بسم الله الرحمن الرحیم
الحمد لله رب العالمین الرحمن الرحیم مالک یوم الدین
ایاک نعبد و ایاک نستعین اهدنا الصراط المستقیم
صراط الذین انعمت علیهم غیر المغضوب علیهم
ولا الضالین

دانشگاه صنعت آب وبرق

(شهید عباسپور)

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق (قدرت- تجدید ساختار)

قیمت‌گذاری گرهی با توجه به قیود امنیت ولتاژ در حضور بارهای قطع‌پذیر

تحقیق و تدوین:

اهوه‌ند جلالی

استاد راهنما:

دکتر محمد صادق سپاسیان

استاد مشاور:

دکتر محمد کاظم شیخ الاسلامی

آبان ماه ۱۳۸۸

این پایان‌نامه تحت عنوان: قیمت‌گذاری گرهی با توجه به قیود امنیت ولتاژ در حضور بارهای قطع‌پذیر

در تاریخ ۸۸/۸/۰٤ توسط هیئت داوران متشکل از آقایان:

۱- جناب آقای دکتر محمد صادق سپاسیان	**(استاد محترم راهنما)**	**امضاء**
۲- جناب آقای دکتر محمدکاظم شیخ الاسلامی	**(استاد محترم مشاور)**	**امضاء**
۳- جناب آقای دکتر مهرداد ستایش نظر	**(استاد محترم داور)**	**امضاء**
٤- جناب آقای دکترشهرام جدید	**(استاد محترم مدعو)**	**امضاء**
۵- جناب آقای دکتر مومن بهادرنژاد	**(نماینده محترم تحصیلات تکمیلی دانشکده برق)**	**امضاء**

مورد بررسی قرار گرفت. نمره در جلسه دفاعیه ۱۸/۵۰ می‌باشد ولی نمره نهایی براساس ضوابط تأخیر دفاع پایان‌نامه و تشویق بخاطر انتشار مقالات محاسبه و در کارنامه درج خواهد شد.

احمد سالم‌نیا

رئیس دانشکده مهندسی برق

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می دانم از زحمات اساتید ارجمند، دکتر محمد صادق سپاسیان و دکتر محمد کاظم شیخ الاسلامی که در انجام این پایان نامه از همراهی و هدایت ایشان برخوردار بودم، نهایت تشکر و قدردانی را بنمایم.

به نام خدا

تعهدنامه اصالت اثر:

اینجانب اهوه‌ند جلالی تائید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه، حاصل کار پژوهشی اینجانب می باشد و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است.
این پایا ن نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح، پایین تر و بالاتر ارائه نشده است.
کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) می‌باشد.

اهوه‌ند جلالی

تقدیم به دو یاور دلسوز

پدر و مادر عزیزم

و.... ای کاش می شد قطره ای از دریای مهرشان را تلافی نمود

و تقدیم به خواهران مهربانم

که همواره مشوق راهم هستند

چکیده:

بارهای قطع پذیر از جمله ابزارهای تأثیرگذار می باشند که با پیدایش مفاهیم پاسخ بار، جهت نیل به اهداف بهره برداری و بهبود امنیت سیستم استفاده شده اند. یکی از شاخص‌های مهم امنیت سیستم که در این پایان-نامه بدان پرداخته شده است حاشیه پایداری ولتاژ می‌باشد. اعمال قیدهای پایداری ولتاژ به مسأله پخش بار بهینه راه‌حل متداولیست که برای به دست آوردن پاسخی با امنیت بیشتر از بازار برق به کار می‌رود. اما این راه‌حل به افزایش هزینه‌های سیستم و پایین آمدن بازده اقتصادی بازار برق نیز منجر می‌گردد. هدف اصلی این پایان‌نامه یافتن روشی برای نیل به حاشیه مطلوب پایداری ولتاژ بدون مقید نمودن برنامه پخش بار بهینه (OPF[1]) به قیدهای پایداری ولتاژ می باشد. ابزار استفاده شده جهت دستیابی به این هدف بارهای قطع پذیر می‌باشد. با توجه به کمبود منابع تولید توان در کشورمان به علاوه اعمال یارانه‌های مختلف بر هزینه برق مصرفی مشتریان، کاهش مصرف توان به روشی عملی و عادلانه مزایای اقتصادی فراوانی برای شبکه در پی خواهد داشت. مدیریت کاهش بار مصرف‌کنندگان در جهت افزایش امنیت سیستم، این مزایا را دو چندان خواهد نمود. در این پایان‌نامه برای مدل نمودن بازار بارهای قطع پذیر، بازه زمانی یک ماهه مورد بررسی قرار گرفته است. بازار قطع بار پیشنهاد شده بر پایه تحلیل حساسیت برای شینهای بار اجرا می‌گردد و حاشیه مطلوب پایداری، برابر با حاشیه به دست آمده از اجرای پخش بار بهینه مقید به قیود پایداری ولتاژ (VSC-OPF[2]) اتخاذ می‌شود. این روش علاوه بر تأمین امنیت ولتاژی سیستم، به کاهش هزینه تولید توان و همچنین کاهش توان مصرفی شبکه منجر می‌شود.

