

ارزیابی پایایی کریدورهای انتقال توان الکتریکی بهره‌مند از فناوری‌های HVDC و EHVAC

فائقه ایران‌نژاد - همایون برهمندپور - محمد جعفریان

پژوهشگاه نیرو

مرکز توسعه فناوری سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا

تهران - ایران

mjafarian@nri.ac.ir , hberahmandpour@nri.ac.ir , faegheh_irannezhad@yahoo.com

منظور استفاده از مزایای نسبی تولید برق در کشورهای هم‌جوار و هم‌منطقه و تشکیل بازارهای منطقه‌ای برق، استفاده از فناوری انتقال توان با ظرفیت بالا^۱ در بسیاری از مناطق جهان گسترش چشمگیری یافته است.

آنچه از مفهوم انتقال توان با ظرفیت بالا در کشورهای مختلف دنیا به طور مشترک برداشت می‌شود، کریدورهای انتقال توان در ظرفیت‌های گیگواتی برای انتقال توان در حجم‌های بالا و در کنار آن، مسافت‌های طولانی است. هم‌اکنون انتقال توان در کریدورهای با ظرفیت‌های گیگواتی در سطح دنیا، امری متداول و معمول می‌باشد و همواره با توسعه این کریدورها در سطح شبکه‌های برق کشورهای دنیا، نقش و اهمیت آن‌ها در شکل‌دهی زیرساخت‌های انتقال توان چه در داخل کشور و چه برای ارتباطات برون‌مرزی و منطقه‌ای، پررنگ‌تر می‌شود.

در کشور ایران نیز، نیاز روزافزون به انرژی الکتریکی طی دهه‌های آینده، سیاست‌گذاری استفاده از منابع تجدیدپذیر، به خصوص بادی و خورشیدی، در حجم انبوه و موقعیت ژئوپلیتیکی و قرار گرفتن این کشور در شاهراه تبادلات انرژی الکتریکی منطقه، موجب گردیده که راهبرد استفاده از فناوری انتقال توان در ظرفیت بالا یکی از فناوری‌های کلیدی در توسعه زیرساخت‌های انتقال توان و ایجاد بستر برای ایفای نقش قطب انرژی الکتریکی ایران در منطقه باشد.

در کنار تمامی مزایای چشمگیر استفاده از کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا، چالش پایایی این کریدورها همواره به عنوان یک دغدغه مهم مطرح بوده است. در این مقاله عناصر مهم در سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا

چکیده — فناوری‌های انتقال توان با ظرفیت بالا طی چند دهه اخیر به سرعت در دنیا گسترش یافته است. یکی از مهمترین ملاحظات سامانه‌های دارای این فناوری‌ها، ارزیابی پایایی آنها است تا از این طریق و با مصالحه اقتصادی بین هزینه تقویت این سامانه‌ها و هزینه خاموشی ناشی از خطا در آنها، بتوان به طرح اقتصادی مناسب دست یافت. در این مقاله با بررسی کلی شاخص‌های پایایی عناصر مهم این سامانه‌ها، رویه‌ای برای محاسبه شاخص‌های پایایی آنها مشتمل بر دو شاخص دسترس‌ناپذیری و متوسط انرژی تغذیه نشده ارائه شده است. در ادامه این شاخص برای گزینه‌های پیشنهادی برای کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا برای ایران در افق ۱۴۱۰ محاسبه و از آن طریق، به ارزیابی گزینه‌های پیشنهادی پرداخته شده است. نتیجه این محاسبات آن است که از دیدگاه پایایی، تفاوت فاحشی بین کریدورهای انتقال توان با فناوری‌های گوناگون وجود ندارد و لازم است با محاسبات اقتصادی، بهترین گزینه در هر مطالعه حاصل شود.

واژه‌های کلیدی: انتقال توان با ظرفیت بالا؛ پایایی؛ دسترس‌ناپذیری؛

انرژی تغذیه نشده؛ HVDC EHVAC

۱. مقدمه

با افزایش سطح توان‌های انتقالی بین مراکز تولید و مصرف، دور شدن مراکز تولید از مصرف به دلیل ملاحظات زیست‌محیطی، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس بالا و نیز ارتباط الکتریکی کشورها با یکدیگر به

^۱ Bulk Power Transmission Technology

مطرح شده، شاخص $EENS^5$ یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها مبتنی بر بار و انرژی است که در این مقاله برای ارزیابی از آن استفاده شده است.

۳. ارزیابی پایایی عناصر سامانه

در بخش‌های زیر، ابتدا تجهیزات موثر در مطالعات پایایی سامانه‌های انتقال توان معرفی می‌گردد و سپس، به منظور ایجاد داده‌های نمونه برای مطالعات پایایی آنها، آمار خروج تجهیزات آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است، در بحث پایایی سیستم‌های قدرت، خطاهای موقت ناشی از صاعقه به دلیل مدت زمان کوتاه و وجود سیستم وصل مجدد، تاثیر ناچیزی بر دسترس‌پذیری دارند؛ از این رو، تنها خطاهای دائمی عناصر اصلی در نظر گرفته می‌شود [۴]. همانگونه که ذکر شد، برای تعیین شاخص‌های پایایی عناصر سامانه‌های انتقال توان با فناوری‌های EHVAC و HVDC از منابع و مراجع معتبر سود جسته می‌شود که در جای خود به آنها اشاره می‌شود.

الف - سامانه EHVAC

عناصر اصلی در سامانه انتقال توان EHVAC از دیدگاه پایایی شامل خطوط انتقال هوایی، ترانسفورماتورهای قدرت و کلیدهای قدرت می‌باشند [۴].

