بسم الله الرحمن الرحيم

پردیس بین المللی ارس
گروه مهندسی برق-قدرت

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته ی مهندسی برق گرایش قدرت

عنوان

DVR مبتنی بر SMES با استفاده از اینورتر چند سطحی

استاد راهنما

دکتر مهران صباحی

استاد مشاور

دکتر محمد فرهادی کنگرلو

پژوهشگر

رامین باویل سفلایی

دی ۱۳۹۳

نام خانوادگی:باویل سفلائی **نام:**رامین

عنوان پایان نامه: DVR مبتنی بر SMES با استفاده از اینورتر چند سطحی

استاد راهنما:دکتر مهران صباحی

استاد مشاور:دکتر محمد فرهادی کنگرلو

مقطع تحصیلی:کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق-قدرت **گرایش:**الکترونیک قدرت و سیستم

دانشگاه:تبریز **دانشکده:** پردیس **تاریخ فارغ التحصیلی:** دی ۱۳۹۳ **تعداد صفحه:**۹۰

کلید واژه ها:بازیاب دینامیکی ولتاژ،ذخیره کننده انرژی مغناطیسی ابررسانا،اینورتر چند سطحی، کمبود ولتاژ، بیشبود ولتاژ

چکیده

امروزه اهمیت کیفیت توان به دلیل گسترش استفاده از تجهیزات حساس به کیفیت توان و ضررهای اقتصادی و فنی ناشی از پایین بودن کیفیت توان بر کسی پوشیده نیست. برای مشترکین و مصرف کنندگان برق که دارای تجهزات حساس هستند، کیفیت ولتاژ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در بین عوامل کیفیت توان مرتبط با ولتاژ نیز دو پدیده کمبود ولتاژ و بیشبود ولتاژ از همه مهمتر هستند. برای جبران این دو پدیده مرتبط با کیفیت ولتاژ بازیاب دینامیکی ولتاژ مناسب‌ترین وسیله است. DVR عبارت است از یک اینورتر که از یک منبع DC تغذیه شده و به صورت سری به شبکه متصل می‌شود. ساختارهای مختلف اینورترها در DVR استفاده می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به اینورترهای چند سطحی اشاره کرد. مسئله مهم دیگر که در DVR وجود دارد نحوه ذخیره‌سازی و یا فراهم نمودن انرژی مورد نیاز برای جبران‌سازی می‌باشد. از این نقطه نظر DVR می‌تواند دارای ذخیره‌کننده انرژی باشد و یا انرژی مورد نیاز خود را از شبکه تامین نماید (بدون ذخیره‌کننده انرژی). ساختارهای دارای ذخیره‌کننده انرژی معمولاً گرانتر ولی در عوض دارای کارآیی بالاتری می‌باشند. یکی از تجهیزات ذخیره‌کننده انرژی، ذخیره‌کننده انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES) می‌باشد که دارای چگالی انرژی زیاد می‌باشد.

در این پایان‌نامه، با ارائه DVR مبتنی بر SMES با ساختار اینورتر چند سطحی CHB است که پل‌های H آن توسط ترانسفورماتور، با هم سری شده و امکان استفاده از لینک DC ، SMES و چاپر مشترک را فراهم می‌نماید. DVR ارائه شده در این پایان‌نامه دارای دو مد عملکرد مهم می‌باشد که یکی مد انتظار (standby) و دیگری مد جبران‌سازی می‌باشد. چاپر استفاده شده بین SMES و لینک DC در مد انتظار وظیفه شارژ SMES و در مد جبران‌سازی وظیفه کنترل ولتاژ لینک DC را برعهده دارد. اینورتر نیز در مد انتظار وظیفه کنترل ولتاژ لینک DC و در مد جبران‌سازی وظیفه جبران ولتاژ شبکه را برعهده دارد. نحوه کنترل اینورتر و چاپر در هر یک از این مدهای عملکرد تشریح شده و میزان جبران‌سازی DVR نیز محاسبه می‌شود. DVR مبتنی بر اینورتر ۵ سطحی با استفاده از SMES در نرم‌افزار PSCAD شبیه‌سازی شده که نتایج نشان می‌دهد DVR ارائه شده در این پایان‌نامه می‌تواند کمبود و بیشبود ولتاژ سه فاز (متقارن) و تکفاز (نامتقارن) را به خوبی جبران کند.