[1] - Optimal Power Flow
[2] - Voltage Security Constrained Optimal Power Flow

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱
۱-۱ اهميت و لزوم بررسي موضوع پايان نامه..... ۱
۱-۲ مروري بر كارهاي انجام شده..... ۳
۱-۳ نحوه تنظيم پايان نامه..... ۵
فصل دوم: اهميت پايداري ولتاژ و اثرات آن بر عملكرد سيستم قدرت ۶
۲-۱ مقدمه..... ٦
۲-۲ تعريف و طبقه بندي مفاهيم مرتبط با پايداري ولتاژ..... ۷
۲-۲-۱ تعريف پايداري ولتاژ، ناپايداري ولتاژ و فروپاشي ولتاژ ۷
۲-۲-۲ طبقه بندي پايداري سيستم قدرت ۸
۲-۳ تحليل پايداري ولتاژ سيستم قدرت..... ۱۰
۲-۳-۱ بررسي يک شبكه ساده ۱۰
۲-۳-۲ بررسي ديناميكي و استاتيكي پايداري ولتاژ..... ۱۲
۲-۳-۳ تجزيه وتحليل به روش تئوري انشعاب ۱۳
۲-۳-۴ عوامل مؤثر بر پايداري ولتاژ..... ۱٤
۲-۴ سناريوهاي فروپاشي ولتاژ..... ۱۸
۲-۵ ارزيابي پايداري ولتاژ..... ۱۹
۲-۵-۱ ارزيابي امنيت سيستم..... ۲۰
۲-۵-۲ محاسبه حدود پايداري ولتاژ ۲۲
۲-۵-۲-۱ حاشيه پايداري ولتاژ..... ۲۳
۲-۵-۲-۲ محاسبه نقطه فروپاشي ولتاژ..... ۲۴
۲-٦ تحليل پيشامدها..... ۳۰
فصل سوم: معرفي پاسخ تقاضا و نقش آن در امنيت سيستم قدرت ۳۵
۳-۱ مقدمه..... ۳۵
۳-۲ پاسخ تقاضا..... ۳٦
۳-۲-۱ پاسخ تقاضا مبتني بر تشويق..... ۳۷
۳-۲-۲ نرخ هاي مبتني بر زمان ٤۱
۳-۳ فوايد و مزاياي فني و اقتصادي برنامه هاي پاسخ بار..... ٤۳
۳-۳-۱ فوايد شركت كنندگان..... ٤۵
۳-۳-۲ فوايد سيستم و بازار ٤۵
۳-۳-۳ فوايد پايايي سيستم ٤٦

۴-۳-۳ سایر فواید..... ٤٦
فصل چهارم: مروري بر روشهاي مختلف قيمت‌گذاري در بازارهاي برق ۴۷
۴-۱ مقدمه..... ٤٧
۴-۲ مدل بازار یکنواخت..... ٤٧
۴-۳ مدل بازار پرداخت بر اساس پیشنهاد..... ٤٩
۴-۴ مدل بازار بر اساس قيمت گذاري نقطه اي..... ٥١
۴-۵ تأثیر لحاظ نمودن قیود پایداري ولتاژ در فضاي قيمت گذاري نقطه اي..... ٥٣
۴-۵-۱ بیشینه کردن فاصله از نقطه فروپاشي ولتاژ..... ٥٤
۴-۵-۲ قیمتهاي حاشیهاي محلي ٥٦
۴-۵-۳ مدل پخش بار بهینه امنیت مقید با تابع هدف چندگانه ٥٧
۴-۵-۴ آنالیز پیشامدها..... ٦٠
فصل پنجم: روش پیشنهادي جهت تأمین امنیت ولتاژي شبکه با استفاده از بارهاي قطع پذیر..... ۶۴
۵-۱ مقدمه..... ٦٤
۵-۲ تأمین بودجه لازم براي اجراي بازار بارهاي قطع پذیر..... ٦٥
۵-۳ نحوه اجراي بازار بارهاي قطع پذیر..... ٦٩
۵-۳-۱ تعیین میزان اثرگذاري بارها..... ٦٩
۵-۳-۲ مدل بازار بارهاي قطع پذیر ۷۱
۵-۴ اعمال تحلیل پیشامدها به بازار بارهاي قطع پذیر..... ٧٦
فصل ششم: نتایج شبیه سازي بر روي شبکه نمونه..... ۷۸
۶-۱ مقدمه..... ٧٨
۶-۲ شبیه سازي بدون آنالیز پیشامدها..... ٧٩
۶-۲-۱ نتایج OPF و VSC-OPF ۸۱
۶-۲-۲ اجراي بازار قطع بار..... ٨٤
۶-۳ شبیه سازي با اعمال آنالیز پیشامدها..... ٩١
۶-۳-۱ نتایج OPF و VSC-OPF ۹۲
۶-۳-۲ اجراي بازار قطع بار..... ٩٥
فصل هفتم: نتیجه گیري و پیشنهادات ۱۰۱
۵-۱ جمع بندي..... ١٠١
۵-۲ پیشنهادات..... ١٠٣
مراجع..... ١٠٤
Abstract..... ١٠٨

