بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده برق و کامپیوتر

# مدیریت تراکم انتقال مبتنی بر ظرفیت دینامیکی خطوط انتقال

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

**محمد محمودیان اصفهانی**

استاد راهنما

**دکتر غلامرضا یوسفی**

**۱۳۹۰**

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده برق و کامپیوتر

# مدیریت تراکم انتقال مبتنی بر ظرفیت دینامیکی خطوط انتقال

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت

**محمد محمودیان اصفهانی**

استاد راهنما

**دکتر غلامرضا یوسفی**

**۱۳۹۰**

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق - قدرت آقای محمد محمودیان اصفهانی

تحت عنوان

# مدیریت تراکم انتقال مبتنی بر ظرفیت دینامیکی خطوط انتقال

در تاریخ ۱۱/۱۵/ ۱۳۹۰توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

| | |
|---|---|
| ۱- استاد راهنما | دکتر غلامرضا یوسفی |
| ۲- استاد مشاور | دکتر اکبر ابراهیمی |
| ۳- استاد داور | دکتر حمیدرضا کارشناس |
| ۴- استاد داور | دکتر احمدرضا تابش |
| ۵- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر امیر برجی |

خداوند را شاکرم که توانستم این دوره از دوران تحصیلم را به پایان برسانم. از پدر و مادر عزیزم که همواره من را حمایت کردند سپاسگزارم. از استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر غلامرضا یوسفی که انجام این پایان‌نامه با هدایت و راهنمایی‌های ارزنده ایشان میسر گردید، صمیمانه تشکر می‌نمایم. از جناب آقای دکتر حمیدرضا کارشناس و همچنین جناب آقای دکتر احمدرضا تابش که داوری این پایان‌نامه را برعهده داشتند تشکر می‌کنم. همچنین از زحمات سرکار خانم مظاهری قدردانی می نمایم و برای تمام این عزیزان آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.

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

تقدیم به:

پدر، مادر و همه‌ی دوستان عزیزم

# فهرست مطالب

عنوان صفحه

چکیده..... ۱

**فصل اول: مقدمه**

۱-۱- پیشگفتار ..... ۲
۱-۲- خطوط انتقال سیستم قدرت..... ۳
۱-۳- دلایل اصلی رشد کند خطوط انتقال ..... ۳
۱-۴- پیامدهای متراکم شدن خطوط انتقال ..... ۴
۱-۵- محدودیت‌های ظرفیت خطوط انتقال سیستم قدرت ..... ۵
۱-۵-۱- قیود حرارتی سیستم انتقال ..... ۵
۱-۵-۲- قیود ولتاژ سیستم انتقال ..... ۶
۱-۵-۳- قیود امنیتی سیستم انتقال ..... ۶
۱-۶- ظرفیت‌های دینامیکی و استاتیکی خطوط انتقال ..... ۷
۱-۷- افزایش ظرفیت خطوط انتقال موجود ..... ۸
۱-۷-۱- بررسی امکان‌پذیری افزایش ظرفیت خط..... ۸
۱-۷-۲- روش‌های افزایش ظرفیت خطوط موجود ..... ۹
۱-۸- روند ارائه‌ی مطالب..... ۱۱

**۲- فصل دوم: مانیتورینگ ظرفیت حرارتی دینامیکی**

۲-۱- مقدمه..... ۱۳
۲-۲- مفاهیم پایه‌ای ظرفیت حرارتی خط ..... ۱۴
۲-۳- مانیتورینگ ظرفیت حرارتی دینامیکی..... ۱۵
۲-۴- مزایای استفاده از تکنولوژی مانیتورینگ ظرفیت حرارتی دینامیکی خط ..... ۱۶
۲-۵- پیش‌بینی ظرفیت حرارتی خطوط ..... ۱۹
۲-۶- مشکل مانیتورینگ ظرفیت حرارتی خط ..... ۱۹
۲-۷- نکات قابل توجه برای بکارگیری ظرفیت‌های لحظه‌ای ..... ۱۹
۲-۸- انواع استراتژی‌های تعیین ظرفیت حرارتی خط ..... ۲۰
۲-۸-۱- استراتژی تعیین ظرفیت استاتیکی..... ۲۰
۲-۸-۲- استراتژی تعیین ظرفیت دینامیکی..... ۲۱
۲-۸-۳- استراتژی تعیین ظرفیت شبه دینامیکی..... ۲۱
۲-۹- تقسیم‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت حرارتی دینامیکی خط ..... ۲۱
۲-۹-۱- بر پایه شرایط آب و هوایی (غیرمستقیم) ..... ۲۱
۲-۹-۲- برپایه‌ی شکم دادگی (مستقیم) ..... ۲۲

۲-۱۰- پارامترهای تعیین کننده‌ی ظرفیت خط ..... ۲۲
۲-۱۰-۱- اندازه‌گیری شرایط آب و هوایی ..... ۲۲
۲-۱۰-۲- مانیتور وضعیت هادی ..... ۲۴
۲-۱۱- مزایا و معایب روش‌های تعیین ظرفیت دینامیکی خط ..... ۲۷
۲-۱۲- نتایج تعیین ظرفیت‌های دینامیکی خیلی خوشبینانه ..... ۲۸
۲-۱۳- خلاصه ..... ۲۸

