بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه بیرجند

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

برنامه‌ریزی به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن پیشامدها

دانشجو:

جواد نجفی

استاد راهنما:

حمید فلقی

استاد مشاور:

مریم رمضانی

تابستان ۱۳۹۳

فرم شماره ۱۰

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

دانشگاه سیرجند
مدیریت تحصیلات تکمیلی

با تاییدات خداوند متعال جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی کارشناسی ارشد آقای جواد نجفی
به شماره دانشجویی:۹۱۱۳۳۰۹۰۱۹ رشته: مهندسی برق گرایش: قدرت دانشکده: برق و کامپیوتر
تحت عنوان: برنامه‌ریزی به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن پیشامدها

به ارزش : ۶ واحد درساعت: ۱۱/۳۰ روز:سه‌شنبه مورخ: ۱۳۹۳/۶/۲۵

با حضور اعضای محترم جلسه دفاع و نماینده تحصیلات تکمیلی به شرح ذیل تشکیل گردید:

سمت	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
استاد راهنمای اول	دکتر حمید فلقی	استادیار	
استاد مشاور اول	دکتر مریم رمضانی	استادیار	
داور اول	دکتر محسن فرشاد	استادیار	
داور دوم	دکتر سعیدرضا گلدانی	استادیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدعلی شمسی‌نژاد	استادیار	

نتیجه ارزیابی دفاع که منوط به ارائه اصلاحات پیشنهادی توسط هیئت داوران حداکثر ظرف مدت یکماه پس از تاریخ دفاع می باشد، به شرح زیر مورد تایید قرار گرفت:

• قبول (با درجه :عالی و امتیاز :۱۹/۸) • دفاع مجدد • غیر قابل قبول

۱- عالی (۲۰- ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹- ۱۸) ۳- خوب (۱۷/۹۹- ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹- ۱۴)

(بدیهی است عواقب آموزشی ناشی از عدم ارائه به موقع اصلاحات مزبور به عهده دانشجو می باشد)

تقدیم به:

پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

تشکر و قدردانی

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت. از اساتید فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر حمید فلقی به عنوان استاد راهنما و خانم دکتر مریم رمضانی به عنوان استاد مشاور که همواره این جانب را مورد لطف و محبت خود قرار داده‌اند، کمال تشکر را دارم.

جواد نجفی

تابستان ۱۳۹۳

چکیده

به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت است. هدف این مسأله تعیین وضعیت روشن یا خاموش بودن نیروگاه‌ها در یک بازه زمانی مشخص با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم و واحدهای نیروگاهی است به‌گونه‌ای که هزینه‌ی بهره‌برداری از این واحدها کمینه شود. در حل سنتی مسأله، ذخیره‌ی چرخان معمولاً به صورت قطعی و برابر با ظرفیت بزرگترین واحد نیروگاهی و یا درصدی از بار ساعتی سیستم در نظر گرفته می‌شود که مهم‌ترین عیب آن در نظر نگرفتن ماهیت احتمالی اجزا و رخدادهای سیستم قدرت است. در این پژوهش یک مدل احتمالاتی دوهدفه برای حل مسأله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌های حرارتی با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در اطلاعات بار و خروج احتمالی واحدهای تولیدی ارائه شده است. اهداف در نظر گرفته شده در این مدل، کاهش هزینه‌ی بهره‌برداری از نیروگاه‌ها و نیز کاهش شاخص انرژی تأمین نشده‌ی سیستم می‌باشد. برای حل مدل پیشنهادی از روش بهینه‌سازی الگوریتم گرده‌افشانی گل‌ها استفاده شده است که پاسخ مسأله را در قالب مجموعه‌ای از پاسخ‌های نامغلوب ارائه می‌دهد. در نهایت بهره‌بردار قادر است با توجه به شرایط اقتصادی و امنیت سیستم، پاسخی را از این مجموعه پاسخ‌ها انتخاب و ذخیره‌ی چرخان مورد نیاز سیستم را تعیین نماید. در ساختار جدید اقتصادی سیستم قدرت، برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای تولید با تغییر الگو به برنامه‌ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای تولید تبدیل شده است که در آن برخلاف ساختار سنتی، هدف بیشینه کردن سود شرکت‌های تولید توان است. در این پژوهش، همچنین یک روش تصادفی مؤثر جهت بررسی عدم قطعیت‌های دسترس‌پذیری واحدهای تولیدی، اطلاعات بار و قیمت انرژی در مسأله‌ی مورد نظر ارائه شده است. با استفاده از این روش، شرکت‌های تولیدی می‌توانند سود مورد انتظار واحدهای نیروگاهی خود را در حضور عدم‌قطعیت‌ها محاسبه کنند.

