

---

## Comparing the reliability level of high-capacity transmission systems: HVDC-VSC, HVDC-LCC and EHVAC

Mostafa Kazemi<sup>1</sup>, Assistant professor, Javad Nezafat Namini<sup>2</sup>, Researcher

1- Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran.

Email: m.kazemi@shr.ui.ac.ir (Corresponding author)

2- Power Systems Operation and Planning Research Department, Niroo Research Institute.

Email: jnezafat@nri.ac.ir

### Abstract:

Implementation of high-capacity power transmission systems in power systems is a growing trend. Among these systems, HVDC and EHVAC power transmission systems are the most popular because of their capabilities and their low investment costs over the long distances. Despite of the mentioned advantages, the reliability of the high-capacity power transmission has been a major concern for power system operators. In terms of reliability, the occurrence of an error in a high-capacity power transmission system (such as HVDCs) causes a large loss of capacity in the transmission network, which can have a major effect on the performance of this system. Therefore, reliability assessment of high-capacity power transmission systems is necessary. In this paper, the reliability level of three modern technologies (HVDC-VSC, HVDC-LCC and EHVAC in different structures) is compared. By comparing these systems, the most proper system for high-capacity power transmission from the reliability viewpoint can be selected.

**Keywords:** Reliability assessment, HVDC-VSC systems, HVDC-LCC systems, EHVAC systems, FMEA

Submit date: 2021/09/20

Accepted date: 2022/04/18

Corresponding author Name: Mostafa Kazemi

Corresponding author address: University of Isfahan, Shahreza Campus, Iran

## مقایسه قابلیت اطمینان انواع سیستم‌های انتقال توان با ظرفیت بالا AC و DC

نوع مطالعه: پژوهشی

مصطفی کاظمی<sup>۱</sup> استادیار، جواد نظافت نمینی<sup>۲</sup> کارشناس پژوهشی  
۱- گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران  
m.kazemi@shr.ui.ac.ir

۲- گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران  
jnezafat@nri.ac.ir

**چکیده:** امروزه رشد صنعت و بار به معنی افزایش نیاز شتابدار به انرژی الکتریکی بوده که برای تامین آن باید بسترهای انتقال توان مهیا باشد. به همین دلیل، استفاده از سیستم‌های انتقال توان با ظرفیت بالا یکی از مواردیست که امروزه در ساختارهای برق دنیا رشد چشمگیری داشته است. در میان این سیستم‌ها، سیستم‌های انتقال توان<sup>۱</sup> HVDC و<sup>۲</sup> EHVAC به دلیل قابلیت‌هایی که دارند، از محبوبیت دوچندانی برخوردار هستند. سیستم‌هایی که بر طبق مطالعات انجام شده برای فواصل طولانی مقرون به صرفه می‌باشد، نگرانی‌های زیادی را برای بهره‌برداران سیستم قدرت ایجاد کرده است. از منظر قابلیت اطمینان، رخداد خطا در سیستم انتقال توان با ظرفیت بالا (مانند HVDCها) موجب از دست رفتن ظرفیت زیادی در شبکه‌ی انتقال شده که می‌تواند بر عملکرد این سیستم تأثیر مخرب داشته باشد. با این توصیفات نیاز است که عملکرد سیستم‌های انتقال توان با ظرفیت بالا از منظر قابلیت اطمینان سنجیده شود. در این مقاله به مقایسه‌ی قابلیت اطمینان سه تکنولوژی روز دنیا (HVDC-VSC<sup>۲</sup> و HVDC-LCC<sup>۴</sup> و HVDC-EHVAC در ساختارهای مختلف) به کمک روش شمارش حالات خطا پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا مدل خطاها به کمک مدل مارکوف استخراج شده و نرخ معادل رخداد خطا و احتمال رخداد خطا به دست آمده و از این داده‌ها برای اعمال خطا گذاری روی همه المان‌ها استفاده گردیده است. به کمک مقایسه‌ی این سیستم‌ها می‌توان سیستم مناسب جهت انتقال توان با ظرفیت بالا را انتخاب نمود. با انجام بررسی فوق نشان داده خواهد شد که از منظر نرخ خروج و احتمال خروج، تکنولوژی EHVAC، از منظر مدت زمان قطعی نیز تکنولوژی VSC دارای عملکرد مناسب‌تری است. همچنین تکنولوژی LCC رفتار میانه‌ای در هر یک از فاکتورهای ذکر شده دارد و نمی‌توان عنوان کرد که یک تکنولوژی به طور قطع از تکنولوژی دیگر بهتر است.

**واژه‌های کلیدی:** قابلیت اطمینان، سیستم‌های HVDC-VSC، سیستم‌های HVDC-LCC، سیستم‌های EHVAC، روش شمارش حالات خطا.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: مصطفی کاظمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اصفهان- شهرضا- جاده دهقان- جنب اداره هواشناسی- مرکز آموزش عالی شهرضا- گروه مهندسی برق

## ۱- مقدمه

با رشد تکنولوژی و افزایش نیاز به انرژی الکتریکی، مبحث تقویت مستحکم‌تر شبکه از طریق ایجاد کوریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا مطرح گردید. علاوه بر این، دلایلی همچون اتصال کند ترل شده به کشورهای مجاور، و نفوذ روزافزون منابع تولید تجدید پذیر با نوسانات تولیدی بالا، بر محبوبیت این سیستم‌ها اضافه کرد به نحوی که امروزه نصب و بهره‌برداری از کوریدورهای انتقالی با ظرفیت گiga واتی به امری معمول در شبکه‌های قدرت دنیا تبدیل شده است.

از منظر کلی می‌توان سیستم‌های انتقال توان با ظرفیت بالا را به دو دسته انتقال به صورت DC و AC تقسیم بندی کرد. در سیستم‌های DC که غالباً تحت عنوان HVDC<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند به کمک ادوات الکترونیک قدرت جریان به صورت مستقیم منتقل می‌شود. سیستم‌های AC خود به دو دسته EHVAC<sup>۲</sup> (ولتاژ بین ۲۳۰ تا ۸۰۰ کیلو ولت) و UHVAC (ولتاژ بالاتر از ۸۰۰ کیلو ولت) تقسیم می‌شوند. موارد ذکر شده دارای مزایا و معایب گوناگونی در مقایسه با یکدیگر و در مقایسه با سیستم‌های انتقال با ظرفیت معمول را دارند و انتخاب هر یک از این طرح‌ها جهت پیاده‌سازی در شبکه‌های قدرت مستلزم مطالعات فنی-اقتصادی بسیار زیاد خواهد بود. یکی از این مطالعات مبحث قابلیت اطمینان این سیستم‌ها است که در این مقاله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

از منظر تکنولوژی به کار رفته در کانورتر HVDCها می‌توان آنها را به دو دسته عمده تقسیم نمود. HVDCهای با تکنولوژی تریستوری یا HVDC-LCC<sup>۳</sup> و HVDCهای با تکنولوژی IGBT یا HVDC-VSC<sup>۴</sup>. نوع تکنولوژی کانورتر بر ساختار داخلی سیستم HVDC تاثیرگذار بوده و همین امر می‌تواند بر قابلیت اطمینان هر ساختار موثر باشد. علاوه بر این، تکنولوژی‌های متفاوت در HVDCها، دارای نرخ خطای مختلفی بوده که همین امر تفاوت در قابلیت اطمینان هر تکنولوژی ایجاد می‌کند. در این مقاله، ساختارهای متفاوت با تکنولوژی‌های تریستوری و IGBT مد نظر قرار گرفته و قابلیت اطمینان هر سیستم سنجیده می‌شود. به همین ترتیب ساختار EHVAC به عنوان دیگر گزینه انتقال توان با ظرفیت بالا در این مطالعه گنجانده می‌شود تا بتوان مقایسه‌ی مناسبی از منظر قابلیت اطمینان بین ساختارهای روز دنیا انجام داد.

روش‌های متعددی در محاسبه‌ی قابلیت اطمینان سیستم‌های HVDC و EHVAC به کار گرفته شده‌اند. به طور کلی می‌توان این روش‌ها را به دو بخش تقسیم کرد: (۱) روش‌های تحلیلی<sup>۵</sup> و (۲) روش‌های شبیه‌سازی محور<sup>۶</sup>. در روش‌های تحلیلی، برای محاسبه‌ی قابلیت اطمینان از مدل‌های ریاضیاتی به منظور توصیف سیستم تحت مطالعه استفاده می‌شوند. این روش خود به دو دسته روش فرکانس-زمان<sup>۷</sup> و روش شمارش حالات خطا<sup>۸</sup> تقسیم می‌شود. در روش فرکانس-زمان از مدل‌سازی مارکوف فضا گسسته برای مدل کردن روند خطا استفاده می‌شود. در (Roy Billinton & Prasad, 1971)، به محاسبه‌ی

قابلیت اطمینان پل‌های سوپچی به کمک روش فرکانس-زمان پرداخته شده تا در ادامه این روند را به سیستم HVDC تعمیم دهد (S. Kuruganty, 1994). در (P. Kuruganty & Woodford, 1988) نیز از همین روش برای محاسبه‌ی قابلیت اطمینان HVDCهای با ساختار ۱۲-پالسه و ۱۸-پالسه پرداخته شده است. روش تحلیلی فرکانس-زمان دارای پیچیدگی‌های ریاضی نسبتاً زیادی خواهد بود و زمانی که تعداد المان‌های سیستم افزایش می‌یابد مدل‌سازی مارکوف پیچیده خواهد شد. در (Ramezanzadeh, Mirzaie, & Shahabi, 2021)، از روش تحلیلی برای محاسبه‌ی قابلیت اطمینان سیستم‌های VSC استفاده شده است. همچنین در (Benato, Chiarelli, & Sessa, 2021)، از ترکیب روش ماتریسی و مدل مارکوف برای محاسبه‌ی قابلیت اطمینان سیستم‌های VSC و LCC استفاده گردیده است.

