بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

کلیدزنی بهینه خطوط انتقال با در نظر گرفتن امنیت ولتاژ

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق گرایش قدرت

اساتید راهنما:

دکتر میثم جعفری نوکندی

دکتر سیدمهدی حسینی

استاد مشاور:

دکتر تقی بارفروشی

دانشجو:

میلاد شیرازی

آذر ۱۳۹۳

سپاسگزاری:

خداوند بزرگ را شاکرم که لطف خود را شامل حال من نمود تا بتوانم تحقیق خود را به پایان برسانم و بتوانم سهمی هرچند اندک، در راه توسعه علمی ایران عزیز بردارم. همچنین از زحمات جناب آقای دکتر یثم جعفری نوکندی و جناب آقای دکتر سید مهدی حسینی اساتید محترم راهنما و جناب آقای دکتر تقی بارفروشی استاد مشاور که همواره با خوشرویی، یاری و راهنمایی ام نمودند، کمال تشکر را دارم و در پایان از زحمات خانواده خوبم و دوستان عزیزم تشکرم و از خداوند منان سلامت و سعادت ایشان را خواستارم.

چکیده

در بهره‌برداری کوتاه‌مدت از سیستم‌های قدرت، شبکه‌های انتقال معمولاً به عنوان بخش ثابت و غیرقابل کنترل در نظر گرفته می‌شوند، زیرا خطوط انتقال به جز در مواردی که خروج‌های پیش‌بینی نشده ناشی از حوادث و یا خروج‌های برنامه‌ریزی شده، برای انجام عملیات تعمیر و مراقبت به وجود می‌آیند، همواره در مدار قرار دارند. در این شرایط، برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم به صورتی انجام می‌شود که با توجه به ظرفیت انتقال توان خطوط موجود، حداقل هزینه بهره‌برداری به دست آید. با این حال بهره‌بردار سیستم می‌تواند با تغییر آرایش سیستم از طریق انجام مانورهای کلیدزنی خطوط (Transmission Switching) و خارج کردن برخی از خطوط در برخی از ساعات، پروفیل ولتاژ سیستم را بهبود بخشیده و یا ظرفیت انتقال را در برخی از مسیرهای دیگر افزایش دهد و به این ترتیب از وقوع پرشدگی و اضافه بار در خطوط جلوگیری نماید. با توجه به این مسأله که پرشدگی خطوط موجب می‌شود که تولید ژنراتورهای ارزان‌تر کاهش یافته و به تولید ژنراتورهای گران‌تر افزوده شود، کلیدزنی برخی از خطوط و کاهش پرشدگی شبکه باعث افزایش تولید ژنراتورهای ارزان‌تر شده و هزینه کل بهره‌برداری سیستم کاهش می‌یابد. البته باید برای برگشت احتمالی خطوط به مدار در زمان وقوع حالت‌های اضطراری نیز پیش‌بینی و سرعت عمل وجود داشته باشد، تا از گسترش حوادث جلوگیری به عمل آید. در این تحقیق، روش‌های ارائه شده برای تعیین خطوط مناسب از جمله روش DC-OTS و AC-OTS مورد بررسی قرار گرفته است و سپس کلیدزنی خطوط انتقال به عنوان یک اقدام کنترلی پیشگیرانه در مقابل پیشامدهای احتمالی متناظر با خروج تکی ژنراتورها و یا خطوط در برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره چرخان در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی — *کلیدزنی بهینه خطوط انتقال، کاهش هزینه انرژی و ذخیره چرخان، برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح، ، برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح*

فهرست

فصل۱- کلیات موضوع ---------- ۱

۱-۱- مقدمه ---------- ۲

۱-۲- پرشدگی خطوط انتقال ---------- ۲

۱-۳- روش‌های مدیریت پرشدگی خطوط انتقال ---------- ۴

۱-۴- استفاده از کلیدزنی به عنوان یک عمل پیشگیرانه به منظور حفظ امنیت سیستم ---------- ۵

