Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 38-50

Vol. 11/ No. 2/ Summer 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

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

Mostafa Kazemi[1], Assistant professor, Javad Nezafat Namini[2], 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۵۰-۳۸

Vol. 11 / No. 2/ Summer 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

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

نوع مطالعه: پژوهشی

مصطفی کاظمی[۱] استادیار، جواد نظافت نمینی [۲] 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 HVDC[۱] و EHVAC[۲] 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 تاثیر 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[۳] و HVDC-LCC[۴] و 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 دهاقان-جنب اداره هواشناسی- مرکز آموزش عالی شهرضا-گروه مهندسی برق

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]

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 کنترل 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 گیگاواتی 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 سیستم های DC که غالبا تحت عنوان HVDC[1] شناخته می‌شوند به کمک ادوات الکترونیک قدرت جریان به صورت مستقیم منتقل می شود. سیستم‌های AC خود به دو دسته‌ی EHVAC[2] (ولتاژ بین ۲۳۰ تا ۸۰۰ کیلو ولت) و UHVAC (ولتاژ بالاتر از ۸۰۰ کیلوولت) تقسیم می شوند. 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 پیاده سازی در شبکه های 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 به‌کار رفته در کانورتر HVDCها می‌توان آنها را به دو دسته‌ی عمده تقسیم نمود. HVDCهای با تکنولوژی تریستوری یا HVDC-LCC[3] و HVDC های با تکنولوژی IGBT یا HVDC-VSC[4]. 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 HVDC ها، دارای نرخ خطای مختلفی بوده که همین امر تفاوت در قابلیت اطمینان هر تکنولوژی ایجاد می‌کند. در این مقاله، ساختارهای متفاوت با تکنولوژی های تریستوری و IGBT مد نظر قرار گرفته و قابلیت اطمینان هر سیستم سنجیده می شود. به همین ترتیب ساختار EHVAC به عنوان دیگر گزینه انتقال توان با ظرفیت بالا در این مطالعه گنجانده می‌شود تا بتوان مقایسه‌ای منا سبی از منظر قابلیت اطمینان بین ساختارهای روز دنیا انجام داد.

روش های متعددی در محاسبه‌ی قابلیت اطمینان سیستم های HVDC و EHVAC به‌کار گرفته شده‌اند. به طور کلی می توان این روش‌ها را به دو بخش تقسیم کرد: ۱) روش‌های تحلیلی[5] و ۲) روش‌های شبیه‌سازی محور[6]. 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[7] و روش شمارش حالات خطا[8] تقسیم می‌شود. در روش فرکانس زمان از مدل‌سازی مارکوف فضا گسسته برای مدل کردن روند خطا استفاده می شود. در (Roy Billinton & Prasad, 1971)، به محاسبه‌ی قابلیت اطمینان پل‌های سویچی 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 HVDC های با ساختار ۱۲-پالسه و ۱۸-پالسه پرداخته شده است. روش تحلیلی فرکانس-زمان دارای پیچیدگی‌های ریاضی نسبتا زیادی خواهد بود و زمانی که تعداد المان‌های سیستم افزایش می‌یابد مدل سازی مارکوف پیچیده خواهد شد. در (Ramezanzadeh, Mirzaie, & Shahabi, 2021)، از روش تحلیلی برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم های VSC استفاده شده است. همچنین در (Benato, Chiarelli, & Sessa, 2021)، از ترکیب روش ماتریسی و مدل مارکوف برای محاسبه 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 طرح های پیشنهادی استفاده گردیده است. از دیگر منابعی که در آن ها از این روش جهت محاسبه‌ی قابلیت اطمینان سیستم‌های HVDC استفاده شده است می توان به (S. Kuruganty, 1995)، (R Billinton, Fotuhi-Firuzabad, & Faried, 2002)، (Zadkhast et al., 2010)، (Xie, Hu, & Singh, 2015)، (Roy Billinton, Saleh Aboreshaid, & Mahmud Fotuhi-Firuzabad, 1997)، (R 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 شبیه سازی 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، اندیس های قابلیت اطمینان محاسبه خواهند شد. در حالی که در روش های شبیه سازی 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 آن ها سناریو بندی خواهد شد. در (Dialynas, Koskolos, & Agoris, 1996)، به مقایسه‌ی قابلیت اطمینان طرح‌های مختلف HVDC جهت

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]

انتقال توان بادی تولید شده توسط نیروگاه‌های مستقر در دریا پرداخته شده است. در این مطالعه از روش شبیه‌سازی محور ا ستفاده گرد یده است. از دیگر منابعی که در آنها از این روش جهت محا سبه‌ی قابل یت اطمینان سیستم‌های HVDC استفاده شده ا ست می توان به (Li, Wang, Wang, & Li, 2009)، (Choudhury, Gillespie, & Jue, 2007) و (Calderbank, Haddock, & Mazur, 1992) اشاره نمود. در مقام مقایسه‌ی محاسبه‌ی قابلیت اطمینان با روش های تحلی لی و روش‌های شبیه‌سازی محور می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. روش‌های تحلیلی جواب دقیقی از حل مسئله به د ست خواه ند داد چرا که از مدل‌های ریاضیاتی استفاده نموده و تکیه بر رو ندهای ت کراری ماند ند آنچه در روش شبیه‌سازی محور مشاهده شد، ندارند. مدت ز مان حل مسئله در روش‌های تحلیلی بسیار کمتر از مدت از 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 به‌دست آمده اطمینان نسبی مناسبی حاصل شود در حالی که روش-های تحلیلی با چنین مشکلاتی مواجه نیستند. جواب حاصل از روش-های تحلیلی همواره و به ازای هر بار هر مسئله یکی خواهد بود ولی در روش‌های شبیه‌سازی محور، این ا مر صدق ن می‌ک ند. در روش های شبیه‌سازی محور تکیه بر سناریوهای ای جاد شده بوده و ه مین ا مر 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 اک ثر م قالات ارا ئه شده در زمینه محاسبه قابلیت اطمینان سیستم‌های HVDC متمر کز بر سیستم‌های HVDC موجود یا نوع خاصی از این سیستم‌ها بوده‌ا ند و کمبود مطالعه‌ای با بستر مقایسه در این زمینه احساس می شود. به عبارت بهتر در امور برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت دا شتن د یدگاهی جامع و کلی که به مقایسه سیستم‌ها به صورت عام پرداخته باشد می-تواند بسیار سودمند باشد و دیدگاه مناسبی برای برنامه‌ریز ایجاد کند.