کلید واژه‌ها: به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی، بهینه‌سازی چندهدفه، عدم‌قطعیت، قابلیت اطمینان، محیط تجدید ساختار

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... د
فهرست جدول‌ها ..... و
فهرست شکل‌ها ..... ز

فصل ۱- پیشگفتار ۱
۱-۱- اهمیت موضوع ۲
۱-۲- نوآوری تحقیق ۳
۱-۳- ساختار پژوهش ۳

فصل ۲- مروری بر کارهای گذشته ۴
۲-۱- مقدمه ۵
۲-۲- بهره‌برداری در سیستم‌های قدرت ۵
۲-۲- مروری بر پژوهش‌های گذشته ۵
۲-۲-۱- الگوریتم‌های کلاسیک ۶
۲-۲-۲- الگوریتم‌های هوشمند ۹

فصل ۳- مدل‌های پیشنهادی مسأله‌ی به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی ۱۲
۳-۱- مقدمه ۱۳
۳-۲- فرمول‌بندی مسأله‌ی UC به صورت دوهدفه بدون در نظر گرفتن قیود شبکه ۱۳
۳-۲-۱- توابع هدف مسأله ۱۳
۳-۲-۲- محدودیت‌های مسأله ۱۴
۳-۲-۳- ارزیابی قابلیت اطمینان و مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها ۱۵
۳-۲-۳-۱- دسترس‌ناپذیری واحدهای تولیدی ۱۵
۳-۲-۳-۲- مدل‌سازی عدم‌قطعیت بار پیش‌بینی شده ۱۵
۳-۲-۳-۳- ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان **EENS** ۱۶
۳-۳- فرمول‌بندی مسأله‌ی UC به صورت تک‌هدفه با در نظر گرفتن قیود شبکه ۱۸
۳-۳-۱- فرمول‌بندی قیود شبکه ۱۸
۳-۳-۲- نحوه‌ی محاسبه‌ی شاخص EENS با در نظر گرفتن قیود شبکه ۱۹
۳-۴- مسأله‌ی UC در محیط تجدیدساختار ۲۰
۳-۴-۱- مدلسازی ریاضی مسأله PBUC ۲۰
۳-۴-۲- محدودیت‌های مسأله PBUC ۲۰
۳-۴-۳- مدلسازی عدم‌قطعیت بار و قیمت انرژی ۲۱
۳-۴-۴- مدل‌سازی عدم‌قطعیت دسترس‌پذیری واحدهای تولیدی ۲۲

۳-۴-۵- چگونگی حل مسأله‌ی PBUC با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها..... ۲۲
۳-۵- جمع‌بندی..... ۲۳
فصل۴- روش حل پیشنهادی مسأله‌ی به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی..... ۲۴
۴-۱- مقدمه..... ۲۵
۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی گرده‌افشانی گل‌ها..... ۲۵
۴-۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی گرده‌افشانی گل‌ها برای بهینه‌سازی تک‌هدفه..... ۲۵
۴-۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی گرده‌افشانی گل‌ها برای بهینه‌سازی چندهدفه..... ۲۶
۴-۳- انتخاب مناسب‌ترین پاسخ نهایی..... ۲۸
۴-۴- کاربرد الگوریتم چندهدفه‌ی گرده‌افشانی گل‌ها در حل مسأله‌ی UC..... ۲۹
۴-۴-۱- ساختار گرده‌ها..... ۲۹
۴-۴-۲- رعایت محدودیت‌ها..... ۲۹
۴-۴-۲- توزیع اقتصادی بار به روش لامبدا..... ۳۰
۴-۵- مراحل حل مسأله‌ی UC..... ۳۰
۴-۶- کاربرد الگوریتم تک‌هدفه‌ی گرده‌افشانی گل‌ها در حل مسأله‌ی UC با در نظر گرفتن قیود شبکه..... ۳۲
۴-۷- کاربرد الگوریتم تک‌هدفه‌ی گرده‌افشانی گل‌ها در حل مسأله‌ی PBUC..... ۳۳
۴-۸- جمع‌بندی..... ۳۴
فصل۵- مطالعات عددی و نتایج و نتایج..... ۳۵
۵-۱- مقدمه..... ۳۶
۵-۲- آزمایش اول: حالت پایه..... ۳۶
۵-۳- آزمایش دوم: تغییر در تابع هدف قابلیت اطمینان..... ۴۲
۵-۴- آزمایش سوم: بررسی تأثیر عدم‌قطعیت بار..... ۴۵
۵-۵- آزمایش چهارم: بررسی تأثیر زمان پیشرو..... ۴۶
۵-۶- آزمایش پنجم: بررسی به مدار آوردن نیروگاه‌ها با قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن قیود شبکه..... ۴۸
۵-۷- آزمایش ششم: تخمین سود مورد انتظار شرکت‌های تولیدی در حضور عدم‌قطعیت‌های دسترس‌پذیری واحدهای تولیدی، قیمت انرژی و بار..... ۵۰
فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۵۶
۶-۱- نتیجه‌گیری..... ۵۷
۶-۲- پیشنهادات..... ۵۸
ضمیمه الف –اطلاعات سیستم‌های آزمایش..... ۵۹
فهرست مراجع..... ۶۲
واژه نامه فارسی به انگلیسی..... ۶۵

