بسم الله الرحمن الرحیم
بهار

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش قدرت

برنامه‌ریزی توسعه شبکه فوق‌توزیع در حضور مزارع بادی با در نظر گرفتن مدل ترکیبی برای قابلیت اطمینان سیستم

ارائه دهنده:

محمد حسین عابدی

استاد راهنما:

دکتر محمد صادق سپاسیان

استاد مشاور:

دکتر داود فرخزاد

پاییز ۱۳۹۱

پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق- قدرت آقای محمد حسین عابدی

تحت عنوان:

برنامه‌ریزی توسعه شبکه فوق‌توزیع در حضور مزارع بادی با در نظر گرفتن مدل ترکیبی برای قابلیت اطمینان سیستم

در تاریخ ۱۳۹۱/۷/۱۷ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنما و جانشین سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده برق: دکتر محمد صادق سپاسیان

۲. استاد ممتحن (داخلی): دکتر محمد احمدیان

۳. استاد ممتحن (خارجی): دکتر محمد کاظم شیخ الاسلامی

«تعهد اصالت اثر»

اینجانب « محمد حسین عابدی » تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه ماحصل کار پژوهشی اینجانب بوده و به پژوهش دیگران که در این نوشتار از آن‌ها استفاده شده، مطابق قوانین و مقررات ارجاع گردیده است.

این پایان‌نامه قبلاً برای هیچ مدرک همسطح و یا بالاتر ارائه نشده و کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعت آب و برق می‌باشد.

نام و نام خانوادگی: محمد حسین عابدی

تقدیم به

پدر و **مادرم** که دعای خیرشان همیشه پناهم بوده است.

از خداوند منان خواهانم که بتوانم زحمات همه عزیزان را ارج نهاده و خورشید معرفت و علم و دانش را در وجودم نمایان سازم و در خلوت گاه اسرار معبودم را بشناسم.

امام علی (ع):

« مَن علَّمنی حَرفاً فَقَد سَـیَّرنی عَبداً »

کسی که کلمه‌ای به من بیاموزد پس به درستی که

مرا بند خود ساخته است

بر خود لازم میدانم از زحمات تمام کسانی که تا کنون مرا در راه یادگیری علم و اخلاق یاری کرده‌اند و کانون بزرگ علوم و معارف انسانی را بر فراز جامعه مدنی بر پا نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

تشکر خاص اینجانب متعلق به کلیه اساتید محترم بـالاخص، **جنـاب آقـای دکتـر محمـد صـادق سپاسیان** می‌باشد که صادقانه مرا در راه پیشبرد اهداف علمی یار و یاور بودند و با صبر و حوصـله در انجـام این پایان نامه راهنمایی‌ام نمودند.

چکیده

برنامه‌ریزی توسعه شبکه فوق‌توزیع یکی از بخش‌های مهم برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های قدرت می‌باشد که هدف آن مشخص کردن مکان، زمان و ظرفیت احداث پست‌های فوق‌توزیع جدید و توسعه پست‌های موجود و نیز مکان، زمان، و تعداد خطوط فوق‌توزیع جدید برای افزودن به شبکه فوق‌توزیع می‌باشد به نحوی که تحویل انرژی الکتریکی به مراکز بار با لحاظ نمودن مجموعه‌ای از قیود بهره برداری و قابلیت اطمینان به اقتصادی‌ترین نحو ممکن صورت گیرد.

از طرفی نگرانی‌های زیست‌محیطی جهانی و نیاز روز افزون به استفاده از انرژی از یک سو و افزایش بهای سوخت‌های فسیلی در چند سال اخیر و کاهش این منابع در سطح جهان از سوی دیگر، باعث افزایش استفاده از منابع تجدید پذیر در تولید انرژی الکتریکی شده است. انرژی باد، امروزه به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع تولید انرژی الکتریکی در بسیاری از کشورها جایگزین نیروگاه‌های مرسوم فسیلی شده و در نتیجه نفوذ انرژی باد در بخش تولید انرژی الکتریکی به شدت افزایش یافته است.

در اکثر مطالعات انجام شده، روش فراگیری برای انجام مطالعات برنامه‌ریزی شبکه فوق‌توزیع که در آن از یک طرح جامع برای مدل کردن انرژی باد استفاده شده باشد و همچنین ملاحظات قابلیت اطمینان شبکه نیز مد نظر قرار گرفته باشد، وجود ندارد.