در روش شمارش حالات خطا به منظور رفع مشکلات ذکر شده، حالات خطای سیستم در نظر گرفته شده و تاثیر هر حالت بر خطای سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در این روش از روندهای مختلفی برای کاهش سناریو خطا مانند خطا گذاری تا N-2 و ... استفاده می‌شود. در (Dialynas & Koskolos, 1994)، هدف توسعه‌ی سیستم HVDC با دیدگاه قابلیت اطمینان بوده است. این کار یک پروژه عملی بوده که در ناحیه‌ی Manitoba, Canada انجام شده است و از روش شمارش حالات خطا جهت بررسی قابلیت اطمینان طرح‌های پیشنهادی استفاده گردیده است. از دیگر منابعی که در آنها از این روش جهت محاسبه‌ی قابلیت اطمینان سیستم‌های HVDC استفاده شده است می‌توان به (S. Kuruganty, 1995)، (R Billinton, Zadkhash et al., Fotuhi-Firuzabad, & Faried, 2002)، (Xie, Hu, & Singh, 2015)، (Roy Billinton, Saleh, 2010)، (Aboreshaid, & Mahmud Fotuhi-Firuzabad, 1997)، (Billinton, S Aboreshaid, & M Fotuhi-Firuzabad, 1997)، (MacIver, Bell, & Nedić, 2015) و (R Billinton & Sankarakrishnan, 1994) اشاره نمود.

این دسته از روش‌های محاسبه‌ی قابلیت اطمینان بر خلاف دسته‌ی قبلی (روش‌های تحلیلی) به کمک برقراری یک محیط شبیه‌سازی به محاسبه‌ی قابلیت اطمینان می‌پردازند. تفاوت این روش با روش تحلیلی در این است که، در روش‌های تحلیلی یک مدل ریاضی برای سیستم ارائه می‌شود و به کمک ساده‌سازی‌های ریاضیاتی، اندیس‌های قابلیت اطمینان محاسبه خواهند شد. در حالی که در روش‌های شبیه‌سازی محور، رفتار با عدم قطعیت المان‌های سیستم به صورت واقعی شبیه‌سازی شده و عملکرد آن در بازه‌ی مناسبی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به عبارت بهتر، در روش‌های شبیه‌سازی محور، چگونگی خروج المان‌ها نه بر اساس مدل‌های ریاضیاتی بلکه بر اساس رفتار زمان محور آنها سناریو بندی خواهد شد. در (Dialynas, Koskolos, & Agoris, 1996)، به مقایسه‌ی قابلیت اطمینان طرح‌های مختلف HVDC جهت

سازی‌ها ارائه شده و مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در نهایت بخش نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

## ۲- معرفی سیستم‌های HVDC

به منظور انجام آنالیز قابلیت اطمینان، دو دسته داده اساسی مورد نیاز خواهد بود. (۱) توپولوژی سیستم و نحوه‌ی اتصال ادوات به یکدیگر، (۲) میزان کاهش ظرفیت سیستم در اثر خروج ادوات مختلف. در این بخش به تشریح این دست از داده‌ها پرداخته می‌شود. در مورد دسته اول داده‌ها یعنی توپولوژی سیستم و نحوه‌ی اتصال ادوات به یکدیگر، در این مقاله، ۴ توپولوژی از HVDC-VSC، ۴ توپولوژی از HVDC-LCC و ۳ توپولوژی از EHVAC ها مورد آنالیز قابلیت اطمینان قرار می‌گیرند. لیست ساختارهای مدنظر این مقاله به صورت زیر است. ساختارهای HVDC-LCC که در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند:

- ساختار ۱: اتصال تک قطبی ۶ پالسه LCC
  - ساختار ۲: اتصال تک قطبی ۱۲ پالسه LCC
  - ساختار ۳: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه LCC با پکیج ۶ پالسه
  - ساختار ۴: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه LCC با پکیج ۱۲ پالسه
- ساختارهای HVDC-VSC که در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند:
- ساختار ۵: اتصال تک قطبی ۶ پالسه VSC
  - ساختار ۶: اتصال تک قطبی ۱۲ پالسه VSC
  - ساختار ۷: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه VSC با پکیج ۶ پالسه
  - ساختار ۸: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه VSC با پکیج ۱۲ پالسه
- ساختارهای EHVAC که در شکل (۳) نمایش داده شده‌اند:
- ساختار ۹: اتصال تک مداره سیستم EHVAC
  - ساختار ۱۰: اتصال تک مداره، دو ترانسه سیستم EHVAC
  - ساختار ۱۱: اتصال دو مداره سیستم EHVAC

لازم به ذکر است که تعدادی از این طرح‌ها به عنوان طرح نهایی عملیاتی نبوده و صرفاً به عنوان فاز اول برای ساخت سیستم‌های انتقال توان با ظرفیت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی به هر حال نیاز است که قابلیت اطمینان این سیستم‌ها هر چند که سیستم‌های ابتدایی در فازهای توسعه هستند در دسترس باشد.

در مورد دسته‌ی بعدی داده‌ها که مرتبط با میزان کاهش ظرفیت انتقال در اثر خروج المان‌های سیستم است، بعضاً نیاز به شبیه‌سازی دقیق سیستم‌ها بعد از طراحی کامل آنها خواهد بود. به عنوان مثال، با محاسبات سرانگشتی و تقریبی نمی‌توان مشخص نمود در اثر خروج یک فیلتر AC چه مقدار ظرفیت انتقال HVDC افت خواهد کرد و نیاز است که این عدد با استفاده از شبیه‌سازی‌ها مختلف معین شود. از آنجا که طراحی سیستم HVDC در ایران انجام نشده و ساختار و میزان ریتینگ ادوات هنوز به دقت تعیین نشده‌اند، در این بخش دست به دامن نتایج منابع معتبر شده‌ایم و با استناد به این منابع سعی بر تعیین نحوه‌ی اثر گذاری خروج المان‌های HVDC بر ظرفیت انتقال را خواهیم داشت.

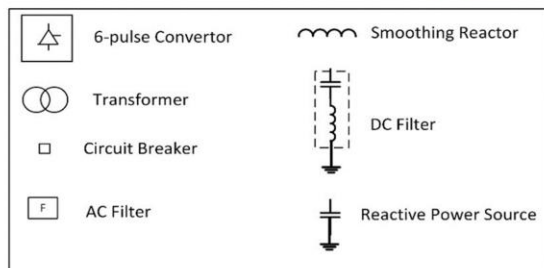
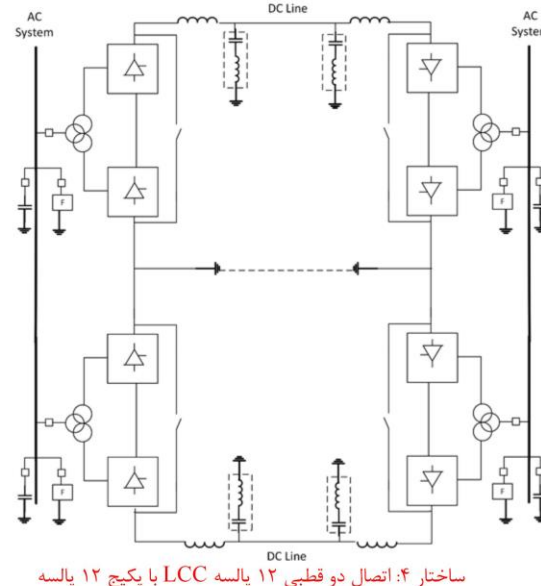
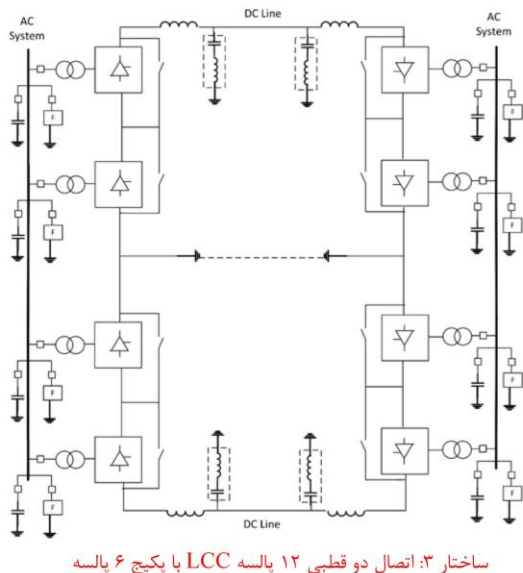
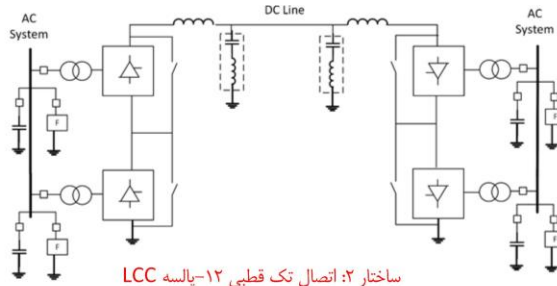
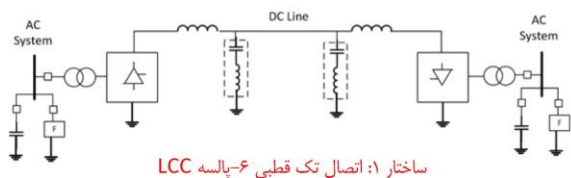
انتقال توان بادی تولید شده توسط نیروگاه‌های مستقر در دریا پرداخته شده است. در این مطالعه از روش شبیه‌سازی محور استفاده گردیده است. از دیگر منابعی که در آنها از این روش جهت محاسبه‌ی قابلیت اطمینان سیستم‌های HVDC استفاده شده است می‌توان به (Li, Choudhury, Gillespie, & Jue, 2007), (Wang, Wang, & Li, 2009) و (Calderbank, Haddock, & Mazur, 1992) اشاره نمود. در مقام مقایسه‌ی محاسبه‌ی قابلیت اطمینان با روش‌های تحلیلی و روش‌های شبیه‌سازی محور می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. روش‌های تحلیلی جواب دقیقی از حل مسئله به دست خواهد داد چرا که از مدل‌های ریاضیاتی استفاده نموده و تکیه بر روندهای تکراری مانند آنچه در روش شبیه‌سازی محور مشاهده شد، ندارند. مدت زمان حل مسئله در روش‌های تحلیلی بسیار کمتر از مدت زمان حل مسئله در روش‌های شبیه‌سازی محور است. به عبارت دیگر روش‌های شبیه‌سازی محور نیازمند مدل کردن تعداد بسیار زیادی سناریو هستند تا از جواب به دست آمده اطمینان نسبی مناسبی حاصل شود در حالی که روش‌های تحلیلی با چنین مشکلاتی مواجه نیستند. جواب حاصل از روش‌های تحلیلی همواره و به ازای هر بار هر مسئله یکی خواهد بود ولی در روش‌های شبیه‌سازی محور، این امر صدق نمی‌کند. در روش‌های شبیه‌سازی محور تکیه بر سناریوهای ایجاد شده بوده و همین امر موجب می‌شود که با هر بار اجرای شبیه‌سازی سناریوهای تولید شده متفاوت باشند و جوابی هر چند نزدیک ولی غیر یکسان حاصل شود. با جمع بندی کارهای قبلی می‌توان متوجه شد که اکثر مقالات ارائه شده در زمینه محاسبه قابلیت اطمینان سیستم‌های HVDC متمرکز بر سیستم‌های HVDC موجود یا نوع خاصی از این سیستم‌ها بوده‌اند و کمبود مطالعه‌ای با بستر مقایسه در این زمینه احساس می‌شود. به عبارت بهتر در امور برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت داشتن دیدگاهی جامع و کلی که به مقایسه سیستم‌ها به صورت عام پرداخته باشد می‌تواند بسیار سودمند باشد و دیدگاه مناسبی برای برنامه‌ریزی ایجاد کند. با این توصیفات، در این مقاله به بررسی قابلیت اطمینان سیستم‌های انتقال توان با ظرفیت بالا (HVDC و EHVAC) پرداخته شده و از روش تحلیلی شمارش حالات خطا برای این منظور استفاده شده است. بدین منظور ابتدا مدل خطاها به کمک مدل مارکوف استخراج شده و نرخ معادل رخداد خطا و احتمال رخداد خطا به دست آمده و از این داده‌ها برای اعمال خطا گذاری روی همان‌ها استفاده گردیده است. در این مقاله هر دو تکنولوژی HVDC-VSC و HVDC-LCC در کنار سیستم‌های EHVAC چند مداره، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند تا از میان آنها بتوان قابل اطمینان‌ترین سیستم را انتخاب نمود.