واژه نامه انگلیسی به فارسی..... ۶۶

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
تابع هدف اول	f_1
تابع هدف دوم	f_2
شمارنده‌ی واحد نیروگاهی	i
شمارنده‌ی ساعت	t
طول مدت برنامه‌ریزی	T
توان تولیدی	P
تعداد کل واحدهای نیروگاهی	N
شمارنده‌ی خط	l
تعداد کل خطوط	L
شمارنده‌ی باس	b
تعداد کل باس‌ها	B
توان اکتیو عبوری از خطوط	PL
توان راکتیو عبوری از خطوط	QL
تابع سوخت نیروگاه‌ها	FC
هزینه‌ی راه‌اندازی	SU
هزینه‌ی خاموش کردن	SD
شاخص انرژی تأمین نشده در طول مدت برنامه‌ریزی	$EENS_{\text{total}}$
حداقل زمان روشن بودن	MUT
حداقل زمان خاموش بودن	MDT
تلفات سیستم	P_{loss}
نرخ خرابی	λ
نرخ تعمیر	μ
گام پرواز لوی	$Levy$
موقعیت گرده	X
میزان بار شبکه	P_D
میزان درآمد شرکت‌های تولیدی	PF
میزان درآمد شرکت‌های تولیدی	RV
ارزش بار از دست‌رفته	$VOLL$
قیمت انرژی	SP
ذخیره‌ی چرخان	SR

تابع آلودگی	E
بیشینه حد مجاز آلودگی	$E_{\max}$
شمارنده‌ی سناریو	ns
احتمال سناریو	π
سود مورد انتظار شرکت‌های تولیدی در حضور عدم‌قطعیت‌ها	Profit