۱-۵- امکان کلیدزنی خطوط انتقال در سیستم‌های واقعی ---------- ۶

۱-۶- ساختار پایان‌نامه ---------- ۷

فصل۲- پیشینه تحقیق ---------- ۸

۲-۱- مرروی بر مطالعات انجام شده در زمینه کلیدزنی خطوط انتقال ---------- ۹

فصل۳- مدل‌های بهینه‌سازی ---------- ۱۷

۳-۱- مقدمه ---------- ۱۸

۳-۲- پخش‌بار بهینه ---------- ۱۸

۳-۳- پخش‌بار بهینه DC ---------- ۱۹

۳-۴- پخش‌بار بهینه DC با در نظر گرفتن کلیدزنی خطوط انتقال ---------- ۲۰

۳-۵- پخش‌بار بهینه AC ---------- ۲۳

۳-۶- پخش‌بار بهینه AC با در نظر گرفتن کلیدزنی خطوط انتقال ---------- ۲۴

۳-۷- الگوریتم ابتکاری بر مبنای پخش‌بار بهینه AC ---------- ۲۵

۳-۷-۱- روش پیش‌بینی خطوط بهینه پیشنهادی مرجع [۲۷] ---------- ۲۶

۳-۷-۲- اصلاح تعیین خطوط کاندیدا برای هر مرحله از الگوریتم ابتکاری ---------- ۲۸

۳-۷-۳- الگوریتم ابتکاری جهت یافتن بهینه‌ترین خطوط ---------- ۳۱

۳-۸- جمع‌بندی ---------- ۳۴

فصل۴- برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره چرخان با در نظر گرفتن کلیدزنی خطوط و قیود پخش‌بار AC ---------- ۳۵

۴-۱- مقدمه ---------- ۳۶

۴-۲- قابلیت اطمینان ---------- ۳۶

۴-۳- فرمول‌بندی مسأله برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره چرخان با در نظر گرفتن کلیدزنی خطوط و قیود پخش‌بار AC ---------- ۳۸

۴-۴- جمع‌بندی ---------- ۴۱

فصل۵- شبیه‌سازی و ارائه نتایج ---------- ۴۲

۵-۱- مقدمه ---------- ۴۳

۵-۲- سیستم استاندارد ۵۷ باسه IEEE ---------- ۴۳

۵-۲-۱- مقایسه روش پیشنهادی با روش مرجع [۲۷] از نظر دقت تعیین بهترین خطوط برای کلیدزنی در سیستم ۵۷ باسه ---------- ۴۶

۵-۲-۲- بررسی تأثیر کلیدزنی خطوط انتقال بر هزینه انرژی و ذخیره چرخان و قطع بار سیستم ۵۷ باسه ------ ۵۰

۵-۲-۳- بررسی تغییرات ولتاژ سیستم ۵۷ باسه ---------- ۵۵

۵-۳- سیستم استاندارد ۱۱۸ باسه IEEE ---------- ۵۷

۵-۳-۱- تعیین دقت پیش‌بینی بهترین خطوط به روش پیشنهادی در مقایسه با روش مرجع [۲۷] در مرحله اول الگوریتم ابتکاری برای سیستم ۱۱۸ باسه ---------- ۵۹
۵-۳-۲- مقایسه روش پیشنهادی با روش مرجع [۲۷] از نظر دقت تعیین بهترین خطوط برای کلیدزنی در سیستم ۱۱۸ باسه ---------- ۶۲
۵-۳-۳- بررسی تأثیر کلیدزنی خطوط انتقال بر هزینه انرژی و ذخیره چرخان و قطع بار سیستم ۱۱۸ باسه ---- ۶۸
---------- ۷۰
۵-۳-۴- بررسی تغییرات ولتاژ سیستم ۱۱۸ باسه ---------- ۷۱

فصل۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات---------- ۷۵

۶-۱- نتیجه‌گیری ---------- ۷۶

۶-۲- پیشنهادات---------- ۷۷

منابع و مراجع----------۷۸

ضمیمه-الف ----------۸۰

ضمیمه-ب ----------۸۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۳-۱: سیستم سه باسه ---------- ۲۹

شکل ۳-۲: الگوریتم ابتکاری اصلاح شده ---------- ۳۳

شکل ۵-۱: دیاگرام تک خطی سیستم ۵۷ باسه ---------- ۴۴

شکل ۵-۲: مقایسه روش پیشنهادی (روش ۳) با روش [۲۷] (روش ۲) و بهترین ترکیب ممکن (روش ۱) ---------- ۴۹

شکل ۵-۳: درصد کاهش کل هزینه‌های بهره‌برداری، ناشی از باز کردن خطوط پیش‌بینی شده در هر مرحله از الگوریتم ابتکاری پیشنهادی ---------- ۵۲

