دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق-گرایش کنترل آقای محمد هاشمی

تحت عنوان:

استفاده از تخمین حالت برای حذف بار در جزیره ایزوله شده با وجود تولیدات پراکنده

در تاریخ ۱۳۹۱/۷/۱۵ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

۱- استاد راهنمای اول	آقای دکتر محمدحسین رمضانی
۲- استاد راهنمای دوم	آقای دکتر علیرضا یزدی‌زاده
۳- استاد داور	آقای دکتر محمدرضا آقامحمدی
۴- استاد داور مدعو	آقای دکتر حسین عسگریان ابیانه
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	آقای دکتر محمدحسین رمضانی

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد (مهندسی برق - کنترل)

استفاده از تخمین حالت برای حذف بار در جزیره ایزوله شده با وجود تولیدات پراکنده

تحقیق و تدوین:

محمد هاشمی

اساتید راهنما:

جناب آقای دکتر رمضانی، جناب آقای دکتر یزدی زاده

مهر ۱۳۹۱

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب "محمد هاشمی" تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل 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 پیش از این برای هیچ مدرک تحصیلی هم‌سطح، سطح پایین‌تر و یا بالاتری ارائه نشده و کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعت آب و برق و اینجانب می‌باشد.

نام و نام خانوادگی: محمد هاشمی

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری خداوند و پشتیبانی خانواده‌ام این دوره تحصیلی را به پایان رسانیده‌ام بر خود لازم می‌دانم کمال سپاس و قدردانی را از پدرم، مادرم و بقیه اعضای خانواده‌ام که مرا در رسیدن به این مرحله از زندگی یاری نمودند داشته باشم.

همچنین از زحمات تمام اساتید محترمی که در طول این دوره تحصیلی، بنده را مورد عنایت و راهنمایی خود قرار دادند، به خصوص اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر رمضانی و جناب آقای دکتر یزدی زاده که در طول انجام این پایان نامه راهنمای اینجانب بودند تشکر و قدردانی می نمایم.

چکیده:

فرکانس سیستم قدرت، به عنوان یکی از شاخص‌های اصلی در کیفیت انرژی الکتریکی و امنیت سیستم قدرت مطرح می‌باشد. حذف بار یک عمل کنترلی اضطراری برای جلوگیری از فروپاشی سیستم‌های قدرت در هنگام وقوع اغتشاش‌های بزرگ در سیستم است. به منظور بازگردانی پایداری سیستم قدرت بعد از اغتشاشات و جلوگیری از ناپایداری فرکانسی سیستم، طرح‌های حذف بار فرکانسی به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. در هنگام رخ دادن اغتشاش‌های بزرگ ممکن است قسمت‌هایی از شبکه جدا شده و بصورت جزیره‌های جدا از هم درآیند که بعضی از این جزایر الکتریکی شامل تولیدات پراکنده هستند. در اینصورت ایجاد تعادل توان در جزیره الکتریکی ایجاد شده به منظور حفظ پایداری فرکانسی آن، امری ضروری می‌باشد. نرخ تغییرات فرکانس (منحنی مشتق فرکانس) به دلیل تأثیرپذیری از ایجاد عدم تعادل توان اکتیو در سیستم، پارامتر مناسبی جهت بالا بردن تطبیق پذیری طرح حذف بار فرکانسی می‌باشد. از این رو در برخی از طرح‌های حذف بار ارائه شده توسط محققان، از منحنی مشتق فرکانس برای تخمین اندازه اغتشاش وارد شده به شبکه استفاده شده است.

در این پایان‌نامه، برای اولین بار از شبکه عصبی به منظور بالا بردن دقت و سرعت تخمین عدم تعادل توان بعد از ایزوله شدن جزیره الکتریکی استفاده شده است. همچنین تأثیر تغییرات تصادفی بار و نویز اندازه‌گیری بر روی منحنی مشتق فرکانس، توسط فیلتر کالمن تا حد خوبی فیلتر شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده حاکی از بهبود طرح حذف بار تطبیقی پیشنهادی می‌باشد.

