بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال با در نظرگرفتن رشد تولید در یک محدوده انعطاف‌پذیر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

محسن برزگری بافقی

استاد راهنما

دکتر اکبر ابراهیمی

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال با در نظرگرفتن رشد تولید در یک محدوده انعطاف‌پذیر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

محسن برزگری بافقی

استاد راهنما

دکتر اکبر ابراهیمی

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق- قدرت آقای محسن برزگری بافقی

تحت عنـــوان

برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با در نظر گرفتن رشد تولید در یک محدوده‌ی انعطاف‌پذیر

در تاریخ ۹۳/۶/۳۱ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه — دکتر اکبر ابراهیمی

۲- استاد داور پایان‌نامه — دکتر غلامرضا یوسفی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر سید محمدعلی خسروی‌فرد

بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر اکبر ابراهیمی، که با کرامتی چون خورشید، گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و بی‌کاستیشان بارور ساختند و روشنایی بخش تاریکی جان و ظلمت اندیشه‌ام بودند تقدیر و تشکر نمایم. چرا که این مهم بی یاری بی دریغشان مشکل می‌نمود.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

پدرم، کوهی استوار

مادرم، سنگ صبور

همسرم، یاور و همدل

و دلبندم، امید بخش جانم که آسایش او آرامش من است.

فهرست مطالب

عنـوان | صفحه

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ کلیات مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال ۳

۱-۲ اصول مدل‌سازی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال ٤

۱-۳ ساختار پایان‌نامه ۹

فصل دوم: برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال

۲-۱ مقدمه ۱۱

۲-۲ تعریف برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال ۱۲

۲-۳ تقسیم‌بندی کلی روش‌های TEP ۱٤

۲-۳-۱ تقسیم‌بندی روش‌های TEP از دیدگاه افق‌های زمانی طراحی ۱۵

۲-۳-۲ تقسیم‌بندی روش‌های TEP از دیدگاه عدم قطعیت‌ها ۱٦

۲-۳-۲-۱ روش‌های مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های شبکه‌ی قدرت ۱۷

۲-۳-۳ تقسیم‌بندی روش‌های TEP از دیدگاه ساختار شبکه‌ی قدرت ۲۰

۲-۳-٤ تقسیم‌بندی روش‌های TEP از دیدگاه برنامه‌ریزی تولید ۲۱

۲-٤ روش‌های حل مسئله‌ی TEP ۲۱

۲-٤-۱ روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک ۲۲

۲-٤-۲ روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری ۲۳

۲-٤-۳ روش‌های بهینه‌سازی فوق ابتکاری ۲٤

فصل سوم: مدل‌سازی مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال

۳-۱ مقدمه ۲۹

۳-۲ مدل‌سازی‌های پایه‌ای مسئله‌ی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال ۳۰

۳-۲-۱ مدل DC ۳۲

۳-۲-۲ مدل حمل و نقل ۳٤

۳-۲-۳ مدل هیبریدی (ترکیبی) ۳٤

۳-۳ مدل‌های کامل‌تر مسئله‌ی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال ۳۵
۳-۳-۱ مدل‌سازی مسئله‌ی TEP با در نظر گرفتن هزینه‌ی بهره‌برداری شبکه ۳۶
۳-۳-۲ مدل‌سازی مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال دینامیکی ۳۹
۳-۳-۳ مدل‌سازی مسئله‌ی TEP با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان شبکه‌ی قدرت ٤۱
۳-۳-٤ مدل‌سازی مسئله‌ی TEP با درنظر گرفتن عدم قطعیت بار ٤۳
۳-۳-۵ مدل‌سازی مسئله‌ی TEP با در نظر گرفتن تلفات خطوط انتقال ٤٦
۳-۳-٦ مدل‌سازی مسئله TEP با در نظر گرفتن ماکزیمم ظرفیت تولید نیروگاه‌ها به‌صورت متغیر در یک بازه ٤۹
۳-۳-۷ مدل ترکیبی مسئله‌ی TEP ۵۳
فصل چهارم: شبیه‌سازی، ارائه‌ی نتایج و تحلیل آن‌ها
٤-۱ معرفی شبکه ۲٤ باسه‌ی IEEE ۵٦
٤-۲ برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با استفاده از مدل DC پایه‌ای ٦۰
٤-۳ برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با در نظر گرفتن هزینه‌ی بهره‌برداری ٦۲
٤-٤ برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال شبه‌دینامیکی (چند مرحله‌ای) ٦٤
٤-۵ برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با درنظر گرفتن قابلیت اطمینان شبکه‌ی قدرت ٦٦
٤-٦ برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با درنظر گرفتن تلفات خطوط انتقال ٦۸
٤-۷ برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با درنظر گرفتن عدم قطعیت بار ٦۹
٤-۸ برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با درنظرگرفتن یک بازه برای ماکزیمم ظرفیت تولید ۷۰
٤-۹ شبیه‌سازی مدل TEP ترکیبی ۷٤
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادات
۵-۱ پیشنهادات ۷۸
مراجع ۷۹