این پایان‌نامه با رویکرد تجمیع اهداف بیان شده به بررسی تأثیر حضور مزارع بادی در برنامه ریزی توسعه شبکه فوق توزیع با در نظر گرفتن ملاحظات قابلیت اطمینان شبکه می‌پردازد. می‌توان به تعیین مدل احتمالاتی توان خروجی مزارع بادی، در نظر گرفتن احتمال وقوع پیشامد یگانه در برخی اجزای شبکه، در نظر گرفتن تغییرات سالیانه بار توسط منحنی تداوم بار و تعیین میزان خرید بهینه برق از سیستم انتقال و مزارع بادی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و نهایتاً استفاده از الگوریتم ژنتیک با یک کد گذاری جامع جهت در نظر گرفتن تمامی متغیرهای مسأله اشاره نمود. روش پیشنهادی بر روی یک شبکه نمونه اعمال گردیده و تأثیر پارامترهای مختلف بر برنامه‌ریزی توسعه طی آزمایش‌های مختلف بررسی شده است.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه، شبکه فوق‌توزیع، مزارع بادی، مدل مارکوف نیروگاه بادی، قابلیت اطمینان، الگوریتم ژنتیک

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱) مقدمه ۲

فصل دوم: مطالعات برنامه‌ریزی توسعه سیستم قدرت و شبکه فوق‌توزیع ۸

۲-۱) مقدمه ۹

۲-۲) مدل ریاضی برنامه‌ریزی توسعه ۹

۲-۳) بخش‌های مختلف برنامه‌ریزی توسعه سیستم قدرت از دیدگاه تجهیزات اضافه شونده به شبکه ۹

۲-۳-۱) برنامه‌ریزی توسعه تولید ۱۰

۲-۳-۲) برنامه‌ریزی توسعه خطوط ۱۰

۲-۳-۳) برنامه‌ریزی توسعه پست‌ها ۱۴

۲-۴) برنامه‌ریزی توسعه توأم تجهیزات ۱۵

۲-۵) تقسیم بندی مطالعات برنامه‌ریزی توسعه با توجه به در نظر گرفتن اثر زمان ۱۵

۲-۵-۱) برنامه‌ریزی توسعه استاتیکی ۱۶

۲-۵-۲) برنامه‌ریزی توسعه دینامیکی ۱۶

۲-۶) مطالعات برنامه‌ریزی توسعه شبکه فوق‌توزیع ۱۶

۲-۶-۱) عوامل مؤثر در برنامه‌ریزی توسعه پست‌ها ۱۷

۲-۶-۲) تعریف دقیق‌تر مسأله برنامه‌ریزی توسعه و جایابی پست‌ها ۱۸

۲-۶-۳) روش‌ها و مدل‌های ارائه شده برای حل مسأله برنامه‌ریزی توسعه و جایابی پست‌ها ۲۱

۲-۷) برنامه‌ریزی توسعه خطوط فوق‌توزیع ۲۳

۲-۷-۱) روش‌ها و مدل‌های ارائه شده برای حل مسأله برنامه‌ریزی توسعه خطوط ۲۳

۲-۸) جمع بندی ۲۴

فصل سوم: مدل قابلیت اطمینان مزارع بادی ۲۵

۳-۱) مقدمه ۲۶

۳-۲) انرژی باد در ایران ۳۳

۳-۳) مدل سرعت باد و توان خروجی توربین بادی ۳۶

۳-۴) مدل مارکوف برای توان خروجی یک توربین بادی ۳۸

۳-۴-۱) تشکیل جدول COPT برای توان خروجی یک توربین بادی ۴۱
۳-۵) مدل تحلیلی مزرعه بادی ۴۲
۳-۵-۱) مدل مارکوف برای توان خروجی نیروگاه بادی ۴۲
۳-۵-۲) تشکیل جدول COPT برای توان خروجی مزرعه بادی ۴۴
۳-۶) جمع بندی ۴۵

فصل چهارم: برنامه‌ریزی توسعه شبکه فوق‌توزیع در حضور مزارع بادی با در نظر گرفتن مدل ترکیبی برای قابلیت اطمینان سیستم

..... ۴۶
۴-۱) مقدمه ۴۷
۴-۲) بیان مسأله ۴۷
۴-۲-۱) مؤلفه‌های هزینه ۴۷
۴-۲-۲) نقاط مصرف ۴۸
۴-۲-۳) مدل سازی ریاضی مسأله ۴۹
۴-۲-۳-۱) مجهولات مسأله ۴۹
۴-۲-۳-۲) تابع هدف مسأله ۴۹
۴-۲-۳-۳) قیود قابلیت اطمینان شبکه ۵۲
۴-۲-۳-۴) قیود احداث تجهیزات شبکه ۵۳
۴-۳) اطلاعات ورودی ۵۴
۴-۴) ارزش زمانی پول ۵۴
۴-۵) روند کلی حل مسأله ۵۵
۴-۶) الگوریتم ژنتیک(GA) ۵۶
۴-۶-۱) ساختار کروموزوم ۵۷
۴-۶-۲) روند انجام برنامه‌ریزی توسعه با استفاده از GA ۵۸
۴-۶-۲-۱) تولید جمعیت اولیه ۵۸
۴-۶-۲-۲) تعریف برازش هر فرد ۵۸
۴-۶-۲-۳) عمل گر انتخاب ۵۸