## ۳- فصل سوم: محاسبه‌ی ظرفیت حرارتی دینامیکی

۳-۱- مقدمه ..... ۲۹
۳-۲- نگاه کلی ..... ۳۰
۳-۳- تعاریف ..... ۳۰
۳-۴- واحدها و تعاریف آنها ..... ۳۱
۳-۵- روش کلی محاسبه ظرفیت حرارتی خط ..... ۳۳
۳-۶- محاسبه‌ی پارامترهای معادله‌ی توازن گرما ..... ۳۴
۳-۶-۱- محاسبه‌ی تلفات گرمایی به‌صورت همرفتی ..... ۳۴
۳-۶-۲- محاسبه‌ی تلفات گرمایی به‌صورت انتقال تابشی گرما ..... ۳۷
۳-۶-۳- محاسبه‌ی گرمای وارد شده به هادی در اثر تابش خورشید ..... ۳۷
۳-۶-۴- محاسبه‌ی مقاومت الکتریکی هادی ..... ۴۰
۳-۷- محاسبات ظرفیت حرارتی دینامیکی هادی ..... ۴۰
۳-۷-۱- محاسبات حالت دائمی ..... ۴۰
۳-۷-۲- محاسبات گذرا ..... ۴۳
۳-۸- داده‌های ورودی ..... ۴۵
۳-۸-۱- باد و دمای محیط ..... ۴۵
۳-۸-۲- ارتفاع از سطح دریا ..... ۴۷
۳-۸-۳- قابلیت جذب (α) و نشر (ε) ..... ۴۷
۳-۸-۴- میزان گرمای خورشید ..... ۴۷
۳-۸-۵- حداکثر دمای مجاز هادی ..... ۴۷
۳-۸-۶- تقریب ثابت زمانی حرارتی هادی ..... ۴۸
۳-۸-۷- گام زمانی ..... ۴۸
۳-۹- محاسبات نمونه ..... ۴۹
۳-۹-۱- داده‌های ورودی ..... ۴۹
۳-۹-۲- نتایج محاسبات ..... ۵۰
۳-۱۰- زمان اجرای برنامه ..... ۵۲
۳-۱۱- حساسیت ظرفیت خط نسبت به پارامترهای جوی ..... ۵۲

۳-۱۲- ابزار بکارگیری ظرفیت حرارتی دینامیکی ..... ۵۳
۳-۱۳- خلاصه ..... ۵۴

## ۴- فصل چهارم: قابلیت انتقال در دسترس

۴-۱- مقدمه ..... ۵۵
۴-۲- تعریف قابلیت انتقال در دسترس (ATC) ..... ۵۶
۴-۳- قابلیت انتقال (TC) ..... ۵۶
۴-۳-۱- تفاوت قابلیت انتقال با ظرفیت انتقال ..... ۵۶
۴-۳-۲- قابلیت انتقال بین دو ناحیه ..... ۵۷
۴-۳-۳- محدودیت‌های قابلیت انتقال ..... ۵۷
۴-۳-۴- تعریف قابلیت انتقال کل(TTC) ..... ۵۸
۴-۳-۵- تعیین قابلیت انتقال کل ..... ۵۹--
۴-۴- حاشیه‌های قابلیت انتقال ..... ۶۰
۴-۴-۱- تعریف TRM ..... ۶۱
۴-۴-۲- تعریف CBM ..... ۶۱
۴-۵- محاسبه‌ی ATC ..... ۶۱
۴-۵-۱- فاکتورهای توزیع انتقال توان ..... ۶۲
۴-۵-۲- پخش بار تداومی(CPF) ..... ۶۷
۴-۵-۳- تکنیک‌های حل مسأله پخش‌بار بهینه ..... ۶۸
۴-۶- فرمول بندی مسأله‌ی TTC و مقایسه روش‌های مختلف ..... ۶۹
۴-۷- روش‌های محاسبه‌ی TRM ..... ۷۱
۴-۸- روش‌های محاسبه و تخصیص CBM ..... ۷۱
۴-۹- مقایسه‌ی روش‌های مختلف محاسبه‌ی TRM و CBM ..... ۷۲
۴-۱۰- روش کلی تعیین TTC و TRM ..... ۷۲
۴-۱۱- الگوریتم محاسبه‌ی ATC با روش RPF ..... ۷۳
۴-۱۲- خلاصه ..... ۷۴

## ۵- فصل پنجم: مدیریت تراکم انتقال در محیط بازار برق

۵-۱- مقدمه ..... ۷۵
۵-۲- مفاهیم پایه‌ای مدیریت تراکم ..... ۷۷
۵-۲-۱- تعریف تراکم ..... ۷۷
۵-۲-۲- دلایل وقوع تراکم ..... ۷۸
۵-۲-۳- مدل ناحیه‌ای شبکه ..... ۷۸
۵-۲-۴- فلوهای موازی- ارتباط بین فلوی فیزیکی و تبادلات تجاری ..... ۷۹
۵-۲-۵- ظرفیت انتقال بین نواحی ..... ۸۰

۵-۳- روش‌های مدیریت تراکم (CMM) ..... ۸۰
۵-۳-۱- روش‌های مدیریت تراکم در بازار روز بعد ..... ۸۱
۵-۳-۲- روش‌های مدیریت تراکم در زمان- واقعی (روش‌های رفع تراکم) ..... ۹۰
۵-۴- فرمول‌بندی مسأله‌ی مدیریت تراکم در زمان- واقعی با روش تغییر الگوی تولید ..... ۹۴
۵-۵- خلاصه ..... ۹۷

