

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فصلنامه‌ی علمی - پژوهشی انجمنی و علوم فنی
دانشگاه خاتم النبیین (ص)
ریاست تحقیقات
سال ششم، شماره‌ی پنجم، تابستان ۱۴۰۲

شناسه:

صاحب امتیاز: دانشگاه خاتم النبیین (ص)

مدیرمسئول: استاد عباس محبی

سرمدیر: سید محمد سجادی

اعضای هیئت تحریر

۱. عباس محبی، رئیس دانشکده‌ی کمپیوترساینس دانشگاه خاتم النبیین (ص).
۲. محمدعلی فهیمی، عضو هیئت علمی دانشکده‌ی کمپیوترساینس دانشگاه خاتم النبیین (ص).
۳. سید محمدشریف شاکر، عضو هیئت علمی دانشکده‌ی کمپیوترساینس دانشگاه خاتم النبیین (ص).
۴. قربان‌علی فروغ، رئیس دانشکده‌ی کمپیوترساینس دانشگاه تعلیم و تربیه استاد ربانی.
۵. انجنیر محمدعیسی نوید، عضو هیئت علمی دانشکده‌ی انجمنی دانشگاه خاتم النبیین (ص).
۶. محمدحسین سلطانی، عضو هیأت علمی دانشکده‌ی کمپیوترساینس دانشگاه کابل.

ویراستار ادبی: سید محمد سجادی
صفحه آرا و طراح جلد: مجتبی احمدی

آدرس: کابل، سرک دارالامان، دانشگاه خاتم النبیین (ص)

شماره‌ی تماس: ۰۷۸۷۷۰۰۷۰۰

E-mail: info@knu.edu.af

Web: www.knu.edu.af

یادآوری: هرگونه استفاده از محتوای این فصلنامه تنها با ذکر منبع مجاز است.

راهنمای تنظیم مقالات

این رهنمود به منظور تدوین مقالات علمی و پژوهشی با استانداردهای معین تهیه و تدوین شده است و از این رو، مقاله باید دارای مشخصات ذیل باشد:

۱. مقالات تحقیقی، تألیفی، مستند و تحلیلی باشند؛
 ۲. مقالات قبلاً در هیچ مجله‌ای چاپ نشده و یا همزمان به مجله‌ی دیگری ارسال نشده باشند.
 ۳. مقالات باید به همراه نام، نشانی دقیق، شماره تماس و ایمیل نویسنده به ایمیل مخصوص سردبیر مجله ارسال شود.
 ۴. عنوان در، چکیده در (حداقل ۲۰۰ حداکثر ۲۵۰ کلمه شامل هدف، روش و یافته‌ها) و کلیدواژه‌ها (حداکثر ۷ کلمه)؛
 ۵. عنوان انگلیسی، چکیده انگلیسی (حداقل ۲۰۰ و حداکثر ۲۵۰ کلمه شامل هدف، روش و یافته‌ها) و کلیدواژه‌ها (حداکثر ۷ کلمه)؛
 ۶. مقاله باید دارای مقدمه، متن (حداقل ۴۵۰۰ کلمه و حداکثر ۷۵۰۰ کلمه)، نتیجه‌گیری باشد؛
 ۷. مقدمه (حداکثر ۳ صفحه ۳۵۰ کلمه) باید شامل موارد ذیل باشد: بیان مسأله، سوال‌های اصلی و فرعی، فرضیه‌ها؛ ضرورت و اهمیت، اهداف، نوآوری، نوع، پیشینه و ساختار تحقیق؛
 ۸. رفرنس بر اساس شیوه‌نامه استناددهی درون متنی باشد؛ (تخلص، سال و شماره صفحه)
 ۹. عنوان و چکیده انگلیسی (حداکثر ۲۵۰ کلمه شامل هدف، روش و یافته‌ها) و کلیدواژه‌ها (حداکثر ۷ کلمه)؛
 ۱۰. اسامی خاص و اصطلاحات لاتین در پاورقی ذکر شود؛
 ۱۱. عناوین اصلی و فرعی در بدنه (متن) مقاله با استفاده از حروف اعداد و به شکل زیر مشخص شوند:
 - عناوین اصلی مقاله - به جز مقدمه و نتیجه - با حروف ابجد (الف، ب، ج) و ...؛
 - عناوین فرعی با اعداد تک رقمی (۱، ۲، ۳، ...)؛
 - عناوین جزئی‌تر با اعداد ترکیبی دو و سه رقمی (۱-۱، ۱-۲ و ۱-۳ و ... ۱-۱-۱، ۱-۱-۲، ۱-۱-۳ و ...).
 ۱۲. تمامی قواعد و استانداردهای نگارشی رعایت گردد؛
- نیم‌فاصله‌ها در مقاله رعایت شود. به عنوان مثال: می‌رود (صحیح) می‌رود (غلط)
۱۳. بین کلمات تنها یک فاصله باشد و فاصله‌های اضافه حذف شود. به عنوان مثال: قانون. جزا (صحیح) قانون... جزا (غلط)

۱۴. فهرست منابع

- فهرست منابع در عناوین کلی به کتاب، مقاله، پایان نامه و اسناد داخلی و بین الملل تقسیم بندی شود؛
- فهرست کتاب: تخلص، نام کوچک، (سال نشر) نام کتاب، جلد (نام و تخلص مترجم، اگر ترجمه باشد) محل نشر، انتشارات، نوبت چاپ؛
- فهرست مقاله: تخلص، نام نویسنده، نام مقاله، (نام و تخلص مترجم، اگر ترجمه باشد) شماره مسلسل، سال نشر، صفحات مقاله در مجله؛
- در صورتی که سند داخلی و یا بین المللی باشد، نام سند و سال تصویب حتما ذکر گردد؛

یادآوری:

- از آنجا که احترام به حقوق پدیدآورندگان آثار علمی یکی از اصول راهبردی مجله است، نقض این حقوق توسط ارسال کنندگان مقالات، موجب رد مقاله خواهد شد؛
- سردبیر در تلخیص، اصلاح و ویرایش مقالات پذیرفته شده آزاد است.
- در صورت لزوم به روزرسانی اطلاعات مندرج در مقاله هنگام چاپ، نویسنده(گان) متعهد به انجام آن است (هستند).
- دفتر مجله مجاز خواهد بود مقالات چاپ شده را به صورت الکترونیکی نیز عرضه نماید.
- مسئولیت آرا و دیدگاه‌های ارائه شده در مقاله‌ها به عهده نویسندگان است و چاپ آن‌ها به معنی تأیید مطالب نیست.

فهرست مطالب

سخن نخست

- ۱ سید محمد سجادی
- مروری بر روش های الکترونیکی ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان در سلول های خورشیدی
- محمد منتظری ۴
- به سازی خاک رسی واگرا با استفاده از مصالح زائد: خاکستر بادی، خاکستر پوسته‌ی برنج و آهک
- مرتضی مبلّغ ۳۸
- بررسی بخش انرژی های تجدید پذیر افغانستان: چشم اندازها و چالش ها
- محمد فیصل کاشفی، پروفیسور مارتین گاربرشت
- ترجمه: سید محمد سجادی ۴۹
- معرفی و بررسی اضافه ولتاژهای بازگشتی و شبیه سازی موردی آن در نرم افزار EMTP_RV
- عبدالله حلیمی ۶۲
- بررسی مروری مدل سازی ابرخازن ها
- سید محمد سجادی، محمد منتظری ۸۶
- نانوفوتونیک کوانتومی و محاسبات کوانتومی: چشم انداز، چالش ها، پیشنهادات
- رضا ابراهیمی ۱۰۴

سخن نخست

عصر ما با عنوان زمانه‌ی اطلاعات، عصر تکنالوژی ارتباطات (I.T.C) و جهانی شدن شناخته می‌شود. گسترش تکنالوژی ارتباطات و تراکم اطلاعات، تأثیرات عمیق و همه‌جانبه بر زندگی بشر داشته است. ظهور انواع نرم‌افزارهای علمی و معلوماتی، گسترش تکنالوژی مدرن و حضور فضای مجازی به‌عنوان رقیب جدی فضای حقیقی، زمان و زمانه ما را متحول و دگرگون نمود. از جانب دیگر هم‌زمان با پیشرفت‌های علمی و صنعتی خیره‌کننده که تسهیلات و شرایط مناسب و مساعدی برای انکشاف و توسعه اجتماعی ایجاد نموده، چالش‌ها و تهدیدات جدیدی نیز در مقابل بشر تبارز پیدا کرده است. اگر نتیجه تکنالوژی مدرن، رویه‌ی فرصت‌سازی است بی‌شک سوی دیگر آن تهدیدزایی می‌باشد؛ زیرا در یک زمان، فرصت و تهدید در سایه تکنالوژی مدرن و عصر جهانی شدن قابل شناسایی است. استفاده بهینه از تکنالوژی ارتباطات و فرصت‌های آن نیازمند برنامه‌ریزی منسجم و متکی بر یافته‌های علمی است که از طریق پژوهش و اجرای پروژه‌های تحقیقاتی حاصل می‌گردد. هرچند رابطه مثبت میان تحقیق و توسعه (R&D) پیشینه‌ی تاریخی بلندی دارد، اما پایه‌ی گسترش تکنالوژی مدرن و توسعه‌ی قلمروی دانش نرم‌افزاری، این رابطه عمیق‌تر و جدی‌تر از همیشه مطرح می‌گردد. کاهش فاصله‌های مکانی و کوتاه شدن زمان، تحت تأثیر تکنالوژی مدرن از مهم‌ترین آثار این عصر است که منجر به افزایش تأثیرگذاری و تأثیرپذیری فرهنگ‌ها و زندگی اجتماعی انسان شد. استفاده از تازه‌ترین نظریه‌های علمی در عرصه‌های مختلف زندگی اجتماعی انسان، بهره‌برداری از تجربیات عملی کشورهای دیگر برای پیمودن مسیر توسعه، انکشاف و بومی‌سازی نظریه‌های فرامکانی و برخوردار از اعتبار علمی، نیازمند اهتمام جدی دولت‌ها و مراکز علمی نسبت به مقوله پژوهش و تحقیقات است.

هرچند با توجه به نیازهای عینی جوامع بشری، تحقیقات علمی در عرصه علوم فنی و مهندسی از دیرباز در کنار دیگر رشته‌های علمی مورد توجه بوده است؛ اما با انقلاب صنعتی در جهان غرب، اهمیت موضوع پژوهش در رشته‌های مهندسی دوچندان گشت به‌طوری که امروزه یکی از مهم‌ترین معیارهای علمی قابل اندازه‌گیری و استناد برای مراکز مختلف علمی یا صنعتی، میزان فعالیت پژوهشی می‌باشد. رشته‌های مهندسی به دلیل کارایی بالا و تأثیرات کلان در سطوح مختلف اجتماعی از اهمیت بالایی برخوردار هستند؛ ازاین‌رو، یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر قدرت کشورهای مختلف دنیا، پیشرفت در مسائل



متنوع رشته‌های مهندسی بیان می‌شود. پیشرفت علوم مهندسی در دنیای امروز به عنوان یکی از شاخصه‌های قدرت شناخته می‌شود؛ به همین جهت، کشورهای توسعه‌یافته همیشه نگاهی خاص و ویژه به پیشرفت در زمینه علوم مهندسی داشته‌اند. این امر منجر به خودکفایی و استقلال کشورها شده که در نتیجه سبب توانایی ایستادگی در برابر استعمار و استثمار قدرت‌های بزرگ می‌شود.

با توجه به شرایط کنونی افغانستان و حضور ده‌ها هزار مهاجر هم‌وطن ما در کشورهای منطقه و جهان، با استفاده از تکنولوژی ارتباطات می‌توان به ساماندهی ظرفیت‌های علمی و تحقیقاتی همت گماشت. در این میان استفاده از پژوهشگران و محققان داخلی و خارجی جهت پر نمودن خلاء تحقیقاتی در کشور عزیزمان از حساسیت و اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. هر چند در شرایط کنونی بخش قابل توجهی از نیروهای فکری و علمی جامعه و مردم ما در خارج از کشور زندگی می‌کنند، اما به منظور استفاده از دانش و مهارت اساتید و پژوهشگران مهاجر نیز می‌توان به گونه‌ای شایسته و سازنده برنامه‌ریزی نمود.

دانشگاه خاتم النبیین (ص) مفتخر است که به عنوان یک مرکز آموزشی معتبر و شناخته شده در سطح ملی، با تربیت نیروهای متخصص در رشته‌های مختلف سهمی در کمک به پیشرفت افغانستان عزیز به دوش می‌کشد. اهمیت تربیت نیروهای کارآمد و مفید که هر یک توانایی برطرف کردن نیازهای کشور و انجام پروژه‌های عملیاتی در سطح منطقه‌ای و ملی را داشته باشند، در روزهایی که رقابت علمی در دنیا شدت گرفته است بسیار احساس می‌شود. یکی از ابعاد مهمی که هر یک از نیروهای متخصص در رشته‌های مختلف از جمله رشته‌های مهندسی باید به آن بپردازند و از آن غافل نشوند، پژوهش و به‌روز بودن معلومات علمی می‌باشد.

تدوین و چاپ مقالات علمی اساتید و محققان کشور در فصلنامه علمی-پژوهشی دانشگاه خاتم النبیین (ص)، در کنار انجام پروژه‌های تحقیقاتی معیاری گام مهمی در راستای ایجاد انگیزه برای نیروهای علمی خارج از کشور می‌باشد. نهادینه نمودن جایگاه بلند تحقیقات در حوزه علوم فنی و مهندسی اصلی‌ترین چشم‌انداز فصلنامه علوم فنی این دانشگاه می‌باشد. در همین راستا این فصلنامه مأموریت خود را ساماندهی ظرفیت‌های تحقیقاتی و علمی محققان و پژوهشگران هم‌وطن جهت پاسخگویی به نیازهای زمانه و کمک به انکشاف و توسعه ملی در افغانستان می‌داند. دانشگاه خاتم النبیین (ص) برای ترویج دانش علوم فنی و مهندسی و استفاده از نوآوری‌ها و ابتکارات علمی و عملی اساتید و محققان کشور، زمینه‌ی چاپ و نشر تازه‌ترین یافته‌های علمی و فنی ایشان را در این فصلنامه فراهم نموده است.

فصلنامه‌ی حاضر با تلاش و مشارکت محققان و پژوهشگران رشته‌های مختلف علوم فنی از داخل و خارج از کشور تهیه و جهت استفاده در اختیار اساتید، دانشجویان و

سیاست‌گذاران عرصه‌های مختلف امور فنی قرار می‌گیرند. امید است این تلاش علمی به عنوان گام آغازین برای باز نمودن روزنه‌های مهم‌تر و گسترده‌تر به سوی تحقیقات علمی و گسترش روحیه و فرهنگ تحقیق و پژوهش در کشور عزیزمان مؤثر و راهگشا باشد. کوشش همکاران ما بر این است تا علاوه بر ایجاد انگیزه در اساتید و دانشجویان محترم کشور، مباحث ناظر به نیازهای جامعه و نظریه‌پردازی در راستای انکشاف اجتماعی، متناسب با شرایط محلی و منطقه‌ای افغانستان عزیز مورد توجه قرار گیرد تا شاهد پیشرفت علم و تکنالوژی و عبور از توسعه‌نیافتگی و عقب‌ماندگی علمی و صنعتی در کشور عزیزمان باشیم.

با تشکر، سید محمد سجادی

سردبیر



مروری بر روش‌های الکترونیکی ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان در سلول‌های خورشیدی

محمد منتظری^۱

چکیده

یکی از مواردی که به هنگام استفاده از سلول‌های خورشیدی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان خروجی می‌باشد که به منظور افزایش بازدهی این سیستم‌ها انجام می‌پذیرد. در واقع یک سیستم فوتولتائیک، زمانی دارای بیشترین بازدهی می‌باشد که توان خروجی در نقطه‌ی حداکثر خود قرار می‌گیرد. تا به حال روش‌های مختلفی برای ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان معرفی و ارزیابی شده است. روش‌های الکترونیکی دارای مزیت هزینه‌های نگهداری و تعمیرات کمتر بوده و در سال‌های اخیر بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، انواع روش‌های الکترونیکی به کار گرفته شده برای ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان سلول‌های خورشیدی معرفی گردیده، مزایا و معایب هر یک از آن‌ها ذکر و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

واژگان کلیدی: انرژی الکتريکی، سلول‌های خورشیدی، فوتولتائیک، ردیابی نقطه حداکثر توان، روش‌های الکترونیکی.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۱. مقدمه

امروزه با توجه به رشد مصرف انرژی الکتریکی در جهان، استفاده از منابع تولید پراکنده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان، بهبود کیفیت توان و سایر مزایای سیستم‌های تولید پراکنده از عوامل رشد و توسعه‌ی این صنایع می‌باشند. سیستم‌های فوتولتائیک یکی از انواع منابع تولید انرژی الکتریکی است که با استفاده از انرژی خورشید قادر به تولید توان الکتریکی می‌باشد. این سیستم‌ها به عنوان صنایع تولید پراکنده در ریزشبکه‌ها و شبکه‌های برق سراسری مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از مبدل‌های انرژی خورشیدی در سراسر جهان روز به روز در حال افزایش می‌باشد. در کنار تمام مزیت‌های موجود برای سیستم‌های خورشیدی، یکی از عمده‌ترین معایب این سیستم‌ها بازدهی پایین آن‌ها می‌باشد. در واقع نقطه‌ی کار پنل‌های فوتولتائیک به شدت تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی است؛ بنابراین قرار داشتن نقطه کار این سیستم‌ها در حالت بهینه، یکی از نیازهای مبرم و ضروری قلمداد می‌شود.

محققین از مدت‌ها پیش تلاش برای یافتن روش‌های حداکثر کردن انرژی دریافتی از منابع تجدیدپذیر به خصوص سلول‌های خورشیدی را آغاز کرده‌اند. در این موضوع، ابتدا سیستم‌های مکانیکی مختلف طراحی شد که با حرکت پنل‌های فوتولتائیک، همواره بیشترین شدت تابش را از خورشید دریافت کند. نوع دیگر این سیستم‌ها، ردیاب‌های الکتریکی هستند که با نام ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان^۱ شناخته می‌شوند و بر اساس تغییرات جریان و ولتاژ سلول جهت دستیابی به حداکثر توان عمل می‌کنند. تا به امروز طراحی‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای MPPT ارائه شده است که هر کدام ویژگی‌ها و نقاط ضعف و قوت خاص خود را دارند. لازم به ذکر است که MPPT تنها مختص سلول‌های خورشیدی نمی‌باشد و برای سایر انرژی‌های تجدیدپذیر مانند پیل سوختی، سیستم ترموالکتریک و غیره نیز کاربرد دارد. در این پژوهش انواع روش‌های مهم مطرح شده برای ردیابی نقطه‌ی توان حداکثر^۲ در سلول‌های خورشیدی معرفی گردیده است.

سلول‌های خورشیدی را از نظر نحوه‌ی استفاده می‌توان به سه دسته تقسیم کرد که شامل سیستم‌های جدا از شبکه، سیستم‌های متصل به شبکه و سیستم‌های ترکیبی با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد.

عملکرد یک سلول خورشیدی به شرایط محیطی بستگی دارد؛ در نتیجه حداکثری توان استخراجی از سلول به سه عامل مهم شدت تابش، دمای سلول و پروفایل بار وابسته است. منحنی مشخصه‌ی I-V پنل نیز تابع شدت تابش و دما می‌باشد، به نحوی که تغییر تابش و دما

¹ Maximum Power Point Tracker (MPPT)

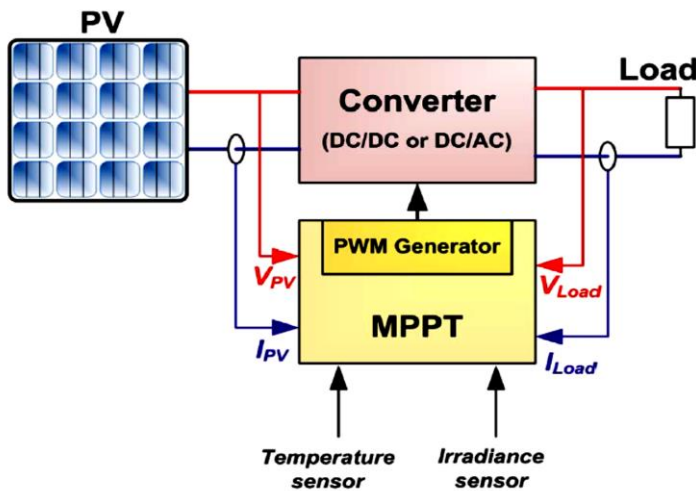
² Maximum Power Point (MPP)



به ترتیب باعث تغییر جریان و ولتاژ پنل می‌شوند. سلول‌های خورشیدی باید به نحوی تنظیم شوند که برای هر شدت تابش و در هر دمایی در MPP خود فعالیت کنند. عاملی که میزان توان یک سلول خورشیدی را مشخص می‌کند، امپدانس بار می‌باشد که مقداری متغیر است. زمانی که بار به طور مستقیم به سلول خورشیدی متصل باشد، محل تقاطع مشخصه‌ی بار و سلول، میزان توان خروجی را تعیین می‌کند که ممکن است از MPP فاصله‌ی زیادی داشته باشد. افزودن یک مبدل DC/DC بین سلول و باتری که شامل سیستم‌های کنترلی نیز باشد، می‌تواند به نگره داشتن سلول در نقطه‌ی MPP کمک کند که به این مبدل‌ها MPPT می‌گویند. ورودی مبدل توسط PV تامین شده و خروجی آن را باتری و بار تشکیل می‌دهند. یک سیستم محاسباتی، دوره‌ی عملکرد^۱ و میزان امپدانس مبدل را مشخص می‌کند تا پنل حول نقطه‌ی MPP کار کند. تلفات این مبدل‌ها نیز باید بسیار اندک باشد تا بازدهی سیستم کاهش شدیدی پیدا نکند.

چندین راه برای هماهنگی پنل PV و پروفایل بار وجود دارد. برای این کار یک سیستم متشکل از یک مبدل DC/DC یا DC/AC بوده و یک سیستم نیز برای محاسبات MPP می‌باشد که مبدل به عنوان یک مدار هماهنگی امپدانس عمل می‌کند. سیستم محاسباتی MPP میزان جریان و ولتاژ ورودی و خروجی و شرایط محیطی را اندازه‌گیری کرده و توان مبدل را با تعیین دوره‌ی عملکرد سیگنال کنترلی مبدل تنظیم می‌کند. طرح سیستم ذکر شده در شکل ۱ قابل مشاهده است. (Hossain, Khan et al. 2011)

بازدهی یک نیروگاه PV به بازدهی پنل PV، مبدل و الگوریتم MPPT بستگی دارد. بازدهی پنل و مبدل وابسته به نوع ساخت آن‌ها بوده و چندان قابل تغییر نیست اما بهبود سیستم MPPT با استفاده از روش‌های کنترلی مختلف میسر می‌باشد و می‌تواند به افزایش توان PV منجر شود.



¹ Duty Cycle

شکل ۱: نمای کلی PV به همراه سیستم MPPT

تا به حال الگوریتم‌های متعددی طراحی شده‌اند که از جنبه‌های مختلفی با یکدیگر تفاوت دارند که از میان آن می‌توان به بازدهی، سرعت همگرایی، پیچیدگی، سنسورهای مورد نیاز، هزینه و... اشاره کرد که در ادامه به دسته‌بندی و معرفی این الگوریتم‌ها پرداخته خواهد شد.

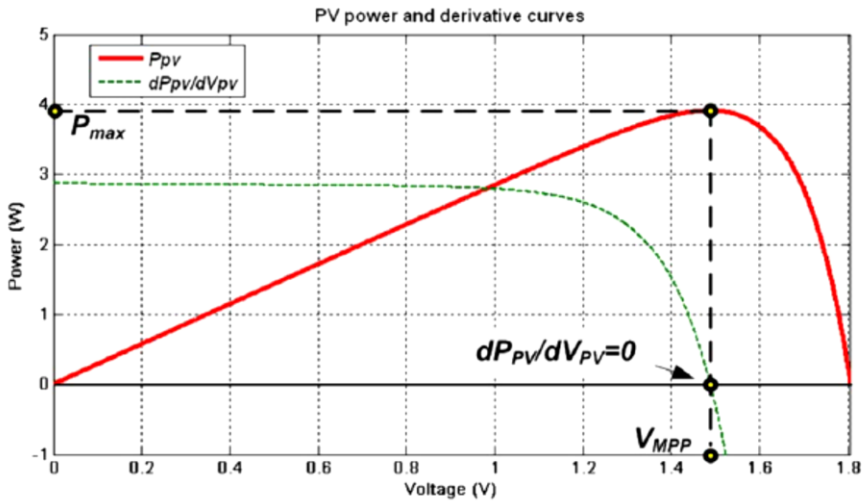
۲. مدل‌سازی MPPT

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تابش خورشید و دما بسیار بر خروجی پنل PV اثر می‌گذرانند. این شرایط محیطی در طول روز ثابت نیستند و این امر باعث می‌شود MPP نیز با توجه به شرایط دما و تابش روی یک منحنی جابجا شود. زمانی که سلول در نزدیکی MPP کار نکند تلفات سیستم بالا می‌رود؛ پس نیاز است نقطه‌ی کار سلول در نزدیکی MPP باقی بماند. منحنی‌های توان-ولتاژ و جریان-ولتاژ سلول PV به ترتیب در شکل ۲ و ۳ قابل مشاهده هستند. نقطه‌ی MPP می‌تواند به وسیله‌ی مدل‌های محاسباتی به دست آید که می‌توان وابستگی توان سلول به پارامترهای مختلف را به شکل رابطه‌ی (۱) نمایش داد:

$$P_{PV} = F(V_{PV}(t) \times I_{PV}(t) \times \gamma(t)) \quad (1)$$

γ در این معادله نماینده‌ی تمامی متغیرها به جز ولتاژ و جریان می‌باشد و به پارامترهای سلول و شرایط محیطی دیگر وابسته است. شیوه‌ی ردیابی MPP بر پایه‌ی تنظیم ولتاژ خروجی سلول جهت دستیابی به حداکثر توان خروجی در هر شرایط محیطی (دما و تابش) می‌باشد. سیستم MPPT از صفر بودن مشتق توان نسبت به ولتاژ در نقطه‌ی MPP استفاده می‌کند که در سمت چپ این نقطه مقدار مشتق مثبت بوده و در سمت راست آن منفی می‌باشد. این مطلب در معادلات (۲) و شکل ۲ ملموس مشخص شده است.

$$\begin{cases} \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 & \text{when } V_{PV} = V_{MPP} \\ \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0 & \text{when } V_{PV} < V_{MPP} \\ \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0 & \text{when } V_{PV} > V_{MPP} \end{cases} \quad (2)$$



شکل ۲: منحنی توان-ولتاژ و مشتق ولتاژ نسبت به توان

ردیاب به گونه‌ای تنظیم می‌گردد که از رابطه‌ی زیر پیروی کند:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} \times \frac{dV_{PV}}{dt} > 0 \quad (3)$$

با مشتق‌گیری از توان نسبت به ولتاژ خواهیم داشت:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV}I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (4)$$

در MPP مشتق توان نسبت به ولتاژ برابر صفر است پس:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \rightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} \quad (5)$$

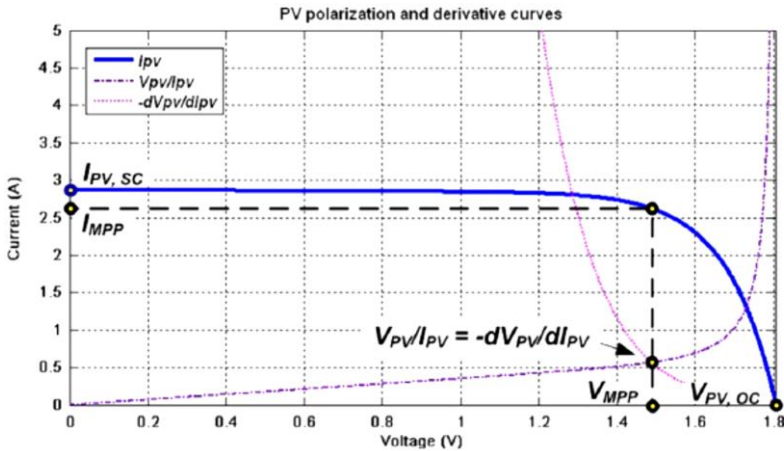
میزان خطا را در این حالت با نماد ε نمایش می‌دهند و عبارت است از:

$$\varepsilon = \frac{V_{PV}}{I_{PV}} + \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} \quad (6)$$

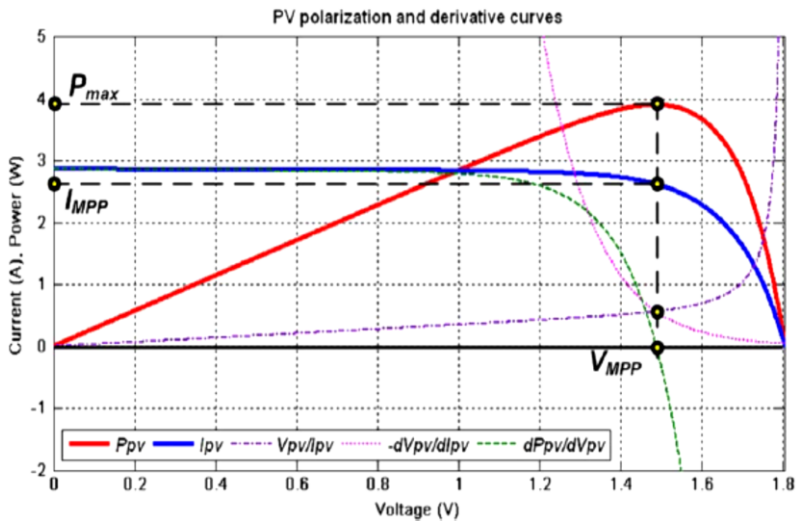
از ترکیب معادلات (۲) و (۶) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \varepsilon = 0 &\leftrightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} && \text{at the MPP} \\ \varepsilon > 0 &\leftrightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} > - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} && \text{left to the MPP} \\ \varepsilon < 0 &\leftrightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} < - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} && \text{right to the MPP} \end{aligned} \quad (7)$$

در شکل ۳ می‌توان قسمت‌های مختلف معادله‌ی (۷) را مشاهده کرد که در آن، مقدار I_{PV} از تقاطع منحنی‌های $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$ و $\frac{V_{PV}}{I_{PV}}$ حاصل می‌شود. مقدار $V_{PV} = V_{MPP}$ نیز مطابق شکل ۴ از تقاطع منحنی‌های $\frac{dV_{PV}}{dI_{PV}}$ و $\frac{V_{PV}}{I_{PV}}$ به دست می‌آید. (Boualem Bendib 2015)



شکل ۳: منحنی جریان ولتاژ، ولتاژ تقسیم بر جریان و مشتق ولتاژ نسبت به جریان سلول PV



شکل ۴: تمام منحنی مشخصه‌های سلول PV جهت یافتن MPP

روش‌های مختلفی برای ردیابی MPP وجود دارد. مواردی که برای انتخاب از میان این روش‌ها باید در نظر گرفته شوند عبارتند از: سختی اجرا، سنسورها، بازدهی، هزینه و کاربرد. از زمانی که سلول‌های PV به عنوان منابع جدا از شبکه به کار گرفته شدند، تحقیقات بسیاری

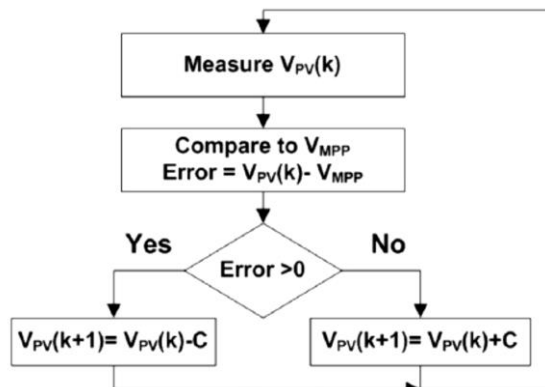
برای استخراج حداکثر توان از آن‌ها انجام شد. تاکنون انواع مختلفی از الگوریتم‌های MPPT طراحی شده‌اند که می‌توان آن‌ها را بر حسب شیوه و تکنیک ردیابی به ۵ دسته تقسیم کرد:

۱. تکنیک‌های ردیابی با پارامترهای ثابت: از مقادیر ثابت و از پیش تعیین شده‌ی پارامترهای سلول استفاده می‌کند.
۲. تکنیک‌های ردیابی با اندازه‌گیری و مقایسه: مقادیر خروجی سلول (ولتاژ و جریان و یا تابش و دما) را اندازه‌گیری کرده و با مقدار از قبل مشخص شده‌ی MPP مقایسه می‌کند.
۳. تکنیک‌های ردیابی با سعی و خطا: مقادیر خروجی سلول را اندازه‌گیری کرده و با توجه به آن برای مسیر ادامه‌ی کار سلول تصمیم‌گیری می‌کند.
۴. تکنیک‌های ردیابی با استفاده از محاسبات ریاضی: محل قرارگیری MPP را با توجه به معادلات سلول و استفاده از محاسبات ریاضی تعیین می‌کند.
۵. تکنیک‌های ردیابی با روش پیش‌بینی هوشمند: از یک روند هوشمند استفاده کرده و محل قرارگیری MPP را در مشخصه‌ی سلول پیش‌بینی می‌کند. (Nabil Karami, 2017).

۳. تکنیک‌های ردیابی با استفاده از پارامترهای ثابت

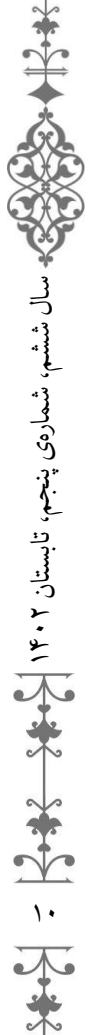
۳-۱. روش ولتاژ ثابت^۱

از این روش به عنوان ساده‌ترین روش MPPT یاد می‌شود. در این روش، همواره تلاش می‌شود نقطه‌ی عملکرد پنل PV به وسیله‌ی تنظیم ولتاژ در نزدیکی V_{MPP} که از روی منحنی مشخصه‌ی آن به دست آمده است نگه داشته شود. این روش که در شکل ۵ نیز نمایش داده شده است، اثر تابش و دما را در نظر نگرفته و فقط از ولتاژ پنل بهره می‌گیرد. در نتیجه نقطه‌ی عملکرد دقیقاً روی MPP تئوری نخواهد افتاد.



شکل ۵: فلوجارت روش CV

¹ Constant Voltage Method (CV) / The Best Fixed Voltage Method (BFV)



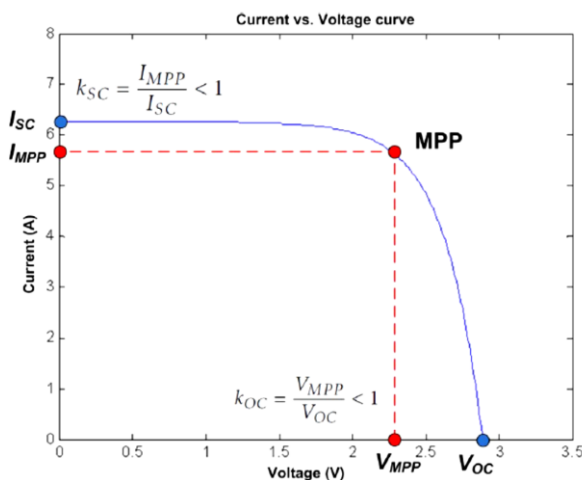
مدار CV تنها متشکل از یک سنسور ولتاژ می باشد که اندازه‌ی ولتاژ پنل را اندازه‌گیری کرده و دوره‌ی عملکرد مبدل DC/DC را به وسیله‌ی آن تنظیم می‌کند. لازم به ذکر است زمانی که پنل در تابش‌های پایین عمل می‌کند، روش CV بازدهی بالاتری از برخی روش‌های دیگر که در ادامه ذکر می‌شوند (مانند P&O و IC)، خواهد داشت. این نکته باعث می‌شود که CV در ترکیب با دیگر روش‌های MPPT به یک روش مناسب با بازدهی بالا بیانجامد.

۳-۲. روش ولتاژ مدار باز^۱

مزیت روش ولتاژ مدار باز این است که ولتاژ خروجی PV با ولتاژ مدار باز آن (V_{OC}) رابطه‌ای تقریباً خطی دارد، به نحوی که می‌توان آن‌ها را با یک ضریب به نام k_{OC} به یکدیگر مرتبط ساخت که مقدار آن به ضریب پرشدگی^۲ پنل، تکنولوژی ساخت سلول و شرایط محیطی وابسته است. این نسبت در رابطه‌ی (۸) نشان داده شده است. رابطه‌ی بین جریان و ولتاژ MPP و جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز نیز در شکل ۶ مشخص می‌باشد.

$$V_{MPP} = k_{OC} V_{OC} \quad (k_{OC} < 1) \quad (8)$$

فلوچارت این روش در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این سیستم برای اندازه‌گیری V_{OC} ، مدار به طور مکرر قطع و وصل خواهد شد که هر بار MPP مطابق معادله‌ی (۸) محاسبه گردیده و ولتاژ عملکرد مدار بر طبق آن تنظیم خواهد شد. اگرچه این روش ظاهراً ساده به نظر می‌رسد، اما انتخاب مقدار بهینه‌ی ضریب k کار سختی می‌باشد که محدوده‌ی ضریب k_{OC} به صورت تجربی در بازه‌ای بین 0.73 و 0.8 به دست آمده است. سعی می‌شود برای V_{OC} مقدار ثابتی برای شرایط مختلف آب و هوایی در نظر گرفته شود. صحت این روش به دقت در انتخاب k_{OC} وابسته می‌باشد. (Saleh Elkelani Babaa 2014)



¹ Open-Circuit Voltage Method

² Fill Factor (FF)

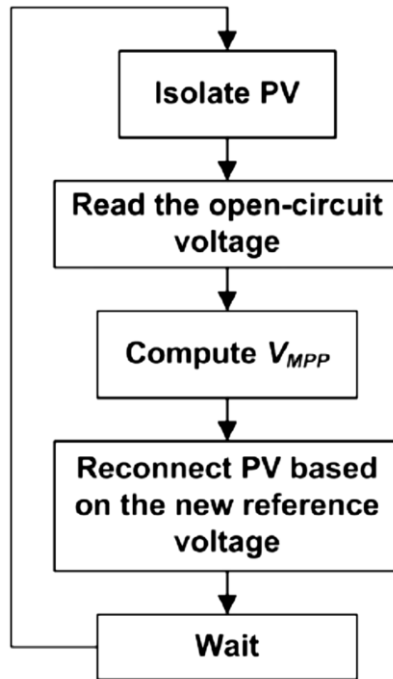
شکل ۶: رابطه‌ی بین V_{MPP} - V_{OC} و I_{MPP} - I_{SC}

۳-۳. روش جریان اتصال کوتاه

مشابه روش قبل، این روش نیز بر مبنای خطی بودن رابطه‌ی بین I_{MPP} و I_{SC} می‌باشد. لذا رابطه‌ی این دو پارامتر مانند معادله‌ی (۹) قابل نوشتن می‌باشد. همانند روش قبل، مقدار k_{SC} وابسته به تکنولوژی ساخت سلول PV، شرایط محیطی و ضریب پرتشددگی خواهد بود. این ضریب برای پنل‌های پلی کریستالی حدود ۰/۸۵ محاسبه شده است.

$$I_{MPP} = k_{SC} I_{IC} \quad (k_{SC} < 1) \quad (9)$$

هر چند دقیقه، مقدار k_{SC} با اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه مدار محاسبه می‌شود. در نتیجه در این روش نیز وقفه‌های پیاپی در مدار خواهیم داشت.

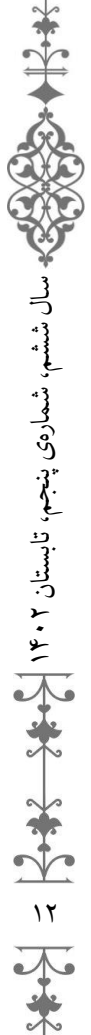


شکل ۷: الگوریتم روش ولتاژ مدار باز

۳-۴. روش ولتاژ مدار باز پیلوت^۱

این تکنیک مشکل دو روش قبلی در ایجاد وقفه‌های متناوب در مدار را جبران می‌کند. در این روش مقدار ولتاژ مدار باز، از روی یک سلول که از لحاظ الکتریکی به بقیه‌ی شبکه وصل نمی‌باشد، خوانده می‌شود و مقدار ضریب k_{OC} به دست آمده، برای محاسبه‌ی V_{MPP} طبق رابطه‌ی (۱۰) استفاده می‌گردد.

¹ Open-Circuit Voltage Pilot PV Cell Method



$$V_{MPP} = k_{OC} V_{OC_{pilot}} \quad (k_{OC} < 1) \quad (10)$$

در این روش تنها از یک حلقه‌ی فیدبک کنترلی استفاده می‌شود که وقفه‌های متوالی ایجاد نمی‌کند. اما صحت آن می‌تواند به واسطه‌ی وجود سایه‌ی جزئی روی پنل و نیز عدم هماهنگی کافی سلول پیلوت و پنل اصلی کاهش یابد.

۳-۵. روش گرادیان دما^۱

ولتاژ مدار باز در سلول PV با دمای سلول رابطه‌ی خطی دارد که این مطلب بعداً در معادله‌ی (۱۴) نشان داده خواهد شد. این رابطه در حال حاضر به صورت معادله‌ی (۱۱) قابل نمایش است.

$$V_{OC} \cong V_{OC_{STC}} + (T - T_{STC}) \frac{dV_{OC}}{dT} \quad (11)$$

که در آن $V_{OC_{STC}}$ نشان‌دهنده‌ی ولتاژ مدار باز در دمای استاندارد (STC)، T بیانگر دمای واقعی سلول، T_{STC} برابر با دمای سلول در شرایط دمایی استاندارد و $\frac{dV_{OC}}{dT}$ گرادیان دما می‌باشد. بنابراین با اندازه‌گیری دمای واقعی، ولتاژ مدار باز قابل محاسبه است و MPP مطابق رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید.

۳-۶. روش پارامتری دما^۲

مقدار ولتاژ MPP را می‌توان مطابق رابطه‌ی تجربی (۱۲) با دمای محیط مرتبط کرد.

$$V_{MPP} \cong (u + Sv) - T(w + Sy) \quad (12)$$

که در آن مقادیر u ، v ، w و y پارامترهای PV در تابش‌های مختلف S می‌باشند. این روش نیازمند اندازه‌گیری دقیق مقدار دما و شدت تابش جهت محاسبه‌ی ولتاژ بهینه می‌باشد.

۳-۷. روش فیدبک ولتاژ یا جریان^۳

این روش مشابه روش ولتاژ ثابت می‌باشد که متشکل از یک روش کنترلی ساده است. این تکنیک از یک سیستم کنترلی ساده برای تنظیم ولتاژ (یا جریان) در یک مقدار ثابت استفاده می‌کند؛ بنابراین میزان اختلافات ولتاژ (یا جریان) سلول PV به صورت پیوسته مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل را کنترل می‌کند. این سیستم اقتصادی است و تنها یک حلقه‌ی فیدبک دارد اما اثر شرایط مختلف محیطی را لحاظ نمی‌کند. شکل ۹ نمایی از این سیستم را نمایش می‌دهد.

¹ The Temperature Gradient Algorithm (TG)

² The Temperature Parametric Method (TP)

³ Feedback Voltage or Current Method

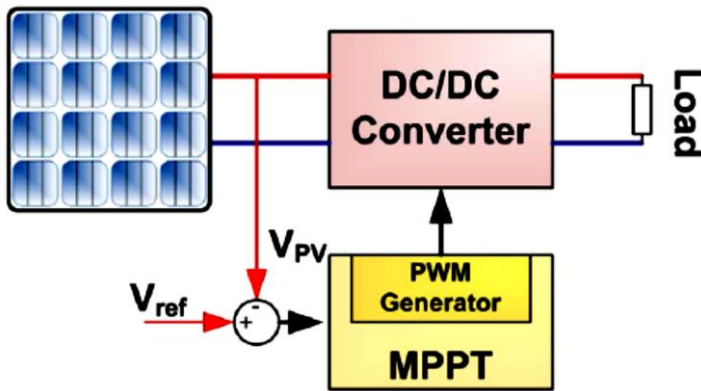


۳-۸. روش افت ولتاژ اتصال pn^۱

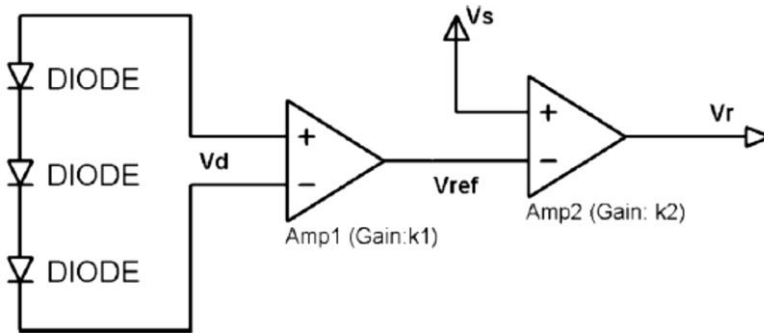
مشخصه‌ی دمایی سلول PV مشابه دیود pn می‌باشد. دیودها در پشت پنل PV نصب می‌شوند تا تغییر دما در سطح سلول به وسیله افت ولتاژ در پیوند pn شناسایی گردد و به دنبال آن ولتاژ ورودی ردیاب به دست آید. ولتاژ مرجع طبق معادله‌ی (۱۳) به دست می‌آید.

$$V_r = k_2(V_s - V_{ref}) = k_2(V_s - k_1V_d) \quad (13)$$

که در آن V_s ولتاژ خروجی پنل PV، V_{ref} ولتاژ مرجع به دست آمده از طریق تقویت افت ولتاژ پیوند pn یعنی V_d و k_1 و k_2 به ترتیب ضرایب تقویت کننده‌های ۱ و ۲ می‌باشند. در این روش تنها اثر دما لحاظ می‌شود و از تغییر تابش چشم‌پوشی می‌شود؛ در نتیجه خطای این سیستم بالاست. (Robert Faranda 2008) طرح این سیستم در شکل ۱۰ مشخص است.



شکل ۹: فیدبک ولتاژ با مدولاسیون PWM



شکل ۱۰: مدار کنترلی ردیاب ولتاژ ثابت

۴. تکنیک‌های ردیابی با اندازه‌گیری و مقایسه

^۱ P-n Junction drop Voltage Tracking Technique (Excellent Operating Point Tracker)

۴-۱. روش جدولی^۱

این روش بر مبنای مقایسه‌ی تمام شرایط محیطی از پیش اندازه‌گیری شده با مقادیر واقعی آن‌ها می‌باشد. در هر دوره، یک ولتاژ عملیاتی جدید V_{MPP} به وسیله‌ی سیستم کنترل‌کننده تعیین می‌شود که این کار با مقایسه‌ی دما و تابش اندازه‌گیری شده با مقادیر داخل جدول صورت می‌پذیرد. جدول مشخصات را کارخانه‌ی تولیدکننده ارائه می‌دهد. این سیستم برای در برداشتن گستره‌ی وسیعی از اطلاعات، نیاز به حافظه‌ی بلندمدت قوی خواهد داشت.

۴-۲. روش حداکثرکردن جریان یا ولتاژ بار^۲

زمانی که یک پنل PV به یک مبدل توان متصل می‌شود، حداکثرکردن توان PV موجب حداکثرکردن توان بار نیز خواهد شد. برعکس این ماجرا نیز برقرار می‌باشد، به شرطی که تلفات مبدل ناچیز در نظر گرفته شود. انواع بار را از لحاظ الکتریکی می‌توان به ۴ دسته‌ی مقاومتی، منبع ولتاژی، منبع جریانی و ترکیب آن‌ها تقسیم نمود. برای نوع منبع ولتاژی و منبع جریانی، به ترتیب جریان خروجی و ولتاژ بار باید حداکثر شود و برای انواع دیگر بارها می‌توان از ولتاژ یا جریان استفاده کرد؛ در نتیجه در این روش فقط نیاز به یک سنسور خواهد بود. در سیستم‌های PV عموماً از باتری به عنوان ذخیره‌ساز انرژی و به عبارتی بار سیستم استفاده می‌گردد. علاوه بر این از یک فیدبک مثبت نیز جهت کنترل مبدل استفاده می‌شود، به نحوی که جریان بار حداکثر شده و پنل در نزدیکی MPP کار کند. این روش با فرض عدم وجود تلفات در مبدل مطرح شد و به همین دلیل تا حدودی خطا دارد.