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱): مشخصات واحدهای مثال نمونه..... ۷
جدول (۲-۲): اعمال لیست حق تقدم در مثال نمونه..... ۷
جدول (۲-۳): به مدار آوردن ۴ واحد نیروگاهی در ساعات متفاوت در مثال نمونه..... ۷
جدول (۲-۴): مقایسه‌ی بین پژوهش‌های گذشته با روش پیشنهادی..... ۱۰
جدول (۳-۱): اطلاعات واحدهای نیروگاهی نمونه جهت محاسبه‌ی شاخص EENS ۱۷
جدول (۳-۲): ترکیبات متفاوت واحدهای نیروگاهی جهت محاسبه‌ی شاخص EENS..... ۱۷
جدول (۵-۱): هزینه‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها بر اساس مقادیر متفاوت EENS در آزمایش ۱..... ۳۶
جدول (۵-۲): پارامترهای الگوریتم‌های متفاوت..... ۳۶
جدول (۵-۳): مشخصات پاسخ نهایی انتخابی در آزمایش (۱)..... ۳۷
جدول (۵-۴): وضعیت نیروگاه‌ها در پاسخ نهایی انتخابی در آزمایش(۱)..... ۳۷
جدول (۵-۵): وضعیت نیروگاه‌ها در پاسخ با بهترین قابلیت اطمینان در آزمایش(۱)..... ۳۸
جدول (۵-۶): وضعیت نیروگاه‌ها در پاسخ با بدترین قابلیت اطمینان در آزمایش(۱)..... ۳۹
جدول (۵-۷): مشخصات قابلیت اطمینان دو پاسخ تعیین شده در جبهه‌ی کارا آزمایش (۵-۲)..... ۴۳
جدول (۵-۸): مشخصات پاسخ نهایی انتخابی در آزمایش(۳)..... ۴۴
جدول (۵-۹): وضعیت نیروگاه‌ها در پاسخ نهایی انتخابی در آزمایش (۳)..... ۴۵
جدول (۵-۱۰): مشخصات پاسخ نهایی انتخابی در آزمایش (۴)..... ۴۷
جدول (۵-۱۱): وضعیت نیروگاه‌ها در پاسخ نهایی انتخابی در آزمایش(۴)..... ۴۸
جدول (۵-۱۲): مشخصات پاسخ‌ها بر اساس ارزش بارهای از دست‌رفته متفاوت..... ۴۸
جدول (۵-۱۱): وضعیت نیروگاه‌ها در پاسخ با VOLL برابر با ۲۰۰ دلار بر مگاوات‌ساعت در آزمایش (۵) ۵۰
جدول (۵-۱۴): مشخصات سناریوی عدم‌قطعیت بار و قیمت انرژی با بیشترین احتمال وقوع..... ۵۱
جدول (۵-۱۵): حل مسأله‌ی PBUC برای ۲۰ سناریو عدم‌قطعیت دسترس‌پذیری واحدهای تولیدی با احتمال وقوع بیشتر..... ۵۲
جدول (۵-۱۵): برنامه‌ی تولید واحدهای نیروگاهی در سناریوی اول..... ۵۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱): مسیرهای جستجو در برنامه‌ریزی پویا..... ۸
شکل (۲-۲): تقریب نمودار واقعی با نمودارهای خطی در برنامه ریزی MILP..... ۱۱
شکل (۳-۱): مدل دو حالته واحد تولیدی..... ۱۵
شکل (۳-۲): منحنی تابع توزیع نرمال..... ۱۶
شکل (۳-۳): شبکه کوچک قدرت در حالت عادی..... ۱۹
شکل (۳-۳): شبکه کوچک قدرت در حالت خروج یک واحد نیروگاهی..... ۱۹
شکل (۴-۱): جبهه‌ی کارای مش‌بندی شده..... ۲۶
شکل (۴-۲): ساختار پیشنهادی گرده برای حل مسأله‌ی UC..... ۲۸
شکل (۴-۳): فلوچارت حل پخش بار اقتصادی به روش لامبدا..... ۳۰
شکل (۴-۴): فلوچارت حل مسأله چندهدفه‌یUC..... ۳۱
شکل (۴-۵): فلوچارت حل مسأله تک‌هدفه‌یUC ۳۲
شکل (۴-۶): فلوچارت حل مسأله PBUC..... ۳۳
شکل (۵-۱): مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌ها در آزمایش (۱)..... ۳۵
شکل (۵-۲): ذخیره‌ی چرخان برای سه پاسخ از جبهه‌ی کارا در آزمایش (۱)..... ۴۰
شکل (۵-۳): میزان شاخص EENS برای سه پاسخ از جبهه‌ی کارا در آزمایش (۱)..... ۴۰
شکل (۵-۴):میزان تفاوت در هزینه و شاخص ارزش بار از دست رفته در جبهه‌ی کارا در آزمایش (۱)... ۴۱
شکل (۵-۵): جبهه کارای مسأله UC در آزمایش (۲)..... ۴۲
شکل (۵-۶): جبهه کارای مسأله UC در آزمایش (۱) و maxEENS برخی پاسخ‌ها..... ۴۴
شکل (۵-۷): جبهه‌ی کارا با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت بار در آزمایش (۳)..... ۴۶
شکل (۵-۸): جبهه‌ی کارا به ازای زمان‌های مختلف پیشرو درآزمایش (۴)..... ۴۷
شکل (۵-۹): مقایسه‌ی ذخیره‌ی چرخان به ازای ارزش بارهای از دست‌رفته‌ی متفاوت..... ۴۹
شکل (۵-۱۰): بار سیستم و میزان بار تأمین شده در سناریوی اول..... ۵۴
شکل (۵-۱۱): درآمد، هزینه و سود شرکت تولیدی در سناریوی اول..... ۵۴