کلیدواژه: تولیدات پراکنده، جزیره الکتریکی، فیلتر کالمن، حذف بار، شبکه عصبی

فهرست مطالب

فهرست مطالب ..... ب
فهرست شکل‌ها ..... ح
فهرست جدول‌ها ..... ک
فصل ۱- بررسی مبانی کنترل فرکانس در سیستم قدرت ۱
۱-۱- فرکانس در سیستم قدرت ۲
۱-۲- دینامیک سیستم قدرت ۳
۱-۳- دلائل لزوم تثبیت فرکانس در یک سیستم قدرت ۵
۱-۴- بررسی مدل رفتاری بار الکتریکی در سیستم‌های قدرت ۵
۱-۴-۱- مدلسازی وابستگی بارهای الکتریکی به فرکانس و ولتاژ با استفاده از مدل نمایی ۶
۱-۴-۲- مدلسازی وابستگی بارهای الکتریکی به فرکانس و ولتاژ با مدل کلاسیک (ZIP) ۷
۱-۴-۳- مدلسازی وابستگی بارهای الکتریکی به فرکانس و ولتاژ با استفاده از مدل ترکیبی ۸
۱-۵- کنترل فرکانس به واسطه‌ی کنترل تولید ۸
۱-۵-۱- کنترل اولیه فرکانس ۸
۱-۵-۲- کنترل ثانویه فرکانس ۹
۱-۵-۳- کنترل ذخیره توان دقیقه‌ای ۱۰
۱-۶- کنترل فرکانس به وسیله‌ی کنترل بار ۱۰
۱-۷- ساختار پایان‌نامه ۱۱
فصل ۲- حذف بار فرکانسی ۱۲
۲-۱- مقدمه ۱۳
۲-۲- روش‌های حذف بار فرکانسی ۱۴
۲-۲-۱- تعداد مراحل و اندازه‌ی گام‌های حذف بار ۱۵
۲-۲-۲- تعیین اولین سطح فرکانس حذف بار ۱۵
۲-۲-۳- رله‌های فرکانسی ۱۶
۲-۳- بررسی چند طرح مرسوم حذف بار ۱۷