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
توان اکتیو خط انتقال i-j	P_{ij}
ماکزیمم توانی عبوری از خط انتقال i-j	$\overline{P_{ij}}$
بردار شارش توان در خطوط شبکه	P
بردار تولید نیروگاه‌ها در باس‌های شبکه‌ی قدرت	P_g
تولید نیروگاه در باس iام شبکه‌ی قدرت	p_{g_i}
بردار بار در باس‌های شبکه‌ی قدرت	P_d
بار در باس iام شبکه‌ی قدرت	p_{d_i}
بردار بیشینه‌ی ظرفیت تولید نیروگاه‌ها	$\overline{P}_g$
بیشینه‌ی ظرفیت تولید نیروگاه در باس iام	$\overline{p}_{g_i}$
توان اکتیو تلف شده کل خطوط انتقال	P_L
تقاضای کل شبکه قدرت	P_D
بردار مینیمم بار در باس‌های شبکه‌ی قدرت	P_d^{min}
بردار ماکزیمم بار در باس‌های شبکه‌ی قدرت	P_d^{max}
مینیمم توان تولیدی نیروگاه باس iام	$p_{g_i}^{min}$
ماکزیمم توان تولیدی نیروگاه باس iام	$p_{g_i}^{max}$
توان اکتیو تلف شده خط انتقال	P_{ij}^{loss}
حد پایین ماکزیمم ظرفیت تولید نیروگاه باس iام	$\overline{p}_{g_i}^{min}$
حد بالای ماکزیمم ظرفیت تولید نیروگاه باس iام	$\overline{p}_{g_i}^{max}$
ولتاژ باس iام	V_i
کندوکتانس خط انتقال i-j	G_{ij}
سوسپتانس خط انتقال i-j	B_{ij}
مقاومت خط انتقال i-j	r_{ij}
امپدانس خط انتقال i-j	x_{ij}
ترانهاده ماتریس اتصالات مربوط به شاخه-گره	S

اختلاف زاویه بین باس‌های i و j	θ_{ij}
زاویه‌ی باس i ام	θ_i
مجموع هزینه‌ی سرمایه‌گذاری TEP	v
هزینه‌ی احداث خط انتقال i-j	c_{ij}
تعداد خط‌های اضافه شده در مسیر i-j	n_{ij}
تعداد خط‌های موجود در مسیر i-j	n_{ij}^0
حداکثر تعداد خط در مسیر i-j	$\bar{n}_{ij}$
بردار عدم تأمین بار در باس‌های شبکه‌ی قدرت	r
عدم تأمین بار در باس iام شبکه	r_i
تعداد باس‌های شبکه	N_{bus}
تعداد خطوط انتقال شبکه	N_{branch}
هزینه‌ی بهره‌برداری مربوط به نیروگاه iام	CG_i
ضرایب هزینه‌ی بهره‌برداری نیروگاه i ام	α_i , β_i , γ_i
ضریب نزول	d
ضریب جریمه‌ی عدم تأمین بار	α
افق زمانی برنامه‌ریزی	TPL
زمان (مرحله)	t
مجموعه‌ی همه‌ی مسیرها و خطوط کاندیدا	Ω
مجموعه باس‌های شبکه	bus
مجموعه نیروگاه‌های شبکه	Gen

چکیده

به دلیل افزایش بار مصرفی در یک سیستم قدرت که ناشی از توسعه تکنولوژی، افزایش جمعیت، ورود مصرف‌کنندگان جدید و نیاز روز افزون به انرژی الکتریکی می‌باشد، لازم است با احداث مناسب خطوط جدید، شبکه‌ی انتقال توسعه یابد تا این شبکه جوابگوی بار پیش بینی شده آینده باشد. به این مطالعات، برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال(TEP) گفته می‌شود.