شکل ۵-۴: درصد کاهش هزینه انرژی، ناشی از باز کردن خطوط پیش‌بینی شده در هر مرحله از الگوریتم ابتکاری پیشنهادی ---------- ۵۳

شکل ۵-۵: درصد کاهش هزینه ذخیره چرخان افزایشی، ناشی از باز کردن خطوط پیش‌بینی شده در هر مرحله از الگوریتم ابتکاری پیشنهادی ---------- ۵۳

شکل ۵-۶: درصد کاهش هزینه ذخیره چرخان کاهشی، ناشی از باز کردن خطوط پیش‌بینی شده در هر مرحله از الگوریتم ابتکاری پیشنهادی ---------- ۵۴

شکل ۵-۷: درصد کاهش هزینه قطع بار، ناشی از باز کردن خطوط پیش‌بینی شده در هر مرحله از الگوریتم ابتکاری پیشنهادی ---------- ۵۴

شکل ۵-۸: تغییرات ولتاژ سیستم ۵۷ باسه، قبل و بعد از اعمال کلیدزنی خطوط تعیین شده توسط روش پیشنهادی --- ۵۶

شکل ۵-۹: دیاگرام تک خطی سیستم استاندارد ۱۱۸ باسه IEEE ---------- ۵۸

شکل ۵-۱۰: مقایسه روش پیشنهادی (روش ۳) با روش ارائه شده در مرجع [۲۷] (روش ۲) و بهترین ترکیب ممکن (روش ۱) در سطح بار کم ---------- ۶۴

شکل ۵-۱۱: مقایسه روش پیشنهادی (روش ۳) با روش ارائه شده در مرجع [۲۷] (روش ۲) و بهترین ترکیب ممکن (روش ۱) در سطح بار متوسط ---------- ۶۵

شکل ۵-۱۲: مقایسه روش پیشنهادی (روش ۳) با روش ارائه شده در مرجع [۲۷] (روش ۲) و بهترین ترکیب ممکن (روش ۱) در سطح بار زیاد ---------- ۶۷

شکل ۵-۱۳: تغییرات هزینه ذخایر چرخان افزایشی، کاهشی و قطع بار شبکه ناشی از کلیدزنی، در هنگام وقوع پیشامدهای احتمالی ---------- ۷۰

شکل ۵-۱۴: تغییرات ولتاژ سیستم ۱۱۸ باسه، قبل و بعد از اعمال کلیدزنی خطوط تعیین شده توسط روش پیشنهادی برای سطح بار کم ---------- ۷۲

شکل ۵-۱۵: تغییرات ولتاژ سیستم ۱۱۸ باسه، قبل و بعد از اعمال کلیدزنی خطوط تعیین شده توسط روش پیشنهادی برای سطح بار متوسط ---------- ۷۳

شکل ۵-۱۶: تغییرات ولتاژ سیستم ۱۱۸ باسه، قبل و بعد از اعمال کلیدزنی خطوط تعیین شده توسط روش پیشنهادی برای سطح بار زیاد ---------- ۷۴

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱: هدف از کلیدزنی ---------- ۹

جدول ۲-۲: مدل‌ها و روش‌های مختلف ارائه شده برای کلیدزنی ---------- ۱۰

جدول ۳-۱: اطلاعات مولدهای سیستم سه باسه ---------- ۲۹

جدول ۳-۲: اطلاعات شاخه‌های سیستم سه باسه ---------- ۲۹

جدول ۳-۳: هزینه تأمین توان بار سیستم به ازای باز شدن هر خط به همراه ویژگی خط مربوطه قبل از کلیدزنی در حالت اول ---------- ۳۰

جدول ۳-۴: توان عبوری از خطوط و توان تولیدی هر مولد قبل و بعد از کلیدزنی بهترین خط در حالت اول ---------- ۳۰

جدول ۳-۵: هزینه تأمین توان بار سیستم به ازای باز شدن هر خط به همراه ویژگی خط مربوطه قبل از کلیدزنی در حالت دوم ---------- ۳۱

جدول ۳-۶: توان عبوری از خطوط و توان تولیدی هر مولد قبل و بعد از کلیدزنی بهترین خط در حالت دوم ---------- ۳۱