فهرست شکل‌ها

شکل۲-۱: شبکه نمونه ۲ شینه ۱۰
شکل ۲-۲: منحني PV براي شبکه نمونه ۲ شينه ۱۱
شکل۲-۳: منحني PV با نقاط انشعاب حدود ۱۵
شکل ۲-۴: منحني PQ ۱۶
شکل ۲-۵: عملکرد تپ چنجر زير بار در اثر وقوع حادثه ۱۷
شکل ۲-۶: حالتهاي عملکرد سيستم قدرت ۲۰
شکل ۲-۷: انواع قابليت هاي انتقال ۲۳
شکل ۲-۸: حاشيه پايداري ولتاژ ۲۴
شکل ۲-۹: يافتن منحني PV با استفاده از تکنيک پيش بيني-اصلاح ۲۷
شکل ۲-۱۰: روشهاي مختلف مرحله تخمين ۲۷
شکل ۲-۱۱: الگوريتم محاسبه نقطه حداکثر بارگذاري ۲۹
شکل ۲-۱۲: تقاطع منحني هاي PV پس از پيشامد ۳۲
شکل ۳-۱: تأثير کاهش مصرف بر روي قيمت برق ۳۷
شکل ۳-۲: نرخ هاي زمان استفاده ۴۲
شکل ۳-۳: قيمت گذاري پيک بحراني ۴۳
شکل ۳-۴: قيمت گذاري زمان واقعي ۴۳
شکل ۴-۱: تسويه بازار به فرم يکنواخت ۴۹
شکل ۴-۱: تسويه بازار به فرم پرداخت بر اساس پيشنهاد ۵۰
شکل ۵-۱: بارهاي قطع پذير در مقابل VSC-OPF ۶۸
شکل ۵-۲: نحوه تأمين بودجه براي قطع بار ۶۹
شکل ۵-۳: دياگرام بلوکي روش پيشنهادي ۷۷
شکل ۴-۴: دياگرام تک خطي شبکه ۱۴ باسه IEEE ۷۹
شکل ۴-۵: تغييرات توليد ژنراتورها (MW) با تغيير ضريب وزني ω ۸۳
شکل ۴-۶: تغييرات هزينه توليد و حاشيه پايداري با تغيير ضريب وزني ω ۸۳
شکل ۴-۷: شماي شبکه اصلاح شده ۱۴ باسه ۹۱
شکل ۴-۸ : تغييرات هزينه توليد و حاشيه پايداري با تغيير ضريب وزني براي روز ۷ ..... ۹۴

فهرست جداول

جدول۲-۱: طبقه‌بندي مطالعات پايداري سيستم قدرت ۹
جدول۶-۱: اطلاعات مربوط به ژنراتورها ۸۰
جدول۶-۲: اطلاعات مربوط به خطوط انتقال ۸۰
جدول۶-۳: ضرايب بار روزانه ۸۰
جدول۶-۴: درصد بار باسهاي شبكه ۸۱
جدول۶-۵: نتايج OPF براي هر سطح بار ۸۱
جدول۶-۶: LMP هاي حاصل از اجراي OPF براي تمام سطوح بار ($/MW) ۸۲
جدول۶-۷: حاشيه پايداري حاصل از OPF دو تابع هدفه ۸۴
جدول۶-۸: LMP هاي حاصل از اجراي VSC-OPF مرحله دوم براي تمام سطوح بار ($/MW). ۸۴
جدول۶-۹: ضرايب حساسيت براي شينهاي بار در تمام سطوح بار ۸۵
جدول۶-۱۰: اطلاعات بارهاي قطع پذير ۸۶
جدول۶-۱۱: قيمتهاي پيشنهادي بارهاي قطع پذير براي هر روز (سطح بار)($) ۸۶
جدول۶-۱۲: نتايج بازار بارهاي قطع پذير ۸۷
جدول۶-۱۳: حاشيه هاي واقعي سيستم براي هفته اول ۸۸
جدول۶-۱۴: نتايج بازار قطع بار با تابع هدف حداقل قطع بار ۸۸
جدول۶-۱۵: مقادير نهايي مصرف بارها با تابع هدف حداقل قطع بار (MW) ۸۹
جدول۶-۱۶: نتايج بازار با تابع هدف حداكثر افزايش حاشيه و تخفيف ۵ درصد ۹۰
جدول۶-۱۷: مقايسه نتايج چند شبيه سازي مختلف ۹۱
جدول۶-۱۸: نتايج OPF و بدترين پيشامد مربوط به هر سطح بار ۹۲
جدول۶-۱۹: LMP هاي حاصل از اجراي OPF براي تمام سطوح بار ($/MW) ۹۳
جدول۶-۲۰: حاشيه پايداري در حالت بروز پيشامدهاي سيستم براي روز ۳ و ۶ و ۷ ..... ۹۳
جدول۶-۲۱: مقادير λ^* به دست آمده از VSC-OPF دو تابع هدفه با ω = ۰/۷ ..... ۹۴
جدول۶-۲۲: LMP هاي حاصل از اجراي VSC-OPF مرحله دوم براي تمام سطوح بار($/MW) ۹۵
جدول۶-۲۳: ضرايب حساسيت براي شينهاي بار در تمام سطوح بار ۹۶
جدول۶-۲۴: اطلاعات بارهاي قطع پذير ۹۷
جدول۶-۲۵: قيمتهاي پيشنهادي بارهاي قطع پذير براي هر روز (سطح بار)($) ۹۷
جدول۶-۲۶: نتايج بازار با تابع هدف حداقل قطع بار و تخفيف صفر درصد ۹۸
جدول۶-۲۷: حاشيه هاي واقعي سيستم براي هفته اول ۹۹
جدول۶-۲۸: نتايج بازار با تابع هدف حداكثر افزايش حاشيه و تخفيف صفر درصد ۹۹
جدول۶-۲۹: مقايسه نتايج چند شبيه سازي مختلف ۱۰۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱ اهمیت و لزوم بررسی موضوع پایان‌نامه

