت واحدها

مسئله به مدار آمدن واحدها یکی از مهم‌ترین برنامه‌های اقتصادی در سیستم قدرت به شمار میرود. برنامه-ریزی مشارکت واحدها به مفهوم بهینه‌سازی منابع تولید با هدف تأمین تقاضای بار با کمترین هزینه است. در سیستمهای قدرت مدرن و سنتی، علاوه بر اقتصادی بودن این برنامه‌ریزی، مسئله امنیت در بهره‌برداری از واحدها نیز از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا ایجاد مصالحه بین اقتصاد و امنیت دراین مسئله

میتواند با رسیدگی به تمامی پتانسیل‌ها و قیود، هزینه‌های تولیدرا کاهش دهد. مسئله‌ی SCUC[1] یکی از پیچیده‌ترین مسائل بهینه‌سازی در سیستم های قدرت است، که باید در آن قیود تولید، انتقال و امنیت شبکه در نظر گرفته شوند. برای حل این مسئله بهینه سازی روش‌های متعددی پیشنهاد شده است که از آن جمله می توان به روش لاگرانژین تقویت شده و روش MIP اشاره کرد. در این نوع مسئله سه ویژگی تامین بار، حداکثرسازی امنیت و حداقل سازی هزینه از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بنابراین حداکثرسازی امنیت اغلب با حفظ محدوده فلوی خطوط تامین می‌شود، در حالیکه، حداقل سازی هزینه با مشارکت واحدهای ارزان ترو توزیع اقتصادی بار در میان واحدهای شرکت کننده، تامین می‌شود[۹].

در بازارهای برقday-ahead تامین کننده ها با توجه به ساختار بازار می توانند پیشنهادهای خود را به صورت مناقصه یک قسمتی یا چند قسمتی ارائه کنند. مناقصه‌ی یک قسمتی فقط شامل قیمت و مقدار است و مناقصه‌ی چند قسمتی شامل هزینه‌ی های راه‌اندازی و بی‌باری ژنراتورهای و نرخ تغییرات توان[2] آن‌ها می باشد[۱۰].

۱-٤ پیش‌بینی بار

نظر به اینکه بار روزانه دو روز پی درپی باهم متفاوت است لذا برای پیش‌بینی مصرف برق روز بعد از منحنی بار ورز قبل استفاده نمی‌شود بلکه با درنظر گرفتن ترقی سالیانه برق از منحنی بار همین روز در سال گذشته استفاده می‌شود. از این جهت باید برنامه‌ی بارگیری هر واحد به‌طور جداگانه و روزانه از طرف هر واحد برنامه‌ریزی به مسئولین نیروگاه‌ها در اتاق فرمان مخابره شود. فقط برنامه بارگیری از نیروگاه‌های آبی به‌علت این‌که بار این نیروگاه‌ها ارتباط مستقیم با مقدار آب موجود دارد، نمی‌توان روزانه صادر کرد بلکه برای مدت طویل‌تری صادر می‌شود. با داشتن منحنی بار روزانه سال قبل تغییرات بار را می‌توان قبلا تا حدودی پیش بینی کرد. این پیش بینی برای یک هفته یا یک ماه بعد به طور تقریبی و برای یک روز بعد تقریبا دقیق صورت می‌گیرد و تغییرات احتمالی در این پیش‌بینی‌ها را می‌توان به کمک تصحیح بارها با

[1] Security constrained unit commitment
[2] Ramp up/down Rate

کمک یک واحد رزرو آماده‌ی بارگیری جبران نمود. منحنی بار به طور روزانه و مرتب برداشته می‌شود زیرا بار روزانه بستگی به نوع روز(روز کاری یا تعطیل) و نوع بار(صنعتی یا روشنایی) و بستگی به فصول مختلف سال دارد. مثلا در زمستان که هوا زود تاریک می‌شود قسمتی از برق روشنایی همزمان با برق صنعتی مصرف می‌شود و باعث بالا رفتن پیک برق در اوایل شب می‌گردد. درصورتی‌که در تابستان برق روشنایی و برق صنعتی باهم اختلاف زمانی پیدا می‌کنند و در نتیجه پیک منحنی بار روزانه کوچکتر از پیک برق در زمستان است[۱].