جدول ۵-۱: اطلاعات واحدهای تولیدی سیستم استاندارد ۵۷ باسه IEEE ---------- ۴۳

جدول ۵-۲:توان تولیدی ژنراتورها و هزینه انرژی سیستم بدون در نظر گرفتن محدودیت خطوط و با در نظر گرفتن محدودیت خطوط ---------- ۴۵

جدول ۵-۳: نتایج حاصل از کلیدزنی بهترین خطوط به صورت ترتیبی روش۱: جواب بهینه (۸۰=۱) روش۲: روش [۱۹] روش۳: روش پیشنهادی ---------- ۴۷

جدول ۵-۴: هزینه انرژی و ذخیره چرخان و بار قطع شده سیستم (برحسب دلار) با توجه به کلیدزنی خطوط تعیین شده با روش پیشنهادی ---------- ۵۱

جدول ۵-۵: شاخص‌های ولتاژ قبل و بعد از کلیدزنی ---------- ۵۵

جدول ۵-۶: پیش‌بینی بهترین خطوط ممکن در مرحله اول الگوریتم ابتکاری، در سطح بار کم ---------- ۶۰

جدول ۵-۷: پیش‌بینی بهترین خطوط ممکن در مرحله اول الگوریتم ابتکاری، در سطح بار متوسط ---------- ۶۱

جدول ۵-۸: پیش بینی بهترین خطوط ممکن در مرحله اول الگوریتم ابتکاری، در سطح بار زیاد ---------- ۶۱

جدول ۵-۹: خطوط تعیین شده در هر مرحله از الگوریتم ابتکاری به ازای کاندیدا قرار دادن خطوط به هر سه روش در سطح بار کم ---------- ۶۳

جدول ۵-۱۰: نتایج حاصل از کلیدزنی بهترین خطوط به صورت ترتیبی برای سطح بار متوسط روش۱: جواب بهینه (I=۱۷۹) روش۲: روش مرجع [۲۷] روش۳: روش پیشنهادی ---------- ۶۵

جدول ۵-۱۱: نتایج حاصل از کلیدزنی بهترین خطوط به صورت ترتیبی برای سطح بار زیاد روش۱: جواب بهینه (I=۱۷۹) روش۲: روش مرجع [۲۷] روش۳: روش پیشنهادی ---------- ۶۷

جدول ۵-۱۲: هزینه انرژی و ذخیره چرخان و بار قطع شده سیستم (برحسب دلار) با توجه به کلیدزنی خطوط تعیین شده با روش پیشنهادی در سطح بار کم ---------- ۶۹

جدول ۵-۱۳: هزینه انرژی و ذخیره چرخان و بار قطع شده سیستم (برحسب دلار) با توجه به کلیدزنی خطوط تعیین شده با روش پیشنهادی در سطح بار متوسط ---------- ۶۹

جدول ۵-۱۴: هزینه انرژی و ذخیره چرخان و بار قطع شده سیستم (برحسب دلار) با توجه به کلیدزنی خطوط تعیین شده با روش پیشنهادی در سطح بار زیاد---------- ۷۰

جدول ۵-۱۵: شاخص‌های ولتاژ قبل و بعد از کلیدزنی برای سطوح مختلف بار ---------- ۷۱

جدول الف-۱: اطلاعات باس‌های سیستم استاندارد ۵۷ باسه ---------- ۸۰

جدول الف-۲: اطلاعات خطوط سیستم استاندارد ۵۷ باسه ----------۸۲

جدول ب-۱: اطلاعات باس‌های سیستم استاندارد ۱۱۸ باسه ----------۸۴

جدول ب-۲: اطلاعات خطوط سیستم استاندارد ۱۱۸ باسه ----------۸۷

فهرست علائم و اختصارات

اندیس‌ها:

n,m	**اندیس باس‌ها**
G	اندیس ژنراتورها
k	اندیس خطوط انتقال
C	اندیس پیشامدهای احتمالی

پارامترها:

C_g	هزینه خرید انرژی از ژنراتور g (برحسب دلار بر مگاوات)
C_g^u	هزینه خرید ذخیره چرخان افزایشی از ژنراتور g (دلار بر مگاوات)
C_g^d	هزینه خرید ذخیره چرخان کاهشی از ژنراتور g (دلار بر مگاوات)
$VOLL$	ارزش بار قطع شده (دلار بر مگاوات)
Pr_c	احتمال وقوع پیشامد احتمالی c
$P_{k,mn,c}$	توان اکتیو خط k از باس m به باس n در حالت c (مگاوات)
$Q_{k,mn,c}$	توان راکتیو خط k از باس m به باس n در حالت c (مگاوار)
$P_{d,m}$	بار اکتیو باس m (مگاوات)
$Q_{d,m}$	بار راکتیو باس m (مگاوار)
$S_{k,max}$	توان نامی خط k (برحسب ولت‌آمپر)
$P_{g,max}$	حداکثر توان اکتیو قابل تأمین توسط ژنراتور g (مگاوات)
$P_{g,min}$	حداقل توان اکتیو قابل تأمین توسط ژنراتور g (مگاوات)
$Q_{g,max}$	حداکثر توان راکتیو قابل تأمین توسط ژنراتور g (مگاوار)
$Q_{g,min}$	حداقل توان راکتیو قابل تأمین توسط ژنراتور g (مگاوار)
RR_g	نرخ تغییر تولید ژنراتور g (برحسب مگاوات بر دقیقه)

$V_{m,max}$	حداکثر اندازه ولتاژ باس m
$V_{m,min}$	حداقل اندازه ولتاژ باس m
δ_{max}	حداکثر اختلاف زاویه ولتاژ باس‌ها
δ_{min}	حداقل اختلاف زاویه ولتاژ باس‌ها

متغیرها:

$P_{g,0}$	توان اکتیو تأمین شده در حالت عادی توسط ژنراتور g (مگاوات)
$P_{g,c}$	توان اکتیو ژنراتور g در پیشامد احتمالی c (مگاوات)
$Q_{g,0}$	توان راکتیو تأمین شده در حالت عادی توسط ژنراتور g (مگاوار)
$Q_{g,c}$	توان راکتیو تأمین شده توسط ژنراتور g در حالت c (مگاوار)
r_g^u	ذخیره چرخان افزایشی خریداری شده از ژنراتور g (مگاوات)
r_g^d	ذخیره چرخان کاهشی خریداری شده از ژنراتور g (مگاوات)
$delp_{m,c}$	بار اکتیو قطع شده در باس m در حالت c (برحسب مگاوات)
$delq_{m,c}$	بار راکتیو قطع شده در باس m در حالت c (برحسب مگاوار)
$V_{m,0}$	اندازه ولتاژ باس m در حالت *عادی*
$V_{m,c}$	اندازه ولتاژ باس m در حالت c
$\delta_{mn,0}$	اختلاف زاویه ولتاژ باس‌های m و n در حالت عادی
$\delta_{mn,c}$	اختلاف زاویه ولتاژ باس‌های m و n در حالت c
π_m^P	هزینه حاشیه‌ای یا دوگان قید تعادل توان اکتیو مربوط به باسm
π_m^Q	هزینه حاشیه‌ای یا دوگان قید تعادل توان راکتیو مربوط به باسm

فصل۱- کلیات موضوع

۱-۱- مقدمه

اخیراً در محیط تجدید ساختار یافته، تمایل برای افزایش ظرفیت انتقال با بهنگام کردن و هوشمند سازی شبکه انتقال موجود مورد توجه قرار گرفته است، چرا که دستیابی به این هدف می‌تواند با هزینه‌های به مراتب کمتر از ساخت یک خط انتقال جدید، در یک فاصله زمانی کوتاه‌تر فراهم شود. ضمن اینکه ساختن یک خط انتقال جدید علاوه بر مسائل ذکر شده از دیدگاه زیست‌محیطی، ملاحظات و اثرات مخرب میدان‌های الکترومغناطیسی (EMF[1]) روی بدن انسان و سلامتی او و کاسته شدن احتمالی ارزش زمین حاوی خط انتقال، به مراتب دشوارتر از قبل شده است.