۴-۶-۲-۴) عمل گر تزویج ۵۹
۴-۶-۲-۵) عمل گر جهش ۵۹
۴-۷) روند محاسبه مؤلفه‌های تابع هدف ۵۹
۴-۷-۱) کدگشایی بخش اول کروموزوم ۵۹
۴-۷-۲) کدگشایی بخش دوم کروموزوم ۵۹
۴-۷-۳) اجرای برنامه‌ریزی خطی (LP) ۵۹
۴-۷-۳-۱) معرفی برنامه‌ریزی خطی ۵۹
۴-۷-۳-۲) محاسبه هزینه احداث و توسعه پست‌ها ۶۰
۴-۸) اطلاعات خروجی ۶۳
۴-۹) جمع بندی ۶۳
فصل پنجم: مطالعات عددی ۶۴
۵-۱) مقدمه ۶۵
۵-۲) اعمال روش پیشنهادی بر روی شبکه نمونه ۶۵
۵-۳) نتایج شبیه سازی ۶۷
۵-۳-۱) آزمایش ۱: حالت پایه ۶۷
۵-۳-۱-۱) طرح توسعه بدون حضور مزارع بادی ۶۷
۵-۳-۱-۲) طرح توسعه با حضور مزارع بادی ۶۸
۵-۳-۲) آزمایش ۲: بررسی تأثیر هزینه تأمین توان از نیروگاه بادی ۷۲
۵-۳-۳) آزمایش ۳: بررسی تأثیر سرعت باد ۷۴
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۸
۶-۱) نتیجه گیری ۷۹
۶-۲) پیشنهادات ۸۰
مراجع و مآخذ ۸۱

فهرست اشکال

شکل (۲- ۱): انواع تقسیم بندی‌های بار مورد مطالعه ۱۹

شکل(۳- ۱):میزان نفوذ باد در کشورهای جهان تا سال ۲۰۱۱ ..... ۲۷
شکل(۳- ۲):روند پیشرفت تکنولوژی ساخت توربین‌های بادی ۲۸
شکل(۳- ۳):روند کاهش هزینه نصب نیروگاه‌های بادی ۲۸
شکل(۳- ۴):تابع توزیع رالی جهت مدل سازی سرعت باد و انرژی باد ۳۰
شکل(۳- ۵):پاسخگویی سیستم تولید به بار شبکه در یک شبانه روز در غیاب نیروگاه‌های بادی ۳۲
شکل(۳- ۶):پاسخگویی سیستم تولید به بار شبکه در یک شبانه روز در حضور نیروگاه‌های بادی ۳۳
شکل(۳- ۷) داده‌های آماری سرعت باد یک سایت نمونه ۳۵
شکل(۳- ۸) تابع توزیع احتمال داده‌های شکل (۳-۷) ۳۶
شکل(۳- ۹):منحنی توان یک توربین بادی ۳۷
شکل(۳- ۱۰):منحنی توان توربین مدل V80-2 MW ۳۹
شکل(۳- ۱۱):داده‌های سرعت باد ۳۹
شکل(۳- ۱۲):داده‌های کلاستر شده سرعت باد ۴۰
شکل(۳- ۱۳):زنجیره مارکوف برای مدل ۵ حالته توربین بادی ۴۰
شکل(۳- ۱۴):مدل مارکوف دو حالته سالم و خراب توربین ۴۲
شکل(۳- ۱۵):فضای حالت سالم و خراب Nt توربین همسان ۴۳
شکل(۳- ۱۶):مدل مارکوف توان خروجی مزرعه بادی با Nt توربین ۴۴

شکل(۴- ۱):منحنی تداومی مصرف برای نقاط بار ۴۸
شکل(۴- ۲):تغییرات پله‌ای هزینه احداث پست نسبت به توان آن ۵۰
شکل(۴- ۳):روند کلی الگوریتم ژنتیک ۵۷
شکل(۴- ۴):ساختار کروموزوم پیشنهادی ۵۷
شکل(۴- ۵):فلوچارت روند کلی حل مسأله ۶۱
شکل(۴- ۶):جهت توان عبوری از پست ۶۲
شکل(۴- ۷):ظرفیت ترانسفورماتورها در آرایش‌های مختلف با در نظر گرفتن پیشامد یگانه ۶۲

شکل(۵- ۱):دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه ۶۵
شکل(۵- ۲): مقایسه هزینه‌های ثابت طرح توسعه با حضور و بدون حضور مزارع بادی ۷۱
شکل(۵- ۳): مقایسه هزینه بهره برداری در طول دوره مطالعات ۷۱
شکل(۵- ۴): مقایسه هزینه کل برنامه ریزی توسعه با حضور و بدون حضور مزارع بادی ۷۲
شکل(۵- ۵):مقایسه هزینه‌های ثابت طرح توسعه با هزینه خرید برق از مزارع بادی و بدون آن ۷۳