خطوط انتقال هوایی EHVAC: خطاهای دائمی خط عموماً به دلیل آسیب دیدن مقرها یا بریده‌شدن هادی‌ها به دلیل بارگذاری سنگین یخ و نیز صدمه دیدن برج‌ها با رخداد‌های طبیعی نظیر سیل و طوفان ایجاد می‌شوند. می‌توان گفت ده درصد از کل خطاهای خط EHVAC، دائمی است [۷و۶،۵]. با فرض مقدار نوعی نرخ خطای گذرا برابر با $0/3$ خطا در 100 کیلومتر در سال، نرخ خطای دائمی $0/03$ بار در 100 کیلومتر در سال خواهد بود. [۸و۵] همچنین مدت زمان تعمیرات از چند ساعت تا چند روز یا چند هفته تغییر می‌کند. مقدار متوسط مدت زمان نگهداری حدود 24 ساعت است.

خطاهای خط EHVAC ممکن است به خطاهای تک‌فاز و خطاهای چندفاز و همچنین، تک‌مداره یا دو مداره تقسیم شوند. معمولاً بیش از 95% خطاهای خط EHVAC تک‌فاز هستند [۸]؛ خطاهای چندفاز کمتر از 5% گزارش شده است. از سوی دیگر منابع بالقوه خطاهای خطوط دو مداره، خطاهای موقتی حاصل از صاعقه یا خطاهای دائمی مرتبط با آسیب برج ناشی از شرایط آب و هوایی سخت هستند. خرابی خط ناشی از آسیب برج در نواحی با آب و هوای سخت، متناظر با نرخ‌های خطا بین $0/005$ و $0/025$ بار در 100 کیلومتر در سال است. لکن برای خطوط در نواحی دیگر که تحت شرایط آب و هوایی سخت نباشند، می‌تواند حدود $0/003$ در 100 کیلومتر در سال، با مدت زمان تعمیرات حدود یک هفته (168 ساعت) باشد

⁵ Expected Energy Not Supplied

در دو فناوری EHVAC² و HVDC³ از دیدگاه پایایی معرفی و با بررسی شاخص‌های پایایی برای این دو فناوری، رویه ارزیابی پایایی هر یک از این دو سامانه ارائه می‌شود و به کمک آن کربدوره‌هایی که در مطالعات امکان‌سنجی برای ایران حاصل گردیده‌اند، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲. پایایی سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا

یکی از چالش‌های مهم بکارگیری کربدوره‌های انتقال توان با ظرفیت بالا، خطرپذیری از دست رفتن آن و نتیجتاً از دست رفتن حجم بالایی از انتقال توان و احتمال از دست دادن پایداری شبکه می‌باشد. از سوی دیگر، ضرر ناشی از انرژی تغذیه‌نشده نیز خود موجب ضرر و هزینه اقتصادی خواهد بود. به همین دلیل لازم است برآورد درستی از پایایی سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا که کربدوره‌های انتقال توان بر مبنای آنها شکل می‌گیرند، داشت تا بتوان مصالحه اقتصادی مناسبی از میزان تقویت و بهبود لازم در عناصر سامانه و نیز میزان بهبود روند تعمیر و نگهداری سامانه در مقابل انرژی از دست رفته ناشی از وقوع خرابی در آن داشت. این موضوع در منابع علمی متعددی مورد بررسی قرار گرفته است و خصوصاً در کشورهای نظیر ایالات متحده آمریکا، چین، برزیل و هند که از این کربدورها استفاده می‌کنند، مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. در [۱] روشی برای پایایی خط انتقال برای سامانه UHV⁴ با تاکید بر خرابی برج‌های خط انتقال ارائه شده است. در [۲] مقایسه‌ای بین دو فناوری AC و DC برای سامانه انتقال توان با ظرفیت بالا از دیدگاه پایایی شده است.

از سوی دیگر یکی از چالش‌هایی که برای مطالعات پایایی سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا و پیش از استقرار آنها وجود دارد، عدم وجود داده‌های آماری و تاریخی لازم برای ارزیابی شاخص‌های پایایی برای تک‌تک عناصر و سامانه می‌باشد. به همین خاطر در این مقاله با استناد به داده‌های جمع‌آوری و معرفی شده در منابع معتبر، این داده‌ها برای تحلیل‌های مورد نظر بکار گرفته شده‌اند. از این رو در این مقاله برای بررسی کربدوره‌های پیشنهادی برای ایران از دیدگاه پایایی، تمرکز بر دو فناوری پایه‌ای EHVAC با سطح ولتاژ 765 kV و HVDC با سطوح ولتاژ 500 و 800 کیلوولت که اطلاعات آن در دسترس بوده، قرار گرفته است.

جامع‌ترین استاندارد موجود برای شاخص‌های پایایی، استاندارد IEEE1366 بوده که در آن تمامی تعاریف مورد نیاز برای محاسبه این شاخص‌ها و نحوه محاسبه آنها ارائه شده است [۳]. در میان شاخص‌های

² Extra High Voltage AC

³ High Voltage DC

⁴ Ultra High Voltage

سامانه برای مطالعات پایایی عبارتند از: خطوط هوایی HVDC، ایستگاه‌های مبدل HVDC، ترانسفورماتورهای مبدل HVDC و کلیدهای قدرت HVDC [۴]. در ادامه آمار خروج هر یک از تجهیزات مؤثر در سامانه HVDC تشریح می‌گردد:

خطوط هوایی HVDC: در صورتی که ویژگی‌های خاص خطوط HVDC مدنظر باشند، ممکن است آمار خطاهای در دسترس برای EHVAC، برای خطوط HVDC هم به کار برده شوند. انتظار می‌رود نرخ خطاهای تک‌قطبی موقت تا حدودی بالاتر از نرخ خطاهای تک‌فاز بر روی خطوط EHVAC باشد. دلیل این امر به ریسک بالاتر قوس برگشتی در مقرها برای قطب مثبت برمی‌گردد و زمانی ایجاد می‌شود که صاعقه با بار منفی به برج اصابت می‌کند. این اثر را می‌توان دلیلی برای افزایش نرخ خطاهای متوسط از حدود ۰/۳ به حدود ۰/۴ خطا در هر ۱۰۰ کیلومتر خط در سال دانست. با فرض نسبت ۱۰٪ از خطاهای دائمی در برابر خطاهای موقت، برای خطوط HVDC نیز ممکن است نرخ خطاهای تک‌قطبی دائمی به ۰/۰۴ خطا در ۱۰۰ کیلومتر در سال، با مدت زمان نگهداری تخمینی برابر ۲۴ ساعت برسد. علاوه بر این، ریسک خطاهای دوقطبی دائمی باید مشابه ریسک خطاهای دومداره دائمی خطوط EHVAC، یعنی ۰/۰۰۳ خطا در ۱۰۰ کیلومتر در سال با مدت زمان نگهداری تخمینی حدود یک هفته (۱۶۸ ساعت) باشد. به استناد گزارش CIGRE، مانند خطوط EHVAC، فرض شده که کلیه نگهداری‌های خطوط HVDC حین کار دائم انجام گیرد و هیچ خروجی برای نگهداری برنامه‌ریزی شده مورد نیاز نیست [۴].

ایستگاه‌های مبدل HVDC: برای تخمین آمار خروج‌های مبدل‌های VSC، از آماری که توسط CIGRE برای سامانه‌های HVDC معمولی منتشر شده است، استفاده می‌شود [۱۴و۱۵]. جدیدترین بررسی جامع پایایی سیستم‌های HVDC در کل دنیا به سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ برمی‌گردد [۱۴و۱۵]. این بررسی شامل ۳۴ طرح HVDC تک‌قطبی و دوقطبی با آمار خروج گزارش شده برای دسته‌بندی عناصر اصلی شامل تجهیزات AC، شیرها، سامانه کنترل و حفاظت، تجهیزات DC، خط انتقال و عناصر دیگر است. برای تخمین آمار خروج‌ها برای مبدل‌های VSC، خروج‌های گزارش شده برای تجهیزات AC، خطوط انتقال و دیگر سامانه‌ها در نظر گرفته نشده است. مدت زمان و نرخ متوسط خروج‌ها برای دسته‌بندی‌های دیگر در جدول (۲) نشان داده شده است. [۴] باید دقت کرد که در هر انتهای هر قطب HVDC، یک مبدل وجود دارد [۴]. اطلاعاتی در مورد مد خطای غالب برای مبدل‌های HVDC دوقطبی در دسترس نیست، ولی فرض منطقی آن است که ۱۰٪ از خروج‌ها را به سامانه کنترل و حفاظت و ۵٪ را

[۴]. در این مقاله فرض می‌شود که نگهداری همه خطوط حین کار انجام می‌شود و برای نگهداری برنامه‌ریزی شده نیازی به خروج خط نیست. [۴]

ترانسفورماتورهای قدرت EHVAC: جدیدترین آمارها از خطاهای ترانسفورماتورها را CIGRE منتشر نموده است [۹و۴] البته آماری برای ولتاژهای بالاتر از ۷۰۰ کیلوولت گزارش نشده است. در این بررسی‌ها در محدوده ولتاژ ۳۰۰ تا ۷۰۰ کیلوولت و برای بیش از ۶۰۰۰ ترانسفورماتور در سال، تعداد خطاهای گزارش شده منجر به خروج‌های اجباری ۱۵۰ بار با نرخ خطای میانگین سالانه ۰/۰۲۴ بار در سال است. مدت زمان خروج گزارش شده با زمان متوسط نگهداری حدود ۹۰ روز (۲۱۶۰ ساعت)، پراکندگی زیادی را نشان می‌دهد.

کلیدهای قدرت EHVAC: در این زمینه هم می‌توان به آمار خطا برای کلیدهای قدرت ولتاژ بالای EHVAC توسط CIGRE رجوع کرد. [۱۰و۴] طبق بررسی صورت گرفته، با اطلاعات ۲۰۰۰ کلید قدرت در محدوده ولتاژ بالای ۵۰۰ کیلوولت، تعداد عمده خطاهای منجر به خروج‌های اجباری، ۳۹ بار در طول دوره است که نرخ خطای میانگین سالانه هم ۰/۰۲۰ بار در سال می‌باشد. مدت زمان خروج گزارش شده، مدت زمان نگهداری متوسط حدود ۲۰۰ ساعت را نشان می‌دهد.