فهرست مطالب

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- کیفیت توان ۱

۱-۳- روش‌های بهبود کیفیت توان ۷

۱-۳-۱- ادوات موازی ۸

۱-۳-۱-۱- جبران کننده توان راکتیو استاتیک (SVC) ۸

۱-۳-۱-۲- فیلتر اکتیو موازی ۹

۱-۳-۱-۳- DSTATCOM: ۱۰

۱-۳-۲- ادوات سری ۱۱

۱-۳-۲-۱- فیلتر اکتیو سری ۱۱

۱-۳-۲-۲- بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) ۱۲

۱-۳-۲- ادوات سری-موازی ۱۲

۱-۳-۳- سایر ادوات بهبود کیفیت توان ۱۳

۱-۳-۳-۱- تپ چنجرهای استاتیکی ۱۳

۱-۳-۳-۲- کلیدهای استاتیکی تغییر حالت (STS) ۱۴

۱-۳-۳- بازیاب دینامیکی ولتاژ ۱۵

۱-۳-۳-۱- ساختارهای مداری DVR ۱۶

۱-۳-۳-۱-۱- ساختارهای بدون المان ذخیره کننده انرژی ۱۶

۱-۳-۳-۱-۲- ساختارهای با المان ذخیره کننده انرژی ۱۷

۱-۳-۳-۲- روش‌های کلی جبران‌سازی ۲۲

۱-۳-۳-۲-۱- جبران‌سازی قبل از کم‌بود (pre-sag) ۲۲

۱-۳-۳-۲-۲- جبران‌سازی هم فاز (in-phase) ۲۳

۱-۳-۳-۲-۳- جبران‌سازی با انرژی بهینه (energy optimized) ۲۴

۱-۴- ذخیره‌کننده انرژی مغناطیسی ابرسانا (SMES) ۲۵

۱-۴-۱- ویژگی‌ها و کاربردها ۲۵
۱-۴-۲- اجزای سیستم SMES ۲۸
۱-۵- DVR مبتنی بر SMES ۳۱
۱-۶- ساختارهای اخیر ارائه شده برای DVR ۳۶
۲-۱- مقدمه ۴۵
۲-۲- DVR مبتنی بر اینورتر چند سطحی با استفاده از SMES ۴۵
۲-۲-۱- عملکرد و کنترل چاپر ۴۶
۲-۲-۲- عملکرد و کنترل اینورتر ۵۹
۲-۲-۱-۱- عملکرد اینورتر در حالت عادی شبکه (حالت انتظار) ۵۹
۲-۲-۱-۲- عملکرد اینورتر در حالت جبران‌سازی ۶۱
۲-۳- سیستم کنترلی کلی DVR ۶۳
۲-۴- محاسبه مقدار جبران‌سازی ۶۳
۳-۱- مقدمه ۶۸
۳-۲- سیستم شبیه‌سازی شده ۶۸
۳-۳- نتایج شبیه‌سازی ۶۹
۳-۳-۱- کمبود ولتاژ ۷۰
۳-۳-۱-۱- کمبود ولتاژ سه فاز ۷۰
۳-۳-۱-۲- کمبود ولتاژ تکفاز ۷۳
۳-۳-۲- بیشبود ولتاژ ۷۷
۳-۳-۲-۱- بیشبود ولتاژ سه فاز ۷۷
۳-۳-۲-۲- بیشبود ولتاژ تکفاز ۷۹
نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۱
مراجع ۸۲

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱): منحنی ITI برای نشان دادن ناحیه قابل تحمل تغییرات ولتاژ برای تجهیزات ۶

شکل (۱-۲): انواع مختلف کمبود ولتاژ ۷

شکل (۱-۳): مدار قدرت یک SVC ۹

شکل (۱-۴): ساختار یک فیلتر اکتیو موازی ۱۰

شکل (۱-۵): عمل‌کرد فیلتر اکتیو موازی برای جبران هارمونیک‌های جریان ۱۰

شکل (۱-۶): ساختار یک فیلتر اکتیو سری ۱۱

شکل (۱-۷): عمل‌کرد فیلتر اکتیو سری در جبران هارمونیک ولتاژ ۱۲

شکل (۱-۸): مدار قدرت یک UPQC ۱۳

شکل (۱-۹): (الف) یک نمونه از تپ چنجر استاتیکی، (ب) کلیدهای دوطرفه ۱۴

شکل (۱-۱۰): (الف) شکل شماتیک STS، (ب) جزئیات مداری STS ۱۵

شکل (۱-۱۱): شکل شماتیک DVR ۱۵

شکل (۱-۱۲): DVR بدون ذخیره‌کننده انرژی وصل شده به طرف منبع (ساختار ۱) ۱۷

شکل (۱-۱۳): DVR بدون ذخیره‌کننده انرژی وصل شده به طرف بار (ساختار ۲) ۱۷

شکل (۱-۱۴): DVR مبتنی بر خازن شارژ شونده از شبکه (ساختار ۳) ۱۸

شکل (۱-۱۵): DVR با ذخیره‌کننده خارجی انرژی متصل به لینک dc (ساختار ۴) ۱۸

شکل (۱-۱۶): دیاگرام فازوری روش pre-sag ۲۳

شکل (۱-۱۷): دیاگرام فازوری روش هم فاز ۲۴

شکل (۱-۱۸): دیاگرام فازوری روش energy optimized ۲۵

شکل (۱-۱۹): اجزای یک سیستم SMES نوعی ۲۹

شکل (۱-۲۰): یک سیستم حاوی ترکیبی از SMES و FACTS ۳۱

شکل (۱-۲۱): DVR مبتنی بر SMES ۳۳

شکل (۱-۲۲): عملکرد DVR مبتنی بر SMES، (الف) ولتاژ شبکه، (ب) ولتاژ بار، (ج) ولتاژ DVR، (د) ولتاژ لینک DC، (ه) جریان SMES ۳۴