ساختار این مقاله بدین صورت است: در بخش دوم به معرفی ساختارهای سیستم‌های انتقال توان با ظرفیت بالا پرداخته شده و در بخش سوم به بررسی روش محاسبه قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود. در بخش چهارم نیز خروجی قابلیت اطمینان بدست آمده از شبیه‌

المان‌های دسته‌ی اول که تعیین ظرفیت کاهش یافته در اثر خروج آنها سر راست و ساده است عبارتند از:

- گروه کانورتی
  - کانورتر

از این منظر می‌توان المان‌ها را به دو دسته تقسیم نمود. در دسته اول از المان‌ها محاسبه‌ی ظرفیت کاهش یافته امری سر راست بوده و به واسطه‌ی تقارن سیستم و یا توپولوژی آن قابل تشخیص است. در حالی که در مورد دسته‌ی دوم از المان‌ها، تاثیر خروج آنها را نمی‌توان مستقیماً و به سادگی سنجید و نیاز به انجام شبیه‌سازی بر سیستم طراحی شده خواهد بود.

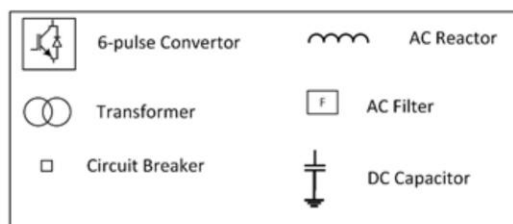
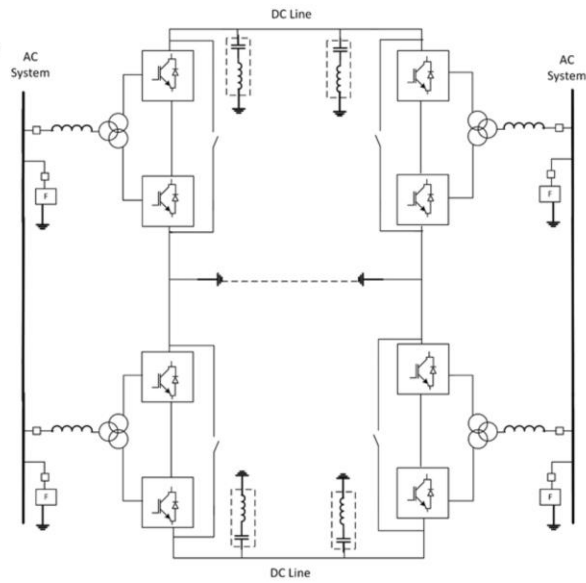
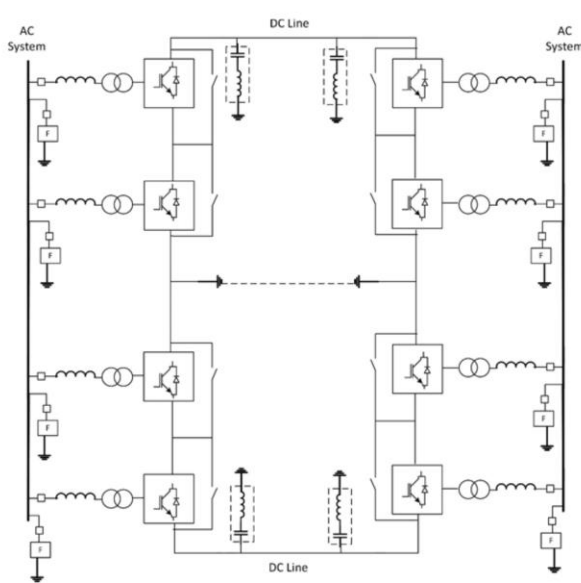
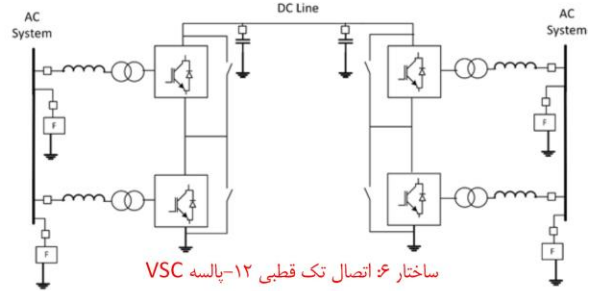
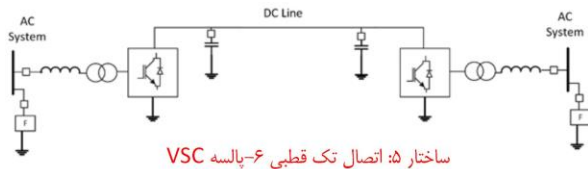


شکل (۱): ساختارهای HVDC-LCC مورد مطالعه در مقاله

- ترانسفورماتور تغذیه کننده کانورتر در HVDC ها یا
- ترانسفورماتور تغذیه کننده در EHVAC ها
- راکتور AC در ساختارهای VSC
- گروه انتقال DC
  - خط انتقال DC و AC به ترتیب در HVDC و EHVAC
- راکتور صاف کننده در ساختار LCC
- فیلترهای DC در ساختار LCC
- خازن DC در ساختار VSC
- المان‌های دسته‌ی دوم نیز عبارتند از:
  - فیلترهای AC و منابع تامین کننده‌ی توان راکتیو

رند استخراج جدول فوق ساده و واضح خواهد بود. به عنوان مثال در ساختار ۳ که مرتبط با یک ساختار دو قطبی با پکیج ۶ پالسه در نظر گرفته شده است، در اثر خروج یک کانورتر، کانورتر مذکور اتصال کوتاه شده و بدین ترتیب در هر پل ۳ کانورتر دیگر به کار می‌پردازند. بدین ترتیب، ولتاژ قطب به قطب سیستم HVDC به 0.75 مقدار نامی کاهش یافته و ظرفیت انتقال به میزان 0.25 کاهش می‌یابد. در همین

در ادامه به بررسی تاثیر این دو دسته خواهیم پرداخت. خروج هر یک از ادوات دسته اول از المان‌ها قابل پوشش با عناصر دیگر نبوده و منجر به کاهش الزامی ظرفیت انتقال خواهد شد. با این منطق می‌توان جدول (۱) را برای تاثیر خروج این ادوات بر ظرفیت انتقال سیستم HVDC و EHVAC بیان نمود. این جدول به تحلیل خروج هر یک از المان‌های فوق، در ساختارهای معرفی شده پرداخته است.