۲-۳-۱- طرح حذف بار فرکانسی در شبکه‌ی برق آمریکای شمالی ۱۷

۲-۳-۲- طرح حذف بار فرکانسی در شبکه‌ی UCTE اروپا ۱۸

۲-۳-۳- طرح حذف بار فرکانسی در شبکه‌ی ایران بر اساس دستورالعمل توانیر ۱۹

۲-۴- ضرورت نیاز به حذف بار هوشمند ۱۹

۲-۵- معایب طرح‌های حذف بار موجود ۲۱

فصل ۳- الگوریتم طرح حذف بار تطبیقی پیشنهادی ۲۲

۳-۱- تغییرات فرکانس و پارامترهای مؤثر بر آن ۲۳

۳-۲- الگوریتم تخمین بزرگی اغتشاش (مقدار عدم تعادل توان) توسط مشتق فرکانس ۲۶

۳-۳- طرح حذف بار تطبیقی پیشنهادی ۳۰

۳-۳-۱- ملزومات طراحی برنامه حذف بار پیشنهادی ۳۰

۳-۳-۲- معرفی طرح حذف بار تطبیقی پیشنهادی ۳۲

۳-۴- مشکلات استفاده از شیب فرکانس چرخش روتور ژنراتورهای شبکه ۳۷

۳-۴-۱- محاسبه فرکانس معادل چرخش روتور ژنراتورهای شبکه ۳۷

۳-۴-۲- دقت اندازه‌گیری فرکانس چرخش روتور ژنراتور ۴۱

فصل ۴- استفاده از فیلتر کالمن برای تخمین فرکانس و مشتق فرکانس شبکه ۴۳

۴-۱- مقدمه ۴۴

۴-۲- فیلتر کالمن گسسته ۴۵

۴-۲-۱- فیلتر کالمن چیست؟ ۴۵

۴-۲-۲- فرآیندی که باید تخمین زده شود ۴۶

۴-۲-۳- اساس محاسباتی فیلتر ۴۷

۴-۲-۴- اساس احتمالاتی فیلتر ۴۸

۴-۲-۵- الگوریتم فیلتر کالمن گسسته ۴۹

۴-۲-۶- پارامترهای فیلتر کالمن و تنظیمات ۵۰

۴-۲-۷- معادلات حالت در نظر گرفته شده برای تخمین فرکانس و مشتق فرکانس ۵۱

۴-۳- استفاده از مشابه‌سازی مونت کارلو برای سنجش الگوریتم فیلتر کالمن ۵۳

۴-۳-۱- اصول مشابه‌سازی مونت کارلو ۵۳

۴-۳-۲- آنالیز عملکرد فیلتر کالمن در تخمین مشتق فرکانس ۵۴

فصل ۵- الگوریتم حذف بار تطبیقی برای جزیره‌های کوچک با وجود تولیدات پراکنده ۵۷

۵-۱- مقدمه ۵۸

۵-۲- مروری بر تولیدات پراکنده ۵۹

۵-۲-۱- تعریف تولیدات پراکنده ۵۹

۵-۲-۲- ظرفیت تولیدات پراکنده ۵۹

۵-۲-۳- تعریف تولیدات پراکنده در ایران ۶۰

۵-۲-۴- فناوری‌های تولید قابل استفاده بعنوان تولیدات پراکنده ۶۰

۵-۳- تفاوت‌های جزیره الکتریکی شامل تولیدات پراکنده ۶۳

۵-۴- استفاده از شبکه عصبی برای تخمین مقدار عدم تعادل توان ۶۴

۵-۴-۱- شبکه عصبی مصنوعی ۶۴

۵-۴-۲- تخمین مقدار عدم تعادل توان با استفاده از شبکه عصبی ۶۴

۵-۴-۳- مدل شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده ۶۵

فصل ۶- شبیه‌سازی ۶۷

۶-۱- کلیات شبیه‌سازی ۶۸

۶-۱-۱- معرفی نرم افزار شبیه‌سازی: PST (Power System Toolbox) V3.0 ..... ۶۸

۶-۱-۲- چگونگی مدلسازی بار در شبیه‌سازیها ۶۸

۶-۱-۳- مفروضات لحاظ شده در شبیه‌سازیها ۶۹

۶-۱-۴- نحوه ارزیابی طرح ۷۰

۶-۲- شبیه‌سازی بر روی شبکه نمونه ۹ باس IEEE ۷۲

۶-۲-۱- بررسی طرح حذف بار در هنگام خروج واحد ۱ ..... ۷۳

۶-۲-۲- بررسی طرح حذف بار در هنگام خروج واحد ۲ ..... ۷۵

۶-۲-۳- بررسی طرح حذف بار در هنگام خروج واحد ۳ ..... ۷۷

۶-۲-۴- مقایسه عملکرد دو طرح حذف بار UCTE و طرح حذف بار تطبیقی ۷۹

۶-۳- در نظر گرفتن شبکه ۹ باس IEEE بعنوان جزیره متصل به شبکه بالادست ۸۰

۶-۳-۱- آموزش شبکه عصبی به منظور تخمین عدم تعادل توان ۸۰

۶-۳-۲- جزیره‌ای شدن شبکه ۹ باس IEEE با وجود ۱۰۰ مگاوات کمبود توان ۸۲
۶-۳-۳- جزیره‌ای شدن شبکه ۹ باس IEEE با وجود ۱۵۰ مگاوات کمبود توان ۸۵
۶-۳-۴- جزیره‌ای شدن شبکه ۹ باس IEEE با وجود ۲۰۰ مگاوات کمبود توان ۸۸
۶-۳-۵- جزیره‌ای شدن شبکه ۹ باس IEEE با وجود ۲۵۰ مگاوات کمبود توان ۹۱
۶-۳-۶- جزیره‌ای شدن شبکه ۹ باس IEEE با وجود ۳۰۰ مگاوات کمبود توان ۹۴
۶-۳-۷- مقایسه عملکرد سه طرح حذف بار UCTE ، تطبیقی و تطبیقی با شبکه عصبی ۹۷
۶-۴- بررسی طرح‌های حذف بار بر روی جزیره الکتریکی شامل تولیدات پراکنده ۹۹
۶-۴-۱- معرفی ریز شبکه مورد بررسی ۹۹
۶-۴-۲- آموزش شبکه عصبی به منظور تخمین عدم تعادل توان ۱۰۰
۶-۴-۳- جزیره‌ای شدن ریزشبکه با وجود ۳ مگاوات کمبود توان ۱۰۱
۶-۴-۴- جزیره‌ای شدن ریزشبکه با وجود ۶ مگاوات کمبود توان ۱۰۴
۶-۴-۵- جزیره‌ای شدن ریزشبکه با وجود ۹ مگاوات کمبود توان ۱۰۷
۶-۴-۶- جزیره‌ای شدن ریزشبکه با وجود ۱۲ مگاوات کمبود توان ۱۱۰
۶-۴-۷- جزیره‌ای شدن ریزشبکه با وجود ۱۵ مگاوات کمبود توان ۱۱۲
۶-۴-۸- مقایسه عملکرد سه طرح حذف بار UCTE ، تطبیقی و تطبیقی با شبکه عصبی ۱۱۵
فصل ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۷
۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۸
۷-۲- پیشنهادات ۱۱۹
پیوست الف: نتایج تکمیلی شبیه‌سازی بر روی شبکه ۹ باس IEEE ۱۲۰
الف-۱- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار به روش مرسوم UCTE (خروج واحد ۱) ۱۲۱
الف-۲- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی(خروج واحد ۱) ۱۲۲
الف-۳- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار به روش مرسوم UCTE(خروج واحد ۲) ۱۲۳
الف-۴- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی(خروج واحد ۲) ۱۲۴
الف-۵- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار به روش مرسوم UCTE(خروج واحد ۳) ۱۲۵
الف-۶- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی(خروج واحد ۳) ۱۲۶
پیوست ب: نتایج تکمیلی شبیه‌سازی شبکه ۹ باس IEEE بصورت جزیره متصل به شبکه بالادست ۱۲۷