## ۶- فصل ششم: مدیریت تراکم بر اساس استفاده از ظرفیت حرارتی دینامیکی

۶-۱- مقدمه ..... ۹۸
۶-۲- محاسبه ATC با استفاده از ظرفیت حرارتی شبه‌دینامیکی ..... ۹۹
۶-۲-۱- محاسبه‌ی ATC با روش PTDF با لحاظ ظرفیت حرارتی شبه‌دینامیکی ..... ۹۹
۶-۲-۲- محاسبه‌ی ATC با روش RPF با لحاظ ظرفیت حرارتی شبه‌دینامیکی ..... ۱۰۰
۶-۳- استفاده از ظرفیت حرارتی در نزدیکی زمان- واقعی برای بهبود ATC ..... ۱۰۱
۶-۴- مدیریت تراکم در زمان- واقعی با بکارگیری ظرفیت حرارتی دینامیکی ..... ۱۰۴
۶-۵- زمان رفع تراکم ..... ۱۰۶
۶-۶- فرمول‌بندی مسأله با لحاظ ظرفیت حرارتی و زمان رفع تراکم ..... ۱۰۸
۶-۷- خلاصه ..... ۱۰۹

## ۷- فصل هفتم: نتایج عددی

۷-۱- مقدمه ..... ۱۱۰
۷-۲- معرفی واسط نرم افزاری ..... ۱۱۱
۷-۲-۱- طراحی برنامه واسط نرم‌افزارهای MATLAB و DigSILENT با استفاده از زبان DPL ..... ۱۱۱
۷-۲-۲- برنامه واسط نرم‌افزارهای MATLAB و DigSILENT ..... ۱۱۱
۷-۳- تاثیرظرفیت حرارتی دینامیکی خطوط انتقال در محاسبات سیستم ..... ۱۱۲
۷-۳-۱- سیستم مورد مطالعه ..... ۱۱۴
۷-۳-۲- نتایج انجام محاسبات ..... ۱۱۴
۷-۴- محاسبه‌ی ATC با استفاده از ظرفیت‌های شبه‌دینامیکی ..... ۱۱۶
۷-۴-۱- نتایج محاسبه ATC با استفاده از روش PTDF ..... ۱۱۶
۷-۴-۲- نتایج محاسبه ATC با استفاده از روش دقیق RPF ..... ۱۱۹
۷-۵- محاسبه‌ی ATC با استفاده از ظرفیت‌های استاتیکی بهبود یافته ..... ۱۲۰
۷-۶- مدیریت تراکم در زمان- واقعی ..... ۱۲۲
۷-۷- مدیریت تراکم در زمان- واقعی با استفاده از ظرفیت‌های حرارتی استاتیکی ..... ۱۲۲
۷-۸- مدیریت تراکم در زمان- واقعی با استفاده از ظرفیت‌های حرارتی دینامیکی ..... ۱۲۵
۷-۸-۱- استفاده از ظرفیت حرارتی دینامیکی به‌منظور تشخیص وقوع تراکم در سیستم ..... ۱۲۶
۷-۸-۲- استفاده از ظرفیت دینامیکی به‌منظور کاهش هزینه‌های مدیریت تراکم ..... ۱۲۷
۷-۸-۳- تاثیر استفاده از ظرفیت دینامیکی در جلوگیری از فروپاشی شبکه و خاموشی‌های بزرگ ..... ۱۲۹

۷-۹- مدیریت تراکم در زمان-واقعی با لحاظ زمان رفع تراکم ..... ۱۳۲
۷-۱۰- تاثیر لحاظ زمان رفع تراکم در تعیین تعداد واحدهای مشارکت کننده ..... ۱۳۶
۷-۱۱- خلاصه ..... ۱۳۸

## ۸- فصل هشتم: نتیجه‌گیری

۸-۱- نتیجه‌گیری ..... ۱۳۹
۸-۲- پیشنهادات ..... ۱۴۱
پیوست شماره ۱ ..... ۱۴۲
پیوست شماره ۲ ..... ۱۴۳
پیوست شماره ۳ ..... ۱۴۴
مراجع ..... ۱۴۶