با این توصیفات، در این مقاله به بررسی قابلیت اطمینان سی ستم های انتقال توان با ظرفیت بالا (HVDC و EHVAC) پرداخ ته 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 آ مده و از ا ین داده‌ها برای اعمال خطا گذاری روی ه مه الـ مان ها ا ستفاده گرد یده 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 اطمی نان ترین سی ستم را انت خاب نمود.

ساختار ا ین مقا له بدین صورت ا ست: در ب خش دوم به معر فی ساختارهای سیستم‌های انتقال توان با ظرفیت بالا پرداخته شده و در بخش سوم به بررسی روش محاسبه قابلیت اطمینان پرداخته می شود. در بخش چهارم نیز خروجی قابلیت اطمینان بد ست آ مده از شبیه-سازی‌ها ارائه شده و مورد مقای سه قرار می‌گیر ند. در نها یت ب خش نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- معرفی سیستم‌های HVDC

به منظور انجام آنالیز قابلیت اطمینان، دو دسته داده اساسی مورد ن یاز خواهد بود. ۱) توپولوژی سیستم و نحوه‌ی اتصال ادوات به یکدیگر، ۲) میزان کاهش ظرفیت سی ستم در ا ثر خروج ادوات مخت لف. در ا ین بخش به تشریح این دست از داده‌ها پرداخته می‌شود. در مورد د سته اول داده‌ها یعنی توپولوژی سیستم و نحوه‌ی اتصال ادوات به ی کدیگر، در این مقاله، ۴ توپولوژی از HVDC-VSC، ۴ توپو لوژی از HVDC-LCC و ۳ توپولوژی از EHVAC ها مورد آنالیز قابلیت اطمینان قرار می‌گیرند. لیست ساختارهای مد نظر 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 طرح ها به ع نوان طرح ن هایی عملیاتی نبوده و صرفا به عنوان فاز اول برای ساخت سیستم‌های انتقال توان با ظرفیت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی به هر حال ن یاز است که قابلیت اطمینان این سی ستم ها هر چ ند که سی ستم های ابتدایی در فازهای توسعه هستند در دسترس باشد.

در مورد دسته‌ی بعدی داده‌ها که مرتبط با م یزان کاهش ظرف یت انتقال در اثر خروج المان‌های سیستم است، بعضا نیاز به شبیه سازی دقیق سیستم‌ها بعد از طراحی کامل آنها خواهد بود. به عنوان مثال، با محاسبات سرانگشتی و تقریبی نمی‌توان مشخص ن مود در ا ثر خروج یک فیلتر AC چه مقدار ظرفیت انتقال HVDC ا فت خوا هد کرد و نیاز است که این عدد با استفاده از شبیه‌سازی‌ها مختلف معین شود. از آنجا که طراحی سی ستم HVDC در ا یران ان جام ن شده 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 م نابع، سعی بر تعیین نحوه‌ی اثر گذاری خروج المان‌های HVDC بر ظرفیت انتقال را خواهیم داشت.

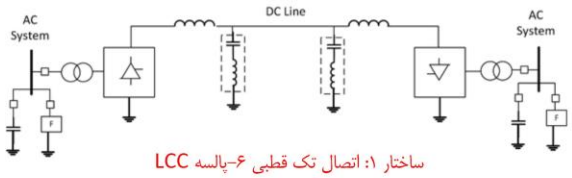
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]

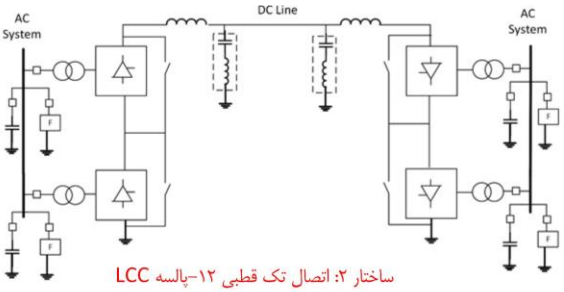
از این منظر می‌توان المان‌ها را به دو دسته تقسیم نمود. در دسته‌ی اول از المان‌ها محاسبه‌ی ظرفیت کاهش یافته امری سر راست بوده و به واسطه‌ی تقارن سیستم و یا توپولوژی آن قابل تشخیص است. در حالی که در مورد دسته‌ی دوم از المان‌ها، تاثیر خروج آنها را نمی‌توان مستقیما و به سادگی سنجید و نیاز به انجام شبیه سازی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