ب-۱- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار به روش مرسوم UCTE (۱۰۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۲۷
ب-۲- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی (۱۰۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۲۸
ب-۳- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی با استفاده از شبکه عصبی (۱۰۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۲۹
ب-۴- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار به روش مرسوم UCTE (۱۵۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۳۰
ب-۵- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی(۱۵۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۳۱
ب-۶- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی با استفاده از شبکه عصبی(۱۵۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۳۲
ب-۷- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار به روش مرسوم UCTE (۲۰۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۳۳
ب-۸- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی(۲۰۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۳۴
ب-۹- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی با استفاده از شبکه عصبی (۲۰۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۳۵
ب-۱۰- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار به روش مرسوم UCTE (۲۵۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۳۶
ب-۱۱- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی (۲۵۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۳۷
ب-۱۲- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی با استفاده از شبکه عصبی (۲۰۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۳۸
ب-۱۳- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار با روش مرسوم UCTE (۳۰۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۳۹
ب-۱۴- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی (۳۰۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۴۰
ب-۱۵- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی با استفاده از شبکه عصبی (۳۰۰ مگاوات کمبود توان)..... ۱۴۱
پیوست پ: نتایج تکمیلی شبیه‌سازی **بر روی** جزیره الکتریکی شامل تولیدات پراکنده..... ۱۴۲
پ-۱- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار با روش مرسوم UCTE (۳ مگاوات کمبود توان)..... ۱۴۲
پ-۲- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی (۳ مگاوات کمبود توان)..... ۱۴۳
پ-۳- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی با شبکه عصبی (۳ مگاوات کمبود توان)..... ۱۴۴
پ-۴- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار با روش مرسوم UCTE (۶ مگاوات کمبود توان)..... ۱۴۵
پ-۵- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی (۶ مگاوات کمبود توان)..... ۱۴۶
پ-۶- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی با شبکه عصبی (۶ مگاوات کمبود توان)..... ۱۴۷
پ-۷- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار با روش مرسوم UCTE (۹ مگاوات کمبود توان)..... ۱۴۸
پ-۸- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی (۹ مگاوات کمبود توان)..... ۱۴۹
پ-۹- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی با شبکه عصبی (۹ مگاوات کمبود توان)..... ۱۵۰
پ-۱۰- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی (۱۲ مگاوات کمبود توان)..... ۱۵۱

پ-۱۱- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی با شبکه عصبی (۱۲ مگاوات کمبود توان) ۱۵۲
پ-۱۲- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی (۱۵ مگاوات کمبود توان) ۱۵۳
پ-۱۳- نتایج شبیه‌سازی اجرای طرح حذف بار تطبیقی با شبکه عصبی (۱۵ مگاوات کمبود توان) ۱۵۴
فهرست مراجع ۱۵۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: ترازوی فرکانسی در حالت برابری تولید و مصرف (ثبوت فرکانس) ۲
شکل ۱-۲: تقابل گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی در توربین و ژنراتور ۳
شکل ۲-۱: فرکانس یک سیستم در نتیجه‌ی از دست رفتن ۲۷ درصد توان تولیدی ۲۰
شکل ۲-۲: نمودار شیب فرکانس یک سیستم در نتیجه‌ی از دست رفتن ۲۷ درصد توان تولیدی ۲۰
شکل ۳-۱: تأثیر عدم تعادل توان و اینرسی سیستم بر شیب اولیه فرکانس ۲۴
شکل ۳-۲: پارامترهای تأثیرگذار روی عدم تعادل توان اکتیو سیستم ۲۵
شکل ۳-۳: تأثیر بار شبکه و عدم تعادل بر روی مشتق فرکانس ۲۹
شکل ۳-۴:شمای کلی طرح حذف بار تطبیقی پیشنهادی ۳۶
شکل ۳-۵: فرکانس و شیب فرکانس در طی وقوع یک اغتشاش ۳۸
شکل ۳-۶: شبکه نمونه ۹ باس IEEE ۳۹
شکل ۳-۷: فرکانس چرخش روتور ژنراتورهای ۱ و ۲ بعد از خروج واحد ۳ ۳۹
شکل ۳-۸: شیب فرکانس چرخش روتور ژنراتورهای ۱ و ۲ بعد از خروج واحد۳ ۳۹
شکل ۳-۹: فرکانس معادل ژنراتورهای شبکه بعد از خروج واحد ۳ ۴۰
شکل ۳-۱۰: مشتق فرکانس معادل ژنراتورهای شبکه بعد از خروج واحد ۳ ۴۱
شکل ۳-۱۱: پاسخ فرکانسی یک سیستم واقعی در حالت کار پایدار ۴۱
شکل ۴-۱: چگونگی کاربرد فیلتر کالمن در تخمین حالت سیستم ۴۶
شکل ۴-۲: سیکل کامل عملکرد فیلتر کالمن گسسته ۵۰
شکل ۴-۳: تأثیر فیلتر کالمن در کاهش خطای تخمین عدم تعادل با وجود نویز ۵۵
شکل ۴-۴: منحنی مشتق فرکانس واحد ۱ شبکه بدون نویز، در حضور نویز و فیلتر شده ۵۶
شکل ۵-۱: ساختار شبکه عصبی رو به جلو با قاعده یادگیری پس انتشار خطا ۶۶
شکل ۵-۲: ساختار پرسپترون تنها ۶۶
شکل ۵-۳: توابع تبدیل استفاده شده در مدل شبکه عصبی ۶۶
شکل ۶-۱: مدل توربین-گاورنر استفاده شده در شبیه‌سازی ۶۹
شکل ۶-۲: شبکه نمونه ۹ باس IEEE ۷۲