۴-۳. روش کنترل خطی جریان

این روش با استفاده از چندین معادله‌ی جبری به دست آمده و به آسانی قابل پیاده‌سازی بوده و ردیابی نقطه‌ی توان حداکثر در آن دائمی خواهد بود. مشخصه‌ی I-V به شکل معادله‌ی (۱۴) قابل نوشتن است.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_s(e^{\lambda(V_{PV} + I_{PV}R_s)} - 1) \quad (14)$$

که در آن $\lambda = q/(AkT)$ ، A ضریب ایده‌آلی، k ثابت بولتزمن و T دمای سلول می‌باشد. برای کنترل‌کننده پیشنهادی، منحنی اولیه با استفاده از رابطه‌ی $f(P_{PV}, I_{PV})=0$ در مشخصه‌ی P-I به دست می‌آید.

$$f(P_{PV}, I_{PV}) =$$

$$P_{PV} - V_{PV}I_{PV} = P_{PV} - \frac{1}{\lambda}I_{PV} \ln \left[\frac{I_{ph} + I_s - I_{PV}}{I_s} \right] - I_{PV}^2 R_s = 0 \quad (15)$$

از طرفی در MPP داریم:

$$\frac{dP_{PV}}{dI_{PV}} = 0 \quad (16)$$

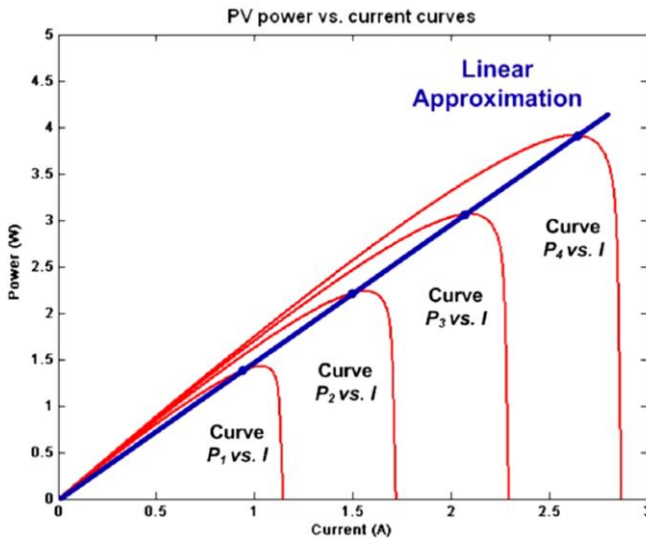
¹ Look-up Table Method

² Load Current or Load Voltage Maximization

با استفاده از معادلات (۱۴) و (۱۵) دومین معادله‌ی توان خروجی به دست می‌آید:

$$g(P_{PV}, I_{PV}) = P_{PV} - \frac{1}{\lambda} I_{PV} \ln \frac{I_{PV}^2 / \lambda}{(P_{PV} - I_{PV}^2 R_s) I_s} - I_{PV}^2 R_s = 0 \quad (17)$$

در واقع در این روش، معادله‌ی (۱۷) برای یک PV می‌تواند با یک رابطه‌ی خطی تقریب زده شده و برنامه‌نویسی را آسان کند. در شکل ۱۱ این مطلب قابل درک می‌باشد. (Nabil Karami, 2017)



شکل ۱۱: محل قرارگیری MPP در تقاطع خط تقریبی با مشخصه‌ی سلول

۵. تکنیک‌های ردیابی با سعی و خطا

۵-۱. روش جریان PV^۱

این روش بر مبنای حداکثر کردن توان خروجی با استفاده از جریان PV می‌باشد. با توجه به این که سیستم خورشیدی از طریق یک مبدل DC/DC به باتری متصل است، ولتاژ خروجی یا همان V_{bat} مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌شود و ارتباطی با دوره‌ی عملکرد مبدل (D) ندارد. طرح کلی این سیستم در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. ولتاژ باتری از طریق دوره‌ی عملکرد مبدل طبق معادله‌ی (۱۸) با ولتاژ سلول رابطه دارد.

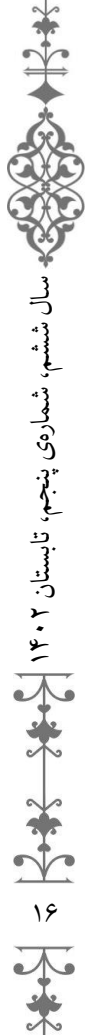
$$V_{bat} = \frac{t_{on}}{T} V_{PV} = D V_{PV} \quad (18)$$

که در آن T دوره‌ی تناوب و t_{on} زمان ۱ بودن سیگنال PWM می‌باشد. توان ورودی مبدل برابر است با:

$$P_{in} = V_{PV} I_{PV} \quad (19)$$

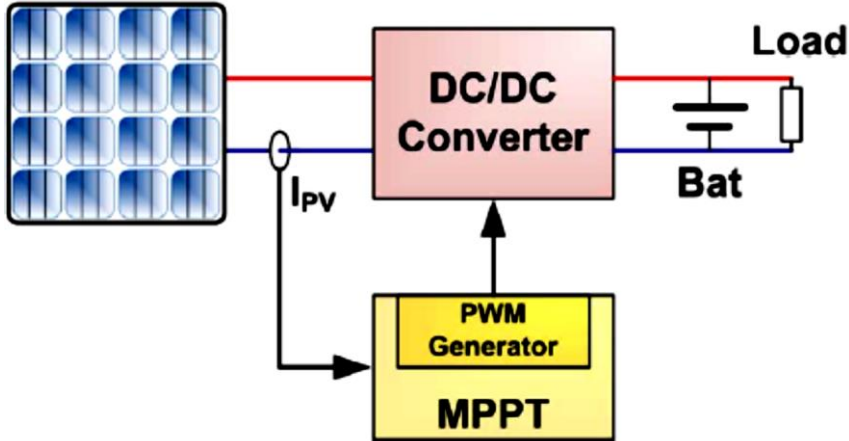
از جایگذاری معادله‌ی (۱۸) در معادله‌ی (۱۹) به دست خواهد آمد:

^۱ The Only-current Photovoltaic Method



$$P_{in} = V_{bat} \frac{I_{PV}}{D} = V_{bat} P_{Buck}^* \quad (20)$$

$$P_{Buck}^* = \frac{I_{PV}}{D} \quad (21)$$



شکل ۱۲: طرح کلی روش جریان PV

الگوریتم این روش در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. روند ردیابی با D اولیه آغاز می‌شود. در این حالت ابتدا جریان PV اندازه‌گیری شده و P_{Buck}^* محاسبه می‌شود، سپس D به اندازه ΔD_1 افزایش می‌یابد. پس از تغییر D ، بلافاصله جریان PV دوباره اندازه‌گیری شده و P_{Buck}^* جدید محاسبه می‌گردد. با داشتن مقادیر قدیمی و جدید P_{Buck}^* ، کنترل‌کننده بر اساس معادلات (۲۲) و (۲۳) تصمیم‌گیری می‌کند که مقدار دوره‌ی عملکرد را کاهش یا افزایش دهد و این مراحل تا زمانی که سلول خورشیدی به نقطه‌ی MPP برسد، به طور مرتب تکرار می‌شود.

$$\Delta P = P_{Buck}^*(t + \Delta t) - P_{Buck}^*(t) \quad (22)$$

$$\Delta D = D(t + \Delta t) - D(t) \quad (23)$$

استفاده از جریان PV به عنوان مزیت بزرگ این روش در مقایسه با دیگر روش‌ها بیان می‌شود. به علاوه این روش به هنگام تغییرات سریع شرایط آب و هوایی عملکرد خوبی خواهد داشت.

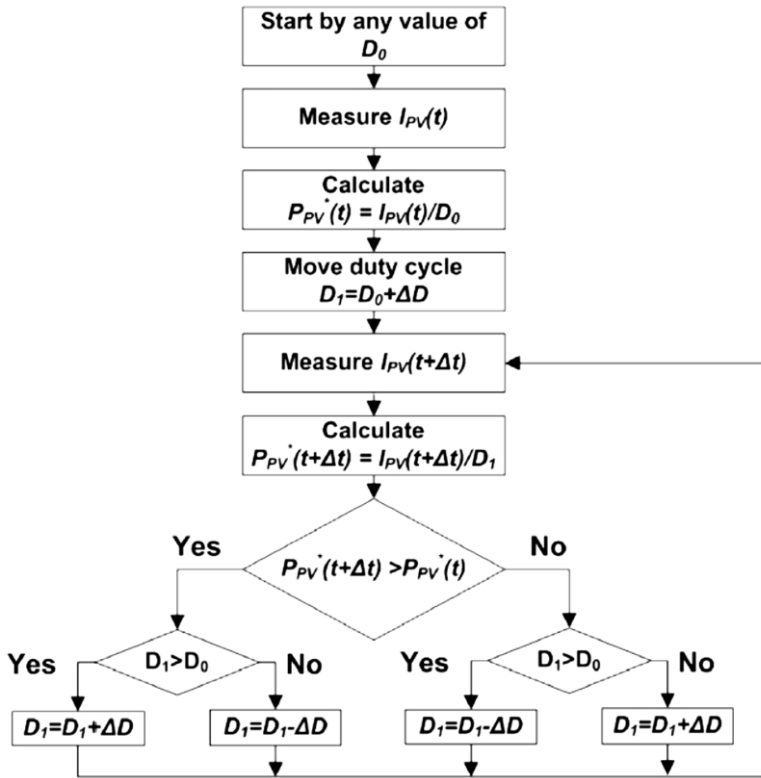
۵-۲. روش کنترل خروجی PV بدون حسگر^۱

این روش برای نیروگاه‌هایی مناسب می‌باشد که فقط جریان بار توسط سیستم ردیاب در نظر گرفته می‌شود. در یک منبع انرژی بزرگ PV، افت ولتاژ در طول بار قابل چشم‌پوشی است؛ بنابراین استخراج بیشترین جریان می‌تواند تقریباً به منزله‌ی دریافت بیشترین توان باشد. طرح کلی و فلوچارت مربوط به الگوریتم این روش به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ قابل ملاحظه

^۱ PV Output Senseless Control Method (POS)



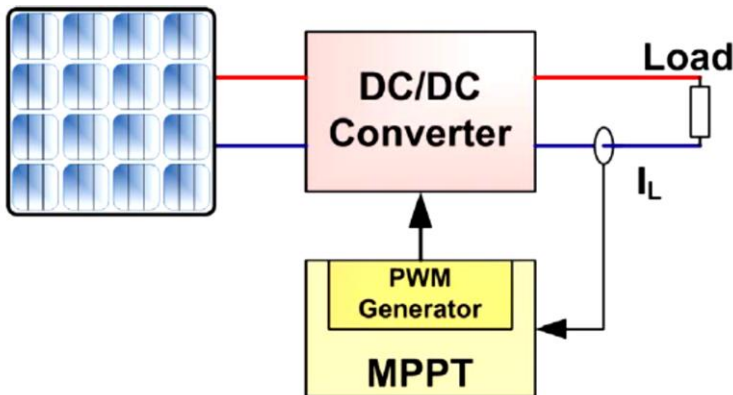
هستند. سیستم مبدل توان به وسیله‌ی سیگنال PWM کنترل می‌شود و ساختار مدار کنترلی ساده می‌باشد. در یک سیستم PV بزرگ، این روش می‌تواند با بازدهی و امنیت بالا به کار گرفته

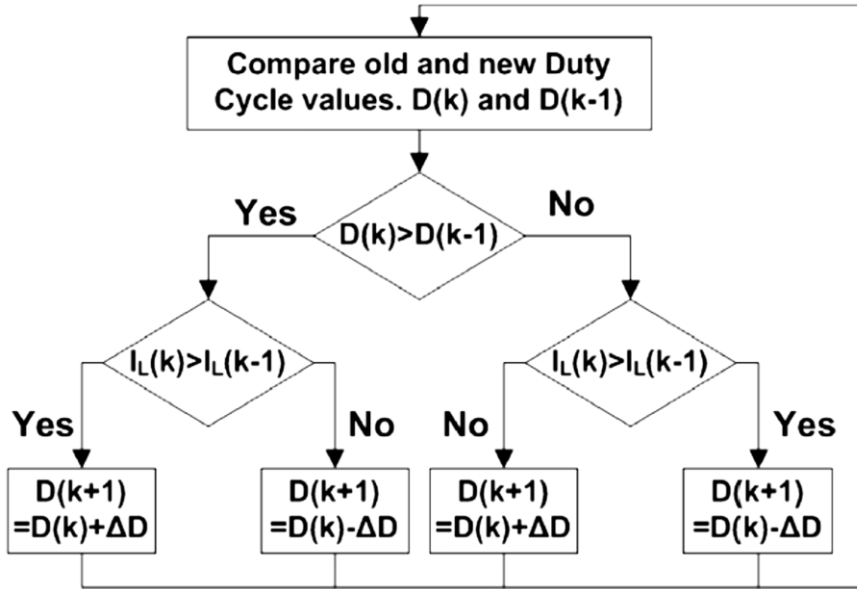


شود از آنجایی که فیدبک ولتاژ و جریان از پنل نداریم.

شکل ۱۳: فلوجارت روش سلول PV

شکل ۱۴: طرح کلی روش POS





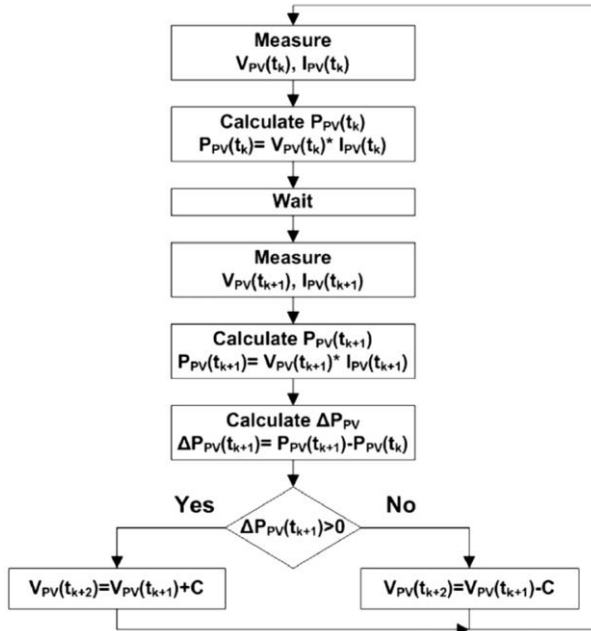
شکل ۱۵: فلوجارت روش POS

۳-۵. روش اغتشاش و مشاهده^۱

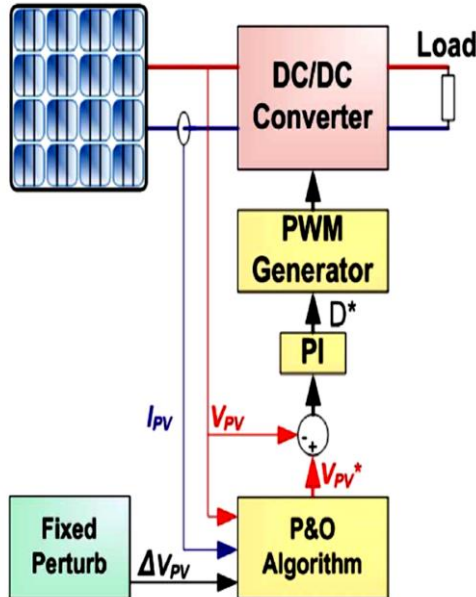
روش P&O یکی از پرستفاده‌ترین روش‌های MPPT است که بر مبنای سعی و خطا می‌باشد. در هر دوره عملکردی، جریان و ولتاژ PV به وسیله‌ی کنترل‌کننده ردیاب اندازه‌گیری و توان حقیقی PV محاسبه می‌شود؛ سپس با تغییر ولتاژ عملکرد و ملاحظه‌ی تغییرات توان، در نقطه‌ی کار سلول اغتشاش ایجاد می‌کند. در این حالت اگر توان افزایش یافت، جهت اغتشاش بعدی مشابه خواهد بود اما اگر توان با تغییر ولتاژ کاهش یابد، جهت اغتشاش بعد باید در خلاف جهت قبل باشد. این روند تا حصول MPP به طور بی‌وقفه ادامه دارد. در واقع در نقطه‌ای که در آن $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ صدق کند، حداکثر توان قابل دستیابی می‌شود. فلوجارت و طرح کلی مربوط به این روش به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نمایش داده شده است.

از مزایای اصلی روش P&O عدم نیاز به مشخصه‌ی سلول و قابلیت پیاده‌سازی برای انواع پنل‌ها می‌باشد. تقسیم‌بندی اغتشاش‌ها مهم‌ترین مسئله‌ای است که در این روش باید مدنظر قرار گیرد. اگر پله‌ها بزرگ باشند سرعت عملیات بالا رفته اما از دقت کاسته می‌شود و در صورت کوچک بودن پله‌ها زمان افزایش یافته اما پاسخ دقیق‌تر خواهد بود. بنابراین با توجه به هر کاربرد

باید تقسیم‌بندی خاصی انتخاب و صورت گیرد. به علاوه در صورتی که اندازه‌ی پله‌ها متغیر باشد می‌توان پاسخ بهتری دریافت کرد. (IV Banu 2013)



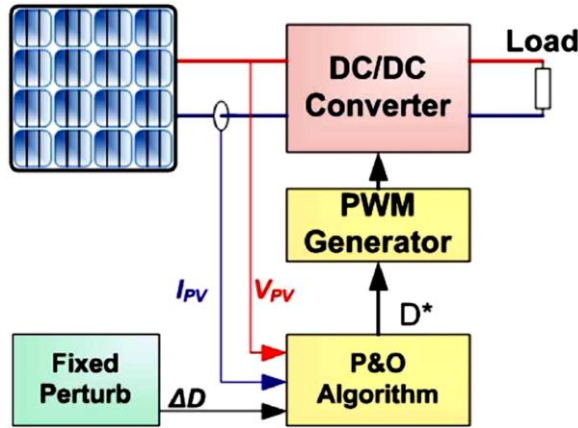
شکل ۱۶: فلوجارت روش P&O



شکل ۱۷: طرح کلی روش P&O

۴-۵. روش تعدیل یافته P&O^۱

در این روش، به جای استفاده از ولتاژ پنل به عنوان عامل متغیر، مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب عملیات کنترل راحت‌تر خواهد بود، چرا که پس از بلاک MPPT هیچگونه هیستریزیس به وجود آمده رخ نخواهد داد. اندازه‌ی اغتشاش در این حالت ثابت و برابر با مقدار پیش‌فرض می‌باشد بنابراین هم‌چنان بحث بهینه‌سازی برای رسیدن به یک پله‌ی معین وجود دارد. طرح کلی این روش در شکل ۱۸ مشخص شده است.



شکل ۱۸: طرح کلی روش تعدیل یافته‌ی P&O

۵-۵. روش معمولی P&O با اغتشاش تطبیقی^۲

در این روش مقدار پله متغیر می‌باشد و ابتدا میزان تغییر ولتاژ برابر با ۱۰٪ از مقدار ولتاژ مدار باز در نظر گرفته می‌شود. پس از هر پله‌ی موفق، اندازه‌ی پله‌ی بعدی تقسیم بر دو می‌گردد تا زمانی که به مقدار ۰/۵٪ از ولتاژ مدار باز برسد. این روش نیز به طور کامل دقیق نمی‌باشد، چرا که ولتاژ مدار باز، خود به شرایط محیطی وابسته است؛ پس نمی‌توان این روش را به عنوان یک روش کاملاً تطبیقی در نظر گرفت. طرح کلی این روش در شکل ۱۹ قابل مشاهده است.

۶-۵. روش تعدیل یافته‌ی P&O با اغتشاش تطبیقی^۳

در این روش مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل از طریق رابطه‌ی (۲۴) به دست می‌آید.

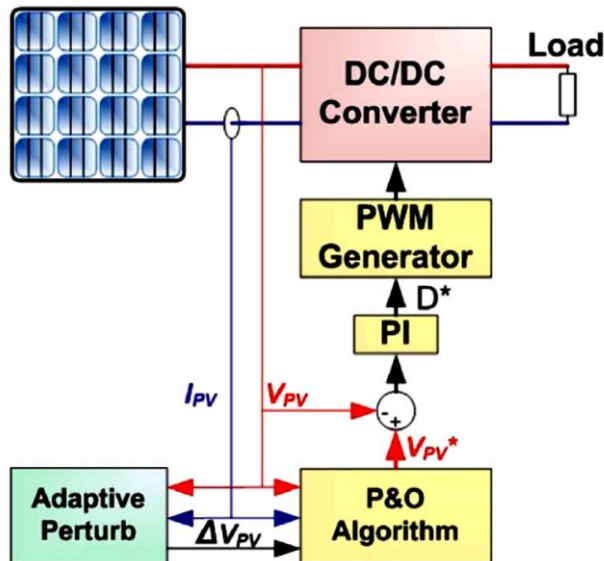
$$d(k) = d(k-1) \pm \frac{\Delta P / \Delta d}{P/d} \quad (24)$$

^۱ Modified P&O with Fixed Perturbation Step

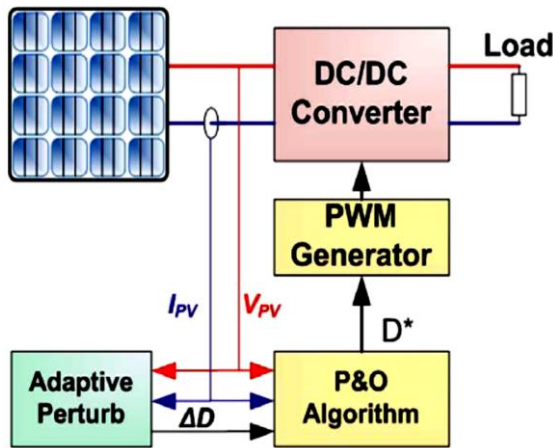
^۲ Conventional P&O with Adaptive Perturbation

^۳ Modified P&O with Adaptive Perturbation

در این حالت سیستم عملکرد، دقت بالایی خواهد داشت اما بار محاسباتی بسیار زیاد می‌گردد. طرح کلی این روش در شکل ۲۰ مشخص است.



شکل ۱۹: روش معمولی P&O با اغتشاش تطبیقی



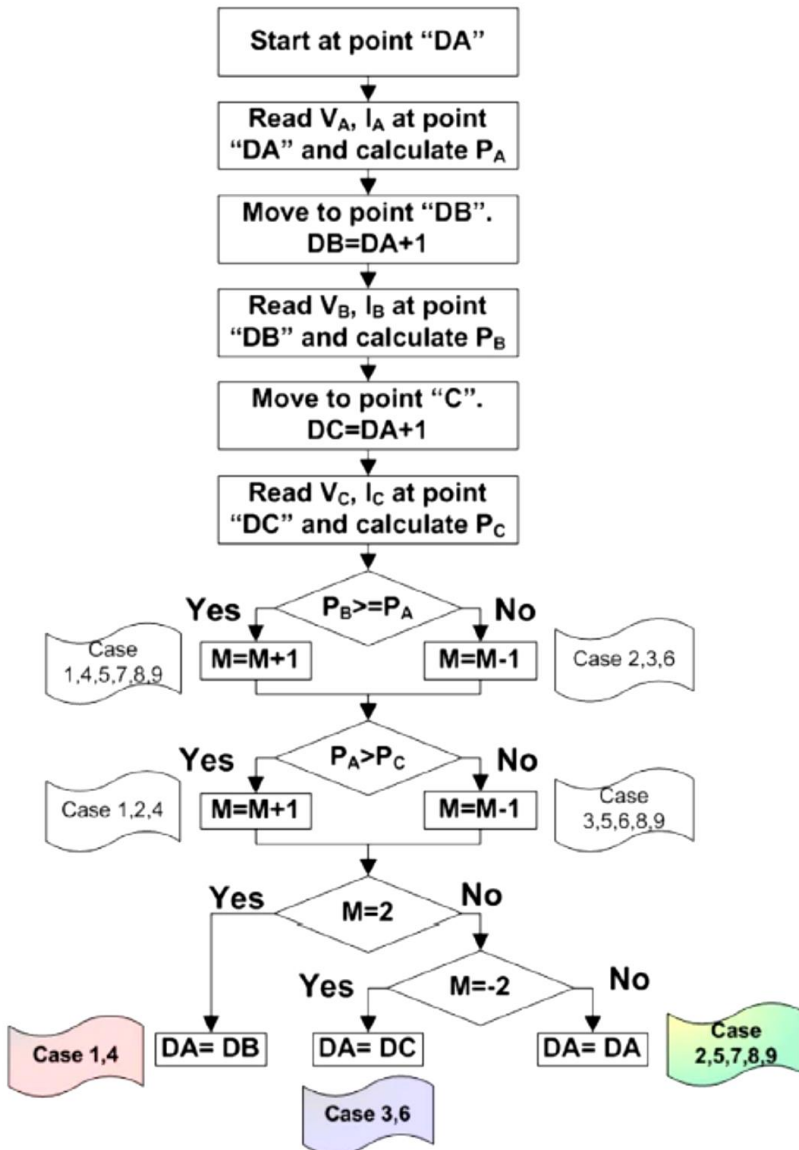
شکل ۲۰: طرح کلی روش تعدیل یافته‌ی P&O با اغتشاش تطبیقی

۵-۷. روش مقایسه‌ی وزنی ۳ نقطه‌ای^۱

فلوچارت این روش در شکل ۲۱ نمایش داده شده است. این سیستم برخلاف روش P&O که دو نقطه را با یکدیگر مقایسه می‌کرد، از ۳ نقطه بهره می‌گیرد. این سه نقطه که در شکل ۲۲ نیز مشخص هستند عبارتند از:

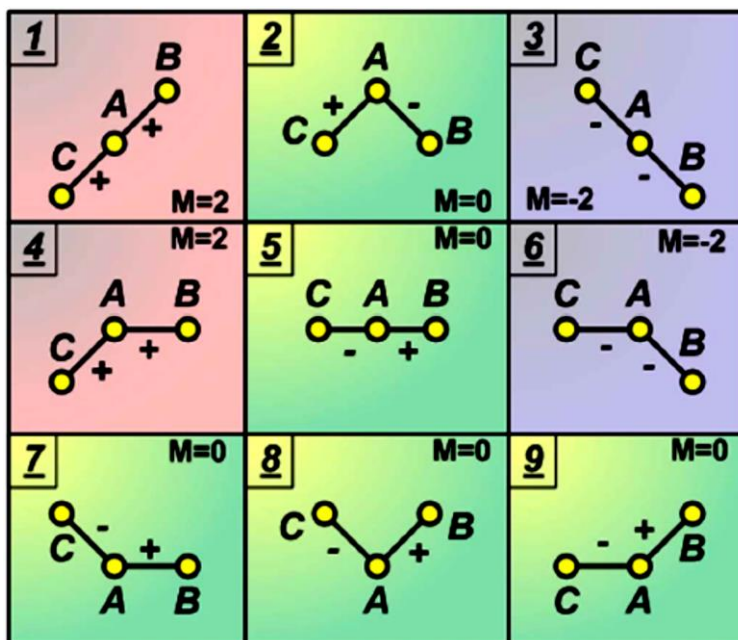
^۱ Three-point Weight Comparison Method

- نقطه‌ی جریان عملکرد A
 - نقطه‌ی B، تغییر یافته‌ی A
 - نقطه‌ی C، تغییر یافته‌ی A به میزان ۲ برابر در خلاف جهت B
- در نتیجه ۹ سناریوی مختلف به وجود خواهد آمد تا MPP به دست آید. در شکل ۲۲ این ۹ حالت قابل مشاهده هستند.



شکل ۲۱: فلوجارت روش مقایسه‌ی وزنی ۳ نقطه‌ای

در این روش اگر توان در B بزرگتر یا مساوی با توان در A باشد، وضعیت مثبت و در غیر این صورت وضعیت منفی در نظر گرفته می‌شود. زمانی که توان در C از توان در A کوچکتر باشد، وضعیت مثبت خواهد بود و بالعکس. حال اگر دو نقطه از سه نقطه به دست آمده مثبت باشند، مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل افزایش خواهد یافت و در صورتی که منفی باشند، اندازه‌ی دوره‌ی عملکرد مبدل تغییرات منفی خواهد داشت. در نهایت، زمانی که یکی مثبت و دیگری منفی باشد، MPPT حاصل می‌شود.



شکل ۲۲: حالت احتمالی متغیر در روش مقایسه‌ی وزنی ۳ نقطه‌ای

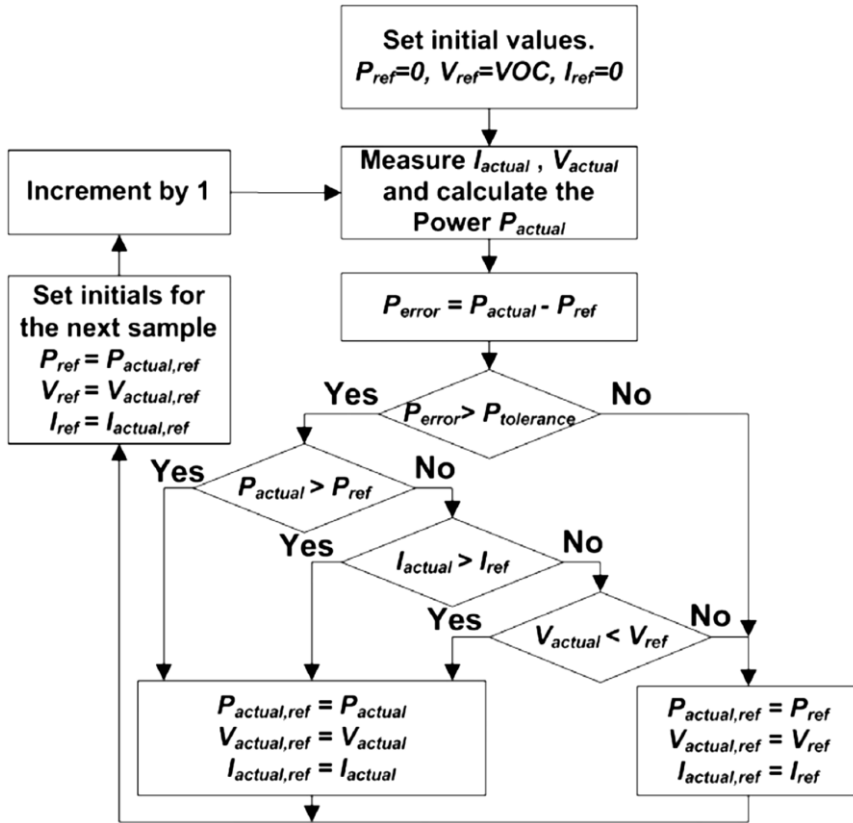
۵-۸. روش جستجوی آنلاین MPP^۱

مبنای این روش، مقایسه‌ی حداکثر توان مرجع با توان واقعی می‌باشد که به اختلاف این دو مقدار، خطای حداکثر توان اطلاق می‌شود. پنل PV زمانی در حالت MPP خواهد بود که مقدار این خطا صفر باشد.

در ابتدا پارامترهای اولیه‌ی MPP یعنی توان P_{ref} و جریان I_{ref} صفر در نظر گرفته می‌شوند و ولتاژ V_{ref} برابر ولتاژ مدار باز پنل قرار داده می‌شود. در هر مرحله نمونه‌برداری، مقدار خطا ($P_{error} = P_{ref} - P_{actual}$) محاسبه شده و با حداکثر خطای قابل قبول $P_{tolerance}$ مقایسه می‌شود. اگر P_{error} از $P_{tolerance}$ کوچکتر باشد، آن‌گاه مقادیر P_{ref} ، I_{ref} و V_{ref} بدون تغییر خواهند ماند و به عنوان مقادیر عملیاتی قرار داده می‌شوند. هر گاه P_{error} از $P_{tolerance}$ بیشتر باشد، سیستم به دنبال یک MPP جدید خواهد رفت. چنانچه P_{actual} از $P_{tolerance}$ بیشتر باشد، مقادیر P_{actual} ،

^۱ On-line MPP Search Algorithm

V_{actual} و I_{actual} به ترتیب به عنوان $P_{actual,ref}$ ، $V_{actual,ref}$ و $I_{actual,ref}$ قرار خواهند گرفت و این بار به عنوان مرجع استفاده خواهند شد. در واقع این روش بر مبنای توان بار عمل می‌کند به طوری که ولتاژ خروجی پنل (V_{actual}) در این روش تغییر یافته و میزان جریان بار ($I_{actual,ref}$) برای رسیدن به MPP افزایش یا کاهش داده می‌شود. لازم به ذکر است که این روش برای بارهای کوچک پاسخگو نخواهد بود. شکل ۲۳ فلورچارت این سیستم را نمایش می‌دهد. (Saravana Selvan 2016)



شکل ۲۳: روش جستجوی آنالین MPP

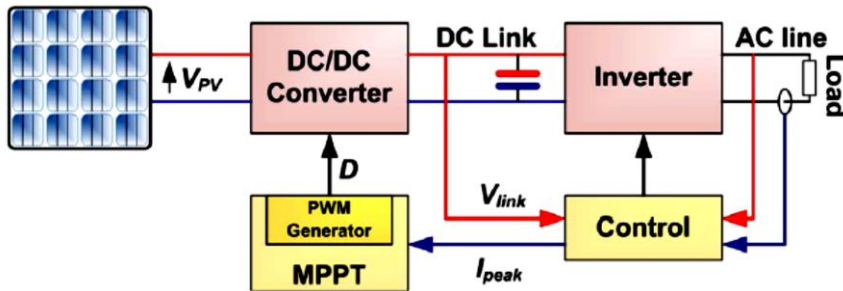
۹-۵. روش کنترل خازن با لینک DC^۱

این روش مختص یک سیستم PV که به یک مبدل AC متصل است، ارائه شده که طرح کلی این سیستم در شکل ۲۴ مشخص شده است. در این حالت ولتاژ ورودی V_{PV} و ولتاژ خروجی V_{link} با معادله‌ی (۲۵) به یکدیگر مرتبط می‌شوند.

$$D = 1 - \frac{V_{PV}}{V_{link}} \quad (25)$$

^۱ DC-Link Capacitor Droop Control Method

که در آن D برابر با دوره‌ی عملکرد اینورتر ایده‌آل می‌باشد. نحوه‌ی کار این سیستم بر اساس شناسایی افت ولتاژ در خازن لینک DC می‌باشد (V_{link}). با در نظر گرفتن مقدار ثابت برای V_{link} ، افزایش جریان اینورتر به منزله‌ی افزایش توان PV خواهد بود. این افزایش جریان نباید به بیش از حد توان PV شود؛ چنانچه این اتفاق بیفتد، مقدار V_{link} کاهش خواهد یافت. بنابراین قبل رخ دادن این اتفاق، مقدار I_{peak} مبدل در حداکثر خود قرار خواهد گرفت.



شکل ۲۴: طرح کلی روش کنترل خازن با لینک DC

۱۰-۵. روش تنظیم مجدد آرایه^۱

در این روش آرایه‌های PV در ترکیبات سری و موازی مختلف به گونه‌ای قرار می‌گیرند که مقدار MPP دارای مشخصات خاصی باشد که باعث می‌شود این روش زمان زیادی را در بر گیرد. در این حالت یک آرایه‌ی خورشیدی به دو پنل تقسیم خواهد شد که یکی به عنوان پنل ساده و دیگری خود به چند پنل بخش‌بندی می‌شود. اتصال پنل‌ها می‌تواند به صورت سری، موازی یا سری-موازی باشد.

۱۱-۵. روش MPPT با یک نشانگر متغیر^۲

این تکنیک متشکل از مبدل باک^۳ به همراه PV و بار می‌باشد که مبدل باک شامل یک فیلتر AC است. در این روش یک رابطه بین حداقل مقدار نشانگر و جریان PV مدل‌سازی می‌شود تا MPP به دست آید. حداقل مقدار اندوکتانس در یک مبدل باک برای عملکرد صحیح آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

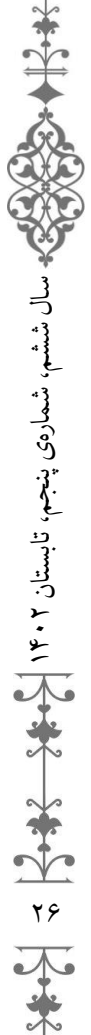
$$L_{min} = \frac{R_L(1-D)}{2f_s} \quad (26)$$

که در آن R_L مقاومت بار، D دوره‌ی عملکرد مبدل باک و f_s فرکانس کلیدزنی می‌باشد. رابطه‌ی جریان ورودی I_{PV} و جریان خروجی I_L مبدل باک به صورت زیر خواهد بود:

¹ Array Reconfiguration Method

² MPPT with a Variable Indicator

³ Buck Converter



$$I_{PV} = I_L D \quad (27)$$

از طرفی امپدانس ورودی R_i و خروجی R_L مبدل به صورت زیر با یکدیگر مرتبط می‌باشند:

$$R_i = \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = \frac{1}{D} \frac{V_L}{I_L} = \frac{1}{D} R_L \quad (28)$$

که در آن V_L و I_L به ترتیب ولتاژ و جریان بار هستند.

از ترکیب معادلات (۲۸-۲۶) حداقل اندوکتانس به دست خواهد آمد:

$$L_{min} = \frac{D(1-D)V_{PV}}{2f_s I_L} = \frac{D^2(1-D)V_{PV}}{2f_s I_{PV}} \quad (29)$$

با در نظر گرفتن ولتاژ ثابت PV برای تمامی شدت‌های تابش، L_{min} تابعی از D و I_L خواهد

بود.

۶. تکنیک‌های ردیابی با استفاده از محاسبات ریاضی

۶-۱. ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان بر مبنای فضای حالت^۱

در این روش، سیستم PV با یک فضای حالت تعریف می‌شود و از یک کنترل‌کننده فیدبک دینامیکی غیرخطی متغیر با زمان برای ردیابی MPP استفاده می‌کند. این روش سریع می‌باشد و به تغییر در پارامترهای PV و نیز شرایط محیطی وابسته نیست. این روش هنوز به صورت عملی مورد استفاده قرار نگرفته است.

۶-۲. روش جهت‌یابی مختصات خطی^۲

این سیستم با استفاده از تکرار، معادله‌ی MPP مربوط به مشخصه‌های آرایه‌ی PV را حل می‌کند، به گونه‌ای که معادله را تغییر می‌دهد تا یک مقدار مشخص برای MPP به دست آید که برای این کار از مقادیر ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه و دیگر مقادیر تعیین‌کننده‌ی مشخصه‌ی آرایه‌ی PV استفاده می‌کند.

۶-۳. روش استفاده از منحنی^۳

در این روش توان پنل بر حسب ولتاژ آن به صورت زیر مدل می‌شود:

$$P_{PV} = aV_{PV}^3 + bV_{PV}^2 + cV_{PV} + d \quad (30)$$

که در آن a ، b ، c و d ضرایب به دست آمده با نمونه‌برداری از توان، ولتاژ و جریان PV هستند.

در این حالت ولتاژ MPP به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$V_{MPP} = \frac{-b\sqrt{b^2 - 3ac}}{3a} \quad (31)$$

¹ State-based MPPT Method

² Linear Reoriented Coordinates Method (LRCM)

³ Curve-fitting Method

این محاسبات باید با سرعت بالایی تکرار شوند تا دقت بالاتری حاصل گردد. این روش نیاز به دانستن پارامترهای فیزیکی PV و مشخصات ساخت آن می‌باشد و شرایط محیطی نیز دقیقاً باید در آن لحاظ شوند. در نتیجه نیازمند حافظه‌ی زیاد و سیستم پردازنده‌ی قدرتمند می‌باشد.

۶-۴. روش دیفرانسیلی^۱

در این روش محل MPP با حل معادله‌ی (۳۲) به دست می‌آید:

$$\frac{dP_{PV}}{dt} = V_{PV} \quad \text{and} \quad \frac{dI_{PV}}{dt} + I_{PV} \frac{dV_{PV}}{dt} = 0 \quad (32)$$

این سیستم نیازمند یک پردازنده‌ی قوی برای حل معادله‌ی بالا می‌باشد. در واقع در این روش

۸ مرحله محاسبات وجود دارد که عبارتند از:

- اندازه‌گیری V_{PV}
- اندازه‌گیری I_{PV}
- اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ dV_{PV} در حین زمان اغتشاش dt
- اندازه‌گیری تغییرات جریان dI_{PV} در حین زمان اغتشاش dt
- محاسبه‌ی حاصل ضرب V_{PV} و dI_{PV}
- محاسبه‌ی حاصل ضرب I_{PV} و dV_{PV}
- محاسبه‌ی حاصل جمع دو سطر قبلی
- مقایسه‌ی حاصل جمع محاسبه شده با یک اغتشاش مشابه در سمت دیگری از نقطه‌ی

عملکرد

چنانچه مجموع حاصل شده غیر صفر باشد، یک مرحله محاسباتی دیگر نیز اضافه خواهد شد که جهت تنظیمات مورد نیاز برای رسیدن به MPP را مشخص خواهد کرد.

۶-۵. روش کنترل اسلاید^۲

این روش بر مبنای محاسبه‌ی تغییرات توان PV بر حسب تغییرات ولتاژ آن می‌باشد. در این روش معادله ۳۳ مطرح است:

$$S = \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (33)$$

که در آن S مشخص‌کننده‌ی جهت ولتاژ عملکرد بر حسب محل MPP است. در این روش، ردیابی نقطه حداکثر با استفاده از کنترل مبدل DC/DC صورت می‌پذیرد. این در حالی است

¹ Differentiation Method

² Slide Control Method

که از پارامتر u برای مدل کردن این روش مطابق با رابطه‌ی (۳۴) استفاده می‌شود، که صفر بودن این پارامتر به معنای باز بودن و یک بودن آن به معنای بسته بودن کلید بسته است.

$$u = 0 \quad S \geq 0$$

$$u = 1 \quad S < 0$$



۶-۶. روش کنترل فیدبک dP/dI یا dP/dV

در این روش مقدار شیب dP_{PV}/dV_{PV} یا dP_{PV}/dI_{PV} از روی منحنی توان محاسبه می‌شود و به وسیله‌ی مبدل نقطه‌ای که شیب در آن صفر است، شناسایی صورت می‌گیرد. با توجه به علامت به دست آمده از دوره‌های قبلی، مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل می‌تواند صعودی یا نزولی باشد تا MPP حاصل شود.

۶-۷. روش هدایت صعودی^۱

روش IC نیز بر مبنای دیفرانسیل توان PV نسبت به ولتاژ آن می‌باشد و MPP زمانی رخ می‌دهد که حاصل دیفرانسیل صفر باشد. در واقع این روش از معادلات (۳۵) و (۳۶) استفاده می‌کند:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV}I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{V_{PV}}{I_{PV}} = - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} \quad (36)$$

معادلات (۳۵) و (۳۶) در شکل‌های ۳ و ۴ نیز نمایش داده شده‌اند و مقادیر dI_{PV} و dV_{PV} از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$dV_{PV}(t_2) \approx \Delta V_{PV}(t_2) = V_{PV}(t_2) - V_{PV}(t_1) \quad (37)$$

$$dI_{PV}(t_2) \approx \Delta I_{PV}(t_2) = I_{PV}(t_2) - I_{PV}(t_1) \quad (38)$$

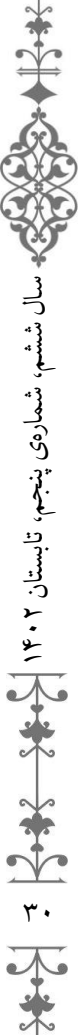
در معادله‌ی (۳۶) مشتق اول، دور یا نزدیک بودن نقطه‌ی عملکرد PV نسبت به MPP را تعیین می‌کند. فلوجارت مربوط به این روش در شکل ۲۴ مشخص شده است.

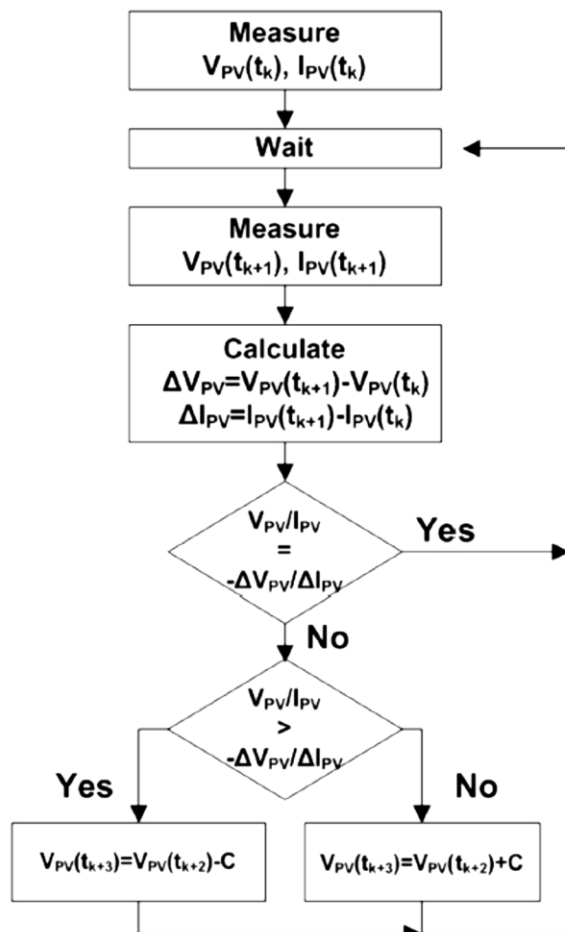
$$\frac{V_{PV}}{I_{PV}} = - \frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} \quad \text{at MPP}$$

$$\frac{V_{PV}}{I_{PV}} < - \frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} \quad \text{left to MPP}$$

$$\frac{V_{PV}}{I_{PV}} > - \frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} \quad \text{right to MPP}$$

¹ Incremental Conductance Method (IC)





شکل ۲۴: فوجارت روش IC

این روش در شرایط متغیر آب و هوایی پاسخی خوبی ارائه می‌کند؛ هم‌چنین نسبت به روش P&O نوسانات کمتری حول MPP دارد. البته در شرایطی که روش P&O کاملاً بهینه شده باشد، بازدهی آن با روش IC تقریباً برابر خواهد بود. با تمام این‌ها روش کنترل فیدبک به مدار کنترلی پیچیده‌ای نیاز خواهد داشت. (Ghislain Remy 2011)

۶-۸. روش کنترل صعودی با پله‌ی متغیر^۱

در این سیستم مشکل روش IC معمولی برطرف شده است. عملکرد این سیستم به نحوی است که دور بودن MPP باعث ایجاد پله‌های بزرگ‌تر می‌شود و با نزدیک شدن به آن، پله‌ها کوچک

¹ Variable Step Incremental Conductance Method

می‌گردند. این روش سرعت پاسخ‌گویی بالا و نوسانات پایینی دارد که از مزیت‌های آن عنوان می‌شود.