شکل (۱-۲۳): DVR مبتنی بر SMES با اینورتر چهار ساق ۳۵
شکل (۱-۲۴): جبرن سازی موازی کمبود ولتاژ با استفاده از مبدل تغذیه شده از SMES ۳۶
شکل (۱-۲۵): (الف) DVR مبتنی بر SMES، (ب) مبدل‌های به کار رفته در ساختار DVR ۳۷
شکل (۱-۲۶): DVR سه فاز مبتنی بر ابرخازن ۳۸
شکل (۱-۲۷): DVR مبتنی بر اینورتر چند سطحی با قابلیت تنظیم ولتاژ DC ۴۰
شکل (۱-۲۸): DVR مبتنی بر مبدل AC-AC ۴۱
شکل (۱-۲۹): DVR مبتنی بر مبدل AC-AC بهبود یافته ۴۲
شکل (۱-۳۰): DVR با قابلیت محدود کنندگی جریان خطا ۴۳
شکل (۲-۱): DVR مبتنی بر اینورتر چند سطحی CHB با استفاده از SMES ۴۶
شکل (۲-۲): چاپر dc-dc نوعی استفاده شده در سیستم SMES ۴۷
شکل (۲-۳): مدار معادل چاپر در مدهای کاری مختلف، (الف) مد ۱، (ب) مد ۲، (ج) مد ۳، (د) مد ۴ .... ۴۹
شکل (۲-۴): تغییرات مقدار پریونیت توان SMES برحسب تغییرات مقدار سیکل کاری چاپر ۵۰
شکل (۲-۵): مدار مورد مطالعه برای شارژ SMES ۵۱
شکل (۲-۶): کنترل‌کننده چاپر برای کنترل جریان SMES ۵۱
شکل (۲-۷): عملکرد چاپر برای کنترل جریان SMES، (الف) ولتاژ دو سر SMES، (ب) متوسط ولتاژ دو سر SMES، (ج) جریان SMES ۵۲
شکل (۲-۸): عملکرد چاپر برای کنترل جریان SMES، (الف) سیگنال کلیدزنی چاپر، (ب) توان مبادله شده SMES، (ج) سیکل کاری کلیدها ۵۳
شکل (۲-۹): کنترل‌کننده SMES برای کنترل توان SMES ۵۴
شکل (۲-۱۰): (الف) جریان SMES، (ب) توان SMES و مقدار مرجع آن در مد کنترل توان، (ج) سیکل کاری چاپر ۵۵
شکل (۲-۱۱): مدار چاپر برای مطالعه تثبیت ولتاژ لینک dc ۵۶
شکل (۲-۱۲): کنترل چاپر برای تثبیت ولتاژ لینک dc ۵۷
شکل (۲-۱۳): عملکرد چاپر در مد کنترلی تثبیت ولتاژ لینک DC، (الف) ولتاژ لینک DC، (ب) جریان SMES ۵۷

شکل (۲-۱۴): عملکرد چاپر در مد کنترلی تثبیت ولتاژ لینک DC، (الف) توان SMES، (ب) ولتاژ SMES، (ج) سیکل کاری کلیدها ۵۸
شکل (۲-۱۵): دیاگرام برداری اینورتر DVR در حالت انتظار ۶۰
شکل (۲-۱۶):کنترل اینورتر DVR در حالت انتظار ۶۱
شکل (۲-۱۷): دیاگرام برداری اینورتر DVR در حالت جبران‌سازی کمبود ولتاژ با روش pre-sag..... ۶۲
شکل (۲-۱۸): کنترل اینورتر در حالت جبران‌سازی..... ۶۲
شکل (۲-۱۹): بلوک دیاگرام سیستم کنترلی کلی DVR ۶۳
شکل (۲-۲۰): تغییرات $\Delta V_{sag,\max}$ بر حسب $V_{DC,pu}$ و θ ۶۶
شکل (۳-۱) DVR مبتنی بر اینورتر پنج سطحی CHB با استفاده از SMES ۶۹
شکل (۳-۲): جبران کمبود ولتاژ سه فاز، نمودارها به ترتیب؛ ولتاژ شبکه، ولتاژ خروجی DVR و ولتاژ بار . ۷۱
شکل (۳-۳): ولتاژ شبکه، ولتاژ DVR و ولتاژ بار در قبل از وقوع کمبود ولتاژ (در حالت شارژ SMES) برای کمبود ولتاژ سه فاز ۷۲
شکل (۳-۴): ولتاژ لینک DC در حالت کمبود ولتاژ سه فاز ۷۳
شکل (۳-۵): جریان SMES در حالت کمبود ولتاژ سه فاز ۷۳
شکل (۳-۶): جبران کمبود ولتاژ تکفاز، نمودارها به ترتیب؛ ولتاژ شبکه، ولتاژ خروجی DVR و ولتاژ بار... ۷۴
شکل (۳-۷): ولتاژ شبکه، ولتاژ DVR و ولتاژ بار در قبل از وقوع کمبود ولتاژ (در حالت شارژ SMES) برای کمبود ولتاژ تکفاز ۷۵
شکل (۳-۸): ولتاژ لینک DC در حالت کمبود ولتاژ تکفاز..... ۷۶
شکل (۳-۹): جریان SMES در حالت کمبود ولتاژ تکفاز ۷۶
شکل (۳-۱۰): جبران بیشبود ولتاژ سه فاز، نمودارها به ترتیب؛ ولتاژ شبکه، ولتاژ خروجی DVR و ولتاژ بار ۷۷
شکل (۳-۱۱): ولتاژ لینک DC در حالت بیشبود ولتاژ سه فاز ۷۸
شکل (۳-۱۲): جریان SMES در حالت بیشبود ولتاژ سه فاز ۷۸
شکل (۳-۱۳): جبران بیشبود ولتاژ تکفاز، نمودارها به ترتیب؛ ولتاژ شبکه، ولتاژ خروجی DVR و ولتاژ بار ۸۰
شکل (۳-۱۴): ولتاژ لینک DC در حالت بیشبود ولتاژ تکفاز ۸۰