شکل (۲): ساختارهای HVDC-VSC مورد مطالعه در مقاله

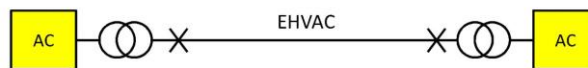
از آنجایی که این فیلترها دارای ترکیب سلف و خازنی هستند، این ادوات علاوه بر حذف هارمونیک‌های مزاحم، به تامین توان راکتیو مورد نیاز کانورترها نیز خواهند پرداخت. به عبارت دیگر خروج فیلترهای AC علاوه بر اینکه بر کیفیت توان شبکه‌ی AC تاثیر خواهند گذاشت، موجب کمبود توان راکتیو مورد نیاز کانورترها شده و بر عملکرد آنها نیز تاثیرگذار خواهند بود. به عبارت بهتر، در هنگام خروج فیلترهای AC، علاوه بر افت توان راکتیو که موجب کاهش ظرفیت انتقال سیستم HVDC خواهد شد، بخشی از ظرفیت انتقال به دلیل آلودگی هارمونیکی سیستم AC نیز از دست خواهد رفت.

محاسبه‌ی دقیق میزان افت توان انتقالی در اثر خروج فیلترهای AC و بانک‌های خازنی نیازمند انجام شبیه‌سازی‌های نسبتاً پیچیده و مقایسه‌ی نتایج با سطوح هارمونیکی تعریف شده در استانداردهای شبکه خواهد بود. از آنجایی که نمونه‌ی عملی یا طراحی شده‌ی کامل از یک سیستم HVDC در ایران موجود نیست، نمی‌توان روند شبیه‌سازی را در این مورد پیاده نمود. در این مقاله بدون اینکه از کلیات مطلب کاسته شود و به منظور ساده‌سازی مسئله، از مقادیر استفاده شده در نمونه‌های عملی در این قسمت استفاده می‌شود.

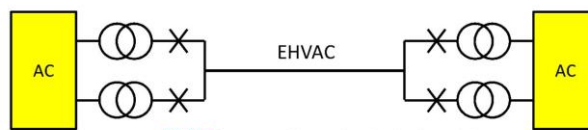
به کمک مراجع (Dialynas & Koskolos, 1994)، (Roy & Billinton et al., 2002) و (Billinton & Prasad, 1971) می‌توان به جمع‌بندی جدول (۲) دست یافت. بدین ترتیب، با مبنا قرار دادن حالت بدبینانه میزان کاهش ظرفیت انتقال را برای ساختارهای معرفی شده در این مقاله نسبت به خروج فیلترهای AC و منابع تولید راکتیو تعمیم می‌دهیم. نتایج این امر در جدول (۲) آمده است. لازم به ذکر است که، از آنجا که در این مقاله خطاگذاری تا مرتبه‌ی دوم لحاظ خواهد شد (N-2)، در ساخت جدول (۲) صرفاً خروج‌های تا مرتبه‌ی دوم لحاظ شده و خروج‌های با مرتبه‌ی بالاتر به واسطه‌ی احتمال ناچیز رخدادشان، نادیده در نظر گرفته شده است.

**جدول (۲): ظرفیت انتقال کاهش یافته در اثر خروج فیلترهای AC و منابع توان راکتیو در ساختارهای مختلف که در این مقاله استفاده خواهند شد.**

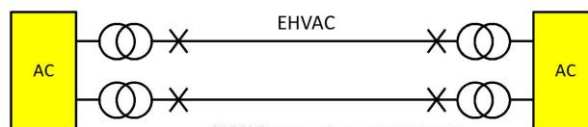
المان خطا	F (pu)	XC (pu)	F+F (pu)	XC+XC (pu)	F+XC (pu)
ساختار ۱ (LCC)	۱	۰.۳۷	---	---	۱
ساختار ۲ (LCC)	۰.۲	۰.۲	۱	۰.۳۷	۰.۲
ساختار ۳ (LCC)	۰.۱	۰.۱	۰.۲	۰.۲	۰.۱
ساختار ۴ (LCC)	۰.۲	۰.۲	۱	۰.۳۷	۰.۲
ساختار ۵ (VSC)	۱	---	---	---	---
ساختار ۶ (VSC)	۰.۲	---	۱	---	---
ساختار ۷ (VSC)	۰.۱	---	۰.۲	---	---
ساختار ۸ (VSC)	۰.۲	---	۱	---	---
ساختار ۹ (EHVAC)	---	---	---	---	---
ساختار ۱۰ (EHVAC)	---	---	---	---	---
ساختار ۱۱ (EHVAC)	---	---	---	---	---



ساختار ۹: اتصال تک مداره سیستم EHVAC



ساختار ۱۰: اتصال تک مداره دو ترانسه سیستم EHVAC



ساختار ۱۱: اتصال دو مداره سیستم EHVAC

شکل (۳): ساختارهای چند مداره EHVAC مورد مطالعه در مقاله (S. Kuruganty, 1994)

ساختار در اثر از خارج شدن یک خط DC، سیستم از حالت دو قطبی خارج شده و مسیر برگشت جریان مسیر زمین خواهد بود. به عبارت بهتر، در این حالت سیستم به صورت تک قطبی کار خواهد کرد و متناظراً ظرفیت انتقال به نصف مقدار قبل کاهش خواهد یافت. در مورد بقیه‌ی ساختارها نیز با همین دست استدلال‌ها می‌توان میزان کاهش ظرفیت انتقال در اثر خروج کانورتر یا خط DC را مورد بررسی قرار داد.

در مورد المان‌های دسته دوم، همانطور که گفته شد، بررسی تاثیر ساده نبوده و نمی‌توان مانند المان‌های دسته‌ی قبل به قطعیت و وضوح مشخص نمود که چه تاثیری بر کاهش ظرفیت سیستم خواهند داشت. به عبارت بهتر، برای بررسی تاثیر خروج این المان‌ها نیاز است که سیستم به طور کامل و با جزئیات طراحی شده باشد و پس از آن به کمک شبیه‌سازی سیستم مشخص نمود که خروج هر یک از عناصر این دسته چه خرابی‌هایی در سیستم به بار می‌آورد و با چه میزان کاهش ظرفیت انتقال می‌توان این خرابی‌ها را جبران نمود. لازم به یادآوریست که EHVACها فاقد المان‌های دسته‌ی دوم هستند.

**جدول (۱): میزان کاهش ظرفیت انتقال ساختارهای یازده گانه در اثر**

**خروج کانورترها و خطوط انتقال**

المان خطا	گروه کانورتری (pu)	گروه خط انتقال (pu)
ساختار ۱ (LCC)	۱	۱
ساختار ۲ (LCC)	۰.۵	۱
ساختار ۳ (LCC)	۰.۲۵	۰.۵
ساختار ۴ (LCC)	۰.۵	۰.۵
ساختار ۵ (VSC)	۱	۱
ساختار ۶ (VSC)	۰.۵	۱
ساختار ۷ (VSC)	۰.۲۵	۰.۵
ساختار ۸ (VSC)	۰.۵	۰.۵
ساختار ۹ (EHVAC)	۱	۱
ساختار ۱۰ (EHVAC)	۰.۵	۱
ساختار ۱۱ (EHVAC)	۰.۵	۰.۵

### ۳- مدل سازی خطاها

در این بخش به حالات مختلف ترکیبی ممکن از خطا گذاری ها می-پردازیم. همانطور که قبلا ذکر شد، در روش شمارش حالات خطا، به ازای وجود  $n$  مود مختلف خطا، تعداد  $2^n$  حالت کارکردی وجود خواهد داشت. چرا که می توان برای هر مود خطا، دو حالت مختلف کارکرد نرمال و کارکرد غیر عادی را در نظر گرفت.

از طرف دیگر، بررسی تمامی این حالات نه تنها برای سیستم های بزرگ میسر نیست بلکه رخداد حالات خطا با درجه ی بالا تاثیر چندانی بر اندیس های قابلیت اطمینان نخواهد گذاشت. چرا که با افزایش تعداد رخداد های خطا، احتمال رخداد آنها به شدت کاهش یافته و همین امر موجب می شود که تاثیر آن بر اندیس های قابلیت اطمینان کم شود. یکی از معمول ترین تقریب هایی که در این زمینه در شبکه های انتقال در نظر گرفته می شود، تقریب  $N-2$  خواهد بود. در این تقریب خطا گذاری حداکثر تا مرتبه ی دوم لحاظ شده و خطاهای مرتبه بالاتر (به عنوان مثال رخداد سه خطای همزمان و ...) در نظر گرفته نخواهد شد. در این مقاله همین تقریب مبنای کار قرار گرفته و خطا گذاری صرفا تا مرتبه ی دوم ادامه خواهد یافت.

در این مقاله چهار مدل خطای اساسی به شرح زیر برای همان در نظر گرفته شده است. شرح این خطاها به صورت زیر است:

#### ■ خطای دائمی همان همراه با تعمیرات

خطای دائمی به خطایی اطلاق می شود که منجر به فعال شدن سیستم حفاظت شده و بعد از رخداد آن نیاز به تعمیرات خواهد بود تا بتوان همان مذکور را دوباره به سیستم بازگرداند. دو استراتژی مختلف می-توان برای بازگرداندن همان به حالت کارکرد نرمال در نظر گرفت. در استراتژی اول همان تعمیر می شود و در طول مدت تعمیر همان خارج از سرویس خواهد بود. استراتژی دوم به صورت زیر است.

#### ■ خطای دائمی همان همراه با استفاده از افرونه (spare)

این مدل از خطا مشابه حالت قبل بوده با این تفاوت که استراتژی تعمیر در آن وجود ندارد. در این استراتژی، همان با افرونه خود جایگزین می شود. این استراتژی معمولا برای همان هایی که مدت زمان تعمیر آنها بسیار زیاد است، در نظر گرفته می شود.

#### ■ خطای گذرای همان

این دسته از خطاها به دلیل رخداد عوامل بسیار جزئی بوده و نیازمند تعمیر نخواهد بود. به عنوان مثال مواردی مانند برخورد فازها در خطوط انتقال در شرایط جوی باد شدید از این دسته خطاها است. در این دسته از خطاها، سیستم حفاظت عمل کرده و موجب قطع کردن همان دارای خطا خواهد شد ولی زمان خاموشی بسیار جزئی و قابل صرف نظر کردن است؛ چراکه در اصل خطایی که نیازمند تعمیر با شد رخ نداده است.