۶-۹. روش خازن انگلی^۱

مشابه روش IC می‌باشد با این تفاوت که اثر خازن انگلی سلول PV یعنی C_{ap} در آن لحاظ شده است. این اثر خازنی مزاحم باعث ایجاد خلل در عملکرد PV می‌شود. روش PC سیگنال خطا را کاهش می‌دهد و از آن برای به‌دست آوردن محل MPP استفاده می‌کند. با اضافه کردن تأثیر جریان خازنی خواهیم داشت:

$$C = k \left(\frac{V_{PV}(n)I_{PV}(n) - V_{PV}(n-1)I_{PV}(n-1)}{V_{PV}(n) - V_{PV}(n-1)} \right) \quad (40)$$

که در آن $V_{PV}(n)$ و $I_{PV}(n)$ مقادیر ولتاژ و جریان PV در n امین نمونه‌برداری هستند و k ضریب تنظیم می‌باشد. در نتیجه برای جریان و ولتاژ داریم:

$$I_C(t) = C_{ap} \frac{dV_{PV}}{dt} \quad (41)$$

$$I_{PV}(t) = F(V_{PV}(t)) + C_{ap}V_{PV}(t) \quad (42)$$

$$P_{PV}(t) = [F(V_{PV}(t)) + C_{ap}\dot{V}_{PV}(t)]V_{PV}(t) \quad (43)$$

برای رسیدن به MPP باید داشته باشیم:

$$\frac{dP_{PV}(t)}{dV_{PV}(t)} = \frac{dF(V_{PV}(t))}{dV_{PV}(t)}V_{PV}(t) + F(V_{PV}(t)) = 0 \quad (44)$$

$$\frac{dF(V_{PV}(t))}{dV_{PV}(t)} = -\frac{F(V_{PV}(t))}{V_{PV}(t)} \quad (45)$$

سمت چپ معادله‌ی (۴۵) هدایت صعودی و سمت راست آن هدایت آنی را نشان می‌دهد. با مشتق‌گیری مجدد مقدار حداکثر به‌دست می‌آید:

$$\frac{dF(V_{PV}(t))}{dV_{PV}(t)} + C \left(\frac{\ddot{V}_{PV}(t)}{\dot{V}_{PV}(t)} + \frac{\dot{V}_{PV}(t)}{V_{PV}(t)} \right) + \frac{F(V_{PV}(t))}{V_{PV}(t)} = 0 \quad (46)$$

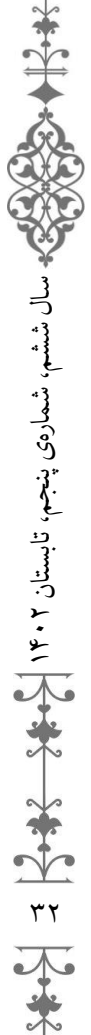
۶-۱۰. روش β

در واقع در این روش MPP توسط سیستم تخمین زده می‌شود. رابطه‌ی زیر برای β از طریق آنالیز مشخصه‌ی جریان-ولتاژ سلول خورشیدی حاصل می‌شود:

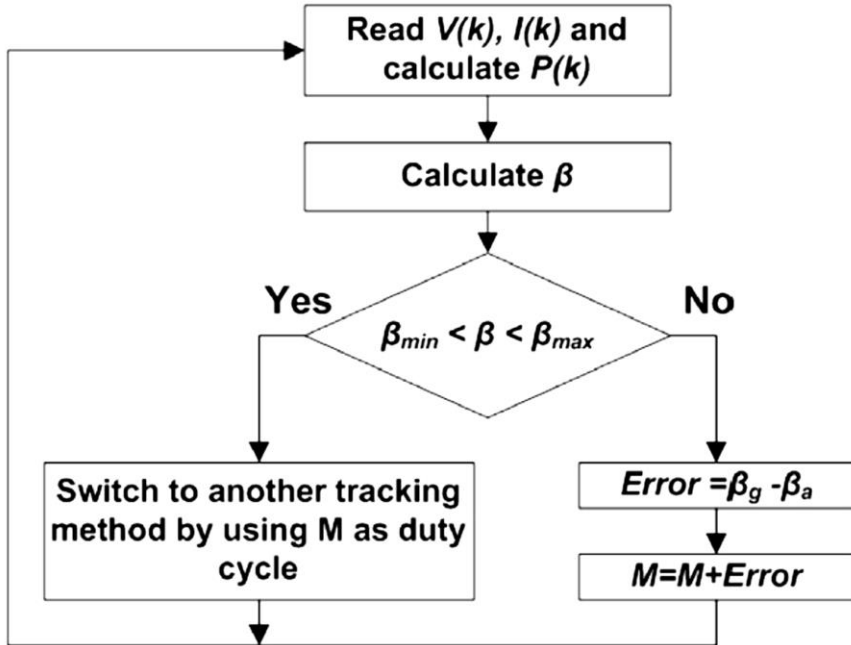
$$\beta = \ln \left(\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \right) - cV_{PV} = \ln(I_s c) \quad (47)$$

که در آن I_s نماینده‌ی جریان اشباع معکوس و c به عنوان ثابت دیود می‌باشد. در واقع می‌توان گفت مقدار β فقط به دما وابسته است و بستگی به تابش نخواهد داشت. زمانی که دما در یک محدوده‌ی مشخصی تغییر نماید، اندازه‌ی β در MPP نیز در یک محدوده، متغیر خواهد بود،

¹ Parasitic Capacitance Method (PC)



به نحوی که β_{min} مربوط به کمترین دما و تابش می باشد و بالعکس. برای شروع کار در این روش از β_g و β_a به عنوان محدوده های β استفاده می شود که به ترتیب بیانگر مقدار β در



محتمل ترین شرایط دمایی پنل و β در آن لحظه می باشند. فلوجارت این سیستم در شکل ۲۵ قابل مشاهده است.

شکل ۲۵: فلوجارت روش β

آزمایش ها نشان داده اند زمانی که توان خروجی PV در نزدیکی MPP باشد، مقدار β در محدوده ی کوچکی نوسان خواهد کرد. از همین ویژگی برای تعیین محل MPP استفاده می شود. در صورت استفاده از پله های صعودی بزرگ، سرعت کار بسیار بالا می باشد ولی پله های کوچک باعث افزایش دقت خواهند شد و سیستم سرعت قابل قبولی نیز خواهد داشت.

۱۱-۶. روش محاسبه V_{MPP} و I_{MPP}

در این روش، مقادیر جریان و ولتاژ MPP با توجه به معادله ی استاندارد جریان PV به دست می آید. پس از انجام محاسبه، از یک فیدبک کنترلی جهت وادار کردن سیستم به عملکرد در MPP استفاده می گردد. رابطه ی توان PV به صورت زیر می باشد:

$$P_{PV} = V_{PV}I_{PV} = I_{PV} \left[V_s + \beta(T - T_{ref}) + R_s I_s - \frac{I_{PV}}{N_p} [R_s + k(T - T_{ref})] \right] N_s \quad (48)$$



که در آن V_s و I_s به ترتیب ولتاژ و جریان خروجی پنل، T و T_{ref} به ترتیب دمای واقعی و دمای استاندارد، β ضریب دمایی، R_s مقاومت سری پنل، k ضریب تصحیح منحنی و N_s تعداد پنل‌های سری شده هستند. از مشتق P_{PV} نسبت به I_{PV} مقادیر ولتاژ و جریان MPP به صورت ذیل به دست خواهند آمد:

$$I_{MPP} = \frac{N_P V_s + \beta(T - T_{ref}) + R_s I_s}{2 R_s + k(T - T_{ref})} \quad (49)$$

$$V_{MPP} = \frac{N_s}{2} V_s + \beta(T - T_{ref}) + R_s I_s \quad (50)$$

۷. تکنیک‌های ردیابی با روش پیش‌بینی هوشمند

۷-۱. روش کنترلی منطقی فازی^۱

ردیاب‌هایی که بر اساس منطق فازی ساخته می‌شوند، هوشمند هستند؛ زیرا حتی اگر ورودی آن‌ها دقیق نباشد، MPP را پیدا و دنبال می‌کنند. عموماً کنترل فازی از سه مرحله تشکیل شده است: فازی کردن^۲، جدول مشاهده^۳ و غیرفازی کردن^۴. در مرحله اول مدل‌سازی، متغیرهای عددی ورودی به متغیرهای قابل فهم برای سیستم ترجمه می‌شود که خود پنج حالت فازی دارد: منفی بزرگ^۵، منفی کوچک^۶، صفر^۷، مثبت کوچک^۸ و مثبت بزرگ^۹. ورودی‌های کنترل‌کننده منطق فازی عموماً یک خطا (E) و تغییرات در خطا (ΔE) می‌باشد که نحوه‌ی به دست آوردن آن‌ها در معادلات (۵۱) و (۵۲) مشخص شده است.

$$E(n) = \frac{V_{PV}(n)I_{PV}(n) - V_{PV}(n-1)I_{PV}(n-1)}{V_{PV}(n) - V_{PV}(n-1)} \quad (51)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (52)$$

پس از محاسبه‌ی E ، ΔE و ترجمه‌ی آن‌ها به متغیرهای مدنظر، خروجی کنترل‌کننده فازی مطابق شکل ۲۶ به دست خواهد آمد که میزان تغییرات دوره‌ی عملکرد مبدل با توجه به آن شناسایی می‌شود. در مرحله‌ی غیرفازی کردن، نتیجه از طریق کنترل‌کننده از زبان

¹ Fuzzy Logic Control

² Fuzzification

³ Rule-base Lookup Table

⁴ Defuzzification

⁵ Negative Big (NB)

⁶ Negative Small (NS)

⁷ Zero (ZE)

⁸ Positive Small (PS)

⁹ Positive Big (PB)



منطق فازی به سیگنال آنالوگ قابل تشخیص برای مبدل تبدیل می‌شود. این روش در شرایط آب و هوایی متغیر به خوبی کار می‌کند اما نیاز به محاسبات خطای صحیح و دقیق دارد. (Hossain, Khan et al. 2011)

ΔE E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

شکل ۲۶: جدول روش منطق فازی

۲-۷. روش استفاده از شبکه‌ی عصبی^۱

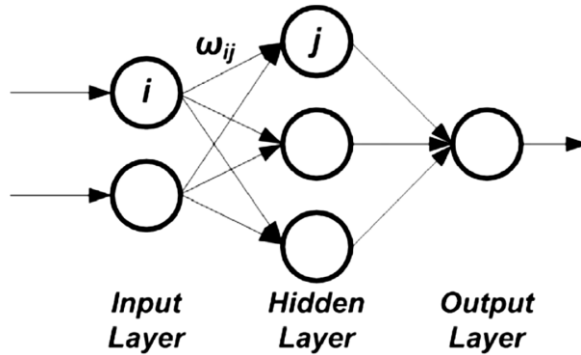
استفاده از شبکه‌ی عصبی نیز از روش‌های هوشمند MPPT عنوان می‌شود. این روش متشکل از سه لایه به نام‌های لایه‌های ورودی، مخفی و خروجی می‌باشد که در شکل ۲۷ نمایش داده شده‌اند. مقادیر ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه یا شرایط محیطی مثل دما، تابش یا ترکیبی از آن‌ها می‌تواند به عنوان ورودی‌های سیستم در نظر گرفته شود. خروجی سیستم، سیگنال ارسالی برای تعیین مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل خواهد بود و الگوریتم داخل لایه‌ی مخفی، کار تبدیل ورودی به خروجی دلخواه را انجام خواهد داد. برای ارتباط بین گره‌ها از وزن‌گذاری استفاده می‌شود که در شکل ۲۷ نیز وزن بین دو گره i و j به صورت W_{ij} قابل مشاهده می‌باشد.

در واقع روش شبکه‌ی عصبی بر مبنای وزن‌گذاری ارتباط میان گره‌ها از طریق عملیات-های تمرینی خاصی می‌باشد، به نحوی که پارامترهای PV در یک بازه‌ی طولانی ماهیانه یا سالانه مورد ضبط و آزمایش قرار می‌گیرند تا مقدار دقیق وزن هر شاخه تعیین شود. نقطه ضعف اصلی این سیستم، منحصر بودن آن برای یک نوع سلول است؛ یعنی نمی‌توان سیستمی ساخت که روی هر نوع PV با هر مشخصاتی عمل کند بلکه فقط می‌تواند برای

^۱ Neural Network



یک PV با پارامترهای معین طراحی شود. به علاوه با تغییر مشخصه‌های PV در طول زمان، اندازه‌گیری و محاسبات مجدد برای حفظ دقت شبکه‌ی عصبی ضروری خواهد بود. (M. F. N. Tajuddin 2015)



شکل ۲۷: لایه‌های شبکه عصبی

۳-۷. روش دنبال کردن ازدحامی بیولوژیکی^۱

این روش هوشمند از حرکت دسته‌جمعی جانوران به خصوص پرندگان یا حشرات الگو گرفته شده است. هوش ازدحامی یک تکنیک هوش مصنوعی در بردارنده‌ی اطلاعات یافت شده از رفتارهای جمعی در سیستم‌های غیر متمرکز می‌باشد. یکی از معروف‌ترین انواع هوش ازدحامی، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲ است؛ که از رفتار پرندگان و حرکت ماهی‌ها استنباط شده است. در روش پیشنهاد شده برای MPPT، هر پنل PV به عنوان یک ذره محسوب شده و MPP به عنوان هدف متحرک می‌باشد. هر پنل PV به گونه‌ای طراحی می‌شود که با استفاده از الگوریتم Bio-MPPT به دنبال نقطه‌ی حداکثر توان خود باشد. بنابراین با پیاده‌سازی تنظیمات ذکر شده روی یک سیستم PV، تمام پنل‌های یک آرایه به عنوان slave برای یک پنل به عنوان master فرض خواهند شد و هر پنل کنترل‌کننده خود را خواهد داشت که با کنترل‌کننده master در ارتباط خواهد بود تا MPP حاصل شود. میزان بازدهی این روش به صورت تجربی ۱۲/۱۹٪ از روش P&O بالاتر بیان شده است.

¹ Biological Swarm Chasing Algorithm

² Particle Swarm Optimization Method (PSO)

H. B. F. K. Boualem Bendib, "A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 637-648, 2015 .

M. A. V. P. Saleh Elkelani Babaa, "Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems," *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014 .

M. I. Hossain, S. A. Khan, M. Shafiullah and M. J. Hossain, "Design and implementation of MPPT controlled grid connected photovoltaic system," in *IEEE Symposium on Computers & Informatics*, 2011 .

M. I. Hossain, S. A. Khan, M. Shafiullah and M. J. Hossain, "Design and implementation of MPPT controlled grid connected photovoltaic system," in *IEEE Symposium on Computers & Informatics*, 2011 .

M. S. A. S. M. A. M. F. N. Tajuddin, "Perturbative methods for maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic (PV) systems: a review," *International Journal of Energy Research*, vol. 39, no. 9, 2015 .

N. M. R. O. Nabil Karami, "General review and classification of different MPPT Techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1-18, 2017 .

O. B. C. M. H. D. Ghislain Remy, "Review of MPPT Techniques for Photovoltaic Systems," *Laboratoire de Genie Electrique de Paris*, 2011 .

O. B. C. M. H. D. Ghislain Remy, "Review of MPPT Techniques for Photovoltaic Systems," *Laboratoire de Genie Electrique de Paris*, 2011 .

P. N. U. Saravana Selvan, "A Review on Photo Voltaic MPPT Algorithms," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, pp. 567-582, 2016 .

R. B. M. I. IV Banu, "Comparative analysis of the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods," in *8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE)*, 2013 .

S. L. Robert Faranda, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS Transactions on Power Systems*, 2008.



به‌سازی خاک رسی واگرا با استفاده از مصالح زائد:

خاکستر بادی، خاکستر پوسته‌ی برنج و آهک

مرتضی مبلّغ^۱

چکیده

با صنعتی شدن تولیدات، زائدات جانبی صنعتی در مقیاس بزرگی در حال تولید هستند؛ در نتیجه مخاطراتی برای محیط زیست به وجود نشان داده‌اند. دفع مستقیم این مواد زائد مثل خاکستر بادی، پودر سنگ‌ها، زائدات مصالح ساختمانی و زائدات کشاورزی تهدیدات بالقوه‌ای را برای اکوسیستم پدیدار ساخته است و وجود راه‌حل‌های فوری در این حوزه احساس می‌شود. یکی از راهکارهای مناسب، استفاده از این مصالح زائد به عنوان بهبوددهنده زیربناها یا اضافه‌شدن به مخلوط‌های تثبیت‌کننده سیمانی است. در مطالعه حاضر، خصوصیات تراکمی و مقاومتی خاک بهبود یافته با مصالح زائد گوناگونی مثل آهک، خاکستر بادی و خاکستر پوسته‌ی برنج بررسی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش بیان می‌کند که این مصالح زائد خصوصیات مهندسی خاک را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داده است.

واژگان کلیدی: به‌سازی خاک، مصالح صنعتی زائد، وزن خشک حداکثر، حدود آتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده.



^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

امروزه به علت گسترش بناها و زیرساخت‌ها زمین مناسب برای پیشبرد اهداف در حال کاهش است، از این رو مهندسان به ناچار سازه‌ها را روی خاک‌های ضعیف می‌سازند. برای افزایش ظرفیت باربری خاک و مصالح افزودنی روش‌های مختلفی به کار گرفته شده است. یکی از این روش‌ها بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک ناپایدار با استفاده از مصالح پوزولانی و پرکننده است. در این روش که تثبیت خاک نیز نامیده می‌شود، خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ضعیف برای اهداف مختلف، اصلاح یا بهبود می‌یابد. از خاک تثبیت شده با افزودنی‌ها می‌توان در جاده‌ها، فرودگاه‌ها و سایر فعالیت‌های عمرانی استفاده کرد. در سال‌های گذشته به علت افزایش تقاضا در بخش‌های عمرانی و پیشرفت تکنولوژی، مصالح افزودنی مختلفی برای تثبیت خاک به وجود آمده است. این مصالح می‌توانند از منابع زائدات طبیعی یا صنعتی تامین شوند. زائدات کشاورزی (خاکستر پوسته‌ی برنج^۱، خاکستر تفاله نیشکر^۲، پوسته تخم مرغ^۳)، خاکستر بادی^۴، سرباره گرانوله شده کوره بلند^۵، پودر سنگ مرمر^۶، زائدات پلاستیک، سیمان پرتلند، آهک، ماسه، زائدات شیشه، باکتری و زائدات ساخت و ساز عمرانی از جمله این مصالح هستند. همچنین از مصالح الیافی مثل الیاف پلی پروپیلن، الیاف جوت و الیاف پوست نارگیل نیز می‌توان برای بهسازی و تثبیت خاک استفاده کرد. (Sharma, 2021) در سمت مقابل، توسعه صنایع نقش کلیدی در رشد اقتصادی هر کشور ایفا می‌کند اما یکی از اثرات منفی رشد صنایع مختلف، تولیدات جانبی صنعتی و مسائل مربوط به دفع آن‌ها است که می‌تواند تأثیراتی منفی بر محیط زیست داشته باشد. به طور کلی، در صورتی که ضایعات به طور استاندارد بازیافت نشوند، به طور مستقیم در محیط زیست انباشته می‌شوند و از طریق ورود به مسیرهای آبی باعث آلودگی محیط زیست خواهند شد. بنابراین، انباشت ضایعات، خطری جدی برای محیط زیست قلمداد می‌شود و محققان باید راه حل‌های مناسبی برای رفع این مشکل ارائه دهند. یکی از راه‌های مناسب، استفاده از مصالح زائد صنعت ساخت و ساز است که می‌توان از آن‌ها در مصالح سیمانی و تثبیت خاک‌های مسئله‌دار نیز استفاده کرد. از مزایای استفاده از مصالح زائد در بهسازی خاک مسئله‌دار می‌توان به حفظ منابع طبیعی با کاهش انباشت‌های صنعتی و مقرون به صرفه بودن آن اشاره کرد. (Bibak; et al. 2020) در مطالعه حاضر، برای انجام این کار به استفاده از مصالح گوناگونی مانند FA، RHA و آهک اشاره شده و خصوصیات تراکمی و مقاومتی خاک بهبود یافته نیز بحث می‌شود.

¹ Rice hush ash (RHA)

² Bagasse ash

³ Chicken eggshell

⁴ Fly ash (FA)

⁵ Ground granulated blast furnace slag (GGBFS)

⁶ Marble powder (MP)

۲. پیشینه‌ی تحقیق

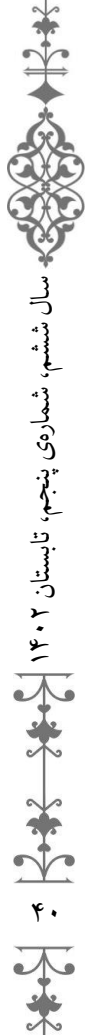
خاکستر پوسته‌ی برنج (RHA) یک مواد افزودنی است که می‌تواند رفتار ژئوتکنیکی خاک را بهبود بخشد. با افزایش مقدار RHA در خاک، به علت سطح ویژه بالا جذب آب برای فرایند هیدراتاسیون و در نتیجه رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. از طرفی به دلیل کلوخه شدن ذرات رس، حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد. با اضافه کردن ۱۲٪ خاکستر پوسته‌ی برنج، به علت واکنش‌های رخ داده در ذرات خاک مقادیر نسبت باربری کالیفرنیا^۱ (CBR) و مقاومت فشاری محدود نشده^۲ (UCS) به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. (Sharma, 2021)

اصلاح خاک به وسیله‌ی آهک به ویژه در خاک‌های CL، موجب افزایش درصد رطوبت بهینه، کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک، کاهش پتانسیل تورم، افزایش مقاومت و افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. تأثیر آهک بر خاک را می‌توان به دو گروه تثبیت کوتاه‌مدت و بلندمدت تقسیم‌بندی نمود. افزایش کارپذیری خاک جزء اصلاح کوتاه‌مدت است و مهم‌ترین عامل در مرحله ساخت اولیه است. افزایش مقاومت و دوام را می‌توان در نتیجه اثر بلندمدت آهک در نظر گرفت که در دوره‌ی عمل‌آوری و پس از آن رخ می‌دهد. (Thompson, 1965) از مسائل مهم دیگر در فرایند تثبیت، مقدار آهک مورد نیاز است. مقدار آهک مورد نیاز براساس درصد رس در خاک، خصوصیات خاک موردنظر و درجه تثبیت مطلوب متغیر می‌باشد. اگر هدف، فقط اصلاح خصوصیات خمیری خاک باشد افزودن آهک به میزان ۲٪ تا ۳٪ وزن خشک خاک کافی است. (Maher; et al. 2005) مقادیر بیشتر آهک برای انجام واکنش پوزولانی و افزایش مقاومت نیاز است. به منظور تثبیت، آهک به میزان ۵٪ تا ۱۰٪ وزن خشک خاک استفاده می‌شود. (Das, 1990) گروهی از پژوهشگران پیشنهاد کرده‌اند که حداقل آهک مورد نیاز برای تثبیت باید به اندازه‌ای باشد که بتواند $PH=12$ را تامین کند. (Yıldız, 2012) همچنین آهک باعث افزایش PH خاک می‌شود. با افزایش خاصیت قلیایی خاک، سیلیکا و آلومینای آزاد شده با کلسیم موجود در آهک وارد واکنش می‌شوند و کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH) و کلسیم آلومینات هیدرات (CAH) تشکیل خواهد شد. این ترکیبات مانند لخته‌های یکپارچه باعث استحکام بیشتر ذرات خاک شده، در نتیجه خاک رس از حالت خمیری و تورمی شدید به رفتار دان‌های و نشست‌ناپذیر تبدیل خواهد شد. (Di Sante; et al. 2015)

خاکستر بادی از اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم، آهن و کلسیم تشکیل شده است و امروزه از نیروگاه‌هایی که برای تولید برق از ذغال سنگ استفاده می‌کنند، به دست می‌آید. (Acosta; et al. 2003) از این رو خاکستر بادی نوعی از مصالح بلااستفاده صنعتی

¹ California Bearing Ratio

² Unconfined Compression Test



به حساب می‌آید و با توجه به قیمت پایین، مقرون به صرفه است. همچنین با اضافه کردن خاکستر بادی، میزان کلسیم محلول و فعالیت پوزولانی افزایش می‌یابد. اضافه کردن خاکستر بادی به صورت قابل توجهی مقدار pH را افزایش می‌دهد. با بالا رفتن pH، سیلیکای خاک از ساختمان ورقه‌ای چهاروجهی خود و آلومینای خاک از ساختمان ورقه‌ای می‌گیرد. (Acosta; et al. 2003)، (Cokca, 2003) و (Parabakar; et al. 2004) اشاره کرد که در گزارشات خود به افزایش CBR، ظرفیت باربری، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت برشی و کاهش درصد جذب آب خاک اشاره کرده‌اند.

در این پژوهش، از ترکیبات شامل خاکستر پوسته‌ی برنج (RHA)، خاکستر بادی (FA) و آهک به منظور بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رسی و اگر استفاده شده است که در ادامه به بررسی تاثیر هر کدام پرداخته خواهد شد.

۳. مصالح و روش‌ها

۳-۱. خاک

خاک استفاده شده در این تحقیق از عمق نیم متری از سطح زمین و حومه شهر تهران جمع‌آوری شده است که خصوصیات آن در جدول ۱ نشان داده شده است. این خاک در طبقه‌بندی رس سیلیتی با واگرایی بالا (MH) قرار می‌گیرد.

جدول ۱: ویژگی‌های پایه خاک پایه مورد مطالعه

مشخصات	مقدار	استاندارد
حد روانی LL	۷۶/۸۹	ASTM D4318
حد خمیری PL	۴۰/۴۳	ASTM D4318
شاخص خمیری PI	۳۶/۴۶	ASTM D4318
چگالی ذرات جامد G_s	۲/۶۹	ASTM D854
طبقه بندی خاک (USCS)	MH	ASTM D2487
وزن مخصوص خشک حداکثر (Mg/m^3)	۱/۴۹۸	ASTM D698
درصد رطوبت بهینه	۲۶/۱	ASTM D698
شن (%)	۰	ASTM D6913
ماسه (%)	۱۴/۱۷	ASTM D6913
ریزدانه (%)	۸۵/۸۳	ASTM D6913

۳-۲. خاکستر پوسته‌ی برنج

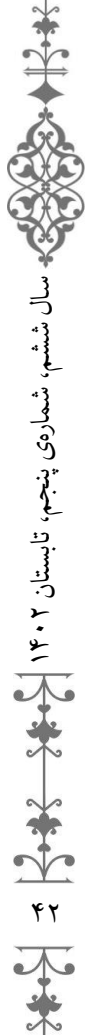
خاکستر پوسته‌ی برنج از سوزاندن پوسته‌ی برنج که یکی از ضایعات جانبی فرآوری برنج است به دست می‌آید. خصوصیات شیمیایی این محصول در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده، اکسید سیلیسیم (SiO_2) اکسید اصلی این افزودنی است.

جدول ۲: آنالیز شیمیایی XRF خاک پایه مورد مطالعه

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی (w%)
SiO_2	۹۱/۱
Al_2O_3	۰/۴
Fe_2O_3	۰/۴
CaO	۰/۴
Na_2O	۰/۱
MgO	۰/۵
LOI	۴/۸
سایر ترکیبات	۲/۳

۳-۳. خاکستر بادی

خاکستر بادی (FA) از گازهای خروجی کوره‌های آتش با سوخت ذغال و سیلت غیر پلاستیک و ریز استخراج می‌شود که ترکیبی متفاوت براساس سوخت ذغال طبیعی است. خاکستر بادی جزء مصالح زائد در نیروگاه‌های حرارتی می‌باشد. این ماده تولید شده در اثر سوختن سوخت، به وسیله ته‌نشین‌کننده‌ی الکترواستاتیکی یا فیلتر کیسه‌ای (یا هر دو) که در محل گازهای خروجی کوره قرار دارد، جمع‌آوری می‌شود. پس از جمع‌آوری خاکسترها آن‌ها را تا زمانی که به محل دیگری منتقل شوند به صورت فشرده در انبار نگهداری می‌کنند. خاکستر بادی به عنوان یک پوزولان برای ارتقای مقاومت ترکیب خاک استفاده شده است. آنالیز XRF خاکستر بادی استفاده شده در این پژوهش نشان می‌دهد که این افزودنی دارای ۶۴/۰۸٪ اکسید سیلیسیم، ۲۱/۲۰٪ اکسید آلومینیوم و ۴/۱۷٪ اکسید آهن است. بنابراین، بیش از ۷۰٪ وزنی در این مصالح حاوی اکسیدهای پوزولانی ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) می‌باشد که طبق استاندارد ASTM C618، پوزولان‌های فعال محسوب می‌شوند.



۳-۴. آهک

در این تحقیق، از آهک فعال به منظور افزایش درجه قلیایی (pH) خاک استفاده شده است. مقدار pH آهک استفاده شده در ترکیبات ۱۲/۸۰ می باشد. جدول ۳ مقدار pH طرح مخلوط‌های این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج آزمایش pH برای طرح‌های مخلوط

مقدار pH	طرح مخلوط
۱۱/۶۳	Soil + 4% RHA + 4% FA + 2% L
۱۲/۴۲	Soil + 4% RHA + 4% FA + 4% L
۱۲/۶۸	Soil + 4% RHA + 4% FA + 6% L
۱۲/۷۰	Soil + 4% RHA + 4% FA + 8% L

۴. بررسی نتایج آزمایشگاهی

طبق استانداردهای مورد نیاز، آزمایش‌های حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و شاخص خمیری (PI) روی خاک پایه و خاک بهسازی شده انجام شد و نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. با افزایش مقدار RHA از ۰٪ به ۴٪، حد روانی از ۷۶/۸۹٪ به ۶۶٪/۸۰٪ کاهش می‌یابد. پس از این محدوده افزایش RHA باعث افزایش حد روانی شده است. به طور کلی، با افزایش ذرات RHA میان ذرات خاک، جذب آب افزایش یافته است. روند شکل گرفته در حد خمیری نیز مانند حد روانی است؛ به طوری که با افزایش RHA، حد روانی نیز افزایش یافته و در نتیجه شاخص خمیری کاهش یافته است. همچنین شاخص تورم آزاد تا ۶۵٪ افزایش یافته است اما با اضافه کردن خاکستر بادی و آهک این میزان تا ۳۰٪ کاهش داشته است. این موضوع می‌تواند به این علت باشد که ذرات FA و آهک خاصیت پوزولانی بیشتری نسبت به RHA دارند و باعث چسبندگی بیشتر ذرات و در نتیجه کاهش منافذ بین ذرات می‌شوند. این موضوع در شاخص خمیری نیز قابل رویت است و می‌تواند دلیلی بر کاهش مقادیر این شاخص باشد.

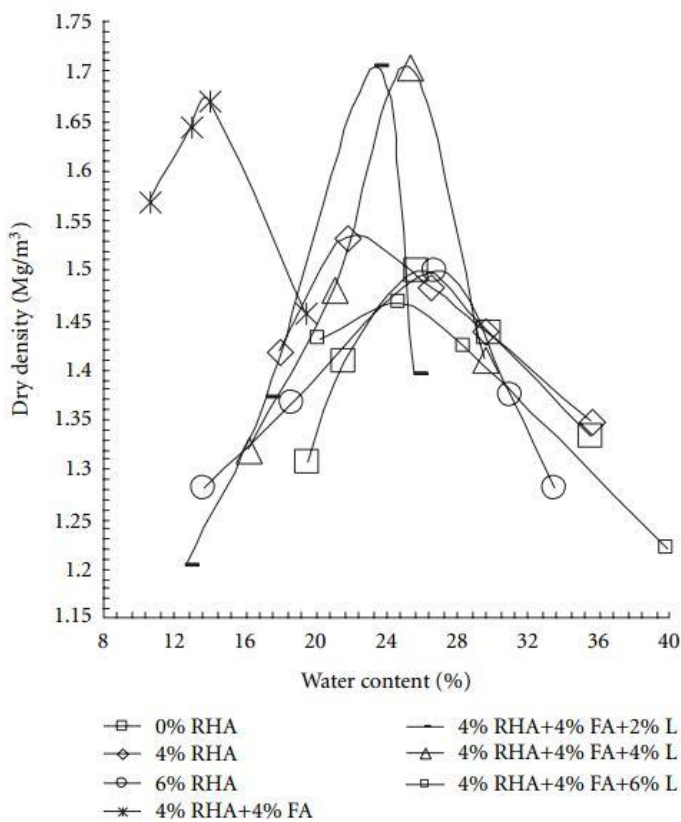
آزمایش تراکم استاندارد روی خاک پایه و خاک دارای افزودنی انجام شد. شکل ۱ نمودارهای تراکم را نشان می‌دهد. خصوصیات تراکمی حداکثر وزن مخصوص خشک^۱ (MDD) و رطوبت بهینه^۲ (OMC) نیز در جدول ۵ نشان داده شده است. باتوجه به نتایج، طرح مخلوط 4% RHA + 4% FA + 6% L به عنوان طرح مخلوط بهینه به دست آمده است.

¹ Maximum Dry Density

² Optimum Moisture Content

جدول ۴: تغییرات شاخص‌های حدود آتربرگ و تورم آزاد با اضافه کردن افزودنی‌ها

درصد افزودنی	LL (%)	PL (%)	PI (%)
2% RHA	۷۷/۵۱	۳۹/۱۶	۳۸/۳۵
4% RHA	۶۶/۸	۴۴/۳۶	۲۲/۴۴
6% RHA	۷۹/۱۴	۴۵/۶۶	۳۳/۴۸
8% RHA	۷۸/۳۸	۴۴/۰۵	۳۴/۳۳
10% RHA	۷۹/۱۴	۴۵/۶۶	۳۳/۴۸
12% RHA	۷۹/۸۶	۴۷/۸۲	۳۲/۰۴
4% RHA + 4% FA	۴۰/۲۹	۳۰/۳۷	۹/۹۲
4% RHA + 4% FA + 2% L	۶۳/۱۱	۳۹/۳۹	۲۳/۷۲
4% RHA + 4% FA + 4% L	۶۴/۷۵	۳۸/۰۲	۲۶/۷۳
4% RHA + 4% FA + 6% L	۵۶/۷۳	۳۷/۶۲	۱۹/۱۱

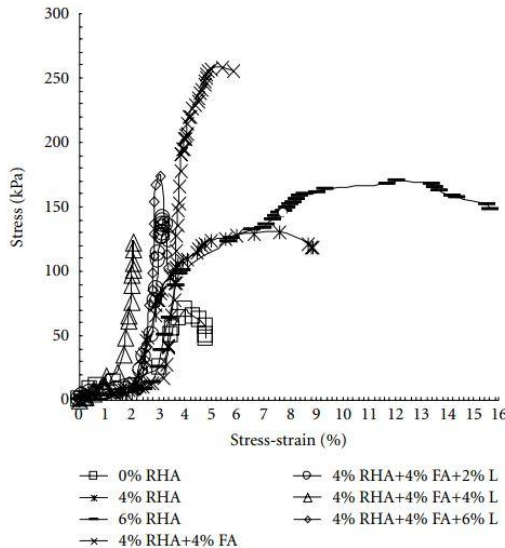


شکل ۱: منحنی تغییرات وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه با اضافه کردن افزودنی‌ها

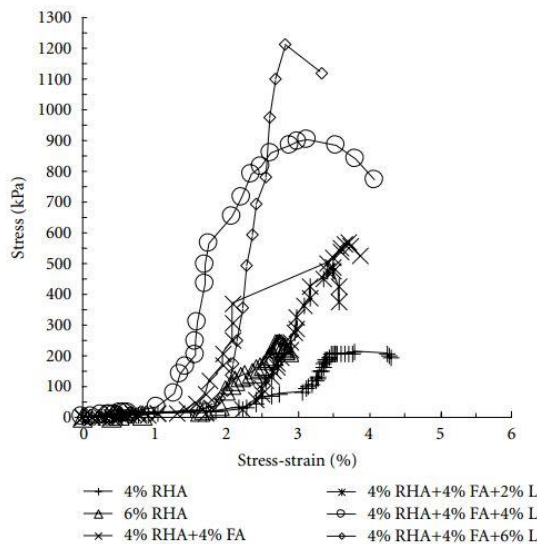
جدول ۵: تغییرات وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه

درصد افزودنی‌ها	MDD (Mg/m ³)	OMC (%)
4% RHA	۱/۵۳۲	۲۲/۵
6% RHA	۱/۴۹۹	۲۷
4% RHA + 4% FA	۱/۶۶	۱۳/۸
4% RHA + 4% FA + 2% L	۱/۷۱	۲۳/۳
4% RHA + 4% FA + 4% L	۱/۷۰۳	۲۵/۳
4% RHA + 4% FA + 6% L	۱/۴۷	۲۴/۸۱

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) در یک دوره ۷ روزه روی خاک پایه و خاک دارای افزودنی مطابق استاندارد ASTM D2166 انجام شد که نتایج آن در شکل‌های ۲ و ۳ و جدول ۶ نشان داده شده است. مطابق این نتایج، در روز اول عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش RHA از ۷۰ به ۱۶۹ کیلوپاسکال می‌رسد. اما با افزایش دوره عمل‌آوری به ۷ روز، مقاومت نمونه‌ها از ۷۰ به ۲۴۰ کیلوپاسکال می‌رسد که تاثیر مثبت عمل‌آوری دیده می‌شود. با اضافه کردن FA و آهک به مخلوط، در دوره یک روزه تاثیر قابل ملاحظه‌ای دیده نمی‌شود اما با گذشت ۷ روز، رشد قابل ملاحظه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌ها قابل مشاهده است، به طوری که مقاومت نمونه‌ها از ۵۶۶ به ۱۲۰۴ کیلوپاسکال می‌رسد. این موضوع به این علت است که خاصیت پوزولانی FA و آهک با افزایش زمان عمل‌آوری فعال شده و باعث ایجاد لخته‌های C-S-H می‌شود، از این رو مقاومت نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. این موضوع در کرنش نمونه‌ها نیز قابل مشاهده است. کرنش نمونه‌ها در دوره یک روزه تغییرات منظمی نداشته‌اند ولی با افزایش دوره عمل‌آوری، کرنش‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه جسم سخت‌تری به وجود می‌آید.



شکل ۲: منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های دوره ۱ روزه



شکل ۳: منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های دوره ۷ روزه

جدول ۶: نتایج آزمایش UCS نمونه‌ها

درصد افزودنی‌ها	دوره ۱ روزه		دوره ۷ روزه	
	UCS (kPa)	کرنش (%)	UCS (kPa)	کرنش (%)
0% RHA	۷۰	۴/۰۴	۷۰	۴/۰۴
4% RHA	۱۲۹	۷/۶	۲۱۰	۳/۷۸
6% RHA	۱۶۹	۱۲/۱	۲۴۰	۲/۶۸
4% RHA + 4% FA	۲۶۰	۵/۴۲	۵۶۶	۳/۷۱
4% RHA + 4% FA + 2% L	۱۴۱	۳/۱۹	۴۸۴	۳/۵
4% RHA + 4% FA + 4% L	۱۲۲	۲/۰۸	۸۹۹	۳/۱۵
4% RHA + 4% FA + 6% L	۱۷۴	۳/۰۹	۱۲۰۴	۲/۸۱

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر افزودنی‌های بازیافتی و بلااستفاده رروی خاک مسئله‌دار، افزودنی‌های خاکستر پوسته‌ی برنج (RHA)، خاکستر بادی (FA) و آهک به خاک اضافه شدند و آزمایش‌های ژئوتکنیکی مطابق با استانداردهای ASTM انجام شدند. مطابق مشاهدات صورت گرفته، نتایج زیر قابل استخراج است:

۱. از نتایج حدود آتربریگ و شاخص تورم آزاد می‌توان استنباط کرد که RHA با ۴٪ وزنی مقدار بهینه برای این افزودنی است.

۲. با افزایش RHA، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد؛ به طوری که مقدار UCS خاک پایه در دوره ۱ روزه از ۷۰ به ۱۲۹ و ۱۶۹ کیلو پاسکال و در دوره ۷ روزه به ۲۱۰ و ۲۴۰ افزایش پیدا کرده است.

۳. با اضافه کردن ۴٪ وزنی FA به ۴٪ وزنی RHA، مقدار UCS نمونه‌ها در دوره ۱ روزه و ۷ روزه به ترتیب به ۲۶۰ و ۵۶۶ کیلو پاسکال افزایش پیدا کرده است.

۴. با اضافه کردن ۲٪ وزنی آهک به مخلوط فوق، مقدار UCS در دوره کوتاه‌مدت کاهش پیدا کرده است ولی در دوره ۷ روزه باعث رشد مقاومت فشاری تا ۱۲۰۴ کیلو پاسکال شده است که تاثیر پوزولانی آهک در دوره بلندمدت را نشان می‌دهد.

۵. باتوجه به نتایج آزمایش UCS طرح مخلوط نهایی بهینه این پژوهش، خاکی دارای ۴٪ وزنی خاکستر پوسته‌ی برنج، ۴٪ وزنی خاکستر بادی و ۴٪ وزنی آهک به دست آمد.

ASTM, C. 618-19., 2019. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM_D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM_D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM_D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM_D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM_D2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

Al-Rawas, A. A., Hago, A. W., & Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and environment*, 40(5), 681-687. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.028>

Acosta, H. A., Edil, T. B., & Benson, C. H. (2003). Soil stabilization and drying using fly ash. *Geo Engineering Rep*, 3.

Cokca, E. (2001). Use of class c fly ashes for the stabilization of an expansive soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), 568-573. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(568\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(568))

Di Sante, M., Fratolocchi, E., Mazziere, F. and Pasqualini, E. (2014). Time of reaction in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour. *Appl. Clay Sci.*, 99: 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.06.018>

Maher, M., Marshall, C., Harrison, F., & Baumgaertner, K. (2005). Context sensitive roadway surfacing selection guide (No. FHWA-CFL/TD-05-004). United States. Federal Highway Administration. Central Federal Lands Highway Division.

McKennon, J. T., Hains, N. L., & Hoffman, D. C. (1994). Method for stabilizing clay bearing soils by addition of silica and lime. Patent Cooperation Treaty (PCT), Patent Classification: C09K, 1(00).

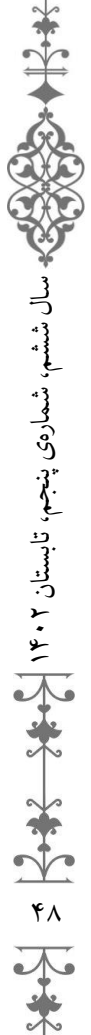
Prabakar, J., Dendorkar, N., & Morchhale, R. K. (2004). Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials*, 18(4) 263-267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.003>

Sharma, A., & Sharma, R. K. (2021). Sub-grade characteristics of soil stabilized with agricultural waste, constructional waste, and lime. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 8 (3), 2473-2484. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02047-8>

Sezer, A., İnan, G., Yılmaz, H. R., & Ramyar, K. (2006). Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Building and environment*, 41(2), 150-155. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.009>

Thompson, M. R. (1965). Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures.

Yıldız, M., & Soğancı, A. S. (2012). Effect of freezing and thawing on strength and permeability of lime-stabilized clays. *Scientia Iranica*, 19(4), 1013-1017. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.06.003>



بررسی بخش انرژی‌های تجدیدپذیر افغانستان: چشم‌اندازها و چالش‌ها

محمد فیصل کاشفی، پروفیسور مارتین گاربرشت

ترجمه: سید محمد سجادی^۱

چکیده

در دسترس بودن انرژی نه تنها برای پیشرفت اقتصادی، بلکه برای هر تلاشی جهت ارتقای سلامت و رفاه اجتماعی یک کشور حیاتی است. صنعت انرژی افغانستان در نتیجه سال‌ها درگیری و بی‌توجهی آشفته است. با وجود کمک‌های سازمان‌های خارجی و مقررات اخیر انرژی، افغانستان دسترسی گسترده‌ای به شبکه برق ندارد. علاوه بر این، برق به طور نامنظم در خانه‌ها توزیع شده، عدم توازن رو به رشدی بین تقاضا و عرضه وجود دارد و پیش‌بینی‌های تقاضای فعلی به دلیل سرعت کم توسعه اقتصادی واقعیت را منعکس نمی‌کند. ظرفیت صنعت برق افغانستان جهت خودکفایی در تولید برق برای پایداری و امنیت آن حیاتی است. بنابراین، هدف این تحقیق بررسی وضعیت کنونی برق افغانستان و شناسایی چشم‌اندازهای انرژی برای خودکفایی و مشکلات در بخش‌های منابع انرژی است. افغانستان می‌تواند منابع هیدروکربنی بومی و انرژی‌های تجدیدپذیر خود را برای برآوردن تقاضای انرژی توسعه دهد. همچنین می‌تواند نیازهای اولیه انرژی خود را با افزایش توان انرژی خود از منابع طبیعی داخلی تامین کند. علاوه بر این، با اجرای درست و برنامه‌ریزی شده سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر، اهداف و استراتژی‌های بهینه‌سازی انرژی، افغانستان ممکن است به اهداف خودکفایی انرژی دست یابد و در عین حال رشد اقتصادی-اجتماعی را نیز پیش ببرد.

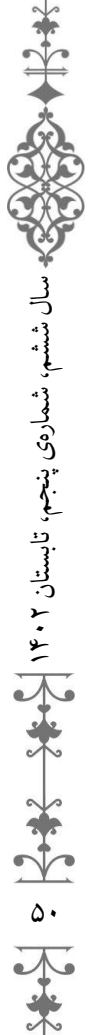
واژگان کلیدی: برق، انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر، افغانستان

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

آسیا تأثیر زیادی بر تغییرات جهانی در زمینه انرژی و محیط‌زیست دارد. سیاست‌های انرژی منطقه تقریباً نیمی از جمعیت جهان را در ابعاد مختلف اجتماعی و بهداشتی تحت تأثیر قرار می‌دهد. اقدامات دولت‌های مختلف آسیایی در مورد تولید، مصرف و حفظ انرژی و گازهای گلخانه‌ای همگی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی و شرایط محیطی تأثیر دارند. (Schreurs & Balanowski, 2017) افغانستان، کشوری محصور در خشکی بوده و موقعیت استراتژیکی دارد. این کشور با جمعیتی حدود ۲۹/۷ میلیون نفر (تا سال ۲۰۱۷) و مساحت کل ۶۵۲۸۶۴ کیلومتر مربع، چهل و یکمین کشور بزرگ جهان است. (CSO, Afghanistan statistical yearbook 2016-2017, 2017) چهار دهه نزع، جنگ داخلی، مداخله خارجی و بی‌ثباتی سیاسی از توسعه کشور جلوگیری کرده و به پیشرفت اقتصادی آن آسیب جدی وارد کرده است. با این حال از سال ۲۰۱۴، ۱۰ سال گذشته توسعه سریعی داشته است، اما فقر به میزان ۵۴/۵٪ افزایش یافته است. (Krishnan et al., 2019) دسترسی به منابع انرژی پایدار و مقرون‌به‌صرفه منجر به رشد اقتصادی می‌شود و هر تلاشی برای بهبود سلامت و رفاه اجتماعی یک کشور باید شامل در دسترس بودن انرژی باشد. درگیری‌های مختلف در افغانستان تاسیسات تولید، انتقال و توزیع انرژی این کشور را از بین برده است. علی‌رغم اینکه گروه‌های توسعه خارجی از سال ۲۰۰۱ توسعه و احیای سرمایه فیزیکی کشور را در اولویت قرار داده‌اند، اما آسیب‌های اساسی و هزینه‌های ضروری بالا مانع پیشرفت و رشد کشور شده است. (NEPA, 2017) افغانستان یکی از پایین‌ترین نرخ‌های مصرف انرژی در جهان را دارد که بیش از ۸۵٪ کل مصرف انرژی را سوخت چوب تشکیل می‌دهد. (ADB, 2015a) در مقایسه با میانگین جهانی یعنی ۲۷۲۸ کیلووات‌ساعت، سرانه مصرف برق سالانه افغانستان پایین است یعنی ۱۵۰ کیلووات‌ساعت. به دلیل عدم توازن رو به رشد عرضه و تقاضای انرژی در افغانستان، ۸۵٪ از جمعیت کشور هنوز به برق دسترسی ندارند. (Bochkarev, 2014) دولت افغانستان تلاش‌هایی را برای بهبود و گسترش سیستم انرژی کشور انجام داده است که تبادل برق با آسیای مرکزی و جنوبی یکی از اهداف کلیدی آن است. با این حال، شبکه سراسری به دلیل زیرساخت ناکافی آن قادر به ارائه خدمات به کل کشور در آینده نزدیک نخواهد بود. (MEW, 2017) در این زمینه، هدف مطالعه حاضر ارزیابی وضعیت انرژی افغانستان به منظور افزایش شانس خودکفایی انرژی در کشور و سپس شناسایی موانعی است که ممکن است در راه دستیابی به خودکفایی انرژی وجود داشته باشد.