۱-۲- پرشدگی خطوط انتقال

در سیستم‌های تجدید ساختار یافته، دسترسی آزاد به سیستم‌های انتقال انرژی نقش مهمی در ایجاد بازارهای رقابتی و همچنین بالا رفتن رفاه اجتماعی سیستم دارند. سیستم‌های انتقال انرژی با جابجایی انرژی در فواصل طولانی سبب مشارکت همگانی تولیدکنندگان انرژی در بازارهای برق می‌شود. در یک بازار رقابتی کامل، همواره فرض بر آن است که ژنراتورهای ارزان بتوانند انرژی تولیدی خود را به طور کامل بفروشند و در نقطه مقابل ژنراتورهای گران‌تر انرژی خود را نتوانند به صورت کامل به فروش برسانند. اما شارش توان در سیستم‌های انتقال انرژی تابع قوانین فیزیکی می‌باشند و نه تابع قوانین بازاری. همچنین حداکثر توان قابل انتقال بین دو نقطه از سیستم قدرت می‌تواند بنا به دلایل متعددی مانند قیود امنیتی ولتاژ، حد حرارتی خطوط و یا پایداری زاویه شفت ژنراتورها به میزان مشخصی محدود شود. همچنین بهره‌بردار سیستم با توجه به محدودیت‌های بهره‌برداری می‌تواند میزان توان عبوری از خطوط انتقال را محدود کند. زمانی که این پدیده رخ می‌دهد به نوعی سیستم دچار پرشدگی شده است.

---

[1] Electromagnetic Field

پرشدگی طبق تعریف مرجع [۱]، به معنای استفاده از سیستم انتقال در خارج از محدوده‌های مجاز بهره‌برداری است. به بیان دیگر، در صورتی که تغییر تولید در حداقل یک ژنراتور خاص در شبکه موجب اختلال در تداوم بهره‌برداری از سیستم شود، سیستم قدرت دچار پرشدگی می‌شود. پرشدگی ممکن است یا به صورت واقعی و در زمان بهره‌برداری از شبکه انتقال رخ دهد و یا در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم پیش‌بینی شود. در هنگام بهره‌برداری از سیستم عوامل مختلفی می‌توانند موجب پرشدگی در شبکه گردند. از این میان می‌توان به عواملی از قبیل خروج ناگهانی یک یا چند ژنراتور در سیستم، تغییر پیش‌بینی نشده در تقاضا و دادوستدهای هماهنگ نشده در خرید و فروش برق اشاره نمود.

با ایجاد پرشدگی در خطوط انتقال ژنراتورهای ارزان شبکه نمی‌توانند تولید خود را افزایش دهند و از این رو بهره‌بردار شبکه مجبور به استفاده از ژنراتورهای گران‌تر شبکه می‌شود و در نتیجه هزینه تولید توان در شبکه افزایش می‌یابد و مشترکین ملزم به پرداخت هزینه‌های بیشتری برای مصرف انرژی می‌شوند. لذا این‌گونه می‌توان نتیجه‌گیری نمود که پرشدگی در خطوط انتقال انرژی به ویژه در بازارهای برق غیر قابل قبول بوده و باید به سرعت رفع شود. در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم قدرت نیز ارائه نامناسب برنامه‌های تولید و مصرف که اجرای آن محدوده‌های مجاز بهره‌برداری از شبکه انتقال را نقض می‌کنند، عامل اصلی وقوع پرشدگی در شبکه محسوب می‌شود. مهمترین محدوده‌های مجاز بهره‌برداری سیستم انتقال، ظرفیت خطوط انتقال و ترانسفورماتورها بر حسب حداکثر توان ظاهری (MVA) یا توان حقیقی (MW) و نیز مقادیر حداقل و حداکثر ولتاژ (V) و حداکثر زاویه ولتاژ شین‌ها (Radian) می‌باشند که از مطالعات مختلف بر روی شبکه به دست می‌آیند. بنابراین در برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم ابتدا باید با توجه به استانداردها و سیاست‌های بهره‌برداران سیستم محدوده‌های مجاز بهره‌برداری تعریف شود و پس از آن با توجه به این محدوده‌های تعیین شده برنامه‌ریزی تولید و مصرف برق تدوین شود. از جمله مهم‌ترین عواملی که

در تعیین این محدوده‌ها نقش دارند می‌توان به معیارها و اصول قابلیت اطمینان، ایمنی استاتیکی و ایمنی دینامیکی اشاره نمود.

۱-۳- روش‌های مدیریت پرشدگی خطوط انتقال

در روش‌های مدیریت پرشدگی در گام اول بعضی روش‌های کنترلی در سیستم مانند بهره‌گیری از شیفت دهنده‌های فاز، تغییر تپ تراسفورماتورها، مدیریت توان راکتیو، ادوات FACTS[1] و غیره برای برطرف کردن پرشدگی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری استفاده می‌شود. در صورت عدم کفایت روش‌های فوق در رفع پرشدگی در گام بعدی روش پخش‌بار مجدد ژنراتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در برخی موارد نیز از فراخوانی ژنراتورهای بی بار یا خارج از اولویت، همچنین روش‌های کاهش بار و قطع بار یا در صورت وجود از کنترل بارهای قابل قطع برای مدیریت پرشدگی استفاده می‌شود.