## چکیده

ظرفیت حرارتی دینامیکی، ظرفیت حرارتی واقعی یک خط انتقال است که با توجه به شرایط آب و هوایی، ساختمان هادی خط و نیز موقعیت جغرافیایی آن، تعیین می‌شود. اهمیت استفاده از ظرفیت حرارتی دینامیکی خطوط انتقال، با توجه به دلایل ایجاد تراکم در سیستم انتقال و نیز روش‌های مختلف پیش‌گیری از وقوع تراکم در سیستم، با بررسی مزایا و معایب این روش‌ها، از لحاظ فنی، اقتصادی و اجتماعی مشخص می‌شود. در این پایان‌نامه، تاثیر استفاده از ظرفیت حرارتی دینامیکی خطوط انتقال، در مسأله‌ی مدیریت تراکم سیستم انتقال، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدیریت تراکم در محیط تجدید ساختار یافته، به‌معنای بکارگیری روش‌هایی با هدف پیش‌گیری از وقوع تراکم و همچنین روش‌های رفع تراکم، در صورت وقوع تراکم می‌باشد. روش‌های پیش‌گیری از وقوع تراکم، روش‌هایی هستند که در بازه‌های زمانی بلند مدت و پیش از رسیدن به زمان بهره‌برداری، با هدف تخصیص ظرفیت انتقال به متقاضیان استفاده از این ظرفیت، بکار می‌روند. مسأله‌ی اصلی در این روش‌ها، محاسبه‌ی ظرفیت انتقال در دسترس، بین دو ناحیه و یا دو شین از شبکه است که متقاضی تبادل توان هستند. در این پایان‌نامه، این ظرفیت انتقال در دسترس، بر خلاف روش‌های کنونی که با توجه به ظرفیت‌های حرارتی استاتیکی به محاسبه‌ی این ظرفیت می‌پردازند، با توجه به پیش‌بینی شرایط آب و هوایی برای یک بازه‌ی زمانی مورد نظر، محاسبه می‌شود. نتایج انجام محاسبات نشان می‌دهد که استفاده از ظرفیت شبه‌دینامیکی حاصل از پیش‌بینی شرایط آب و هوایی، قابلیت انتقال در دسترس را به میزان چشمگیری افزایش می‌دهد. روش‌های مربوط به رفع تراکم در زمان بهره‌برداری، روش‌های سریعی هستند که در هنگام وقوع تراکم در سیستم، به حل مسأله‌ی تراکم می‌پردازند. اساس کار این روش‌ها، تشخیص و سپس رفع تراکم است. وقوع تراکم در سیستم، با توجه به ظرفیت حرارتی خطوط سیستم و میزان بار خط، تشخیص داده می‌شود. در این پایان‌نامه، نشان داده می‌شود که چنانچه از ظرفیت حرارتی دینامیکی خطوط استفاده شود، می‌توان وقوع تراکم در سیستم را به‌درستی تشخیص داد. در این پایان‌نامه، روش تغییر الگوی تولید برای رفع تراکم بکارگرفته می‌شود که در این روش، با حل یک مسأله‌ی بهینه‌سازی، میزان تغییر تولید ژنراتورها به منظور رفع تراکم از سیستم، تعیین می‌شود. تعیین تعداد واحدهای مشارکت کننده در مسئله‌ی مدیریت تراکم با اهداف مختلف، در مراجع مختلف مورد بحث واقع شده است ولی تاکنون، مسأله‌ی بکارگیری ظرفیت حرارتی دینامیکی خطوط و همچنین ملاحظات عملی مربوط قابلیت واحدهای تولیدی در کاهش و یا افزایش توان تولیدی در زمان معین، در حل مسأله‌ی مدیریت تراکم، مورد توجه قرار نگرفته است. در این پایان‌نامه، قیود مسأله‌ی بهینه‌سازی به‌گونه‌ای اصلاح می‌شوند که ظرفیت حرارتی دینامیکی خطوط به‌همراه زمان رفع تراکم، وارد مسأله شوند. نتایج انجام محاسبات، تاثیر استفاده از ظرفیت حرارتی دینامیکی در کاهش هزینه‌های مدیریت تراکم و نیز جلوگیری از فروپاشی شبکه را نشان خواهند داد. در این پایان‌نامه، با توجه به تعریف ظرفیت‌های کوتاه مدت و اضطراری، زمان رفع تراکم از سیستم، تعیین می‌شود و تاثیر لحاظ این پارامتر مهم، در نتایج حل مسأله با روش‌های مختلف انتخاب واحدهای مشارکت‌کننده در مدیریت تراکم، نشان می‌دهد که تعداد واحدهای مشارکت‌کننده و میزان تغییر تولید واحدها می‌تواند بسیار متفاوت باشد نسبت به وقتی که زمان رفع تراکم، در حل مسأله لحاظ نمی‌شود. دراین پایان‌نامه، محاسبات مربوط به ظرفیت حرارتی دینامیکی در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شده و از طرفی، مدلسازی و محاسبات سیستم، در محیط نرم‌افزار DigSILENT انجام گرفته است. امکان تبادل اطلاعات بین این دو نرم‌افزار، از طریق ایجاد یک واسط نرم‌افزاری با استفاده از زبان برنامه‌نویسی DPL، مهیا شده است. مسأله‌ی بهینه‌سازی، با استفاده از جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB، حل شده و سیستم‌های ۶ و ۳۰ باسه‌ی تغییر یافته‌ی IEEE، به‌عنوان سیستم‌های تست، بکار رفته است.



کلمات کلیدی: ظرفیت حرارتی استاتیکی، ظرفیت حرارتی دینامیکی ، مدیریت تراکم، تغییر الگوی تولید.

# فصل اول

# مقدمه

## ۱-۱- پیشگفتار

در دو دهه‌ی اخیر، ظرفیت انتقال توان خطوط انتقال، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. رشد تولید و مصرف در سیستم قدرت نسبت به احداث خطوط انتقال جدید، سرعت به‌مراتب بیشتری دارد. به‌عنوان مثال برطبق آمار سال ۲۰۰۳، سیستم قدرت آمریکا با رشد بار تقریباً دو درصدی در هر سال مواجه بوده و همچنین پیش بینی شده بود که رشد تولید در ۲۰ سال آتی در حدود سی درصد باشد، در حالی که رشد ظرفیت انتقال، تنها پانزده درصد تخمین زده شده بود [۱]. از طرفی ظرفیت انتقال توان خطوط موجود بر اثر قیود مختلفی چون قیود حرارتی (جریان خطوط)، قیود ولتاژ و قیودپایداری، محدود می‌شود. لذا در نتیجه‌ی این عدم هماهنگی بین رشد تولید، مصرف و ظرفیت انتقال، سیستم انتقال به سمت متراکم شدن پیش می‌رود. بطور کلی مسأله‌ی تراکم خطوط انتقال، یکی از عوامل مهم در بحران انرژی به‌شمار می‌آید که نتایج گوناگونی در پی دارد. تراکم خطوط، حاشیه امنیت سیستم را در مواجه با حوادث احتمالی کاهش می‌دهد و همچنین قطعی بارها در هنگام بروز حوادث، بیشتر می‌شود که این امر خود منجر به افزایش پرداخت هزینه‌ی خسارات می‌گردد. همچنین در سالهای اخیر با تجدیدساختار و ایجاد بازارهای رقابتی در صنعت برق، ظرفیت خطوط انتقال بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است چراکه در بازارهای انرژی الکتریکی تراکم خطوط انتقال می‌تواند منجر به افزایش قیمت برق گردد که توسط مصرف‌کنندگان پرداخت می‌شود. همچنین به‌علت تراکم خطوط ممکن است از برخی واحدهای تولیدی با مشخصات مطلوب نتوان بهره‌برداری لازم را بعمل