شکل (۳-۱۵): جریان SMES در حالت بیشبود ولتاژ تکفاز ۸۰

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۱): تعریف مشکلات رایج کیفیت توان ۳
جدول (۱-۲): طبقه‌بندی مشکلات کیفیت توان طبق استاندارد IEEE1159 ..... ۴
جدول (۱-۳): مشخصات SMES در کاربردهای مختلف ۲۷
جدول (۲-۱): وضعیت کلیدها در مدهای مختلف کاری چاپر ۴۸
جدول (۳-۱) مقادیر پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده ۶۹

فصل اول

بررسی منابع

۱-۱- مقدمه

کیفیت توان از مباحث مهم روز می‌باشد چرا که از یک طرف تعداد تجهیزات و بارهای الکتریکی حساس به کیفیت توان در حال رشد می‌باشد و از طرف دیگر تعداد تجهیزاتی که موجب کاهش کیفیت توان می‌شوند (مانند مبدل‌های الکترونیک قدرت) در حال افزایش می‌باشد. اگر تجهیزات و بارهای حساس در مقابل عوامل بدی کیفیت توان مانند نوسانات ولتاژ محافظت نشوند، موجب افت کارآیی و احتمالاً خرابی آن‌ها خواهد شد. کیفیت توان پایین موجب صدمات اقتصادی و فنی زیادی می‌شود. امروزه یکی از بهترین روش‌ها برای بهبود کیفیت توان استفاده از جبران‌کننده‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت هستند که به شکل‌ها و ساختارهای مختلفی وجود دارند. طبق داده‌های موجود، نوسانات ولتاژ مهمترین و رایج‌ترین عامل بدی کیفیت توان محسوب می‌شود. برای جبران نوسانات و اغتشاشات ولتاژ معمولاً از جبران‌کننده‌های سری استفاده می‌شود که رایج‌ترین آن‌ها بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) می‌باشد. DVR در حقیقیت یک مبدل الکترونیک قدرت است که به صورت سری (معمولاً توسط ترانسفورماتور) به شبکه وصل می‌شود و با تزریق ولتاژ با دامنه و فاز مناسب موجب جبران ولتاژ بار حساس می‌شود. یکی از مهمترین مسائل در ارتباط با DVR این است که برای جبران موثر کمبود ولتاژ عمیق و طولانی مدت باید یک ذخیره‌کننده انرژی وجود داشته باشد. یکی از بهترین ذخیره‌کننده‌های انرژی که چگالی انرژی بالایی دارد، ذخیره‌کننده انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES) می‌باشد. با این توضیحات، ابتدا به مباحث مربوط به کیفیت توان پرداخته می‌شود و سپس ادوات بهبود کیفیت توان و بخصوص DVR مورد بحث قرار می‌گیرد. بعد از آن، مشخصات و ویژگی‌های SMES مورد بحث قرار گرفته و در نهایت چند ساختار DVR مبتنی بر SMES ارائه خواهد شد.

۱-۲- کیفیت توان

کیفیت توان مفاهیم مختلفی برای افراد مختلف دارد. موسسه مهندسین برق و الکترونیک (IEEE) در استاندارد IEEE1100 کیفیت توان را به صورت "مفهوم تغذیه و زمین کردن وسایل حساس الکترونیکی است به نحوی که برای این ادوات مناسب باشد" تعریف می‌کند. هر چند که این تعریف یک تعریف مناسبی به نظر

می‌آید، ولی محدود شدن به وسایل حساس الکترونیکی ممکن است مورد توافق قرار نگیرد. همه وسایل الکتریکی در برابر مشکلات کیفیت توان آسیب‌پذیر هستند. این وسیله الکتریکی ممکن است یک موتور، ژنراتور، ترانسفورمر، کامپیوتر، وسایل مخابراتی و یا لوازم منزل باشد. همه این وسایل الکتریکی در برابر مشکلات کیفیت توان بسته به شدت آن‌ها می‌توانند عمل‌کرد نامناسب داشته باشند [۱-۲].