شکل(۵- ۶):مقایسه هزینه کل برنامه ریزی توسعه با هزینه خرید برق از مزارع بادی و بدون آن ۷۴
شکل(۵- ۷):هزینه بهره برداری برنامه ریزی توسعه طی سه آزمایش ۷۶
شکل(۵- ۸):هزینه کل برنامه ریزی توسعه طی سه آزمایش ۷۷

فهرست جداول

جدول(۳- ۱):آثار کوتاه مدت استفاده از نیروی باد در یک سیستم قدرت ۳۱

جدول(۳- ۲): آثار بلند مدت استفاده از نیروی باد در یک سیستم قدرت ۳۲

جدول(۳- ۳):COPT برای توربین با مدل مارکوف ۴ حالته ۴۱

جدول(۳- ۴):COPT برای توربین با مدل مارکوف ۵ حالته ۴۱

جدول(۳- ۵):COPT برای توربین با مدل مارکوف ۸ حالته ۴۲

جدول(۳- ۶):COPT برای مزرعه بادی با ۱۰ توربین و مدل مارکوف ۶ حالته ۴۵

جدول(۴- ۱):اطلاعات ورودی مورد نیاز برای حل مسأله ۵۵

جدول(۵- ۱):اطلاعات شبکه نمونه ۶۵

جدول(۵- ۲):اطلاعات فنی و اقتصادی مورد نیاز برای انجام مطالعه ۶۶

جدول(۵- ۳):اطلاعات فنی خطوط فوق توزیع ۶۶

جدول(۵- ۴): اطلاعات فنی پست‌ها ۶۶

جدول(۵- ۵):اطلاعات فنی ترانسفورماتورها ۶۶

جدول(۵- ۶):مشخصات پست‌های انتخابی پس از توسعه شبکه ۶۷

جدول(۵- ۷):مشخصات خطوط اضافه شونده به شبکه ۶۸

جدول(۵- ۸): اجزای هزینه حاصل از اجرای مطالعات عددی ۶۸

جدول(۵- ۹): جدول احتمالات توان خروجی ۵ حالته یک توربین بادی برای پست شماره ۵ ..... ۶۸

جدول(۵- ۱۰)جدول احتمالات توان خروجی ۵ حالته یک توربین بادی برای پست شماره ۷ ..... ۶۹

جدول(۵- ۱۱):جدول احتمالات توان خروجی ۵ حالته یک توربین بادی برای پست شماره ۸ ..... ۶۹

جدول(۵- ۱۲):مشخصات پست‌های انتخابی پس از توسعه شبکه با حضور مزارع بادی ۶۹

جدول(۵- ۱۳):مشخصات خطوط اضافه شونده به شبکه ۷۰

جدول(۵- ۱۴): مشخصات مزارع بادی احداث شده در پست‌ها ۷۰

جدول(۵- ۱۵):اجزای هزینه حاصل از اجرای مطالعات با حضور مزارع بادی ۷۰

جدول(۵- ۱۶):مشخصات مزارع بادی احداث شده در پست‌ها در آزمایش ۲ ..... ۷۲

جدول(۵- ۱۷):مشخصات خطوط اضافه شونده به شبکه در آزمایش ۲ ..... ۷۳

جدول(۵- ۱۸):اجزای هزینه حاصل از اجرای مطالعات در آزمایش۲ ..... ۷۳

جدول(۵- ۱۹): جدول احتمالات توان خروجی ۵ حالته یک توربین بادی برای پست شماره ۵ با افزایش سرعت باد ۷۴

جدول(۵- ۲۰)جدول احتمالات توان خروجی ۵ حالته یک توربین بادی برای پست شماره ۷ با افزایش سرعت باد ۷۵

جدول(۵- ۲۱):جدول احتمالات توان خروجی ۵ حالته یک توربین بادی برای پست شماره ۸ با افزایش سرعت باد ۷۵

جدول(۵- ۲۲):مشخصات خطوط اضافه شونده به شبکه در آزمایش ۳ ..... ۷۵

جدول(۵- ۲۳):مشخصات مزارع بادی احداث شده در پست‌ها در آزمایش ۳ ..... ۷۶
جدول(۵- ۲۴):اجزای هزینه حاصل از اجرای مطالعات در آزمایش۳..... ۷۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱) مقدمه

صنعت برق در دهه‌های گذشته رشد بسیاری داشته است؛ از ژنراتورهای توان پایین که مصرف نواحی محدود را پوشش می‌دهند تا شبکه‌های به هم پیوسته بزرگ که تأمین کننده برق چندین کشور و یا حتی قاره می‌باشند. امروزه شبکه قدرت یکی از بزرگ‌ترین سیستم‌های ساخته دست بشر است. بهره بردن از این شبکه بزرگ، کاری بسیار دشوار می‌باشد چرا که موجب ایجاد مسائل زیادی برای صنعت و علم گشته که باید به آن پرداخته شود [۱].