آورد و یا انجام برخی از معاملات بازار به علت تراکم خطوط، امکان‌پذیر نباشد که این موضوع مطلوب بازیگران بازار نیست. در این فصل به بررسی خطوط انتقال، پیامدهای ناشی از تراکم خطوط و دلایل اصلی رشد کند خطوط انتقال پرداخته شده و در نهایت محدودیت‌های گوناگون ظرفیت خطوط انتقال و روشهای گوناگون افزایش ظرفیت انتقال بررسی شده‌است. مزایا و معایب هر روش تشریح و در نهایت سیستم مانیتورینگ لحظه‌ای ظرفیت حرارتی خطوط انتقال معرفی شده‌است.

### ۱-۲- خطوط انتقال سیستم قدرت

خطوط انتقال انرژی الکتریکی، وظیفه‌ی انتقال انرژی الکتریکی از تولیدکنندگان به مصرف‌کنندگان را دارند. توان الکتریکی از طریق خطوط هوایی و کابل‌ها از نیروگاه‌ها به مصرف‌کنندگان منتقل می‌شود. خطوط هوایی برای فواصل طولانی و در فضاهای باز استفاده می‌شوند درحالی‌که کابل‌ها برای انتقال توان به‌صورت زیرزمینی یا زیرآبی، استفاده می‌شوند. برای ظرفیت انتقال توان یکسان، کابل‌ها ۱۰ تا ۱۵ برابر گرانتر از خطوط هوایی هستند بنابر این کابل‌ها تنها در مکان‌های خاص که نتوان از خطوط هوایی استفاده کرد، بکار می‌روند [۲]. سرعت احداث خطوط انتقال و یا به عبارتی رشد خطوط انتقال به دلایل مختلفی که لزوماً تکنیکی نیستند، به‌کندی صورت می‌گیرد. به عنوان مثال در سال ۱۹۹۰ در کالیفرنیا، مطالعاتی صورت گرفت و بنابر آن مطالعات، قرار شد ۱۷۰۰ کیلومتر خط انتقال بین سال های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ احداث شود، در پایان سال ۲۰۰۰ عملیات ساخت یکی از این خطوط، حتی آغاز هم نشده بود [۳]. در آمریکا و نیز در بسیاری از کشورهای پیشرفته‌ی دنیا، ساخت یک خط جدید در حدود ۵ سال بطول می‌انجامد و همچنین فرآیند اخذ مجوز نیز فرآیندی زمان‌بر است و در بسیاری از موارد نیز به علت قوانین ایالتی در ایالات مختلف، این مجوز داده نمی‌شود. این در حالی است که نیروگاههای جدید در ظرف چند ماه ساخته می‌شوند [۳]. در ادامه، دلایل اصلی رشد کند خطوط انتقال و سپس پیامدهای ناشی از آن بیان و در نهایت محدودیت‌های گوناگون ظرفیت خطوط انتقال بررسی می‌شود.

### ۱-۳- دلایل اصلی رشد کند خطوط انتقال

دو دلیل اصلی که موجب رشد کند خطوط انتقال شده است عبارتند از [۱]:

۱) اخذ مجوز برای احداث خط جدید بسیار مشکل و در بسیاری موارد امکان‌ناپذیر است چراکه احداث خط یک خط جدید می‌تواند موجب بروز مشکلاتی گردد از جمله:

- کاهش قیمت زمین‌های مناطق اطراف خط انتقال به‌علت نمای ایجاد شده توسط تجهیزات خط انتقال.
- تأثیرات EMF[1] بر سلامتی انسان: قرار گرفتن در معرض میدان‌های الکترومغناطیس (EMF) با شدت پائین به مدت طولانی به عنوان یک عامل بالقوه خطرناک برای سیستم‌های بیولوژیک شناخته شده‌اند.
- تأثیر مخرب روی سیستم‌های زیست محیطی.
- تأثیرات محیطی ساخت و نگهداری خطوط انتقال.

۲) سرمایه‌گذاران راغب نیستند در این بخش سرمایه‌گذاری کنند و کمبود سرمایه‌گذاری در این بخش وجود دارد چراکه ممکن است موقعیت سرمایه‌گذاری در دیگر پروژه‌ها، با نرخ بازگشت سرمایه بیشتری، وجود داشته باشد.