به دلیل سرمایه‌گذاری بسیار زیاد مورد نیاز در بخش برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال، یافتن بهترین طرح توسعه از اهمیت زیادی برخوردار است. به منظور تدوین چنین طرح توسعه‌ای باید مدل‌سازی دقیق و نسبتا کاملی از مسئله ارائه گردد که در آن قیود مختلف فنی و اقتصادی مورد نیاز منظور شده باشد. در سال‌های اخیر تلاش‌های موثری در جهت کامل‌تر کردن مدل مسئله و حذف برخی از ساده‌سازی-ها انجام شده است. در نظر گرفتن زمان احداث خطوط جدید(توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال چند مرحله‌ای)، قیود امنیت و قابلیت اطمینان، عدم-قطعیت بار، تلفات خطوط انتقال و... در مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال نمونه‌ای از این تلاش‌هاست. در این پایان نامه ابتدا با مروری بر برخی از مدل‌سازی‌های کامل‌تر ارائه شده در سال‌های اخیر و شبیه‌سازی آنها در شبکه‌ی تست، آثار ناشی از ساده سازیهای مختلف در مدل‌های اولیه بررسی می‌گردد. در این راستا، استفاده از سرعت، قدرت محاسباتی و انعطاف پذیری مناسب الگوریتم بهینه-سازی PSO به ویژه در بعضی مدل‌های پیچیده‌تر کمک شایانی به حل مسئله و نیل به این هدف می‌نماید. از دیگر مسائل مهم در مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی سیستم قدرت تأثیر متقابل برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال و توسعه‌ی تولید (GEP) می‌باشد. در روش‌های مرسوم، این دو برنامه‌ریزی به صورت مستقل انجام شده و هیچ‌گونه هماهنگی بین آن‌ها برقرار نمی‌شود. در این پایان‌نامه، به منظور ایجاد هماهنگی بین TEP و GEP، ابتدا GEP به صورت تک باسه انجام شده و نیروگاه‌های جدیدی که باید به شبکه اضافه شوند مشخص می‌گردد. با در نظر گرفتن ظرفیت تولید نیروگاه‌های جدید در بازه‌ی انعطاف‌پذیری حول مقدار به‌دست آمده از GEP امکان دسترسی به برنامه توسعه شبکه انتقال با هزینه سرمایه‌گذاری کمتری فراهم می‌گردد. این برنامه‌ریزی، الگوی توسعه‌ی تولید جدیدی برای شبکه حاصل می‌کند. کاهش مجموع هزینه‌ی سرمایه‌گذاری TEP و GEP نسبت به برنامه‌ریزی‌های توسعه مرسوم که با در نظر گرفتن میزان قطعی و معینی برای افزایش ظرفیت تولید انجام می‌شود، کارآیی روش پیشنهادی و ایجاد هماهنگی مناسبی بین برنامه‌های TEP و GEP را تأیید می‌کند. بیشترین هماهنگی و کمترین مقدار برای مجموع هزینه سرمایه‌گذاری با تکرار محاسبات به‌ازای تغییر حدود بازه انتخابی حاصل می‌گردد. در نهایت، با شبیه‌سازی این روش در شبکه‌ی تست، قابلیت و مزایای آن نسبت به روش‌های متداول مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال، الگوی توسعه‌ی تولید، هماهنگی TEP و GEP، الگوریتم PSO

فصل اول

مقدمه

برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی قدرت[1] بخشی از یک فرآیند گسترده است که با برنامه‌ریزی انرژی[2] آغاز و به برنامه‌ریزی بهره‌برداری[3] ختم می‌گردد [۱]. هدف از برنامه‌ریزی توسعه در شبکه‌ی قدرت تعیین بهینه‌ی نوع، زمان و محل احداث تجهیزات جدید (مثل نیروگاه‌ها، خطوط، پست‌ها و جبران‌سازها) بر اساس پیش‌بینی و تأمین رشد بار مصرفی تحت قیود فنی، محیطی و اقتصادی می‌باشد [۲]. با توجه به گستردگی و پیچیده بودن مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی قدرت و به منظور کاهش حجم محاسبات، این مسئله، متناسب با نوع تجهیزات جدید اضافه شده به شبکه به بخش‌های مختلفی تقسیم می‌شود [۲]. برخی از مهم‌ترین بخش‌های مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه عبارتند از [۲]:

- برنامه‌ریزی توسعه‌ی تولید[4]: هدف از برنامه‌ریزی توسعه‌ی تولید تعیین بهینه‌ی نوع، ظرفیت و زمان اضافه-کردن واحدهای جدید نیروگاهی با توجه به بار پیش‌بینی شده در بازه‌ی زمانی معینی در آینده می‌باشد.

[1] Power system expansion planning
[2] Energy planning
[3] Operation planning
[4] Generation expansion planning

- برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال[1]: در این برنامه‌ریزی، نوع خطوط انتقال جدید، مسیرهای احداث و زمان احداث آن‌ها با توجه به بار پیش‌بینی‌شده و الگوی توسعه‌ی تولید به‌دست آمده از برنامه‌ریزی توسعه‌ی تولید، مشخص می‌شود.