یک تعریف مختصر و مفید برای کیفیت توان ممکن است به صورت زیر بیان شود:

کیفیت توان مجموعه‌ای از محدوده‌های الکتریکی است که اجازه می‌دهد یک تجهیز الکتریکی به صورت از پیش تعیین شده عمل کند بدون این‌که قسمت مهمی از کارایی خود را از دست دهد و یا این که از عمر آن کاسته شود. این تعریف دو چیز را از وسیله الکتریکی تقاضا می‌کند: کارایی و عمر. هر مشکل مرتبط با توان که یکی (و یا هر دو) این عوامل را تهدید کند یک مشکل کیفیت توان محسوب می‌گردد.

چرا کیفیت توان یک مسئله نگران کننده است و از چه زمانی شروع شده است؟ از زمان کشف الکتریسیته (حدود 400 سال پیش) تولید، توزیع و استفاده از وسایل الکتریکی به صورت یکنواخت در حال افزایش است. روش‌های بدیع و جدید تولید واستفاده از الکتریسیته انقلاب صنعتی را سرعت بخشید. بعد از آن دانشمندان و مهندسین به سیر تکاملی الکتریسیته کمک کردند. در آغاز ماشین‌های الکتریکی به صورت ابتدایی و در عین حال بسیار کاربردی و سودمند بودند. آن‌ها برق زیادی مصرف می‌کردند و کارآیی نسبتاً خوبی داشتند. این ماشین‌ها به صورت محتاطانه طراحی می‌شدند که ملاحظات اقتصادی در اولویت بعد از کارایی قرار داشت. آن‌ها احتمالاً در معرض مشکلات کیفیت توان بودند که در آن زمان وجود داشت، اما اثرات کیفیت توان بخش به دلیل پایداری ماشین‌ها و بخش به خاطر کمبود روش‌های موثر برای اندازه‌گیری پارامترهای کیفیت توان قابل تشخیص نبودند. به هر حال، در ۵۰ سال گذشته صنعت به جایی رسید که باید تولیدات قابل رقابت از نظر اقتصادی داشته باشد. این باعث شد ماشین‌های الکتریکی هر چه کوچک‌تر و کاراتر و بدون در نظر گرفتن حاشیه‌های عمل‌کرد طراحی شوند. در عین حال سایر عوامل نیز به میدان می‌آمدند. تقاضای روزافزون الکتریسیته موجب تولید انبوه برق شد. نیاز صنعت به همراه مصرف خانگی روز به روز زیاد شد به طوری که تولید برق را با محدودیت مواجه کرد. امروزه شرکت‌های برق به صورت مستقل عمل نمی‌کنند

بلکه آن‌ها جزئی از یک شبکه بزرگ و پیچیده هستند. ترکیب عوامل فوق سیستم قدرت را نیازمند کیفیت توان کرده است [۱-۲].

با رشد سریع تکنولوژی ادوات الکترونیکی و کامپیوتری و سیستم‌های اتوماسیون بیش از پیش کاربرد پیدا می‌کنند. این ادوات به عنوان ادوات حساس شناخته می‌شوند. به بیان بهتر تجهیزات الکترونیکی و کامپیوتری به کیفیت ولتاژی که از آن تغذیه می‌شوند بسیار حساس هستند و اگر کیفیت ولتاژ تغذیه کننده آن‌ها مطلوب نباشد خسارات بسیاری به بار خواهد آورد. از مهم‌ترین عوامل بدی کیفیت توان از نظر ولتاژ می‌توان به کمبود ولتاژ (Voltage sag)، بیش‌بود ولتاژ (Voltage swell)، هارمونیک و نوسان (Flicker) اشاره کرد. برای آشنایی بیش‌تر با این مفاهیم، تعریفی از هر کدام از آن‌ها در زیر آورده می‌شود.

مشکلات رایج کیفیت توان در جدول (۱-۱) تعریف شده است [۳-۴] طبقه‌بندی کامل‌تری از مشکلات کیفیت توان طبق استاندارد IEEE1159 در جدول (۱-۲) نشان داده شده است [۵].