در سالهای اخیر بر اثر فرایند جهانی تجدید ساختار و خصوصی‌سازی، صنعت برق با تحولات اساسی مواجه گشته که مدیریت سیستم‌های قدرت و بازارهای انرژی را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. در سیستم تجدید ساختار شده هدف بهره‌بردار مستقل شبکه (ISO[1]) حفظ تعادل تولید و مصرف با در نظر گرفتن بازده اقتصادی سیستم و محدودیتهای فنی شبکه می‌باشد.[۱] هدف عمومی بازیگران در چنین فضایی صرفاً افزایش سود می‌باشد.[۲] لذا مسئولیت ISO از نقطه نظر اقتصادی نیز می‌بایست بیشینه نمودن سود ژنراتورها و بارها به طور همزمان و یا اصطلاحاً بیشینه کردن رفاه اجتماعی بازیگران بازار باشد. از طرفی بهره‌بردار سیستم و بازیگران بازار به حداقل سطحی از کیفیت توان و امنیت شبکه نیازمند می‌باشند. به عنوان نمونه شبکه باید قادر به تأمین تعادل بار و مصرف، حفظ پایداری ولتاژ و نیز حفظ فرکانس شبکه در شرایط بروز حوادث یگانه باشد. لذا به مطالعه دقیق بر روی مسائل پایداری شبکه برای حفظ سطح مطلوب

[1] - Independent System Operator

پایداری در سیستم نیاز می‌باشد.[۱] لزوم توجه به دو هدف ذکر شده به طور همزمان، وظایف بهره‌بردار شبکه را پیچیده و دشوار نموده است. ماهیت مسأله‌ای که ISO با آن روبرو می‌باشد شامل یافتن اقتصادی-ترین نقطه کاریست که هیچ یک از قیدهای امنیتی سیستم را نقض ننماید. این امر باعث روی آوردن بسیاری از بهره‌برداران سیستمها به راه‌حلهایی از جنس بهینه‌سازی شده است. به طوریکه پخش بار بهینه (OPF) از مرسوم‌ترین ابزارها برای یافتن نقطه‌کار پاسخ بازار می‌باشد. اما لحاظ نمودن تمام نیازمندیهای امنیتی شبکه در داخل مسأله OPF به سادگی ممکن نیست. یکی از این مسایل پایداری ولتاژ می‌باشد. حفظ پایداری ولتاژ به عنوان یکی از شاخصهای مهم امنیت شبکه، جزو اساسی ترین مسئولیتهای ISO می‌باشد که با رشد روز افزون مصرف برق و نیز محدودیتهای اقتصادی و محیطی توسعه شبکه انتقال به مسأله دشوار و پیچیده‌ای تبدیل شده است. بطوریکه شبکه های برق در نقاط کار نزدیک به حداکثر بارگذاری بهره برداری شده و احتمال وقوع حوادث منجر به ناپایداری ولتاژ در آنها بیشتر می باشد. روشهایی که سعی دارند مسأله پایداری ولتاژ را در روابط پخش بار بهینه وارد نمایند، دو راهکار اساسی را دنبال می‌نمایند. دسته اول سعی در تولید قیدهای مناسب و درخور مسأله پایداری ولتاژ و افزودن آن به قیدهای OPF داشته و دسته دوم به یافتن ترم‌های مناسب جهت افزودن به تابع هدف مسأله OPF پرداخته‌اند. از طرفی هر چه قیدهای سنگین‌تر و بیشتری به مسأله پخش بار بهینه اضافه شود و یا تابع هدف از مفهوم اقتصادی صرف فاصله بگیرد، سهم ژنراتورهای گرانتر در بازار بیشتر شده لذا هزینه‌های تأمین توان شبکه بالاتر خواهد رفت. لذا دستیابی به راهکاری که با استفاده از آن ISO بتواند بدون نیاز به توسعه مسأله OPF به سطح مطلوب امنیت در شبکه دست بیابد برای شبکه فوائد بسیار در پی خواهد داشت که مهم‌ترین آنها کاهش هزینه تأمین توان در شبکه خواهد بود. استفاده از پتانسیلهای موجود در سمت مصرف‌کنندگان جهت نیل به اهداف بهره‌برداری از رویه‌های نوینی است که با پیدایش مفاهیم پاسخ بار در بازارهای برق رواج یافته است. نکات مهم در این زمینه اولاً تشویق مصرف‌کنندگان به شرکت در برنامه های پاسخ بار و ثانیاً مدیریت مشارکت طرف مصرف به صورت مناسب و هدفمند در جهت بهبود امنیت شبکه می‌باشند. مدلهای بسیاری برای مشارکت دادن مصرف کنندگان در بازار برق وجود دارند که یکی از آنها بارهای قطع‌پذیر میباشد. قراردادهای بارهای قطع پذیر در بسیاری از بازارهای برق جهان در حال اجرا می باشند. این قراردادها با اهداف مختلف از جمله تأمین رزرو بهره‌برداری مورد نیاز شبکه، حفظ امنیت شبکه در هنگام بروز پیشامدها و دیگر اهداف مرتبط با امنیت شبکه و نیز با مکانیزمهای متفاوت و متناسب با ساختار بازار برق هر کشور صورت می‌گیرند.[۳و۴] مدل ارائه شده در این پایان‌نامه، به صورت یک مدل میان مدت می‌باشد که در آن بارهای قطع پذیر اطلاعات مورد نیاز بازار قطع بار را در اختیار ISO قرار می‌دهند

و انتخاب مناسب ترین بارها جهت قطع، توسط ISO طی یک فرایند بهینه‌سازی و با هدف تأمین امنیت ولتاژی سیستم صورت می‌گیرد.