۱-۱ کلیات مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال

خطوط انتقال یکی از مهم‌ترین اجزای شبکه‌ی قدرت می‌باشد و نقش مؤثری در ارتباط بین تولید و مصرف انرژی الکتریکی دارد [۳]. برای آن‌که خطوط انتقال به عنوان یکی از اجزای حیاتی شبکه‌ی قدرت بتواند وظایف خود را همزمان با رشد سایر اجزاء شبکه ایفا کند، لازم می‌باشد همزمان با رشد بار و تولید شبکه‌ی قدرت، خطوط انتقال نیز به‌صورت مطلوب توسعه یابد [۳]. لذا به برنامه‌ی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال نیاز می‌باشد که در آن طرح یا طرح‌های بهینه‌ی احداث خطوط انتقال جدید برای رساندن انرژی با قابلیت اطمینان و به صورت اقتصادی به مصرف-کننده برنامه‌ریزی شود [۳]. این برنامه با توجه به بار پیش‌بینی‌شده و الگوی توسعه‌ی تولید (به‌دست آمده از برنامه-ریزی توسعه‌ی تولید) و با ارضای محدودیت‌های فنی، اقتصادی و محیطی برای یک دوره‌ی زمانی مشخص به‌دست می‌آید.

روش‌های مختلف برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال که شامل الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک، ابتکاری و فراابتکاری می‌باشد را می‌توان به حوزه‌های مختلف زیر دسته‌بندی کرد:

- از دیدگاه عدم‌قطعیت که به دو دسته‌ی روش‌های قطعی و غیرقطعی تقسیم می‌شود [۴].
- از دیدگاه زمان احداث خطوط انتقال جدید که به دو دسته‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی انتقال استاتیک[2] و برنامه‌ریزی توسعه‌ی انتقال دینامیک[3] تقسیم می‌گردد [۵].
- از دیدگاه محیط شبکه‌ی قدرت که به دو دسته‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی انتقال در محیط سنتی و برنامه‌ریزی توسعه‌ی انتقال در محیط تجدید ساختار یافته تقسیم می‌شود [۶].

[1] Transmission system expansion planning
[2] Static transmission expansion planning
[3] Dynamic transmission expansion planning

۱-۲ اصول مدل‌سازی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال

به منظور استفاده از الگوریتم‌های ارائه‌شده برای حل مسئله‌ی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال، باید این مسئله را مدل-سازی کنیم. مدل‌های مختلفی بدین منظور ارائه شده‌اند که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها مدل DC [۷]، مدل حمل و نقل (مدل DC بدون محدودیت غیرخطی) [۸]، مدل هیبرید (ترکیبی از مدل DC و حمل و نقل) [۶] و مدل AC می‌باشد. این مدل‌سازی‌ها به صورت حداقل سازی یک تابع هدف که هزینه‌ی سرمایه‌گذاری احداث خطوط انتقال جدید است به شرط رعایت قیود مختلف شبکه همچون ظرفیت خطوط، توان نامی ژنراتورها و معادلات پخش بار و قیود دیگر تعریف می‌گردد. هریک از این مدل‌سازی‌ها که به عنوان مدل‌های پایه‌ای TEP[1] شناخته می‌شوند، دارای یک سری ساده‌سازی‌ها می‌باشند و ممکن است طرح توسعه‌ای که از این مدل‌ها به‌دست می‌آید ناقص بوده و از جواب بهینه‌ی واقعی دور باشد. دلیل اصلی اعمال این ساده‌سازی‌ها به مسئله‌ی TEP، پیچیده شدن مسئله و عدم انعطاف الگوریتم‌های حل مسئله در مسائل پیچیده و بزرگ و لزوم کاهش این پیچیدگی بوده است. امروزه با پیشرفت الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، امکان حذف این ساده‌سازی‌ها که بعضاً بسیار تأثیرگذار می‌باشند وجود دارد. به همین خاطر در چند سال گذشته تلاش‌هایی در جهت کامل‌تر کردن مدل مسئله‌ی TEP و رسیدن به طرح‌های توسعه‌ی بهینه‌تر و واقعی‌تر انجام شده است. ازجمله مهم‌ترین این مواردی که می‌توان جهت کامل‌تر کردن مدل‌های پایه‌ای مسئله TEP به آن‌ها اضافه نمود، درنظر گرفتن هزینه‌ی بهره‌برداری در تابع هدف، در نظر گرفتن زمان احداث خطوط انتقال جدید، در نظر گرفتن مسئله‌ی قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال، درنظر گرفتن عدم قطعیت بار پیش‌بینی-شده و لحاظ نمودن تلفات خطوط انتقال می‌باشد.