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

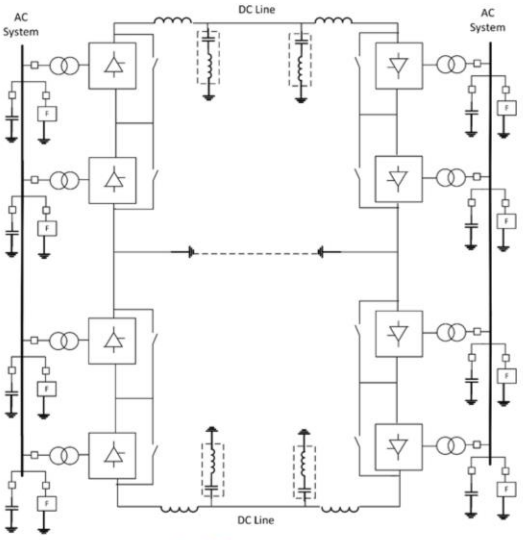
- گروه کانورتری
  - کانورتر



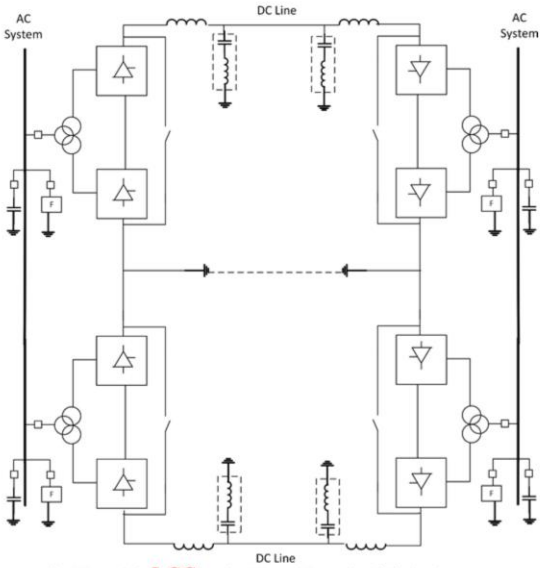
ساختار ۱: اتصال تک قطبی ۶-پالسه LCC



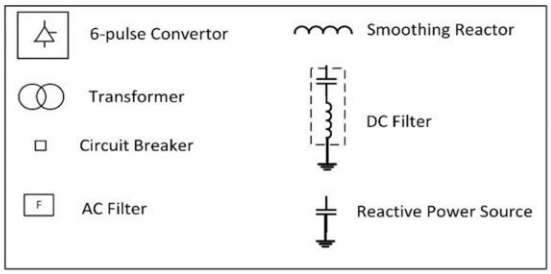
ساختار ۲: اتصال تک قطبی ۱۲-پالسه LCC



ساختار ۳: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه LCC با پکیج ۶ پالسه



ساختار ۴: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه LCC با پکیج ۱۲ پالسه



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

- ترانسفورماتور تغذیه کننده‌ی کانورتر در HVDC ها یا ترانسفورماتور تغذیه کننده در EHVACها
- 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:

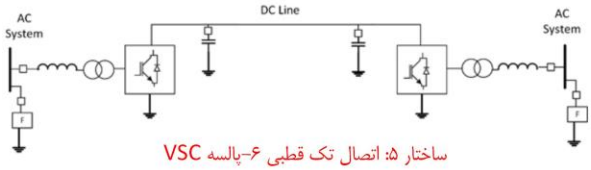
- فیلترهای AC و منابع تامین کننده‌ی توان راکتیو

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

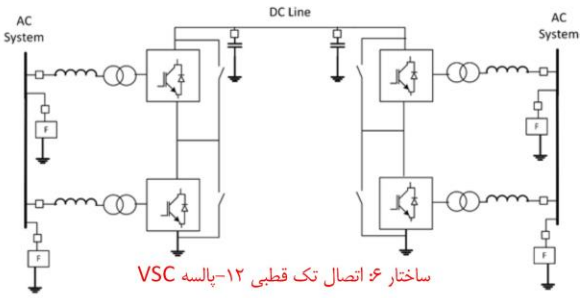
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]

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.

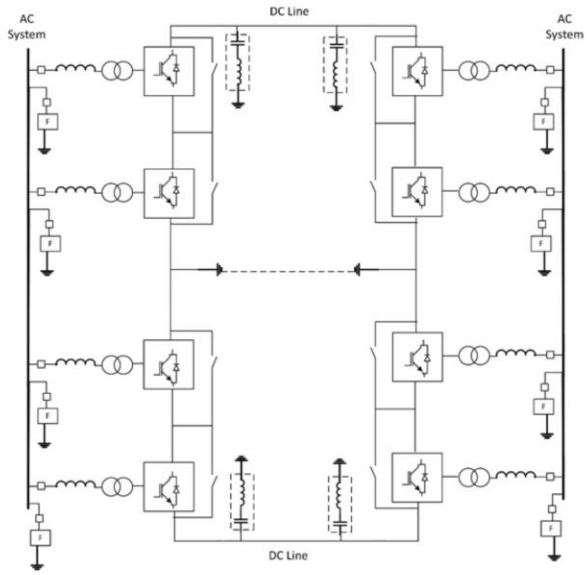
روند استخراج جدول فوق ساده و واضح خواهد بود. به عنوان مثال در ساختار ۳ که مرتبط با یک ساختار دوقطبی با پکیج ۶ پالسه در نظر گرفته شده است، در اثر خروج یک کانورتر، کانورتر مذکور اتصال کوتاه شده و بدین ترتیب در هر پل ۳ کانورتر دیگر به کار می‌پردازند. بدین ترتیب، ولتاژ قطب به قطب سیستم HVDC به 0.75 مقدار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