۲. چشم‌انداز انرژی افغانستان

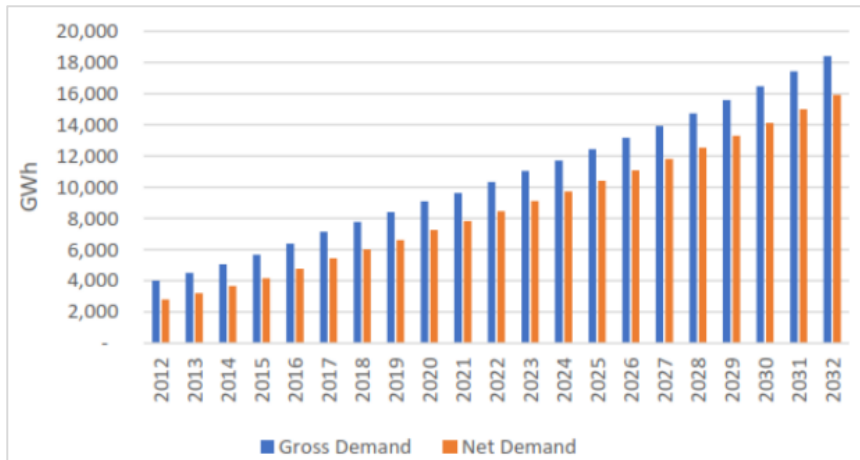
به دلیل عواملی مانند رشد جمعیت، رشد تولید ناخالص داخلی، تغییرات قیمت انرژی، تغییرات تاریخی در شدت انرژی، سرانه مصرف، شرایط انرژی داخلی و در دسترس بودن انرژی، تقاضا برای برق در افغانستان به سرعت در حال افزایش است. اطلاعات کافی در مورد



مصرف انرژی روستایی در افغانستان وجود ندارد. اما روستاییان افغانستان بر اساس استانداردهای اکثر کشورهای دنیا فقیر هستند و بیش از ۲۰/۴٪ قادر به تامین حداقل سطح انرژی غذایی مورد نیاز برای حفظ یک سبک زندگی سالم نیستند. (ANDS, 2008)

۲-۱. تقاضای انرژی

بر اساس ماستر پلان بخش برق برای افغانستان، پیش‌بینی می‌شود تقاضای خالص از ۲۸۰۰ گیگاوات‌ساعت در سال ۲۰۱۲ به ۱۵۹۰۹ گیگاوات‌ساعت در سال ۲۰۳۲ با نرخ رشد متوسط سالانه ۹/۸٪ افزایش یابد. (*Afghanistan Renewable Energy Development Issues and Options*) حتی قبل از دسترسی کامل به منابع انرژی داخلی افغانستان، پیش‌بینی‌ها نشان می‌داد که افغانستان برای تامین تقاضای برق خود به منابع انرژی جدید نیاز دارد. ادعا می‌شود که منابع محلی می‌توانند نیازهای انرژی اولیه میان مدت افغانستان را برآورده کنند، مشروط بر اینکه منابع انرژی به طور موثر و موفقیت‌آمیز مدیریت شوند (۲۰۱۴-۱۵ تا ۲۰۲۴-۲۵). این احتمال وجود دارد که افغانستان به لطف منابع انرژی خود به سرعت مستقل از واردات انرژی شود. این مطالعه ادعا می‌کند که ذخایر هیدروکربنی شناسایی شده در افغانستان ظرفیت تامین تقاضای انرژی را تا ۸۰٪ نیاز آن به فرآورده‌های نفتی را دارد. (Khan & Joya, 2013)



شکل ۱: تقاضای برق پیش‌بینی شده

۲-۲. ظرفیت و عرضه انرژی

سیستم تامین برق کنونی در افغانستان از جنبه‌های مختلفی از جمله انعطاف‌پذیری، قابلیت، هزینه تامین داخلی و پوشش جغرافیایی منطقه‌ای ناقص است. (*Afghanistan Renewable Energy Development Issues and Options*) با وجود این واقعیت که دسترسی به برق بین سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱ تقریباً سه برابر شده است، افغانستان هنوز سطح دسترسی ضعیفی به انرژی دارد. به گفته وزارت انرژی و آب (MEW) تنها ۳۰٪ مردم افغانستان به برق دسترسی

دارند. نرخ برق‌رسانی در کابل در حال حاضر بین ۷۰٪ تا ۷۵٪ است، اما حدود ۸۵٪ مردم در مناطق روستایی به انرژی مورد نیاز روزانه خود دسترسی ندارند. (Bochkarev, 2014) نفت سفید، برق آبی و گازوئیل منابع انرژی الکتریکی تجاری هستند اما امیدوارکننده‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی آبی و خورشیدی هستند که هزینه‌های اولیه بالایی آن‌ها یک مانع بزرگ است. (ANDS, 2008) در این کشور، تنها ۹٪ از جمعیت به برق عمومی دسترسی دارند و کشور به طور قابل توجهی به واردات برق از همسایگان خود وابسته است (ADB, 2015a). بر اساس گزارش د افغانستان برشنا شرکت (DABS)، تنها ۲۲/۶٪ برق کشور در داخل تولید می‌شود و ۷۷/۴٪ باقی‌مانده عرضه وارداتی است. ازبکستان (۳/۳۵٪)، تاجیکستان (۳۰/۷٪)، ایران (۲۱/۷٪) و ترکمنستان (۳/۱۲٪) کشورهای عرضه‌کننده برق هستند و علیرغم این واقعیت که ازبکستان منبع اصلی خارجی است اما ظرفیت انتقال انرژی به کشور محدود است. (DABS, 2016)

جدول ۱: واردات برق از کشورهای همسایه

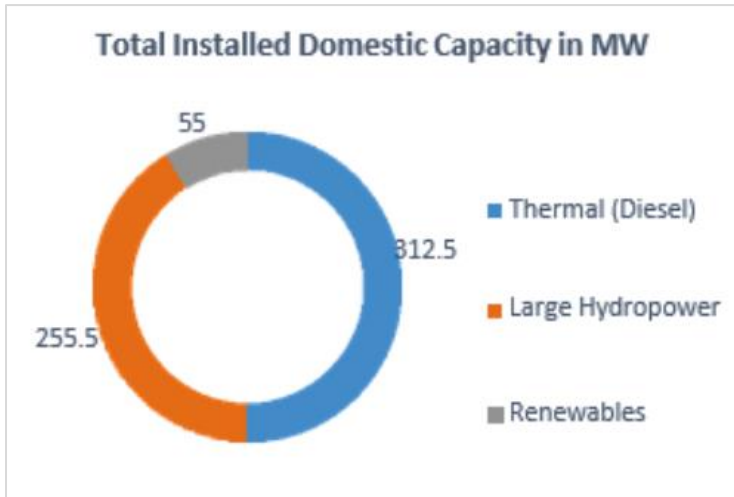
کشور	آوریل ۲۰۱۳ تا مارچ ۲۰۱۴	آوریل ۲۰۱۴ تا مارچ ۲۰۱۵	آوریل ۲۰۱۵ تا مارچ ۲۰۱۶
تاجیکستان	۹۴۷۱۷۹	۱۱۳۷۶۰۲	۱۱۷۹۵۸۱/۰۵
ترکمنستان	۱۳۹۲۵۸۱	۱۲۴۲۸۳۹	۱۳۵۶۴۷۵/۴۶
ازبکستان	۳۹۸۵۸۶	۴۲۷۷۰۲	۴۷۲۹۵۸/۹۶
ایران	۸۳۹۵۷۰	۸۶۹۱۴۳	۸۳۱۷۲۴/۷۹
مجموع	۳۵۷۷۹۱۶	۳۶۷۷۲۸۵	۳۸۴۰۷۴۰

دولت افغانستان با کمک سازمان انکشاف بین‌المللی امکان دسترسی به برق را برای مصارف مسکونی بسیار افزایش داده است. با این حال، هنوز مشکل تولید سوخت‌های فسیلی، برق داخلی و تامین مناسب و مطمئن انرژی وجود دارد. ظرفیت نصب شده متصل به شبکه افغانستان تقریباً به طور مساوی بین برق آبی و حرارتی تقسیم می‌شود. این در حالی است که منابع انرژی تجدیدپذیر خارج از شبکه از جمله انرژی عظیم آبی، خورشیدی، باد و زیست‌توده توزیع یکنواخت انرژی را فراهم می‌کنند. مطابق شکل ۲، از ۶۲۳ مگاوات ظرفیت نصب شده داخلی، ۳۱۲/۵ مگاوات از انرژی حرارتی، ۲۵۵/۵ مگاوات از انرژی آبی و ۵۵ مگاوات از انرژی‌های تجدیدپذیر تامین می‌شود.

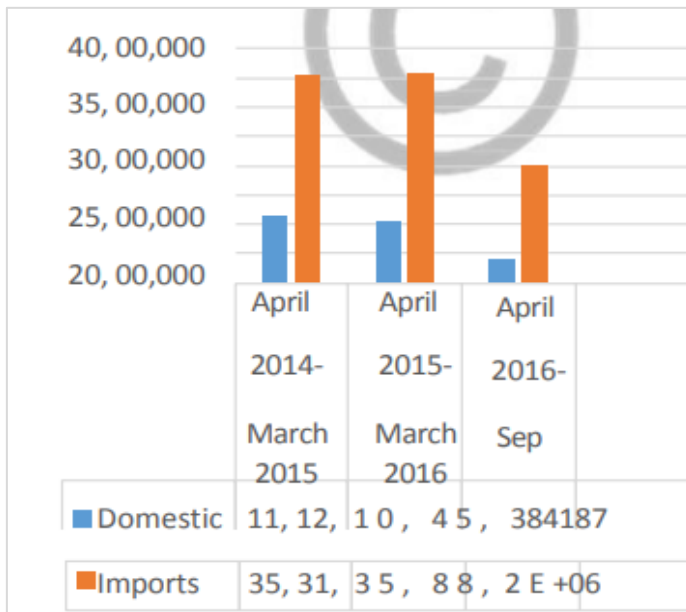
تولید انرژی از طریق سوختن نفت و دیزل دو نوع تولید پرهزینه انرژی در افغانستان هستند. استفاده از این دو سوخت می‌تواند ۳۵ تا ۴۰ سنت در هر کیلووات‌ساعت هزینه داشته باشد که تقریباً ۶ تا ۷ برابر گران‌تر از هزینه واردات برق از کشورهای آسیای مرکزی است. (Bochkarev, 2014) اگرچه اخیراً دولت در زمینه منابع تجدیدپذیر سرمایه‌گذاری کرده است، اما ظرفیت تولید با روش حرارتی فعلی برای بهره‌برداری پرهزینه است و به دلیل عدم



دسترسی به شبکه در مناطق مختلف، وابستگی به منابع وارداتی افزایش پیدا می‌کند. از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵، هزینه واردات انرژی ۱۴ برابر افزایش یافته و از ۱۶ میلیون دلار به ۲۲۴ میلیون دلار رسید. شکل ۳ منابع برق داخلی و وارداتی را مقایسه می‌کند.



شکل ۲: منابع انرژی در افغانستان؛ مجموع ظرفیت داخلی نصب شده بر حسب مگاوات



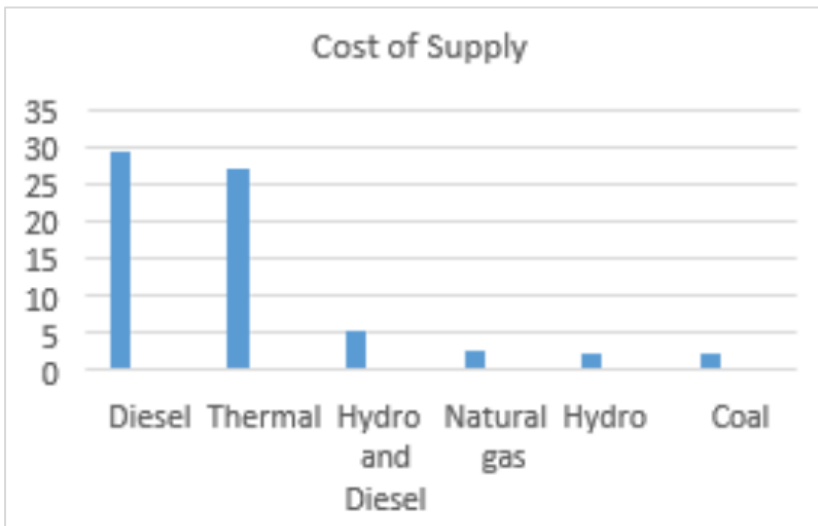
شکل ۳: تامین برق بر حسب مگاوات ساعت (واردات در مقابل تولید داخلی)

هزینه عرضه یا میانگین قیمت نوع تولید بر حسب Usc/kWh (کریپتون بر کیلووات ساعت) (ANDS, 2008)، در جدول ۲ و شکل ۴ ارائه شده است.



جدول ۲: هزینه تامین برق

ردیف	نوع نیروگاه	میانگین قیمت (Usc/kWh)
۱	دیزلی (برای همه مناطق)	۲۹/۵۳
۲	حرارتی (کابل جدید)	۲۷/۱۱۵
۳	آبی، حرارتی و دیزلی	۶/۴۷۳
۴	آبی و دیزلی	۵/۱۹
۵	گاز طبیعی	۲/۸ - ۳/۵
۶	وارداتی	۲/۶۲
۷	آبی	۲/۲۹
۸	زغال سنگ (۱ مگاوات = ۴/۵ تن)	۱ تن = ۲/۲۰۰ افغانی



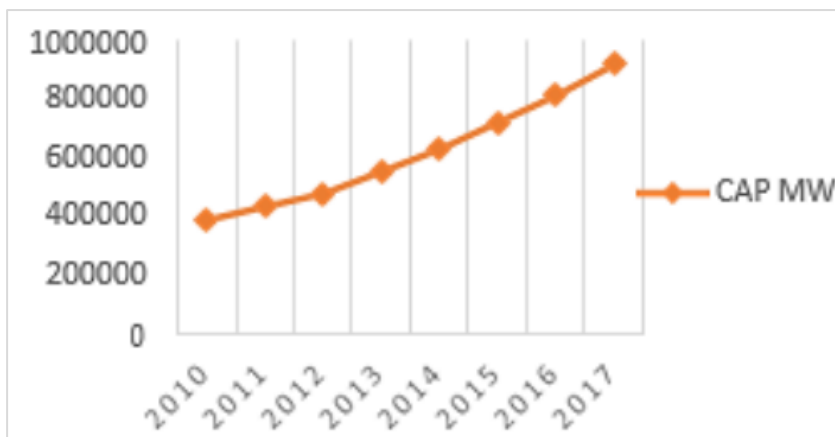
شکل ۴: هزینه تامین برق

۳. فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر

فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی آبی، خورشیدی، حرارتی، باد و زیست‌توده معمولاً در آسیا به خوبی تثبیت می‌شوند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی تجدیدپذیر (IRENA)، ظرفیت آسیا برای تولید برق از منابع تجدیدپذیر از ۳۸۷۵۵۰ مگاوات در سال ۲۰۱۰ به ۹۱۸۶۵۵ مگاوات در سال ۲۰۱۷ گسترش یافته است. (IRENA, 2018)

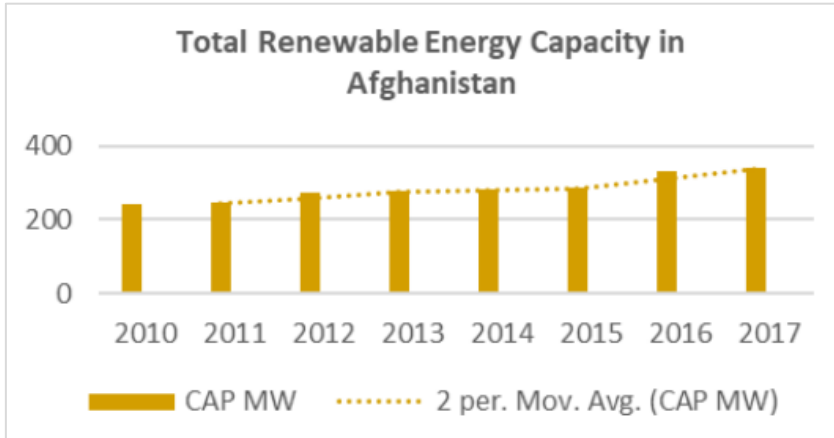
ظرفیت و توانایی تولید انرژی تجدیدپذیر در آسیا از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ در شکل ۵ نشان داده شده است.

شکل ۵: مجموع ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر در آسیا



پیشرفت اقتصادی-اجتماعی و پایداری افغانستان به شدت به انرژی تجدیدپذیر بستگی دارد. فراوانی منابع تجدیدپذیر، از جمله زیست توده، آبی و خورشیدی، به پرکردن شکاف‌های عرضه برق در آینده از نظر شرایط اقتصادی و مالی کمک می‌کند که در شکل ۶ ظرفیت و رشد کلی انرژی تجدیدپذیر افغانستان بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ نشان داده شده است. طبق اعلام بانک جهانی، ظرفیت کلی برق آبی رودخانه‌های شمال شرقی افغانستان یعنی دریای آمو، پنج و کوکچه ۲۳۰۰۰۰ مگاوات یا تقریباً ۸۷٪ (۲۰۰,۰۰۰ مگاوات) است. رودخانه کتر نیمی از تقریباً ۸٪ (۱۹۰۰۰ مگاوات) از کل پروژه‌های آبی با ظرفیت نصب شده تا ۳ مگاوات منطقه کابل را که در شرق نهفته است، به خود اختصاص داده است. (Afghanistan Renewable Energy Development Issues and Options) ظرفیت پروژه‌های آبی در جدول ۵ نشان داده شده است. (MEW, 2015).

افغانستان سالانه ۳۰۰ روز آفتابی با میانگین ظرفیت انرژی خورشیدی ۶/۵ کیلووات ساعت در هر مترمربع دارد. مقادیر بالاتر انرژی خورشیدی را می‌توان در ولایات جنوبی به ویژه قندهار، فراه، هرات و هلمند یافت. تولید انرژی از طریق نور خورشید حتی در مناطق شمالی که میانگین تابش فقط ۴/۵ کیلووات ساعت در هر مترمربع در روز است، نیز امکان‌پذیر می‌باشد.



شکل ۶: مجموع ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر در افغانستان

جدول ۵: تقسیم‌بندی اندازه نیروگاه‌های آبی

ظرفیت (MW)	نوع نیروگاه آبی
> ۲۵۰۰۰ کیلووات	کوچک
> ۲۵۰۰ کیلووات	مینی
> ۲۵۰ کیلووات	میکرو
> ۲/۵ کیلووات	پیکو

منابع بادی در افغانستان فراوان است، با این حال این انرژی عمدتاً در جنوب غربی متمرکز شده است و مرزهای ایران را دربر می‌گیرد. مجموع ظرفیت انرژی بادی کشور ۱۵۰۰۰۰ مگاوات است، اما تنها ۶۶۷۰۰ مگاوات آن در واقع قابل استفاده است. علاوه بر این، انرژی زمین‌گرمایی و زیست‌توده نویدهای زیادی را ارائه می‌دهند، اگرچه مطالعه بیشتر در مورد این منابع مورد نیاز است. (Afghanistan Renewable Energy Development Issues and Options) منابع زیست‌توده برای تامین نیازهای انرژی مناطق مسکونی حیاتی هستند زیرا اکثر تقاضای سوخت خانواده‌ها از چوب، زغال چوب، فضولات حیوانات و ضایعات کشاورزی تامین می‌شود. انرژی زمین‌گرمایی نیز کم‌هزینه بوده و امکان استفاده برای تولید برق را دارد. جدول ۶ ظرفیت افغانستان را برای انواع منابع انرژی تجدیدپذیر نشان می‌دهد.

جدول ۶: ظرفیت منابع انرژی‌های تجدیدپذیر افغانستان

نوع انرژی	ظرفیت
خورشیدی	دارای میانگین تابش خورشیدی ۶/۵ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز و ۳۰۰ روز آفتابی
آبی	دارای ظرفیت ایجاد سدهای بزرگ، مینی و میکرو هر کدام با ظرفیت ۶۰۰ مگاوات
بادی	۵ مگاوات برای هر کیلومتر مربع، کشوری بادخیز
بایومس	۳ منطقه با استعداد با ظرفیت ۴ - ۱۰۰ مگاوات
زمین گرمایی	۳۰۰۰ - ۳۵۰۰ مگاوات

۴. چالش‌های رسیدن به خودکفایی

هر کشوری برای برآورده کردن نیازهای انرژی خود و حرکت به سمت داشتن انرژی پایدار، استراتژی خاص خود را دارد که ترکیبی از فرصت‌های منابع و چالش‌های دسترسی و کارایی آن‌ها است. چالش‌های انرژی افغانستان به دلایلی که قبل تر ذکر شد با دیگر کشورهای در حال توسعه متفاوت است. بر اساس ظرفیت تولید داخلی برق افغانستان که تنها ۲۲٪ از کل مصرف برق را در سال ۲۰۱۵ تامین می‌کرد، این کشور با کمبود انرژی روبرو است. افغانستان با چالش‌های متعددی از جمله جنگ‌هایی مواجه است که مشکلات اقتصادی و سیاسی ایجاد کرده، رشد اقتصادی را کاهش داده و دچار یک فقر بی‌پایان شده است. به علاوه، بخش برق سراسری افغانستان مشکلاتی از قبیل نیروی کار و ظرفیت فنی را تجربه می‌کند. (USAID, 2010)

- هیچ چارچوب سیاستی در افغانستان وجود ندارد که عرضه انرژی را برای توسعه پایدار مشخص کند. به دلیل زیرساخت‌های ناکافی، که موانع متعددی را برای تشویق کارایی انرژی ایجاد می‌کند، عملی کردن سیاست‌های فعلی و اجرای قوانین دشوار بوده است.

- در افغانستان، مشتریان به علت وجود یک سیستم توزیع نابرابر در کشور رنج می‌برند. در حال حاضر، تنها حدود دو سوم (۶۷٪ تا ۷۵٪) جمعیت کشور به برق قابل اعتماد دسترسی دارند و بیش از ۷۰٪ از مردم کابل به برق ثابت دسترسی دارند. (MEW, 2016)
- برای داشتن سطح بالایی از امنیت انرژی، شبکه‌های انتقال و توزیع کشور باید گسترش یابد. در ماه مارچ ۲۰۱۵، ۱۱۷۶۰۳۰ خانواده به شبکه انرژی برق متصل شدند که نسبت به چند سال گذشته ۱۱٪ افزایش داشته است. طول خطوط انتقال از ۲۲۶۱ کیلومتر به ۶۹۰۷ کیلومتر افزایش یافت که نتیجه سیاست توسعه برق دولت است.
- در برنامه‌ریزی بلندمدت انرژی کشور، دسترسی به منابع آب در شرایط اقلیمی نامشخص - برای تولید برق آبی در آینده - یک نگرانی جدی است.
- کمبود بودجه برای زیرساخت‌های تولید و انتقال گاز، گسترش ۷۵ میلیارد متر مکعب ذخایر گاز را تنها به ۱۵۰ کیلومتر مربع محدود می‌کند. منابع انرژی تجدیدپذیر و سوخت فسیلی قابل توجهی برای توسعه از طریق سرمایه‌گذاری خصوصی و دولتی مورد نیاز است. (ADB, 2015b)
- از آنجایی که فرآیند مدیریت سازمان‌های متعددی را در بر می‌گیرد، رویه‌های صدور مجوز و فعالیت‌های تعمیر و نگهداری باعث ایجاد مشکلات هماهنگی بین مقامات مختلف می‌شود.
- یک فقدان آگاهی عمومی نسبت به فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، مزایای اجتماعی و زیست‌محیطی و در دسترس بودن منابع انرژی با سوخت مقرون به صرفه وجود دارد.

۵. فرصت‌های خودکفایی

خودکفایی در صنعت انرژی را می‌توان در هر منطقه‌ای از طریق چشم‌انداز و اهداف تعریف شده دولت برای تولید انرژی کافی در سطح محلی به دست آورد. ثبات تقاضا را می‌توان با ارائه خدمات انرژی پایدار، ایمن و با کیفیت بالا به شهروندان افغانستان و همچنین با ترویج انرژی‌های تجدیدپذیر و اقدامات حفظ انرژی در بخش‌های مختلف به دست آورد.

۵-۱. بهترین استفاده از منابع هیدروکربنی و انرژی‌های تجدیدپذیر

افغانستان دارای منابع عظیم انرژی از سوخت‌های فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر است که باید برای تامین نیازهای کشور استفاده شود. اتخاذ سیاست‌های ملی و منطقه‌ای می‌تواند به ترویج و به‌کارگیری هیدروکربن‌های بومی و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر کمک کند. این سیاست‌ها، کشور را در تعیین اولویت‌ها و روش‌های ایجاد بازار انرژی پایدار و مقرون به صرفه کمک خواهد کرد.

بزرگترین امید افغانستان انرژی‌های تجدیدپذیر است که شامل انرژی آبی، خورشیدی، باد، زمین‌گرمایی، زیست‌توده و چوب می‌شود. اگرچه این کشور دارای ظرفیت‌های زیادی است، اما در حال حاضر بیشتر از نیروگاه‌های آبی استفاده شده است. منابع سالانه آب سطحی تجدیدپذیر کشور که بین پنج حوضه رودخانه تقسیم می‌شود، ۵۷ میلیارد متر مکعب برآورد شده است. با این حال، در دسترس بودن منابع آب در طول سال متفاوت بوده یا به طور یکسان در سراسر کشور قابل دسترسی نیست. (MEW, 2017; NEPA, 2017) شواهدی وجود دارد که انرژی زمین‌گرمایی و زیست‌توده دارای ظرفیت زیادی هستند. (*Renewable Energy Development Issues and Options*) خوشبختانه دولت با کمک جامعه جهانی در حال تعیین اهداف دقیق برای صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر است تا بتواند در آینده نزدیک انرژی مورد نیاز کشور را تامین کند و به خودکفایی برسد.

۵-۲. بهره‌وری انرژی و صرفه‌جویی

انرژی ممکن است در کشورهای توسعه‌یافته با حداقل کردن تلفات و ضایعات، افزایش کارایی از طریق پیشرفت‌های تکنولوژیکی، بهینه‌سازی بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری به نحو مؤثری ذخیره شود. (Al-Mofleh et al., 2009) موثرترین راه حل برای از بین بردن شکاف تقاضای انرژی در افغانستان افزایش بهره‌وری انرژی از طریق نوسازی، استقرار فناوری‌های عملی و ایجاد جوامع کارآمد انرژی خواهد بود. هنگامی که هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برگشت داده شود، مصرف انرژی کاهش می‌یابد، در نتیجه در هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌شود. علاوه بر مزایای مالی، حفظ انرژی با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ممکن است به حفاظت از محیط‌زیست کمک کند. صرفه‌جویی در انرژی باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود که به نفع محیط زیست، امنیت ملی، ثبات مالی شخصی و اثربخشی هزینه است.

در نتیجه، دولت باید با تأکید بر مکانیزم‌های کاربردی در بخش‌های مختلف، بهره‌وری انرژی را ارتقا داده و قوانین بهره‌وری انرژی را رعایت کند. ساختمان‌ها انرژی زیادی مصرف می‌کنند، بنابراین بهره‌وری انرژی دقیق‌تر در صنعت ساخت‌وساز، کمک زیادی به حفظ انرژی خواهد کرد. بهبود بهره‌وری انرژی، در ترکیب با برنامه‌های دیگر، ارزان‌ترین، سریع‌ترین و سازگارترین روش برای برآوردن مقدار عمده‌ای از تقاضای انرژی افغانستان است که نیاز به سرمایه‌گذاری تامین انرژی را کاهش می‌دهد.

۶. نتیجه‌گیری و توصیه

افغانستان اکنون قادر به تولید برق خود نیست؛ با این حال، دولت افغانستان با همکاری سازمان‌های بین‌المللی به دنبال راه‌های دستیابی به آن است. وضعیت انرژی در افغانستان را می‌توان به عنوان "فقر انرژی" توصیف کرد که به عنوان عدم دسترسی به خدمات انرژی مدرن تعریف می‌شود. با وجود اینکه در سال‌های اخیر دسترسی به شبکه برق به طور چشمگیری



افزایش یافته اما هنوز محدود است. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند آبی، بادی و خورشیدی به وفور در کشور وجود دارند اما عمدتاً ناشناخته هستند. در سال‌های اخیر، قیمت استفاده از این منابع کاهش یافته و به دولت اجازه می‌دهد تا آن‌ها را بررسی کند.

تامین برق و انرژی اولیه ارزان و قابل اعتماد برای رشد اجتماعی و اقتصادی بسیار مهم است. به علاوه، به منظور ایجاد سیاست و برنامه‌ریزی موثر، دولت افغانستان، تمویل‌کنندگان، بازیگران بخش خصوصی و گروه‌های جامعه مدنی نیاز به دسترسی به اطلاعات و داده‌های معتبر در مورد تصویر انرژی موجود در کشور دارند.

برق‌رسانی فرایندی طولانی و سخت است که مستلزم ثبات سیاسی، قانون و مقررات کافی و حمایت بین‌المللی می‌باشد. برای ارائه برق، دولت باید با استفاده از تجربه سایر کشورها از این فرصت برای رفع موانع استفاده کند. خدمات انرژی باید مقرون‌به‌صرفه، سازگار، ایمن و از نظر زیست‌محیطی بی‌خطر باشند. راهبردهایی وجود دارد که می‌توان برای بهبود بخش انرژی اتخاذ کرد:

- استراتژی تولید برق باید بر تولید انرژی کم‌هزینه، بهینه‌سازی استفاده از ظرفیت، تنظیم هزینه ورودی، بهینه‌سازی همزمان سوخت و فناوری آن و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر متمرکز شود.
 - اجرای صحیح می‌تواند به بهبود قابلیت اطمینان سیستم انرژی کشور کمک کند.
 - استراتژی باید صرفه‌جویی و بهینه‌سازی استفاده از برق با تمرکز بر مدیریت تقاضا، مدیریت بار و ارتقای فناوری را با ارائه تجهیزات کارآمد انرژی دربر داشته باشد.
 - مقررات باید با هدف ایجاد توازن بین منافع همه ذینفعان و قابل دوام ساختن بخش انرژی از نظر تجاری باشد.
 - برای رشد بخش انرژی، استراتژی‌های مرتبط با امور مالی باید اتخاذ شود.
 - تولید محلی محصولات انرژی تجدیدپذیر باید در بخش مرکزی اجرا شود.
 - دولت باید یک فرایند برنامه‌ریزی انرژی برای ایجاد رقابت و ثبات برای سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی فراهم کند.
 - ارتقای بهره‌وری انرژی با مدیریت صحیح استفاده از سیستم‌های توزیع.
 - واحدهای دولتی و بخش خصوصی همراه با جامعه باید برای دستیابی به ابتکارات بلندمدت بهره‌وری انرژی که به نفع شهروندان است، با یکدیگر همکاری کنند.
- مقدار زیادی انرژی در ساختمان‌ها مصرف می‌شود؛ بنابراین استراتژی‌های بهره‌وری انرژی باید به شدت در ساختمان‌ها اجرا شود.



ADB. (2015a). Proposed multi-tranche financing facility Islamic republic of Afghanistan: energy supply improvement investment program. Manila : report and recommendation of the president to the board of directors .

ADB. (2015b). Sector assessment, energy. Asian development bank .

Afghanistan Renewable Energy Development Issues and Options. <https://doi.org/10.1596/30270>

Al-Mofleh, A., Taib, S., Mujeebu, M. A., & Salah, W. (2009). Analysis of sectoral energy conservation in Malaysia. *Energy*, 34(6), 733-739 .

ANDS. (2008). Energy Sector Strategy (2007-2012), Afghanistan National Development Strategy Secretariat .

Bochkarev, D. (2014). Afghanistan reconnected linking energy supplies to consumers in Asia. Eastwest Institute .

CSO, Afghanistan statistical yearbook 2016-2017 .(۲۰۱۷) .

DABS. (2016). Afghanistan energy information center. Kabul : Da Afghanistan Breshna Sherkat .

IRENA. (2018). Renewable capacity statistics 2018, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi .

Khan, F., & Joya, O. (۲۰۱۳) .Afghanistan Economic Update, October 2013 . .

Krishnan, N., Wieser, C., & Wang, Z. (2019). Afghanistan Development Brief: The Implications of Afghanistan's 2014 Security Transition, Deteriorating Welfare, Declining Employment .

MEW. (2015). Renewable energy policy. Kabul: Ministry of Energy and water .

MEW. (2016). Call for expression of interest (EoI) for implementation of 100 Mw grid connected. Kabul : ministry of energy and water .

MEW. (2017). Afghanistan investment opportunities in energy sector. Kabul : Da Afghanistan Breshna Sherkat .

NEPA. (2017). Second national communication. Kabul: national environmental protection agency. 2-30 .

Schreurs, M. A., & Balanowski, J. (2017). Promoting Socially and Economically Just Energy Transformations in Asia :Possibilities, Challenges and the Road Ahead. Friedrich-Ebert-Stiftung Vietnam Office .

USAID. (2010). Advisor to the secretariat of the inter-ministerial commission for Energy, Kabul: United States aid for international development .



معرفی و بررسی اضافه‌ولتاژهای بازگشتی و شبیه‌سازی موردی آن در نرم‌افزار EMTP_RV

عبدالله حلیمی^۱

چکیده

ولتاژ بازیابی گذرا (TRV) یکی از مشخصه‌های ذاتی در سیستم قدرت است که حداکثر و سرعت افزایش آن از عوامل مهمی هستند که بر روند کلیدزنی در سیستم قدرت تاثیر می‌گذارند. هنگامی که یک سیستم قدرت دارای ویژگی‌هایی از TRV باشد به این معنا است که ولتاژ از محدوده تحمل کلیدها بیشتر بوده و ممکن است کلیدهای مدار، جریان خطا را قطع نکنند. در این مقاله، ابتدا انواع اضافه‌ولتاژها در سیستم قدرت بررسی شده است. در ادامه، اضافه‌ولتاژهای ناشی از کلیدزنی (پدیده‌ای مهم در شبکه قدرت) معرفی شده است. اهمیت بررسی این موضوع، تاثیر این اضافه‌ولتاژها هنگام عملکرد کلیدهای قدرت می‌باشد که به دلیل پیچیده بودن شبکه‌های قدرت از وجود ساختارهای متفاوت، وقوع خطاهای مختلف با شکل موج‌ها و ساختارهای متفاوت تاثیر می‌پذیرند. وجود این شکل موج‌های مختلف بر عملکرد کلیدهای قدرت تاثیر مستقیم خواهد داشت که ممکن است کلیدها قابلیت تحمل این تنش‌ها را نداشته و قطع مدار ناموفق باشد. از سوی دیگر، عملکرد ناموفق کلیدها در شرایط خطا امکان به بار آوردن خسارت به شبکه در هنگام شرایط بحرانی را خواهد داشت. در ادامه این پژوهش، برای مشاهده تنش‌های حاصل از کلیدزنی به شبیه‌سازی موردی در نرم‌افزار حالت گذرای EMTP_RV پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: اضافه‌ولتاژ برگشتی، کلید، پیک ولتاژ، RRRV.



^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران



۱. مقدمه

گسترش شبکه‌های انتقال و افزایش روزافزون مصرف برق و انرژی، احداث خطوط انتقال برق با ظرفیت ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ مگاوات را ایجاب می‌نماید. تنها با استفاده از ردیف ولتاژهای بالا و متناسب با قدرت و مسافت، افزایش ظرفیت انتقالی خطوط امکان‌پذیر می‌باشد، به همین دلیل احداث شبکه‌های سراسری انتقال انرژی به طول چندین هزار کیلومتر با ردیف ولتاژهای ۷۵۰ تا ۱۲۰۰ کیلوولت و ظرفیت چند ده هزار مگاوات در کشورهای بزرگ عمومی شده است و مطالعات و تحقیقات مداوم به منظور استفاده از ردیف ولتاژهای بالاتر در دست انجام می‌باشند.

تامین عایق‌بندی کافی و مطمئن هادی‌های ولتاژ بالا در خطوط انتقال و تجهیزات فشار قوی مانند ترانسفورماتورها، راکتورها، کلیدها و غیره در طی فعالیت شبکه و تغییرات آن، یکی از مسائل عمده‌ی خطوط انتقال انرژی و استفاده از ردیف ولتاژهای بالا است.

عبور ولتاژ شبکه از مقدار نامی خود و ظهور ولتاژهای لحظه‌ای موحی با دامنه بیش از ولتاژ دی‌الکتریک ماده عایق، به اضافه ولتاژ در شبکه موسوم می‌باشد. از آنجاکه بروز اضافه‌ولتاژ در شبکه اجتناب‌ناپذیر است، بنابراین احتمال وقوع قوس الکتریکی در عایق‌بندی و ماده عایق وجود دارد. کاهش درصد بروز قوس‌ها و اتصال‌های کوتاه مستلزم شناخت کامل اضافه‌ولتاژ، انواع مختلف، شرایط ایجاد و نحوه تاثیر آن‌ها در عایق‌بندی شبکه می‌باشد. در صورت برخورداری از چنین شناختی، انتخاب مشخصات مناسب شبکه و تجهیزات موجود در آن امکان‌پذیر می‌گردد. کلیه اضافه‌ولتاژهای ظاهر شده در شبکه براساس شکل یا نحوه‌ی تغییرات آنان به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱-۱. اضافه‌ولتاژهای پایدار

تجهیزات درون سیستم انتقال می‌توانند ولتاژهایی حدود ۵% بیشتر از ولتاژهای نامی را برای دوره‌های زمانی طولانی (چند دقیقه یا بیشتر) تحمل کنند. موسسه استانداردهای ملی آمریکا (ANSI)، حداکثر ۱۲۱ کیلوولت را برای سیستم ۱۱۵ کیلوولتی و حداکثر ۳۶۲ کیلوولت را برای سیستم ۳۴۵ کیلوولت در نظر می‌گیرد. این استاندارد، حداکثر ولتاژ سیستم را به این صورت تعریف می‌کند که " بالاترین ولتاژ سیستمی که تحت شرایط کار معمولی رخ می‌دهد که تجهیزات و سایر اجزا جهت کار مداوم، رضایت‌بخش و بدون هرگونه ایراد برای آن طراحی شده‌اند، را حداکثر ولتاژ سیستم گوئیم."

۱-۲. اضافه‌ولتاژهای موقت

اضافه‌ولتاژهای موقت، افزایش ولتاژ شبکه و تجاوز آن از مقدار اسمی فرکانس (۵۰ هرتز) را شامل می‌گردند. افزایش ولتاژ اسمی شبکه تا بیش از مقدار اسمی آن برای مدت طولانی ادامه نیافته و با توجه به پیش‌بینی‌های صورت گرفته در شبکه، مقدار اسمی خود را در فاصله زمانی معین باز می‌یابد. به عنوان مثال در فاصله برقراری جریان عیب یا در فاصله زمانی بی‌باری خط، ولتاژ شبکه از مقدار اسمی خود تجاوز کرده یا به صورت اضافه‌ولتاژ موقت ظاهر می‌گردد.

به دلیل فاصله زمانی کم و موقتی بودن این افزایش ولتاژ، آن را اضافه‌ولتاژ موقت می‌نامند. اضافه‌ولتاژهای موقت تا زمانی که علت اصلی بروز آنان رفع شود یا تجهیزات اتوماتیک کنترل ولتاژ شروع به کار کنند، ادامه می‌یابند. این اضافه‌ولتاژها معمولاً در پی تغییر شکل شبکه ظاهر می‌گردند. تغییر شکل شبکه به عللی چون بروز عیب، قطع و وصل خطوط، جدا شدن بارهای اکتیو و راکتیو عمده، وارد و خارج شدن ترانسفورماتورها، راکتورها، مانور اشتباه در شبکه، تنظیم نابجای دستگاه‌های کنترل ولتاژ ترانسفورماتورها، ژنراتورها و غیره و بروز برخی پدیده‌ها در شرایط خاص نظیر پدیده‌های رزونانس و فرورزونانس روی می‌دهند.

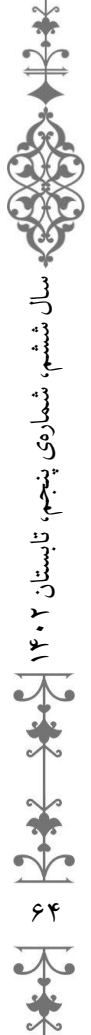
به طور خلاصه این اضافه‌ولتاژها به علل کلی زیر روی می‌دهند:

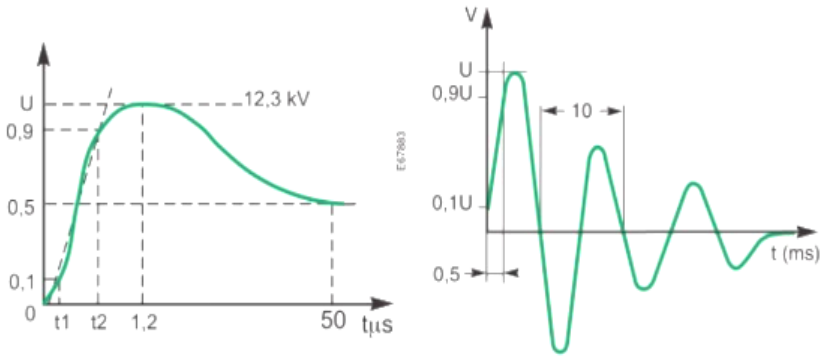
- بروز عیوب مختلف در شبکه
- قطع و وصل کلیدها و تغییر بارهای اکتیو و راکتیو
- بروز رزونانس و فرورزونانس در شبکه
- قطع فازها
- بروز نوسانات (power swing)
- اضافه‌ولتاژ بی‌باری خط

۱-۳. اضافه‌ولتاژهای موجی

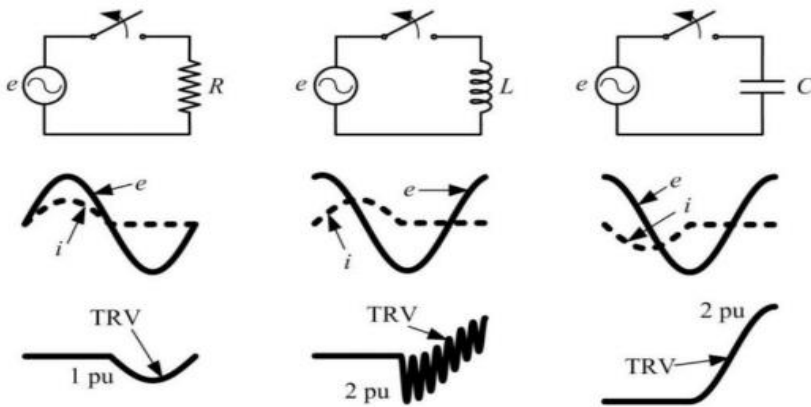
این نوع از اضافه‌ولتاژها به صورت موج در ولتاژ شبکه ظاهر گشته و با سرعتی نزدیک به سرعت نور در طول هادی منتشر می‌گردند، که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. این موج طی انتشار خود در طول هادی، تغییر شکل داده و دچار افزایش دامنه با سرعت ثابت بر حسب کیلوولت بر میکروثانیه می‌شود. اضافه‌ولتاژهای موجی از طریق دو منبع گوناگون در شبکه ظاهر می‌گردند:

- اضافه‌ولتاژهای ناشی از رعد و برق
- اضافه‌ولتاژهای ناشی از قطع و وصل (کلیدزنی)





شکل ۱: شکل موج یک صاعقه و اضافه‌ولتاژ آن در شبکه



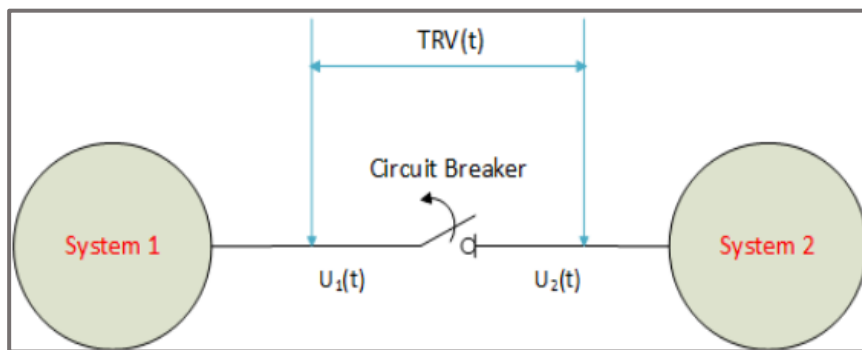
شکل ۲: اضافه‌ولتاژهای ناشی از انواع کلیدزنی در شبکه

۲. اضافه‌ولتاژ بازگشتی (TRV)

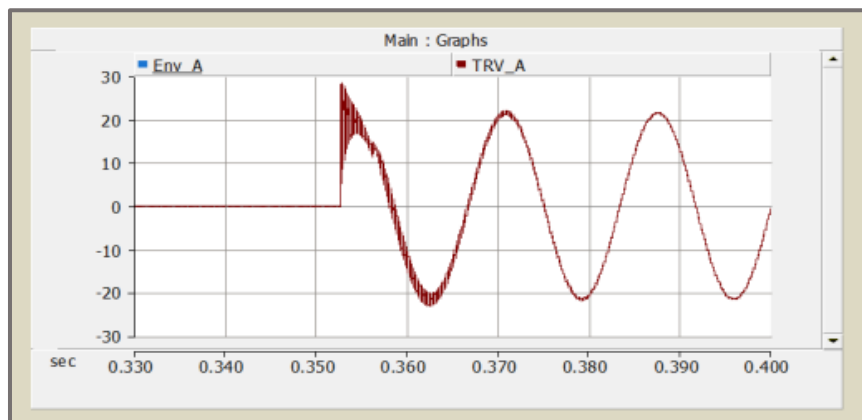
یکی از شایع‌ترین پدیده‌ها در سیستم قدرت که به خوبی معرفی نشده است "ولتاژ بازگشتی گذرا" یا (Transient Recovery Voltage) نام دارد. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که یک وقفه در تامین جریان رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، زمانی که توسط کلید قطع‌کننده، یک قسمت از شبکه که دچار خطای اتصال کوتاه شده جدا می‌شود، ولتاژ در دو سر پل‌های کلید افزایش می‌یابد که بزرگی این ولتاژ گاهی تا دو برابر مقدار ولتاژ نامی هم می‌رسد. TRV به مشخصه‌های سیستمی که قطع‌کننده در آن وجود دارد و نوع خطایی که کلید را وادار به واکنش کرده، بستگی دارد. مشخصه‌های سیستم عبارتند از: نوع بارها، نوع اتصال کابل‌ها و خطوط و نوع سیستم زمین. شدیدترین TRV معمولاً به پل‌های اولیه کلید وارد می‌شود که قسمت دارای خطا را از شبکه جدا می‌کند. از ویژگی‌های این اضافه‌ولتاژ می‌توان به فرکانس بالای آن اشاره نمود که با توجه به رابطه زیر داریم: (J. C. Das, 2010).

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

که در آن f_n فرکانس طبیعی شبکه، L و C به ترتیب اندوکتانس و ظرفیت معادل مدار هستند.



شکل ۳: اختلاف ولتاژ بین دو سر کلید و نمایش TRV

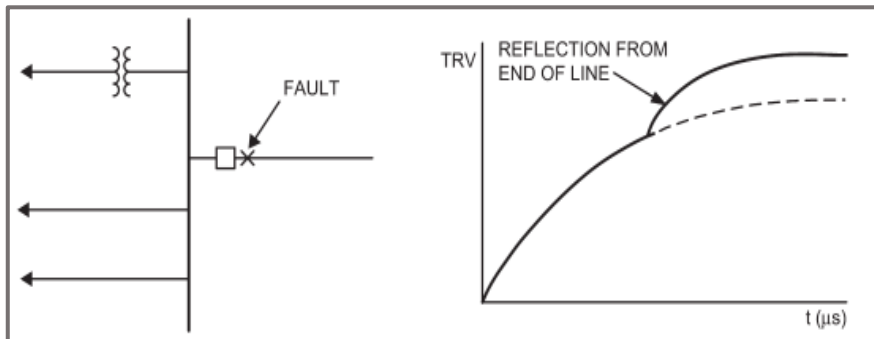


شکل ۴: نمونه‌ای از شکل موج TRV

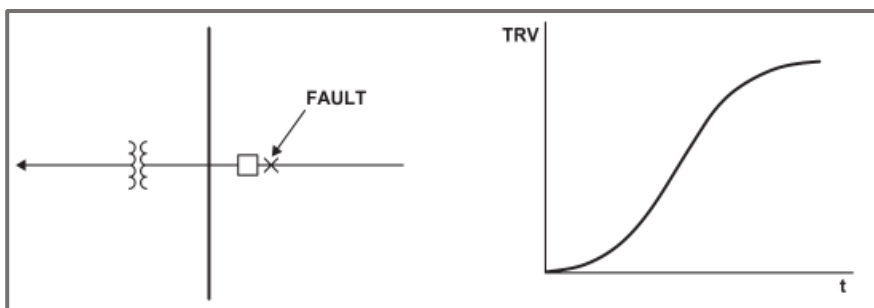
از دیگر پارامترهای مهم TRV می‌توان به نرخ افزایش شیب و پیک آن اشاره نمود که محاسبه نرخ اولیه افزایش بسیار مهم است که به دلیل پدیده‌های امواج سیار و بازتاب‌های متعدد، این کار چندان ساده نیست؛ زیرا موج روی دو سیستم که توسط کلید قطع می‌شود، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. پروفیل‌های ولتاژ بازیابی را می‌توان برای جریان‌های خطا، حداکثر و حداقل و جریان‌های خطای در محدود ترانسفورماتور در نظر گرفت. جریان‌های بدون خطا نیز می‌توانند از انواع مقاومتی، القایی و خازنی باشند که پیکربندی مدار در بروز انواع این جریان، نقش مهمی را ایفا می‌کند. به عنوان مثال، مشخصات ولتاژ بازیابی در خطاهای ترمینال (نزدیک کلید) و خطاهای خط کوتاه (SLF) (خطاهای خیلی نزدیک به کلید یعنی در محدوده ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ متر) متفاوت است. نمایه‌های TRV می‌توانند با توجه به مشخصات سیستم به یک یا ترکیبی از شکل‌های زیر ظاهر شوند. (IEEE Standard C37.011, 2011).