اطلاعات عناصر مورد استفاده در محاسبات پایایی برای اتصال EHVAC در جدول (۱) به همراه دسترس‌ناپذیری^۶ عناصر (حاصلضرب نرخ خطا در مدت زمان تعمیر متناظر) خلاصه شده است. [۴]

جدول ۱: داده‌های عناصر استفاده شده برای اتصال EHVAC

عناصر	نرخ خروج (1/yr)	زمان تعمیرات (h)	دسترس‌ناپذیری (h/yr)
ترانسفورماتور	۰/۰۲۴	۲۱۶۰	۵۱/۸
کلید قدرت	۰/۰۲	۲۰۰	۴
۱۰۰۰ کیلومتر خط تک‌مداره	۰/۳	۲۴	۷/۲
۱۰۰۰ کیلومتر خط دومداره	۰/۰۳	۱۶۸	۵/۰

کربدوره‌های HVDC

امروزه برای طراحی سامانه HVDC چند آرایش وجود دارد که از شایع‌ترین آنها، آرایش مبدل کموتاتور خط (LCC^۷) و مبدل منبع ولتاژ خودکموتاتور (VSC^۸) می‌باشد. در حال حاضر آرایش VSC نسل جدید و غالب در مقایسه با آرایش LCC است و به دلیل مزایای فنی، برای توسعه سامانه انتقال توان HVDC مناسب‌تر است. از این‌رو در این مقاله، به سامانه HVDC بر اساس فناوری VSC پرداخته شده است [۴]. عناصر اصلی این

^۶ Unavailability (U)

^۷ Line Commutate Converter

^۸ Voltage Sourced Converter

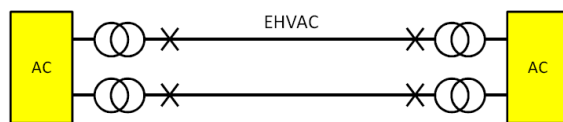
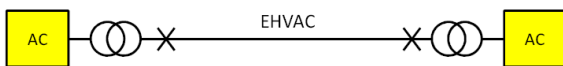
جدول ۳: داده‌های عناصر سامانه HVDC

عناصر	نرخ متوسط خطا (1/yr)		مدت متوسط خروج (h)	
	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۵	۲۰۰۶
شیرها	۱/۴	۱/۵	۳/۷	۲/۳
حفاظت و کنترل	۱/۷	۲/۱	۲/۰	۳/۹
تجهیزات DC	۱/۱	۰/۷	۵/۹	۶/۹
متوسط کلی	۴/۳		۴/۱	
متوسط هر مبدل	۱/۴			

سامانه‌های EHVAC

در شکل (۱) دو گزینه برای یک سامانه EHVAC نشان داده شده است:

- تک مداره (بالا): یک اتصال تک‌مداره بدون پشتیبان که در آن همه عناصر در ۱۰۰٪ ظرفیت سامانه ارزیابی می‌شوند.
- دو مداره (پایین): یک اتصال دو مداره که هر مدار پشتیبان دیگری است و هر عنصر در ۵۰٪ ظرفیت انتقال سامانه ارزیابی می‌شود.



شکل ۱: دو گزینه برای اتصال EHVAC نقطه به نقطه [۴]

سامانه تک‌مداره EHVAC

ظرفیت انتقال زمانی که هر عنصر در دسترس نباشد، صفر است [۴]:

$$P_0 = 2Q_{trans} + 2Q_{breaker} + Q_{line} \quad (1)$$

Q_{trans} ، $Q_{breaker}$ و Q_{line} دسترس‌ناپذیری به ترتیب ترانسفورماتور، کلید

قدرت و خط انتقال است. ظرفیت انتقال در بقیه زمان‌ها کامل است [۴]:

$$P_{100} = 1 - P_0 \quad (2)$$

سامانه دومداره EHVAC

در این حالت فرض بر این است که هر ترانسفورماتور و هر یک از دو مدار موازی ظرفیتی برابر با ۵۰٪ بیشترین ظرفیت انتقال داشته باشند.

با رخداد هر یک از موارد زیر ظرفیت انتقال سامانه صفر خواهد شد:

- هر دو مدار به دلیل یک خروج همزمان در دسترس نباشند.
 - هر دو مدار به دلیل خطای خط دومداره در دسترس نباشند.
- احتمال اینکه ظرفیت انتقال صفر باشد، عبارتست از [۴]:

$$P_0 = (2Q_{trans} + 2Q_{breaker} + Q_{line})^2 + Q_{line-cm} \quad (3)$$

$Q_{line-cm}$ دسترس‌ناپذیری خط به دلیل خطاهای دومداره است. ظرفیت انتقال

سامانه زمانی ۵۰٪ است که هر یک از موارد زیر روی دهد:

به نقص تجهیزات DC تخصیص داد [۴]. با این تسهیم برای نرخ خروج‌ها، مد خطای غالب به ترتیب برابر ۰/۰۶۳ بار در سال و ۰/۰۱۵ بار در سال به دست می‌آید. مدت زمان خروج‌های مربوطه برای این مد خطای غالب نیز دو برابر میزان مدت زمان خطاها برای یک مبدل یعنی حدود ۶ و ۱۲ ساعت است [۴].

جدول ۲: میانگین خروج اجباری برای مبدل‌های HVDC ۲۰۰۵-۲۰۰۶

عناصر	نرخ خطا (1/yr)	زمان تعمیر (h)	دسترس‌ناپذیری (h/yr)
ترانسفورماتور	۰/۰۲۴	۲۱۶۰	۵۱/۸
کلید قدرت	۰/۰۷۵	۳	۰/۲۳
مبدل	۴	۴/۱	۵/۷
مبدل، کنترل و حفاظت	۱/۴	۶	۰/۳۸
مبدل، عناصر DC	۰/۰۶۳	۱۲	۰/۱۸
خطای تک‌قطب ۱۰۰۰ کیلومتر خط	۰/۰۱۵	۲۴	۹/۶
خطای دو قطب ۱۰۰۰ کیلومتر خط	۰/۴	۱۶۸	۵/۰

ترانسفورماتورهای مبدل HVDC: برآورد منطقی این است که آمار خطاهای

ترانسفورماتورهای مبدل HVDC را می‌توان مانند ترانسفورماتورهای

EHVAC، یعنی نرخ خطای ۰/۰۲۴ بار در سال با مدت زمان متوسط

نگهداری ۲۱۶۰ ساعت در نظر گرفت [۴].