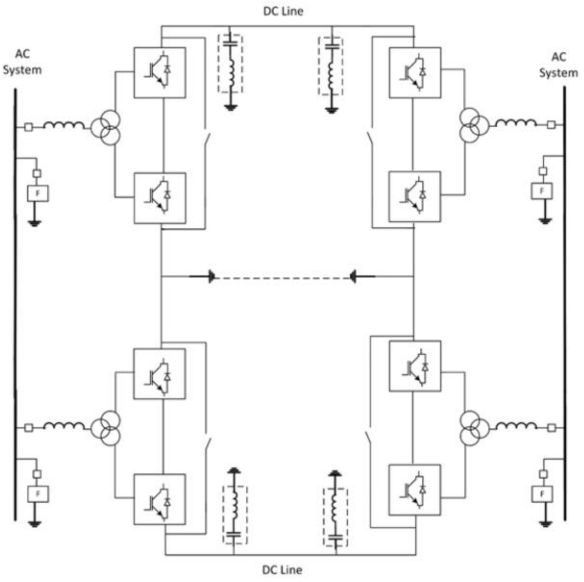
ساختار ۵: اتصال تک قطبی ۶-پالسه VSC



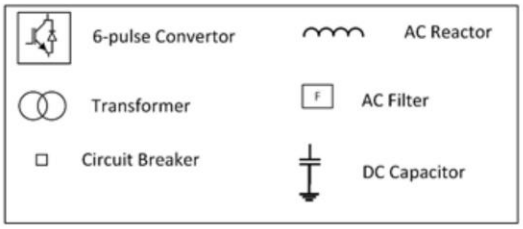
ساختار ۶: اتصال تک قطبی ۱۲-پالسه VSC



ساختار ۷: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه VSC با پکیج ۶ پالسه

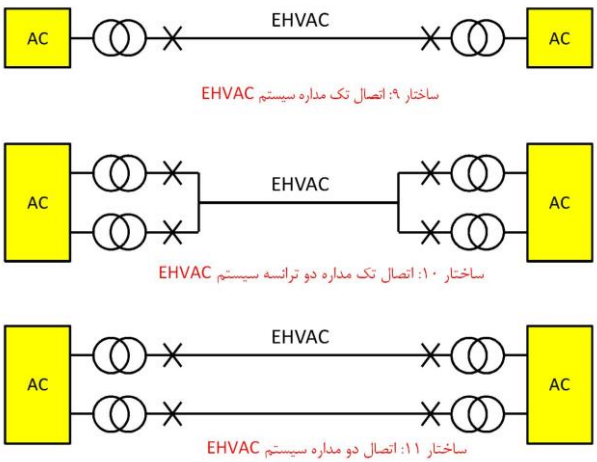


ساختار ۸: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه VSC با پکیج ۱۲ پالسه



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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]



شکل (۳): ساختار های 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 متناظرا 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 المان ها 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 خرابی ها 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 / ساختار	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

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 بهتر خروج فیلتر های AC علاوه بر اینکه بر کیفیت توان شبکه‌ی AC تاثیر خواهند گذاشت، موجب کمبود توان راکتیو مورد نیاز کانورترها شده و بر عملکرد آن ها نیز تاثیرگذار خواهند بود. به عبارت بهتر، در هنگام خروج فیلتر های 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 اثرخروج فیلتر های AC و بانک‌های خازنی نیازمند انجام شبیه سازی های نسبتا 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 شبیه-سازی را در این مورد پیاده نمود. در این مقاله بدون اینکه از کلیات مطلب کاسته شود و به منظور ساده سازی مسئله، از مقادیر استفاده شده در نمونه‌های عملی در این قسمت استفاده می‌شود.

به کمک مراجع (Dialynas & Koskolos, 1994)، (Roy Billinton & Prasad, 1971) و (R Billinton et al., 2002)، 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 ومنابع 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) صرفا 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 / ساختار	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)	---	---	---	---	---

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]

۳- مدل‌سازی خطاها

در این بخش به حالات مختلف ترکیبی ممکن از خطا گذاری ها می‌پردازیم. همانطور که قبلا ذکر شد، در روش شمارش حالات خطا، به ازای وجود n مود مختلف خطا، تعداد 2^n حالت کارکردی و جود خواهد داشت. چرا که می‌توان 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 درجه‌ی بالا تاثیر چندانی بر اندیس‌های قابلیت اطمینان نخواهد گذاشت. چرا که با افزایش تعداد رخدادهای خطا، احتمال رخداد آنها به شدت کاهش یافته و همین امر موجب می‌شود که تاثیر آن بر اندیس‌های قابلیت اطمینان کم شود. یکی از معمول‌ترین تقریب‌هایی که در این زمینه در شبکه‌های انتقال در نظر گرفته می شود، تقریب N-2 خواهد بود. در این تقریب خطاگذاری حداکثر تا مرتبه‌ی دوم لحاظ شده و خطاهای مرتبه بالاتر (به عنوان مثال رخ داد سه خطای همزمان و ...) در نظر گرفته نخواهد شد. در این مقاله همین تقریب مبنای کار قرار گرفته و خطا گذاری صرفا تا مرتبه‌ی دوم ادامه خواهد یافت.

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

- خطای دائمی المان همراه با تعمیرات

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

- خطای دائمی المان 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، المان با افرونه خود جایگزین می‌شود. این استراتژی معمولا برای المان‌هایی که مدت زمان تعمیر آنها بسیار زیاد است، در نظر گرفته می‌شود.