نکته‌ی مهم در مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال این است که باید در دل برنامه‌ریزی، الگوی تولید واحدهای نیروگاهی نیز تعیین گردد [۱]. زیرا برای تعیین توان عبوری از خطوط موجود و جدید شبکه باید تولید هر یک از نیروگاه‌ها مشخص باشد [۱]. الگوی تولید نیروگاه‌ها در طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال مؤثر است و الگوهای تولید متفاوت، طرح‌های توسعه‌ی متفاوتی را ایجاد می‌کند. درنتیجه باید با تغییر الگوی تولید، بهترین طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال را با مینیمم هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بدست آورد. این الگوی تولید اگرچه به یک طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با مینیمم هزینه‌ی سرمایه‌گذاری منجر می‌شود ولی باید از لحاظ هزینه‌ی بهره‌برداری هم مورد بررسی قرار گیرد. تعیین الگوی تولید مناسب نیروگاه‌ها، خود به‌صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی مدل می‌شود که در آن باید با

[1] Transmission system expansion planning

تغییر تولید نیروگاه‌ها در یک بازه‌ی مشخص، هزینه‌ی بهره‌برداری (هزینه‌ی تولید نیروگاه‌ها) مینیمم گردد. بنابراین می‌توان با تغییر الگوی تولید نیروگاه‌ها و اضافه‌کردن هزینه‌ی بهره‌برداری به تابع هدف (شامل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری احداث خطوط جدید) و پیدا کردن الگوی تولید مناسب، بهترین طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال را به‌دست آورد.

در اکثر مقالات تحقیقاتی از مدل مسئله‌ی TEP استاتیکی به منظور دستیابی به طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال استفاده می‌شود. در این مدل با حذف زمان احداث خطوط انتقال جدید، فقط تعداد و محل خطوط جدید مشخص می‌گردند. با توجه به بلندمدت بودن مسئله‌ی TEP و تغییر پیوسته‌ی بار در افق زمانی مشخص شده برای برنامه‌ریزی، منطقی است که زمان احداث خطوط جدید نیز مشخص شوند [۶]. به این برنامه‌ریزی، برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال دینامیکی گفته‌می‌شود. پیچیدگی و تعداد زیاد متغیرهای مسئله، عیب اصلی مسئله‌ی TEP دینامیکی است که باعث شده کمتر از این مسئله استفاده شود. با این‌حال با توجه به اهمیت مسئله‌ی TEP دینامیکی، سعی شده است ساده‌سازی‌هایی در آن انجام شود تا در زمان معقول به جواب مناسب دست یابد. یکی از این ساده‌سازی‌ها، شکستن مسئله به چند زیربخش و حل هرکدام از آن‌ها با استفاده از روش‌های استاتیکی می‌باشد [۶]. به این روش‌ها، روش-های TEP شبه‌دینامیکی یا چندمرحله‌ای[1] گفته می‌شود [۶]. ازجمله مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های پیش-رونده، پس‌رونده و پیش‌رونده-پس‌رونده اشاره نمود [۶]. در این پایان‌نامه از روش پیش‌رونده استفاده شده است که در آن از سال اول طراحی شروع شده و پس از به‌دست آوردن طرح توسعه‌ی بهینه در هر مرحله و کنار هم گذاشتن آن‌ها، طرح توسعه‌ی کلی شبکه به‌دست می‌آید.

از دیگر مسائل مهم که در مدل TEP پایه‌ای در نظر گرفته نمی‌شود و ازجمله مهم‌ترین مباحث شبکه‌ی قدرت می‌باشد، قابلیت اطمینان شبکه‌ی قدرت است. قابلیت اطمینان شبکه‌ی قدرت در مسئله‌ی TEP معمولاً با معیار N-1 سنجیده می‌شود. به این صورت که با حذف هر المان شبکه‌ی قدرت (شامل هر خط شبکه‌ی انتقال توسعه‌یافته (شبکه‌ی انتقال اولیه با اضافه کردن خطوط انتقال جدید) و هر نیروگاه شبکه‌ی قدرت) خطوط انتقال شبکه دچار اضافه بار نشوند و به حالت پایدار خود ادامه دهند [۱۰]. از نکاتی که هنگام بررسی قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال باید مدنظر قرار داد این است که بعد از حذف هر المان شبکه‌ی قدرت باید الگوی تولید جدیدی برای نیروگاه‌ها در نظر گرفته شود و سپس توان عبوری از خطوط انتقال دیگر به‌دست آورده شود. دلیل انجام این کار این است که ممکن

[1] Multi-stages transmission expansion planning

است خط انتقالی بعد از حذف یک المان شبکه‌ی قدرت و الگوی تولید اولیه اضافه بار شود ولی با الگوی تولید جدید، از حالت اضافه بار خارج شود. بنابراین باید بهینه‌سازی دیگری به مسئله‌ی TEP هنگام بررسی قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال اضافه‌گردد که تعداد این بهینه‌سازی‌ها به تعداد المان‌های شبکه بستگی دارد. در نتیجه سرعت برنامه-ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال به شدت کاهش می‌یابد ولی به دلیل اهمیت بالای مسئله‌ی قابلیت اطمینان، انجام این کار لازم است.

برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال از منظر ساختار شبکه‌ی قدرت بر دو نوع برنامه‌ریزی در محیط سنتی و برنامه‌ریزی در محیط تجدید ساختار یافته صورت می‌پذیرد [۳]. در محیط تجدید ساختار یافته، عدم قطعیت‌های زیادی به دلیل نوع ساختار این شبکه وجود دارد [۳]. به عنوان مثال شرکت‌های خصوصی فعال در بازار ، استراتژی خود را به منظور بیشینه‌کردن سود خود، پی‌درپی عوض می‌کنند و همچنین مصرف‌کنندگان انرژی نیز میزان مصرف خود را با قیمت برق تنظیم می‌کنند. در نتیجه برنامه‌ریز از برنامه‌ی توسعه‌ی تولید و رشد بار اطلاعات کافی ندارد و این منجر به عدم قطعیت‌های شدید در این محیط می‌گردد [۳]. در مدل‌سازی مسئله‌ی TEP در محیط سنتی معمولا پارامترهای شبکه به صورت قطعی مدل می‌شود و تنها بدترین حالت شبکه بدون لحاظ کردن درجه‌ی اهمیت بقیه‌ی حالات در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. در این برنامه‌ریزی با وجود اینکه برنامه‌ریز به کلیه‌ی اطلاعات شبکه دسترسی دارد و محدوده‌ی عدم قطعیت‌های شبکه بسیار کم می‌باشد، باز هم عدم قطعیت‌هایی در آینده وجود خواهد داشت [۳]. از جمله مهم‌ترین این عدم‌قطعیت‌ها، بار پیش‌بینی شده‌ی آینده می‌باشد که به دلیل خطاهای روش پیش‌بینی و همچنین پارامترهای دخیل در پیش‌بینی، مقدار پیش‌بینی شده ممکن است با مقدار واقعی تفاوت داشته باشد [۱۱]. به-منظور دقیق‌تر کردن طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال ارائه شده، این عدم قطعیت باید به نحوی در مدل مسئله‌ی TEP گنجانده شود. روش‌های مختلفی به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌های شبکه‌ی قدرت وجود دارد که ازجمله مهم-ترین آن‌ها، روش‌های احتمالاتی، آنالیز تصمیم‌گیری و تکنیک سناریو می‌باشد [۳]. روش‌های فوق هرکدام به دلایلی روش‌هایی سخت و پیچیده بوده و ممکن است استفاده از آن‌ها در شبکه‌های بزرگ و همچنین در مدل‌های کامل مسئله‌ی TEP پیچیدگی مسئله را بسیار زیاد کند. روشی که در این پایان‌نامه برای مدل‌سازی عدم قطعیت بار درنظر گرفته شده است، تعیین یک بازه برای بار هر باس شبکه به جای یک مقدار قطعی می‌باشد [۱۱]. در واقع بار هر باس به عنوان یک متغیر از مسئله در نظر گرفته می‌شود که در بازه‌ی تعیین شده برای آن تغییر می‌کند. مجموع بار باس‌ها با یک ضریب منفی در تابع هدف قرار داده می‌شود و هدف از مسئله می‌نیمم کردن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و ماکزیمم

کردن بار کل شبکه می‌باشد [۱۱]. مزیت این روش این است که علاوه بر مدل‌سازی عدم قطعیت بار شبکه، بار باس‌ها نیز بهینه می‌شود [۱۱]. البته این روش عیب‌هایی نیز دارد که می‌توان با تغییراتی در آن و همچنین استفاده از تجربه‌ی برنامه‌ریز، این عیب‌ها را پوشش داد. لازم به ذکر است علاوه بر بار، بعضی از پارامترهای دیگر استفاده شده در مدل قطعی مثل الگوی توسعه‌ی تولید آینده نیز با عدم قطعیت‌هایی همراه هستند که این پارامترها را نیز می‌توان با این روش مدل‌سازی نمود. البته میزان عدم‌قطعیت این پارامترها زیاد نبوده و تأثیرگذاری آن‌ها در مسئله‌ی TEP کم می‌باشد.