با رشد جوامع بشری احتیاج به انرژی به طور چشمگیری افزایش یافته است و بشر از صورت‌های مختلف انرژی برای تأمین این نیاز خود بهره جسته است. در این بین انرژی الکتریکی به دلیل داشتن مزایای ویژه، از جمله سهولت تولید و انتقال از توجه ویژه‌ای برخوردار بوده است. از این رو سیستم قدرت به عنوان مجموعه ادوات و تجهیزاتی که وظیفه تولید، انتقال و توزیع مطمئن انرژی الکتریکی برای مصرف کنندگان را به عهده دارد، دارای اهمیت فراوانی می‌باشد[۲] . رشد انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف کنندگان، تغییرات توان الکتریکی نسبت به زمان، محدودیت تأمین سوخت نیروگاه‌ها، محدودیت توان تولیدی نیروگاه‌ها، محدودیت توان عبوری از خطوط و محدودیت بارگذاری پست‌ها لزوم انجام مطالعه دقیق در سیستم قدرت را به منظور حفظ توانایی این سیستم در انجام وظایف خود آشکار می‌کنند. به طور کلی این مطالعات را می‌توان در دو بخش مطالعات بهره‌برداری و مطالعات برنامه‌ریزی تقسیم کرد. در مطالعات بهره‌برداری هدف تأمین نیاز انرژی مصرف کنندگان به طور مطمئن و مطلوب با حداقل هزینه در زمان حال می‌باشد. در اینجا فرض بر کفایت تجهیزات موجود است، به عبارتی تجهیزات موجود توانایی تأمین انرژی را به طور مطلوب دارند. مطالعاتی نظیر برنامه‌ریزی تولید، توزیع اقتصادی بار و پخش بار بهینه را می‌توان در زمره همین مطالعات دسته‌بندی کرد [۱,۲]. در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه، بخش‌هایی از سیستم قدرت کفایت و توانایی خود را در تأمین انرژی مورد نیاز مصرف کنندگان از دست داده‌اند و هدف تعیین ویژگی، نوع، زمان ورود و محل نصب تجهیزات جدید در زمان آینده می‌باشد باریکه ضمن برگرداندن کفایت مطلوب، هزینه توسعه نیز کم‌ترین باشد.

برای داشتن سیستمی پایدار و داشتن سطح قابلیت اطمینان و امنیت مناسب در سیستم، باید همواره برنامه ریزی و مدیریتی صحیح صورت گیرد. یکی از بخش‌های برنامه ریزی در شبکه قدرت، برنامه ریزی توسعه شبکه فوق توزیع می‌باشد که به دلیل نزدیکتر بودن به سمت مصرف کننده، نیاز به برنامه ریزی دقیق برای جلوگیری از قطعی بار و کاهش سطح قابلیت اطمینان سیستم دارد. تحقیقات و مطالعات متنوعی در این بخش صورت گرفته است. در زمینه توسعه خطوط این تحقیقات از نظر روش حل مسأله، در نظر گرفتن سال افق، رقابتی بودن سیستم و ابزارهای بهینه سازی با یکدیگر متفاوت می‌باشند[۳] . هدف از برنامه‌ریزی شبکه فوق توزیع، مشخص کردن مکان، زمان و ظرفیت احداث پست‌های جدید و توسعه پست‌های موجود و تعداد خطوط جدید برای افزودن به شبکه فوق‌توزیع می‌باشد، به نحوی که تحویل انرژی الکتریکی به مراکز بار با لحاظ نمودن مجموعه‌ای از قیود بهره‌برداری و قابلیت اطمینان به

اقتصادی‌ترین نحو ممکن صورت گیرد [٤]. اصولاً مدل‌های ارائه شده برای توسعه خطوط را می‌توان به دو دسته مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی و ابتکاری تقسیم کرد.

اولین بار در زمینه مدل بهینه سازی ریاضی در سال ۱۹۷۰، یک مدل ریاضی خطی برای توسعه شبکه با در نظر گرفتن مدل خطی حمل و نقل برای رفتار شبکه ارائه شد. سپس برای نزدیک کردن این مدل به واقعیت از پخش بار مستقیم استفاده شد[۵] . بعدها روش برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مسأله بیان شد که در این روش از روابط پخش بار مستقیم برای بررسی رفتار شبکه استفاده می‌شد. روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی پویا نیز برای حل مسأله توسعه شبکه بیان شده‌اند. به دلیل محدودیت‌های مدل‌های بهینه سازی ریاضی در پیاده کردن تمام جزییات مسأله برنامه‌ریزی توسعه خطوط، مدل‌های ابتکاری به عنوان یک جایگزین خوب برای مدل بهینه سازی ریاضی مورد استفاده قرار گرفته است.