- خطای گذرای المان

این دسته از خطاها به دلیل رخداد عوامل بسیار جزئی بوده و نیازمند تعمیر نخواهد بود. به عنوان مثال مواردی مانند بر خورد فاز ها 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 المان دارای خطا خواهد شد ولی زمان خاموشی بسیار جزئی و قابل صرف نظر کردن است؛ چراکه در اصل خطایی که نیازمند تعمیر باشد رخ نداده است.

- خروج تعمیرات المان

المان‌های سیستم قدرت مانند هر سیستمی نیازمند تعمیرات دوره‌ای بوده تا بتوان بدین ترتیب عملکرد و طول عمر سیستم را بهبود بخشید. تعمیرات معمولا به دو صورت آفلاین و برخط انجام می‌شود. 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 بهره‌برداری قرار خواهد گرفت.

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

ترکیب موارد فوق می‌تواند حالات مختلف خطاگذاری را تشکیل دهد که در ادامه به تحلیل آنها می‌پردازیم.

۳-۱ خطاهای تکی

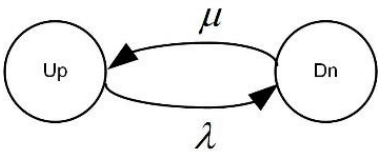
در این دسته از خطاها، یکی از مودهای غالب خطا فعال شده و بقیه در مود کارکردی سالم به فعالیت خواهند پرداخت. بر طبق دسته بندی ارائه شده در فوق می‌توان انواع خطا های تکی را شامل موارد زیر دانست:

- خطای دائمی المان همراه با تعمیرات
- خطای دائمی المان همراه با استفاده از افرونه
- خطای گذرای المان
- خروج تعمیرات المان

می‌توان این مدل از خطاها را به صورت یک پروسه‌ی مارکوف فضا گسسته به صورت شکل (۴) مدل کرد. این مدل مارکوف دارای دو حالت کارکردی Up (کارکرد صحیح المان) و Dn (خراب شدن المان) خواهد بود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]



شکل (۴): مدل مارکوف خطای تکی

در مدل مارکوف فوق، λ نرخ رخداد خطا های ذکر شده در فوق خواهد بود و μ نیز نرخ تعمیرات خواهد بود.

به کمک نوشتن معادلات تعادل فرکانسی برای مدل مارکوف شکل (۴) می‌توان نرخ معادل رخداد خطا (λ_{eq}) و احتمال رخداد خطا (U_{eq}) را به صورت زیر محاسبه کرد.

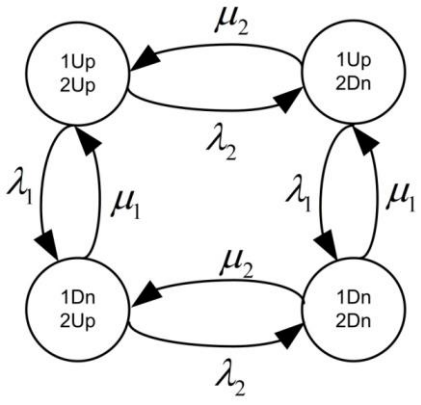
$$\lambda_{eq} = \lambda$$
$$U_{eq} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \qquad (۱)$$

۳-۲ 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 المان به صورت همزمان و تعمیر هر دو المان
- خطای دائمی دو المان به صورت همزمان و استفاده از افرونه هر دو المان
- خطای دائمی دو المان به صورت همزمان و تعمیر یکی و استفاده از افرونه دیگری
- خطای دائمی یک المان به همراه خطای گذرای المان دیگر و تعمیر المان دارای خطای دائمی
- خطای دائمی یک المان به همراه خطای گذرای المان دیگر و استفاده از افرونه المان دارای خطای دائمی

مدل مارکوف این مدل از خطا به صورت شکل (۵) خواهدبود.



شکل (۵): نمودار مارکوف خطای دوتایی همزمان

در مدل مارکوف فوق، λ_1 نرخ رخداد خطای المان اول بوده و μ_1 نرخ تعمیر همین المان است. به همین ترتیب نرخ‌های مربوط با المان 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 المان وارد ناحیه خطا شده‌اند و به کمک نوشتن معادلات تعادل فرکانسی برای مدل مارکوف شکل (۵) می‌توان نرخ معادل رخداد خطا (λ_{eq})و احتمال رخداد خطا (U_{eq}) را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_1\lambda_2\,(r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2\, r_2 + \lambda_1\lambda_2 r_2 r_1}$$
$$U_{eq} = P_{1D\,2D} = \frac{\lambda_1\lambda_2\, r_1 r_2}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2\, r_2 + \lambda_1\lambda_2 r_2 r_1} \qquad (۲)$$

۳-۳ خطاهای دوتایی غیر همزمان

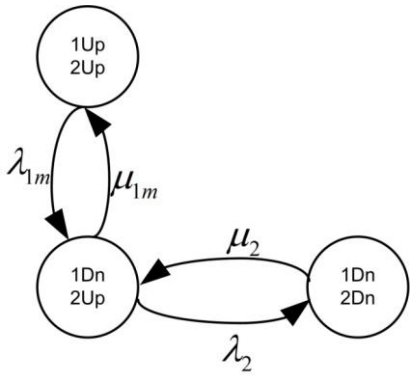
در این دسته از خطاها، دو خطا به صورت غیر همزمان رخ داده و موجب کاهش یا از دست رفتن ظرفیت انتقال خواهد شد. از آنجا که بحث ترتیب زمانی در این خطا ها وجود دارد، لازم است که اولین خروج مربوط به خروج تعمیرات در نظر گرفته شود. به عبارت بهتر، در این مدل از خطاها، خطا در سیستم در زمانی رخ می‌دهد که المان دیگر 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 المان در حالی که المان دیگری به حالت تعمیر رفته است و تعمیر المان دارای خطای دائمی
- خطای دائمی یک المان در حالی که المان دیگری به حالت تعمیر رفته است و استفاده از افرونه المان دارای خطای دائمی
- خطای گذرای یک المان در حالی که المان دیگری به حالت تعمیر رفته است