#### ■ خروج تعمیرات همان

المان های سیستم قدرت مانند هر سیستمی نیازمند تعمیرات دوره ای بوده تا بتوان بدین ترتیب عملکرد و طول عمر سیستم را بهبود بخشید. تعمیرات معمولا به دو صورت آفلاین و برخط انجام می شود. در تعمیر برخط، تعمیرات بر سیستم زنده انجام شده و نیاز به قطع کردن سیستم تحت تعمیر نخواهد بود. در تعمیرات آفلاین نیاز است تا سیستم تحت تعمیر بی برق شده و تعمیرات بر روی آن انجام گردد. در این حالت سیستم تحت ریسک بیشتری در حین بهره برداری قرار خواهد گرفت.

در سیستم های تحت بحث این مقاله (HVDC و EHVAC) تعمیرات به صورتی انجام می شود که ریسک بهره برداری تا حد امکان کاهش یابد. در مورد سیستم های HVDC بدین ترتیب عمل می شود که هر بار یک قطب خارج شده و تعمیرات تمامی ادوات روی آن قطب انجام می پذیرد تا نیاز نباشد که سیستم هر بار برای تعمیر همان خاصی از مدار خارج شود. همین امر برای سیستم های EHVAC به صورت تعمیرات مداری انجام می شود. به عبارت بهتر، در EHVACها، هر بار یک مدار بی برق شده و تعمیرات همان های مربوط انجام می شود. لازم به ذکر است که مبحث تعمیرات دوره ای خود یکی از مباحث بسیار پیچیده در قابلیت اطمینان بوده و بحث خروج تعمیرات در این مقاله به سادگی و با دریافت نرخ تعمیرات دوره ای به عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته شده است. به عبارت بهتر در این مقاله، خروج تعمیرات بر اساس تعمیرات دوره ای با نرخ ثابت در نظر گرفته شده است و تعمیرات شرایط محور مد نظر نبوده است.

ترکیب موارد فوق می تواند حالات مختلف خطا گذاری را تشکیل دهد که در ادامه به تحلیل آنها می پردازیم.

### ۳-۱ خطاهای تکی

در این دسته از خطاها، یکی از مودهای غالب خطا فعال شده و بقیه در مود کارکردی سالم به فعالیت خواهند پرداخت. بر طبق دسته بندی ارائه شده در فوق می توان انواع خطاهای تکی را شامل موارد زیر دانست:

#### ■ خطای دائمی همان همراه با تعمیرات

#### ■ خطای دائمی همان همراه با استفاده از افرونه

#### ■ خطای گذرای همان

#### ■ خروج تعمیرات همان

می توان این مدل از خطاها را به صورت یک پرسه ی مارکوف فضا گسسته به صورت شکل (۴) مدل کرد. این مدل مارکوف دارای دو حالت کارکردی Up (کارکرد صحیح همان) و Dn (خراب شدن همان) خواهد بود.



در مدل مارکوف فوق،  $\lambda_1$  نرخ رخداد خطای امان اول بوده و  $\mu_1$  نرخ تعمیر همین امان است. به همین ترتیب نرخ‌های مربوط با امان دوم با اندیس‌های شماره ۲ در شکل فوق نمایش داده شده است. در این حالت با در نظر گرفتن حالت چهارم (1D2D) که در آن هر دو امان وارد ناحیه خطا شده‌اند و به کمک نوشتن معادلات تعادل فرکانسی برای مدل مارکوف شکل (۵) می‌توان نرخ معادل رخداد خطا ( $\lambda_{eq}$ ) و احتمال رخداد خطا ( $U_{eq}$ ) را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 + \lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2} \quad (2)$$

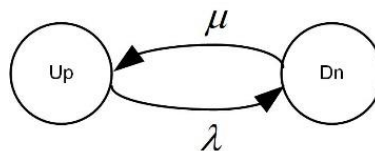
$$U_{eq} = P_{1D2D} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 + \lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2}$$

### ۳-۳ خطاهای دوتایی غیر همزمان

در این دسته از خطاها، دو خطا به صورت غیر همزمان رخ داده و موجب کاهش یا از دست رفتن ظرفیت انتقال خواهد شد. از آنجا که بحث ترتیب زمانی در این خطاها وجود دارد، لازم است که اولین خروج مربوط به خروج تعمیرات در نظر گرفته شود. به عبارت بهتر، در این مدل از خطاها، خطا در سیستم در زمانی رخ می‌دهد که امان دیگر در حالت تعمیرات قرار گرفته و به نوعی یک خطای ترتیبی مرتبه دوم تشکیل می‌شود. بر طبق دسته بندی ارائه شده در فوق می‌توان انواع خطاهای دوتایی غیر همزمان را شامل موارد زیر دانست:

- خطای دائمی یک امان در حالی که امان دیگری به حالت تعمیر رفته است و تعمیر امان دارای خطای دائمی
- خطای دائمی یک امان در حالی که امان دیگری به حالت تعمیر رفته است و استفاده از افزونه امان دارای خطای دائمی
- خطای گذرای یک امان در حالی که امان دیگری به حالت تعمیر رفته است

می‌توان این مدل از خطاها را به صورت یک پرو سه‌ی مارکوف فضا گسسته به صورت شکل (۶) مدل کرد. این مدل مارکوف دارای ۳ حالت کارکردی خواهد بود. لازم به ذکر است که تفاوت این مدل کارکردی و آنچه که در مورد خطای همزمان دو امان دیده شد، در این است که در حالت غیر همزمان، ترتیب رخداد حوادث وجود دارد. به عبارت بهتر باید اول امان به حالت تعمیر رفته و پس از آن خطا رخ دهد. عکس این مطلب هیچ زمان رخ نمی‌دهد. به این معنی که، زمانی که یک امان دچار خطا شده هیچ‌گاه امان دیگر را به تعمیرات نمی‌بریم و سعی بر این خواهد بود که تعمیر امان تا زمان به مدار بازگشتن امان خطا دیده به تعویق بیفتد. به این دلیل است که مدل مارکوف خطاهای دوتایی غیر همزمان، دارای سه مود کارکردی خواهد بود.



شکل (۴): مدل مارکوف خطای تکی

در مدل مارکوف فوق،  $\lambda$  نرخ رخداد خطا های ذکر شده در فوق خواهد بود و  $\mu$  نیز نرخ تعمیرات خواهد بود. به کمک نوشتن معادلات تعادل فرکانسی برای مدل مارکوف شکل (۴) می‌توان نرخ معادل رخداد خطا ( $\lambda_{eq}$ ) و احتمال رخداد خطا ( $U_{eq}$ ) را به صورت زیر محاسبه کرد.

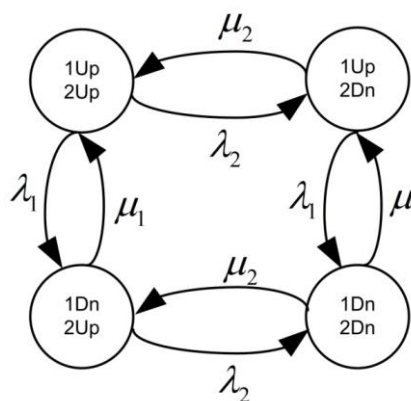
$$\lambda_{eq} = \lambda$$

$$U_{eq} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (1)$$

### ۲-۳ خطاهای دوتایی همزمان

در این دسته از خطاها، دو خطا به صورت همزمان رخ داده و موجب کاهش یا از دست رفتن ظرفیت انتقال خواهد شد. بر طبق دسته بندی ارائه شده در فوق می‌توان انواع خطاهای دوتایی همزمان را شامل موارد زیر دانست:

- خطای دائمی دو امان به صورت همزمان و تعمیر هر دو امان
  - خطای دائمی دو امان به صورت همزمان و استفاده از افزونه هر دو امان
  - خطای دائمی دو امان به صورت همزمان و تعمیر یکی و استفاده از افزونه دیگری
  - خطای دائمی یک امان به همراه خطای گذرای امان دیگر و تعمیر امان دارای خطای دائمی
  - خطای دائمی یک امان به همراه خطای گذرای امان دیگر و استفاده از افزونه امان دارای خطای دائمی
- مدل مارکوف این مدل از خطا به صورت شکل (۵) خواهد بود.

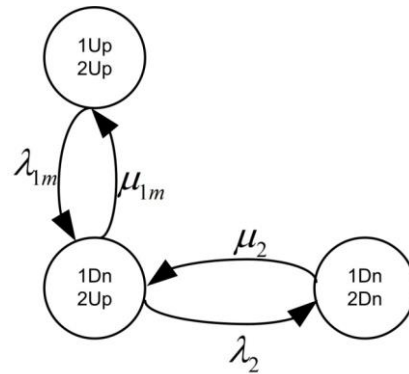


شکل (۵): نمودار مارکوف خطای دوتایی همزمان

- نرخ قطع شدن سیستم انتقال ( $\lambda$ )
  - متوسط مدت زمان قطع شدن سیستم انتقال در هر بار قطعی ( $T$ )
  - احتمال قطع شدن سیستم انتقال ( $U$ )
  - ظرفیت پربونیت خط انتقال که به صورت احتمالاتی خارج از دسترس خواهد بود. ( $U_{eq}$ )
- به منظور ارائه‌ی مقایسه‌ای دقیق‌تر بین ساختارهای فوق، هر یک از شاخص‌های دسته‌بندی شده برای ساختارهای متفاوت با یکدیگر در شکل‌های (۷) - (۱۰) مقایسه شده است.