۱-۵ خلاصه‌ای از راه‌کار حل مسئله و اهداف

با توجه با این تعاریف، مسئله‌ی مورد نظر ما در چند مرحله حل خواهد شد. در مرحله‌ی اول، برای حل مسئله‌ی در مدار قرارگرفتن واحدها، تابع هدف به‌صورت یک تابع غیرخطی و درجه دوم است. روش حل در نرم افزار باتوجه به غیرخطی بودن تابع هدف به‌وسیله‌ی MINLP برنامه‌ریزی شده‌است. قیود حداقل و حداکثر تولید توان واحدها، نرخ تغییرات توان و نرخ روشن و خاموش شدن هرواحد نیز در نظر گرفته می‌شود. همین‌طور منحنی بار ساعتی نیز برای برنامه‌ریزی تامین بار به‌صورت یک جدول درکد برنامه درنظر گرفته شده‌است. حداقل زمان کار و حداقل زمان توقف واحدها ازجمله قیود مهم تعریف شده در حل مسئله می‌باشد.

درمرحله‌ی دوم برای سهولت و رسیدن سریع‌تر به جواب، این تابع به صورت یک تابع خطی مدل می‌شود و روش حل مسئله MIP است. برای این‌که تابع هدف مورد نظر ما خطی شود باید تابع هزینه‌ی واحدهای نیروگاهی را به صورت توابع خطی ـ تکه‌ای تقریب بزنیم. البته گفتنی است که تغییری که در جواب بهینه‌ی مسئله ایجاد می‌شود، جزئی و قابل چشم‌پوشی است. همچنین در حالت‌های روشن و خاموش بودن واحدها نیز تغییری مشاهده نمی‌شود.

همان‌طور که اشاره شد حداکثرسازی امنیت، اغلب با حفظ محدوده فلوی خطوط تامین می‌شود. درنتیجه با اعمال قیود پخش بار مستقیم(Dc) در مرحله‌ی سوم این قید نیز در مجموعه‌ی معادلات نوشته شده جای

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.

۳-۷ نتیجه‌گیری :

با مشاهده‌ی نتایج شبیه‌سازی در مراحل مختلف می‌توان گفت که وجود یک منبع تجدیدپذیر تولید توان، همانند انرژی بادی در یک شبکه، میزان رزرو چرخان را افزایش می‌دهد و به‌دنبال آن امنیت سیستم نیز بیشتر می‌شود. حال اگر تعداد این منابع را در یک شبکه افزایش دهیم خواهیم دید که میزان رزرو چرخان نیز بیش از پیش می‌شود. جالب توجه است که مقدار تابع هدف که نشان‌گر هزینه‌ی تولید توان می‌باشد نیز کم‌تر می‌شود. با دقت در نمودار های رزرو چرخان با حضور یک و سه واحد بادی در شبکه نیز می‌توان به این موضوع دست یافت که مقدار رزرو چرخان دارای دو دسته جواب می‌باشد. دلیل این امر آن است که در برخی از تکرارهای مونت کارلو واحد دوم و سوم خاموش بوده و میزان رزرو چرخان کم‌تر شده‌است؛ که البته احتمال جواب‌ها با یکدیگر قدری متفاوت می‌باشد.