شکل ۶-۳: فرکانس معادل شبکه بعد از خروج واحد ۱ و حذف بار UCTE ۷۳
شکل ۶-۴: فرکانس معادل شبکه بعد از خروج واحد ۱ و حذف بار تطبیقی ۷۴
شکل ۶-۵: فرکانس معادل شبکه بعد از خروج واحد ۲ و حذف بار UCTE ۷۵
شکل ۶-۶: فرکانس معادل شبکه بعد از خروج واحد ۲ و حذف بار تطبیقی ۷۶
شکل ۶-۷: فرکانس معادل شبکه بعد از خروج واحد ۳ و حذف بار UCTE ۷۷
شکل ۶-۸: فرکانس معادل شبکه بعد از خروج واحد ۳ و حذف بار تطبیقی ۷۸
شکل ۶-۹: شبکه نمونه ۹ باس IEEE بعنوان جزیره متصل به شبکه بالادست ۸۰
شکل ۶-۱۰: ساختار شبکه عصبی استفاده شده برای تخمین عدم تعادل توان شبکه ۹ باس IEEE ۸۱
شکل ۶-۱۱: نمودار رگرسیون دیتای آموزش شبکه عصبی ۸۱
شکل ۶-۱۲: فرکانس معادل شبکه (۱۰۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار UCTE) ۸۲
شکل ۶-۱۳: فرکانس معادل شبکه (۱۰۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی) ۸۳
شکل ۶-۱۴: فرکانس معادل شبکه (۱۰۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی- عصبی) ۸۴
شکل ۶-۱۵: فرکانس معادل شبکه (۱۵۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار UCTE) ۸۵
شکل ۶-۱۶: فرکانس معادل شبکه (۱۵۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی) ۸۶
شکل ۶-۱۷: فرکانس معادل شبکه (۱۵۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی- عصبی) ۸۷
شکل ۶-۱۸: فرکانس معادل شبکه (۲۰۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار UCTE) ۸۸
شکل ۶-۱۹: فرکانس معادل شبکه (۲۰۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی) ۸۹
شکل ۶-۲۰: فرکانس معادل شبکه (۲۰۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی-عصبی) ۹۰
شکل ۶-۲۱: فرکانس معادل شبکه (۲۵۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار UCTE) ۹۱
شکل ۶-۲۲: فرکانس معادل شبکه (۲۵۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی) ۹۲
شکل ۶-۲۳: فرکانس معادل شبکه (۲۵۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی-عصبی) ۹۳
شکل ۶-۲۴: فرکانس معادل شبکه (۳۰۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار UCTE) ۹۴
شکل ۶-۲۵: فرکانس معادل شبکه (۳۰۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی) ۹۵
شکل ۶-۲۶: فرکانس معادل شبکه (۳۰۰ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی-عصبی) ۹۶
شکل ۶-۲۷: جزیره الکتریکی مورد بررسی با وجود تولیدات پراکنده ۹۹
شکل ۶-۲۸: ساختار شبکه عصبی استفاده شده برای تخمین عدم تعادل توان ریز شبکه ۱۰۰