علاوه بر این، در کشورهای مختلف، دلایل متعددی می‌تواند مانع سرمایه‌گذاری در این بخش باشد. به‌عنوان مثال، نابسامانی در بازارهای انرژی و عدم قطعیت‌هایی که از سوی قانون‌گذار ایجاد می‌گردد و همچنین تغییر قوانین، اخیراً از موانع عمده در سرمایه‌گذاری برای احداث خطوط جدید در آمریکای شمالی بوده است. یکی از اشکالاتی که وجود دارد این است که در آمریکا، پرداخت به مالکان خطوط انتقال، بر اساس میزان سرمایه‌گذاری که انجام داده‌اند و با یک نرخ ثابت، بازگشت سرمایه انجام می‌شود. این در حالی است که چنانچه درآمد حاصل از انتقال توان از هر خط، به مالکان آن پرداخت شود، انگیزه‌ی بیشتری برای سرمایه‌گذاری در زمینه‌ی ساخت خطوط جدید، ایجاد می‌شود. نرخ مجاز بازگشت سرمایه، که به صاحبان خطوط پرداخت می‌گردد، آنقدر کم است که هیچ انگیزه‌ای به‌منظور ساخت خطوط جدید، برای آنها ایجاد نمی‌کند [۳]. لذا در نتیجه‌ی این عدم هماهنگی بین رشد تولید و مصرف و ظرفیت انتقال، سیستم انتقال به سمت متراکم شدن پیش می‌رود. متراکم شدن خطوط انتقال پیامدهای گوناگونی دارد که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

### ۱-۴- پیامدهای متراکم شدن خطوط انتقال

بطور کلی مسأله‌ی تراکم خطوط انتقال خود یکی از عوامل مهم در بحران انرژی به‌شمار می‌آید. به‌عنوان مثال می‌توان به بحران انرژی کالیفرنیا در سال ۲۰۰۰ به علت متراکم شدن خطوط انتقال اشاره کرد. از جمله نتایج گوناگون متراکم شدن خطوط انتقال، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- حاشیه امنیت سیستم در مواجه با حوادث احتمالی کاهش می‌یابد.

[1]- Electro Magnetic Field

- قطعی بارها در هنگام بروز حوادث بیشتر می‌شود که خود منجر به افزایش پرداخت هزینه‌ی خسارات می‌گردد.
- ممکن است از واحدهای تولیدی با مشخصات مطلوب نتوان بهره‌برداری لازم را بعمل آورد.
- در بازارهای انرژی الکتریکی تراکم خطوط انتقال می‌تواند منجر به افزایش قیمت برق گردد که توسط مصرف‌کنندگان پرداخت می‌شود. این هزینه اضافی در بازارهای انرژی الکتریکی هزینه قیود نام دارد. به‌عنوان مثال هزینه قیود در سیستم برق کالیفرنیا برای مسیر۱۵[1] (خطوط ارتباطی بین شمال و جنوب کالیفرنیا) واقع در جنوبی‌ترین بخش PG&E[2] برطبق گزارش ISO[3] در سال ۲۰۰۱ در حدود ۱۶۹ میلیون دلار بوده است [۳].
- ممکن است برخی از معاملات بازار به علت تراکم خطوط امکان‌پذیر نباشد که این موضوع از دید شرکت‌کنندگان در بازار مطلوب نیست.

در این شرایط که ساخت خطوط جدید با مشکلات فراوان روبرو است، افزایش ظرفیت انتقال خطوط موجود، یک راه حل منطقی بنظر می‌رسد. حال این سوال مطرح می‌شود که چگونه ظرفیت انتقال خطوط موجود، می‌تواند افزایش یابد؟ برای پاسخ‌گویی به این سؤال، باید محدودیت‌های ظرفیت انتقال خطوط مورد بررسی قرار گیرند.

### ۱-۵- محدودیت‌های ظرفیت خطوط انتقال سیستم قدرت

یک سیستم انتقال قدرت، از سیستم انتقال، سیستم فوق‌توزیع و سیستم توزیع تشکیل شده‌است. سیستم انتقال مسؤولیت انتقال توان‌های زیاد را بر عهده دارد و در رنج ولتاژهای ۲۳۰ کیلوولت به بالا کار می‌کند. سیستم توزیع، مصرف‌کنندگان نهایی را تغذیه می‌کند و در رنج ولتاژ ۳۴/۵ کیلوولت به پائین کار می‌کند. سیستم فوق توزیع، ارتباط بین سیستم انتقال و سیستم توزیع را ایجاد می‌کند و رنج ولتاژی بین ۶۹ تا ۱۳۸ کیلوولت دارد. البته برخی از مصرف‌کنندگان بزرگ، انرژی مورد نیاز خود را از سیستم انتقال و یا فوق توزیع تامین می‌کنند. ظرفیت انتقال توان سیستم‌های انتقال، با قیود مختلفی، محدود می‌شودکه در ادامه به تشریح هریک از این قیود پرداخته می‌شود [۱].

#### ۱-۵-۱- قیود حرارتی سیستم انتقال

ظرفیت حرارتی خط، به‌معنای اندازه‌ای از جریان مجاز قابل عبور از یک خط است که چنانچه این جریان از خط عبور کند، دمای خط، به حداکثر دمای مجاز خود می‌رسد، بدون اینکه فاصله‌ی هادی تا زمین از میزان مجاز آن

[1] -Path 15
[2] -Pacific Gas & Electric company
[3] -Independent system operator

کمتر شود و یا اینکه استقامت کششی هادی در اثر گرمایش بیش از حد، از دست برود[۴]. حداکثر دمای مجاز هادی بر اساس مشخصات مربوط به گداختگی هادی و با توجه به عمر هادی، محاسبه [۲] می‌شود. قیود حرارتی باید به منظور جلوگیری از افزایش زیاد دمای خطوط انتقال، کابلهای زیرزمینی و ترانسفورمرها، تعیین شوند. افزایش زیاد دمای کابلهای زیرزمینی و ترانسفورمرها، عمر آنها را کاهش می‌دهد. افزایش زیاد دمای هادی‌های خط انتقال می‌تواند مقاومت مکانیکی آنها را کاهش دهد و باعث شکم‌دادگی هادی‌ها شود (فاصله آنها تا زمین کاهش یابد). لذا برای خطوط انتقال تعیین ماکزیمم دمای آنها با توجه به جریان عبوری از آنها ضروری است [۱].