جدول (۱-۱): تعریف مشکلات رایج کیفیت توان

مشخصات موج ولتاژ	نام	توضیح
فرکانس	انحرافات فرکانسی	انحراف فرکانس اصلی سیستم قدرت از مقدار نامی خود (50Hz و یا 60Hz)
دامنه	تغییرات ولتاژ بلند مدت	داشتن اندازه بیش‌تر و یا کم‌تر از مقدار نامی برای ولتاژ اندازه‌گیری شده برای زمان‌های بیش‌تر از یک دقیقه. مورد اول بیشبود ولتاژ نامیده می‌شود که معمولاً بین 1.1 تا 1.2 پریونیت می‌باشد. مورد دوم افت ولتاژ نامیده می‌شود که معمولاً بین 0.8 تا 0.9 پریونیت می‌باشد.
	نوسانات ولتاژ	تغییرت منظم پوش ولتاژ بین دو مقدار که معمولاً بین 0.95 و 1.05 می‌باشد. تاثیر نوسان ولتاژ روی شدت نور و در نتیجه ناپایداری نور قابل مرئی را فلیکر می‌گیند.
	کمبود ولتاژ	کاهش در مقدار موثر ولتاژ در فرکانس قدرت بین 0.1 و 0.9 پریونیت به مدت نیم سیکل تا یک دقیقه. وقتی که این

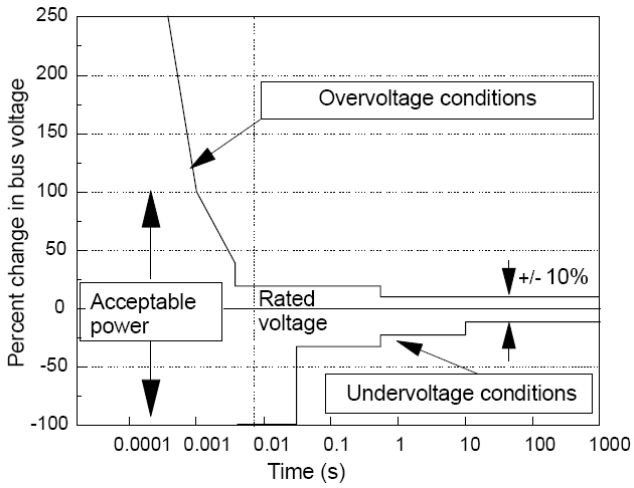
		کاهش بیش‌تر از 0.9 پریونیت باشد به این پدیده وقفه کوتاه مدت می‌گویند.
	بیش‌بود	افزایش ولتاژ موثر در فرکان سیستم قدرت بین 0.1 تا 0.8 پریونیت به مدت نیم سیکل تا یک دقیقه.
	گذرا	تغییر ناگهانی و در فرکانس غیر از فرکانس سیستم قدرت در حالت ماندگار ولتاژ. وقتی که این تغییرات فقط در یک جهت (مثبت و یا منفی) باشد تغییر ضربه‌ای نامیده می‌شود و وقتی این تغییرات در هر دو جهت اتفاق بیفتد گذرای نوسانی نامیده می‌شود.
شکل موج	هارمونیک‌ها	حضور فرکانس‌های با مضرب صحیحی از هارمونیک‌های اصلی. هارمونیک‌ها با شکل موج اصلی ترکیب شده و یک شکل موج اغتشاش یافته می‌دهند.
تقارن سیستم‌های سه فاز	نامتعادلی ولتاژ	بیش‌ترین انحراف از مقدار میانگین ولتاژهای سه فاز تقسیم بر مقدار میانگین ولتاژهای سه فازکه به صورت در صد بیان می‌شود.

جدول (۱-۲): طبقه‌بندی مشکلات کیفیت توان طبق استاندارد IEEE1159

طبقه‌بندی	طیف	مدت زمان	دامنه
۱. گذراها			
۱.۱. ضربه‌ای			
۱.۱.۱. تغییرات نانو ثانیه‌ای	5 ns rise	<50ns	
۲.۱.۱. میکرو ثانیه‌ای	1us rise	50ns to 1ms	
۳.۱.۱. میلی ثانیه‌ای	0.1 ms rise	>1ms	
۲.۱. نوسانی			
۱.۲.۱. فرکانس پایین	<5kHz	0.3 to 50ms	0 to 4pu
۲.۲.۱. فرکانس متوسط	5 to 500kHz	20us	0 to 8pu
۳.۲.۱. فرکانس بالا	0.5 to 5MHz	5us	0 to 4pu
۲. تغییرات کوتاه مدت			
۱.۲. لحظه‌ای			
۱.۱.۲. کم‌بود		0.5 to 30 cycles	1.1 to 0.9pu
۲.۱.۲. بیش‌بود		0.5 to 30 cycles	1.1 to 1.8pu
۲.۲. آنی			