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده

همانطور که ذکر شد گروهی از روشهای پیشنهاد شده جهت تأمین نیازمندیهای امنیتی شبکه عموماً بر توسعه و اصلاح مسأله OPF تأکید نموده‌اند. دو رویه قابل بررسی در این گونه روشها یکی توسعه تابع هدف مسأله OPF و دیگری افزودن قیود مناسب به آن می‌باشد. مراجعی چون [۵] و [۶] صرفاً کارایی روشهای بهینه سازی غیر خطی را برای حل مسائل مرتبط با پایداری ولتاژ، از جمله بیشینه کردن حد بارگذاری سیستم نشان داده‌اند. در مرجع [۷] یک الگوریتم دو مرحله‌ای برای لحاظ نمودن پایداری ولتاژ در مسأله پخش بار بهینه پیشنهاد شده است. به طوریکه در مرحله اول، حد بارگذاری سیستم از درون یک مسأله پخش بار بهینه با تابع هدف توسعه یافته استخراج می‌شود و این مقدار در مرحله دوم به یک مسأله پخش بار بهینه با یک تابع هدف اقتصادی خالص اعمال می شود. در فصل دوم این پایان‌نامه بیشتر به این روش پرداخته خواهد شد. در مرجع [۸] سعی شده است با افزودن یک تابع ریسک به تابع هدف مسأله OPF و بدون تغییر در قیدهای مسأله، علاوه بر تعیین نقطه کار پاسخ بازار، هزینه پایداری ولتاژ را برای هر بار یا ژنراتور در LMP شینهای مربوط به هر کدام منعکس نماید. تابع ریسک اضافه شونده به تابع هدف از جنس واحد پول بوده و لذا LMP های حاصله به عنوان هزینه برق قابل استناد می‌باشند. با توجه به وابسته بودن ریسک سیستم به الگوی تولید ژنراتورها، برای چندین الگوی متفاوت تولید، ریسک فروپاشی ولتاژی بطور جداگانه محاسبه می‌شود و با منطبق نمودن یک تابع مناسب، ریسک سیستم را به صورت تابعی از میزان تولید هر ژنراتور استخراج کرده و این تابع را به عنوان جریمه[1] به تابع هدف اولیه اضافه می‌نمایند. احتمال وقوع فروپاشی ولتاژ در هر پیشامد با محاسبه یک تابع چگالی احتمال نرمال برای حاشیه سیستم و محاسبه احتمال منفی بودن آن محاسبه می‌شود. همانطور که مشخص است افزودن ترم جریمه به تابع هدف OPF باعث افزایش هزینه تأمین توان و دور شدن از بهینه‌ترین الگوی تولید خواهد شد. مرجع [۹] نیز روشهای مختلفی را که برای انجام یک مسأله پخش بار بهینه با جابجایی تولید توان اکتیو و در نظر گرفتن مسأله پایداری ولتاژ به کار رفته‌اند، مرور نموده است. مقالات دیگری نیز به بررسی ارزش امنیت ولتاژی سیستم و با راه‌حلهای غیر OPF محور پرداخته‌اند. به طور نمونه مرجع [۱۰] با استفاده از مفهوم ریسک، هزینه امنیت سیستم شامل امنیت ولتاژی را به سیگنالهای مناسب برای قیمت‌گذاری امنیت در هر شین تبدیل

[1] - Penalty Term

نموده است. مفهوم ریسک به صورت حاصلضرب احتمال وقوع هر حادثه در میزان خسارات ناشی از آن حادثه می‌باشد. حوادث به صورت خروج یگانه المانهای سیستم در نظر گرفته شده و خسارات ناشی از هر حادثه که می‌تواند به فروپاشی ولتاژ نیز منجر شود به سه دسته هزینه‌های قطع بار در صورت بروز، هزینه خرید از ژنراتورهای گرانتر و هزینه تعمیر تجهیزات آسیب دیده تقسیم گشته‌اند. سپس تابع ریسک سیستم بر حسب توان خالص مصرفی شینها (که ممکن است مثبت یا منفی باشد) استخراج شده و حساسیت این تابع به توان خالص مصرفی هر شین به عنوان هزینه امنیت در آن شین تعریف شده است.