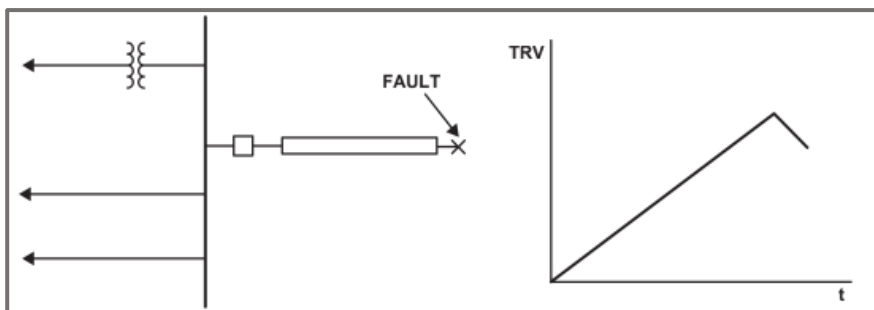
- هم‌فرکانس با منبع (Power supply frequency)
- میرایی (Overdamped)
- نوسانی (Oscillatory)
- دندان اره‌ای یا مثلثی (Traingular)



شکل ۵: شکل موج TRV نمایی



شکل ۶: شکل موج TVR نوسانی



شکل ۷: شکل موج مثلثی یا دندان اره‌ای

۱-۲. اولین فاز قطع کننده (Firt pole to clear)

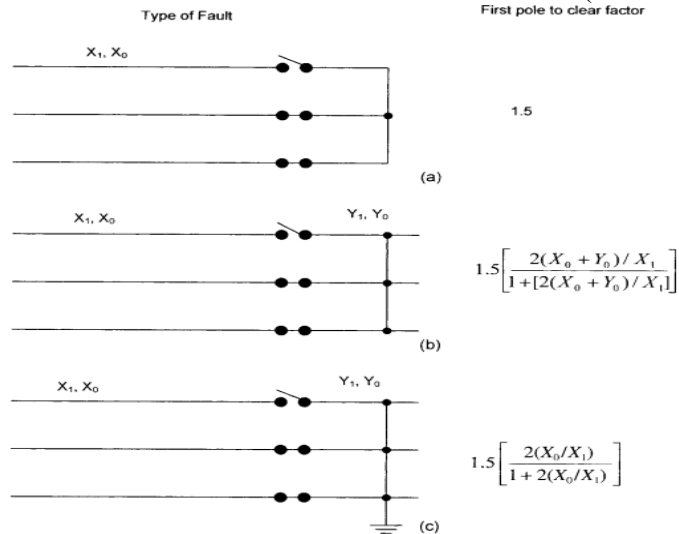
TRV به ولتاژی اطلاق می شود که در فاز اول قطع کننده اعمال گردد؛ زیرا به طور کلی در اکثر مواقع مقداری بالاتر از ولتاژ اعمال شده در دو فاز دیگر قطع کننده وجود دارد که پس از مدتی از بین می روند. یک خطای سه فاز زمین نشده را در نظر بگیرید. در این حالت ولتاژ در فازهای قطع کننده، برای اولین فاز قطع کننده $1/5$ برابر ولتاژ فاز خواهد بود؛ زیرا قطع قوس به دلیل 120° درجه جابجایی فازها، در سه فاز همزمان نیست. بنابراین، از نظر تئوری، ولتاژ فرکانس توان اولین فازی که پاک می شود $1/5$ برابر ولتاژ فاز بوده و ممکن است از $1/5$ تا 2 برابر متغیر باشد (به ندرت می تواند از 3 برابر تجاوز کند) که با استفاده از اجزای متقارن قابل محاسبه است. شکل ۸، فاز اول را نشان می دهد که تجهیزات شبکه، خطاهای ترمینال سه فاز را پاک می کنند. ضریب اولین قطبی که خطای سه فاز به زمین را پاک می کند به صورت رابطه زیر محاسبه می شود: (J. C. Das, 2010)

$$\frac{3}{2} \times \frac{2X_0/X_1}{1+[2X_0/X_1]} \quad (2)$$

برای خطاهای بدون تماس با زمین، عبارت زیر را می توان نوشت:

$$\left[\frac{3}{2} \times \frac{2(X_0+Y_0)X_1}{1+[2(X_0+Y_0)/X_1]} \right] \quad (3)$$

که در آن X_0 و X_1 راکتانس های توالی مثبت و صفر سمت منبع هستند. در حال حاضر، برای مدارشکن های بالای 100 کیلوولت با سیستم های زمین جامد، ضریب اولین فاز قطع کننده $1/3$ است که با توجه به نوع خطا متفاوت می باشد. به طور مثال برای یک قطع کننده 550 کیلوولت، خطای ترمینال $1/3$ و برای خطای خط کوتاه و خطای خارج از فاز، این مقدار 2 است. (J. C. Das, 2010)



شکل ۸: (a) ضریب اولین فاز قطع کننده - خطای ترمینال سه فاز، عدم اتصال به زمین. (b) خطای سه فاز در سمت بار. (c) خطای سه فاز به زمین در سمت بار

با افزایش فرکانس طبیعی، ظرفیت قطع هر یک از کلیدهای قدرت در شبکه کاهش می‌یابد. با این حال، می‌توان با اطمینان بیان کرد که در این حالت کاهش ظرفیت قطع مدارشکن‌ها در مقایسه با کاهش توان اتصال کوتاه، سرعت کمتری دارد. ساده‌ترین راه برای مستقل کردن ظرفیت شکست از فرکانس طبیعی، تأثیرگذاری بر نرخ افزایش ولتاژ بازیابی (RRRV) توسط مقاومت‌ها در کنتاکت‌های مدارشکن‌ها است. با این حال، ممکن است موقعیت‌های خاصی وجود داشته باشد که ظرفیت قطع یک مدارشکن در آن کاهش یابد یا به یک مدارشکن با ظرفیت قطع بالاتر نیاز باشد. TRV یک پارامتر مهم برای مشخصات کلیدهای مدار است که استانداردهای ANSI/IEEE و IEC، پارامترهای TRV را در ساختار رتبه‌بندی کلیدها مشخص می‌کنند. (IEEE Standard C37.011, 2011)

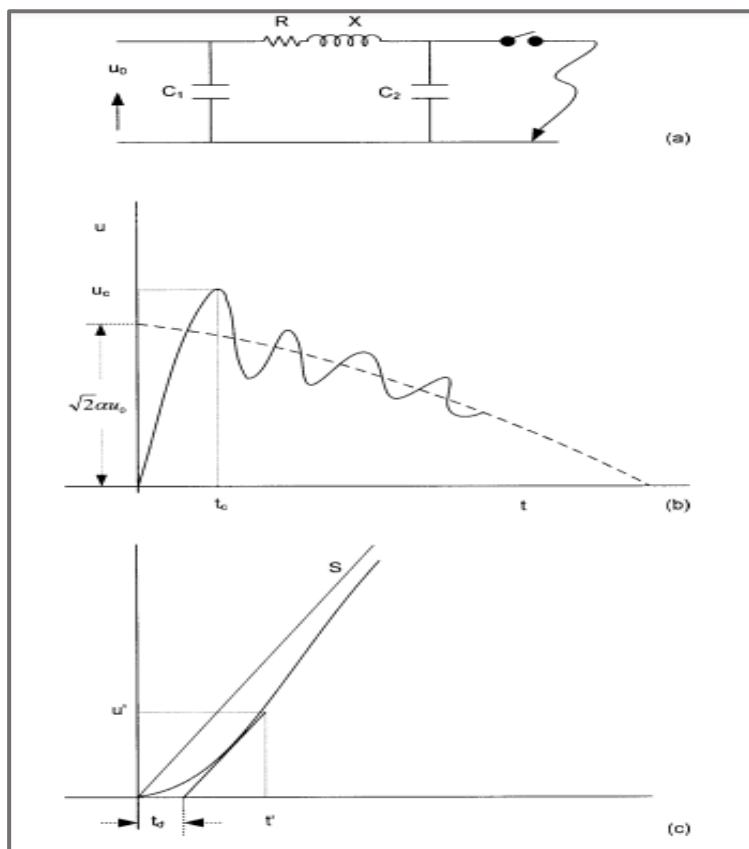
۲-۲. خطای ترمینال و TRV تک فرکانسی

مداری شامل یک گذرای تک فرکانسی برای یک خطای ترمینال در سیستمی متشکل از خازن‌ها و اندوکتانس‌های توزیع شده، رخ می‌دهد. در این حالت، خطای ترمینال به عنوان خطای نزدیک به قطع‌کننده مدار تعریف می‌شود و راکتانس بین خطا و قطع‌کننده مدار ناچیز است که از آن صرف نظر می‌شود. TRV می‌تواند در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز متفاوت باشد. ثابت‌های سیستم قدرت یعنی مقاومت، اندوکتانس و ظرفیت خازنی در شکل ۸ نشان داده می‌شود. این مدار ممکن است به خوبی نشان دهنده مدل Π یک خط انتقال باشد. همچنین شکل ۹-b پارامترهای اساسی ولتاژ بازیابی گذرا را برای یک خطای ترمینال در شبکه ساده شده

نرخ افزایش ولتاژ بازیابی ($RRRV = S$) مماس بر ولتاژ بازیابی گذرا است که از نقطه صفر ولتاژ بازیابی گذرای ذاتی (ITRV) شروع می‌شود. TRV می‌تواند با طراحی و عملکرد قطع‌کننده مدار تغییر کند، از این رو TRV اندازه‌گیری شده در پایانه‌های دو قطع‌کننده مدار می‌تواند متفاوت باشد. مشخصات سیستم قدرت با نادیده گرفتن اثر قطع‌کننده‌ها محاسبه می‌شود که به معنای این است هنگام عبور جریان نامی از یک مدارشکن ایده‌آل، امپدانس ترمینال صفر بوده و هنگام قطع جریان اتصال کوتاه، امپدانس ترمینال آن فوراً به بینهایت تغییر می‌کند. سپس TRV را ولتاژ بازیابی گذرای ذاتی می‌نامند. شکل ۹-c نمای بزرگ شده‌ای از شیب را نشان می‌دهد که در چند میکروثانیه اول رفتار ولتاژ ممکن است با تأخیر زمانی t_d توصیف شود که به خازن زمین مدار بستگی دارد. تأخیر زمانی t_d در شکل ۹-c به صورت تقریبی برابر با معادله زیر است: (J. C. Das, 2010)

$$t_d = CZ_0 \quad (4)$$

که در آن C ظرفیت خازنی پراکندگی نسبت به زمین و Z_0 امپدانس موجی سیستم است. همچنین استاندارد IEC، افزایش خطی ولتاژ را با امپدانس موجی ۴۵۰ اهم و بدون تأخیر زمانی در نظر می‌گیرد. (J. C. Das, 2010)



شکل a-9 نشان می‌دهد. (J. C. Das, 2010)

شکل ۹: مشخصات ولتاژ بازیابی گذرا در یک خطای ترمینال. (a) پیکربندی سیستم. (b) مشخصات ولتاژ بازیابی. (c) منحنی TRV اولیه، خط تاخیر و RRRV به صورت S نشان داده شده است.

۲-۳. TRV در مدارهای خازنی و القایی

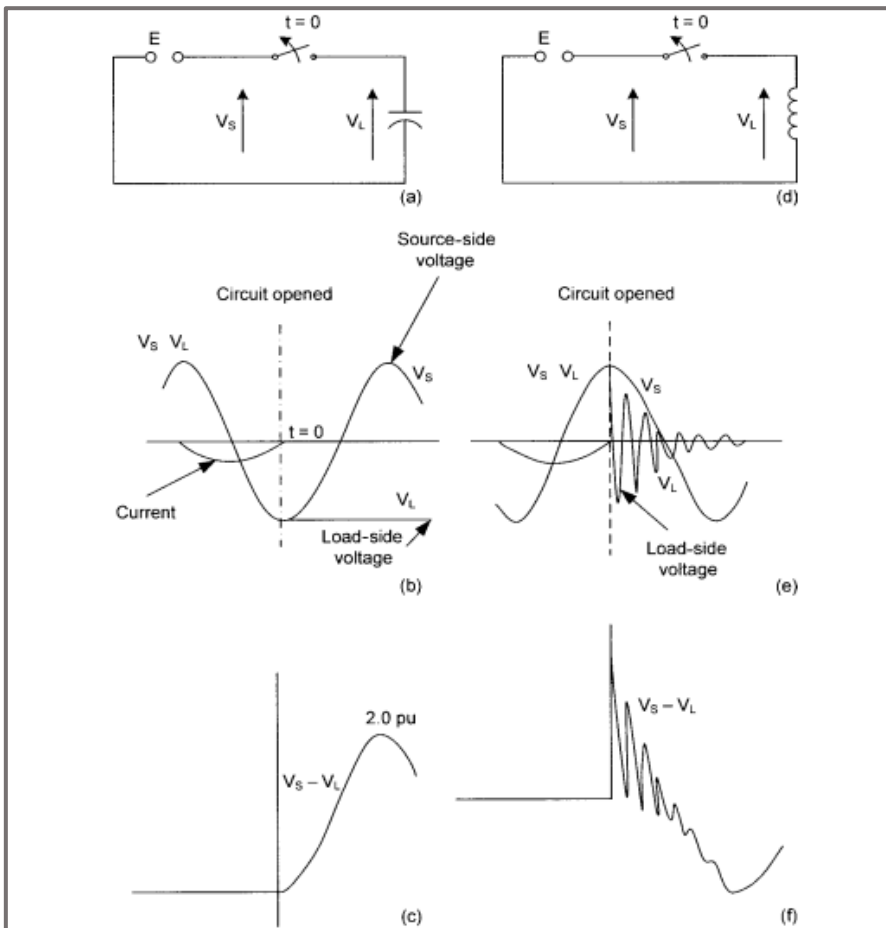
TRV در قطع مدارهای خازنی و القایی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. زمانی که در یک مدار خازنی، جریان از صفر عبور می‌کند (شکل a-۱۰) ولتاژ سیستم روی خازن‌ها محبوس می‌شود. TRV، تفاوت ولتاژی سمت منبع و بار مدارشکن پس از $1/2$ سیکل قطع جریان، حداکثر به ۲ پریونیت در هر فاز می‌رسد. نوسانات TRV در شکل a-۱۰ و c-۱۰ عملاً وجود ندارند؛ زیرا ظرفیت خازنی بزرگ، فرکانس نوسانی را سرکوب کرده و نرخ افزایش TRV کم است که این موضوع ممکن است باعث قطع کنتاکت‌های کلید شود. زمانی که فاصله کافی بین کنتاکت‌های کلید وجود نداشته باشد، ممکن است پدیده وصل مجدد رخ دهد. پدیده وصل مجدد به قطع ناموفق یک کلید گفته می‌شود. این موضوع در هنگام قطع یک بار القایی صدق



نمی‌کند (شکل d-10، e-10 و f-10)؛ زیرا ظرفیت خازنی در سمت قطع شده، کم و فرکانس مدار عایق شده زیاد است. بنابراین TRV نوسانی بوده و نرخ افزایش TRV پس از قطع نسبتاً زیاد است. (J. C. Das, 2010)

در بخش قبل نمونه‌هایی از TRV تک فرکانسی ذکر شد که زمانی رخ می‌دهد که انرژی الکتریکی بین عناصر خازنی و القایی توزیع شود و پس از اتصال کوتاه هیچ خط انتقالی در باس مربوطه متصل نباشد، همچنین هیچ شارژ اولیه‌ای روی خازن یا جریان اولیه‌ای روی سلف وجود نداشته باشد. سپس ولتاژ خازن، که می‌تواند معادل TRV باشد، عبارت است از: (J. C. Das, 2010)

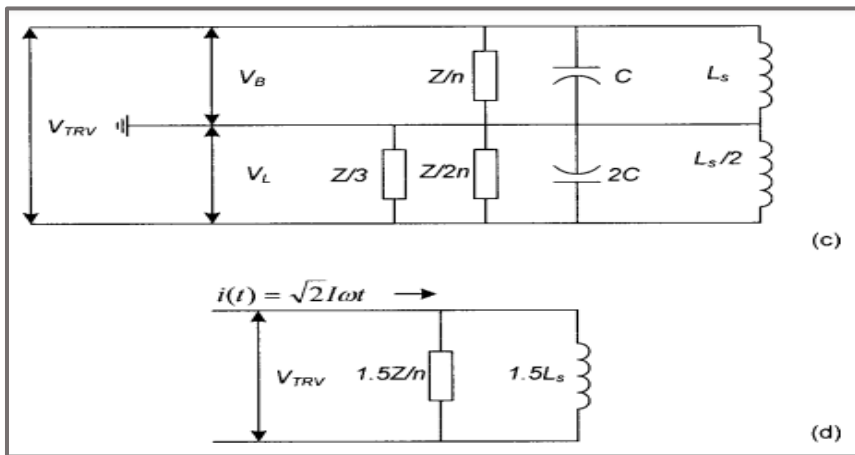
$$TRV = \frac{V}{LC} \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) \left(\frac{1}{s^2 + 1/LC} \right) \quad (5)$$



شکل ۱۰: (a) و (b) و (c) به ترتیب قطع جریان خازنی، نمودار مدار ولتاژ سمت بار و منبع و TRV. (d)، (e) و (f) به ترتیب قطع جریان القایی، نمودار مدار ولتاژ سمت بار و منبع و TRV.

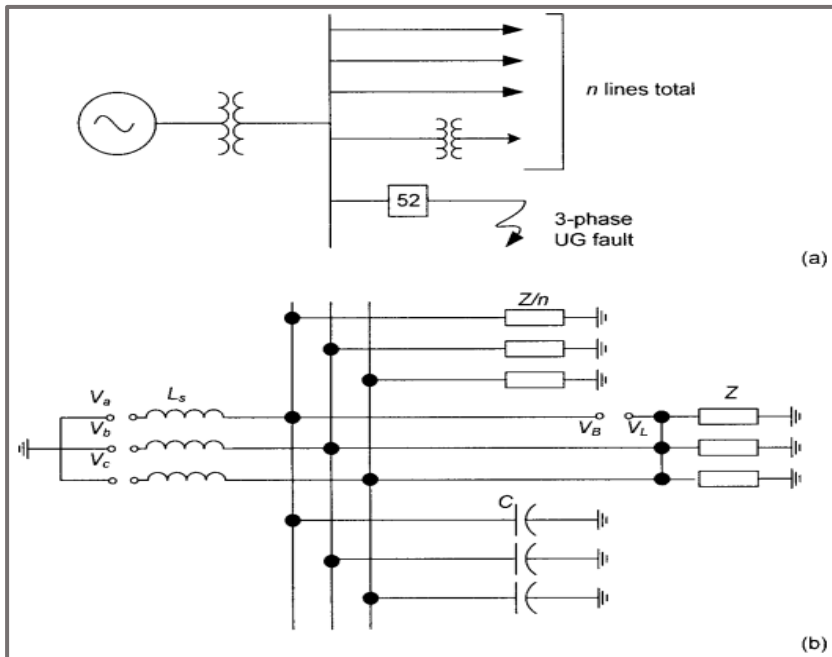
۲-۴. TRV دوفراکانسی

مداری که شامل اندوکتانس و ظرفیت خازنی در دو طرف کلید باشد باعث ایجاد TRV دوفراکانسی می‌شود. در این حالت پس از قطع خطا، هر دو مدار در فرکانس‌های خود نوسان می‌کنند و یک گذرای دوفراکانسی مرکب در سراسر کنتاکت‌های مدارشکن ظاهر می‌شود که این موضوع برای یک خطای خط کوتاه در فاصله بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از کلید (SLF) می‌تواند رخ دهد. با توجه به تجهیزات معیوب در شبکه، این بازیابی ممکن است دارای امواج در حال حرکت باشد. در سیستم‌های بالاتر از ۱۲۱ کیلوولت قطع‌کننده‌های مدار معمولاً در مدارهایی ترکیبی استفاده می‌شوند که در آن خطاها می‌توانند توسط خطوط انتقال و ترانسفورماتورها تغذیه شوند. شکل a-۱۱ را در نظر بگیرید که در آن n خط انتقال از یک باس سرچشمه می‌گیرد. توجه داشته باشید که در پایان یکی از خطوط انتقال، ترانسفورماتور گنجانده شده است. شین اصلی از یک ترانسفورماتور تغذیه می‌شود و می‌توان راکتانس منبع را به راکتانس ترانسفورماتور اضافه کرد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، یک خطای سه فاز زمین نشده در باس رخ می‌دهد. شکل b-۱۱ شبکه گذرا را در زمانی نشان می‌دهد که فاز اول (فاز a) خطا را قطع می‌کند در حالی که در دو فاز دیگر کلیدها هنوز بسته می‌باشند. ولتاژ فاز a به زمین، ۱ پریونیت و ولتاژ فاز b و c برابر با $1/2$ - پریونیت است. اگر ولتاژ سمت بار و سمت منبع کلید را به ترتیب V_B و V_L نشان دهیم، در واقع TRV همان تفاوت این دو ولتاژ است. برای به دست آوردن یک مدار معادل، همانطور که در شکل c-۱۰ نشان داده شده است، امپدانس موجی n خط موازی Z/n است. خطی که دارای خطا است، امپدانس موجی (Z) و ظرفیت خازنی ترانسفورماتور (C) شین و بریکر را نیز دارد که همه با هم جمع شده‌اند. در سمت باس، ولتاژ V_B با افت ولتاژ در راکتانس ترانسفورماتور (L_s)، ظرفیت باس (C) و امپدانس موجی معادل n خط به صورت موازی تعیین می‌شود. در سمت خطا نیز، مسیر از طریق فازهای b و c به صورت موازی است.

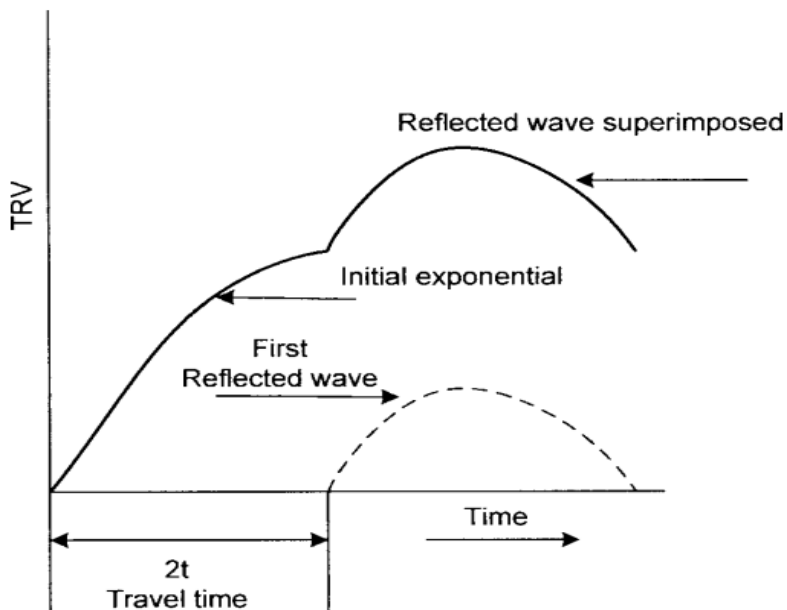


شکل c-۱۱ این موضوع را توضیح می‌دهد. (J. C. Das, 2010)





شکل ۱۱: (a) پیکربندی سیستم قدرت. (b) مدار معادل کشیده شده با اولین فاز برای پاک کردن خطا در حالی که دو فاز دیگر هنوز متصل هستند. (c) مدار کلی ساده شده برای تحلیل TRV. (d) ساده سازی مدار در (c) برای محاسبات TRV.



شکل ۱۲: مشخصات TRV، شکل موج معادل دوفراکانسی

۳. استانداردهای ANSI/IEEE برای TRV

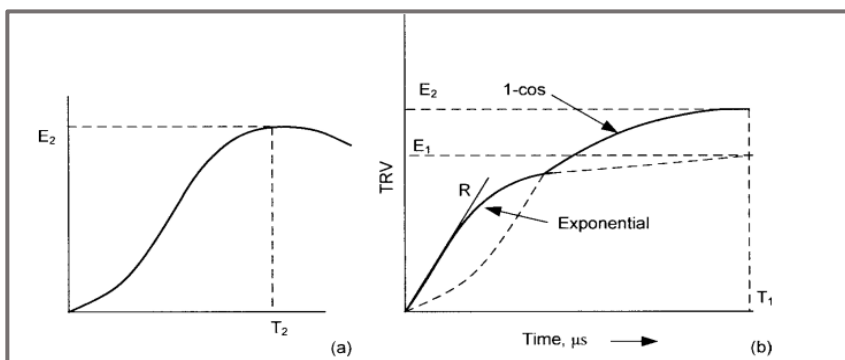
طبق استانداردهای ANSI/IEEE، برای قطع‌کننده‌های با ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت و کمتر، ولتاژ نامی گذرا به صورت پوش تعریف می‌شود که مانند تعریف در استانداردها، با استفاده از مقادیر E_2 و T_2 توسط شکل موج 1-cos تشکیل می‌شود. E_2 پیک TRV است که حاصل ضرب $1/8$ در حداکثر ولتاژ نامی در نظر گرفته می‌شود و T_2 نیز زمان رسیدن به این پیک برحسب میکروثانیه است که با توجه به نوع قطع‌کننده مدار، نوع اتصال کوتاه و درجه ولتاژ متغیر است. این موضوع در شکل a-۱۳ نشان داده شده است. همچنین برای $1/2$ چرخه اول، جزء توان-فرکانس ثابت در نظر گرفته می‌شود و با خط مستقیم E_2 نشان داده می‌شود. منحنی شکل a-۱۳ منحنی 1-cos نامیده می‌شود. TRV تشکیل شده با پوش، توسط منحنی تعریف می‌شود. (J. C. Das, 2010)

برای قطع‌کننده‌های دارای ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت و بالاتر، مقدار نامی TRV با ترکیب یک شکل موج نمایی (exponential) و شکل موج 1-cos نشان داده می‌شود. (شکل b-۱۳) پوش تشکیل شده توسط منحنی نمایی با خواندن مقادیر نامی E_1 ، R ، T_1 ، E_2 و T_2 از استانداردها و رفتار این مقادیر در جریان نامی اتصال کوتاه قطع‌کننده به دست می‌آید. مقدار R بدون توجه به اثر خازن سمت شین، به عنوان نرخ افزایش TRV نامی تعریف می‌شود که در آن ولتاژ بازیابی در پایانه‌های قطب اول افزایش می‌یابد تا تحت شرایط نامی مشخص شده برای یک خطای سه فاز زمین نشده در سمت بار قطع شود. نرخ تقریبی نزدیک به de/dt یا مقدار شیب پوش، در این حالت نامی است اما در واقع کمی بیشتر است زیرا ظرفیت خازنی سمت باس نادیده گرفته می‌شود. معادلات به صورت زیر نوشته می‌شود: (J. C. Das, 2010)

$$e_1 = E_1(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = \frac{E_1}{R}$$

$$e_2 = \frac{E_2}{2} [1 - \cos(\pi t/T_2)]$$
(۶)



شکل ۱۳: (a) منحنی 1-cos در ANSI/IEEE برای مدارشکن‌های ۱۰۰ کیلوولت و کمتر (b) پروفیل TRV در ANSI/IEEE برای مدارشکن‌های ۱۰۰ کیلوولت و بالاتر



جدول ۱: مقادیر نامی TRV برای سطح ولتاژ بالاتر از ۱۲۰ کیلوولت (J. C. Das, 2010)

RATED MAXIMUM VOLTAGE (kV)		RATED SHORT-CIRCUIT AND SHORT-TIME CURRENT (kA rms)	RATED RECOVERY VOLTAGE		DEFINITE-PURPOSE TRV PARAMETERS AT 30% OF RATED SHORT-CIRCUIT CURRENT			DEFINITE-PURPOSE TRV PARAMETERS AT 7% OF RATED SHORT-CIRCUIT CURRENT		
K FACTOR	PEAK VOLTAGE, E_2 (kV), PEAK		TIME TO PEAK, T_2 (μ s)	CURRENT (kA rms)	PEAK VOLTAGE (kV), PEAK	TIME TO PEAK (μ s)	CURRENT (kA rms)	PEAK VOLTAGE (kV) PEAK	TIME TO PEAK (μ s)	
245	1	63	431	520	19	487	30.3	4.4	505	43.8
362	1	40	637	775	12	720	40.7	2.8	745	63.2
362	1	63	637	775	19	720	37.1	4.4	745	55.7
550	1	40	968	1325	12	1094	49.0	2.8	1133	76.1
550	1	63	968	1325	19	1094	44.7	4.4	1133	63.9

۴. نمایه‌های TRV براساس استاندارد IEC

برای نمایش TRV در IEC 62271-1009، روش‌های دو و چهار پارامتری استفاده می‌شود که در استاندارد پیش‌نویس IEEE نیز پذیرفته شده است و در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۴-۱. روش چهار پارامتری

شکل ۱۴ نمایش موج TRV را با روش چهار پارامتری نشان می‌دهد. استانداردها فرض می‌کنند برای سیستم‌های بالاتر از ۷۲/۵ کیلوولت، رفع خطاهای ترمینال بالاتر از ۳۰٪ مقدار کل جریان خطا منجر به ایجاد ویژگی‌هایی در TRV می‌شود که دارای یک پوشش چهار پارامتری هستند. موج TRV دارای یک دوره اولیه افزایش بالا و سپس نرخ افزایش کم است. این شکل موج‌ها را می‌توان با چهار پارامتر زیر نشان داد: (J. C. Das, 2010)

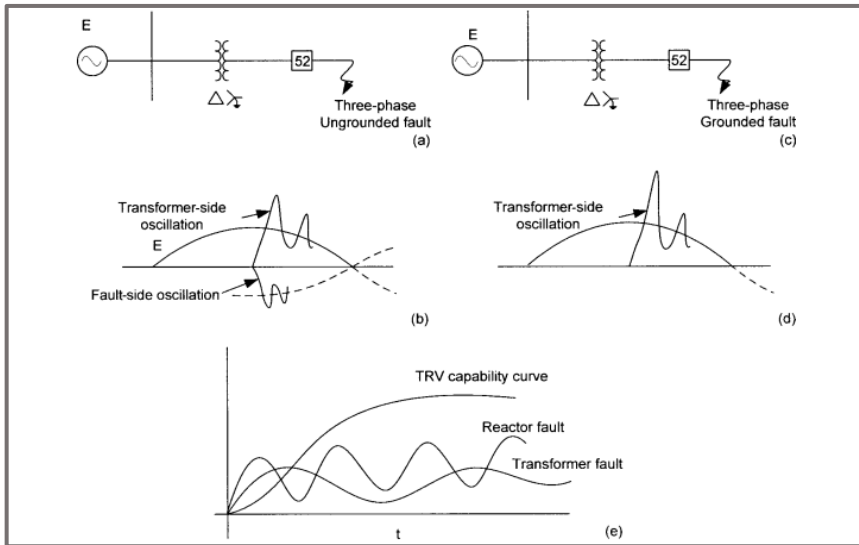
• $u1$ = ولتاژ مرجع اول بر حسب کیلوولت

• $t1$ = زمان رسیدن به $u1$ ، بر حسب میلی‌ثانیه

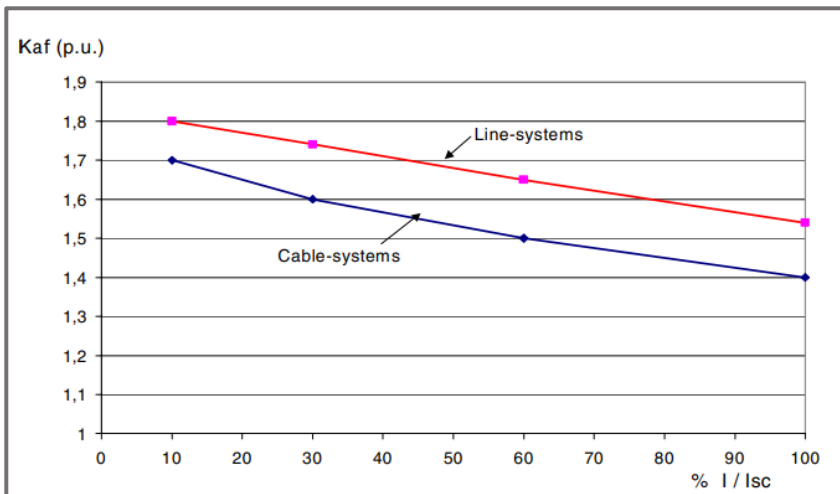
• uc = ولتاژ مرجع دوم، مقدار پیک TRV

• $t2$ = زمان رسیدن به uc ، بر حسب میلی‌ثانیه

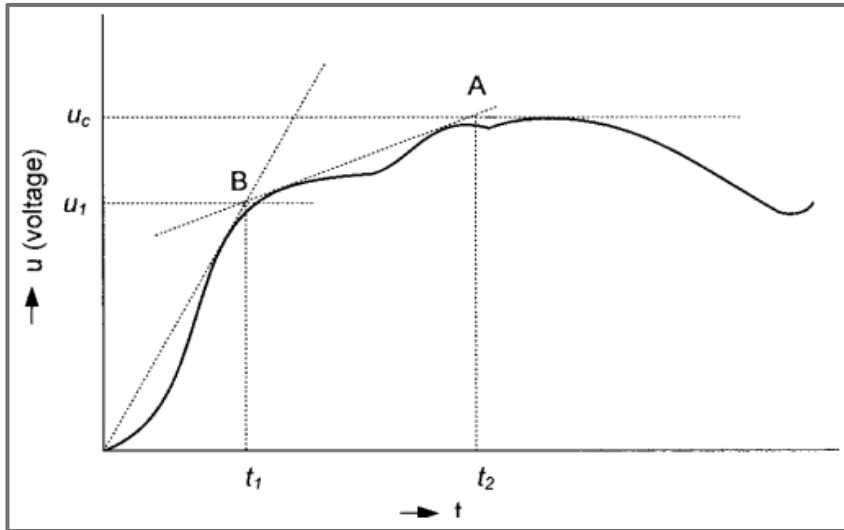
IEC مقادیر $u1$ ، uc ، $t1$ و $t2$ را برای کلیدهای مدار مشخص می‌کند. ضریب دامنه (Kaf) برای حالت‌های مختلف آزمایش مانند T10، T30، T60، T100 (به ترتیب در ۱۰۰٪، ۶۰٪، ۳۰٪ یا ۱۰٪ از جریان خطا) داده شده است. (J. C. Das, 2010)



شکل ۱۴: (a) خطای سه فاز زمین نشده در سمت ثانویه ترانسفورماتور با سیستم سیم‌پیچی مثلث-ستاره. (b) پروفیل. (c) خطای سه فاز به زمین در سمت ثانویه یک ترانسفورماتور با سیستم سیم‌پیچی مثلث-ستاره. (d) پروفیل TRV. (e) موقعیت‌هایی (خطاهای نزدیک ترانسفورماتور یا راکتور) که در آن TRV می‌تواند از منحنی قابلیت TRV مدارشکن‌ها فراتر رود.



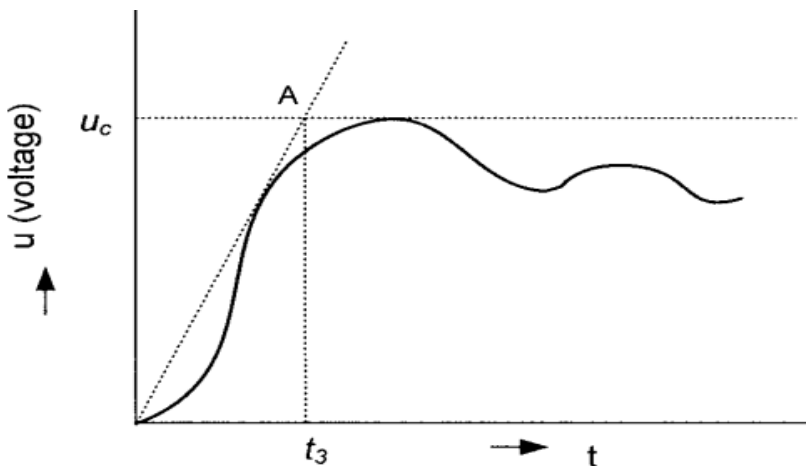
شکل ۱۵: ضریب دامنه (Kaf) به عنوان تابعی از جریان اتصال کوتاه (Isc) جریان اتصال کوتاه نامی (است)



شکل ۱۶: نمایش چهار پارامتری TRV در IEC

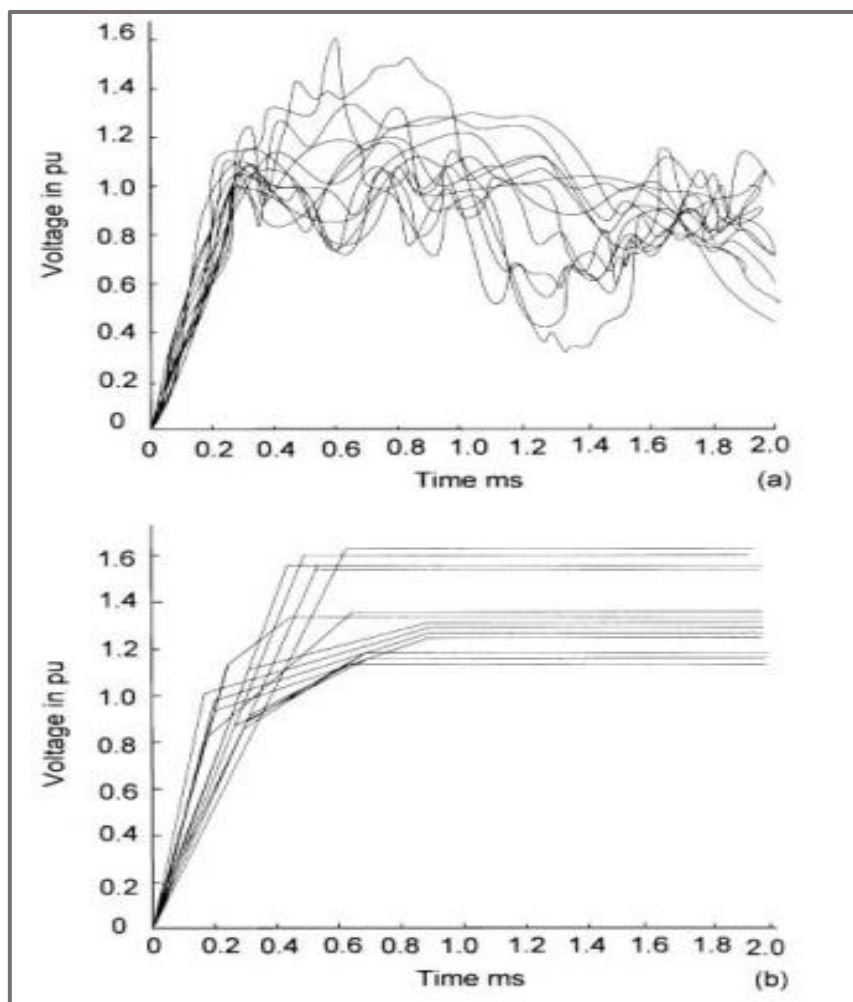
۲-۴. نمایش دو پارامتری

برای خطاهای ترمینال بین ۱۰% تا ۳۰% در سیستم‌های بالاتر از ۷۲/۵ کیلوولت و برای تمام جریان‌های خطای ترمینال در سیستم‌های ۷۲/۵ کیلوولت و کمتر، استاندارد، پروفیل TRV را با دو پارامتر u_c و t_3 در نظر می‌گیرد. شکل ۱۵ نمایش موج TRV را به روش دو پارامتری نشان می‌دهد. این شکل موج در سیستم‌های کمتر از ۱۰۰ کیلوولت یا مکان‌هایی که جریان اتصال کوتاه در مقایسه با حداکثر جریان اتصال کوتاه در سیستم کم است، رخ می‌دهد. TRV را در این حالت می‌توان تقریباً با یک فرکانس گذرا نشان داد. (J. C. Das, 2010)



شکل ۱۷: نمایش دو پارامتری TRV در IEC

همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، نرخ اولیه افزایش TRV در بخش‌هایی که براساس روش‌های دو یا چهار پارامتری با مشخص کردن خط تأخیر ترسیم شده‌اند، قرار می‌گیرد. بنابراین، با توجه به نوع خطا، پیکربندی سیستم و مکانی که خطا در آن رخ می‌دهد و همچنین تغییر رفتار فرایند قطع کلیدهای مدار، پروفیل‌های متفاوتی از TRV می‌تواند وجود داشته باشد. (J. C. Das, 2010)



شکل ۱۸: (a) مقدار اندازه‌گیری شده‌ی TRV در یک سیستم ۴۰۰ کیلوولت. (b) بیان شده توسط روش‌های IEC.

۵. مقایسه استانداردهای IEEE و IEC

همانطور که در بخش‌های قبل بررسی شد دو استاندارد IEEE و IEC تعاریف متفاوتی در رابطه با شکل موج‌های TRV ارائه کردند که در ادامه به مقایسه تفاوت‌های این دو استاندارد پرداخته می‌شود.

• تفاوت در تعریف شکل موج‌ها

دسته‌بندی استاندارد IEEE در رابطه با شکل موج‌های TRV براساس یک تابع exponential برای کلیدهایی با محدوده ولتاژ کمتر از ۱۰۰ کیلوولت و یک تابع شامل ترکیب exponential و 1-cos برای کلیدهایی با محدوده ولتاژ بالاتر از ۱۰۰ کیلوولت انجام شده است. اما دسته‌بندی استاندارد IEC در رابطه با شکل موج‌های TRV برای کلیدهای با محدوده ولتاژ کمتر از ۷۲/۵ کیلوولت براساس پوش‌های دو پارامتری و برای کلیدهایی با محدوده ولتاژ بیشتر از ۷۲/۵ کیلوولت براساس پوش‌های ۴ پارامتری ارائه شده است.

• در نظر گرفتن T_d

استاندارد IEC در این رابطه بدترین حالت را لحاظ کرده است؛ به این معنا که مقادیر خازن‌های پارازیتی سمت منبع را در نظر نگرفته، بدترین نوع RRRV را لحاظ کرده و عملاً مقدار امیدانس موجی را ۴۵۰ اهم فرض کرده است.

• استاندارد IEEE C37.06 و نسخه IEEE C37.06.1

مقادیر پیک TRV برای محاسبات طبق استاندارد IEEE C37.06 از رابطه زیر پیروی می‌کنند که ضرایب K_p, K_{af} که مربوط به درصد محدوده قطع جریان خطا، فاز قطع‌کننده و نوع سیستم زمین در هنگام خطا در محاسبه پیک تاثیرگذار می‌باشند.

$$U_c = k_p \times k_{af} \times \frac{U_r \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (۷)$$

اما در استاندارد IEEE C37.06.1 ضریب جدیدی با عنوان K_{vd} که مربوط به تاثیر ترانسفورماتور نزدیک به خطا می‌باشد، تعریف می‌شود. اثر این ترانسفورماتور براساس محدودیتی که در عبور جریان خطا نشان می‌دهد، نمایان می‌شود و با توجه به اینکه چه درصدی از جریان خطا را محدود می‌کند ضریب K_{vd} تعریف می‌شود. در نهایت با توجه به این تعریف، محاسبه TRV براساس رابطه زیر خواهد بود:

$$U_c = k_p \times k_{af} \times k_{vd} \times \frac{U_r \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (۸)$$

۶. شبیه‌سازی موردی TRV

در این بخش از پژوهش به شبیه‌سازی موردی دو حالت از شکل موج‌های TRV در نرم‌افزار حالت گذاری EMTP_RV پرداخته می‌شود تا به درک بهتری از مفاهیم ارائه شده برسیم و شکل موج‌های حاصل از آن را هنگام وقوع در یک شبکه واقعی مشاهده کنیم.

جدول ۲: مقادیر تعریف شده برای TRV براساس استاندارد IEEE (IEEE Std C37.011, 2019)

Standard values of TRV represented by four parameters for terminal fault, short-line fault and out-of-phase fault test duties.												
Line No.	Rated maximum voltage (1) U_r kV, rms	Test duty	First pole to clear factor k_{pp} p.u.	Amplitude factor k_{af}	First reference voltage u_1 kV	Time μ s	TRV peak value (4) (8) u_2 kV	Time (2) t_2 μ s	Time delay (3) t_d μ s	Voltage u' kV	Time t' μ s	RRRV u_1/t_1 kV/ μ s
1	123	Terminal fault	1.5	1.40	113	56	211	224	2	57	30	2
2	123	Short line fault	1.0	1.40	75	38	141	152	2	38	21	2
3	123	Out-of-phase	2.5	1.25	188	113	314	452	2	94	51	1.67
4	145	Terminal fault	1.5	1.40	133	67	249	268	2	67	35	2
5	145	Short line fault	1.0	1.40	89	44	166	178	2	44	24	2
6	145	Out-of-phase	2.5	1.25	222	133	370	532	2	111	68	1.67
7	170	Terminal fault	1.5	1.40	156	78	291	312	2	78	41	2
8	170	Short line fault	1.0	1.40	104	52	194	208	2	52	28	2
9	170	Out-of-phase	2.0 (6)	1.25	208	135	347	541	2	104	70	1.54
10	245	Terminal fault	1.5	1.40	225	113	420	452	2	113	58	2
11	245	Short line fault	1.0	1.40	150	75	280	300	2	75	40	2
12	245	Out-of-phase	2.0 (6)	1.25	300	195	500	779	2	150	99	1.54

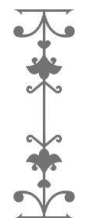
جدول ۳: مقادیر تعریف شده برای TRV براساس استاندارد IEEE (IEEE Standard C37.01, 2011)

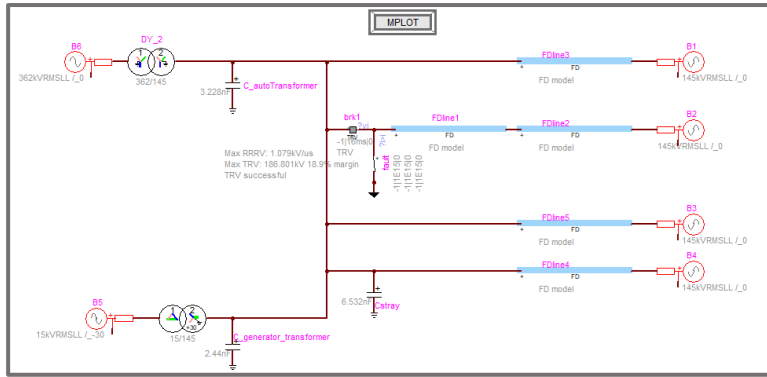
Line No.	Rated Maximum Voltage kV, rms (1)	Rated Voltage Range (1)	Rated Short-Circuit and Short-Time Current kA, rms (1)	Rated Transient Recovery Voltage (1)		Definite Purpose TRV Parameters at 30% of Rated Short-Circuit Current			Definite Purpose TRV Parameters at 7% of Rated Short-Circuit Current		
				Peak Voltage E_2 kV, peak	Time to Peak T_2 μ sec	Current kA, rms	Peak Voltage kV, peak	Time to Peak μ sec	Current kA, rms	Peak Voltage kV, peak	Time to Peak μ sec
Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	
1	123	1.0	20	216	275	6	245	28.3	1.4	253	48.7
2	123	1.0	40	216	260	12	245	23.5	2.8	253	36.5
3	123	1.0	63	216	260	19	245	21.4	4.4	253	31.0
4	145	1.0	20	255	330	8	288	30.9	1.1	299	53.4
5	145	1.0	40	255	310	16	288	25.9	2.2	299	40.0
6	145	1.0	63	255	310	19	288	22.5	4.4	299	34.0
7	145	1.0	80	255	310	24	288	22.6	5.0	299	31.2
8	170	1.0	16	298	395	8	338	35.2	1.1	350	63.4
9	170	1.0	31.5	298	360	9.5	338	29.1	2.2	350	47.0
10	170	1.0	40	298	360	12	338	27.8	2.8	350	43.2
11	170	1.0	50	298	360	15	338	26.4	3.5	350	35.7
12	170	1.0	63	298	360	19	338	25.4	4.4	350	36.7
13	245	1.0	31.5	431	520	9.5	487	34.8	2.2	505	56.2
14	245	1.0	40	431	520	12	487	33.3	2.8	505	51.6
15	245	1.0	50	431	520	15	487	31.6	3.5	505	47.4
16	245	1.0	63	431	520	19	487	30.3	4.4	505	43.8
17	362	1.0	40	637	775	12	720	40.7	2.8	745	63.2
18	362	1.0	63	637	775	19	720	37.1	4.4	745	55.7
19	550	1.0	40	868	1325	12	1094	49.0	2.8	1133	76.1
20	550	1.0	63	868	1325	19	1094	44.7	4.4	1133	63.9
21	800	1.0	40	1408	1530	12	1591	60.7	2.8	1647	94.1
22	800	1.0	63	1408	1530	19	1591	55.3	4.4	1647	79.9

۱-۶. حالت نمایی (Exponential)

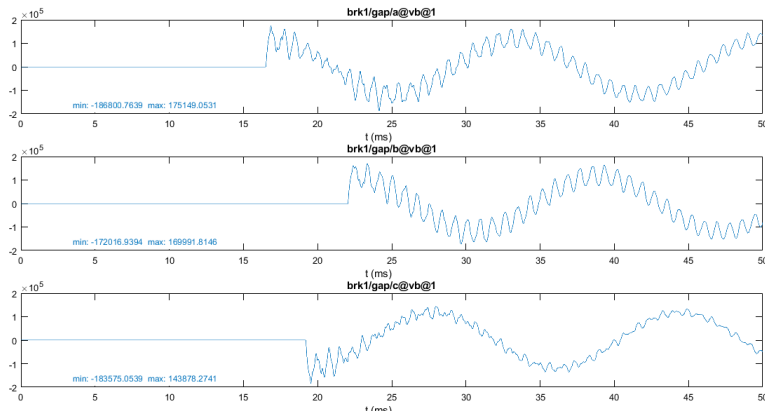
شبکه شبیه‌سازی شده برای مشاهده این شکل موج در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود.