می‌توان این مدل از خطاها را به صورت یک پروسه‌ی 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 المان دیده شد، در این است که در حالت غیر همزمان، ترتیب رخداد حوادث و جود دارد. به عبارت بهتر باید اول المان 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 المان دچار خطا شده هیچ‌گاه المان دیگر را به تعمیرات نمی‌بریم و سعی بر این خواهد بود که تعمیر المان تا زمان به مدار بازگشتن المان خطا دیده به تعویق بیفتد. به این دلیل است که مدل مارکوف خطاهای دوتایی غیر همزمان، دارای سه مود کارکردی خواهد بود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]



شکل (۶): نمودار مارکوف خطای دوتایی غیر همزمان

در مدل مارکوف فوق، λ_{1m} نرخ خروج جهت تعمیر المان اول بوده و μ_{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 (λ_{eq}) و احتمال رخداد خطا (U_{eq}) را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_{1m}\lambda_2 r_{1m}}{1+\lambda_{1m}r_{1m}+\lambda_{1m}\lambda_2 r_{1m}r_2}$$
$$U_{eq} = P_{1D2D} = \frac{\lambda_{1m}\lambda_2\, r_{1m}r_2}{1+\lambda_{1m}r_{1m}+\lambda_{1m}\lambda_2 r_{1m}r_2} \quad (۳)$$

۴- مطالعه موردی

در بخش‌های قبل تمامی مقدمات مورد نیاز جهت انجام شبیه سازی، اعم از ساختارهای مد نظر، معرفی خطا ها و مدل سازی آن ها مورد بررسی قرار گرفت. ورودی های مورد نیاز برای محاسبات قابلیت اطمینان عبارتند از نرخ رخداد خطا و زمان تعمیر هر المان از ساختارهای معرفی شده. به منظور جمع آوری 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)، (Zadkhast et al., 2010)، (R Billinton et al., 1997)، (Farneti, Riot, Bazzi, & Morris, 1991) و (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 میانگین گیری بین داده‌های مشترک به اطلاعات جدول های (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:

- نرخ قطع شدن سیستم انتقال (λ)
- متوسط مدت زمان قطع شدن سیستم انتقال در هر بار قطعی (r)
- احتمال قطع شدن سیستم انتقال (U)
- ظرفیت پریونیت خط انتقال که به صورت احتمالاتی خارج از دسترس خواهد بود. (Outage Capacity)

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 می شود، نرخ خروج ساختارهای EHVAC از دیگر ساختارها کمتر بوده و کمترین نرخ خروج مربوط به ساختار EHVAC1 (ساختار نهم: اتصال تک مداره سیستم EHVAC) است. دلیل این امر این است که نرخ خروج با تعداد المان‌های سیستم رابطه مستقیم دارد. هرچه تعداد المان‌های به‌کار رفته در یک سیستم بیشتر باشد، نرخ خروج آن سیستم ممکن است افزایش یابد. 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 لزوما 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 سیستم های 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 می شود 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 پکیج های جداگانه‌ی کانورتری 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 مداره سیستم EHVAC) بوده که بسیار نزدیک به ساختار EHVAC3 (ساختار یازدهم: اتصال دو مداره سیستم EHVAC) می‌باشد. به عبارت دیگر می توان دریافت که از منظر زمان تعمیرات،

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]

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

جدول (۳): داده‌های قابلیت اطمینان سیستم انتقال LCC

	خطای دائمی		خطای موقت		زمان جایگزینی (h)
	نرخ خروج (occ/y)	زمان تعمیر(h)	نرخ خروج (occ/y)	زمان تعمیر (h)	
فیلتر AC	۰.۷۷۵	۶	---	---	---
خازن‌ها	۰.۰۰۲	۱۲	---	---	---
ترانسفورماتور کانورتر	۰.۰۲۳	۱۴۴۰	۰.۱۵	۳	۹۰
سوییچ DC	۰.۰۰۲	۱۲	---	---	---
کانورتر	۰.۳۰۲	۶.۲	---	---	---
سیستم خنک کنندگی	۰.۵۶۹	۶.۵	---	---	---
راکتور صاف کننده	۰.۰۳۰	۲۴۰۰	۰.۲۵	۶	۴۸
خط انتقال DC	۰.۰۰۰۰۲ (/km)۵	۱۶۸	---	---	---
نرخ تعمیرات برنامه‌ریزی شده: ۱ بار در سال برای هر قطب زمان تعمیرات برنامه‌ریزی شده: ۱۶۸ ساعت (۱ هفته)					