کلیدهای قدرت HVDC: پیش‌بینی می‌شود که اولین نوع کلیدهای قدرت

برای شبکه‌های HVDC بر پایه فناوری IGBT باشد. از آنجا که این کلیدها

هنوز در حال توسعه هستند، تخمین شاخص پایایی برای آنها مشکل است.

در این فناوری، کلید از یک IGBT تشکیل شده است. در حالی که

مبدل‌های VSC از شش شیر IGBT مشابه تشکیل شده‌اند. علاوه بر این،

سیستم کنترل و حفاظت برای کلید بسیار ساده‌تر از مبدل‌های VSC خواهد

بود. بنابراین، به عنوان اولین تقریب، پیشنهاد شده که پایایی تخمینی برای

کلیدها بر اساس پایایی مورد انتظار شیرهای IGBT انجام شود. مطابق

جدول (۲) مشاهده می‌شود که نرخ خروج متوسط برای شیرهای HVDC

حدود ۱/۵ بار در سال با مدت زمان خروج متوسط حدود ۳ ساعت است. با

تسهیم نرخ خروج به همان روشی که برای مبدل‌ها انجام شد، نرخ خروج

مورد انتظار برای یک کلید IGBT حدود ۰/۰۷۵ بار در سال می‌شود [۴].

اطلاعات عناصر مورد استفاده در محاسبات پایایی برای سامانه HVDC در

جدول (۳) خلاصه شده است [۴].

۳.۱. شناسایی موده‌های غالب

در ادامه، دسترس‌ناپذیری (Q) تک‌تک عناصر، برای تخمین احتمال ظرفیت

در دسترس انتقال توان (P) برای سامانه‌های گوناگون، محاسبه می‌شود.

احتمال اینکه ظرفیت انتقال صفر باشد، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۴]:

(۸)

$$P_0 = (2Q_{trans.} + 2Q_{converter} + 2Q_{breaker} + Q_{line})^2 + 2Q_{C\&P-cm} + 2Q_{dcE-cm} + Q_{line-cm}$$

که در آن QC&P-cm دسترس‌ناپذیری کنترل و حفاظت و QdcE-cm

دسترس‌ناپذیری تجهیزات DC است.

ظرفیت انتقال زمانی ۵۰٪ است که هر یک از موارد زیر رخ دهد:

هر یک از چهار ترانسفورماتور در دسترس نباشد.

هر یک از چهار کانورتر در دسترس نباشد.

هر یک از چهار کلید قدرت در دسترس نباشد.

هر یک از دو خط در دسترس نباشد.

احتمال اینکه ظرفیت انتقال ۵۰٪ باشد برابر است با [۴]:

$$P_{50} = 4Q_{trans.} + 4Q_{converter} + 4Q_{breaker} + 2Q_{line} \quad (9)$$

و احتمال اینکه ظرفیت انتقال کامل باشد، عبارتست از [۴]:

$$P_{100} = 1 - P_{50} - P_0 \quad (10)$$

۳.۲. الگوریتم محاسبه شاخص پایایی

از شاخص‌های مختلفی می‌توان برای ارزیابی پایایی کربدورهای انتقال توان

با ظرفیت بالا بهره برد. در این مقاله تمرکز بر روی دو شاخص EENS و U

می‌باشد. رابطه (۱۱) برای محاسبه این دو شاخص بکار می‌رود. شکل (۳)

الگوریتم ارزیابی پایایی کربدورهای سامانه‌های انتقال توان را نشان می‌دهد.

(۱۱)

$$(EENS)_{corridor-type} = \left(\frac{n}{n} \times Power \times P_0\right) + \left(\frac{n-1}{n} \times Power \times P_{\left(\frac{1}{n} \times 100\right)}\right) + \dots + \left(\frac{2}{n} \times Power \times P_{\left(\frac{n-2}{n} \times 100\right)}\right) + \left(\frac{1}{n} \times Power \times P_{\left(\frac{n-1}{n} \times 100\right)}\right) + (0 \times Power \times P_{100})$$

$$(U)_{corridor-type} = \frac{P_0 + \left(\frac{n-1}{n} \times P_{\left(\frac{1}{n} \times 100\right)}\right) + \left(\frac{n-2}{n} \times P_{\left(\frac{2}{n} \times 100\right)}\right) + \dots + \left(\frac{1}{n} \times P_{\left(\frac{n-1}{n} \times 100\right)}\right) + (0 \times P_{100})}{8760} \times 100$$

۴. تحلیل پایایی کربدورهای پیشنهادی ایران

طبق مطالعات مقدماتی انجام‌شده در [۱۵]، هشت کربدور محتمل برای

انتقال توان با ظرفیت بالا افق سال ۱۴۱۰ برای ایران شناسایی شده است.

مشخصات و ویژگی‌های اصلی این کربدورها در جدول (۴) آمده است. در

جدول (۱) و (۳)، اطلاعات مربوط به دسترس‌ناپذیری (U) برای هر یک از

انواع گزینه‌ها ارائه شده است. بر این اساس، در جدول (۴) برای هر یک از

کربدورهای شناسایی شده، انواع حالتی که از نظر فنی امکان‌پذیر می‌باشد،

ارائه گردیده [۱۶ و ۱۷] و برای هر یک از حالات محتمل میزان شاخص‌های

پایایی محاسبه شده است.

• هر یک از چهار ترانسفورماتور در دسترس نباشد.

• هر یک از چهار کلید قدرت در دسترس نباشد.

• هر یک از دو خط در دسترس نباشد.