از دیگر ساده‌سازی‌هایی که در مدل پایه‌ای مسئله‌ی TEP انجام شده است، صرفنظر کردن از تلفات خطوط انتقال و استفاده از پخش بار DC جهت به‌دست آوردن توان عبوری از خطوط می‌باشد. در شبکه‌های قدرت واقعی، تلفات خطوط انتقال بزرگ بوده و درنظر گرفتن آن ممکن است تغییراتی در طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال ایجاد کند [۱۲]. بنابراین تلفات خطوط انتقال باید به روشی در مسئله‌ی TEP در نظر گرفته شود. استفاده از پخش بار AC جهت به‌دست آوردن توان عبوری از خطوط، یکی از این روش‌ها می‌باشد. البته استفاده از این روش باعث کند شدن مسئله‌ی برنامه‌ریزی می‌شود. بنابراین با اعمال تغییراتی در مدل پایه‌ای مسئله‌ی TEP می‌توان با وجود استفاده از پخش بار DC، تلفات خطوط انتقال را نیز در نظر گرفت. بدین صورت که توان عبوری از خطوط و تلفات خطوط با استفاده از پارامترهای به‌دست آمده از پخش‌بار DC محاسبه می‌شوند و مجموع توان عبوری و تلفات هر خط باید در محدوده‌ی مجاز مشخص شده برای آن خط قرار گیرد [۱۳]. لازم به ذکر است در مقالاتی به دلیل عدم امکان استفاده از روابط غیرخطی در الگوریتم بهینه‌سازی، تلفات خطوط و همچنین هزینه‌ی بهره‌برداری خطی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳]. در این پایان‌نامه به دلیل استفاده از روش بهینه‌سازی PSO[1] و امکان استفاده از روابط غیرخطی، نیازی به خطی‌سازی این روابط وجود ندارد.

موارد فوق برخی از مسائل مهم و تأثیرگذاری است که در مدل‌های اولیه‌ی مسئله TEP لحاظ نشده است. در سال‌های اخیر محققین با ارائه مدل‌هایی کامل‌تر سعی در لحاظ کردن این موارد در مسئله TEP داشته‌اند. در این پایان‌نامه با مروری بر این مدل‌های کامل‌تر و شبیه‌سازی آن‌ها در شبکه تست ۲۴ باسه IEEE با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO، تأثیر لحاظ کردن هر یک از این مسائل در مسئله TEP مورد بررسی قرار می‌گیرد.

[1] Particle swarm optimizition

از پیچیدگی‌هایی که در روند برنامه‌ریزی توسعه‌ی تولید و شبکه‌ی انتقال وجود دارد، ارتباط تنگاتنگ این دو برنامه‌ریزی توسعه به یکدیگر می‌باشد [۱]. از یک طرف نتایج برنامه‌ریزی توسعه‌ی انتقال تا حد بسیار زیادی به نتایج برنامه‌ریزی در بخش تولید وابسته است و از طرف دیگر نتایج برنامه‌ریزی توسعه‌ی انتقال بر طرح‌های توسعه‌ی تولید تأثیر می‌گذارد [۱]. اگر برنامه‌ریزان توسعه‌ی تولید قبل از برنامه‌ریزی از طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال اطلاع داشته باشند بهتر می‌توانند درمورد طرح توسعه‌ی تولید و مکان نیروگاه‌های جدید برنامه‌ریزی کنند. همچنین طبق مدل‌های ارائه‌شده‌ی مسئله‌ی TEP، برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال بدون در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به مکان و ظرفیت نیروگاه‌های شبکه امکان‌پذیر نمی‌باشد [۱]. بنابراین برای این‌که بتوان یک برنامه‌ریزی بهینه برای شبکه‌ی قدرت انجام داد این دو برنامه‌ریزی یا باید با هم در یک مسئله بهینه‌سازی انجام شوند که این کار در شبکه‌های قدرت بزرگ بسیار سخت بوده و نیاز به ساده‌سازی‌های بسیار زیادی دارند یا باید به صورت مجزا انجام شده ولی در هماهنگی کامل با هم قرار داشته باشند. ایجاد هماهنگی مناسب بین این دو برنامه‌ریزی توسعه همچنان از دغدغه‌های برنامه‌ریزان شبکه قدرت می‌باشد. به همین خاطر در مدل‌های اولیه‌ی مسئله‌ی TEP همچنان از طرح‌های بهینه‌ی توسعه‌ی تولید به‌دست آمده از GEP[1] استفاده نمی‌شوند و با افزایش بار کل شبکه، ماکزیمم ظرفیت نیروگاه‌های موجود در شبکه‌ی اولیه متناسب با افزایش بار کل و به صورت یکنواخت افزایش داده می‌شوند. درحالی که ممکن است با افزایش بار شبکه به نسبت معین، ماکزیمم ظرفیت یک نیروگاه با نسبت دیگری تغییر یابد و حتی ممکن است در باسی از شبکه که نیروگاه وجود نداشته است، نیروگاه جدیدی احداث گردد که موارد فوق با توجه به طرح توسعه‌ی تولید مشخص می‌شود. در این پایان‌نامه تلاش شده است با ایجاد تغییراتی در مدل پایه‌ای مسئله‌ی TEP، این عیب را تا حدی پوشش داد. بدین صورت که ماکزیمم ظرفیت تولید هر نیروگاه شبکه به‌عنوان متغیر مسئله در نظر گرفته شده و برای هرکدام از آن‌ها یک بازه حول مقدار افزایش داده شده در مدل پایه‌ای مسئله‌ی TEP تعیین می‌شود. با تغییر ماکزیمم ظرفیت تولید نیروگاه‌ها در بازه تعیین شده و سپس تعیین الگوی تولید مناسب با توجه به ماکزیمم ظرفیت تولید مشخص شده، سعی در می‌نیمم کردن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری احداث خطوط انتقال جدید داریم. طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال به‌دست آمده از این مدل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کمتری نسبت مدل پایه‌ای مسئله‌ی TEP دارد. همچنین با انجام محاسبات مر بوط به GEP، الگوی توسعه‌ی تولید مشخص شده در این مدل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کمتری را خواهد داشت. بنابراین هماهنگی بین مسئله‌ی TEP و الگوی توسعه‌ی تولید به