اما استفاده از ظرفیت موجود در سمت مصرف کنندگان برای تأمین امنیت سیستم نیز به صورتهای مختلفی در مراجع مطرح شده است. در مرجع [۱۱] نویسنده روشی را برای بهبود پخش بار بهینه سیستم از نقطه نظر پایداری ولتاژ ارائه نموده است که بر پایه تغییر آرایش[1] توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها و بارها در شرایط عملکرد نرمال شبکه، و حداقل قطع بار در شرایط پیشامدها می باشد. اساس روش ذکر شده بر محاسبه ضرایب مشارکت برای ژنراتورها و بارها بوسیله آنالیز مودال می باشد. ضرایب مشارکت استفاده شده در این مرجع از مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم در نقطه کار بحرانی سیستم متناسب با بیشترین حد بارگذاری به دست می‌آیند. مزیت این روش این است که مقادیر ویژه در نزدیکی نقطه فروپاشی رفتار غیر خطی از خود نشان نمی‌دهند. با استفاده از ضرایب مشارکت به دست آمده یک تابع جریمه به تابع هدف OPF اضافه می‌شود که نقطه کار پاسخ را به سمت پایداری ولتاژ بیشتر سوق می‌دهد. همانطور که بیان شد نقطه ضعف عمومی این گونه روشها فاصله گرفتن پاسخ بازار از الگوی بهینه حاصل از OPF خالص می-باشد. در مرجع [۱۲] نویسنده اندیسهای ساده‌ای را برای بارها و ژنراتورها تعریف کرده است که بر اساس آنها میزان تمایل و نیز کارایی هر شرکت‌کننده برای بهبود امنیت شبکه تعیین می‌شود و بهره‌بردار مستقل سیستم قادر خواهد بود مؤثرترین ابزار را برای رفع قیود شبکه اتخاذ نماید. این اندیسها بر اساس سه معیار مقدار توان پیشنهادی بار برای قطع، میزان تأثیر بار مورد نظر در اندیسهای امنیت سیستم (که با استفاده از آنالیز حساسیت به دست می‌آیند) و نیز قیمت محلی هر بار تعریف شده و در محدوده یک تا صفر قرار می‌گیرند. مرجع [۱۳] برای رفع تراکم شبکه انتقال از مفهوم پاسخ بار استفاده نموده است. در این مرجع دو رویه تغییر آرایش تولید ژنراتورها و استفاده از برنامه‌های پاسخ بار اضطراری[2] برای رفع تراکم شبکه بررسی و از لحاظ بازدهی اقتصادی با هم مقایسه شده‌اند. برای بارها دو نوع الاستیسیته به صورت تغییر مصرف به ازای تغییر قیمت در همان ساعت و در سایر ساعات تعریف شده است. با این مفهوم مقدار نهایی و بهینه مصرف هر شین با توجه به اطلاعاتی چون مقدار مصرف اولیه آن شین، تغییرات قیمت برق در همه

[1] - Re-Dispatch
[2] - Emergency Demand Response Programs (EDRP)

ساعات، میزان الاستیسیته‌های مختلف بار نسبت به تغییر قیمت در هر کدام از ساعات شبانه‌روز و نیز مقدار مبلغ تشویقی جهت قطع بار مشخص شده‌است. بارها مقادیر تغییر مصرف خود را به عنوان پیشنهاد قطع به بازار عرضه می‌کنند و در نهایت با حل یک مسأله بهینه سازی مقادیر مورد نیاز تغییرات در تولید ژنراتورها و مصرف بارها با هدف حداقل نمودن هزینه رفع تراکم مشخص می‌گردند.

۱-۳ نحوه تنظیم پایان‌نامه:

فصل دوم این پایان نامه به معرفی پایداری ولتاژ به عنوان یک نیازمندی امنیتی سیستم پرداخته است. نحوه برخورد با مسأله پایداری ولتاژ با اعمال آنالیز پیشامدهای شبکه نیز در این فصل بررسی شده است. در فصل سوم انواع برنامه‌های پاسخ بار رایج در بازارهای برق توضیح داده شده و در مورد فواید استفاده از این برنامه‌ها و تأثیرات مثبت آن بر عملکرد شبکه بحث شده است. فصل چهارم این پایان نامه در مورد انواع روشهای قیمت‌گذاری برق بحث نموده و به قیمت‌گذاری نقطه‌ای به طور ویژه با بیان اثرات مطالعات پایداری ولتاژ در این نوع قیمت‌گذاری پرداخته است. فصل پنجم به توضیح روش پیشنهادی در این پایان-نامه برای تأمین امنیت ولتاژی سیستم با استفاده از پتانسیل سمت مصرف پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی روش مزبور بر روی شبکه نمونه و تحلیل نتایج به دست آمده نیز در فصل ششم ذکر شده است. در نهایت در فصل هفتم نتیجه‌گیری و پیشنهادات جهت ادامه مطالعات در آینده ارایه شده است.

فصل دوم

اهمیت پایداری ولتاژ و اثرات آن بر عملکرد سیستم قدرت

۲-۱ مقدمه

مدل‌های مختلفی برای اجرای بازار برق در کشورهای مختلف به کار می‌روند. اما گذشته از نوع مدل بازار مورد استفاده، برای بهره‌بردار هر سیستم قدرت، لزوم تعادل توان تولیدی با توان مصرفی قیدی است که نسبت به سایر قیود در اولویت قرار دارد. برای عملکرد سیستم قدرت در شرایط ایمن و قابل اطمینان، پارامترهای شبکه می‌بایست در محدوده مجاز قرار داشته باشند. این پارامترها شامل ولتاژ شینه‌ها، فلوی خطوط، توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها و ... می‌باشند. اگر چه از عبور پارامترهای ذکر شده از محدوده‌های مجاز می‌بایست اجتناب شود، اما در صورت بروز این امر شرایط اضطراری برای سیستم ترسیم نشده و شبکه دچار مشکل اساسی نخواهد شد. لذا برای اعمال محدوده‌های مزبور در هنگام یافتن نقطه کار پاسخ برای بازارهای برق، به سادگی از افزودن قیدهای متناظر به مسأله بهینه‌سازی حل بازار استفاده شده و کارایی مسأله مورد حل از نظر حجم محاسبات مورد نیاز و سرعت پاسخ از اهمیت بیشتری برخوردار می-باشد. [۱۴و۱۵] اما تراکم ایجاد شده در اثر قید پایداری ولتاژ که می‌تواند به سرعت برای سیستم به بروز پیامدهای شدید و مخرب منجر شود به این سادگی (اعمال قید مناسب) امکان‌پذیر نبوده و به علاوه در