- حالت نمایی TRV زمانی رخ می‌دهد که یک خطای سه فاز زمین نشده روی پایانه‌های کلید قدرت ایجاد شود و حداقل یک ترانسفورماتور و یک خط انتقال در سمت بدون خطای کلید وجود داشته باشد.
- شکل موج حاصل از این نوع TRV به صورت یک تابع نمایی خواهد بود.
- شبیه‌سازی حالت فوق با توجه به مقادیر داده شده برای عناصر موجود در نرم‌افزار انجام شده است.
- در این مدار یک خطای سه فاز زمین نشده بعد از مدارشکن I ایجاد شده است.

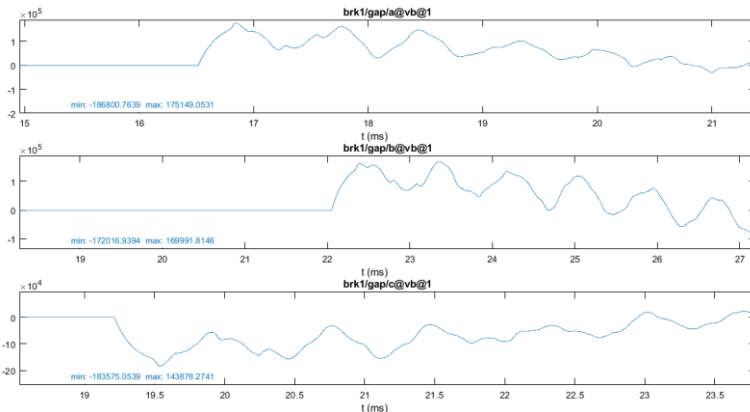




شکل ۱۹: شبکه شبیه‌سازی شده برای مشاهده TRV در حالت نمای



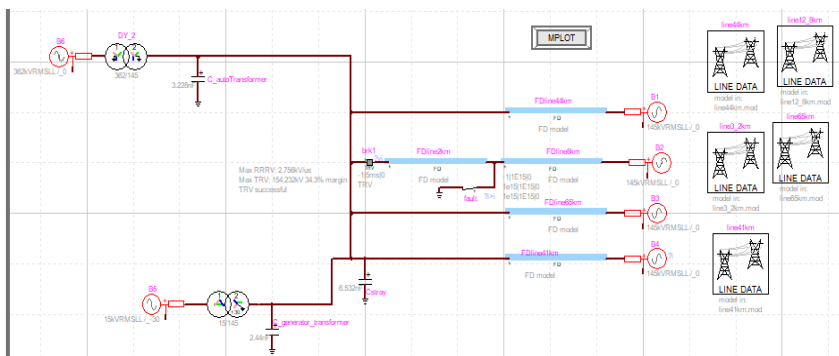
شکل ۲۰: نمایش شکل موج در شبیه‌سازی شبکه معادل



شکل ۲۱: نمای بزرگ شده از شکل شماره ۲۰

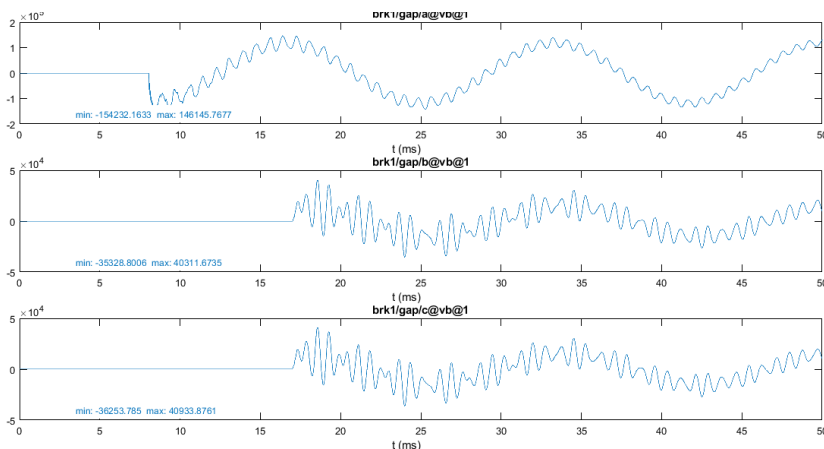
۲-۶. حالت خطی کوتاه (SLF)

شبکه شبیه‌سازی شده برای مشاهده این شکل موج در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود.



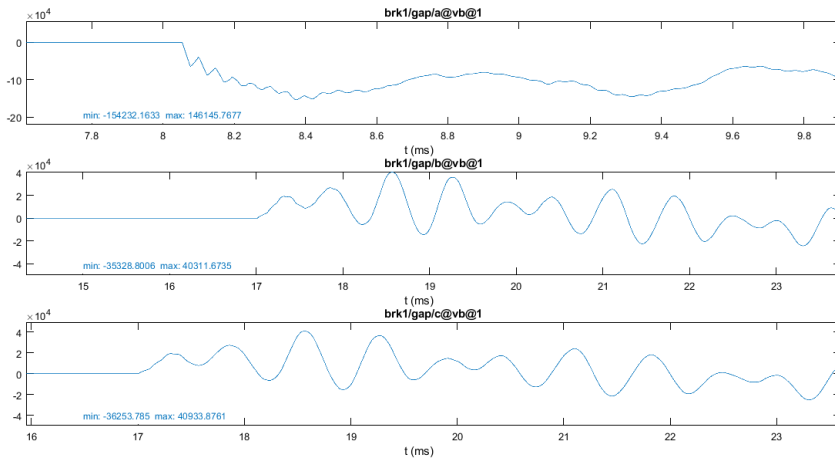
شکل (۲۲): شبکه شبیه‌سازی شده برای مشاهده TRV در حالت SLF

- در این حالت نیز TRV زمانی رخ می‌دهد که خطا از محل کلید فاصله داشته باشد (معمولاً بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ متر).
- شکل موج TRV در این حالت به صورت دندان اره‌ای یا مثلثی خواهد بود.
- خطای اعمال شده در فاصله ۲ کیلومتری از مدارشکن ۱ اعمال شده است.
- شبیه‌سازی حالت فوق با توجه به مقادیر داده شده به عناصر انجام شده است.



شکل ۲۳: نمایش شکل موج TRV در شبیه‌سازی شبکه





شکل ۲۴: نمای بزرگ شده از شکل شماره ۲۳

۷. نتیجه گیری

در این پژوهش، ابتدا به بررسی و شناخت انواع اضافه ولتاژهای ممکن در شبکه قدرت پرداخته شد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها اضافه ولتاژهای ناشی از قطع و وصل کلیدهای قدرت می‌باشد. این اضافه ولتاژها دارای انواع مختلف شکل موج می‌باشند که اساس شکل‌گیری آن‌ها وابسته به پارامترهای توپولوژی شبکه موجود، نوع خطا، مقادیر جریان خطا و وجود عناصری مانند ترانسفورماتور، راکتور و خازن‌های پارازیتی موجود در شبکه می‌باشد. اثرگذاری خازن‌های پارازیتی در مطالعات گذرا بسیار با اهمیت می‌باشد؛ زیرا سیستم در فرکانس‌های بالا جریان‌کشی‌های خازنی خواهد داشت که در مقدار قطع جریان خطا موثر خواهد بود. پس از بررسی و شناخت این پدیده، به استانداردهای موجود در این زمینه پرداخته شد و سپس برای درک بهتر مفاهیم و مشاهده TRV در یک شبکه واقعی، شبیه‌سازی موردی در نرم‌افزار حالت گذرای EMTP-RV انجام شد.

۸. پیشنهادات

کلیدهای قدرت سیستم‌های عایقی متفاوتی نظیر هوا، روغن و خلا دارند که از میان آن‌ها کلیدهای خلا تا سطح ولتاژ ۷۲ کیلوولت مورد بهربردی قرار گرفته‌اند. بنابراین با توجه اهمیت ولتاژ بازگشتی گذرا در کلیدهای قدرت، زمینه‌های تحقیقاتی متعددی در این حوزه وجود دارد. از طرفی با توجه به گسترش روزافزون منابع انرژی تجدیدپذیر در جهان و نیاز جدی به تامین انرژی برق با آلودگی‌های زیست محیطی کمتر، توصیه‌ها و پیشنهادات تحقیقاتی می‌توانند به شرح زیر باشند:

۱. بررسی و تحلیل اثرگذاری فلیترهای مورد استفاده در منابع انرژی خورشیدی بر روی

اضافه ولتاژهای بازگشتی

۲. بررسی و تحلیل اثر گذاری سیستم‌های کابلی مورد استفاده در منابع انرژی بادی مستقر در دریاها و اقیانوس‌ها بر اضافه‌ولتاژهای بازگشتی
۳. بررسی، تجزیه و تحلیل اضافه‌ولتاژهای بازگشتی در کلیدهای خلا (vacuum circuit breaker)
۴. بررسی، تجزیه و تحلیل پارامترهای موثر بر اضافه‌ولتاژهای بازگشتی در کلیدهای قدرت مورد استفاده در پست‌های GIS



J. C. Das “Transients in Electrical Systems Analysis, Recognition, and Mitigation”

IEEE Standard C37.011. Application guide for transient recovery voltage for AC high-voltage circuit breakers; 2011.

IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers with Rated Maximum Voltage above 1000 V, IEEE Std C37.011 2019

IEEE Standard C37.01 Application guide for transient recovery voltage for AC high-voltage circuit breakers; 2011

بررسی مروری مدل‌سازی ابرخازن‌ها

سید محمد سجادی^۱، محمد منتظری^۱

چکیده

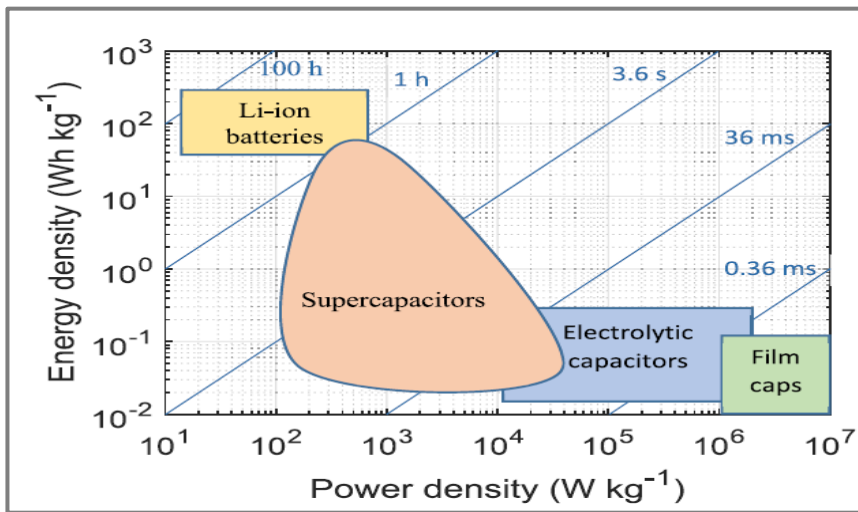
سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، نقش پررنگی در تنوع‌بخشی به سبد انرژی ایفا می‌کنند. از میان جدیدترین نسل‌های ذخیره‌ساز انرژی می‌توان به ابرخازن‌ها اشاره نمود. ابرخازن‌ها به دلیل چگالی بالای انرژی، کارایی خوب و ماندگاری طولانی بدون نیاز به نگهداری خاص، در حال دست آوردن جایگاهی ویژه در بحث ذخیره‌سازی هستند. همین موارد سبب شده تا ابرخازن‌ها به موضوعی جذاب برای پژوهش و مطالعه محققان تبدیل شوند. این مقاله مروری جهت شناخت بهتر رفتار و بهره‌برداری بیشتر ابرخازن‌ها در شرایط مختلف مطالعاتی که برای مدل‌سازی ابرخازن‌ها صورت گرفته است را مورد بررسی قرار داده است. با توجه به علاقه زیاد به مدل‌سازی این سیستم‌ها، مقالات بسیاری در این زمینه منتشر شده است که در آنها تکنیک‌های مدل‌سازی به صورت طبقه‌بندی، توضیح داده شده و مقایسه می‌شوند. همچنین نقاط قوت و ضعف هر مدل نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد و تکنیک‌های تجربی مورد استفاده برای اندازه‌گیری خواص مدل شرح داده می‌شود. سرانجام تجزیه و تحلیل‌ها بیانگر گسترش بازار ابرخازن‌ها در حال حاضر است.

واژگان کلیدی: ابرخازن، ذخیره‌سازی، مدل‌سازی، انرژی.



۱. مقدمه

نگرانی در مورد تغییرات آب و هوا و مشکلاتی که وابستگی نفتی نظیر نوسانات قیمتی و بحرانهای نفتی برای بسیاری از کشورها، نشان از لزوم ایجاد تغییرات اساسی در سیستم‌های تامین انرژی دارد. به دلیل گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و برقی‌سازی بخش حمل و نقل، سیستم‌های ذخیره انرژی الکتریکی (ESS)^۱ در حال تبدیل شدن به یک موضوع مهم پژوهشی هستند. (Aneke and Wang 2016) ابرخازن‌ها سیستم‌هایی با چگالی توان و انرژی بالا می‌باشند که ارتباطی میان باتری‌ها و خازن‌های معمولی را ایجاد می‌کنند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، انرژی مخصوص یک ابرخازن به مراتب بالاتر از یک خازن معمولی است و توان مخصوص آنها نیز از باتری‌های موجود بیشتر است. باتری‌های لیتیوم-یون برای کاربری‌هایی که نیاز به چرخه تخلیه چند ساعته دارند (به عنوان مثال خود مصرفی فتولتائیک‌ها) مناسب هستند و خازن‌های سنتی دارای عملکرد بهینه با زمان چرخه میلی یا میکرو ثانیه (به عنوان مثال مبدل‌های برق) هستند. در این زمینه، ابرخازن‌ها (SC)^۲ به عنوان بهترین گزینه برای انواع کاربردهایی مطرح می‌شوند که نیازمند زمان چرخه شارژ-تخلیه از چند ثانیه تا چند دقیقه هستند.



شکل ۱: مشخصه چگالی توان و انرژی انواع ذخیره‌سازها

به طور کلی می‌توان ادعا کرد که این فناوری دارای چگالی توان و راندمان تخلیه بالا، چرخه عمر طولانی و نگهداری بسیار کم‌هزینه است. اصطلاحاتی توسط محققان، تولیدکنندگان و کاربران برای مراجعه به SCها استفاده می‌شود. برخی از محققان با توجه به اینکه مکانیزم اصلی ذخیره انرژی در این تجهیزات یک میدان

¹ Energy Storage Systems

² Super Capacitors

الکتريکي ايجاد شده در لايه مضاعف بين الکترودها و الکتروليت است، آنها را خازن‌هاي الکتروشيميایي (Li, Zhang et al. 2017) يا خازن‌هاي دو لايه الکتريکي می‌نامند. (Parida, Bhavanasi et al. 2017) از آنجا که رفتار SCها مشابه خازن‌هاي معمولی بوده و اغلب برای مدیریت پیک‌هاي پر قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند، دیگر نویسندگان آنها را خازن‌هاي قدرت می‌نامند. (Zhang, Wang et al. 2015) خازن‌هاي فوق العاده و خازن‌هاي طلا نیز نام‌هايی هستند که برای ارجاع به SCها استفاده می‌شوند. این اصطلاحات که منشأ آن در اولین تجهیزات قابل استفاده تجاری است، در اواخر دهه ۷۰ و اوایل دهه ۸۰ میلادی توسط شرکت‌هايی مانند شرکت الکتريکي نیپون (تحت عنوان "خازن فوق العاده") و پاناسونیک (تحت عنوان "خازن طلا") استفاده شده است. (Sharma and Bhatti 2010)

در سال‌هاي اخیر، مقالات تحقیقاتی متعددی در مورد مباحث مختلف مربوط به SC منتشر شده است. همچنین مقالات بازبینی بسیاری با هدف رفع نیاز به ساماندهی و جمع‌بندی بخش‌هاي تحقیقاتی با توجه به نیاز آشکار فعلی به این فناوری، انتظار رشد برای آینده و پتانسیل چشمگیر آن منتشر شده است.

ابرخازن‌ها به دلیل عملکرد پویای قدرت و طول عمر بالا در مقایسه با باتری‌هاي مورد استفاده در شرایط یکسان، مورد توجه قرار گرفتند. این تجهیزات را می‌توان با استفاده از مبدل‌هاي الکترونیکی با بسیاری از منابع تولید انرژی مانند نیروگاه‌هاي انرژی تجدیدپذیر مرتبط دانست. غالب SCها با استفاده از مدارهاي معادل متشکل از مقاومت‌ها، خازن‌ها و عناصر القایی که ممکن است در فرکانس‌هاي بالاتر دارای اهمیت باشند، در حوزه‌هاي زمان و فرکانس مدل‌سازی می‌شوند. مدل خط انتقال اولیه الکترودهاي متخلخل در الکتروليت‌ها با شبیه‌سازی دینامیک مولکولی سازگار است و برای درک رفتار ابرخازن‌ها استفاده شده است. نمایش یک ابرخازن از نظر مدار معادل متشکل از عناصر غیرفعال، نه تنها یک روش مناسب و محاسباتی کارآمد برای توصیف ابرخازن است، بلکه براساس فیزیک صدا نیز بنا شده است. در واقع، خطی شدن معادلات دیفرانسیلی جزئی که توصیف‌گر سیستم است، منجر به معادلات دیفرانسیل معمولی خطی می‌شود که می‌تواند با یک شبکه الکتريکي غیرفعال همراه باشد. برای درک بهتر عملکردها، مقایسه‌هايی بین مدارهاي معادل انجام شده است و مدل‌هايی با چند مقیاس نشان داده شده است که طیف‌هاي امپدانس را به خوبی نشان می‌دهد. برای جابجایی دقیق پارامترهاي مدل، استفاده از الگوریتم‌هاي بازگشتی برای به دست آوردن مناسب‌تر داده‌هاي تجربی توصیف‌کننده چرخه بار تخلیه مورد نیاز است.

۲. مدل‌سازی

مدل یک سیستم فیزیکی، بازنمایی ریاضی از جنبه‌هاي خاصی از رفتار آن است. با توجه به پیچیدگی فرایندهاي حاکم بر رفتار هر سیستم و مقدار قابل توجهی از متغیرهايی که در عملکرد خود از تاثیر بیشتر یا کمتر برخوردار هستند، هر مدل برای دستیابی به اهداف خاصی طراحی

شده است. مدل‌سازی سیستم‌های الکتروشیمیایی و به ویژه ابرخازن‌ها، ابزاری اساسی برای بهره‌برداری، بهینه‌سازی ادغام و مدیریت ابرخازن در یک سیستم الکتریکی کامل است. به علاوه، این تعامل خوب بین علم مواد و مهندسی برق برای بهبود مواد SCها و فرایندهای تولید، پیش‌بینی عملکرد ابرخازن، استراتژی کنترل، پیش‌بینی طول عمر، محاسبات هزینه و انتظارات آینده مفید است. بررسی روند اصلی مدل‌سازی‌های مختلف در این بخش ارائه شده است، نقاط قوت و ضعف اصلی هر یک مشخص شده و به معقول‌ترین کارکردهای هر مدل می‌پردازیم. بیشترین استفاده از تکنیک‌های تعیین مشخصات برای هر مدل خلاصه می‌شود و نتایج برخی از آزمایش‌های تجربی به عنوان نمونه‌های مصور برای تسهیل درک مدل‌ها و فرایندهای توصیف ارائه می‌شود. با توجه به تمرکز ادغام سیستم در این بررسی، بر روند مدلی که حمایت بهتری از برنامه‌های مهندسی ابرخازن دارد، تاکید بیشتری صورت می‌گیرد.

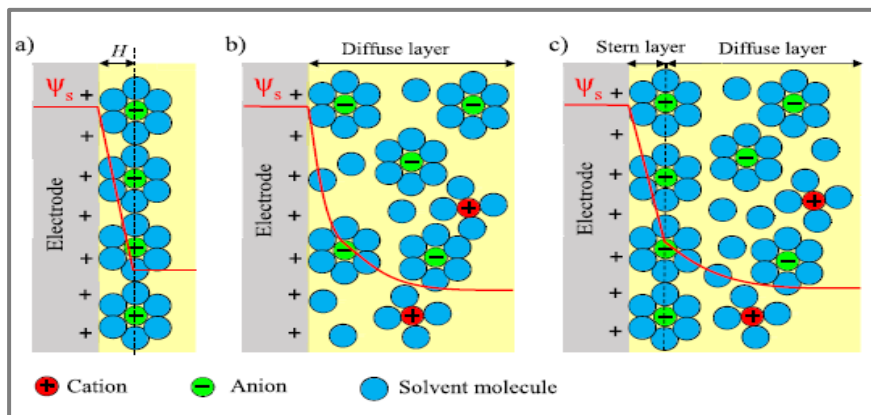
۲-۱. مدل‌سازی براساس رفتار دولایه

اثر دولایه در ابتدا توسط فیزیک‌دان آلمانی، هرمان ون هلملتز (Hermann von Helmholtz) توصیف شد. (Helmholtz 1879) هلملتز فهمید که یک الکتروود شارژ شده در یک الکتروولیت، یون‌های مشابه را با همان بار دفع و یون‌های با بار مخالف را جذب می‌کند. (Wang and Pilon 2011) وی این پدیده را به عنوان خازن معمولی با فاصله برای جداسازی بار H که تقریباً شعاع یون‌های حل شده است، مدل نمود. (شکل a2) ضعف اصلی این پیشنهاد عدم وجود هیچگونه وابستگی ظرفیت به ولتاژ است، که با اندازه‌گیری‌های واقعی تطابق ندارد.

پس از آن، گای و چاپمن به طور مستقل مدلی را برای لایه دوتایی ایجاد کردند که در آن تحرک یونی در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، یون‌ها به عنوان نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شوند و ترکیبی از انتشار و نیروهای الکترواستاتیکی به عنوان پدیده حاکم بر تحرک یونی پیشنهاد می‌شود. بنابراین، همانطور که در شکل (b2) نشان داده شده است، یک لایه پنخس شده در ناحیه الکتروولیت نزدیک به الکتروودها ارائه شد. با این حال، از آنجا که یون‌ها به عنوان بار نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شوند، مقادیر ظرفیت پیش‌بینی شده توسط گای و چاپمن از اندازه‌گیری‌های واقعی بیشتر است زیرا در واقعیت یون‌ها اندازه محدود دارند و نمی‌توانند به طور دلخواه به سطح نزدیک شوند.

دانشمند دیگری به نام استرن مدل‌های هلملتز و گای-چاپمن را ترکیب کرد و لایه دوتایی را به عنوان ترکیبی از دو لایه توصیف کرد که در شکل (c2) نشان داده شده است. وی یک لایه فشرده از یون‌های غیر مترقبه را که به شدت در سطح الکتروود جذب می‌شوند، مشابه لایه هلملتز و یک لایه پراکنده با یون‌های متحرک را پیشنهاد کرد و از مدل گای-چاپمن استفاده نمود.





شکل ۲: مدل رفتار دولایه

این‌ها آثار اولیه‌ای هستند که اصول رفتار دو لایه در آنها برقرار و معادلات اساسی ارائه شده است. حتی اگر این ایده‌ها برای توسعه مدل‌های SC استفاده شوند اما به خودی خود به عنوان یک ابزار بنیادی برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند؛ زیرا تأثیر پدیده‌های دیگر نیز باید در یک مدل در نظر گرفته شود تا رفتار واقعی SC را پیش‌بینی کند.

۲-۲. مدل مولکولی

مدل‌سازی مولکولی ابزاری مفید برای طراحی SC و تجزیه و تحلیل خواص مواد است. به لطف این روش می‌توان پدیده‌های غیرقابل مشاهده در هیچ مجموعه آزمایشی مانند توزیع و جهت‌گیری یون‌های الکترولیت، تغییر در مورفولوژی الکتروود، تأثیر مقاومت یونی جداکننده در مورد عملکرد SC، مقاومت یونی و الکترونیکی الکتروود متخلخل را پیش‌بینی کرد.

هر دو حالت تعادل و پدیده‌های دینامیکی که باعث کنترل رفتار SC می‌شوند، از طریق مدل‌سازی مولکولی مدل می‌شوند. با این هدف، رفتار مواد SC در سطح مولکولی با شروع از قوانین فیزیکی و شیمیایی حاکم بر ماده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای اجرای این نوع مدل‌ها باید شبیه‌سازی‌های کاملاً پیچیده‌ای حل شود و نیاز به استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی مانند روش‌های عنصر طیفی برای تفکیک معادلات مدل یا مونت کارلو، بر اساس مکانیک آماری یا پویایی مولکولی حرکت برای یک سیستم مولکولی در طی مدت زمانی کوتاه که معادله نیوتن را حل می‌کند، وجود دارد.

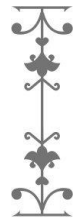
هر دو دقت و الزامات محاسباتی این مدل‌ها به طور عمده به مدل‌سازی الکتروود و الکترولیت بستگی دارد. در این راستا، می‌توان یک مدل ابتدایی انتخاب کرد که یون‌ها را کره‌های سخت و الکتروودها را به عنوان دیواره‌های ساده در نظر می‌گیرد که در نتیجه هزینه شبیه‌سازی را کاهش می‌دهد. با این حال، دقت مدل‌ها نیز به دلیل فرضیات ساختاری غیرواقعی آنها و عدم توانایی در محاسبه خواص الکترواستاتیکی کاهش می‌یابد. گزینه دیگر برای مدل‌سازی الکترولیت، که

دقت و هزینه محاسباتی مدل را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، در نظر گرفتن مولکول‌های حلال به عنوان حوزه‌های سخت غیرقابل شارژ است. نیازهای محاسباتی این مدل‌های الکترولیت تمام اتمی، استفاده آنها را به ویژه در شبیه‌سازی سیستم‌های بزرگ محدود می‌کند. با هدف غلبه بر این محدودیت‌ها، مدل‌های نظم کاهش یافته و مدل‌های متحد یا دانه درشت ارائه شده است.

همچنین دو مدل اصلی برای مدل‌های الکتروود وجود دارد. از یک طرف، ولتاژ موجود در هر الکتروود در هر مرحله از دینامیک مولکولی را می‌توان برابر با یک مقدار خاص فرض کرد و از سوی دیگر، یک گزینه ساده محاسباتی ارزان‌تر یک شبیه‌سازی با در نظر گرفتن بارهای جزئی ثابت مختص هر اتم می‌باشد. همانطور که برخی محققان نتیجه گرفته‌اند، استفاده از شبیه‌سازی بار ثابت، هم ساختار جذب شده در رابط را تغییر می‌دهد و هم مقیاس‌های زمانی که پدیده‌های آرامش در آن روی می‌دهد.

تکنیک‌های تجربی به تجزیه و تحلیل خواص مواد SC اختصاص داده شده است. قابلیت این تکنیک‌ها برای توصیف دستگاه‌های کار از اهمیت ویژه‌ای برای درک عملکرد این سیستم‌های ذخیره انرژی برخوردار است. به این معنا، از تکنیک‌های رزونانس مغناطیسی هسته‌ای و کوآرتز الکتروشیمیایی در برخی تحقیقات استفاده می‌شود تا به طور مستقیم جمعیت گونه‌های آنیونی و کاتیونی در یک الکتروود SC را تعیین کند. با این حال، اغلب این روش‌ها تکنیک‌های خاصی هستند که آزمایش SC را به طور کلی امکان‌پذیر نمی‌کنند، زیرا دسترسی به مواد مورد نیاز لازم است. در این روش، ساختار منافذ و همبستگی آن با اندازه یون‌های الکترولیتی در توصیف مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. تعدادی از مطالعات همچنین دلیل خرابی‌های SC را در شرایط مختلف سوء استفاده با هدف جلوگیری از خطرات، حفظ تمامیت سایر سیستم‌ها و محافظت از افراد مورد بررسی قرار داده‌اند. شرایط سوء استفاده معمولاً شامل درجه حرارت بالا یا پایین، ولتاژ زیاد و اتصال کوتاه است. پس از نابودی SC، این تجهیز جدا شده و وضعیت مواد آن در این مرحله اطلاعات ارزشمندی را برای افزایش عمر و جلوگیری از خرابی فاجعه‌بار فراهم می‌کند. بنابراین، آزمایش‌هایی که برای توصیف مواد استاندارد استفاده می‌شود برای تجزیه و تحلیل پس از نابودی نیز صورت می‌گیرند.

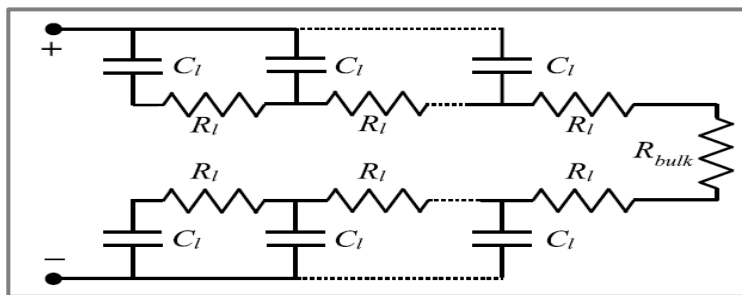
این تکنیک‌ها برجسته‌ترین رویکرد برای تجزیه و تحلیل مواد SC هستند. اولین خاصیت ماده‌ای که می‌توان اندازه‌گیری کرد، ساختار منافذ الکتروودها است که قطر آن در مقیاس نانومتر یا میکرومتر است. اندازه مناسب این منافذ تأثیر اولیه بر رفتار SC دارد و تکنیک‌های مختلفی برای توصیف این پارامتر ارائه شده است که سه مورد از پرکاربردترین آنها میکروسکوپ الکترونی روبشی، جذب گاز حجمی و اندازه‌گیری مایکروویو هستند. دومین ویژگی که معمولاً مشخص می‌شود، ساختار شبکه این منافذ می‌باشد که چندین مرتبه کوچکتر از اندازه منافذ است. آزمایش‌های پرکاربرد برای تجزیه و تحلیل ساختار شبکه، طیف‌سنجی اشعه ایکس و



رزونانس مغناطیسی هسته‌ای هستند. سرانجام، سومین خاصیتی که معمولاً مورد توجه است، رابطه بین خواص مواد و عملکرد الکتریکی آنها است. این مسئله را می‌توان از طریق اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی برای سیستم‌های سه الکتروده به وسیله پتانسیواستات یا گالوانواستات بررسی کرد.

۲-۳. مدل‌های خط انتقال

مدل خط انتقال، اولین بار توسط د. لیوی معرفی شده و ابزاری برای مدل‌سازی امپدانس الکتریکی یک SC است. (De Levie 1963) این مدل یک روش مفید برای تغییر از مقیاس منافذ موضعی به مقیاس ماکروسکوپی یک الکتروده است. خط انتقال یک نمایش الکتریکی مناسب از رفتار کلی یک الکتروده به جای در نظر گرفتن تمام مسیری است که هر یک از گونه‌های جاذب در آن دنبال می‌شوند. این مدل شامل یک توالی کامل برش الکتروده است که به عنوان یک مقاومت و یک خازن به منظور شبیه‌سازی نفوذ تدریجی بارها به الکتروده در نظر گرفته می‌شود. دو خط انتقال در شکل ۳ نشان داده شده است تا هر دو الکتروده را در یک SC مدل کنند. این دو خط انتقال و همچنین مقاومت عمده‌ای از الکتروولت (R_{bulk}) با هم جمع شده‌اند تا رفتار یک SC کامل را نشان دهند.



شکل ۳: مدل خط انتقال

تعداد شاخه‌هایی که در یک مدل خط انتقال وجود دارد صحت مدل، پیچیدگی روش تعیین پارامتر و نیازهای محاسباتی را تعیین می‌کند. هرچه تعداد شاخه‌ها بیشتر باشد، تعداد ثابت‌های زمانی و نیازهای محاسباتی برای انجام شبیه‌سازی‌ها بیشتر می‌شود. بسته به نوع کاربرد، شاخه‌های کمتر و بیشتر ترجیح داده می‌شوند. پیشنهادات مربوط به خطوط انتقال با تعداد متغیر از ۵ تا ۱۵ در تحقیقات یافت شده است. بنابراین، محققانی وجود دارند که روش‌هایی را برای کاهش زمان شبیه‌سازی در مدل‌های خط انتقال با یک استراتژی تعادل شکل موج پیشنهاد می‌کنند تا ضمن حفظ صحت خوب، زمان شبیه‌سازی را کاهش دهند.

با توجه به تعداد زیاد مقاومت‌ها و خازن‌ها که بخشی از آنها را تشکیل می‌دهند، اتصالات پارامترها نیز در مدل‌های این نوع مدل‌سازی موضوع اصلی است. یک روش پارامترسازی برای یک مدل خط انتقال که فقط بر مبنای دینامیک مولکولی تعادل است، در یک پژوهش ارائه شده

است که در آن مقایسه مقداری بین شبیه‌سازی‌های مقیاس مولکولی و آزمایش‌های امپدانس الکتروشیمیایی ارائه شده است. (Péan, Rotenberg et al. 2016)

با توجه به اینکه مدل خط انتقال مبتنی بر ساختار فیزیکی رابط است، می‌توان رابطه بین خصوصیات فیزیکی الکترودها و رفتار الکتریکی SC را بررسی کرد. یک مدل خط انتقال با اطلاع در مورد توزیع اندازه منافذ برای شبیه‌سازی پاسخ فرکانسی کل الکترودها و بررسی رابطه وابستگی زمان استراحت با چندین پارامتر ترکیب شد. در نتیجه، محققان یک استراتژی را برای طراحی بهترین ماده مایع بین سایشی با توجه به انرژی و چگالی توان برای SC تعیین کردند. آنها از مدل خط انتقال همراه با آزمایش‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و تئوری عملکردی چگالی استفاده می‌کنند تا چگونگی واکنش‌های ردوکس که منجر به نابودی زودرس در هدایت پلیمرها می‌شود را درک کنند. به این ترتیب، آنها قادر به ارائه روش‌های جدید برای افزایش دوام این SCها و بهبود خواص الکتروشیمیایی این تجهیزات هستند.

اگرچه مدل‌های خط انتقال برای شبیه‌سازی امپدانس الکترودها مزایای بسیاری را ارائه می‌دهند، اما یکی از اشکالات اصلی آنها این است که وقتی چندین سلول به صورت سری یا موازی به یکدیگر متصل هستند، مقایسه سلول‌ها دشوار است. بنابراین، معمولاً هنگامی که یک سیستم SC واقعی نیاز به تجزیه و تحلیل دارد مدل‌های تحلیلی دیگری ترجیح داده می‌شوند که در قسمت بعد به آنها پرداخته می‌شود.

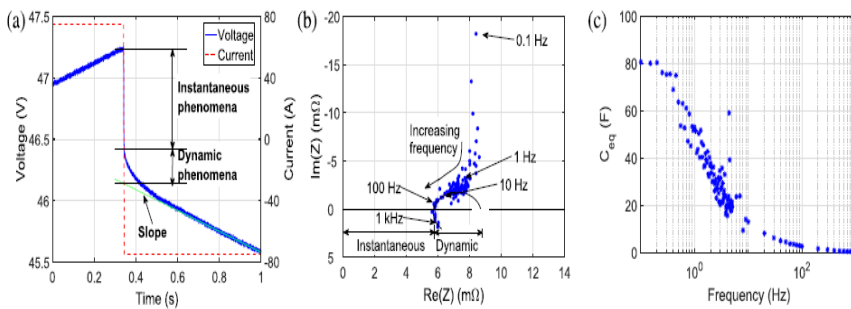
همانطور که در شکل (a4) نشان داده شده است، رفتارهای دینامیکی از SC زمانی مشاهده می‌شود که یک جریان پله روی آن اعمال شود. در این حالت پس از مرحله فعلی در طول $0/2$ ثانیه اول، یک شیب متغیر در پاسخ ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود، که با شیب نهایی تفاوت دارد که با یک خط سبز نقطه‌دار نشان داده شده است. اما هنگامی که پاسخ لحظه‌ای و پدیده‌های دینامیکی نیاز به تفکیک دارند، تعیین دقیق مرز بین آنها دشوار است و پارامترهای محاسبه شده معمولاً به اندازه کافی دقیق نیستند. آزمایشاتی که به طور معمول برای توصیف این پدیده‌ها انجام می‌شود برای تعیین کمیت و بازنمایی مناسب از رفتار متغیر SC در فرکانس‌های مختلف است. جالب‌ترین دینامیک برای کاربرد SC در یک سیستم انرژی مربوط به پاسخ لایه دوتایی است که برای فرکانس‌های مختلف از چند هرتز تا صدها هرتز مشاهده می‌شود.

رایج‌ترین آزمایش برای این تجزیه و تحلیل، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)¹ است که شامل کاربرد یک آشفتگی جریان سینوسی کوچک با فرکانس‌های مختلف در اطراف یک نقطه عامل حالت پایدار و اندازه‌گیری پاسخ ولتاژ است. به دلیل اینکه رفتار سیستم پس از آشفتگی در حالت پایدار خطی می‌شود، تنها یک آشفتگی کوچک مورد نیاز است. امپدانس پیچیده SC با استفاده از قانون اهم تعمیم یافته تعیین می‌شود و همانطور که در شکل (b4) قابل مشاهده است نتیجه آن در نمودار نایکوئیست نمایش داده شده است. توجه داشته باشید که

¹ Electrochemical impedance spectroscopy

محور فرضی معمولاً معکوس می‌شود تا رفتار ظرفیت را در محور عرض مثبت بکشد. از این نمودار، امپدانس مرتبط با پدیده‌های لحظه‌ای را می‌توان به عنوان نقطه‌ای که نمودار نایکوئیست در محور واقعی تقاطع داشته و هیچ رفتار خازنی وجود نداشته باشد، محاسبه کرد. امپدانس به دست آمده از این آزمایش که در شکل (b۴) نشان داده شده، ۵/۹۵ میلی اهم است. برای محاسبه تأثیر پدیده‌های پویای مرتبط با لایه مضاعف، باید یک نیم‌دایره یا نیمه بیضی در قسمت مرکزی نقشه نایکوئیست رسم شود. با توجه به ماهیت پویای لایه مضاعف مقاومت در برابر آن همانطور که در نمودار نایکوئیست نشان داده شده است با فرکانس متفاوت است.

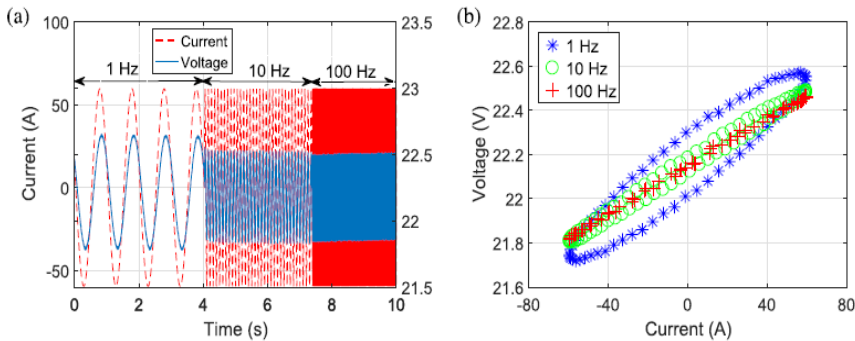
همانطور که در شکل (c۴) نشان داده شده است، از امپدانس به دست آمده با این آزمایشات می‌توان ظرفیت معادل ابرخازن C_{eq} را برای فرکانس‌های مختلف نیز محاسبه کرد. C_{eq} با فرکانس حدود ۱ هرتز کاهش می‌یابد، همچنین یک حد فرکانس بالا در آن وجود دارد که در آن هیچ رفتار خازنی اندازه‌گیری نمی‌شود. این حد فرکانس همزمان با نقطه‌ای است که در آن نمودار نایکوئیست در محور واقعی در EIS تلاقی پیدا می‌کند.



شکل ۴: رابطه فرکانس و ظرفیت خازن، مقاومت‌های حقیقی و غیرحقیقی، زمان و ولتاژ

علاوه بر آزمایش‌های فوق، تجزیه و تحلیل نوسانات بزرگتر در توان مدیریت شده نیز امکان‌پذیر است. با این هدف، جریان‌های سینوسی با دامنه و فرکانس‌های مختلف از SC خواسته می‌شوند. در آزمایش نشان داده شده در شکل (a۵)، یک جریان سینوسی با دامنه ۶۰ آمپر و فرکانس‌های ۱ هرتز، ۱۰ هرتز و ۱۰۰ هرتز به SC وارد و پاسخ ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود. نمایشی از نتایج در منحنی‌های $v=i$ در شکل (b۵) نشان داده شده است. منحنی $v-i$ به دست آمده از فرکانس ۱ هرتز مساحت بزرگتری را محصور کرده و شیب بیشتری نسبت به دو منحنی دیگر دارد. اندازه‌گیری بزرگ به دلیل پدیده‌های پویا با فرکانس‌های مشخصه در حدود ۱ هرتز است که مطابق با EIS نشان داده شده در شکل (b۴)، جبران بین جریان و ولتاژ را تحریک می‌کند. شیب بزرگتر به دلیل مقاومت بالاتری است که SC در فرکانس‌های پایین‌تر نسبت به فرکانس‌های بالا دارد. منحنی $v=i$ اندازه‌گیری شده در ۱۰ هرتز به دلیل مقاومت معادل کمتر در این فرکانس از شیب کمتری برخوردار است و هنوز هم یک ناحیه کوچک را محصور می‌کند،

زیرا پدیده‌های پویای همراه با لایه مضاعف SC وجود دارد. همانطور که در شکل (b) نشان داده شده است، منحنی مربوط به فرکانس ۱۰۰ هرتز دارای شیب کمتر بوده و مساحتی را در برنمی‌گیرد، زیرا هیچ اثر دینامیکی مربوط به فرکانس مشخصه را در این نقطه ندارد.



شکل ۵: ولتاژ و جریان در فرکانس‌های مختلف

۲-۴. مدل‌های تجزیه و تحلیل ساده

پس از مدل‌های خط انتقال، مدل‌های تحلیلی ساده برای معرفی عملکرد الکتریکی یک ابرخازن کامل هستند. در حالی که مدل‌های خط انتقال نشان دهنده امیدانس SC است، مدل‌های تحلیلی ساده شامل مفاهیم دیگری مانند کارایی کولومبی، تخلیه خود به خود و القائات پارازیتی هستند. این مدل‌ها معمولاً به عنوان مدارهای الکتریکی معادل نمایش داده می‌شوند و ابزاری مناسب برای برآورد عملکرد الکتریکی SC هستند. این گونه نمایش مدار معادل برای تجزیه و تحلیل تاسیسات توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است که SC یکی از سیستم‌های درگیر در آن بوده و تعامل همه این مدل‌ها به منظور شبیه‌سازی کل سیستم مورد نیاز است.

راهبردی که برای ساده‌سازی و نمایش پدیده‌های فیزیکی به عنوان یک مدار معادل دنبال می‌شود، موضوع مهمی است که باید در هنگام طراحی یک مدل تحلیلی ساده مورد بررسی قرار گیرد. (Meyers, Doyle et al. 2000) هرچه مدل ساده‌تر باشد، پیچیدگی و دقت ریاضی آن در پیش‌بینی عملکرد SC پایین می‌آید. هنگام انتخاب مناسب‌ترین مدل نیز دقت و دامنه فرکانس باید در نظر گرفته شود. توصیف رفتار SC و فرایند محاسبه مقادیر پارامترهای مدار معادل موضوع مهم دیگری است که تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام می‌شود.

ظرفیت خازن، یکی از اصلی‌ترین پارامترهای دخیل در فرایند مدل‌سازی SC است. در بیشتر مدل‌های تحلیلی ساده، وابستگی ولتاژ به ظرفیت خازن SC در نظر گرفته می‌شود. برخی از محققان عبارت مماس را پیشنهاد می‌کنند که در معادله زیر نشان داده شده است:

$$C = Ca + Cb \cdot \tanh\left(\frac{v}{Ux} - Ux\right)$$



در معادله فوق عبارت U_x به معنای ولتاژ در نقطه انعطاف پذیری از مماس عبارت هایپربولیکی است، V نیز به معنای ولتاژ ابرخازن و C_a و C_b ضرایب متناسب هستند. سایر محققان از یک عبارت خطی متناسب با تغییر ولتاژ خازن استفاده می کنند: (Berrueta, San (Martin et al. 2014)

$$C = C_0 + kv$$

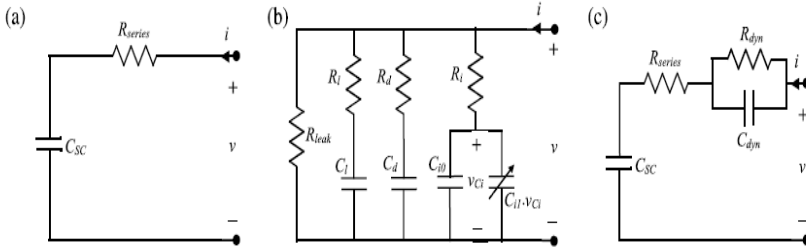
به علاوه، ظرفیت متغیر مدل های تحلیلی ساده نمایانگر پدیده های دیگری هستند که عملکرد الکتریکی ابرخازن را تعیین می کنند. متداول ترین مدارهای الکتریکی مورد استفاده برای این منظور عبارت اند از:

مدار RC: همانطور که در شکل (a7) نشان داده شده است، این مدل از یک خازن ایده آل و یک مقاومت سری تشکیل شده است که تمام پدیده های غیر ایده آل در SC را نشان می دهد. مزایای اصلی این مدار، سادگی در فرایند مناسب سازی دو پارامتر آن، شبیه سازی سریع کامپیوتر و دقت مناسب برای دینامیک سریع است که معمولاً برای اندازه گیری سیستم های ذخیره سازی و محاسبه تقریبی راندمان سیستم مورد استفاده قرار می گیرد. با هدف بهبود قابل توجه دقت مدل های مدار RC ساده، برخی از روش های اتصالات آنلاین در تحقیقات مختلف ارائه شده است.