[1] Generation expansion planning

وجود خواهد آمد. اگر بتوان ابتدا برنامه‌ریزی توسعه‌ی تولید را به صورت تک باسه انجام داد و نوع و ظرفیت نیروگاه‌هایی که باید به شبکه اضافه شوند را مشخص نمود. سپس مسئله‌ی TEP را با استفاده از مدل پیشنهادی ارائه شده در این پایان‌نامه (تعیین یک بازه برای ماکزیمم ظرفیت تولید نیروگاه‌های جدید) اجرا نمود، هماهنگی بهتری بین برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال و برنامه‌ریزی توسعه‌ی تولید ایجاد می‌شود. حاصل این هماهنگی، برنامه‌ی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال و الگوی توسعه‌ی تولید با هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کمتر است. به عبارت دیگر با استفاده از این روش (تعیین یک بازه‌ی معین برای ماکزیمم ظرفیت تولید نیروگاه‌های جدید به‌دست آمده از GEP و سپس انجام TEP)، الگوی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال و الگوی توسعه‌ی تولیدی ارائه می‌گردد که دارای مجموع هزینه‌ی سرمایه-گذاری توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال و هزینه‌ی الگوی توسعه‌ی تولید کمتر نسبت به حالت اولیه (بدون در نظر گرفتن بازه-ی معین برای ماکزیمم ظرفیت تولید نیروگاه‌های جدید) می‌باشد. بنابراین هماهنگی مناسبی بین TEP و GEP برقرار شده است. بیشترین هماهنگی و کمترین مقدار برای مجموع هزینه سرمایه‌گذاری با تکرار محاسبات به‌ازای تغییر حدود بازه انتخابی حاصل می‌گردد. در این پایان‌نامه، با شبیه‌سازی این روش در شبکه‌ی تست ۲۴ باسه IEEE، قابلیت و مزایای آن نسبت به روش‌های متداول مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور دستیابی به طرح توسعه‌ی بهینه‌تر و مناسب‌تر شبکه‌ی انتقال باید مدل‌سازی دقیق‌تر و نسبتا کاملی از مسئله‌ی TEP ارائه کرد که در آن موارد گفته شده در بالا تا حد امکان لحاظ شده باشد. در این پایان‌نامه با ترکیب مدل‌های مختلف ارائه شده در سال‌های اخیر و در نظر گرفتن ظرفیت تولید واحدهای نیروگاهی در یک بازه‌ی انعطاف‌پذیر تا حد امکان به مدل کامل‌تر مسئله‌ی TEP نزدیک می‌شویم. با شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در شبکه تست ۲۴ باسه IEEE، نتایج این مدل بررسی می‌گردد.

۱-۳ ساختار پایان‌نامه

فصل دوم: در این فصل با مروری بر مسئله‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال، جوانب مختلف آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل سوم: در این فصل مدل‌سازی‌های پایه‌ای مسئله‌ی TEP بیان می‌شود و سپس با بررسی برخی از ساده-سازی‌های صورت‌گرفته در این مدل‌ها، مدل‌های کامل‌تر مسئله ارائه می‌گردد. همچنین در این فصل مبحث