محاسبات بازار برق رقابتی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. دشواریهای محیطی که همواره بر سر راه تقویت شبکه و احداث خطوط جدید در شبکه وجود داشته و دارد و هم‌چنین افزایش قابل توجه حجم مبادلات الکتریکی انجام شونده در بازارهای برق به همراه دشواریها و پیچیدگی‌های ذاتی محاسبات مربوط به پایداری ولتاژ باعث شده که حفظ سیستم در محدوده امن از منظر این نوع پدیده به یکی از مهم‌ترین مسئولیتهای بهره‌بردار سیستم و بازار تبدیل گردد. پدیده فروپاشی ولتاژ دارای مشخصات و پیامدهایی می-باشد که داشتن اطلاعاتی دقیق در مورد مقدار نزدیکی به نقطه مرزی فروپاشی را ضروری نشان می‌دهد. این پدیده که ماهیت ناگهانی و فاجعه آمیز دارد، اثرات ناگواری روی برخی نواحی شبکه و گاه سراسر شبکه باقی می‌گذارد و عموماً بر اثر بارگذاری سنگین روی سیستم و یا بروز خروجهایی که قابلیت انتقال توان در شبکه را کاهش می‌دهند روی می‌دهد. از این رو مطالعه این پدیده نیازمند مطالعات خروجهای اضطراری می‌باشد. پدیده ناپایداری ولتاژ را در افق زمانی از چند ثانیه تا چند ساعت و با مدلهای استاتیکی و نیز دینامیکی می‌توان بررسی نمود.[۱۶] در موضوعات مربوط به بازارهای برق نیز این پدیده را بیشتر در قالب پخش بار بهینه مورد بررسی قرار داده‌اند. آنچه در حین این پدیده روی می‌دهد به این صورت قابل شرح است که نقطه کار کنونی سیستم که نقطه کار پایداری می‌باشد، بر اثر افزایش بیش از حد بارگذاری یا تغییری ناگهانی که در قسمتی از سیستم رخ می‌دهد مانند خروج یکی از خطوط، ناگهان ناپدید یا گم می‌شود و تغییرات گذرای سیستم برای یافتن نقطه کار پایدار جدید به کاهش سریع و غیرقابل‌بازگشت ولتاژ می‌انجامد. مطالعه دقیق این پدیده نیازمند داشتن مدل تحلیلی دقیق و غیرخطی از سیستم می‌باشد که این نیاز با لزوم سرعت و کارایی محاسبات مورد نیاز برای یافتن پاسخ اقتصادی و در عین حال ایمن شبکه، در تقابل می‌باشد.[۱]

۲-۲ تعریف و طبقه‌بندی مفاهیم مرتبط با پایداری ولتاژ

۲-۲-۱ تعریف پایداری ولتاژ، ناپایداری ولتاژ و فروپاشی ولتاژ

پایداری سیستم قدرت طبق تعریف عبارتست از توانایی سیستم برای حفظ خود در نقطه تعادل در حالت عملکرد نرمال شبکه و نیز بازگشت به نقطه تعادل قابل قبول پس از بروز اختلال.[۱۷] مسأله پایداری می-تواند در ارتباط با زاویه روتور و حفظ سنکرونیزم آن با شبکه و یا در ارتباط با کنترل و پایداری ولتاژ تعریف گردد. در مرجع [۱۸] پایداری ولتاژ به این صورت تعریف شده است: "پایداری ولتاژ قابلیت سیستم برای حفظ ولتاژ در همه شینها در سطح قابل قبول در شرایط عملکرد نرمال و یا مواجهه با اختلال می‌باشد." سیستم قدرت دارای پایداری ولتاژ می‌باشد اگر مقدار ولتاژ پس از بروز اختلال به مقدار آن در

حالت نرمال شبکه بسیار نزدیک باشد. یک سیستم قدرت هنگامی ناپایدار می‌شود که ولتاژ شینها در اثر خروج تجهیزات سیستم (ژنراتورها، خطوط، ترانسفورماتورها، شینها و...)، افزایش بار، کاهش تولید و یا ضعف در کنترل ولتاژ، به صورت غیر قابل کنترل شروع به کاهش نماید. مرجع [۱۷] نیز علت ناپایداری ولتاژ را اینگونه بیان نموده است: "ناپایداری ولتاژ بر اثر تلاش سیستم برای تأمین توان مصرفی خارج از توانایی ترکیب سیستم انتقال و تولید موجود روی می‌دهد." مسأله کنترل ولتاژ و ناپایداری ولتاژ ماهیت محلی[۱] دارند، اما نتایج ناپایداری ولتاژ ممکن است در سطح وسیع نیز گسترش یابد. فروپاشی ولتاژ[۲] نتیجه فاجعه آمیز یک سلسله رویدادهاست که منجر به کاهش ناگهانی ولتاژ در بخش عمده‌ای از سیستم قدرت می‌گردد.