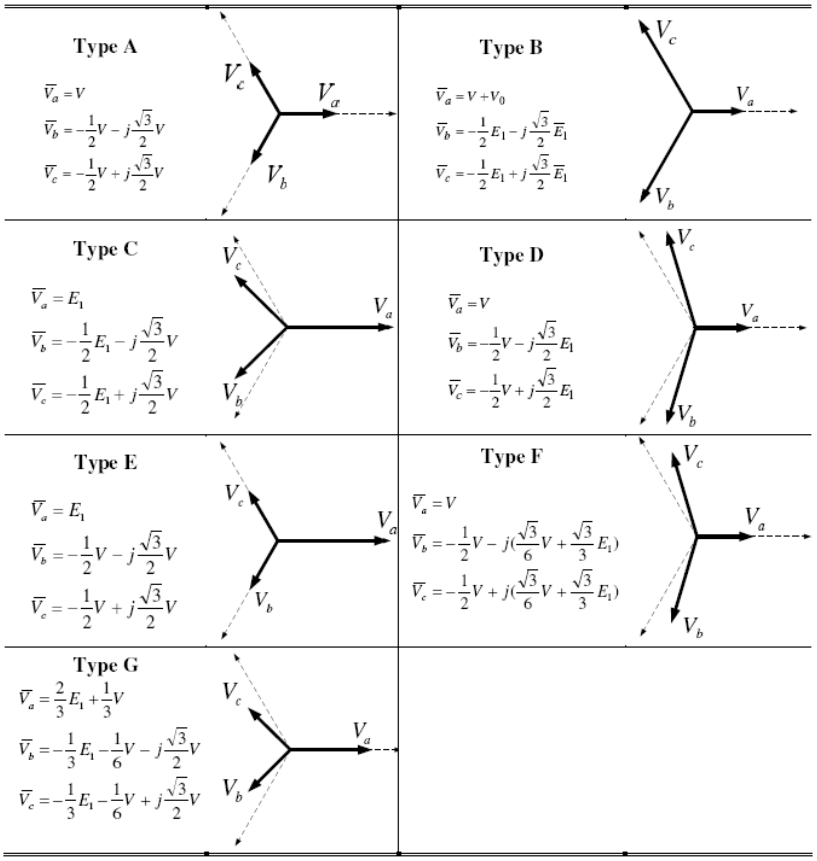
۱.۲.۲. وقفه		0.5 cycles to 3sec	<0.1pu
۲.۲.۲. کم‌بود		30cycles to 3sec	0.1 to 0.9pu
۳.۲.۲. بیش‌بود		30cycles to 3sec	1.1 to 1.4pu
۳.۲. موقت			
۱.۳.۲. وقفه		3seg to 1min.	<0.1pu
۲.۳.۲. کم‌بود		3seg to 1min.	0.1 to 0.9pu
۳.۳.۲. بیش‌بود		3seg to 1min.	1.1 to 1.2pu
۳. تغییرات بلند مدت			
۱.۳. وقفه ماندگار		>1min	0.0pu
۲.۳. افت ولتاژ		>1min	0.8 to 0.9pu
۳.۳. بیشبود ولتاژ		>1min	1.1 to 1.2pu
۴. نامتعادلی ولتاژ		حالت دائم	0.5 to 2%
۵. اغتشاش شکل موج			
۱.۵. DC offset		حالت دائم	0 to 0.1%
۲.۵. هارمونیک‌ها	0 to 100th Harmonic	حالت دائم	0 to 20%
۳.۵. هارمونیک‌های میانی	0 to 6kHz	حالت دائم	0 to 2%
۴.۵. شکاف ولتاژ (Notching)		حالت دائم	
۵.۵. نویز	Broadband	حالت دائم	0 to 1%
۶. نوسانات ولتاژ	<25Hz	متناوب	0.1 to 7%
۷. تغییرات فرکانس		<10sec	

در بین مشکلات کیفیت توان، تغییرات ولتاژ بیش‌تر از مشکلات دیگر رایج و مضر است. هر وسیله برقی تا یک حد مشخصی می‌تواند تغییرات ولتاژ را تحمل کند تغییرات ولتاژ بیش از آن حد مجاز باشد موجب آسیب به وسیله برقی خواهد شد. موسسه‌های مختلف منحنی‌هایی برای آستانه تحمل اغتشاشات ولتاز تجهیزات برقی منتشر نموده‌اند. یکی از این منحنی‌ها معروف به منحنی ITI است. این منحنی که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است تغییرات ولتاژ قابل تحمل برای کامپیوترهای متصل به یک سیستم توزیع 120V را نشان می‌دهد [۶].



شکل (۱-۱): منحنی ITI برای نشان دادن ناحیه قابل تحمل تغییرات ولتاژ برای تجهیزات

در بین تغییرات ولتاژ، کمبود ولتاژ بیش‌تر از پدیده‌های دیگر تغییرات ولتاژ رخ می‌دهد و بیش‌ترین خسارت را به بار می‌آورد. کمبود ولتاژ در سیستم‌های سه فاز انواع مختلفی دارد که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. نوع کمبود ولتاژ بستگی به نوع عیب در شبکه و هم‌چنین ساختار شبکه دارد. آرایش ترانسفورماتورهای توزیع توزیع هم تاثیر زیادی روی عیب دارد و در حالت کلی نمی‌توان گفت که نوع خاصی از عیب در شبکه (برای مثال عیب تک فاز به زمین (SLG)) موجب چه نوع کمبود ولتاژ می‌شود و ممکن است نوع کمبود ولتاژ از یک محل شبکه به محل دیگر تغییر کند [۷].