۳-۸ جمع بندی

تعیین ظرفیت رزرو چرخان مورد نیاز سیستم از مهمترین وظایف بهره بردار شبکه برای بهره برداری ایمن و مطمئن از سیستم قدرت است. افزایش غیر منتظره بار و خروج ناگهانی ژنراتورها یا خطوط از حوادث محتملی است که امنیت سیستم را در معرض خطرقرار می دهد. لذا برای بهره برداری ایمن و مطمئن[1] از سیستم قدرت، در نظر گرفتن مقداری از ظرفیت تولید ژنراتورها بعنوان رزرو ضروری است. رزرو چرخان بخش بارگذاری نشده ژنراتورهای سنکرون است که همزمان با وقوع حادثه و با توجه به قیود نرخ بارگیری توانایی پاسخگویی سریع به تغییرات بار را دارد[۱۱]. همانطور که دیدیم با وجود نیروگاه‌هایی با انرژی‌های تجدیدپذیر، علاوه بر این‌که مقدار رزرو چرخان وامنیت سیستم افزایش یافته‌است، قیمت تولید توان نیز کاهش یافته‌است. استفاده از نیروگاه‌هایی با سوخت تجدیدپذیر باعث کاهش حضور نیروگاه‌هایی با سوخت فسیلی خواهد شد که این امر خود باعث کاهش مصرف سوخت‌های متداول و تجدیدناپذیری

[1] secure & reliable

هم‌چون گاز و گازوئیل و....خواهد شد و به دنبال آن باعث کاهش حضور آلاینده‌های محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای خواهدشد.

۳-۹ پیشنهادات

برای بهبود مطالعات آینده، پیشنهادات ذیل ارائه می‌شود :

۱- در نظر گرفتن عدم قطعیت بار در مدل ارائه شده با توجه به اینکه بار نیز یکی از موارد غیرقطعی و عاملی مهم در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها در شبکه می‌باشد.

۲- انرژی باد باتمام ویژگی‌های مثبت، به دلیل داشتن ذاتی غیرقطعی، با چالش‌هایی روبه‌رو است که یکی از راه‌حل‌های این چالش استفاده از منابع ذخیره انرژی می‌باشد.

فهرست منابع و مراجع

[۱] م. سلطانی، تولید الکتریسته و بهره برداری، ۱۳۸۷.

[۲] W. A.J و W. B.F، تولید،بهره بردای و کنترل در سیتم های قدرت، ح. سیفی، تدوین، ۱۳۷۱.

[۳] ع. ربیعی، مفاهیم اساسی در سیستم های قدرت، ۱۳۹۱.

[۴] س. نیکخواه، "آموزش کاربردیGAMS"، ۱۳۹۲.

[۵] Arroyo, J. M., & Conejo, A. J. (2000). Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market. IEEE Transactions on power systems, 15(3), 1098-1104.

[۶] ه. برهمندپور، س. کمانکش و م. جعفریان، "ظرفیت سازی شبکه ی انتقال با وجود توسعه ی نیروگاه های بادی"، *بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی برق*، ۲۰۱۳.

[۷] Fu, Y., Shahidehpour, M., & Li, Z. (2005). Security-constrained unit commitment with AC constraints. IEEE transactions on power systems, 20(3), 1538-1550.

[۸] Ortega-Vazquez, M. A., & Kirschen, D. S. (2009). Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration. IEEE Transactions on Power Systems, 24(1), 114-124.

[۹] غ. قاسمخانی، ا. سالاری، ا. عبداللهی و م. رشیدی نژاد، "برنامه ریزی امنیت مقید واحدهای تولیدی در حضورهمزمان منابع پاسخگویی بار و خودروهای برقده" ، *بیست و سومین کنفرانس مهندسی برق*

ایران، *دانشگاه صنعتی شریف*، ۲۰الی ۲۴ اردیبهشت۱۳۹۴.

[۱۰] ح. ر. شهروی، "عملکرد بهینه رزرو چرخان منطقه ای در بازار رقابتی"، *شش امین همایش ملی انرژی*، ۲۰۰۷.

[۱۱] م. صمدی و ح. رجبی مشهدی، "تعیین بهینه مقدار ظرفیت رزرو چرخان و توزیع آن بین واحدها"، *بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق(PSC)*، ۲۰۰۹.