مدل های چند شاخه ای: این مدل با اتصال موازی چندین شاخه RC با ثابت های زمانی مختلف ساخته می شود. این شاخه ها انتشار یون را از طریق منافذ الکترومدل می کنند. یک فرایند انتخاب مناسب برای زمان ثابت، توزیع مقاومت و ظرفیت در این شاخه ها در تحقیقات گوناگون تحلیل شده است که بیشتر محققان از سه شاخه استفاده می کنند. همانطور که در شکل (b7) نشان داده شده است مقاومت نشت (R_{leak}) سبب تخلیه خود به خودی ابرخازن می شود. این در حالی است که بعضی از پژوهشگران فقط دو شاخه موازی را پیشنهاد می کنند، اما باید مقاومت نشتی وابسته به زمان را شامل شوند. دینامیک آهسته (ده ها ثانیه یا بیشتر) و رفتار خود تخلیه ای توسط این مدل ها به طور دقیق پیش بینی شده است. مطالعات متعددی نتیجه می گیرند که مدل های چند شاخه ای بهترین میزان انرژی را برای انرژی ذخیره شده در یک SC (حالت شارژ و خود تخلیه) به دست می آورند.

مدل های دینامیکی: این مدل با اتصال سری یک خازن به نمایندگی از خازن اولیه SC و بعضی از گروه های RC ساخته شده است که در شکل (c7) نشان داده شده است. این کار در نتیجه باعث بهبود صحت مدل برای کاربردهای پر مصرف می شود که برای مدل سازی چرخه سریع تخلیه بار یا نوسان سریع در قدرت ابرخازن مناسب هستند. همچنین عملکرد معمولی SC در یک وسیله نقلیه الکتریکی بهتر است توسط یک مدل پویا مدل سازی شود.



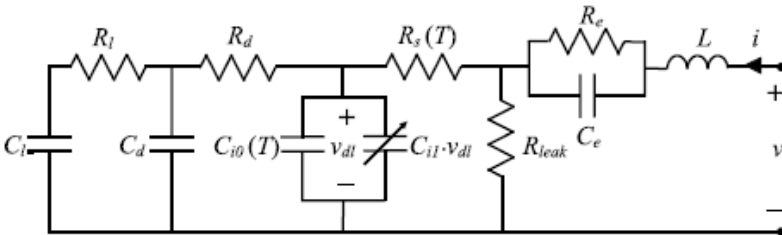


شکل ۶: متداول‌ترین مدارهای تجزیه و تحلیل ساده

برخی از تحقیقات ارائه شده، مدل‌های چند منظوره‌ای را ارائه می‌دهند که ویژگی‌های آنها ترکیبی از سه نوع توصیف شده در بالا است. در این تحقیقات یک مدل دستیابی به نتایج دقیق در پیش‌بینی رفتار SC برای فرکانس‌هایی به اندازه ۱ کیلوهرتز و توزیع مجدد شارژ و تخلیه خود به خودی که فقط در مدت زمان چند دقیقه قابل توجه هستند، ارائه شده است. یکی از مضرات این مدل، که در شکل ۷ نشان داده شده، پیچیده‌تر بودن آن از انواع ذکر شده قبلی است. به همین دلیل، روشی آزمایشی برای محاسبه پارامترهای مدار توسط محققان ارائه می‌شود. ظرفیت اولیه در این مدل توسط دو خازن واقعی در قسمت مرکزی شماتیک ارائه شده است.

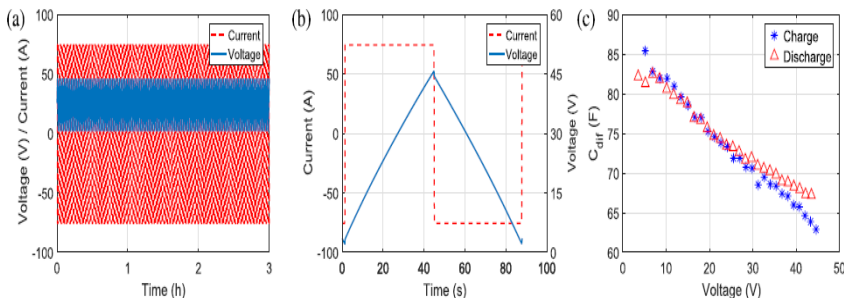
$$C_{i0} = C_{i00} + C_{i0t}$$

خازن‌های C_l و C_d ظرفیتی از منافذ الکتروود کوچکتر از یون‌های حل شده را نشان می‌دهند. انرژی مورد نیاز برای فرایندهای صرفه‌جویی و فروپاشی، مربوط به مقاومت‌های R_l و R_d است که به صورت سری به هر یک از خازن‌ها وصل می‌شوند. علاوه بر این، مقاومت R_s نمایانگر پدیده‌های اهمی است که در SC اتفاق می‌افتد. R_{leak} نیز مقاومت نشستی بوده و بیانگر هدایت الکتریکی غشاء است. اتصال موازی R_e و C_e نشان دهنده رفتار پویای الکترودهای متخلخل است. نتیجه ساختار متخلخل، پاسخ به مقاومت آنها در برابر حرکت الکترون و C_e خازن است. سرانجام، L نمایانگر القا به دلیل ارتباطات الکتریکی بین سلول‌هایی است که ماژول را تشکیل می‌دهند.



شکل ۷: مدل چندمنظوره‌ای

با توجه به کاربرد این مدل‌ها، آزمایش‌های اختصاص داده شده به محاسبه پارامترها مورد توجه ویژه برنامه‌های مهندسی قرار گرفته است. پدیده‌های دیگری مانند اندازه‌گیری ساده خازن SC، کولومبیک و راندمان انرژی، توزیع بار در منافذ الکتروود و تخلیه خود به خودی نیاز به برخی از مدل‌های تحلیلی ساده دارند. مجموعه‌ای از دو آزمایش که به طور معمول در تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرند برای توصیف این پارامترها در اینجا ارائه شده است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، آزمایش اول شامل تعداد چرخه تخلیه کامل با یک بار جریان ثابت است. این آزمایش باید به اندازه کافی طولانی باشد تا دینامیک SC تثبیت شود. همانطور که در شکل (a) نشان داده شده است، آزمایش مذکور ۳ ساعت به طول انجامید. در نهایت جریان فعلی دارای یک پروفایل پله‌ای با مقادیر +۷۵ یا -۷۵ آمپر است که مستلزم شکل شبه مثلثی در ولتاژ از ۳ تا ۴۵ ولت است که در یکی از آخرین چرخه‌های تخلیه بار برای دستیابی به عملکرد پایدار مانند نمونه نشان داده شده در شکل (b) ساخته شده است. جالب است که شیب ولتاژ هنگام افزایش آن، کاهش می‌یابد. از این شیب (dv/dt) و جریان اندازه‌گیری شده (i) می‌توان ظرفیت دیفرانسیل را محاسبه کرد. این ظرفیت متغیر در شکل (c) نشان داده شده است و در نتیجه باید بیان داشت که شیب پایین‌تر ولتاژ، مقادیر ظرفیت خازنی پایین‌تری را نشان می‌دهد.



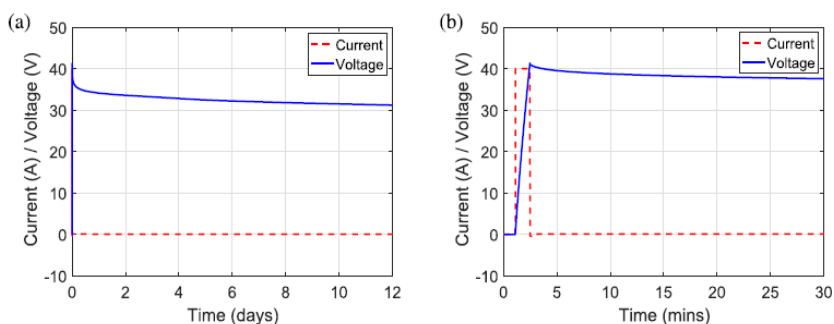
شکل ۸: رابطه ظرفیت خازنی با ولتاژ و جریان

آزمایش دیگری همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، برای توصیف شارژ SC در ولتاژ نزدیک حداکثر ولتاژ مدار باز مجاز در طی چند روز انجام شده است. در شکل (a) توزیع بار در الکتروودها در اولین دقیقه یا ساعت‌های اندازه‌گیری و در شکل (b) جریان و ولتاژ در طول کل آزمایش نشان داده شده است. ولتاژ کاهنده خطی که پس از اولین ساعت‌های آزمایش ثبت شده است، ناشی از تخلیه خود به خود SC است. مقدار مقاومت نشت (R_{leak}) را می‌توان با توجه به خازن ایده‌آلی که به وسیله مقاومت تخلیه می‌شود، از طریق معادله زیر محاسبه کرد:

$$R_{leak} = \frac{v}{C_{dif} \cdot \frac{dv}{dt}}$$

مقدار مقاومت نشتی به دست آمده از این آزمایش ۱۹۳/۹ کیلو اهم است.

پدیده‌های پیری نیز اهمیت ویژه‌ای برای مدل‌های تحلیلی ساده شده SC و کاربردهای مهندسی آنها دارند. هنگامی که تأثیر پیری در SC مورد مطالعه قرار می‌گیرد، توصیف عملکرد الکتریکی این تجهیزات، آزمایش‌های بیان شده با روش‌های تسریع روند پیری به منظور نتیجه‌گیری آزمایش در یک بازه زمانی معقول ترکیب می‌شوند. در این حالت معمولاً دما و ولتاژ کار افزایش می‌یابد، زیرا در صورت افزایش ۱۰۰ میلی ولتی ولتاژ سلولی، یا افزایش دما به اندازه ۱۰ کلوین، میزان پیری دو برابر می‌شود. نکته قابل توجه این است که یک پدیده بازیابی عملکرد با قطع سیکل همراه است. این آزمایش اخیراً در مقاله‌ای گزارش شده است که در آن یک مدل تجربی برای پیش‌بینی وضعیت سلامت ارائه شده است. علاوه بر این، تأثیر جریان‌های موج‌دار موج زیاد در پیری SC به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که موارد ذکر شده هیچ تأثیری بر پیری SC ندارند. اندازه‌گیری‌های تجربی از کاهش ظرفیت و افزایش مقاومت در برابر جریان پالس و دمای بالا در قسمت اول ارائه شده است. در نهایت به عنوان نتیجه گزارش می‌شود در حالی که کاهش ظرفیت خازن SC با جریان پالس افزایش یافته است، اما بر افزایش مقاومت تأثیر نمی‌گذارد. (Torregrossa and Paolone 2016)



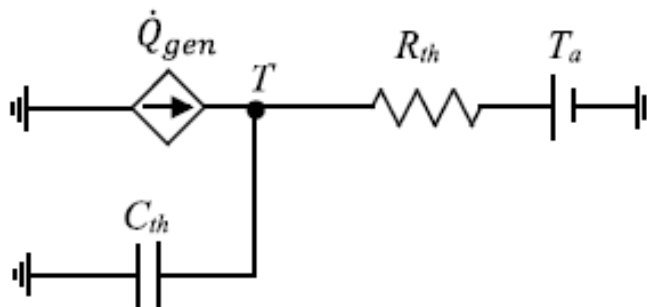
شکل ۹: تغییرات ولتاژ و جریان

۲-۵. مدل حرارتی

مدل‌سازی حرارتی از SC یک ابزار مفید برای محاسبه دمای کار (T) است. ورودی‌های این مدل‌ها معمولاً عملکرد الکتریکی SC و دمای محیط (Ta) است. آگاهی از دمای داخلی SC با توجه به اینکه تأثیرات زیادی روی خواص الکتریکی دستگاه دارد ضروری است. به طور خاص، افزایش T باعث افزایش ظرفیت و کاهش مقاومت سری SC می‌شود. علاوه بر این، مقادیر بالای T در تسریع تخلیه خود به خودی تجهیز و واکنش‌های شیمیایی پارازیتی مانند اکسیداسیون و پیروی از قانون Arrhenius به معنای پیر شدن سریع‌تر SC است. (Gualous, Chaoui et al. 2016) یک مدل حرارتی موارد زیر را دارا می‌باشد:

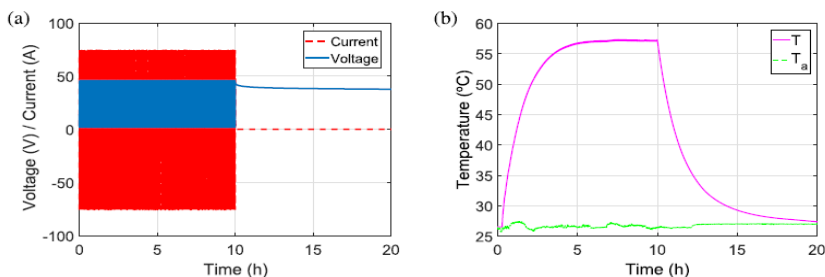
تولید گرما: در حین کار عادی SC دو نوع فرایند در این مدل، گرما را تولید می‌کنند. از یک طرف به دلیل مقاومت درونی تلفات اهمی وجود دارد که باعث افزایش کلی دما می‌شود و از طرف دیگر، تولید گرمای برگشت‌پذیر (آنتروپیک) معمولاً در مدل‌های حرارتی گنجانده شده است تا تغییرات آنتروپی را در لایه دوبعدی مدل کند و به دقت بیشتری برسد. مناسب‌ترین مدل برای این اصطلاح آنتروپیک هنوز بحثی باز در تحقیقات است اما بیشتر محققان تولید گرمای آنتروپیک خود را بر اساس مدل تقریبی ارائه شده که در آن یک لایه دو اتمی به صورت تک اتمی فرض شده است، پایه‌گذاری می‌کنند. با این حال، محققان نتیجه گرفته‌اند که اگر معادله پواسون-نرنست-پلانک با معادله گرما ترکیب شود، نتایج بهتری حاصل می‌شود.

انتقال حرارت: علاوه بر تولید گرما، دمای SC به توانایی دستگاه در انتقال این گرما به هوای اطراف بستگی دارد. به طور کلی سه مکانیزم انتقال حرارت یعنی رسانایی، همرفت و تابش وجود دارد. براساس پدیده‌های رسانایی، گرما در داخل بخش جامد از دمای زیاد به دمای پایین منتقل می‌شود. پدیده همرفت (طبیعی یا اجباری) اجازه می‌دهد تا گرما از سطح دستگاه به هوای اطراف منتقل شود. یک مدل حرارتی که معادلات آن از قوانین اساسی انتقال حرارت است در کارهای تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته شده است. با توجه به اختلاف دمای کم بین سطح SC و هوای محیط، بسیاری از محققان از تأثیر تابش به عنوان مکانیزم انتقال حرارت صرف نظر نمی‌کنند. ماژول‌های محصور شده‌ای که شامل چندین سلول خنک شده توسط همرفت طبیعی هستند معمولاً به عنوان مدارهای معادل حرارتی مدل می‌شوند، مانند نمونه ارائه شده که در شکل ۱۰ که با استفاده از Cth و مکانیزم‌های انتقال و انتقال همبستگی با مقاومت حرارتی Rth طبقه‌بندی می‌شوند. در مواردی که جریان هوا در اطراف سلول‌ها مجبور به بهبود اتلاف گرما می‌شود، برخی از محققان پیشنهاد می‌دهند که این فرایند را با مدار حرارتی معادل مدل‌سازی کنند، در حالی که برخی دیگر نرم افزار Fluid Dynamic را برای افزایش دقت مدل ترجیح می‌دهند.



شکل ۱۰: مدل حرارتی

یک روش معمول برای توصیف تجربی عملکرد حرارتی یک SC با دستیابی به تولید تقریباً ثابت حرارت در دستگاه، ناشی از عملکرد طبیعی آن است. در صورتی که خصوصیات حرارتی با دمای محیط ثابت انجام شود، دقت نتایج افزایش می‌یابد، که می‌توان با قرار دادن SC در داخل آن به دست آورد. دمای داخلی و محیط باید اندازه‌گیری شود زیرا تفاوت بین این دو متغیر مربوط به پدیده اتلاف گرما است. با این هدف، آزمایش نشان داده شده در شکل ۱۱ تا زمانی که دمای SC تثبیت شود، چرخه تخلیه بار با یک جریان ثابت و پله و به دنبال آن تا زمانی که SC به دمای محیط برسد، یک دوره خنک کننده انجام می‌شود. گرمای تولید شده در دوره اول می‌تواند ثابت باشد و درجه حرارت به عنوان یک فرایند اول تکامل می‌یابد. برای توصیف مناسب این پدیده لازم است تا T تثبیت شود که در شکل (b۱۱) نشان داده شده است. پس از این تثبیت، هنگامی که تقاضای فعلی متوقف شود SC تا دمای محیط سرد می‌شود. توان کالری تولید شده و پویایی روند تبادل گرما را می‌توان با این آزمایش تعیین کرد.



شکل ۱۱: رابطه دما با ولتاژ و جریان

۳. نتیجه‌گیری

ابرخازن‌ها سیستم‌های ذخیره‌سازی با چگالی توان و انرژی بالا هستند. بالا بودن همزمان چگالی انرژی و توان سبب ایجاد تمایز میان این نسل از خازن‌ها با خازن‌های معمولی و باتری‌ها گردیده است و همین تمایز بر کاربرد ابرخازن‌ها افزوده است. در این مطالعه ۵ نمونه مدل‌سازی ابرخازن‌ها بررسی گردید. در مدل‌سازی دولایه ابتدا مدل اولیه‌ای که توسط دانشمندان مطرح گردید بیان و سپس مدل‌های تکمیلی دیگر دانشمندان بررسی شد. در مدل مولکولی با کمک شبیه‌سازی‌های پیچیده، تجزیه و تحلیل خواص ماده می‌توان پدیده‌هایی که توسط دیگر انواع مدل‌سازی‌ها قابل بررسی نیست را پیش‌بینی نمود. در این روش مدل‌سازی بسته به نوع مدل کردن الکترولیت و الکتروود، دقت و پیچیدگی مدل‌سازی تغییر می‌کند. در مدل‌سازی خطوط انتقال، هر پایانه ابرخازن به صورت یک خط متشکل از شاخه‌های خازن و مقاومت مدل شده است و رابط بین این خطوط، مقاومت ناشی از الکترولیت بین آنها است. در این مورد هم میزان محاسبات بسته به تعداد شاخه‌ها متغیر است. مدل تجزیه و تحلیل ساده نیز همچون مدل خطوط انتقال، ابرخازن را به صورت مدارهای الکترونیکی مدل می‌کند. هر یک از اجزای این

مدار نشان‌دهنده جزئی از ابرخازن هستند. مدل‌سازی تجزیه و تحلیل ساده دارای انواع حالت تشکیل مدار معادل بوده که هر کدام از مدارهای معادل با توجه به نیاز شبیه‌سازی استفاده می‌شوند. مدل حرارتی به بررسی تاثیرات دما بر ابرخازن می‌پردازد و با ارائه یک مدار الکتریکی، تاثیرات دمایی را مدل می‌کند. در مجموع می‌توان گفت هر یک از انواع مدل‌ها دارای مزایایی بوده که با توجه به نیاز محققین مورد استفاده قرار می‌گیرند.



- Aneke, M. and M. Wang (2016). "Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review." *Applied Energy* 179: 350-377.
- Berrueta, A., et al. (2014). "Electro-thermal modelling of a supercapacitor and experimental validation." *Journal of Power Sources* 259: 154-165.
- De Levie, R. (1963). "On porous electrodes in electrolyte solutions: I. Capacitance effects." *Electrochimica Acta* 8(10): 751-780.
- Gualous, H., et al. (2016). Supercapacitor calendar aging for telecommunication applications. 2016 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), IEEE.
- Helmholtz, H. v. (1879). "Studien über electrische Grenzschichten." *Annalen der Physik* 243(7): 337-382.
- Li, J., et al. (2017). "Facile preparation of nitrogen/sulfur co-doped and hierarchical porous graphene hydrogel for high-performance electrochemical capacitor." *Journal of Power Sources* 345: 146-155.
- Meyers, J. P., et al. (2000). "The impedance response of a porous electrode composed of intercalation particles." *Journal of The Electrochemical Society* 147(8): 2930.
- Parida, K., et al. (2017). "Fast charging self-powered electric double layer capacitor." *Journal of Power Sources* 342: 70-78.
- Péan, C., et al. (2016). "Multi-scale modelling of supercapacitors: From molecular simulations to a transmission line model." *Journal of Power Sources* 326: 680-685.
- Sharma, P. and T. Bhatti (2010). "A review on electrochemical double-layer capacitors." *Energy conversion and management* 51(12): 2901-2912.
- Torregrossa, D. and M. Paolone (2016). "Modelling of current and temperature effects on supercapacitors ageing. Part I: Review of driving phenomenology." *Journal of Energy Storage* 5: 85-94.
- Wang, H. and L. Pilon (2011). "Accurate simulations of electric double layer capacitance of ultramicroelectrodes." *The Journal of Physical Chemistry C* 115(33): 16711-16719.
- Zhang, L., et al. (2015). "A comparative study of equivalent circuit models of ultracapacitors for electric vehicles." *Journal of Power Sources* 274: 899-906.

نانوفوتونیک کوانتومی و محاسبات کوانتومی:

چشم انداز، چالش‌ها، پیشنهادات

رضا ابراهیمی^۱

چکیده

در این مقاله پیوند نانوفوتونیک و علم فناوری‌های کوانتومی در نظر گرفته شده است. این رویکرد میان رشته‌ای ممکن است به عنوان نقطه شروعی برای توسعه فناوری‌های پیشگامانه عمل کند. چندین جهت جدید از جمله جفت شدن قوی نور و ماده، فوتونیک توپولوژیکی، فراسطح‌ها و منابع فوتون و اپتومکانیک معلق در نانوفوتونیک کوانتومی مورد توجه قرار گرفته است. امیدواریم این بررسی تعامل تقویت شده بین جوامع نانوفوتونیک و علوم کوانتومی را تقویت کند. این هم‌افزایی منجر به تحقق سیستم‌های ارتباطی، حسی و پردازش اطلاعات جدید می‌شود. در مورد محاسبات کوانتومی و کاربردهای محاسبات در حوزه‌های مختلف، اپتیک کوانتومی و مخابرات کوانتومی توضیحاتی داده شده است و بعد از معرفی اتم‌های ریدبرگی و خواص آن‌ها، پیشرفت‌های حاصل شده در ساخت رایانه‌های کوانتومی ریدبرگی در شبکه اتمی بررسی می‌شود. سپس کاربرد این اتم‌ها در اپتیک کوانتومی و بهره‌گیری از آن در تولید چشمه تک فوتون و دروازه دوفوتونی ارائه می‌شود. در بخش آخر مقاله نیز پیشنهاداتی در چشم‌انداز آینده داده می‌شود.

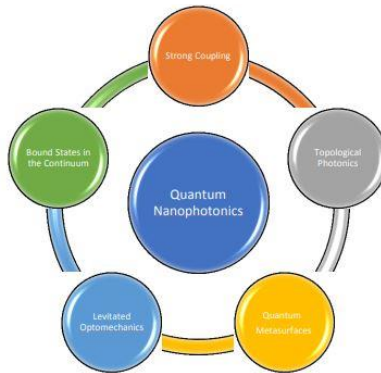
واژگان کلیدی: نانوفوتونیک، فناوری‌های کوانتومی، محاسبات کوانتومی، اپتیک کوانتومی، مخابرات کوانتومی.



^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی فوتونیک گرایش نانوفوتونیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۱. مقدمه

فناوری‌های کوانتومی مدرن تغییر بزرگی برای متحول کردن صنعت فعلی ایجاد می‌کنند. این فناوری شامل ارتباطات ایمن، اندازه‌گیری‌های بسیار ظریف، اندازه‌شناسی و محاسبات است. همه این‌ها به دلیل کاوش ویژگی‌های غیرکلاسیک سیستم‌های ویژه آماده شده، امکان پذیر شده است. (Huang et al., 2020) در بیشتر موارد این سیستم‌ها کاملاً شکننده بوده و مانند دماهای برودتی برای نشان دادن و حفظ خواص کوانتومی به شرایط خاصی نیاز دارند. نانوفوتونیک یک پلتفرم جذاب برای درک ویژگی‌های کوانتومی مختلف با نور ارائه می‌دهد. نانوفوتونیک کوانتومی یکی از زمینه‌های در حال توسعه است که چگونگی برهمکنش نور با اتم‌ها، مولکول‌ها و ساختارهای مصنوعی را بررسی می‌کند. (So et al., 2020) این سیستم بر تولید، انتشار، دستکاری و تشخیص نور با استفاده از مهندسی و کنترل منسجم سیستم‌های کوانتومی تمرکز دارد که امکان کاوش در جنبه‌های اساسی فیزیک کوانتومی را فراهم می‌کند، در حالی که سیستم‌های کوانتومی موجود را به رژیم‌های جدید سوق می‌دهد. در این مقاله پیشرفت‌های اخیر نانوفوتونیک برای کاربردهای فناوری کوانتومی را پوشش می‌دهیم. این مطالعه شامل اتصال قوی ریزحفره‌های پلاسمونیک، دی الکتریک و مواد دی‌کالکتریک فلزات واسطه دوبعدی، ساطع‌کننده‌های کوانتومی (اتم‌ها، مولکول‌ها، نقاط کوانتومی و غیره) و حالت‌های محدود در پیوستار، فوتونیک توپولوژیکی، متاسورفای کوانتومی است. هدف ما نشان دادن تطبیق‌پذیری پلتفرم نانوفوتونیک برای اکتشاف اثرات کوانتومی اساسی و توسعه کاربردهای کوانتومی در دنیای واقعی است. ما معتقدیم که نانوفوتونیک نقش مهمی در توسعه فناوری‌های کوانتومی پیشرفته داشته باشد.



شکل 1: روند نانوفوتونیک کوانتومی

نانوفوتونیک ابزارهای جدیدی را برای دستکاری توزیع میدان الکترومغناطیسی فراهم می‌کند. این امکان، کنترل موثر چگالی نوری حالت‌ها را فراهم می‌کند. به طور معمول، محصور شدن قوی میدان الکترومغناطیسی در مقیاس نانو با چگالی نوری بالاتر مطابقت دارد. چنین محصور شدن در فضای آزاد معمولاً از نظر پراش محدود است و نمی‌تواند کوچکتر از کسری از طول

موج باشد. درک محدودیت نور شدید برای فعال کردن برهمکنش نور- ماده با اتم‌ها و مولکول‌ها ضروری است. (Jang et al., 2023) از آنجایی که سیستم‌ها متشکل از نانوحفره و اتم‌ها یا مولکول‌های منفرد بسیار کوچک هستند، باید آن‌ها را به عنوان سیستم‌های کوانتومی در نظر گرفت و در بسیاری از موارد تقریب دوسطحی به اندازه کافی خوب است. در حالی که نور هنوز می‌تواند به صورت کلاسیک درمان شود. طبق این توصیف اتم‌ها و مولکول‌ها می‌توانند نور را با فرکانس‌های نزدیک به اختلاف انرژی دو سطح جذب یا منتشر کنند. معمولا انتشار در فضای آزاد خود به خود اتفاق می‌افتد و فقط به ویژگی‌های سیستم کوانتومی بستگی دارد. در سال ۱۹۴۶، پورسل بیان کرد که نرخ انتشار خود به خودی را می‌توان با قرار دادن یک سیستم کوانتومی در یک حفره یا نزدیک سطح با بازتاب بالا تغییر داد. (Huang et al., 2020) در واقع برای ساطع کردن نور، سیستم کوانتومی باید بتواند با حالت‌های نوری موجود جفت شود. به نظر می‌رسد که چگالی نوری حالت‌های حفره در مقایسه با فضای آزاد کاملا متفاوت است. بنابراین می‌توان با کنترل چگالی نوری حالت‌ها نرخ انتشار را افزایش یا کاهش داد. این درک در نهایت زمینه جدیدی از الکترودینامیک کوانتومی حفره (c-QED) را به وجود آورد. (Horiuchi, 2013) در اینجا تشدیدگرهای نوری برای تعدیل قدرت جفت شدن نور و ماده استفاده می‌شوند. از آنجایی که اندازه تابشگرهای کوانتومی بسیار کوچکتر از طول موج عملیاتی است، برهمکنش نور و ماده نسبتا ضعیف است و با حجم حالت الکترومغناطیسی که از نظر پراش محدود است نسبت معکوس دارد؛ بنابراین برای تقویت یکی شدن، حجم حالت باید کاهش یابد. برای دستیابی به این هدف حفره‌های باکیفیت و نانوساختارهای پلاسمونیک به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در یک کار پیشگام توسط هاروچ و همکارانش در سال ۱۹۸۳ یک حفره میکروویو با کیفیت بالا و مجموعه‌ای از اتم‌های ریدبرگ برای دستیابی به رژیم جفت قوی استفاده شد. (de Abajo) در محدوده مرئی نانوذرات طلا با شکاف زیر نانومتری اجازه ایجاد یک کانون زیرموج میدان نزدیک با چندین مرتبه افزایش چگالی نوری حالت‌ها را می‌دهد. در چنین مقیاس‌های طولی و سطوح توان، اثرات تونل‌زنی غیرمحلی و کوانتومی ممکن است بر تعامل تابش دهنده با حالت پلاسمونیک تاثیر بگذارد و نیاز به توصیف کاملا کوانتومی نور دارد. (Wu, 2023) اخیرا به طور تجربی مشاهده شد که یک مولکول منفرد که به یک حفره پلاسمونیک جفت شده است علائمی از اختلاط قوی حالت‌های نوری و اکسایتون را حتی در دمای اتاق نشان می‌دهد. در چنین رژیم‌های جفت شدن قوی، تبادل نوسانی بین سیستم کوانتومی و نور وجود دارد که به نوسانات رابی خلاء معروف است که با نرخ متناسب جفت می‌توان آن را در هر دو طیف پراکندگی و نورتابی مشاهده کرد. در رژیم جفت قوی، تمام تلفات دیگر باید ناچیز باشد. این نشان می‌دهد که برهمکنش نور- ماده انسجام را حفظ می‌کند که امکان توسعه سیستم‌های نوری فعال کم مصرف را فراهم می‌کند و به طور گسترده با استفاده از سیستم‌های نیمه‌هادی و نقاط کوانتومی مورد مطالعه قرار گرفته است.



کاربردهای بالقوه شامل نانولیزرها، حسگر حفره‌ای تقویت‌شده، ارتباطات نوری کوانتومی دمای اتاق و محاسبات، منابع تک‌فوتونی بیان شده است. همچنین بستری برای برهمکنش موثر فوتون-فوتون فراهم می‌کند. یکی از سوالات باز و هیجان‌انگیز مربوط به امکان اصلاح خواص شیمیایی برخی از مواد با قرار دادن آن‌ها در حفره‌های نوری تحت شرایط برهمکنش قوی نور- ماده است. مطالعات نظری و تجربی اخیر شواهد خاصی از تغییرات انتقال انرژی، انتقال بار، فتوشیمیایی و سینتیک حالت پایه را نشان می‌دهند. (Wu, 2023)

۲. مخابرات کوانتومی

انتقال حالت کوانتومی از یک نقطه به نقطه دیگر را مخابرات کوانتومی گویند. در مخابرات کوانتومی، اطلاعاتی که باید مخابره شوند، روی فوتون‌هایی سوار می‌شوند که هم می‌توانند در فضای آزاد و هم از طریق فیبرهای نوری کم‌اتلاف ارسال شوند. ایجاد، کنترل و اندازه‌گیری اسپین در ساختارهای نانو امکانات جدیدی برای الکترونیک و پردازش اطلاعات از جمله محاسبات و مخابرات کوانتومی فراهم می‌کند. بنیان‌ها و مفاهیم اساسی مخابرات کوانتومی شامل اطلاعات کوانتومی، در هم تنیدگی کوانتومی و تله‌پورت کردن ارائه می‌شود. (Savaresi et al., 2023)

در مخابرات کوانتومی پرتوهای نوری در بردارنده فوتون‌های در هم تنیده هستند، به طوری که صرف نظر از فاصله، اندازه‌گیری فوتونی در یک پرتو، بر اندازه‌گیری‌های زوج فوتون در هم تنیده آن در پرتو دیگر تاثیر می‌گذارد. (Savaresi et al., 2023) اطلاعات را می‌توان روی سیستم‌های کوانتومی نظیر اتم‌ها، فوتون‌ها و ... ذخیره و پردازش کرد. پردازش اطلاعات کوانتومی با پردازش اطلاعات کلاسیک متفاوت است، زیرا در حالت کوانتومی باید همدوسی کوانتومی در ذخیره‌سازی و پردازش اطلاعات حفظ شود. عضو اصلی اطلاعات در سیستم‌های کوانتومی بیت کوانتومی یا کیوبیت است. (Savaresi et al., 2023)

۳. اطلاعات کوانتومی

تفاوت اساسی مخابرات کوانتومی در مقایسه با مخابرات کلاسیک نوع اطلاعات مخابره شونده است. در مخابرات کوانتومی اطلاعات در حالات کوانتومی قرار دارند و اساس مخابرات کوانتومی ارسال و دریافت این حالات کوانتومی است. از حالات کوانتومی که در مخابرات کوانتومی قابل استفاده هستند می‌توان به اسپین الکترون و پلاریزاسیون فوتون اشاره کرد. در گیرنده و فرستنده سیستم مخابرات کوانتومی نیازمند پردازش اطلاعات کوانتومی هستیم. برای این منظور متناظر با حالت کلاسیک در پردازش اطلاعات کوانتومی نیز گیت‌های کوانتومی تعریف می‌شوند. (Horiuchi, 2013) در ادامه علاوه بر مرور مختصری بر مفهوم بیت‌های کوانتومی، گیت‌های کوانتومی نیز معرفی می‌شوند.



۴. گیت‌های کوانتومی

در بحث پردازش اطلاعات کوانتومی چهار گیت اصلی وجود دارد که تمام پردازش‌های کوانتومی به وسیله این چهار گیت قابل پیاده‌سازی هستند.

- (۱) گیت CNOT
- (۲) گیت هادامارد
- (۳) گیت انتقال فاز
- (۴) گیت چرخش

۵. درهم تیدگی کوانتومی

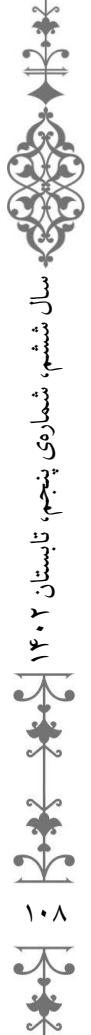
انپشتین در سال ۱۹۳۵ به منظور ناقص نشان دادن توانایی واقع‌نمایی نظریه مکانیک کوانتومی با کمک دو تن از شاگردان خود آزمایش فکری مشهوری (EPR) را طراحی کرد که در تحولات بعدی فیزیک جدید در قرن بیستم تاثیر بسزایی داشت. در این آزمایش فرض می‌شد که دو سیستم کوانتومی نظیر دو فوتون در یک محیط عایق شده و مجزا از تاثیرات بیرونی با هم اندرکنش انجام می‌دهند و سپس از هم دور می‌شوند. تا زمانی که این دو فوتون در شرایط انزوا از محیط بیرون باقی بمانند، هر اندازه هم که فاصله میان آن دو زیاد باشد باز هم یک سیستم واحد به شمار می‌آیند، به طوری که اگر یکی از دو فوتون برای شناسایی یکی از برخی از مشخصه‌های آن اندازه‌گیری شود، آزمایشگر می‌تواند بدون آنکه به فوتون دوم دسترسی مستقیم داشته باشد اطلاعات مشابه را در مورد آن کسب کند. (Horiuchi, 2013)

اندرکنش EPR دارای سه خصوصیت عمده است:

- اگر اصلاح یا تغییری به ذره شماره یک اعمال شود، زوج آن یعنی ذره شماره دو نیز دچار آن تغییرات می‌شود.
- تغییرات ذره شماره دو که ناشی از تغییرات اعمال شده به ذره شماره ۱ است، وابسته به فاصله میان دو ذره نیست.
- ذره شماره دو به طور همزمان تغییرات ذره شماره ۱ را حس می‌کند.

۶. تله‌پورت کردن و فرایند مخابرات کوانتومی

در علم فیزیک، تله‌پورت کردن به معنای حمل یا بردن چیزی از نقطه‌ای به نقطه دیگر بدون ارتباط فیزیکی است. انتقال اطلاعات روی فوتون‌ها اساس رایانه‌های کوانتومی را تشکیل می‌دهد. سرعت تله‌پورت کردن فوتون‌ها از سرعت نور تجاوز می‌کند اما با توجه به شیوه کار در انتقال اطلاعات، این سرعت در کامپیوترهای کوانتومی به سرعت نور محدود می‌شود. (de Abajo) تله‌پورت کردن یا جابجایی بدون ارتباط فیزیکی، تا حدود زیادی مشابه داستان‌های علمی-تخیلی-فضایی است که فردی از نقطه‌ای ناپدید و در نقطه‌ای دیگر ظاهر می‌شود، با این



تفاوت که در آزمایش‌های کنونی، ماده منتقل نمی‌شود، بلکه فقط فوتون‌ها و اطلاعاتی که روی آن‌ها سوار شده، انتقال می‌یابند.

۷. گیرنده مخابرات کوانتومی: آشکارساز نوری اسپینی

در این قطعه از ترکیب تکنولوژی سیلیکون و III-V استفاده شده است. مواد با روش همجوشی ویفر به یکدیگر متصل شده‌اند. این فرآیند تجاری است و اجازه می‌دهد تا با بازدهی اپتیکی بالا نیمه‌هادی‌های III-V را که طول عمر خیلی طولانی دارند با یکدیگر ترکیب کرده و از میزبانی نیمه‌هادی گروه IV، به خصوص سیلیکون، برای اسپین الکترون بهره برد. الکترون در یک چاه کوانتومی GaAs با ضخامت 10nm که به وسیله InP با ناخالصی نوع p محاط شده است، تولید می‌شود. چاه کوانتومی به صورت اپتیکی محدود است، آنچنان که جذب فوتون نیازمند تقویت به وسیله یک کاواک رزونانس اپتیکی است. حفره، پس از تولید از طریق یک لایه InP نوع p+ به سمت زمین حرکت می‌کند. حفره هیچگونه اطلاعات کوانتومی را حمل نمی‌کند زیرا با حالات اسپین الکترون باند هدایت در هم تنیده نیست. الکترون به وسیله یک میدان الکترواستاتیک به بخش حافظه و پردازش گیرنده همدوس اسپینی منتقل می‌شود. این انتقال می‌تواند تا وقتی که همدوسی با درجه خیلی بالایی حفظ می‌شود، انجام شود. بخش حافظه و پردازش آشکارساز در واقع یک پردازنده کوانتومی کوچک است. گیت‌های منطقی در ساختار نامتجانس SiGe وجود دارند. لایه SiGe که با B نشان داده شده است، لایه سد با شکاف باند نسبتاً زیاد برای محدود کردن الکترون در ناحیه موردنظر است. میان این لایه‌ها الکترون به یک یون $P31+$ که در زیر یک گیت الکترونیکی کاشته شده است، محدود می‌شود. در آن‌جا الکترون محدود می‌ماند، ولی اطلاعات ذخیره شده در اسپین آن می‌تواند از طریق تبادل اسپین با الکترون‌های محدود به یون‌های ناخالص $P31$ مشابه که در زیر گیت قرار گرفته است، به کامپیوتر منتقل شود. کنترل مورد نیاز از طریق اعمال ولتاژ به گیت‌ها و این واقعیت که فاکتور g الکترون محدود میان دو لایه سد، مدوله می‌شود، انجام می‌گیرد. در لایه SiGe که لایه تنظیم نیز نامیده می‌شود، فاکتور g در جهت ۱۰۰ برابر ۵۶۳/۱ است. در لایه SiGe یا لایه D (بخشنده) فاکتور g برابر ۹۹۸/۱ است. با مدوله کردن ولتاژ گیت تابع موج الکترون از طریق اثر استارک به سمت الکتروود کشیده می‌شود. در حضور یک میدان تشعشعی میکروویو ثابت، اسپین الکترون می‌تواند از حالت رزونانس بیرون آید. این عمل باعث اندرکنش‌های کیوبیت‌های منفرد می‌شود. (de Abajo)

اندرکنش دو کیوبیت با اعمال ولتاژهای مثبت به گیت مجاور الکتروودها صورت می‌گیرد. هر دو الکترون از یون‌ها دور شده و اندرکنش کولنی کاهش یافته باعث افزایش شعاع بوهر می‌شود. این امر باعث افزایش اندرکنش میان الکترون‌های همسایه نیز شده و فعل و انفعال مبادله را آغاز می‌کند. این فعل و انفعال مبادله، عملیات NOT میان کیوبیت‌ها را کنترل می‌کند. چنین اندرکنش یک کیوبیتی و دو کیوبیتی با یکدیگر یک دسته عمومی از گیت‌ها را شکل می‌دهد،



آن‌چنان که هر تبدیلی می‌تواند روی اطلاعات کوانتومی ذخیره شده در اسپین‌های الکترون محدود، از قبیل تصحیح خطا و پردازش اطلاعات کوانتومی انجام شود.

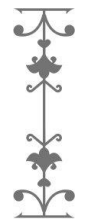
۸. فرستنده مخابرات کوانتومی: گسیلنده فوتونی

بعد از تصحیح خطا، تله‌پورت کردن یا دیگر مراحل پردازش اطلاعات کوانتومی، می‌خواهیم اطلاعات کوانتومی را به صورت فوتون انتشار دهیم. این کار با اجرای معکوس فرایند آشکارسازی قابل انجام است زیرا الکترون نیاز دارد تا با یک حفره بازترکیب شود. (Wu, 2023) فقط یک نوع حفره اجازه دارد با الکترون فعل و انفعال انجام دهد. از آنجا که حفره از بالای باند ظرفیت انتخاب می‌شود، مادامی که تعدادشان به طور طبیعی زیاد باشد، برای بازترکیب مشکلی وجود نخواهد داشت. اطلاعاتی که باید انتقال یابند ابتدا به الکترون محدود به اولین یون ناخالصی P31 منتقل می‌شوند. با اعمال یک پالس نسبتاً قوی به الکترو گیت، این الکترون از یون جدا شده و به صورت الکترواستاتیکی به نقطه کوانتومی InGaAs منتقل می‌شود. حفره نیز به همین صورت به نقطه کوانتومی منتقل شده و بازترکیب الکترون-حفره صورت می‌گیرد. به محض بازترکیب، اطلاعات کوانتومی به فوتون گسیل شده، منتقل می‌شوند. در ساختار گیرنده نیز تغییر کوچکی رخ داده است و نقطه کوانتومی جایگزین چاه کوانتومی شده است. دلیل استفاده از نقطه کوانتومی این است که تابع موج الکترون در فضای کوچکی محدود شود و قبل از گسیل فوتون، آزادانه به محیط اطراف حرکت نکند. در بخش گیرنده، الکترون به محض تولید، از ماده III-V خارج می‌شود. در بخش گسیلنده انتظار می‌رود الکترون با حفره تزریقی اندرکنش داشته باشد. این امر ممکن است چندین نانوثانیه به طول بینجامد. یک الکترون آزاد، تمایل به اسپین‌های مختلف در طول عمر خود دارد و به سرعت ناهمدوس می‌شود. (Savaresi et al., 2023)

۹. پیشرفت‌های مخابرات کوانتومی و آینده آن

فیزیکدانان فرهنگستان علوم اتریش و دانشگاه وین با استفاده از یک فیبرنوری به طول ۸۰۰ متر، دو آزمایشگاه در دو سوی رود دانوب را به یکدیگر متصل کردند و از این طریق، حالت کوانتومی اجزای نور را از فرستنده به گیرنده انتقال دادند. در کامپیوترهای آینده از این روش برای ایجاد بیت‌های کوانتومی به منظور نمایش صفر و یک دیجیتال استفاده خواهد شد.

موفقیت آمیز بودن این آزمایش به این معناست که انتقال اطلاعات روی فوتون‌های نور که اساس رایانه‌های کوانتومی را تشکیل می‌دهد، به طور عملی نیز امکان‌پذیر است. (Savaresi et al., 2023; Wu, 2023) در آزمایش دیگری از طریق سیم‌پیچی به طول بیش از دو کیلومتر بیت‌های کوانتومی یا کیوبیت‌ها تله‌پورت شدند، اما در این آزمایش که در محیط طبیعی انجام گرفت، فاصله واقعی میان دو آزمایشگاه، از ۵۵ متر تجاوز نمی‌کرد. گام بعدی برای ارتباطات جهانی کوانتومی، تلاش برای تله‌پورت کردن فوتون‌ها با استفاده از ارتباطات ماهواره‌ای است.



اکنون باید این نکته روشن شود که آیا تله‌پورت کردن فوتون‌ها در میان نقاطی با فواصل بسیار زیاد، امکان‌پذیر می‌باشد یا خیر؟ (Wu, 2023)

در حال حاضر تنها سیستم مناسب برای مخابرات کوانتومی راه دور، فوتون است. سیستم‌های دیگر مثل اتم‌ها و یون‌ها در حال بررسی هستند و به کارگیری آن‌ها در مخابرات کوانتومی در آینده نزدیک محقق نمی‌شود. یکی از مشکلات سیستم‌های مبتنی بر فوتون، تلفات فوتون‌ها در کانال کوانتومی است. این موضوع فاصله قابل عبور برای تک فوتون را با توجه به آشکارسازها و فیبرهای سیلیکایی موجود به ۱۰۰ کیلومتر محدود می‌کند. اصولاً این مشکل با تقسیم فاصله به فواصل کوچکتری که بتوان در هم تنیدگی کوانتومی را در آن تله‌پورت کرد، مرتفع می‌شود. کاربرد بعدی که اصطلاحاً مبادله در هم تنیدگی و حافظه کوانتومی نامیده می‌شوند، از انتقال در هم تنیدگی به فواصل دور به دست می‌آیند. به علاوه برای حذف ناهمدوسی ناشی از کانال‌های کوانتومی از تکرارکننده کوانتومی استفاده می‌شود. (Savaresi et al., 2023)

برای انتشار فوتون دو محیط فیبرهای نوری و فضای آزاد وجود دارد. هر یک از این دو انتخاب، طول موج مناسب متناظر با خود را نیاز دارد. برای فیبرهای نوری محدوده طول موجی رایج مخابرات معمولی یعنی ۱۳۰۰ تا حدود ۱۵۵۰ نانومتر نیز برای مخابرات کوانتومی استفاده می‌شود. در حالت فضای آزاد طول موج کوتاه‌تر در حدود ۸۰۰ نانومتر با توجه به وجود آشکارسازهای کارآمد و همچنین طول موج‌های خیلی بلندتر ۴ تا حدود ۱۰ میکرومتر که در آنجا اتمسفر شفاف است، برای مخابرات کوانتومی استفاده می‌شود. (Savaresi et al., 2023)

۱۰. محاسبات و ارتباطات کوانتومی

محاسبات کوانتومی (QC) یک پارادایم نوظهور با پتانسیل ارائه مزیت محاسباتی قابل توجهی نسبت به محاسبات کلاسیک معمولی با بهره‌برداری از اصول مکانیکی کوانتومی مانند در هم تنیدگی و برهم‌نهی است. پیش‌بینی می‌شود که این مزیت محاسباتی QC به حل بسیاری از مسائل پیچیده و حل‌نشده در چندین حوزه کاربردی مانند طراحی دارو، علم داده، انرژی پاک، مالی، توسعه شیمیایی صنعتی، ارتباطات ایمن و شیمی کوانتومی کمک کند. در سال‌های اخیر پیشرفت فوق‌العاده در توسعه سخت‌افزار کوانتومی و نرم‌افزار / الگوریتم کوانتومی، QC را بسیار به واقعیت نزدیک‌تر کرده است. (Wu, 2023) در واقع نشان دادن برتری کوانتومی نقطه عطف مهمی در عصر کوانتوم با مقیاس متوسط بر سرورصدا (NISQ) است. مرحله منطقی بعدی مزیت کوانتوم است که به موجب آن رایانه‌های کوانتومی یک مشکل دنیای واقعی را بسیار کارآمدتر از محاسبات کلاسیک حل می‌کنند. از آنجایی که انتظار می‌رود دستگاه‌های کوانتومی در چند سال آینده به‌طور پیوسته افزایش یابند، ناهمدوسی کوانتومی و اتصال کیوبیتی دو چالش اصلی برای دستیابی به مزیت کوانتومی در عصر NISQ هستند. QC یک زمینه تحقیقاتی بسیار موضوعی و سریع است که پیشرفت قابل توجهی در تمام جنبه‌ها دارد. (Wu, 2023) بررسی



سیستماتیک ادبیات موجود در مورد QC برای درک وضعیت مدرن این زمینه نوظهور و شناسایی چالش‌های باز برای این جامعه که در سال‌های آینده باید به آن‌ها رسیدگی کند بسیار ارزشمند خواهد بود. (Chen & Segev, 2021) طبقه‌بندی پیشنهادی برای نقشه‌برداری از مطالعات مختلف مرتبط برای شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی استفاده می‌شود. مروری دقیق بر ابزارها و فناوری‌های نرم‌افزار کوانتومی، رمزنگاری پس‌کوانتومی و توسعه سخت‌افزار رایانه‌های کوانتومی، وضعیت فعلی را در حوزه‌های مربوطه به تصویر می‌کشد.