فصل ۱– پیشگفتار

۱-۱- اهمیت موضوع

در اغلب سیستم‌های قدرت، بار توسط نیروگاه‌های حرارتی تأمین می‌شوند. ظرفیت واحدهای نیروگاهی در هر سیستم از بار پیش‌بینی شده‌ی آن بیشتر است. استراتژی‌های مختلفی برای پاسخگویی به تقاضای توان در ساعات مختلف قابل استفاده است. در نگاه ابتدایی و ساده می‌توان بار پیک در شبکه را شناسایی کرده و به همان اندازه واحد نیروگاهی وارد مدار کنیم. اما نیروگاه‌های حرارتی برای تولید توان به سوخت‌های فسیلی نیاز دارند. از طرفی منابع سوخت‌های فسیلی رو به اتمام است از این رو این منابع به عنوان کالایی ارزشمند وگران‌قیمت در جهان محسوب می‌شود، همچنین با سوختن این منابع، آلاینده‌های فراوانی منتشر می‌شوند که علاوه بر آلودگی باعث تغییرات شرایط اکوسیستمی نیز می‌شود. در نتیجه با کاهش بار در ساعات متفاوت باید نیروگاه‌های گران‌قیمت از مدار خارج شوند. اما نیروگاه‌ها برای ورود به مدار وخارج شدن از مدار با محدودیت های فراوانی مواجه هستند. پس بهره‌بردار باید بهترین برنامه جهت تأمین بار سیستم را تنظیم کند که کمترین هزینه‌ی بهره‌برداری را داشته و محدودیت‌های سیستم و واحدهای نیروگاهی را نیز در نظر گرفته باشد، زیرا با کاهش هزینه‌های بهره‌بردای، مصرف سوخت‌های فسیلی نیز کاهش یافته و ضمن کاهش آلودگی، می‌توان منابع با ارزش سوخت‌های فسیلی را ذخیره کرد.

تمامی تجهیزات در سیستم‌های مهندسی احتمالی هستند، این بدان معنا است که هر تجهیزی در هر دوره‌ی زمانی ممکن است دچار اختلال شود. واحدهای نیروگاهی نیز به هر دلیلی ممکن است از مدار خارج شوند. با خارج شدن یک واحد نیروگاهی از مدار و با توجه به ظرفیت آن بخشی از توان تولیدی از بین می‌رود. لذا در صورت امکان این توان تولیدی باید توسط ذخیره‌ی چرخان تأمین شود. نوع بارهای سیستم از لحاظ اهمیت در شبکه‌ی قدرت متفاوت است. به عنوان مثال در تأمین بخشی از بارهای سیستم مانند بیمارستان‌ها امکان وقفه وجود ندارد اما در مقابل بارهای خانگی دارای اهمیت کمتری هستند. پس باید برنامه‌ی عملکرد واحدهای نیروگاهی به گونه‌ای باشد تا در صورت خارج شدن یکی از واحدهای نیروگاهی از مدار، تا حد امکان بتوان بارهای سیستم را تأمین کرد. در نتیجه بهره‌بردار باید دامنه‌ی وسیعی از هزینه‌ی بهره‌برداری نیروگاه‌ها بر اساس قابلیت اطمینان سیستم خود را در اختیار داشته باشد تا بتواند با توجه به اهمیت نوع بار و فاکتور اقتصادی، برنامه‌ای را جهت به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی تنظیم و میزان ذخیره‌ی چرخان در سیستم را تعیین کند.

برای تهیه‌ی چنین مجموعه‌ای از پاسخ‌ها و همچنین پیچیده بودن ساختار مسأله، نیاز به ابزاری قدرتمند جهت حل مسأله ضروری است. لذا تاکنون روش‌های متعددی جهت حل این مسأله ارائه شده است و پژوهش‌های فراوانی نیز در حال انجام است. یک مسئله‌ی بهینه‌سازی شامل یک یا چند تابع هدف همراه با تعدادی محدودیت می‌باشد. یک روش مناسب بهینه‌سازی، باید بهینه‌ترین پاسخ را در کمترین زمان در اختیار بهره‌بردار قرار دهد. البته چنانچه تابع هدف بیش از یکی باشد به جای یک پاسخ، مجموعه‌ای از پاسخ‌ها بدست می‌آید.