یکی از اولین روش‌ها در زمینه مدل‌های ابتکاری در سال ۱۹۷۲ ارائه شد که از مفهوم شبکه الحاقی با ترکیب پخش بار مستقیم برای رفتار شبکه استفاده می‌کرد[٦] . یکی از متداول‌ترین روش‌های مدل ابتکاری، روش‌هایی هستند که بر مبنای استفاده از آنالیز حساسیت برای توسعه شبکه ارائه شده‌اند. انواع روش‌های پسرو و پیشرو بر این اساس کار می‌کنند[۷] .

بعدها با پیشرفت تکنولوژی و ارائه روش‌های جدید بهینه سازی، ارائه مدل‌هایی کامل‌تر، هم از نظر مدل سازی و هم روش حل ارائه شدند که امکان انجام سریع‌تر محاسبات را با در نظر گرفتن جزئیات بیشتر مسأله داشتند. در این زمینه می‌توان به روش‌های موازی سازی شده و الگوریتم‌های ژنتیک، آبکاری فولاد، جستجوی ممنوعه، تئوری بازی و ... اشاره کرد [۲]. بیشتر روش‌های ارائه شده در سال‌های اخیر به خاطر پیشرفت توانایی‌های کامپیوترها، روش‌های بهینه سازی جدید و سطح بالای عدم قطعیت به دلیل تجدید ساختار در شبکه برق بوده است.

در مورد برنامه‌ریزی توسعه پست‌ها نیز روش‌های متفاوتی ارائه شده که شامل روش‌هایی مبتنی بر تجربیات مهندسی، راه حل‌های کلاسیک و غیر کلاسیک ریاضی می‌باشند. برخی از روش‌ها قادر به پیشنهاد و انتخاب خودکار محل پست‌های جدید بوده و دسته‌ای دیگر تنها از بین کاندیدهای مشخص، پست‌ها را انتخاب می‌کنند.

در[۸] تعیین محل و ظرفیت پست‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به همراه الگوریتم حمل و نقل حل شده است. بعدها مدل توسعه یافته‌ای از روش حمل و نقل مرکب جهت انتخاب مکان پست‌ها ارائه شد[۹] . در [۱۰] یک روش بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح- مختلط مربعی ارائه شد که علاوه بر مکان و ظرفیت بهینه پست، ساختار شبکه توزیع را نیز پیدا می‌کرد. به مرور با پیشرفت کامپیوترها و الگوریتم‌های بهینه سازی، روش‌های جدیدی توسط الگوریتم ژنتیک و سیستم‌های خبره برای حل این مسأله ارائه شد[۱۱] . برای وارد کردن زمان در برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع، روش‌هایی بر اساس برنامه ریزی شبه پویا ارائه شد .

در سال ۲۰۰۱ برای نخستین بار روشی مناسب برای توسعه شبکه فوق توزیع به همراه تولید پراکنده[1] ارائه شد [۱۲]. در این مدل با مشخص بودن بار برای هر مکان پست، به بررسی میزان ظرفیت بهینه پست‌ها و تولیدات پراکنده برای هر مکان و چگونگی توسعه شبکه فوق توزیع پرداخته شده و اثر توسعه بر روی هزینه کل، مورد بررسی قرار گرفته است. در[۱۳] همین مسأله با کمک الگوریتم ژنتیک حل شده و نتایج با روش ارائه شده بر اساس آنالیز حساسیت که در تحقیق قبل بیان گردید، مقایسه شده است. این مراجع هزینه‌های بهره برداری را مورد توجه قرار نداده‌اند. [۱٤] یک روش چند مرحله‌ای به همراه الگوریتم ژنتیک برای جایابی پست‌ها و مسیریابی فیدرها ارائه داده است. در این روش هزینه کمینه با توجه به قیودی مانند افت ولتاژ و ظرفیت فیدرها محاسبه شده است. [۱۱] از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب پست‌های جدید از میان پست‌های کاندید، همچنین ارتقاء ظرفیت پست‌های موجود بهره می‌گیرد. در این مطالعه بار شبکه به دلیل عدم قطعیت به صورت فازی مدل شده است.

از طرفی نگرانی‌های زیست‌محیطی جهانی و نیاز روز افزون به استفاده از انرژی از یک سو و افزایش بهای سوخت‌های فسیلی در چند سال اخیر و کاهش این منابع در سطح جهان از سوی دیگر، باعث افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریکی شده است [۱۵]. انرژی باد، امروزه به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع تولید انرژی الکتریکی در بسیاری از کشورها جایگزین نیروگاه‌های مرسوم فسیلی شده و در نتیجه نفوذ انرژی باد در بخش تولید انرژی الکتریکی به شدت افزایش یافته است [۱٦].