احتمال اینکه ظرفیت انتقال ۵۰٪ باشد، برابر است با: [۴]:

$$P_{50} = 4Q_{trans.} + 4Q_{breaker} + 2Q_{line} \quad (4)$$

بنابراین ظرفیت انتقال کامل برابر است با: [۴]:

$$P_{100} = 1 - P_{50} - P_0 \quad (5)$$

سامانه‌های HVDC

بررسی‌های بسیاری بر روی پایایی سامانه‌های انتقال HVDC انجام گرفته

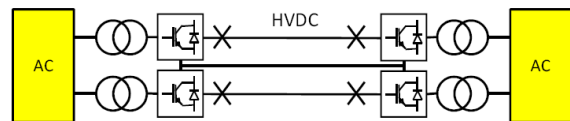
است. پایایی این سامانه‌ها به طراحی انجام شده بستگی دارد. در اکثر

مطالعات تنها پایایی سامانه‌های HVDC دوقطبی بررسی شده است.

برای سامانه HVDC، حالت دوقطبی در شکل (۲) نشان داده شده است. هر

قطب DC یک ترانسفورماتور و مبدل مجزا دارد. همچنین، فرض می‌شود که

هر قطب مجهز به یک کلید قدرت DC در هر انتهای خط باشد. [۴]



شکل ۲: یک اتصال HVDC دو قطبی نقطه به نقطه [۴]

HVDC تک قطبی تک‌مداره

ظرفیت انتقال زمانی که هر عنصر در دسترس نباشد، صفر است:

$$P_0 = (2Q_{trans.} + 2Q_{converter} + 2Q_{breaker} + Q_{line}) \quad (6)$$

Qtrans, Qbreaker, Qconverter, و Qline دسترس‌ناپذیری به ترتیب

ترانسفورماتور، کلید قدرت، مبدل و خط است. ظرفیت انتقال در بقیه زمان‌ها

کامل است:

$$P_{100} = 1 - P_0 \quad (7)$$

HVDC دو قطبی

ظرفیت انتقال سامانه زمانی صفر است که هر یک از موارد زیر اتفاق افتد:

هر دو قطب به دلیل خروج همزمان در دسترس نباشند، برای مثال یک

ترانسفورماتور در یک قطب و خط در قطب دیگر.

هر دو قطب به دلیل خطایی که هر دو قطب را تحت تاثیر قرار می‌دهد، در

دسترس نباشند.

هر دو قطب به دلیل یک مد خطای غالب در کنترل و حفاظت دو مبدل در

دسترس نباشند.

هر دو قطب به دلیل یک مد خطای غالب در تجهیزات DC، در دسترس

نباشند.

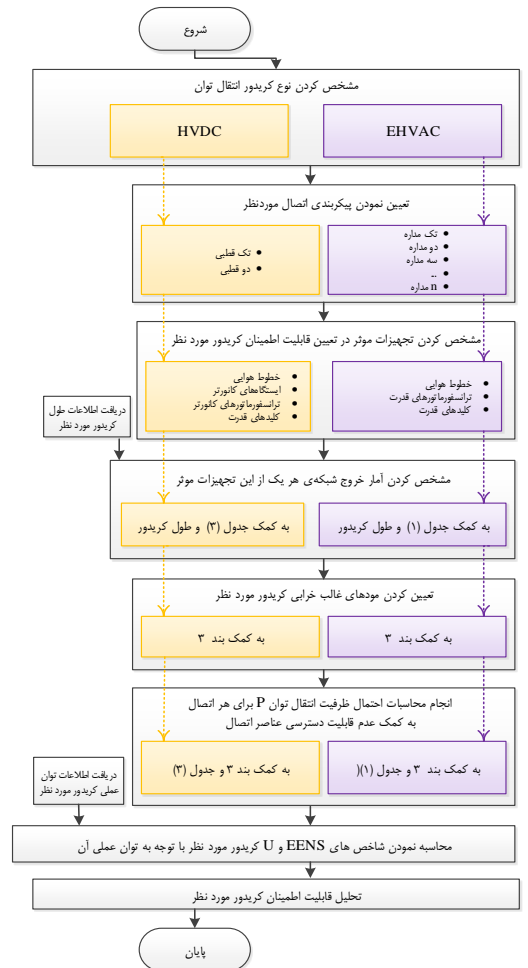
دیدگاه پایایی، سامانه 765 kV EHVAC است.