در شکل (۷)، نرخ خروج ساختارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نرخ خروج ساختارهای EHVAC از دیگر ساختارها کمتر بوده و کمترین نرخ خروج مربوط به ساختار EHVAC1 (ساختار نهم: اتصال تک مدار سه سیستم EHVAC) است. دلیل این امر این است که نرخ خروج با تعداد المان‌های سیستم رابطه مستقیم دارد. هرچه تعداد المان‌های به کار رفته در یک سیستم بیشتر باشد، نرخ خروج آن سیستم کم‌تر است. افزایش باید. به عنوان مثال در ساختارهای LCC کمترین نرخ خروج مربوط به ساختار LCC1 (ساختار اول: اتصال تک قطبی ۶ پالسه LCC) است که دارای کمترین تعداد المان بین ساختارهای LCC است. لازم به ذکر است که نرخ خروج به تنهایی پوشش دهنده همه‌ی تعابیر قابلیت اطمینان نبوده و لزوماً سیستمی که دارای نرخ خروج پایین تری باشد معنای قابلیت اطمینان بالاتر را نخواهد داشت. صحت این گزاره را می‌توان با مقایسه شکل (۸) بررسی نمود.

در شکل (۸)، مدت زمان خروج به ازای هر بار قطعی سیستم برای ساختارهای مختلف نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، کمترین زمان قطعی مربوط به سیستم‌های VSC در قیاس با دیگر سیستم‌ها می‌باشد. سیستم‌های VSC در هر بار خروج می‌توانند به طور متوسط زودتر از ساختارهای LCC و EHVAC به سیستم برگردند. دلیل این امر بیشتر به نوع تکنولوژی به کار رفته در ساختارهای VSC باز می‌گردد که موجب می‌شود عملیات تعمیر سریع‌تری داشته باشند. در بین خود ساختارهای VSC نیز، ساختار VSC3 (ساختار هفتم: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه VSC) با پکیج ۶ پالسه دارای کمترین زمان تعمیر بوده که آن را از دیگر ساختارهای VSC متمایز می‌کند. یکی از دلایل این امر وجود مانورهای متعدد در این ساختار بوده چرا که از پکیج‌های جداگانه‌ی کانورتوری ۶-پالسه استفاده شده است. همین استدلال در مورد ساختارهای LCC صادق بوده و منجر می‌شود که کمترین زمان تعمیر بین ساختارهای LCC متعلق به ساختار LCC3 (ساختار سوم: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه LCC) با پکیج ۶ پالسه باشد. در مورد ساختارهای EHVAC نیز کمترین زمان بازگشت پس از خطا مربوط به EHVAC1 (ساختار نهم: اتصال تک مدار سه سیستم EHVAC) بوده که بسیار نزدیک به ساختار EHVAC3 (ساختار یازدهم: اتصال دو مدار سه سیستم EHVAC) می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان دریافت که از منظر زمان تعمیرات،



شکل (۶): نمودار مارکوف خطای دوتایی غیر همزمان

در مدل مارکوف فوق،  $\lambda_{1m}$  نرخ خروج جهت تعمیر المان اول بوده و  $\mu_{1m}$  نرخ بازگشت از تعمیرات همین المان است. در این حالت با در نظر گرفتن حالت چهارم (1D2D) که در آن هر دو المان وارد ناحیه خطا شده‌اند و به کمک نوشتن معادلات تعادل فرکانسی برای مدل مارکوف شکل (۵) می‌توان نرخ معادل رخداد خطا ( $\lambda_{eq}$ ) و احتمال رخداد خطا ( $U_{eq}$ ) را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_{1m} \lambda_2 r_{1m}}{1 + \lambda_{1m} r_{1m} + \lambda_{1m} \lambda_2 r_{1m} r_2} \quad (3)$$

$$U_{eq} = P_{1D2D} = \frac{\lambda_{1m} \lambda_2 r_{1m} r_2}{1 + \lambda_{1m} r_{1m} + \lambda_{1m} \lambda_2 r_{1m} r_2}$$

#### ۴- مطالعه موردی

در بخش‌های قبل تمامی مقدمات مورد نیاز جهت انجام شبیه‌سازی، اعم از ساختارهای مد نظر، معرفی خطاها و مدل‌سازی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. ورودی‌های مورد نیاز برای محاسبات قابلیت اطمینان عبارتند از نرخ رخداد خطا و زمان تعمیر هر المان از ساختارهای معرفی شده. به منظور جمع‌آوری این داده‌ها و از آنجا که نمونه عملی این سیستم‌ها در ایران موجود نیست، این داده‌ها به کمک منابع معتبر (P. Kuruganty & Woodford, 1988)، (Dialynas & Koskolos, 1994)، (Zadkhasht et al., 2010)، (R Farneti, Riot, Bazzi, & Billinton et al., 1997)، (Morris, 1991)، (Desrochers, Lefebire, Blanchard, & Rioux, 1988) به صورت جدول‌های (۳) - (۵) جمع‌بندی شده است. در این جمع‌بندی داده‌های خام مورد نیاز از منابع مختلف گردآوری شده و با حذف داده‌های ناهمگون در نهایت با میانگین‌گیری بین داده‌های مشترک به اطلاعات جدول‌های (۳) - (۵) رسیده‌ایم. ارائه جزئیات استخراج داده‌ها خارج از حوصله این مقاله خواهد بود.

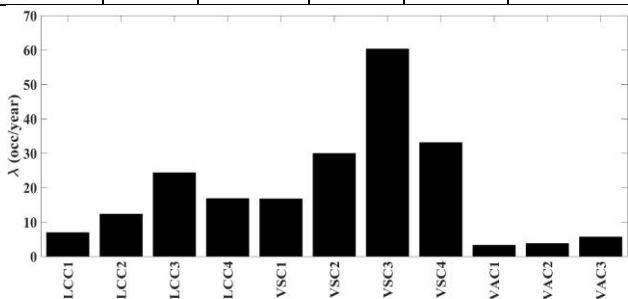
پس از به دست آوردن داده‌های ورودی می‌توان به محاسبه اندیس‌های قابلیت اطمینان برای هر ساختار به صورت جداگانه پرداخت. بدین منظور از کدزنی در محیط MATLAB استفاده شده است. شاخص‌های مورد بررسی عبارتند از:

انتقال خود احتمال خروج فاکتور موثر نیست. به عبارت بهتر، در هر بار خروج، بخشی از ظرفیت انتقال ممکن است از دست برود که فاکتور احتمال خروج، تاثیر این نکته را برای همه‌ی خروج‌ها به صورت یکسان لحاظ می‌کند. بنابراین نیاز است که از فاکتور به‌عدی جهت مقایسه‌ی دقیق‌تر سیستم‌های انتقال بهره‌جوییم.

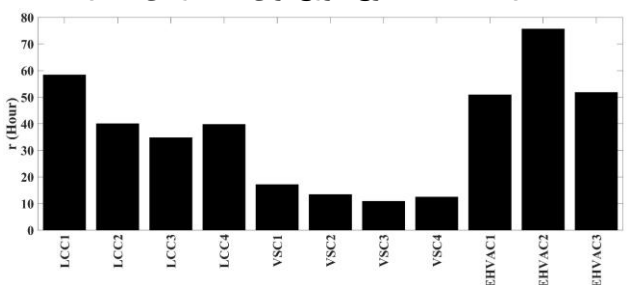
جدول (۵): داده‌های قابلیت اطمینان سیستم انتقال که در این مقاله

برای سیستم‌های EHVAC مورد استفاده قرار خواهند گرفت

زمان جایگزینی (h)	خطای موقت		خطای دائمی		خط انتقال
	زمان تعمیر (h)	نرخ خروج (occ/y)	زمان تعمیر (h)	نرخ خروج (occ/y)	
---	۰.۰۱	۰.۰۰۰۳ (/km)	۲۴	۰.۰۰۰۳ (/km)	خط انتقال
۹۰	۳	۰.۱۵	۲۱۶۰	۰.۰۲۴	ترانسفورماتور
---	---	---	۲۰۰	۰.۰۲	بریکر



شکل (۷): مقایسه نرخ خروج برای ساختارهای انتقال



شکل (۸): مقایسه زمان خروج برای ساختارهای انتقال توان

در شکل (۱۰)، فاکتور ظرفیت احتمالاتی خارج شده برای ساختارهای معرفی شده مورد بحث قرار گرفته است. همانطور که گفته شد، این فاکتور ضعف فاکتور قبلی (احتمال خروج) را پوشش داده و در هر بار خروج، میزان ظرفیت کاسته شده از انتقال را نیز در محاسبات لحاظ می‌کند. به عبارتی این فاکتور یک میانگین وزن‌دار (با وزن ظرفیت از دست رفته) برای هر احتمال لحاظ کرده و محاسبه می‌کند. همانطور که از مقایسه‌ی دو شکل (۹) و (۱۰) قابل تشخیص است، نتایج حاصل کاملاً تغییر کرده به نحوی که در شکل (۱۰)، بهترین گزینه از منظر کمترین ظرفیت احتمالاتی قطع شده، ساختار VSC3 (ساختار هفتم: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه VSC با پکیج ۶ پالسه) خواهد بود. دلیل اصلی این امر از دو فاکتور منتج می‌شود: (۱) وجود تکنولوژی بار خداد خطای کمتر (۲) وجود مسیرهای مانور و جایگزین بی‌شتر. در بین ساختارهای EHVAC نیز با منطبق فوق، ساختارهای EHVAC2 و

دومداره کردن سیستم و یا استفاده از ترانسفورماتورهای دوبل (ساختار EHVAC2) کمک کننده نخواهند بود.