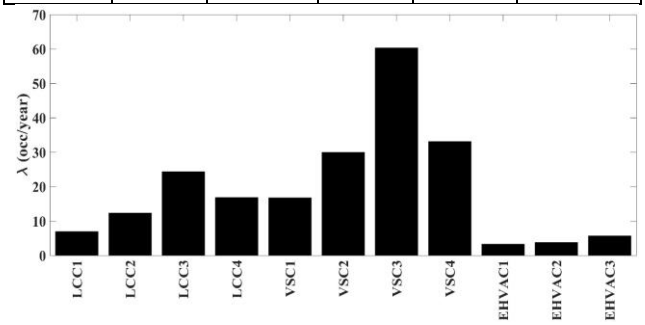
جدول (۴): داده‌های قابلیت اطمینان سیستم انتقال VSC

	خطای دائمی		خطای موقت		زمان جایگزینی (h)
	نرخ خروج (occ/y)	زمان تعمیر(h)	نرخ خروج (occ/y)	زمان تعمیر(h)	
فیلتر AC+ راکتور AC	۲.۰۸۸	۷.۹۹	---	---	---
خازن DC	۰.۶۸۴	۳.۹۳	---	---	---
ترانسفورماتور کانورتر	۰.۰۲۳	۱۴۴۰	۰.۱۵	۳	۹۰
کانورتر	۱.۰۴۶	۴.۳۶	---	---	---
خط انتقال DC	۰.۰۰۰۰۲ (/km)۵	۱۶۸	---	---	---
نرخ تعمیرات برنامه‌ریزی شده: ۱ بار در سال برای هر قطب زمان تعمیرات برنامه‌ریزی شده: ۱۶۸ ساعت (۱ هفته)					

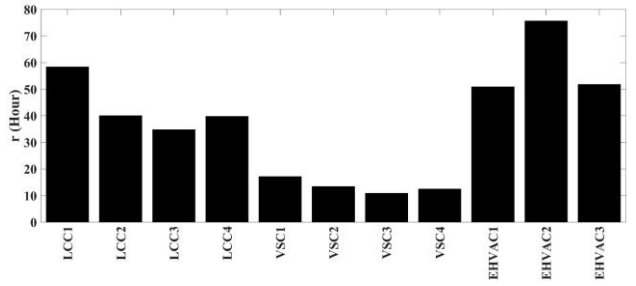
به کمک فاکتورهای قبل می‌توان احتمال خروج هر سیستم را محاسبه نمود. این فاکتور در شکل (۹) برای ساختارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، ساختار EHVAC1 (ساختار نهم: اتصال تک مداره سیستم EHVAC) دارای کمترین احتمال خروج بوده که دلیل اصلی آن نرخ بسیار پایین خروج این ساختار در مقایسه با دیگر ساختارها است. همین منطق 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 کماکان فاکتور احتمال خروج، فاکتور مناسبی برای بیان قابلیت اطمینان در سیستم‌های انتقال نبوده چرا که در سیستم های 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 بعدی جهت مقایسه‌ی دقیق‌تر سیستم‌های انتقال بهره جوییم.

جدول (۵): داده‌های قابلیت اطمینان سیستم انتقال که در این مقاله برای سیستم‌های EHVAC مورد استفاده قرار خواهند گرفت

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



شکل (۷): مقایسه نرخ خروج برای ساختارهای انتقال



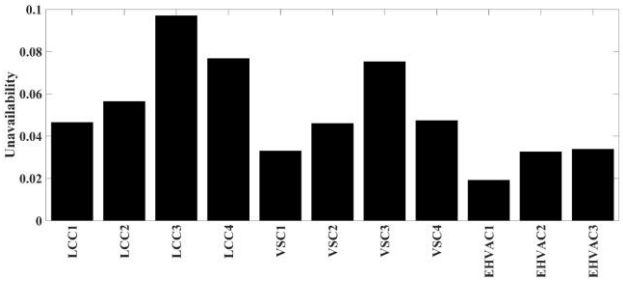
شکل (۸): مقایسه زمان خروج برای ساختارهای انتقال توان

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 کاملا 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 با ارخداد خطای کمتر ۲) و وجود مسیرهای مانور و جایگزین بیشتر. در بین ساختارهای EHVAC نیز با منطق فوق، ساختارهای EHVAC2 و

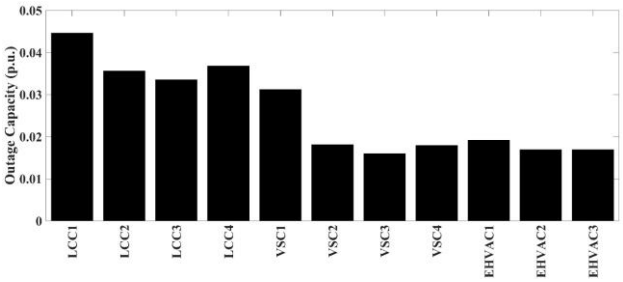
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]

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 متنوع‌تر، کم‌ترین ظرفیت قطعی مربوط به ساختار LCC3 خواهد بود.



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



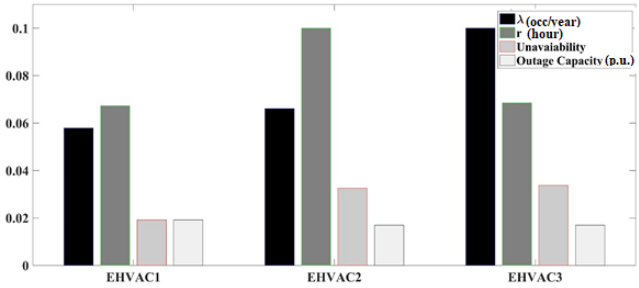
شکل (۱۰): مقایسه ظرفیت احتمالاتی خارج شده

با مقایسه‌ی شکل‌های (۸)-(۱۰) می‌توان متوجه شد که هر تکنولوژی در یک فاکتور قابلیت اطمینان از دیگران عملکرد 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 احتمالاتی قطع شده، تکنولوژی‌های VSC و EHVAC در یک سطح و بهتر از LCCها هستند.