- در تمامی کریدورهای شناسایی شده در ایران، سه نوع سامانه تعیین شده برای هر کریدور، تفاوت چندانی از نظر شاخص پایایی با یکدیگر ندارند و بهره‌مندی از هر یک از انواع سامانه‌ها در سیستم انتقال، دغدغه پایایی برای سیستم قدرت نخواهد داشت.
 - همچنین در تمامی کریدورهای شناسایی شده بر خلاف انتظار، با اینکه تعداد مدارهای سامانه 765 kV کم‌تر از سامانه 400 kV است و با قطع تک‌مدار سامانه 765 kV ، توان بالایی از دسترس خارج خواهد شد، اما مشاهده می‌شود که در کلیه کریدورها، شاخص پایایی سامانه 765 kV بیشتر یا مساوی شاخص متناظر سامانه 400 kV است. دلیل این امر آن است که در سامانه 400 kV هر چند تعداد مدار افزایش یافته و ظاهراً باید شاخص پایایی سیستم بالاتر رود، اما به همان نسبت که تعداد مدار زیادتر شده، تعداد تجهیزات نیز افزایش یافته است و از این‌رو میزان شاخص پایایی در دو حالت مذکور تقریباً یکی است.
- بنابراین، طبق آنچه گفته شد با بهره‌مندی از هر یک از انواع سامانه‌های پیشنهادی در سیستم انتقال، شاخص‌های پایایی مقدار متعارفی دارند و برای انتخاب نهایی نوع سامانه برای کریدور پیشنهادی موردنظر می‌توان بدون دغدغه از اختلاف فاحش شاخص پایایی، تصمیم‌سازی مناسب را با تحلیل فنی-اقتصادی لازم برای کریدور برتر انجام داد.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در کنار مطالعات امکان‌سنجی لازم برای استفاده از فناوری انتقال توان با ظرفیت بالا، یکی از مسائل مهم و قابل تأمل با ورود این فناوری به سیستم انتقال، مبحث پایایی سیستم است که باید مورد توجه و بررسی قرار گیرد. در نگاه اول چنین به نظر می‌رسد که با قرار گرفتن حجم بالایی از انتقال توان بر روی یک سامانه در مقابل انتقال توان توسط چندین مدار موازی در سطوح ولتاژ پایین‌تر، خطرپذیری بیشتری برای این سامانه از دیدگاه پایایی وجود دارد. در این مقاله با بررسی رفتار کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا با دو فناوری EHVAC و HVDC از دیدگاه پایایی، الگوریتم جامعی برای محاسبه شاخص‌های ارزیابی سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا ارائه شد و سپس توسط این الگوریتم، کریدورهای شناسایی شده در ایران در افق ۱۴۱۰، مورد تحلیل قرار گرفت.

جمع‌بندی مناسبی که از این تحلیل بدست آمد، آن بود که بر خلاف انتظار، سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا از دیدگاه پایایی، شاخص‌هایی در حد سامانه‌های با سطوح ولتاژ کمتر دارند و لزوماً استفاده از تنها یک مدار با



شکل ۳: روندنمای ارزیابی پایایی کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا

- به عنوان مثال، برای کریدور زنجان - گیلان، که تحقق آن از نظر فنی با سه نوع فناوری امکان‌پذیر است، در صورتی که از سامانه HVDC دوقطبی استفاده شود، میزان شاخص EENS برابر 154696 kW.h/yr خواهد بود، یعنی $1.1/39\%$ از کل انرژی در بازه زمانی یک سال تامین نشده است. زمانی که از سامانه HVAC دومداره 400 kV استفاده شود، میزان EENS برابر $146961/2 \text{ kW.h/yr}$ می‌باشد و $1.1/32\%$ انرژی در بازه زمانی یک سال تامین نمی‌گردد و هنگامی که از اتصال EHVAC تک‌مداره 765 kV استفاده شود، میزان شاخص EENS برابر $143791/2 \text{ kW.h/yr}$ است و $1.1/29\%$ انرژی در بازه زمانی یک سال از دست رفته است. به عبارت دیگر، با توجه به شاخص پایایی، با بهره‌مندی از هر یک از انواع سامانه‌های پیشنهادی برای کریدور مذکور، پایایی سامانه در حد قابل قبول قرار دارد. با این وجود، از این دیدگاه اولویت نوع سامانه برای این کریدور به ترتیب سامانه EHVAC تک‌مداره 765 kV ، سامانه HVAC دومداره 400 kV و سامانه HVDC دوقطبی 500 kV است. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود:
- در تمامی کریدورهای موجود، مناسب‌ترین اتصال برای هر کریدور از

Reliability, Electra No.88, pp. 20-48, May 1983.

[10]- WG 13.06, "Final Report of the Second International Enquiry on High Voltage Circuit-Breaker Failures and Defects in Service", CIGRÉ 1994

[11]- Gerald T. Heydt, Kory Hedman, James D. McCalley, Dionysios Aliprantis, Mani Venkatsubramanian, "Electric Energy Challenges of the Future," PSERC Publication 12-11, May 2012

[12]- ZENG Qingyu, "Analysis on Reliability of UHVAC and UHVDC Transmission Systems", Power System Technology, Vol. 37 No. 10, Oct. 2013

[13]- Yunting Song, Wei Tang, Linna Zhang, Haitao Yang, Jingjing Wang, Ping Ji, Xiaofei Hu, Wenfei Liu, Xuxia Li, Cheng Yang, Ludeng Liu, "Adequacy and safety comprehensive evaluation for ultra-high voltage AC/DC mixed power grid", Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2016 International Conference on, Beijing, China, 16-20 Oct. 2016.

[14]- I Vancers et al., "A survey of the reliability of HVDC systems throughout the world during 2005 – 2006," Paper B4-119, CIGRÉ 2008.

[۱۵]- گزارش "بررسی و پیشنهاد نحوه شناسایی قطب‌های مازاد تولید و مصرف در کشور تا افق ۱۴۱۰ و تهیه نقشه مسیرهای بالقوه‌ی کربدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا"، مرکز توسعه فناوری سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا، پژوهشگاه نیرو، دی‌ماه ۱۳۹۵.

[۱۶]- گزارش "تدوین رویه مطالعات جبران‌سازی توان راکتیو، پایداری زاویه‌ای استاتیک و پایداری ولتاژ استاتیک کربدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا و پیاده‌سازی آن برای کربدورهای شناسایی شده در ایران"، مرکز توسعه فناوری سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا، پژوهشگاه نیرو، اردیبهشت ۱۳۹۶

[۱۷]- گزارش "تدوین رویه انتخاب نوع فناوری و مشخصات فنی آن برای کربدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا از جنبه‌ی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی و پیاده‌سازی آن برای کربدورهای شناسایی شده در ایران"، مرکز توسعه فناوری سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا، پژوهشگاه نیرو، اردیبهشت ماه ۱۳۹۶

ظرفیت بالا برای انتقال توان، نمی‌تواند منجر به کاهش شاخص پایایی و بالا رفتن خطرپذیری شبکه از نظر انرژی تغذیه‌نشده و خاموشی گردد.