جدول (۳): داده‌های قابلیت اطمینان سیستم انتقال LCC

زمان جایگزینی (h)	خطای موقت		خطای دائمی		فیلتر AC
	زمان تعمیر (h)	نرخ خروج (occ/y)	زمان تعمیر (h)	نرخ خروج (occ/y)	
---	---	---	۶	۰.۷۷۵	فیلتر AC
---	---	---	۱۲	۰.۰۰۲	خازن‌ها
۹۰	۳	۰.۱۵	۱۴۴۰	۰.۰۲۳	ترانسفورماتور کانورتر
---	---	---	۱۲	۰.۰۰۲	سوئیچ DC
---	---	---	۶.۲	۰.۳۰۲	کانورتر
---	---	---	۶.۵	۰.۵۶۹	سیستم خنک‌کنندگی
۴۸	۶	۰.۲۵	۲۴۰۰	۰.۰۳۰	راکتور صاف‌کننده
---	---	---	۱۶۸	۰.۰۰۰۰۲ (/km)Δ	خط انتقال DC

نرخ تعمیرات برنامه‌ریزی شده: ۱ بار در سال برای هر قطب  
زمان تعمیرات برنامه‌ریزی شده: ۱۶۸ ساعت (۱ هفته)

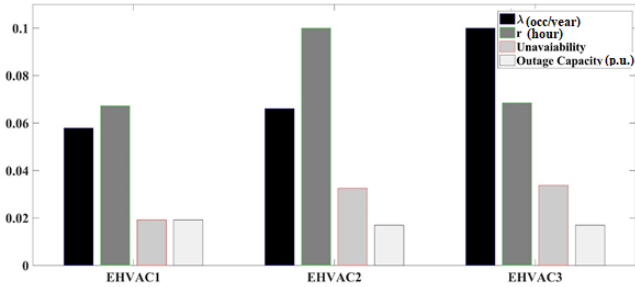
جدول (۴): داده‌های قابلیت اطمینان سیستم انتقال VSC

زمان جایگزینی (h)	خطای موقت		خطای دائمی		فیلتر AC
	زمان تعمیر (h)	نرخ خروج (occ/y)	زمان تعمیر (h)	نرخ خروج (occ/y)	
---	---	---	۷.۹۹	۲.۰۸۸	فیلتر AC
---	---	---	۳.۹۳	۰.۶۸۴	راکتور DC
۹۰	۳	۰.۱۵	۱۴۴۰	۰.۰۲۳	ترانسفورماتور کانورتر
---	---	---	۴.۳۶	۱.۰۴۶	کانورتر
---	---	---	۱۶۸	۰.۰۰۰۰۲ (/km)Δ	خط انتقال DC

نرخ تعمیرات برنامه‌ریزی شده: ۱ بار در سال برای هر قطب  
زمان تعمیرات برنامه‌ریزی شده: ۱۶۸ ساعت (۱ هفته)

به کمک فاکتورهای قبلی می‌توان احتمال خروج هر سیستم را محاسبه نمود. این فاکتور در شکل (۹) برای ساختارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، ساختار EHVAC1 (ساختار نهم: اتصال تک مداره سیستم EHVAC) دارای کمترین احتمال خروج بوده که دلیل اصلی آن نرخ بسیار پایین خروج این ساختار در مقایسه با دیگر ساختارها است. همین منطبق باعث شده که کمترین احتمال خروج در ساختارهای VSC مربوط به VSC1 (ساختار پنجم: اتصال تک قطبی ۶ پالسه VSC) باشد و در بین ساختارهای LCC نیز کمترین احتمال خروج به ساختار LCC1 (ساختار اول: اتصال تک قطبی ۶ پالسه LCC) تعلق یابد. لازم به ذکر است که کمترین فاکتور احتمال خروج، فاکتور مناسبی برای بیان قابلیت اطمینان در سیستم‌های انتقال نبوده چرا که در سیستم‌های

احتمالاتی از دست رفته می‌باشد، بدون از دست دادن کل بیت موضوع، دو فاکتور اول بر ۱۰ برابر مقادیر ماکزیمم‌شان تقسیم شده تا همه اعداد در یک رنج قرار گیرند. این کار امکان مقایسه‌ی همزمان بر روی یک نمودار را ایجاد می‌کند. همچنین، چون هدف از این بخش صرفاً مقایسه‌ی ساختارها با یکدیگر است، این تقسیم کردن به آنالیز آسیمی وارد نمی‌کند، چرا که صرفاً نسبت اعداد در این جا قابل بحث بوده و خود اعداد اهمیت موضوعی ندارند.

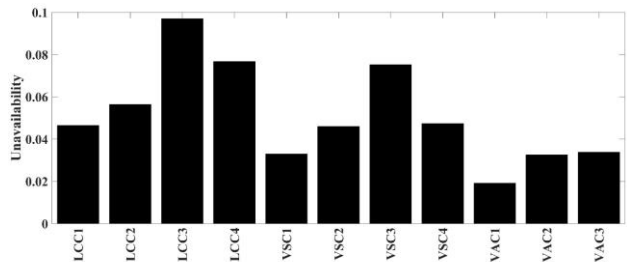


شکل (۱۱): مقایسه EHVACها از دید ۴ فاکتور قابلیت اطمینانی

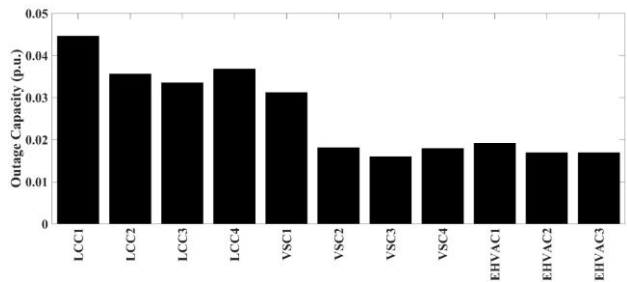
در شکل (۱۱)، ساختارهای مختلف EHVAC مورد آنالیز و مقایسه قرار گرفته‌اند. برای این مقایسه ۴ فاکتور نرخ قطعی ( $\lambda$ )، مدت زمان قطعی ( $r$ )، احتمال قطعی (Unavailability) و ظرفیت اختلالاتی (Outage Capacity) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود در فاکتورهای نرخ قطعی، مدت زمان قطعی و احتمال قطعی، ساختار EHVAC1 بهتر از دو ساختار EHVAC2 و EHVAC3 عمل کرده است و تنها در فاکتور ظرفیت اختلالاتی قطع شده، ساختارهای دیگر بهتر از EHVAC1 هستند. هرچند در فاکتور آخر نیز این عملکرد بسیار نزدیک بوده و قابل چشم‌پوشی است. بدین ترتیب، از بین ساختارهای EHVAC، ساختار EHVAC1 به عنوان بهترین ساختار انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که از منظر فنی شبکه ممکن است ساختار EHVAC3 بر ساختار EHVAC1 به دلایلی همچون ظرفیت انتقال بالاتر ترجیح داده شود چرا که از دو مدار برای انتقال توان استفاده می‌کند. ولی از دید قابلیت اطمینان این امر ضعف EHVAC3 محسوب می‌شود چرا که با هر بار خروج خود، ظرفیت بیشتری را از سیستم قطع می‌کند و ممکن است در خطوط دیگر گرفتگی ایجاد شود.

در شکل (۱۲)، نیز ساختارهای مختلف LCC مورد آنالیز و مقایسه قرار گرفته‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، ساختار LCC1 دارای مدت زمان قطعی بسیار زیادی در مقایسه با دیگر ساختارها می‌باشد. ضعف ساختار ۳ نیز در نرخ بسیار بالای خطای آن در مقایسه با دیگر ساختارها خواهد بود. در حالی که ساختارهای LCC2 و LCC4 فاکتورهای قابلیت اطمینانی متعادل تری نسبت به دو ساختار ذکر شده دارند. لازم به یادآوری است که ساختار LCC4 در واقع حالت تکمیل شده ساختار LCC2 است. در بسیاری از پروژه‌های صنعتی ابتدا سیستم HVDC با ساختار تک قطبی LCC2 راه‌اندازی شده و پس از تکمیل دو عدد از این پروژه‌ها، با اتصال آنها به یکدیگر، یک ساختار

EHVAC3 دارای کمترین ظرفیت قطع شده احتمالاتی بوده چرا که این دو ساختار دارای مسیرهای موازی در سیستم انتقال خود هستند. در ساختارهای LCC نیز به دلیل وجود مانورهای متنوع تر، کمترین ظرفیت قطعی مربوط به ساختار LCC3 خواهد بود.



شکل (۹): مقایسه احتمال خروج برای ساختارهای انتقال توان



شکل (۱۰): مقایسه ظرفیت اختلالاتی خارج شده

با مقایسه‌ی شکل‌های (۸)–(۱۰) می‌توان متوجه شد که هر تکنولوژی در یک فاکتور قابلیت اطمینان از دیگران عمل کرد بهتری دارد. این مقایسه‌ی اجمالی به صورت زیر قابل خلاصه است: از منظر نرخ خروج و احتمال خروج، تکنولوژی EHVAC، از منظر مدت زمان قطعی نیز تکنولوژی VSC و از منظر ظرفیت اختلالاتی قطع شده، تکنولوژی‌های VSC و EHVAC در یک سطح و بهتر از LCCها هستند.

ساختارهای LCC تقریباً در میانه‌ی طیف فاکتورهای نرخ قطعی و مدت زمان قطعی قرار دارند. به عبارت دقیق‌تر، در مدت زمان قطعی، LCCها بهتر از EHVACها و بدتر از VSCها هستند و از منظر نرخ قطعی، LCCها بهتر از VSCها و بدتر از EHVACها هستند.

با در نظر گرفتن نتایج فوق می‌توان دریافت که انتخاب مطلق بین تکنولوژی‌های فوق ممکن نخواهد بود. چرا که هر تکنولوژی در یک فاکتور از دیگری عملکرد مناسب تری دارد. به عبارت دیگر، هر تکنولوژی در هر یک از فاکتورهای فوق به تنهایی نمی‌توان تعیین نمود که کدام تکنولوژی مناسب‌تر است. ولی با مقایسه انواع ساختارها در هر تکنولوژی می‌توان بهترین آنها را انتخاب نمود. با این توصیفات، در این فاز از مقاله هیچ کدام از تکنولوژی‌های VSC، EHVAC و LCC حذف نشده ولی می‌توان به کمک مقایسه‌ی هر ساختار با تکنولوژی‌های خود، ساختارهای ضعیف‌تر را شناسایی کرد و حذف نمود.