در ساختار جدید اقتصادی، واحدهای نیروگاهی در اختیار شرکت‌های تولیدی است که هدف آن‌ها به دست آوردن بیشترین سود ناشی از فروش انرژی به مصرف‌کنندگان است. از این دیدگاه، قابلیت اطمینان متفاوت است. زیرا شرکت تولیدی ملزم به تأمین بار شبکه نیست و تنها بر اساس بیشینه کردن سودشان

بار شبکه را تأمین می‌کنند. پس شرکت‌های تولیدی باید بتوانند سود مورد انتظار خود را در محیط عدم‌قطعیت‌ها پیش‌بینی کنند.

۱-۲- نوآوری تحقیق

در این پژوهش مدل‌های جدیدی از مسأله‌ی به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی[1] همراه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ارائه شده است و ضمن مقایسه‌ی آنها، بهترین پاسخ تعیین می‌شود و بهره‌بردار قادر است با داشتن مجموعه‌ای از پاسخ‌ها بر اساس دو فاکتور هزینه و قابلیت اطمینان، پاسخی را جهت تنظیم عمکرد واحدهای نیروگاهی خود انتخاب و ضمن آن ذخیره‌ی چرخان در سیستم را تعیین کند.

در این پژوهش عوامل مهمی همچون عدم‌قطعیت بار و زمان پیشرو که بر هزینه و قابلیت اطمینان سیستم تأثیرگذار است بررسی و بهره‌بردار را آگاه می‌سازد تا بتواند تأثیر این عوامل را به حداقل برساند.

همچنین یک ابزار بهینه‌سازی قدرتمند جدیدی به نام الگوریتم گرده‌افشانی گل‌ها[2] جهت حل مسأله نیز ارائه شده است که در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی موجود دارای برتری می‌باشد.

در حل مسأله‌ی UC در محیط تجدید ساختار نیز با استفاده از یک روش تصادفی ضمن مدیریت انواع عدم‌قطعیت‌ها، سود شرکت‌های تولیدی در محیط دارای عدم‌قطعیت پیش‌بینی می‌شود.

۱-۳- ساختار پژوهش

ساختار ادامه‌ی پژوهش بدین شرح است. نخست در فصل دوم مروری بر کارهای گذشته خواهیم داشت. در فصل سوم مفاهیم به مدار آوردن نیروگاه‌ها و محدودیت‌های موجود در آن و مدل قابلیت اطمینان مسأله و مسأله‌ی UC در محیط تجدید ساختار تشریح خواهند شد. در فصل چهارم انواع روش‌های حل مسأله‌ی موجود و روش پیشنهادی بررسی می‌شود. در فصل پنجم نتایج عددی حاصل از آزمایش‌های متفاوت نشان داده خواهد شد و در نهایت، در فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات در ادامه‌ی کار ارائه خواهند شد.

[1] Unit Commitment
[2] Multi Objective Flower Pollination Algorithm

فصل ۲– مروری بر کارهای گذشته

۲–۱– مقدمه

در این فصل مروری برکارهای گذشته در زمینه‌های به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی، قابلیت اطمینان در مسأله‌ی UC ، مسأله‌ی UC در محیط تجدید ساختار و روش‌های حل مسأله خواهد شد.

۲–۲– بهره‌برداری در سیستم‌های قدرت

در صنعت برق طراحی و بهره‌برداری بهینه و موُثر اقتصادی همواره مورد نظر بوده است. افزایش پیوسته قیمت‌های مواد سوختی و نیز تورم سالانه باعث شده است که همواره بهره‌برداری اقتصادی از سیستم‌های تولید انرژی الکتریکی مورد توجه و مطالعه قرار گرفته باشد. بهره‌برداری شامل مسائل متعددی مانند پخش بار بهینه بین واحدها، به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی، برنامه تعمیرات و نگهداری واحدهای تولید و کنترل تولید (AGC)[1] می‌باشد. بازه‌ی مطالعه‌ی بهره‌برداری در محدوده‌ی وسیعی انجام‌می‌شود، به‌گونه‌ای که بازه‌ی مطالعه‌ی مسأله‌ی به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی در چندین ساعات، روز، ماه وحتی سال انجام می‌شود از طرف دیگر بازه‌ی مطالعه‌ی مسأله‌ی AGC در در کمتر از ۱ ثانیه است[۱].