در بسیاری از کشورها انرژی باد سهم قابل توجهی از کل تولید انرژی الکتریکی را بر عهده دارد و در کشورهایی که این انرژی هنوز نتوانسته است جایگاه خود را در صنعت برق پیدا کند، با ایجاد سیاست‌های تشویقی مانند سند استاندارد انرژی‌های تجدید پذیر، سعی بر این دارند که از ظرفیت این انرژی به عنوان یکی از منابع اصلی تولید انرژی الکتریکی استفاده نمایند. سیاست‌های اعمال شده بر روی انرژی‌های تجدید پذیر مانند تعرفه‌های ثابت در آلمان، دانمارک و اسپانیا باعث پیشرفت سریع این انرژی در این کشورها گردیده است [۱۷].

در حال حاضر (تا پایان سال ۲۰۱۱) پنج کشور چین، امریکا، آلمان، اسپانیا و هند بیش از ۷۴٪ ظرفیت انرژی باد جهان را که معادل ۲۳۷ گیگاوات می‌باشد، در اختیار دارند. انرژی باد در بسیاری از کشورهای اروپایی به شدت در حال گسترش می‌باشد تا جایی که در اروپا تا سال ۲۰۰۹ میزان ظرفیت نصب شده توربین‌های بادی ۷۴۷۶۷ مگاوات می‌باشد که برابر ۴/۸٪ کل بار الکتریکی اروپا بوده و باعث کاهش ۱۱۲ میلیون تن دی‌اکسید کربن گشته است. در ایران نیز به علت موقعیت جغرافیایی، توانایی بالایی از لحاظ احداث مزارع بادی وجود دارد تا آنجا که ایران از لحاظ میزان ظرفیت نصب شده توربین‌های بادی در مقام ۴۳ جهان (۱۰۰ مگاوات ظرفیت نصب شده تا آخر سال ۲۰۱۱) قرار گرفته است [۱۸].

[1] Distributed Generation

برای مشخص کردن فواید ذاتی باد به عنوان یک منبع تولید انرژی الکتریکی بر روی قابلیت اطمینان سیستم و تعیین کردن میزان نفوذ مطلوب باد بر روی تولید سیستم انرژی الکتریکی، بدست آوردن یک مدل مناسب ظرفیت برای توربین‌های بادی در مطالعات شبکه ضروری می‌باشد. برای رسیدن به این هدف و به علت تغییرات سریع توان تولیدی یک توربین بادی با تغییرات سرعت باد، لازم است یک مدل مناسب برای سرعت باد بدست آورد.

در همین راستا، روش‌های زیادی برای مدل کردن سرعت باد به منظور مطالعات قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی سیستم قدرت ارائه گردیده است. بعضی از این روش‌ها رویکرد تحلیلی را دنبال می‌کنند و بعضی روش‌های دیگر از توابع توزیع مانند توزیع ویبال[1] برای مدل کردن سرعت باد استفاده می‌نمایند[**۱۹**] . روش‌های دیگری مانند استفاده از شبکه‌های عصبی نیز بدین منظور بکار گرفته شده است. هرکدام از این روش‌ها دارای ضعف‌ها و فوایدی می‌باشند.

روش‌های تحلیلی، یک واحد تولیدی را به صورت چند حالت مختلف که نشان دهنده میزان ظرفیت‌های متفاوتی است که آن واحد در عمل می‌تواند داشته باشد مدل می‌کنند و نرخ ورود و خروج به این حالات را با استفاده از اطلاعات تاریخی آن واحد بدست می‌آورند. در نهایت، احتمال قرار گرفتن میزان توان تولیدی آن واحد را در هر یک از حالات محاسبه می‌نمایند. یک نیروگاه بادی نیز با استفاده از این روش به صورت یک مدل چند حالته با ظرفیت محدود[2] مدل می‌گردد. مهم‌ترین مشکل این روش برای مدل کردن یک نیروگاه بادی، در نظر نگرفتن مشخصات ذاتی باد (وابستگی زمانی بین توان تولیدی باد در ساعات مختلف) می‌باشد.

استفاده از تابع توزیع ویبال، یک روش احتمالاتی بر مبنای اطلاعات متغّیر تصادفی می‌باشد. در این روش ابتدا برای هر مزرعه بادی با توجه به اطلاعات تاریخی آن، پارامترهای تابع توزیع(پارامتر شکل[3] و پارامتر مقیاس[4]) را بدست می‌آورند. بعد از بدست آمدن تابع توزیع مناسب که خاص هر مزرعه بادی می‌باشد، می‌توان با استفاده از نمونه‌برداری از آن تابع توزیع و با به‌کارگیری از روش‌های شبیه‌سازی مانند روش شبیه سازی مونت‌کارلو[5] تغییرات سرعت باد را مدل نمود و یا با استفاده از سایر روش‌های احتمالاتی که توانایی در نظر گیری متغّیرهای تصادفی را دارند، تأثیرات انرژی باد را بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت بررسی نمود [**۱۹**].