شکل ۶-۲۹: نمودار رگرسیون دیتای آموزشی شبکه عصبی ۱۰۰
شکل ۶-۳۰: فرکانس معادل ریزشبکه (۳ مگاوات اغتشاش و حذف بار UCTE) ۱۰۱
شکل ۶-۳۱: فرکانس معادل ریزشبکه (۳ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی) ۱۰۲
شکل ۶-۳۲: فرکانس معادل ریزشبکه (۳ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی-عصبی) ۱۰۳
شکل ۶-۳۳: فرکانس معادل ریزشبکه (۶ مگاوات اغتشاش و حذف بار UCTE) ۱۰۴
شکل ۶-۳۴: فرکانس معادل ریزشبکه (۶ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی) ۱۰۵
شکل ۶-۳۵: فرکانس معادل ریزشبکه (۶ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی-عصبی) ۱۰۶
شکل ۶-۳۶: فرکانس معادل ریزشبکه (۹ مگاوات اغتشاش و حذف بار UCTE) ۱۰۷
شکل ۶-۳۷: فرکانس معادل ریزشبکه (۹ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی) ۱۰۸
شکل ۶-۳۸: فرکانس معادل ریزشبکه (۹ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی-عصبی) ۱۰۹
شکل ۶-۳۹: فرکانس معادل ریزشبکه (۱۲ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی) ۱۱۰
شکل ۶-۴۰: فرکانس معادل ریزشبکه (۱۲ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی-عصبی) ۱۱۱
شکل ۶-۴۱: فرکانس معادل ریزشبکه (۱۵ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی) ۱۱۲
شکل ۶-۴۲: فرکانس معادل ریزشبکه (۱۵ مگاوات اغتشاش و حذف بار تطبیقی-عصبی) ۱۱۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱: نمونه طرح حذف بار پله‌ای در شبکه‌های تحت نظر WECC ۱۸
جدول ۲-۲: طرح حذف بار UCTE اروپا ۱۸
جدول ۲-۳: طرح حذف بار شبکه ایران ۱۹
جدول ۳-۱: سطوح فرکانس عملکرد طرح حذف بار پیشنهادی ۳۳
جدول ۳-۲: جدول نهایی طرح حذف بار تطبیقی پیشنهادی ۳۵
جدول ۴-۱: معادلات بهنگام‌سازی زمانی فیلتر کالمن گسسته ۴۹
جدول ۴-۲: معادلات بهنگام‌سازی مقادیر فیلتر کالمن گسسته ۴۹
جدول ۵-۱: تقسیم‌بندی تولیدات پراکنده بر اساس ظرفیت تولید ۶۰
جدول ۵-۲: برخی از انواع مختلف فناوری‌های قابل استفاده بعنوان تولیدات پراکنده ۶۲
جدول ۶-۱: ضرایب وابستگی بار در شبیه‌سازی انجام شده ۶۹
جدول ۶-۲: مشخصات مدل گاورنر استفاده شده در شبیه‌سازی ۷۰
جدول ۶-۳: طرح حذف بار UCTE ۷۱
جدول ۶-۴: خلاصه نتایج عملکرد طرح حذف بار UCTE و حذف بار تطبیقی در شبکه ۹ باس IEEE ۷۹
جدول ۶-۵:خلاصه نتایج عملکرد طرح‌های حذف بار در برابر اغتشاشات مختلف ۹۷
جدول ۶-۶: خلاصه نتایج عملکرد طرح‌های حذف بار در برابر اغتشاشات مختلف وارده به ریزشبکه ۱۱۵