برنامه‌ریزی به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت است که هدف آن کاهش هزینه‌ی بهره‌برداری واحدهای نیروگاهی است. البته در این مسأله محدودیت‌هایی همچون برآوری تولید و مصرف، ذخیره‌ی چرخان، حداقل زمان روشن/خاموش بودن و حد افزایشی و کاهشی تولید واحدها وجود دارند که برنامه‌ی عمکرد واحدهای نیروگاهی باید این محدودیت‌ها را برآورده سازد.

۲–۳– مروری بر پژوهش‌های گذشته

تا قبل از سال ۱۹۶۰ میلادی، مسأله‌ی UC فقط به بحث توزیع اقتصادی بار[2] محدود می‌شد. در آن زمان شرایط شناخته شده‌ی کوهن- تاکر[3] وضعیت اقتصادی بهینه را مشخص می‌کرد. هنگامی که این شرایط برآورده می‌شد کلیه‌ی نیروگاهایی که در مدار بودند، به غیر از نیروگاه‌هایی که به صورت موثر با حداکثر توان در شبکه بودند، با توجه به میزان سوختشان بارگذاری می‌شدند. برمبنای شرایط کوهن-تاکر چندین راه‌حل برای مسأله‌ی UC پایه‌گذاری گردید که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان ابداع روش تکرار لامبدا و روش گرادیان برای نیروگاه‌های حرارتی را نام برد [۲].

مسأله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها (UC) نقش مهمی در بهره‌برداری روزانه‌ی سیستم‌های قدرت دارد. با افزایش روزافزون بار مصرفی و از طرفی کاهش منابع فسیلی، روند تأمین بدون وقفه انرژی مصرفی سیستم قدرت با مشکل روبرو می‌شود. اگرچه منابع تولید انرژی دیگری مانند خورشید و باد نیز وجود دارند اما به دلیل قابلیت اطمینان پایین این منابع و افزایش بار مورد تقاضا، واحدهای نیروگاهی باید

[1] Automatic Generation Control
[2] Load Economic Dispatch
[3] Kohn-Tocker

بتوانند انرژی تولیدی خود را در بهترین حالت و کمترین اتلاف در اختیار سیستم قدرت قرار دهند. مسأله‌ی UC از نظر ریاضی دارای ماهیت پیچیده و غیرخطی است که هدف آن کمینه‌سازی هزینه‌ی بهره‌برداری واحدهای تولیدی ضمن رعایت قیود حاکم بر سیستم است [۱].

ذخیره‌ی چرخان[1] عبارتی است که برای توصیف اختلاف بین تولید کنونی واحدهای موجود در مدار و حداکثر قابلیت تولید توان این واحدها استفاده می‌شود و در واقع بیناگر ظرفیت بالقوه‌ای است که هنوز بالفعل نشده است. وجود ذخیره‌ی چرخان در سیستم برای جبران پیامدهای ناشی از خروج غیرمنتظره‌ی واحدها و یا نوسانات پیش‌بینی نشده‌ی بار ضروری است [۱]. ذخیره‌ی چرخان به دو صورت قطعی و احتمالی تعیین می‌شود. در روش قطعی، ذخیره‌ی چرخان معمولاً برابر با ظرفیت بزرگترین واحد نیروگاهی و یا درصدی از بار ساعتی سیستم در نظر گرفته می‌شود [۳]. در حالی که در روش‌های احتمالاتی با در نظر گرفتن ماهیت تصادفی اجزای سیستم قدرت و با استفاده از شاخص‌های قابلیت اطمینان، ذخیره‌ی چرخان برای سیستم تعیین می‌شود [۴ و ۵].

طول مدت برنامه‌ریزی در پژوهش‌های مطرح شده کوتاه و حداکثر ۲۴ ساعت است. اما در [۶] مسأله‌ی UC به صورت بلند مدت ارائه شده است. در [۶] یک مدل تصادفی جهت محاسبه‌ی ارزش مادی قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن قیود و محدودیت‌های شبکه ارائه شده است. بدین صورت که به صورت تصادفی خروج برخی واحدها و خطوط صورت می‌گیرد و سپس با انتخاب برخی سناریوها با احتمال وقوع بیشتر و با استفاده از مونت‌کارلو، شاخص LOLE[2] برای محاسبه‌ی ذخیره‌ی چرخان استفاده می‌شود. مسأله‌ی UC در [۶] به صورت ساعتی توسط OPF[3] حل می‌شود و قیود حداقل زمان روشن/خاموش بودن، نرخ شیب افزایشی/کاهشی در نظر گرفته نشده است. ضمن اینکه در [۶] آلودگی تولیدی توسط واحدهای نیروگاهی به صورت قید مدل‌سازی شده است.