خطوط انتقال قدرت بطور سنتی با ظرفیت حرارتی هادی با عنوان ظرفیت استاتیکی خط، محدود شده‌اند. این ظرفیت بر اساس یک سری شرایط از پیش تعیین شده، مشخص می‌شود. این شرایط، در مرحله‌ی طراحی خط به منظور محاسبه‌ی فاصله‌ی هادی‌ها تا زمین وارد می‌شوند. در محیط‌های سنتی و روش‌های قدیمی، ظرفیت خط تنها تحت یک شرایط مشخص آب و هوایی مثلاً دمای زیاد محیط، تابش خورشید و سرعت کم وزش باد، طراحی و تعریف می‌شود، همچنین به دلایل امنیتی در اکثر مواقع یک ظرفیت محافظه‌کارانه برای خطوط تعیین می‌شود.

**۱-۵-۲- قیود ولتاژ سیستم انتقال**

قیود ولتاژ باید با هدف اجتناب از اضافه یا افت ولتاژها در حالت کار دائمی سیستم تعیین شوند. اضافه ولتاژها می‌توانند باعث از بین رفتن ایزولاسیون و تخریب عایق‌ها، اتصال‌کوتاه و تشدید اثرات کرونا گردند. در حالی که افت ولتاژها می‌توانند باعث عملکرد نادرست تجهیزات، خسارت به موتورها وآسیب‌های دیگر گردند. سیستم‌های انتقال دوقید ولتاژ دارند: قید ولتاژ حداکثر و ولتاژ حداقل. این قیود حداکثر و حداقل در کشورهای مختلف و طبق استانداردهای مختلف، مقادیر متفاوتی دارند. به عنوان مثال در ایران، قید ولتاژ حداکثر در شرایط نرمال، ۱۰۵٪ و در شرایط اضطراری، ۱۱۰٪ ولتاژ نامی است. این در حالی است که در بسیاری از کشورها، قید ولتاژ حداکثر برای شرایط اضطراری هم، ۱۰۵٪ می‌باشد. قید ولتاژ حداقل در ایران، ۹۵٪ در شرایط نرمال و ۹۰٪ ولتاژ نامی در شرایط اضطراری می‌باشد.

**۱-۵-۳- قیود امنیتی سیستم انتقال**

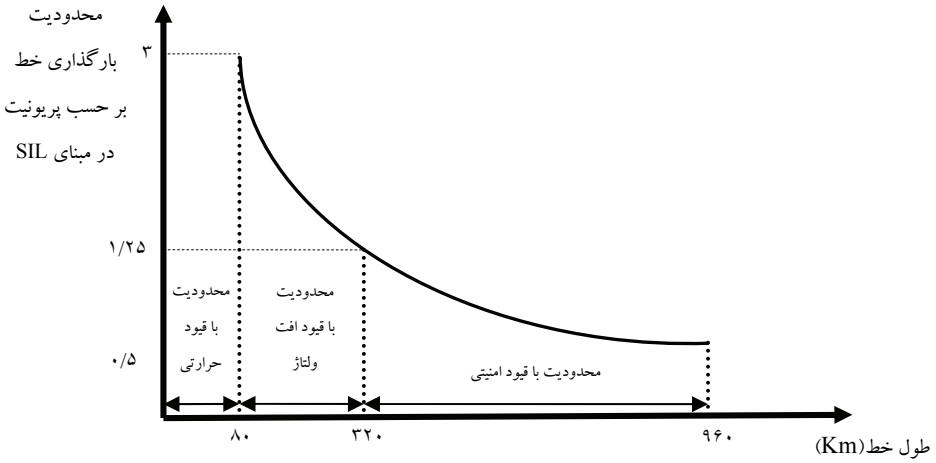
قیود امنیتی انتقال، به اختلاف زاویه‌ی فاز ولتاژ در دو طرف خط مربوط می‌شود (زاویه فاز ولتاژ فرستنده-گیرنده). برای یک میزان مشخص از توان انتقالی، هرچقدر طول خط بیشتر باشد، اختلاف زاویه فاز ولتاژ در دو انتهای خط، بیشتر می‌شود. لذا برای برای خطوط بلند، قبل از اینکه قید حرارتی و یا ولتاژ، عامل محدود کننده‌ی انتقال توان باشد، قید امنیتی خط، میزان توان مجاز انتقالی از خط را تعیین می‌کند. توان جاری شده بین دو منطقه با دیگر عوامل نیز می‌تواند محدود شود از جمله:

- لحاظ ظرفیت رزرو برای خطوط انتقال در هنگام رخداد حوادث احتمالی.

• محدود نمودن توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط برای مقابله با ناپایداری‌های گذرا، حالت دائمی و ولتاژ.

که البته اینها متداول‌ترین قیود بهره‌برداری هستند. برای خطوط با طول متوسط، اغلب، قیود ولتاژ، عامل محدودکننده‌ی انتقال توان از خط هستند. میزان انتقال توان در خطوط کوتاه، با قیود حرارتی، محدود می‌شود.

شکل ۱-۱، رابطه‌ی بین طول خط و میزان توان قابل انتقال از آنرا، به‌همراه قیود محدودکننده‌ی انتقال توان، نشان می‌دهد.