۱۱. محاسبات کوانتومی در مهندسی نرم‌افزار

محاسبات و برنامه‌نویسی کامپیوتر کوانتومی مباحث بسیار پیشرفته و نوپا می‌باشند. محاسبات کوانتومی مرز مشترکی میان فیزیک کوانتومی و علم کامپیوتر است. در واقع هدف محاسبات کوانتومی، یافتن روش‌هایی برای طراحی مجدد قطعات شناخته شده محاسبات مانند گیت‌ها و ترانزیستورها، به گونه‌ای است که بتوانند تحت اثرات کوانتومی که در ابعاد نانومتری بروز می‌کنند، عمل نمایند. (Kim et al., 2022) از کاربردهای محاسبات کوانتومی می‌توان به محاسبات موازی، تجزیه اعداد، مرتب‌سازی و شبیه‌سازی کوانتومی اشاره کرد. در نگاه اول، برنامه‌نویسی یک کامپیوتر کوانتومی کار ساده‌ای به نظر می‌رسد در حالی که طراحی یک زبان برنامه‌نویسی کوانتومی، کاری دقیق و ماهرانه می‌باشد و نیاز به افراد متخصص در این زمینه دارد. در نتیجه، مهندسی نرم‌افزار کوانتومی به عنوان یک چالش مهم برای تکنیک‌های پیشرفت کامپیوترهای کوانتومی مطرح است. از این رو، الگوریتم‌های کوانتومی و برنامه‌نویسی کوانتومی نقش کلیدی در استفاده از قدرت کامپیوترهای کوانتومی دارند. در رابطه با کامپیوترهای کوانتومی، الگوریتم‌های کوانتومی و تکنیک‌های نوین زبان‌های برنامه‌نویسی کوانتومی برای کامپیوترهای کوانتومی بحث‌هایی شده است. (Scully & Zubairy, 1999)

۱۲. اپتیک کوانتومی

تنوری‌های پیشرفته اپتیک کوانتومی از اپتیک کلاسیک سرچشمه می‌گیرند، با این سوال که چگونه مرزهای زمانی ناهمسانگرد می‌توانند خواص زاویه‌ای اثر تقویت خلاء را کنترل کنند. نویسندگان، چندین مثال برای توزیع زاویه‌ای فوتون‌های تولید شده ارائه می‌کنند؛ که مهار تولید فوتون در امتداد یک جهت خاص، تقویت مستقیم رزونانسی، تولید شانه‌های زاویه‌ای و تغییر سریع بین مهار و تقویت تشدید می‌باشند. (Scully & Zubairy, 1999) چائو و همکاران یک چارچوب بهبودیافته را برای ارزیابی حداکثر چگالی محلی حالت‌های یکپارچه طیفی (LDOS) که می‌توان در یک رسانه ساختاریافته به دست آورد، گزارش کرد. این عمل به طور تحلیلی قانون مقیاس‌بندی بین کران بالای LDOS، حساسیت مواد و پهنای باند منبع را استخراج می‌کند. (Scully & Zubairy, 1999) فنگ و همکاران نفوذ کوانتومی را معرفی کرده و نمایش تجربی آن را با استفاده از شبکه‌های موج‌بر نمونه اولیه ارائه می‌کند. شبکه‌های

موج بر با احتمال اشغال متفاوت به عنوان پیکربندی روی تراشه با استفاده از تکنیک نوشتن لیزر مستقیم ساخته شدند. این رویکرد برای مشاهده مستقیم پدیده‌های انتقال کوانتومی برای اکتشاف آماری در مطالعات آینده در مورد دینامیک نفوذ کوانتومی مفید خواهد بود. (Blais et al., 2020)

از زمان اولین مشاهده رفتار کوانتومی منسجم در یک کیوبیت ابررسانا در حال حاضر بیش از ۲۰ سال پیشرفت‌های اساسی در زمینه مدارهای کوانتومی ابررسانا صورت گرفته است. یکی از این پیشرفت‌ها معرفی مفاهیم الکترو دینامیک کوانتومی حفره (QED) به مدارهای ابررسانا است تا آنچه را که اکنون به عنوان مدار QED شناخته می‌شود، ارائه دهد. این رویکرد در یک معماری واحد الزامات اساسی برای محاسبات کوانتومی را محقق می‌کند که پیش از این برای اجرای الگوریتم‌های کوانتومی ساده و کار همزمان ده‌ها کیوبیت ابررسانا استفاده شده است. به این دلایل مدار QED یکی از معماری‌های پیشرو برای محاسبات کوانتومی است. به موازات این پیشرفت‌ها به سمت پردازش اطلاعات کوانتومی، مدار QED فرصت‌های جدیدی را برای اکتشاف فیزیک غنی اپتیک کوانتومی در رژیم‌های پارامتری جدید ارائه می‌کند که در آن اثرات غیرخطی قوی به راحتی در سطح فوتون‌های میکروویو منفرد قابل مشاهده است. (Scully & Zubairy, 1999)

الکترو دینامیک کوانتومی حفره (QED) برهمکنش نور و ماده را در اساسی‌ترین سطح آن مطالعه می‌کند که برهمکنش منسجم اتم‌های منفرد با فوتون‌های منفرد است. در طول ۴۰ سال گذشته این اکتشاف منجر به پیشرفت‌هایی در تکنیک‌های تجربی به مرحله‌ای رسیده است که کنترل حالت کوانتومی اتم‌های منفرد در حال حاضر امکان‌پذیر است؛ پیشرفت‌هایی که ابزارهای بسیار دقیقی را برای بررسی ماهیت ضدشهودی فیزیک کوانتومی فراهم کرده‌اند. برای رسیدن به رژیمی که در آن جفت شدن منسجم نور و ماده بر همه نرخ‌های فروپاشی غلبه می‌کند، به طوری که اثرات کوانتومی مهم می‌شوند، QED حفره‌ای به اتم‌هایی با گشتاور دوقطبی الکتریکی اتمی بزرگ و حفره‌هایی که میدان الکترومغناطیسی را در ناحیه کوچکی از فضا محدود می‌کنند، متکی است. (You & Nori, 2011) با این حال پیوستگی کوانتومی به اتم‌های طبیعی محدود نمی‌شود و اولین نشانه‌های قطعی برهم‌نهی منسجم دو حالت در یک سیستم کوانتومی مهندسی شده است. دو دهه پیش از طریق تکنیک‌های فیزیک اتمی نوسانات رابی و حاشیه‌های تداخل رمزی مشاهده شد. در قلب چنین آزمایشاتی یک دستگاه مبتنی بر اتصال جوزفسون قرار دارد که به عنوان یک اتم مصنوعی عمل می‌کند. با این حال برخلاف اتم‌های طبیعی اتم‌های مصنوعی ابررسانا با طراحی و عملکرد مناسب در دماهای برودتی باید تا حدودی مجبور به رفتار مکانیکی کوانتومی شوند. در طول ۲۰ سال گذشته پیشرفت چشمگیری در این مسیر حاصل شده است و بر اساس برخی معیارها اتم‌های مصنوعی اکنون هم تراز یا حتی از هم‌تایان طبیعی خود بهتر هستند. علاوه بر این مدارهای کوانتومی ابررسانا را می‌توان به شدت و به طور قابل کنترلی با میدان‌های الکترومغناطیسی محدود شده در عناصر



مدار مانند سلف‌ها و خازن‌ها جفت کرد. به عبارت دیگر با استفاده از فیزیک QED می‌توان به طور طبیعی حفره‌ای را در مدارها کاوش کرد، مشاهده‌ای که زمینه مدار QED7-9 را باز کرده است. فراتر از اپتیک کوانتومی، مدار QED در یک معماری واحد به الزامات ضروری برای محاسبات کوانتومی جهانی دست می‌یابد و اکنون یک معماری پیشرو برای تحقق یک کامپیوتر کوانتومی مقیاس پذیر است. (Scully & Zubairy, 1999)

این کار بررسی می‌کند که چگونه درجه کنترل و اتصال اتم‌های مصنوعی فعال شده توسط مدار QED را می‌توان برای کشف فیزیک QED حفره و اپتیک کوانتومی روی یک تراشه و همچنین ساخت فناوری‌های کوانتومی امیدوارکننده مورد بهره‌برداری قرار داد. ما ابتدا مفاهیم اساسی مدار QED را معرفی می‌کنیم و اینکه چگونه رژیم‌های پارامتر جدیدی که می‌توان در مدار QED به دست آورد در مقایسه با QED حفره‌ای به امکانات جدیدی برای اپتیک کوانتومی منجر می‌شود. در مرحله بعد مدار QED را در زمینه پردازش اطلاعات کوانتومی مورد بحث قرار می‌دهیم. سپس دیدگاهی را در مورد گام‌های بعدی در زمینه مدار QED به سمت محاسبات کوانتومی ابتدا با تصحیح خطای کوانتومی (QEC) و سپس با بحث در مورد برخی از چالش‌های مرتبط با مقیاس‌بندی به سیستم‌های بزرگتر ارائه می‌کنیم. (Wu, 2023)

به طور خلاصه در این بخش نظریه پایه مدار QED را خلاصه می‌کنیم. آن‌ها شامل یک کیوبیت ابرسانا (سبز) تعبیه شده در یک نوسانگر میکروویو با کیفیت بالا (آبی) مانند یک تشدیدکننده خط انتقال هم‌سطح ابرسانا، یک سلف و مدار خازن (LC) یا یک حفره سه‌بعدی (D^3) با عنصر توده‌ای هستند. هنگام کار با یک تشدیدکننده خط انتقال، کیوبیت در نزدیکی هادی مرکزی تشدیدکننده ساخته می‌شود. این هادی مرکزی توسط شکاف‌هایی قطع می‌شود که منجر به اتصال خازنی به پورت‌های ورودی و خروجی تشدید کننده می‌شود. در این نقاط، جریان ناپدید می‌شود و این شرایط مرزی باز منجر به حالت‌های عادی با فرکانس‌های کاملاً جدا شده می‌شود. هنگام کار با رزوناتورهای یک سانتی‌متری، فرکانس اصلی در رژیم میکروویو است و معمولاً بین ۵ تا ۱۵ گیگاهرتز انتخاب می‌شود. این فرکانس‌ها به اندازه‌ای بالا هستند که از جمعیت فوتون‌های حرارتی در دمایی که این دستگاه‌ها در آن کار می‌کنند جلوگیری می‌شود، اما هنوز در یک محدوده مناسب برای الکترونیک کنترل میکروویو هستند. (Scully & Zubairy, 1999)

مدارهای ابرسانا با اتصالات جوزفسون می‌توانند مانند اتم‌های مصنوعی رفتار کنند. در این مدارهای کوانتومی، اتصالات جوزفسون به عنوان عناصر مدار غیرخطی عمل می‌کنند. چنین غیرخطی بودن در یک مدار فاصله نابرابر بین سطوح انرژی را تضمین می‌کند به طوری که پایین‌ترین سطوح را می‌توان به صورت جداگانه با استفاده از میدان‌های خارجی مورد بررسی قرار داد. به طور تجربی، این مدارها در مقیاس میکرومتری ساخته می‌شوند و در دمای میلی‌کلوین کار می‌کنند. به دلیل کاهش ابعاد و به لطف ابرسانایی، اتلاف و نویز ناشی از



محیط تا حد زیادی سرکوب می‌شود، بنابراین مدارها می‌توانند به صورت مکانیکی کوانتومی رفتار کنند. (Kim et al., 2022)

مدارهای ابررسانای مبتنی بر اتصالات جوزفسون اخیرا به موضوع تحقیقات زیادی تبدیل شده‌اند؛ زیرا می‌توانند به عنوان کیوبیت (سیستم‌های کوانتومی دوسطحی قابل کنترل) برای محاسبات کوانتومی مورد استفاده قرار گیرند. حتی اگر زمان‌های ناهمدوسی معمولی این مدارها از الزامات محاسبات کوانتومی کمتر است، انسجام کوانتومی ماکروسکوپی آن‌ها برای نشان دادن رفتار کوانتومی قابل توجه کافی است. این مدارها می‌توانند تعدادی حالت ویژه ابررسانا با مقادیر ویژه گسسته کمتر از سطوح انرژی تحریکات شبه ذره‌ای داشته باشند که شامل شکستن جفت کوپر می‌شود. این ویژگی به این مدارها اجازه می‌دهد تا مانند اتم‌های مصنوعی ابررسانا رفتار کنند. در واقع تشابه عمیقی بین اتم‌های طبیعی و اتم‌های مصنوعی ساخته شده از مدارهای ابررسانا وجود دارد. هر دو دارای سطوح انرژی گسسته هستند و می‌توانند نوسانات کوانتومی منسجمی را بین این سطوح نشان دهند. در حالی که اتم‌های طبیعی را می‌توان با استفاده از فوتون‌های مرئی یا مایکروویو که الکترون‌ها را از حالتی به حالت دیگر برمی‌انگیزد، کنترل کرد. اتم‌های مصنوعی در این مدارها توسط جریان‌ها، ولتاژها و فوتون‌های مایکروویو هدایت می‌شوند که سیستم را از یک حالت کوانتومی ماکروسکوپی به حالت دیگر برانگیخته می‌کنند. (Scully & Zubairy, 1999)

تفاوت‌های بین مدارهای ابررسانا و اتم‌های طبیعی شامل مقیاس‌های مختلف انرژی در دو سیستم و میزان قوی بودن هر سیستم با محیط خود است. کوپلینگ برای اتم‌های طبیعی ضعیف و مدارها قوی است. برخلاف اتم‌های طبیعی، اتم‌های مصنوعی را می‌توان با ویژگی‌های خاصی طراحی کرد و با استفاده از فناوری‌های لیتوگرافی استاندارد روی یک تراشه ساخت. با توجه به کاربردها این درجه از تنظیم‌پذیری یک مزیت مهم نسبت به اتم‌های طبیعی است. بنابراین می‌توان به شیوه‌ای قابل کنترل، مدارهای ابررسانا را برای آزمایش اصول مکانیک کوانتومی در مقیاس ماکروسکوپی و همچنین نشان دادن فیزیک اتمی و اپتیک کوانتومی روی یک تراشه استفاده کرد. علاوه بر این اتم‌های مصنوعی را می‌توان به گونه‌ای طراحی کرد که دارای ویژگی‌های عجیب و غریبی باشند که در اتم‌های طبیعی وجود ندارد.

۱۳. مدارهای ابررسانا به عنوان اتم‌های مصنوعی

دو مقیاس مهم انرژی رفتار مکانیکی کوانتومی مدار اتصال جوزفسون را تعیین می‌کنند؛ یعنی انرژی جفت جوزفسون (E_J) و انرژی الکترواستاتیک کولن ($E_C = (2e)^2 / 2C$) برای یک جفت کوپر که e بار الکترونیکی است و C یا ظرفیت C_J یک اتصال جوزفسون یا ظرفیت یک جزیره ابررسانا به نام جعبه کوپر جفت (یعنی مجموع ظرفیت گیت C_g و ظرفیت اتصال مربوطه) بسته به مدار است. (Folk et al., 2003) علاوه بر این، کیوبیت‌های ابررسانای ترکیبی امکان‌پذیر است. به عنوان مثال یک جعبه جفت کوپر می‌تواند زمانی که $E_J / E_C \approx 1$



مانند یک کیوبیت شارژ رفتار کند. در مورد کیوبیت شار، با کاهش نسبت E_I/E_c ، نویز شارژ می‌تواند بر نویز شار و مدار غالب شود. سپس بیشتر شبیه کیوبیت شارژ عمل می‌کند. در این مدار وقتی $\alpha < 0.5$ نسبت انرژی جفت جوزفسون بین اتصالات کوچکتر و بزرگتر در حلقه (است) پتانسیل دو چاه به یک پتانسیل تک چاه تبدیل می‌شود و مدار مانند یک کیوبیت فاز عمل می‌کند. (Braunstein et al., 1992) می‌توان یک ظرفیت خازنی بزرگ را برای سرکوب نویز شارژ در این مدار به محل اتصال کوچک انتقال داد. همچنین می‌توان برای کاهش نویز شارژ در جعبه کوپر جفت از این ظرفیت بزرگ که به اتصال جوزفسون متصل شده است، استفاده کرد تا مدار را در رژیم فاز پیاده‌سازی کند. در ادامه چند جنبه از پدیده‌های فیزیکی اتمی و اپتیکی کوانتومی موجود در مدارهای ابررسانا را برجسته می‌کنیم. (Kim et al., 1999)

یک میدان الکترومغناطیسی کوانتیزه می‌تواند انرژی را به طور منسجم با یک سیستم دوسطحی معمولاً در یک حفره کوچک (در مقیاس میکرومتر) مبادله کند. این فرایند تبادل انرژی شامل یک پدیده اساسی به نام نوسان رابی است. سیستم دوسطحی و میدان کوانتومی از انرژی را با فرکانس مشخصی که فرکانس رابی نامیده می‌شود به عقب و جلو مبادله می‌کنند. هنگامی که میدان در رزونانس با سیستم است، فرکانس رابی با قدرت جفت شدن سیستم میدان متناسب است. (Kim et al., 1999) ابتدایی‌ترین حالات چنین فرایندهای منسجمی شامل برهمکنش یک سیستم دوسطحی با یک فوتون منفرد در حفره است. تبادل انرژی بین سیستم و فوتون منفرد زمانی قابل مشاهده است که فرکانس رابی بزرگتر از نرخ فروپاشی سیستم دوسطحی و حفره باشد. این جفت شدن فوتون-اتم برای انواع مختلفی از اتم‌ها که با میدان نوری در یک حفره تعامل دارند به دست آمده است و اساس الکترودینامیک کوانتومی حفره (QED) را تشکیل می‌دهد. (Schaub et al., 1999) حفره QED با مدارهای ابررسانا پیشنهاد شد و به طور تجربی در سیستم‌هایی که کیوبیت‌های ابررسانا به عنوان اتم‌های مصنوعی دوسطحی استفاده می‌شوند، به دست آمد. برای حفره یک تشدید کننده القایی/خازن تک حالت (LC) و یک تشدید کننده موج بر هم سطح چند حالت استفاده شده است. به طور قابل توجهی، حد جفت قوی برای یک کیوبیت ابررسانا در یک حفره می‌تواند بسیار راحت‌تر از یک اتم طبیعی در یک حفره با طراحی مناسب پارامترهای سیستم به دست آید. برای مثال این امکان را می‌دهد تا تغییر را برای یک کیوبیت ابررسانا در حفره مشاهده کنیم. علاوه بر این کیوبیت ابررسانا و حفره را می‌توان روی یک تراشه ساخت. (Braunstein et al., 1992)

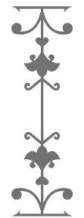
مدارهای کوانتومی ابررسانا را می‌توان با پارامترهای سیستمی خاص طراحی کرد تا به رژیم به اصطلاح کوپلینگ فوق قوی، که در آن قدرت جفت کیوبیت فوتون با مقیاس انرژی کیوبیت و فوتون قابل مقایسه و مناسب هستند؛ دستیابی پیدا کرد. در واقع تعدادی مطالعات نظری در مورد این سیستم وجود داشته است که برخی از خواص استاتیکی و دینامیکی غنی آن را تجزیه و تحلیل می‌کنند. همچنین جفت بسیار قوی بین یک کیوبیت شار ابررسانا و یک موج بر

هم سطح یا یک تشدیدگر LC اخیراً در آزمایش‌ها نشان داده شده است. می‌توان انتظار داشت که پدیده‌های جدیدی در این رژیم جفت‌کننده فوق قوی پیدا شود که در رژیم‌های جفت ضعیف معمولی و نسبتاً قوی وجود ندارد. علاوه بر این حالت‌های پوشانده شده از یک کیوبیت بار ابررسانا و یک میدان میکروویو شدید به صورت تجربی با تعبیه مدار در یک نوسانگر LC مشاهده شد. قابلیت تنظیم این حالت‌های پوشیده این امکان را می‌دهد تا هر دو رژیم جفت رزونانس و پراکنده کشف شود. (Loss & DiVincenzo, 1998)

حالت الکترونیکی در اتم‌های طبیعی دارای تقارن برابری کاملاً تعریف شده زوج یا فرد در هر سطح مداری است. در اثر تقریب دوقطبی، برهمکنش همیلتونی بین اتم و میدان الکتریکی وابسته به زمان دارای برابری فرد است؛ بنابراین برای داشتن یک عنصر ماتریس انتقال دوقطبی غیر صفر علاوه بر محدودیت‌های روی اعداد کوانتومی آزیموتالی و مغناطیسی حالت‌های الکترونیکی باید جایی که هیچ گذار دوقطبی بین حالت‌های الکترونیکی با برابری یکسان وجود ندارد یک تغییر برابری بین حالت اولیه و نهایی وجود داشته باشد. با این حال قوانین انتخاب می‌تواند برای اتم‌های مصنوعی ابررسانا متفاوت باشد. به عنوان مثال در تقریب دوقطبی برهمکنش همیلتونی بین یک مدار کیوبیت شار و یک میدان مغناطیسی وابسته به زمان برابری مشخصی وجود ندارد مگر در نقطه‌ای با شار مغناطیسی ساکن جایی که Φ شار مغناطیسی ساکن به حلقه و Φ_0 کوانتوم شار مغناطیسی اعمال شده است. در این مقدار شار خاص برهمکنش همیلتونی دارای برابری فرد است. (Chen & Segev, 2021)

لیزر از یک محیط تقویت‌کننده در داخل یک حفره نوری تشدیدکننده تشکیل شده است. هنگامی که سیستم رانده می‌شود وارونگی جمعیت حالت (SPI) را می‌توان برای اتم‌ها یا مولکول‌های موجود در محیط تقویت‌کننده به دست آورد. علاوه بر این بازخورد مثبتی بین نور ساطع شده و محیط تقویت‌کننده وجود دارد. به دلیل این بازخورد مثبت و ماهیت گسیل فوتون تحریک شده لیزر دارای بهره نوری خالص بزرگی است و فوتون‌های ساطع شده دارای جهت، فاز و قطبش یکسان هستند. این مزایا به این معنی است که لیزر کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مختلف دارد. اخیراً چندین مطالعه با استفاده از تنها یک اتم مصنوعی، لیزر را از نظر تئوری و تجربی بررسی کرده‌اند. (Vrijen & Yablonovitch, 2001)

کیوبیت‌های ابررسانا این مزیت را دارند که حالت‌های کوانتومی را به شیوه‌ای قابل کنترل دستکاری می‌کنند. اگر این کیوبیت‌های ساکن به صورت مکانی از هم جدا شوند، می‌توان از فوتون‌های منفرد تولید شده در یک حفره گسترده به‌عنوان یک گذرگاه کوانتومی شبیه به یک کیوبیت پرنده برای اجرای ارتباطات کوانتومی بین آن‌ها استفاده کرد. از نظر فناوری، این امر مستلزم تولید تک فوتون‌ها با دستکاری یک کیوبیت ابررسانا و انتقال اطلاعات بین کیوبیت‌های ابررسانا و فوتون‌ها است. دستیابی به این فرایند ارتباط کوانتومی روی یک تراشه با استفاده از یک حفره روی تراشه امکان‌پذیر می‌شود. (Vrijen & Yablonovitch, 2001)



۱۴. چالش‌ها

چالش‌های عملی پردازش اطلاعات کوانتومی با مدار QED به سرعت در حال انتقال از حوزه کنجکاوی علمی به آستانه واقعیت فنی است. انجام این کار انتقال چالش‌های عملی متعددی را ارائه می‌کند که دقیقاً در حوزه موضوعی مهندسی کوانتومی قرار دارند. رشته‌ای در حال توسعه که در خدمت ایجاد پلی بین علوم کوانتومی سنتی و مهندسی کلاسیک در حمایت از ساخت ماشین‌های کوانتومی قابل توسعه است. (Jang et al., 2023) اگرچه انتزاعات مهندسی مرتبط با مقیاس‌پذیری سیستم مانند آنالوگ‌های کوانتومی مقیاس ندارد یا قانون مور به دلیل اینکه بسیار نابالغ هستند هنوز برای پردازشگرهای اطلاعات کوانتومی توسعه نیافته‌اند، اما ضمن درک چالش‌های فعلی می‌توانیم آن‌ها را بیان کنیم. امروزه در گسترش عملکرد فعلی به سیستم‌ها و برنامه‌های کاربردی در مقیاس بزرگتر نگاه می‌شود. نیازهای عمومی یک پردازنده اطلاعات کوانتومی را می‌توان در خطوط زیر خلاصه کرد. پردازنده‌های کوانتومی باید از موادی با پیوستگی بالا و با استفاده از فرایندهای ساخت قابل تجدید و توسعه ساخته شوند. آن‌ها پس از ساخت باید کنترل شوند و با دقت بالا خوانده شوند چالشی که با افزایش تعداد کیوبیت‌ها سخت‌تر می‌شود. (Schaub et al., 1999) نیاز به ورود و خروج تعداد بیشتری از سیگنال‌های کنترل و بازخوانی به پردازنده و همچنین ظلم اتصالات در مسیریابی آن سیگنال‌ها در پردازنده وجود دارد. نیاز به کالیبره کردن فرکانس‌های کیوبیت و حفره منفرد و کوپلینگ‌های آن‌ها با یکدیگر برای کنترل و بازخوانی مناسب پردازنده و همچنین حذف گفنگوی متقاطع کلاسیک و دینامیک ناخواسته همیلتونی منسجم وجود دارد. علاوه بر این باید پردازنده و تمام خطوط کنترل آن و احتمالاً وسایل الکترونیکی بروندی را به شیوه‌ای سازگار با عملکرد بالا در یخچال رقیق‌سازی با ظرفیت کنترل حرارت محدود در دمای میلی‌کلوین قرار داد و حرارت داد و باید مجموعه‌ای از الکترونیک و یک مجموعه نرم‌افزاری برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های داده شده در مقیاس ایجاد کرد. (Loss & DiVincenzo, 1998)

چالش‌های برآورده کردن این نیازها تا حدی به دو دوره متمایز مقیاس‌گذاری مرتبط است. اولی یک دوره کوتاه‌تر یعنی عصر brute-force است که در آن هر کیوبیت به طور جداگانه برای کنترل و بازخوانی سیم‌کشی می‌شود. پردازنده‌های کیوبیت امروزی با حداکثر چند ده کیوبیت در این دسته قرار می‌گیرند. چنین رویکردهای brute-force تا حدود ۱۰۰۰ کیوبیت قابل اجرا هستند. یک تخمین ضعیف عمده‌تاً با بسته‌بندی، مسیریابی سیگنال و اندازه یخچال رقیق‌سازی که کسی مایل به تولید آن است محدود می‌شود. دومی را می‌توان به عنوان عصر مقیاس‌پذیری نام‌گذاری کرد که در آن روش‌های یکپارچه مانند مالتی‌پلکس کردن سیگنال و الکترونیک بروندی هم‌مکانی برای فعال کردن کنترل و بازخوانی کیوبیت‌های بیشتر با سیم‌های کمتر به قیمت پیچیدگی بالاتر معرفی می‌شوند. (Myers et al., 2005) بار حرارتی دو نوع مدار کیوبیت ابررسانا که در اینجا مورد بحث قرار گرفت، مدار مسطح QED و کیوبیت‌های



بوزونی مایکروویو در بسیاری از این چالش‌ها هرچند به درجات متفاوت مشترک هستند. با رویکرد مسطح، کیوبیت‌های ابررسانا خود اطلاعات کوانتومی را نگه می‌دارند که از حفره‌های مایکروویو برای خواندن حالت‌های کوانتومی یا در برخی موارد واسطه جفت و کنترل کیوبیت استفاده می‌شود. چنین پردازنده‌های مسطحی از روش‌های ساخت نیمه‌رسانا از جمله قابلیت توسعه لیتوگرافی، قابلیت ساخت روی تراشه‌های سیلیکونی و عوامل شکل نسبتاً کوچک بهره می‌برند. در حفظ انسجام، چالش‌ها بسیار است زیرا فرایندهای ساخت برای برآوردن نیازهای ذکر شده پیچیده‌تر می‌شوند. در رویکرد بوزونی کیوبیت، حفره‌های مایکروویو نسبتاً بزرگ (در مقیاس سانتی‌متری) برای نگهداری حالت‌های کوانتومی فوتونیک در بلوک‌های آلومینیومی ماشین‌کاری می‌شوند و کیوبیت‌های ترانسومون برای کنترل این حالت‌ها استفاده می‌شوند. مزیت اصلی این رویکرد درجه ای از مدولار بودن و طول عمر بالاتر حفره-فوتون بالاتر که به قیمت ردپای بسیار بزرگ‌تر تمام می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد، امروزه هر دو رویکرد تقریباً به یک سطح از گیت دست می‌یابند، حدود ۹۹/۹ درصد برای دروازه‌های تک‌کیوبیتی و ۹۹ درصد برای دروازه‌های دو کیوبیتی. هر دو رویکرد مسطح کیوبیت و حفره-فوتون به یکپارچگی سه‌بعدی برای تسهیل توسعه‌پذیری تکیه می‌کنند. رویکرد bosonic qubit طبیعتاً به طور یکپارچه سه‌بعدی است، در حالی که رویکرد مسطح کیوبیت دوبعدی از فناوری‌های یکپارچه‌سازی سه‌بعدی در یک زمینه مرسوم‌تر استفاده می‌کند. با حرکت از زنجیره‌های یک‌بعدی کیوبیت به آرایه‌های دو بعدی بزرگتر، مسیریابی سیگنال به کیوبیت‌های داخلی عملاً بدون استفاده از بعد سوم برای فعال کردن اتصالات متقابل و دور زدن یکدیگر ممنوع می‌شود. اگرچه ممکن است ساخت چندین لایه سیم‌کشی در کنار کیوبیت‌ها در یک فرایند واحد تصور شود، چنین رویکردی عموماً دی‌الکتریک‌های با اتلاف را بین لایه‌های سیم‌کشی ترکیب می‌کند و انسجام کیوبیت را کاهش می‌دهد. در حالی که ساخت یکپارچه با دی‌الکتریک‌های با کیفیت بالا ممکن است روزی یک رویکرد قابل قبول و سودمند برای کیوبیت و الکترونیک کنترل یکپارچه باشد. در این میان یک رویکرد جایگزین این است که تراشه‌های جداگانه‌ای را که مطابق با عملکرد مربوطه آن‌ها ساخته می‌شوند به یکدیگر متصل کنیم، به عنوان مثال یک تراشه کیوبیت با انسجام بالا، یک تراشه چندلایه برای مسیریابی سیگنال و یک تراشه از طریق سیلیکون از طریق (TSV) که آن‌ها را به یکدیگر متصل می‌کند، در حالی که تراشه کیوبیت بسیار حساس را از دی‌الکتریک‌های با اتلاف در تراشه اتصال جدا می‌کند. (Folk et al., 2003)

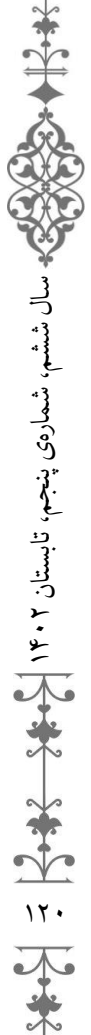
اگرچه ادغام سه‌بعدی به رفع ظلم ارتباطات متقابل کمک می‌کند اما به تنهایی آن را حل نمی‌کند. با افزایش تعداد کیوبیت‌ها تقاضا برای تعداد خطوط سیگنالی که باید به بسته کیوبیت (Housing) متصل شوند، افزایش می‌یابد. امروزه آن سیگنال‌ها با استفاده از وسایل الکترونیکی در دمای اتاق تولید می‌شوند و در امتداد سیم‌کشی کواکسیال به یخچال رقیق‌کننده



وارد می‌شوند که باید به درستی حرارت داده شوند. پیشرفت‌ها شامل استفاده از کابل‌های انعطاف‌پذیر برای کاهش بار حرارتی یخچال و افزایش تراکم سیم‌کشی است. آوردن الکترونیک کنترل به یخچال به عنوان مثال با استفاده از نیمه‌هادی فلز-اکسید-مکمل برودتی (CMOS) یا منطق کوانتومی تک‌شار (SFQ)، به کوتاه کردن طول سیم‌های سیگنال کمک می‌کند، اما این کار را انجام نمی‌دهد. (Folk et al., 2003) تعداد سیم‌های متصل به بسته را کاهش می‌دهند مگر اینکه الکترونیک برودتی مستقیماً با کیوبیت‌ها یکپارچه شود. در عمل CMOS کرایونیک انرژی زیادی را تلف می‌کند که در مجاورت کیوبیت‌ها در مرحله میلی‌کلوین یخچال‌های امروزی قابل دوام است. الکترونیک مبتنی بر SFQ یا مشتقات آن ممکن است راه حلی را ارائه دهد؛ اما در حال حاضر نسبت به هم‌تای CMOS خود بالغ‌تر است. این مشکلات ممکن است در دوران brute-force منع‌کننده نباشند، اما باید در دوره مقیاس‌بندی مورد توجه قرار گیرند. (Braunstein et al., 1992)

۱۵. پیشنهاداتی در چشم‌انداز آینده

حوزه نانوفوتونیک‌های مبتنی بر مواد دو بعدی با سرعتی سریع در حال رشد است که توسط توانایی طراحی سیستم‌های نانوفوتونیک با کنترل تعداد بی‌سابقه درجات آزادی و ساخت ساختارهای ناهمسان مواد از پایین به بالا آغاز شده است. با دقت اتمی پالت وسیعی از کلاس‌های پلاریتونیک شناسایی شده‌اند که شامل میدان‌های نوری فوق‌العاده محدود حتی نزدیک شدن به مقیاس‌های طول مشخصه یک اتم است. این پیشرفت‌ها یک تقویت واقعی برای حوزه نوظهور نانوفوتونیک کوانتومی بوده است، جایی که ماهیت مکانیکی کوانتومی الکترون‌ها و پلاریتون‌ها و برهمکنش‌های آن‌ها مرتبط می‌شود. به عنوان مثال می‌توان به اثرات غیرمحلّی کوانتومی برهمکنش‌های نور و ماده فوق قوی تابش چرنکوف، دسترسی به انتقال‌های ممنوعه، اثرات هیدرودینامیکی، غیرخطی‌های تک‌پلاسمونی، کوانتیزاسیون پلاریتونیک، اثرات توپولوژیکی و غیره اشاره کرد. علاوه بر این پدیده‌های ذاتی نانوفوتونیک کوانتومی سیستم‌های مواد دو بعدی نیز می‌توانند به عنوان کاوشگرهای حساس برای خواص کوانتومی موادی که حالت‌های نانوفوتونیک یا مواد کوانتومی را در مجاورت خود حمل می‌کنند، استفاده شوند. در اینجا پلاریتون‌ها به عنوان کاوشگر برای تحریک‌های نامرئی در ابررساناها یا به عنوان ابزاری جدید برای نظارت بر وجود انحنای بری در مواد توپولوژیکی و اثرات ابرشبکه در مواد دو بعدی پیچ خورده عمل می‌کنند. در این چشم‌انداز ما یک نمای کلی از حوزه نوظهور نانوفوتونیک کوانتومی مواد دو بعدی ارائه می‌کنیم و چشم‌انداز آینده را در مورد چشم‌انداز پدیده‌های نوظهور اساسی و فناوری‌های کوانتومی نوظهور مانند سنجش کوانتومی، منابع تک‌فوتون و دستکاری تابشگرهای کوانتومی ارائه می‌کنیم. ما به چهار مفهوم اصلی می‌پردازیم: (۱) سنجش کوانتومی دارای پلاریتون‌ها برای کاوش ابررسانایی و کشف رفتارهای هیدرودینامیکی حمل و نقل الکترونیک جدید (۲) فناوری‌های کوانتومی که تولید تک‌فوتون، دستکاری و تشخیص را با



استفاده از مواد دوبعدی مهار می‌کنند (۳) مهندسی پلاریتون با مواد کوانتومی با زاویه پیش و کنترل ترتیب انباشته شدن در ساختارهای ناهمسان و اندروالس و (۴) برهمکنش‌های شدید نور- ماده که توسط محصور شدن شدید نور در سطح اتمی توسط مواد دوبعدی فعال می‌شوند که ابزارهای جدیدی برای دستکاری میدان‌های نور در مقیاس نانو فراهم می‌کنند. (به عنوان مثال شیمی کوانتومی).

۱۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله ما نانوفوتونیک کوانتومی، اپتیک کوانتومی، محاسبات کوانتومی و کارهای تحقیقاتی که چشم اندازه‌های آینده و پیشرفت‌های اخیر را تا به حال انجام داده‌اند، شرح دادیم. در مخابرات کوانتومی، اطلاعاتی که باید مخابره شوند، روی فوتون‌هایی سوار می‌شوند که هم می‌توانند در فضای آزاد و هم از طریق فیبرهای نوری کم تلف ارسال شوند. محاسبات کوانتومی (QC) یک پارادایم نوظهور با پتانسیل ارائه مزیت محاسباتی قابل توجهی نسبت به محاسبات کلاسیک معمولی با بهره‌برداری از اصول مکانیکی کوانتومی مانند در هم تنیدگی و برهم‌نهی است. پیش‌بینی می‌شود که این مزیت محاسباتی QC به حل بسیاری از مسائل پیچیده و محاسباتی حل‌نشده در چندین حوزه کاربردی مانند طراحی دارو، علم داده، انرژی پاک، مالی، توسعه شیمیایی صنعتی، ارتباطات ایمن و شیمی کوانتومی کمک کند. اپتیک کوانتومی شاخه‌ای از فیزیک است که رفتار نور را به عنوان یک موجود کوانتومی با رفتاری کاملاً کوانتومی بررسی می‌کند. اپتیک کوانتومی در واقع به مطالعه جنبه‌هایی از نور در حوزه مکانیک کوانتوم می‌پردازد. تئوری‌های پیشرفته اپتیک کوانتومی از اپتیک کلاسیک سرچشمه می‌گیرند. لیزر یکی از پرکاربردترین روش‌های اپتیک کوانتومی است. نور منتشر شده از این دستگاه‌ها در یک حالت منسجم قرار دارد که یعنی نور بسیار شبیه به یک موج سینوسی کلاسیک است. در این حالت منسجم، عملکرد موج مکانیکی و در نتیجه عدم قطعیت مکانیکی کوانتومی به طور مساوی توزیع می‌شود. بنابراین نور ناشی از لیزر به شدت توصیه می‌شود و عموماً به حالت یکسان انرژی (همان فرکانس و طول موج) محدود می‌شود.



- Blais, A., Girvin, S. M., & Oliver, W. D. (2020). Quantum information processing and quantum optics with circuit quantum electrodynamics. *Nature Physics*, 16(3), 247-256.
- Braunstein, S. L., Mann, A., & Revzen, M. (1992). Maximal violation of Bell inequalities for mixed states. *Physical Review Letters*, 68(22), 3259.
- Chen, Z., & Segev, M. (2021). Highlighting photonics: looking into the next decade. *ELight*, 1(1), 2.
- de Abajo, F. J. G. *Nanophotonics in Two-dimensional Materials*.
- Folk, J., Potok, R., Marcus, C., & Umansky, V. (2003). A gate-controlled bidirectional spin filter using quantum coherence. *Science*, 299(5607), 679-682.
- Horiuchi, N. (2013). Versatile nanophotonics. *Nature Photonics*, 7(6), 432-432.
- Huang, L., Xu, L., Woolley, M., & Miroshnichenko, A. E. (2020). Trends in quantum nanophotonics. *Advanced Quantum Technologies*, 3(4), 1900126.
- Jang, J., Jeong, M., & Rho, J. (2023). Quantum nanophotonics. In (Vol. 12, pp. 335-337): De Gruyter.
- Kim, J., Benson, O., Kan, H., & Yamamoto, Y. (1999). A single-photon turnstile device. *Nature*, 397(6719), 500-503.
- Kim, M., Park, N., Lee, H. J., & Rho, J. (2022). The latest trends in nanophotonics. In (Vol. 11, pp. 2389-2392): De Gruyter.
- Loss, D., & DiVincenzo, D. P. (1998). Quantum computation with quantum dots. *Physical Review A*, 57(1), 120.
- Myers, R., Ku, K., Li, X., Samarth, N., & Awschalom, D. (2005). Optoelectronic control of spin dynamics at near-terahertz frequencies in magnetically doped quantum wells. *Physical Review B*, 72(4), 041302.
- Savaresi, M., Martínez-Suárez, A., Tedeschi, D., Ronco, G., Hierro-Rodríguez, A., McVitie, S., Stroj, S., Aberl, J., Brehm, M., & García-Suárez, V. M. (2023). Strain-induced dynamic control over the population of quantum emitters in two-dimensional materials. arXiv preprint arXiv:2301.10273.
- Schaub, J., Li, R., Schow, C., Campbell, J., Neudeck, G., & Denton, J. (1999). Resonant-cavity-enhanced high-speed Si photodiode grown by epitaxial lateral overgrowth. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(12), 1647-1649.
- Scully, M. O., & Zubairy, M. S. (1999). Quantum optics. In: American Association of Physics Teachers.
- So, S., Park, N., Lee, H. J., & Rho, J. (2020). New trends in nanophotonics. In (Vol. 9, pp. 983-985): De Gruyter.
- Vrijen, R., & Yablonovitch, E. (2001). A spin-coherent semiconductor photo-detector for quantum communication. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 10(4), 569-575.
- Wu, W. (2023). A quantum circuit architecture based on the integration of nanophotonic devices and two-dimensional molecular network. *Quantum Technology: Driving Commercialisation of an Enabling Science III*.
- You, J.-Q., & Nori, F. (2011). Atomic physics and quantum optics using superconducting circuits. *Nature*, 474(7353), 589-597.

Quantum nanophotonics and quantum computing: prospects, challenges, proposals

Reza Ebrahimi¹

Abstract

In this article, the link between nanophotonics and the science of quantum technologies is considered. Such an interdisciplinary approach may serve as a starting point for the development of breakthrough technologies. Several new directions, including strong light-matter coupling, topological photonics, metasurfaces and photon sources, and suspended optomechanics have been addressed in quantum nanophotonics. We hope that this review will foster an enhanced interaction between the nanophotonics and quantum science communities. Such synergy leads to the realization of new communication, sensory and information processing systems. In this article, explanations are given about quantum computing and the applications of computing in various fields, quantum optics, quantum telecommunications, and after introducing Rydberg atoms and their properties, the progress made in the construction of Rydberg quantum computers in the atomic network is reviewed. Then, the application of Rydberg atoms in quantum optics and its use in the production of a single-photon source and a two-photon gate are presented. In the last part of the article, suggestions are also given.

Keywords: nanophotonics, quantum technologies, quantum computing, quantum optics, quantum telecommunications.

A review of supercapacitor modeling

Sayed Mohammad Sajjadi^{1*}, Mohammad Montazeri¹

Abstract

Energy storage systems play a prominent role in diversifying the energy portfolio. Supercapacitors can be mentioned among the newest generations of energy storage. Supercapacitors are gaining a special place in the storage discussion due to their high energy density, good efficiency and long life without the need for special maintenance. These things have caused supercapacitors to become an attractive subject for research and study by researchers. This review article has examined the studies that have been done for the modeling of supercapacitors in order to better understand the behavior and utilization of supercapacitors in different conditions. Due to the great interest in modeling these systems, many articles have been published in this field in which modeling techniques are classified, explained and compared. Also, the strengths and weaknesses of each model are examined and the experimental techniques used to measure the properties of the model are described. Finally, the analyzes show the expansion of the supercapacitors market at present.

Keywords: Supercapacitor, storage, modeling, energy.



Abstract



¹ Master's student in Renewable Energy Engineering, Faculty of Modern Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran



Introduction and review of Transient Recovery Voltages and its case simulation in EMTP_RV software

Abdallah Halimi¹

Abstract

Transient recovery voltage (TRV) is one of the characteristics inherent in the power system, and its maximum and increasing speed are important factors that affect the switching process in the power system. When a power system has characteristics of TRV, it means that the voltage is higher than the tolerance range of the switches and the circuit breakers may not interrupt the fault current. In this article, the types of overvoltages in the power system have been investigated first. In the following, overvoltages caused by switching (an important phenomenon in the power network) are introduced. The importance of investigating this issue is the effect of these overvoltages during the operation of power switches, which are affected by the existence of different structures, the occurrence of different errors with different waveforms and structures due to the complexity of power networks. The presence of these different waveforms will have a direct effect on the performance of the power switches, which may not be able to withstand these stresses and the circuit may fail. On the other hand, the failed operation of the keys in error conditions will have the possibility of causing damage to the network during critical conditions. In the continuation of this research, in order to observe the stresses resulting from keying, case simulation has been done in EMTP_RV transient mode software.

Keywords: recovery overvoltage, switch, peak voltage, RRRV.

¹ Master's student of power systems at K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Review of Afghanistan's Renewable Energy Sector: Prospects and Challenges

Mohammad Faisal Kashifi, Prof. Dr. Ing. Martin Garbrecht

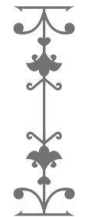
Abstract

Energy availability is critical not just for economic progress, but also for any attempt to enhance a country's health and social welfare. Afghanistan's energy industry is in disarray as a result of many years of conflict and neglect. Despite foreign organizations' assistance and recent energy regulations, Afghanistan lacks widespread access to power. Furthermore, the electricity supply is distributed irregularly in the dwellings. There is an increasing imbalance between demand and supply, and current demand forecasts do not reflect reality due to slowed economic development. The capacity of Afghanistan's power industry to become self-sufficient in electricity generation would be critical to its sustainability and security. Thus, the goal of this research is to review Afghanistan's present energy situation and to identify energy prospects for self-sufficiency as well as problems in many parts of energy sources. Afghanistan can develop its indigenous hydrocarbon and renewable energy resources to fulfill energy demand. Afghanistan can meet its primary energy needs by increasing its domestic energy potential from natural resources. Furthermore, with the proper and planned execution of renewable energy policies, energy efficiency objectives, and strategies, Afghanistan may achieve energy self-sufficiency goals while also advancing socioeconomic growth.

Keywords: Electricity, Energy, Renewable Energy, Afghanistan.



Abstract



Improvement of divergent clay soil using waste materials: fly ash, rice husk ash and lime

Morteza Mobalegh¹

Abstract

With the industrialization of production, industrial by-products are being produced on a large scale; As a result, they have created risks for the environment. The direct disposal of these waste materials such as fly ash, stone powder, construction material waste and agricultural waste has created potential threats to the ecosystem and the existence of urgent solutions is felt in this field. One of the appropriate solutions is to use these waste materials as infrastructure improvers or to add them to cement stabilizing mixtures. In the present study, compaction and resistance properties of soil improved with various waste materials such as lime, fly ash and rice husk ash have been investigated. The results of this research state that this waste material has significantly improved the engineering properties of the soil.

Keywords: Soil improvement, waste industrial materials, maximum dry weight, Atterberg range, unlimited compressive strength.

¹ Master's degree in geotechnical engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran

An overview of the electrical methods of maximum power point tracking in solar cells

Mohammad Montazeri¹

Abstract

One of the most important cases in using solar cells is tracking the maximum power point of the PV output, which is done in order to increase the efficiency of these systems. In fact, a system is in the highest efficiency when it is at the maximum point of its output. Until now, the operation methods for tracking the maximum power point have been obtained. Electronic methods have the advantage of lower maintenance and repair costs and have been studied more in recent years. In this study, the different types of electronic methods used for tracking the power of solar cells have been introduced, the advantages and disadvantages of each have been mentioned and compared.

Keywords: Electricity, Solar cell, Photovoltaic, Maximum power tracking, Electronic methods.



Abstract



¹ Master's student of Renewable Energy Engineering, Faculty of Modern Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