فصل ۱

بررسی مبانی کنترل فرکانس در سیستم قدرت

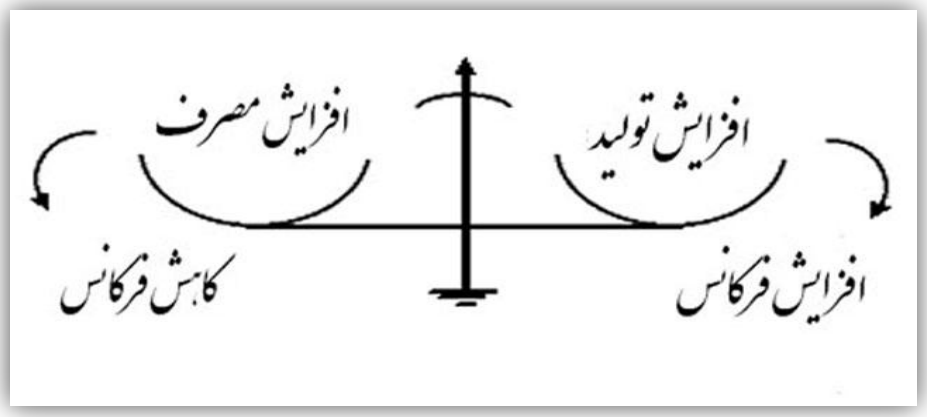
۱–۱– فرکانس در سیستم قدرت

فرکانس یک سیستم قدرت از پارامترهای تأثیرگذار در توان تحویلی به مصرف‌کننده و امنیت سیستم می‌باشد. برای این دیدگاه دلایلی وجود دارد از جمله:

دلیل اول اینکه فرکانس در یک شبکه‌ی به هم پیوسته کمیتی سراسری است و در تمام نقاط مقدار یکسانی دارد.

دلیل دوم وابستگی بارهای مصرفی به فرکانس است. تغییر فرکانس از مقدار نامی، موجب کاهش راندمان و گاه حتی صدمه به تجهیزات تولید و مصرف می‌گردد.

دلیل سوم اینکه فرکانس یک سیستم قدرت نشان‌دهنده‌ی تعادل یا عدم تعادل بین تولید و مصرف توان الکتریکی است. چگونگی این تأثیر با ترازوی فرکانسی نشان داده می‌شود (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱: ترازوی فرکانسی در حالت برابری تولید و مصرف (ثبوت فرکانس)

همانگونه که در شکل مشخص است با تغییر در توان تولیدی یا مصرفی، فرکانس تغییر می‌کند؛ بدین صورت که با افزایش تولید نسبت به مصرف، فرکانس افزایش یافته و با افزایش مصرف نسبت به تولید، فرکانس کاهش می‌یابد. بنا به دلایل مطرح شده در بالا، فرکانس از شاخص‌های مهم یک سیستم قدرت می‌باشد و کنترل آن نیازمند برنامه ریزی و بهره‌برداری دقیق می‌باشد.

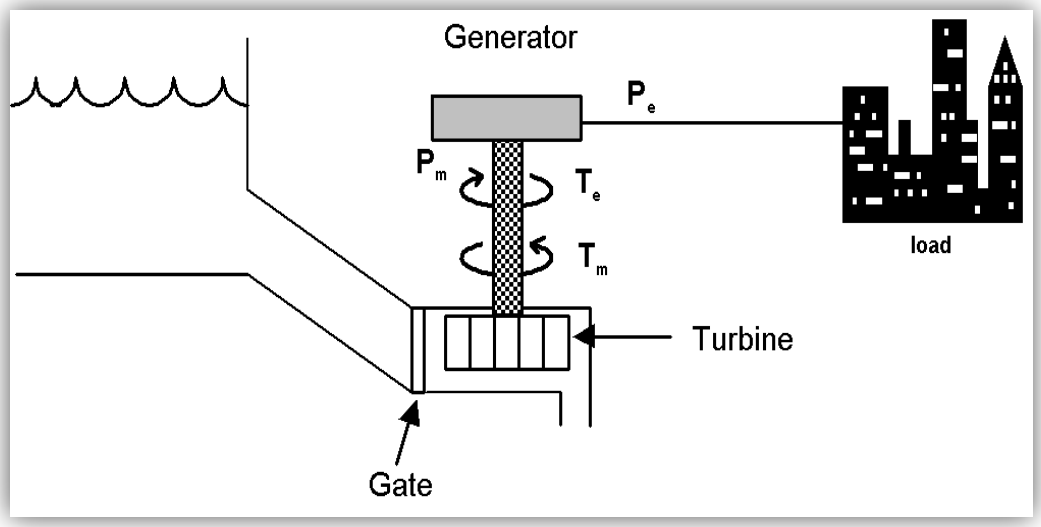
به علت ماهیت تغییرپذیر بار، بهره بردار سیستم قدرت باید همواره سعی در حفظ تساوی تولید و مصرف و تأمین مداوم بار داشته باشد و این چیزی جز هدف بنیادین شبکه‌های قدرت نیست. بنابراین برای نیل به این هدف، کنترل فرکانس اهمیت می‌یابد.

گاه در اثر اغتشاشات رخ داده در شبکه اعم از قطع خطوط ارتباطی یا خارج شدن واحدهای نیروگاهی از شبکه، توازن تولید و مصرف به هم می‌خورد و در نتیجه فرکانس شروع به کاهش می‌کند. اگر در این شرایط عملی در جهت کنترل فرکانس و بازگشت آن به محدوده مجاز صورت نگیرد، ممکن است شبکه به سمت

خاموشی سراسری[1] پیش برود. در چنین شرایطی قطع قسمتی از بار، می‌تواند تنها راه جلوگیری از فروپاشی شبکه‌ی قدرت و ضررهای فراوان ناشی از آن باشد. در ادامه به تفضیل در این مورد بحث خواهد شد.