اخیراً با توجه به هزینه بسیار بالای نصب تجهیزات مورد نیاز و ناکارآمد بودن روش‌های ذکر شده، روشی بر مبنای باز کردن برخی از خطوط انتقال که توسط مسائل بهینه‌سازی تعیین می‌شوند ارائه شده است، که به موجب آن می‌توان مسیر عبور توان را به گونه‌ای تغییر داد که توان عبوری از خطوط پرشده کاهش یابد و نیروگاه‌های ارزان‌تر در شبکه بتوانند تولید خود را افزایش دهند، که این امر هم به نفع مصرف‌کنندگان می‌باشد و هم به نفع تولیدکنندگان. در ضمن استفاده از این روش نیاز به سرمایه‌گذاری کوچکی مثل افزایش تعدادی کلید برای افزایش قابلیت انجام مانورهای مختلف در خطوط دارد که در مقابل فواید اقتصادی آن بسیار ناچیز است.

[1] Flexible AC Transmission System

۱-۴- استفاده از کلیدزنی به عنوان یک عمل پیشگیرانه به منظور حفظ امنیت سیستم

محدودیت انتقال در خطوط همچنین می‌تواند ناشی از رعایت شرایط بهره‌برداری به‌هنگام پیشامد خطا و به منظور حفظ امنیت در شبکه باشد. شبکه‌های بهم پیوسته طوری طراحی و بهره‌برداری می‌شوند که تداوم تأمین نیاز مصرف‌کننده به‌هنگام پیشامدهای احتمالی نظیر از دست دادن تولید یک ژنراتور، خارج شدن یک خط انتقال و یا ایجاد خطا در هر کدام از تجهیزات سیستم، وجود داشته باشد.

روش‌های پیشگیرانه در بهره‌برداری بدین معنی است که بهره‌برداری سیستم به طریقی انجام پذیرد که با خروج هر کدام از تجهیزات فوق‌الذکر هیچ مشکلی در تداوم عبور توان نباشد. لازمه بهره‌برداری پیشگیرانه، داشتن ظرفیت تولید کافی برای تأمین انرژی بیش از نیاز مصرف و با ظرفیت خالی روی خطوط تبادل محدود در شبکه است که در این صورت شبکه مزبور طوری بهره‌برداری می‌شود که هر تجهیز آن در شرایط عادی بهره‌برداری کمتر از حد حرارتی خود و کمتر از حد اضطراری خود در بدترین شرایط پیشامد، بارگذاری شده و ظرفیت ذخیره در آن شرایط مورد استفاده قرار گیرد. البته امکان برآورده کردن چنین خواسته‌ای عملاً وجود ندارد و در هنگام وقوع برخی از خرابی‌ها با توجه به نوع، مکان و وظیفه‌ی تجهیز، قطع بار در برخی از نقاط شبکه رخ می‌دهد.

در چنین شرایطی با توجه به اینکه کلیدزنی می‌تواند ابزاری قدرتمند و در عین حال مقرون به صرفه برای رفع پرشدگی خطوط انتقال باشد، احتمالاً می‌تواند به کاهش محدودیت‌های تحویل ذخیره چرخان در شرایط پیشامدهای احتمالی نیز کمک کند و همچنین از میزان قطع بار در شبکه که به موجب این خرابی‌ها رخ داده است، بکاهد، که البته این موضوع باید توسط ابزارهای در دسترس در سیستم‌های آزمایشی استاندارد شبیه‌سازی شده و مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

۱-۵- امکان کلیدزنی خطوط انتقال در سیستم‌های واقعی

به طور کلی برنامه‌ریزی احداث شبکه‌های انتقال به گونه‌ای است که بتوانند شرایط مختلف بهره‌برداری سیستم شامل حالت عادی و پیشامدهای احتمالی، سطوح مختلف بار و توزیع تولید در نقاط مختلف شبکه را تحمل کنند. شرایط فوق همواره ثابت نبوده و لذا ممکن است که در برخی شرایط، نیاز به حضور یک خط در مدار باشد، اما در برخی شرایط دیگر نیاز به حضور آن نباشد و حتی عدم حضور آن، از نظر اقتصادی سودآور نیز باشد. بنابراین کلیدزنی خطوط امری امکان‌پذیر است و با توجه به وجود محدودیت در احداث خطوط جدید، مناسب است که از ظرفیت خطوط موجود در شبکه بهتر استفاده شود.