ساختارهای LCC تقریبا 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 مناسب‌تری دارد. به عبارت بهتر از منظر سیستم انتقال توان با ظرفیت بالا، 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 احتمالاتی از دست رفته می‌باشد، بدون از دست دادن کلیت 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 صرفا مقایسه‌ی ساختارها با یکدیگر است، این تقسیم کردن به آنالیز آسیبی وارد نمی‌کند، چرا که صرفا نسبت اعداد در اینجا قابل بحث بوده و خود اعداد اهمیت موضوعی ندارند.



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

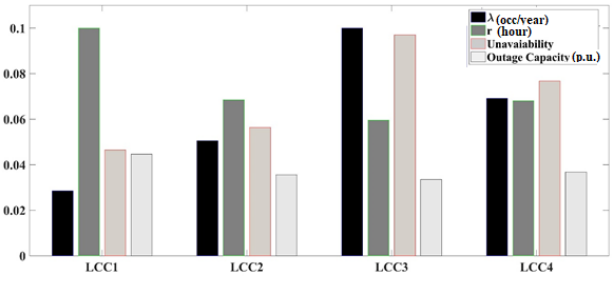
در شکل (۱۱)، ساختارهای مختلف EHVAC مورد آنالیز و مقایسه قرار گرفته‌اند. برای این مقایسه ۴ فاکتور نرخ قطعی (λ)، مدت زمان قطعی (r)، احتمال قطعی (Unavailability) و ظرفیت احتمالاتی قطع شده (Outage Capacity) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود در فاکتورهای نرخ قطعی، مدت زمان قطعی و احتمال قطعی، ساختار EHVAC1 بهتر از دو ساختار EHVAC دیگر عمل کرده است و تنها در فاکتور ظرفیت احتمالاتی 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. همنطور که مشاهده می شود، 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 متعادل‌تری نسبت به دو ساختار ذکر شده دارند. لازم به یادآوری است که ساختار LCC4 درواقع حالت تکمیل شده ساختار LCC2 است. در بسیاری از پروژه های 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

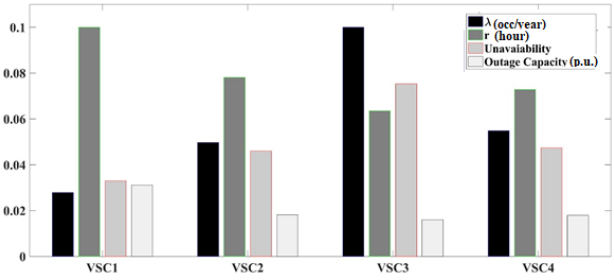
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]

LCC4 ایجاد می‌شود. هر چند نرخ خطای LCC4 در قیاس با LCC2 بالاتر است، ولی از منظر فنی شبکه و فاکتورهایی مانند انتقال توان بالاتر، LCC4 بر LCC2 ارجحیت دارد. با این توصیفات، در بین ساختارهای LCC ساختار کامل‌تر 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 می شود، 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 کامل‌تر 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 LCC ها هستند. ساختارهای LCC تقریبا در میانه‌ی طیف فاکتور های نرخ قطعی و مدت زمان قطعی قرار دارند. به عبارت دقیق‌تر، در فاکتور مدت زمان قطعی، LCC ها بهتر از EHVAC ها و بدتر از VSC ها هستند و از منظر نرخ قطعی، LCC ها بهتر از VSC ها و بدتر از EHVACها هستند. با این توصیفات می توان دریافت که انتخاب 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 نهم: اتصال تک مداره سیستم EHVAC) و در تکنولوژی LCC ساختار LCC4 (ساختار چهارم: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه LCC با پکیج ۱۲ پالسه) و نهایتا، در تکنولوژی VSC نیز ساختار VSC4 (ساختار هشتم: اتصال دو قطبی ۱۲ پالسه VSC با پکیج ۱۲ پالسه) انتخاب شد.

به عنوان ادامه کار پیشنهاد می‌گردد که آنالیز حساسیت شاخص های قابلیت اطمینان معرفی شده نسبت به ورودی‌های مسئله انجام پذیرد چرا که پارامتر های ورودی دارای عدم قطعیت قابل توجه بوده و شناسایی پارامتر های تاثیر گذار می‌توانند 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 ,(۲)۱۲ , ۹۱۳-۹۱۸.

Billinton, R., Fotuhi-Firuzabad, M., & Faried, S. (2002). Reliability evaluation of hybrid multiterminal HVDC subtransmission systems. IEE 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., Lefebire, S., Blanchard, M., & Rioux, B. (1988). A method for reliability evaluation of dc links. CIGRE Report, 14 (05) 1988 session .

Dialynas, E., & Koskolos, N. (1994). Reliability modeling and evaluation of HVDC power transmission systems. IEEE transactions on power delivery, 9(2), 872-878 .

Dialynas, E., Koskolos, N., & Agoris, D. (1996). Reliability assessment of autonomous power systems incorporating

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]

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 .۲۱۰-۲۱۸ ,(۱)

Zadkhast, 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 .

زیرنویس‌ها

[1] High voltage DC
[2] Extra high voltage AC
[3] Line-commutated converters
[4] Voltage Source Convertor
[5] Analytical method
[6] Simulation based methods
[7] Frequency-duration method
[8] Contingency enumeration method

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.1.5]