۱-۲- دینامیک سیستم قدرت

یک سیستم قدرت الکتریکی شبیه به یک سیستم مکانیکی چرخشی عمل می‌کند. شکل ۱-۲ یک سیستم قدرت ساده‌شده را نشان می‌دهد. توان مکانیکی توسط آب یا بخار یا منابع دیگر انرژی تولید شده و باعث ایجاد گشتاور مکانیکی (T_{mech}) روی شفت متصل کننده توربین به ژنراتور می‌شود و ژنراتور توان مکانیکی را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. بار متصل به ژنراتور باعث ایجاد یک گشتاور الکتریکی (T_{elec}) روی شفت می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است تغییر در تقاضای بار و یا تغییر در تولید باعث ایجاد نوسان در سرعت چرخش توربین و ژنراتور و در نتیجه نوسان فرکانس سیستم قدرت می‌شود[۱].



شکل ۱-۲: تقابل گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی در توربین و ژنراتور

اختلاف بین گشتاور مکانیکی و گشتاور الکتریکی، یک گشتاور شتاب‌دهنده (که عامل اصلی تغییر فرکانس سیستم یا همان سرعت چرخش روتور ژنراتور است) بصورت زیر ایجاد می‌کند:

$$T_a = T_{mech} - T_{elec} \qquad (۱-۱)$$

T_{mech}: گشتاور وارد بر روتور ژنراتور حاصل از نیروی مکانیکی

T_{elec}: گشتاور وارد بر روتور ژنراتور حاصل از بار الکتریکی

[1] Blackout

T_a: گشتاور شتاب دهنده وارد بر روتور ژنراتور

با استفاده از معادلات حرکت در ژنراتور در نهایت به رابطه زیر می‌رسیم:

$$P_{mech} - P_{elec} = J\frac{\partial \omega}{\partial t} \qquad (۲-۱)$$

P_{mech}: توان مکانیکی

P_{elec}: توان الکتریکی

J: ممان اینرسی $(kg\text{-}m^2)$

ω: سرعت زاویه‌ای (rad/s^2)

طبق رابطه‌ی (۱-۲)، هرگونه تغییر در توان مکانیکی یا الکتریکی موجب تغییر در فرکانس سیستم می‌گردد. این همان موضوعی است که پیشتر از آن به عنوان ترازوی فرکانسی یاد کردیم. به دلیل ماهیت متغیر بار، برای حفظ تعادل این ترازو نیاز به کنترل مداوم تولید در جهت تأمین بار مصرفی داریم که این موضوع به عنوان کنترل فرکانس شناخته می‌شود[۱].

فرکانس یک سیستم قدرت باید همواره در محدوده مجاز بهره‌برداری نگاه داشته شود. این محدوده‌ی مجاز برای شبکه‌های مختلف بسته به فرکانس نامی شبکه و پارامترهای تأثیرگذار دیگر متفاوت است. به طور مثال شبکه برق اروپا[1] محدوده‌ی مجاز فرکانس بهره‌برداری از سیستم قدرت را بین ۴۹/۷۵ و ۵۰/۲۵ هرتز تعیین کرده است[۲].

کنترل فرکانس در سیستم‌های مدرن نقش بسیار مهمی را از دو منظر زیر ایفا می‌کند:

۱- کیفیت انرژی ارائه شده به مصرف کننده، ۲- پایداری و امنیت سیستم از دید بهره‌برداری

در واقع خروج فرکانس از محدوده مجاز بهره‌برداری موجب ناپایداری سیستم قدرت می‌شود.

در این فصل ابتدا دلائل لزوم تثبیت فرکانس در یک سیستم قدرت بررسی شده و سپس به دلیل تأثیرگذاری متقابل رفتار بار و فرکانس بر یکدیگر، به طور خلاصه در مورد روش‌های مدل کردن بارهای اکتیو و راکتیو نسبت به تغییرات فرکانس و ولتاژ توضیحاتی داده خواهد شد. در ادامه روش فعلی کنترل فرکانس در شبکه اروپا به عنوان یکی از روش‌های مرسوم کنترل فرکانس بررسی شده و در انتها حذف بار به عنوان آخرین راه جلوگیری از فروپاشی یک سیستم قدرت معرفی می‌گردد.

[1] UCTE