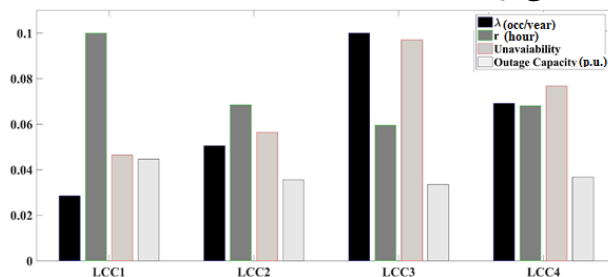
به منظور شناسایی ساختارهای ضعیف‌تر در هر تکنولوژی از منظر قابلیت اطمینان، فاکتورهای فوق برای هر تکنولوژی به صورت جداگانه در شکل‌های (۱۱)–(۱۳) آورده شده‌اند. لازم به ذکر است، از آنجا که اعداد محاسبه شده برای نرخ قطعی و مدت زمان قطعی به مراتب بزرگتر از اعداد محاسبه شده برای فاکتورهای احتمال قطعی و ظرفیت

مطلق بین تکنولوژی‌های فوق ممکن نخواهد بود. چرا که هر تکنولوژی در یک فاکتور از دیگری عملکرد مناسب‌تری دارد. ولی با مقایسه انواع ساختارها در هر تکنولوژی می‌توان به‌ترین آن‌ها را انتخاب نمود. در تکنولوژی EHVAC ساختار EHVAC1 (ساختار مهم: اتصال تک مدار سه سیستم EHVAC) و در تکنولوژی LCC ساختار LCC4 (ساختار چهارم: اتصال دو قطبی ۱۲ پالس با پکیج ۱۲ پالس) و نهایتاً، در تکنولوژی VSC نیز ساختار VSC4 (ساختار هشتم: اتصال دو قطبی ۱۲ پالس با پکیج ۱۲ پالس) انتخاب شد. به‌عنوان ادامه کار پیشنهاد می‌گردد که آنالیز حساسیت شاخص‌های قابلیت اطمینان معرفی شده نسبت به ورودی‌های مسئله انجام پذیرد چرا که پارامترهای ورودی دارای عدم قطعیت قابل توجه بوده و شناسایی پارامترهای تأثیرگذار می‌تواند در آینده برای طراحی و برنامه‌ریزی سیستم قدرت سودمند بوده و مطالعه جامعی را حاصل کند.

## مراجع

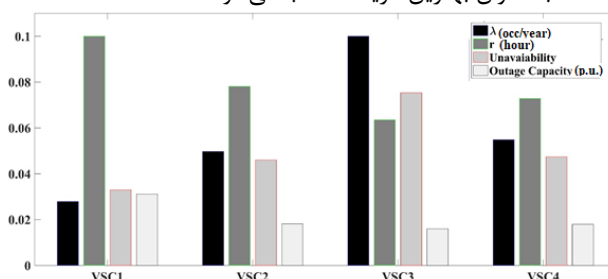
- Benato, R., Chiarelli, A., & Sessa, S. D. (2021). Reliability assessment of a multi-state HVDC system by combining Markov and matrix-based methods. *Energies*, 14(11), 3097.
- Billinton, R., Aboreshaid, S., & Fotuhi-Firuzabad, M. (1997). Diagnosing the health of bulk generation and HVDC transmission systems. *IEEE Transactions on Power systems*, 12(4), 1740-1745.
- Billinton, R., Aboreshaid, S., & Fotuhi-Firuzabad, M. (1997). Well-being analysis for HVDC transmission systems. *IEEE Transactions on Power systems*, 12(4), 913-918.
- Billinton, R., Fotuhi-Firuzabad, M., & Faried, S. (2002). Reliability evaluation of hybrid multiterminal HVDC subtransmission systems. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 149(5), 571-577.
- Billinton, R., & Prasad, V. (1971). Quantitative reliability analysis of HVDC transmission systems part II composite system analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*(3), 1047-1054.
- Billinton, R., & Sankarakrishnan, A. (1994). Adequacy assessment of composite power systems with HVDC links using Monte Carlo simulation. *IEEE Transactions on Power systems*, 9(3), 1626-1633.
- Calderbank, H., Haddock, J., & Mazur, G. (1992). Availability and reliability considerations for Nelson River bipole 1. Paper presented at the INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS.
- Desrochers, G., Lefebvre, S., Blanchard, M., & Rioux, B. (1988). A method for reliability evaluation of dc links. *CIGRE Report*, 14 (05) 1988 session.
- Dialynas, E., & Koskolas, N. (1994). Reliability modeling and evaluation of HVDC power transmission systems. *IEEE transactions on power delivery*, 9(2), 872-878.
- Dialynas, E., Koskolas, N., & Agoris, D. (1996). Reliability assessment of autonomous power systems incorporating

LCC4 ایجاد می‌شود. هر چند نرخ خطای LCC4 در قیاس با LCC2 بالاتر است، ولی از منظر فنی شبکه و فاکتورهای ماندن انتقال توان بالاتر، LCC4 بر LCC2 ارجحیت دارد. با این تو صیفات، در بین ساختارهای LCC ساختار کامل تر LCC4 به عنوان به‌ترین گزینه انتخاب می‌شود.



شکل (۱۲): مقایسه LCCها از دید ۴ فاکتور قابلیت اطمینانی

در شکل (۱۳)، نیز ساختارهای مختلف VSC مورد آنالیز و مقایسه قرار گرفته‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، ساختار VSC1 دارای مدت زمان قطعی بسیار زیادی در مقایسه با دیگر ساختارها می‌باشد. ضعف ساختار ۳ نیز در نرخ بسیار بالای خطای آن در مقایسه با دیگر ساختارها خواهد بود. در حالی که ساختارهای VSC2 و VSC4 فاکتورهای قابلیت اطمینانی متعادل‌تری نسبت به دو ساختار ذکر شده دارند. مانند سیستم LCC، در بین ساختارهای VSC ساختار کامل تر VSC4 به عنوان بهترین گزینه انتخاب می‌شود.



شکل (۱۳): مقایسه VSCها از دید ۴ فاکتور قابلیت اطمینانی

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ۱۱ ساختار HVDC و EHVAC مورد بررسی و آنالیز قابلیت اطمینان پرداخته شد. نتایج این آنالیز به صورت خلاصه بدین صورت است که، هر تکنولوژی در یک فاکتور قابلیت اطمینان از دیگران عملکرد بهتری دارد. از منظر نرخ خروج و احتمال خروج، تکنولوژی EHVAC، از منظر مدت زمان قطعی نیز تکنولوژی VSC دارای عملکرد مناسب‌تری است. از منظر ظرفیت احتمالاتی قطع شده، تکنولوژی‌های VSC و EHVAC در یک سطح و به‌تر از LCCها هستند. ساختارهای LCC تقریباً در میانه‌ی طیف فاکتورهای نرخ قطعی و مدت زمان قطعی قرار دارند. به‌عبارت دقیق‌تر، در فاکتور مدت زمان قطعی، LCCها به‌تر از EHVACها و بدتر از VSCها هستند و از منظر نرخ قطعی، LCCها به‌تر از VSCها و بدتر از EHVACها هستند. با این تو صیفات می‌توان دریافت که انتخاب

- HVDC interconnection links. IEEE transactions on power delivery, 11(1), 519-525 .
- Farneti, F., Riot, B., Bazzi, G., & Morris, C. (1991). Reliability of underground and submarine high voltage cables. Paper presented at the CIGRE Symposium in Electric Power Systems Reliability.
- Kuruganty, P., & Woodford, D. (1988). A reliability cost-benefit analysis for HVDC transmission expansion planning. IEEE transactions on power delivery, 3(3), 1241-1248 .
- Kuruganty, S. (1994). Effect of HVDC component enhancement on the overall system reliability performance. IEEE transactions on power delivery, 9(1), 343-351 .
- Kuruganty, S. (1995). Comparison of reliability performance of group connected and conventional HVDC transmission systems. IEEE transactions on power delivery, 10(4), 1889-1895 .
- Li, W., Choudhury, P., Gillespie, D., & Jue, J. (2007). A risk evaluation based approach to replacement strategy of aged HVDC components and its application at BCTC. IEEE transactions on power delivery, 22(3), 1834-1840 .
- MacIver, C., Bell, K. R., & Nedić, D. P. (2015). A reliability evaluation of offshore HVDC grid configuration options. IEEE transactions on power delivery, 31(2), 810-819 .
- Ramezanzadeh, S. P., Mirzaie, M., & Shahabi, M. (2021). Reliability assessment of different HVDC transmission system configurations considering transmission lines capacity restrictions and the effect of load level. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 128, 106754 .
- Wang, L., Wang, G., & Li, B. (2009). Reliability evaluation of UHVDC systems using Monte Carlo simulation. Paper presented at the 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting.
- Xie, K., Hu, B., & Singh, C. (2015). Reliability evaluation of double 12-pulse ultra HVDC transmission systems. IEEE transactions on power delivery, 31, 210-218, (1)
- Zadkhash, S., Fotuhi-Firuzabad, M., Aminifar, F., Billinton, R., Faried, S. O., & Edris, A.-A. (2010). Reliability evaluation of an HVDC transmission system tapped by a VSC station. IEEE transactions on power delivery, 25(3), 1962-1970 .

## زیر نویس ها

- <sup>1</sup> High voltage DC
- <sup>2</sup> Extra high voltage AC
- <sup>3</sup> Line-commutated converters
- <sup>4</sup> Voltage Source Converter
- <sup>5</sup> Analytical method
- <sup>6</sup> Simulation based methods
- <sup>7</sup> Frequency-duration method
- <sup>8</sup> Contingency enumeration method