همچنین قوانین کیرشهف اجازه باز شدن خطوط را برای اصلاح پخش‌بار اقتصادی می‌دهند. بازشدن خطوط برای اصلاح پخش‌بار قبلاً در سطوح کوچک انجام شده است. شواهدی موجود است که بهره‌برداران سیستم برای مصرف یا تولید توان راکتیو خطوط یا به دلایل دیگر، خطوط را خارج یا وارد مدار می‌کنند. انجمن هماهنگ برق شمال شرق[1] ، «خروج خطوط انتقال داخلی» را در لیست اعمال قابل انجام برای اجتناب از شرایط ولتاژهای نامناسب قرار داده است. علاوه بر این، بهره‌برداران سیستم، روش‌هایی برای بستن سریع خطوط در مواقع اضطراری دارند. در شبکه PJM[2] این طرح‌های حفاظتی ویژه SPS[3] به بهره‌برداران این اجازه را می‌دهد که خطوط را در حالت کار عادی، خارج کنند و خط را در زمان‌های اضطراری به شبکه باز گردانند [۲].

علاوه بر این برای حفظ پایداری گذرا مابین دو ناحیه با بیشتر از یک خط انتقال بلند از کلیدزنی استفاده می‌شود، برای مثال اگر یکی از دو خط موازی و بلند در اثر خطا از مدار خارج شود، به‌جای مسیر قبلی حالا مسیری با امپدانس دو برابر آنچه قبل از خارج شدن خط مزبور داشته، خواهد داشت که می‌تواند اثر خیلی جدی در ناپایداری سیستم داشته باشد. برای رفع این

[1] The Northeast Power Coordinating Council
[2] Pennsylvania-New Jersey-Maryland Interconnection
[3] Special Protection Schemes

معضل یک ایستگاه کلیدزنی (switching station) در وسط هر دو خط ایجاد می‌شود که در هر پیشامدی که روی یکی از خطوط ایجاد شود خطوط باقیمانده پس از خارج شدن خط خطادار دارای ۱/۵ برابر امپدانس اولیه خط خواهند بود. این‌کار سهم مهمی در حفظ پایداری سیستم و افزایش قابل توجهی در انتقال توان سیستم خواهد داشت.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

در این فصل، ضرورت استفاده از کلیدزنی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای رفع پرشدگی شبکه که منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم قدرت می‌گردد، بیان شد. در فصل دوم مروری بر کارهای انجام شده مرتبط با تحقیق دسته‌بندی و به طور خلاصه آورده شده است، همچنین مشکلاتی که در مورد کلیدزنی وجود دارد بیان شده است. در فصل سوم پخش‌بار بهینه بر مبنای معادلات پخش‌بار DC و AC آورده شده است و سپس کلیدزنی خطوط انتقال به صورت یک متغیر باینری که وضعیت در مدار بودن خطوط را تعیین می‌کند، در آنها لحاظ می‌گردد و سپس مشکلات و پیچیدگی‌های حل این مسائل جدید مورد بررسی قرار خواهد گرفت و سپس با توجه به عدم دسترسی به حل‌کننده مسائل غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) با ابعاد بزرگ، یک روش ابتکاری برای یافتن بهترین خطوط که باز کردن آنها بیشترین کاهش هزینه را برای سیستم در بر دارد ارائه می‌گردد. در فصل چهارم تأثیر کلیدزنی خطوط انتقال بر هزینه‌های انرژی و ذخیره چرخان و همچنین میزان قطع بار شبکه در هنگام رخداد پیشامدهای احتمالی با ارائه یک مدل بهینه‌سازی ACOPF با در نظر گرفتن معیار قابلیت اطمینان N-1، بررسی می‌شود. در فصل ششم نتایج اعمال روش پیشنهادی بر روی دو سیستم استاندارد ۵۷ و ۱۱۸ باسه IEEE مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. نتایج پیش‌بینی خطوط بهینه با روش پیشنهادی با بهترین نتایج ممکن مقایسه می‌گردد و تأثیر باز شدن خطوط بر هزینه‌های بهره‌برداری و میزان قطع بار و اندازه ولتاژ باس‌های شبکه به صورت تحلیلی آورده خواهد شد.