الگوریتم‌های فراوانی جهت حل مسأله‌ی UC وجود دارند. الگوریتم‌های حل به دو گروه الگوریتم‌های کلاسیک و الگوریتم‌های هوشمند تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های کلاسیک شامل لیست حق تقدم، برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح، لاگرانژ، تجزیه‌ی بندرز و ... می‌باشند که تنها به سه مورد اول به دلیل قدمت این روش‌ها اشاره خواهد شد. الگوریتم‌های هوشمند نیز با الهام از طبیعت و زندگی موجودات ساخته می‌شود که شامل الگوریتم اجتماع ذرات، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بازپخت فلزات، الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم جستجوی ممنوع و ... می‌باشند.

۲-۳-۱- الگوریتم‌های کلاسیک

برنامه‌ریزی بر اساس روش کلاسیک حق تقدم: روش لیست حق تقدم[4] از ساده‌ترین روش‌های حل در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها می‌باشد. مراجع [۷ و۸] مسأله‌ی UC را با روش احتمالاتی بر اساس لیست

[1] Spinning Reserve
[2] Loss Of Load Expectation
[3] Optimal Power Flow
[4] Priority List

حق‌تقدم حل کرده‌اند. در این روش برای کلیه‌ی ترکیبات ممکن جهت هر سطح بار، اولویت ورود به مدارها مشخص می‌شود. به عنوان مثال فرض کنید ۳ واحد تولیدی به صورت جدول (۲-۱) موجود است:

جدول (۲-۱): مشخصات واحدهای مثال نمونه

واحد	حداقل تولید (MW)	حداکثر تولید (MW)	میانگین هزینه‌ی تولید ($/MW)
1	150	600	10.5
2	100	400	10
3	50	200	11

حال اگر این واحدها رابر اساس لیست حق تقدم مرتب کنیم آنگاه اولویت در مدار قرار گرفتن واحدها به صورت جدول (۲-۲) خواهد شد.

جدول (۲-۲): اعمال لیست حق تقدم در مثال نمونه

واحد	حداقل تولید (MW)	حداکثر تولید (MW)	میانگین هزینه‌ی تولید ($/MW)
2	100	400	10
2	150	600	10.5
3	50	200	11

اگر برای ۴ ساعت متوالی بارهای زیر را بخواهیم تأمین کنیم ترکیب واحدهای در مدار مطابق ستون آخر جدول (۲-۳) خواهد شد:

جدول (۲-۳): به مدار آوردن ۴ واحد نیروگاهی در ساعات متفاوت در مثال نمونه

ساعت	میزان بار	ترکیب واحدها
1	300	2
2	400	2
3	600	2+1
4	1300	3+2+1

در واقع وقتی که بار افزایش پیدا می‌کند واحدها (طبق لیست حق تقدم) وارد مدار می‌شوند تا میزان بار و ذخیره‌ی چرخان برآورده شوند و بالعکس وقتی که بار کاهش می‌یابد، تا زمانی که قید بار و ذخیره‌ی چرخان نقض نشوند، واحد طبق لیست حق تقدم از مدار خارج می‌شود.

از مزایای این روش این است که خیلی سریع به جواب می‌رسد ولی برخلاف سرعت بالا از دقت کمی برخوردار است چرا که عموماً به جواب‌هایی دست می‌یابد که به دور از جواب بهینه است [۲].

برنامه‌ریزی بر اساس روش کلاسیک برنامه‌ریزی پویا: در برنامه‌ریزی پویا[1]، جواب بهینه‌ی یک مسأله‌ی n متغیره با تجزیه‌ی آن به n مرحله تعیین می‌شود. لازم به توضیح است که شاید سخت‌ترین بخش در اجرای برنامه‌ریزی پویا، تجزیه‌ی مسأله‌ی بهینه‌سازی اصلی به مسائل کوچکتر مرتبط با هم است.

[1] Dynamic Programming