با استفاده از مدل مناسب تغییرات سرعت باد می‌توان تغییرات توان تولیدی یک توربین بادی را محاسبه کرد. همان‌طور که بیان شد توان تولیدی یک توربین بادی تابعی غیر خطی از سرعت وزش باد در هر لحظه می‌باشد. توان تولیدی یک مزرعه بادی نیز که از چندین توربین بادی تشکیل شده است، از مجموع توان تولیدی تک تک این توربین‌ها محاسبه می‌گردد. در خیلی از مطالعات، معمولاً سرعت وزش باد را برای تمامی توربین‌ها یکسان در نظر

---

[1] Weibull Probability Distribution Function
[2] Derated capacity
[3] Figure Parameter
[4] Scale Parameter
[5] Monte-Carlo Simulation

می‌گیرند. این فرض چندان هم نامناسب به نظر نمی‌رسد. چون که در خیلی از مزارع تغییرات سرعت باد برای توربین‌های مختلف قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

بعد از بدست آمدن مدل مناسب برای توان تولیدی یک مزرعه بادی، می‌توان مطالعات سیستم قدرت را در حضور این مزارع از ابعاد مختلف مورد بررسی قرار داد. لازم به یادآوری است که مدل استفاده شده برای باد با توجه به نوع مطالعات و دقت مورد نیاز آن ممکن است متفاوت باشد. برای مثال شاید مدل استفاده شده در مطالعات برنامه‌ریزی قدرت قابل اعمال به مطالعات بهره‌برداری شبکه نباشد.

در سال‌های گذشته مطالعاتی در زمینه استفاده از تولیدات پراکنده به خصوص انرژی باد با در نظر گرفتن ملاحظات قابلیت اطمینان در مطالعات سیستم قدرت صورت گرفته است که هرکدام از آن‌ها از دیدگاهی متفاوت به این مسأله پرداخته‌اند. در ذیل به معرفی برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

در [۱۶]، هدف ارائه روندی جامع برای ارزیابی قابلیت مزرعه بادی، به منظور تجمیع اهداف مختلف، شامل کاهش تلفات خطوط انتقال، هزینه قطع بار و هزینه بهره برداری واحدهای تولیدکننده می‌باشد. علاوه بر این آنالیز مرکب قابلیت اطمینان سیستم با حضور انرژی بادی برای انجام ارزیابی کل هزینه، هم‌زمان با کاهش انرژی در نقاط مختلف بار و همچنین تولید ژنراتورها در شرایط پرباری انجام شده است. در مرجع [۲۰]، روشی برای مدل کردن مزارع بادی بزرگ برای استفاده در مطالعات برنامه‌ریزی شبکه قدرت ارائه شده است؛ که یک متد سیستماتیک بر پایه فرکانس و دوره زمانی برای مدل کردن مزرعه بادی، در هنگامی که احتمال، فرکانس حادثه و نرخ انحراف در هر منطقه، با استفاده از مدل منطقه مزارع بادی و توربین‌های بادی، قابل دسترسی است.

یک روش الگوریتم فازی تصمیم گیری چند پیشامدی برای باز تنظیم سیستم توزیع که شامل آنالیز تلفات سیستم فوق توزیع می‌باشد، در [۲۱] انجام شده است. روش Bellman-Zadeh و ارزیابی تلفات شبکه فوق توزیع در این مقاله استفاده شده است. منعطف بودن این روش سبب افزایش اطمینان و راحتی استفاده در صنعت می‌باشد. مراجع [۲۲,۲۳] اشاره به روش نوینی برای برنامه ریزی توسعه سیستم فوق توزیع با حضور تولیدات پراکنده دارد. به نحوی که ابتدا با اعمال روش خوشه بندی ریاضی[1] پست‌های کاندید انتخاب شده و سپس با استفاده از GA، بارها به پست‌های موجود یا کاندید به نحو بهینه تخصیص داده می‌شود.

با مرور تحقیقات اشاره شده در فوق، می‌توان به این نکته پی برد که روش فراگیری برای انجام مطالعات برنامه‌ریزی شبکه فوق توزیع که در آن از یک طرح جامع برای مدل کردن انرژی باد استفاده شده باشد و همچنین ملاحظات قابلیت اطمینان شبکه نیز مد نظر قرار گرفته باشد، وجود ندارد. لذا این پایان‌نامه با رویکرد تجمیع اهداف بیان شده به بررسی تأثیر حضور مزارع بادی در برنامه ریزی توسعه شبکه فوق توزیع با در نظر گرفتن ملاحظات قابلیت اطمینان شبکه می‌پردازد. ابتدا با استفاده از روش تحلیلی قابلیت اطمینان مارکوف مزارع بادی به صورت یک

[1] Modified Mathematical Clustering Algorithm