شکل۱-۱: منحنی بارگذاری خط انتقال [۲]

نکته‌ی قابل توجه این است که بیشترین محدودیت انتقال، محدودیت و قید حرارتی است. برای مثال در قسمت شمالی کالیفرنیا، ۱۱۱ قید حرارتی برای خطوط مشخص شده‌است در حالی که تعداد قیود ولتاژ، بسیار کمتر از این عدد است [۳]. علاوه بر این، ظرفیت انتقال خطوط ولتاژ بالای سیستم، به‌ندرت با قیود حرارتی محدود می‌شود (خطوط با سطح ولتاژ بیشتر از ۴۰۰kV ) و بیشتر مواقع خطوط واسط، یعنی خطوط با سطح ولتاژ ۱۱۵ تا ۲۳۰ کیلوولت، با قیود حرارتی، محدود می‌شوند.

### ۱-۶- ظرفیت‌های دینامیکی و استاتیکی خطوط انتقال

در این قسمت، مفهوم ظرفیت حرارتی دینامیکی خطوط انتقال مورد بحث واقع می‌شود. قیود حرارتی خطوط سیستم، یکی از مهمترین قیود محدودکننده‌ی انتقال توان در سیستم انتقال به شمار می‌آیند. در صورتی که تقاضای انتقال توان، بیشتر از ظرفیت انتقال توان سیستم باشد، سیستم انتقال متراکم نامیده می‌شود. ظرفیت انتقال توان سیستم، با قیود مختلفی که یکی از مهمترین آنها قیود حرارتی خطوط سیستم است، محدود می‌شود. مباحث مربوط به ظرفیت انتقال و تراکم، در فصول آتی بطور مفصل تشریح می‌شوند. بنابراین، قیود حرارتی، ممکن است موجب تراکم سیستم انتقال شوند. با ظرفیت ثابت حرارتی خطوط، اپراتور سیستم نمی‌تواند از همه‌ی ظرفیت خط استفاده کند لذا ظرفیت-های دینامیکی،که براساس شرایط محیطی محاسبه می‌شوند، به منظور لحاظ ظرفیت حرارتی موثر، مورد توجه قرار گرفته‌اند. به عبارتی از آنجا شرایط در نظر گرفته شده برای تعیین ظرفیت ثابت، بدترین شرایط آب و هوایی ممکن برای طول یک خط می‌باشد، این ظرفیت نمی‌تواند نشان دهنده‌ی ظرفیت حرارتی واقعی یک خط باشد. به علت

تمایز بین ظرفیت ثابت و واقعی خط، تعاریف مربوط مربوط به ظرفیت‌های استاتیکی و دینامیکی بصورت زیر، انجام می‌گیرد.

۱) **ظرفیت استاتیکی:** ظرفیت حرارتی استاتیکی به جریانی (یا مگاولت‌آمپر متناظر با آن) گفته می‌شود که از هادی یک خط انتقال عبور می‌کند بطوری که در نتیجه‌ی آن، حداکثر حرارت مجاز هادی تحت یک شرایط آب و هوایی پایدار، نتیجه شود [۵].

۲) **ظرفیت دینامیکی:** عبارت ظرفیت‌های دینامیکی به استفاده از اطلاعات زمان- واقعی[1] (یا نزدیک به زمان- واقعی) برای تعیین ظرفیت‌های دقیق اجزاء اشاره دارد. در مورد خطوط انتقال هوایی، پارامترهای مهم در تعیین ظرفیت حرارتی دینامیکی، موقعیت، ساختمان و دمای هادی، دمای محیط، سرعت و جهت وزش باد هستند. ظرفیت حرارتی دینامیکی یک هادی هوایی را می‌توان به این صورت تعریف کرد: بار ثابتی که منجر شود دمای هادی، تحت یک شرایط آب و هوایی معلوم، به حداکثر دمای مجازش برسد.

### ۱-۷- افزایش ظرفیت خطوط انتقال موجود

در ابتدای این فصل، دلایل رشد کند خطوط انتقال انرژی الکتریکی و انواع محدودیت‌های ظرفیت خطوط انتقال مطرح و مشکلات ناشی از متراکم شدن خطوط بررسی شدند و در نهایت با توجه به مشکلات و مسائل مربوط به احداث خطوط جدید، یک راه‌کار موثر برای جلوگیری از متراکم شدن خطوط انتقال در کوتاه مدت، افزایش ظرفیت انتقال قدرت خطوط موجود، معرفی شد. در ادامه‌ی این فصل به بررسی امکان‌پذیری این راه‌کار پرداخته می‌شود و روشهای افزایش ظرفیت خط (که به ویژگی‌های فیزیکی خط مربوط می‌شود) مطرح، مزایا و معایب هر روش بیان و در انتها به معرفی سیستم مانیتورینگ لحظه‌ای پارامترهای خط پرداخته می‌شود. به هر حال قبل از اینکه اقدام به افزایش ظرفیت یک خط شود، باید بررسی گردد که به کدام طریق ظرفیت یک خط خاص افزایش داده شود. این اقدام کاملاً وابسته به شرایط خط و محدودیت‌های غالب حاکم بر آن خط می‌باشد.

#### ۱-۷-۱- بررسی امکان‌پذیری افزایش ظرفیت خط

۱) **بررسی‌های فنی**

- رشد بار سیستم: باید بررسی شود که آیا افزایش ظرفیت خط، جوابگوی رشد بار سیستم هست یا خیر، به عبارتی باید بررسی شود که این افزایش، تا چه مدت می‌تواند احداث خطوط جدید را به تعویق بیندازد.

- ارزیابی شرایط کنونی و عمر مورد انتظار برای اجزای خط: این ارزیابی باید برای اجزای اصلی خطوط مانند دکل‌ها، فونداسیون، هادی‌ها و عایق‌ها انجام گیرد.

[1] - Real Time