۶. مراجع

[1]- Maohua Li, Zheng Li, Dengke Yu, "The System Reliability Analysis of 1000 kV UHV Transmission Tower Based on Moment Method", Elsevier, Energy Procedia, Volume 16, Part A, 2012

[2]- Y. Song, B. Fan, Y. Bai, X. Qin, Z. Zhang, "Reliability and Economic Analysis of UHV half-Wave-length AC Transmission", Transmission in IEEE International Conference on Power System (POWERCON), New Zealand, 2012

[3]- IEEE Standards Association. "IEEE 1366-2012-IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices." New York: IEEE (2012).

[4]- K. LINDÉN, B. JACOBSON, M.H.J. BOLLEN, and J. LUNDQUIST, "Reliability study methodology for HVDC grids," B4-108, Report of CIGRE 2010.

[5]- Huaxin Wang, Aiyu Chen, Jian Wang and Yongxi Zhao, "Reliability and Economic Comparison of Ultra-long-distance Transmission Mode," International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering (SEEE 2015), 2015

[6]- Grid Disturbance and Fault Statistics, Nordel, 2007.

[7]- J.A. Gillespie, G. Stapleton, "Improving Double Circuit Transmission Line Reliability Through Lightning Design," Paper B2-301, Cigré Session, Paris, 2004.

[8]- EPRI Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above, 3rd Ed., 2005.

[9]- Bossi, A. et al., "An international survey on failures in large power transformers in service", Final report of CIGRE Working Group 12.05:

جدول ۴: نتایج حاصل از ارزیابی پایایی کربدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا برای ایران

شماره	کربدور	طول خط (km)	توان عملی (MW)	حالات ممکن برای کربدور			شاخص قابلیت اطمینان	
				شماره	نوع اتصال	سطح ولتاژ (kV)	EENS (MWh/yr)	Unavailability (%)
۱	تبریز-زنجان	۳۱۵	۷۱۵	۱	تک مداره HVAC	۴۰۰	۸۱۵۱۰	٪ ۱/۳۰
				۲	تک مداره HVAC	۷۶۵	۸۱۵۱۰	٪ ۱/۳۰
				۳	تک قطبی تک مداره HVDC	۵۰۰	۸۴۶۹۸/۹	٪ ۱/۳۵
۲	زنجان-گیلان	۲۵۰	۱۲۶۸	۱	دو مداره HVAC	۴۰۰	۱۴۶۹۶۱/۲	٪ ۱/۳۲
				۲	تک مداره HVAC	۷۶۵	۱۴۳۷۹۱/۲	٪ ۱/۲۹
				۳	دو قطبی HVDC	۵۰۰	۱۵۴۶۹۶	٪ ۱/۳۹
۳	یوشهر-اصفهان	۶۱۵	۵۱۹۶	۱	دوازده مداره HVAC	۴۰۰	۶۹۵۷۵۳/۰۶	٪ ۱/۵۳
				۲	سه مداره HVAC	۷۶۵	۶۲۷۴۶۸/۹۶	٪ ۱/۳۸
				۳	دو قطبی HVDC	۸۰۰	۶۶۲۴۹۰	٪ ۱/۴۶
۴	خوزستان-تهران	۹۷۵	۲۸۷۸	۱	نه مداره HVAC	۴۰۰	۳۸۶۲۵۳/۱۸	٪ ۱/۵۳
				۲	سه مداره HVAC	۷۶۵	۳۵۸۱۲۹/۰۴	٪ ۱/۴۲
				۳	دو قطبی HVDC	۸۰۰	۳۸۲۷۷۴	٪ ۱/۵۲
۵	اصفهان-طیس	۵۷۰	۱۹۶۱	۱	پنج مداره HVAC	۴۰۰	۲۴۱۸۶۱/۹	٪ ۱/۴۱
				۲	تک مداره HVAC	۷۶۵	۲۲۶۸۸۷/۷	٪ ۱/۳۲
				۳	دو قطبی HVDC	۵۰۰	۲۴۹۰۴۷	٪ ۱/۴۵
۶	طیس-سمنان	۵۵۰	۳۰۳۷	۱	شش مداره HVAC	۴۰۰	۳۷۹۷۲۶/۲۳	٪ ۱/۴۳
				۲	دو مداره HVAC	۷۶۵	۳۶۳۵۲۸/۹	٪ ۱/۳۷
				۳	دو قطبی HVDC	۸۰۰	۳۸۵۶۹۹	٪ ۱/۴۵
۷	تهران-سمنان	۲۲۰	۲۷۰۹	۱	سه مداره HVAC	۴۰۰	۳۱۵۵۸۰/۴۴	٪ ۱/۳۳
				۲	تک مداره HVAC	۷۶۵	۳۰۶۶۵۸/۸	٪ ۱/۲۹
				۳	تک قطبی تک مداره HVDC	۸۰۰	۳۱۸۴۷۰	٪ ۱/۳۴
۸	سمنان-سازندران	۲۳۵	۱۸۴۰	۱	دو مداره HVAC	۴۰۰	۲۱۳۰۷۲	٪ ۱/۳۲
				۲	تک مداره HVAC	۷۶۵	۲۰۸۴۷۲	٪ ۱/۲۹
				۳	دو قطبی HVDC	۵۰۰	۲۲۴۴۸۰	٪ ۱/۳۹