پایداری ولتاژ را می‌توان "پایداری بار" نیز نامید. چرا که سیستم قدرت قابلیت انتقال هر مقدار نامحدود توان از نقطه تولید به محل بارها را ندارد. دلیل اصلی ناپایداری ولتاژ عدم توانایی سیستم در تأمین توان راکتیو مورد نیاز بار جهت حفظ ولتاژ در شرایط بارگذاری سنگین سیستم می‌باشد. عوامل مؤثر دیگر در مسأله پایداری ولتاژ حدود توان راکتیو ژنراتورها، مشخصات بارها، مشخصات ابزارهای جبران‌ساز توان راکتیو و نیز عملکرد ابزارهای کنترل ولتاژ موجود در شبکه می‌باشند.[۱۷] ویژگیهای مرتبط با توان راکتیو در خطوط انتقال، ترانسفورماتورها و بارهای شبکه حداکثر توان قابل انتقال سیستم را محدود می‌نمایند. سیستم قدرت توانایی انتقال توان در طول مسافتهای دور یا از طریق خطوط راکتانس بالا، از یک مقدار معین توان یا مسافت به آنسو را بدلیل نیاز به مقدار بیش از اندازه توان راکتیو ندارد. به علت راکتانس بالای خطوط و متعاقباً تلفات بالای توان راکتیو، انتقال توان راکتیو در خطوط انتقال بسیار دشوار بوده و به همین دلیل توان راکتیو مورد نیاز برای حفظ ولتاژ در خود مناطق کنترل ولتاژ تولید و مصرف می‌شود.

۲-۲-۲ طبقه‌بندی پایداری سیستم قدرت

پایداری سیستم قدرت می‌تواند مرتبط با زاویه روتور[۳] و یا ولتاژ سیستم باشد. پایداری مرتبط با زاویه روتور خود شامل پایداری گذرا[۴] و اختلال کوچک[۵] می‌باشد. پایداری اختلال کوچک در ارتباط با میرایی نوسانات الکترومکانیکی سیستم در اثر بروز یک اختلال کوچک تعریف می‌گردد و پایداری گذرا بر اثر فقدان گشتاور سنکرون کننده در روتور ژنراتورها به وجود آمده و با یک اختلال بزرگ آغاز می-

[1] - Local
[2] - Voltage Collapse
[3] - Rotor Angle Stability
[4] - Transient Stability
[5] - Small-Signal Stability

گردد.[۱۸] برخی پایداریها در ارتباط با ژنراتورها و برخی دیگر در ارتباط با بار رخ می‌دهند. از نظر افق زمانی نیز می‌توان پایداریها را از دو منظر بلند مدت و کوتاه مدت بررسی نمود. جدول (۲-۱) مطالعات پایداری سیستم قدرت را از نظر افقهای زمانی و نیز عامل اصلی مرتبط با آنها دسته‌بندی نموده است.

جدول ۲-۱ : طبقه‌بندی مطالعات پایداری سیستم قدرت[۱۷]

<table>
<tr><th>افق زمانی</th><th colspan="2">ژنراتور محور</th><th colspan="2">بار محور</th></tr>
<tr><td rowspan="2">کوتاه مدت</td><td colspan="2">پایداری توان زاویه</td><td colspan="2" rowspan="2">پایداری ولتاژ کوتاه مدت</td></tr>
<tr><td>اختلال کوچک</td><td>گذرا</td></tr>
<tr><td rowspan="2">بلند مدت</td><td colspan="2" rowspan="2">پایداری فرکانس</td><td colspan="2">پایداری ولتاژ بلند مدت</td></tr>
<tr><td>اختلال کوچک</td><td>اختلال بزرگ</td></tr>
</table>

چهارچوب زمانی پایداری زاویه که به نوسانات الکترومکانیکی سیستم مربوط می‌شود کوتاه مدت (حدود چند ثانیه) می‌باشد. پایداری ولتاژ یک مسأله بار محور بوده و می‌تواند در ارتباط با افق زمانی تغییرات بار سیستم به صورت بلند مدت مورد مطالعه قرار گیرد. پایداری ولتاژ کوتاه مدت می‌بایست در ارتباط با اجزایی چون موتورهای القایی، ژنراتورهای سنکرون و لوازم کنترل الکترونیک قدرت مانند HVDC یا SVC و ... مورد مطالعه قرار بگیرد.[۱۷] مسأله پایداری ولتاژ از منظر افق کوتاه مدت بسیار شبیه به پایداری زاویه روتور می‌باشد. بیشتر فروپاشی‌های ولتاژ رویداده در عمل اثرات و شواهد هر دو ناپایداری ولتاژ و زاویه را داشته و امکان تمایز این دو را دشوار نموده‌اند. پس از اینکه سیستم تغییرات دینامیکی کوتاه‌مدت را طی نمود، تغییرات بلند مدت سیستم تا چند دقیقه ادامه پیدا می‌کند. در افق بلند مدت دو نوع پایداری فرکانس و ولتاژ قابل بررسی می‌باشد. ناپایداری فرکانس در اثر اختلال بزرگ در شبکه به وجود آمده و ممکن است منجر به جزیره‌ای شدن شبکه گردد.[۱۸] این نوع ناپایداری بر اثر عدم تعادل توان اکتیو در دو طرف تولید و مصرف روی می‌دهد. اما بررسی بلند مدت ناپایداری ولتاژ نیاز به مدل سازی دقیق از دینامیک بلندمدت سیستم دارد. پایداری ولتاژ از منظر بلند مدت با دستورالعمل‌هایی چون احیای بار بوسیله تپ ترانسها و اقدامات تأخیری و اصلاحی[1] چون وارد کردن جبرانسازهای شنت یا انجام قطع بار[2] مرتبط می‌باشد. دینامیک بلند مدت سایر المانهای سیستم مانند کنترل بویلر یا کنترل اتوماتیک ژنراتورها[3]، مطالعه پایداری ولتاژ بلند مدت را تحت تأثیر قرار می‌دهند. گاه برای تحلیل پایداری ولتاژ بهتر

[1] - Corrective
[2] - Load Shedding
[3] - Automatic Generation Control(AGC)