شکل (۱-۲): انواع مختلف کمبود ولتاژ

۱-۳- روش‌های بهبود کیفیت توان

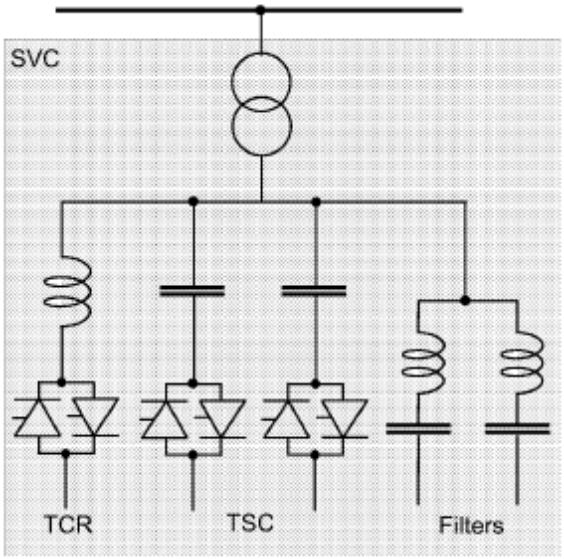
روش‌های زیادی برای بهبود کیفیت توان وجود دارد. در ای‌جا فقط روش‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت به عنوان بهترین گزینه برای بهبود شاخص‌های کیفیت توان مد نظر هستند. کاربرد کلیدها و مبدل‌های الکترونیک قدرت انعطاف و کنترل پذیری چشم‌گیری به سیستم‌های قدرت داده است که این سیستم‌ها را به سیستم‌های هوشمندی تبدیل کرده است که بتوان برنامه‌ریزی مناسب را برای تحویل توان با کیفیت بالا انجام داد. کاربرد مبدل‌های الکترونیک قدرت به طور سری و موازی در شبکه باعث به وجود آمدن ادواتی شده است که به ادوات custom power معروف هستند. انواع رایج این ادوات را می‌توان به صورت زیر نام برد [۸-۹]:

۱-۳-۱- ادوات موازی

همان‌طور که از اسم این گروه ادوات بر می‌آید، این جبران کننده‌ها به صورت موازی به شبکه (توسط ترانسفورماتور و یا اندوکتانس) متصل می‌شوند. هدف عمده از نصب این ادوات جبران‌سازی جریان شبکه به دلیل اتصال موازی آن‌ها می‌باشد.

۱-۳-۱-۱- جبران کننده توان راکتیو استاتیک (SVC)

شکل (۱-۳) مدار قدرت SVC را نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، SVC از مجموعه‌ای از خازن‌ها و سلف‌های کنترل شونده با کلید الکترونیک قدرت تشکیل شده است. واضح است که SVC فقط تبادل توان راکتیو با شبکه دارد که می‌تواند آن را از شبکه جذب و یا به شبکه تزریق کند. هدف عمده از به کارگیری SVC کنترل توان راکتیو در شبکه می‌باشد که می‌توان به وسیله آن پروفیل ولتاژ و هم‌چنین فلیکر ولتاژ را بهبود بخشید و به همین علت در میان تکنیک‌های بهبود کیفیت توان آورده شده است. هر چند که SVCها ساختار ساده‌ای دارند ولی انعطاف پذیری و سرعت عمل‌کرد آن‌ها به اندازه‌ای نیست که بتواند تغییرا ولتاژ کوتاه مدت (مانند sag و swell) را جبران کند. علاوه بر آن SVC مجهز به ذخیره‌کننده انرژی نیست که این عامل بازه‌ی کنترلی آن را خیلی محدودتر می‌کند. شایان ذکر است که در بعضی از مراجع به SVC استفاده شده در سطح توزیع از اسم D-SVC استفاده شده است.



شکل (۱-۳): مدار قدرت یک SVC

۱-۳-۱-۲- فیلتر اکتیو موازی

فیلتر اکتیو موازی تجهیزی بر مبنای مبدل الکترونیک قدرت است که به طور موازی به شبکه وصل می‌شود. این تجهیز معمولاً برای جبران هارمونیک‌های جریان که در شبکه به دلیل وجود بارهای غیر خطی (مانند یکسوسازها) به وجود می‌آیند، به کار می‌رود. مبدل استفاده شده هم می‌تواند اینورتر منبع ولتاژ (VSI) و هم اینورتر منبع جریان (CSI) باشد. شکل (۱-۴) ساختار یک فیلتر اکتیو موازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، فیلتر اکتیو موازی از یک لینک dc، یک مبدل (VSI یا CSI) و یک ترانسفورماتور و یا سلف کوپلینگ تشکیل شده است. شکل (۱-۵) شکل موج‌های نوعی جبران‌سازی جریان را نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، وظیفه فیلتر اکتیو این است که جریان خروجی برابر اختلاف یک شکل موج جریان سینوسی و جریان غیر خطی بار را تولید کند تا جریان شبکه یک جریان سینوسی باشد. علاوه بر جبران هارمونیک‌های جریان فیلتر اکتیو موازی می‌تواند توان راکتیو هم با شبکه مبادله کرد و جبران توان راکتیو نیز انجام دهد.