

تبیین چشم‌انداز فناوری‌های HVDC و EHVAC برای ایران با توجه به کریدورهای اصلی انتقال توان الکتریکی در افق ۱۴۱۰

علی آرانی‌زاده، محمد جعفریان، همایون برهمندپور

مرکز توسعه فناوری سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

hberahmandpour@nri.ac.ir, mjafarian@nri.ac.ir, ali_arani@elec.iust.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به نیاز کشور به مصرف انرژی الکتریکی در آینده و همچنین محدود بودن انرژی تولید برق در نقاط خاص، نیاز به کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا بیش از پیش مورد نظر می‌باشد. در این میان شناخت فناوری هر یک از این کریدورها از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این مقاله، به شناخت ساختار دقیق کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا خواهیم پرداخت. مرجع [۱] کریدورهای شبکه برق ایران در افق ۱۴۱۰ را معرفی کرده است. لازم است در ادامه شناسایی این کریدورها، فناوری دستیابی به آن نیز مشخص گردد. برای این منظور سعی شده است در میان سه فناوری خطوط HVAC، EHVAC و HVDC متغیرهای تصمیم‌ساز بدست آید و براساس آن برای هر کریدور بهترین نوع فناوری تعیین گردد. این متغیرهای تصمیم‌ساز شامل شاخص‌های اقتصادی و قابلیت اطمینان خواهد بود.

قبل از بررسی و ارزیابی شاخص اقتصادی در مورد فناوری هر کریدور، ابتدا می‌بایست جنبه‌های دقیق فنی هر کریدور بدست آید و براساس آن برآورد اقتصادی هر کریدور مشخص گردد. با توجه به اینکه شرایط اقتصادی خطوط HVAC در ایران مشخص می‌باشد، لذا در ابتدا سعی می‌شود جنبه‌های فنی خط EHVAC مطرح گردد و در ادامه مقایسه دقیقتری میان این دو نوع فناوری بدست آید. مرجع [۲] وضعیت بکاری گیری خطوط UHVAC در جهان و بررسی شاخص‌های آن را بررسی کرده است. مراجع [۳] و [۴] به بررسی وضعیت خطوط انتقال الکتریکی با ظرفیت بالا در کشور چین پرداخته و شبکه این کشور را در آینده ترسیم

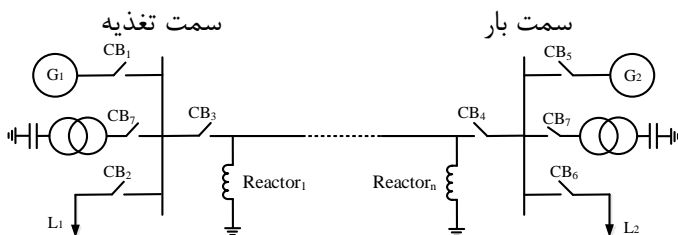
چکیده — با افزایش نیاز مصرف انرژی در کشور، برنامه‌ریزی و شناخت کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا نیز ضروری می‌نماید. با شناسایی این کریدورها، تعیین فناوری این خطوط از اهمیت بالایی برخوردار است. این فناوری‌ها شامل خطوط EHVAC با سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت و ۷۶۵ کیلوولت و خطوط HVDC فناوری‌های مدنظر ما می‌باشد که می‌بایست به‌ازای هر کریدور یکی از این فناوری‌ها برای آینده انتخاب گردد. در میان فناوری‌های گفته شده، خط ۷۶۵ کیلوولت در ایران ناشناخته‌تر می‌باشد که سعی شده است در ابتدا مشخصات فنی آن بررسی گردد و در نهایت با شناخت متغیرهای تصمیم‌ساز نظیر مسایل اقتصادی و قابلیت اطمینان، به چشم‌انداز موردنظر دست یافت. بر این اساس در این مقاله الگوریتمی برای انتخاب فناوری انتقال توان الکتریکی با ظرفیت بالا و پیاده‌سازی آن در ایران ارائه شده است. شبیه‌سازی‌های خطوط انتقال جهت جبرانسازی توان راکتیو توسط نرم‌افزار Dig Silent و کدنویسی‌های مربوط به بخش پایداری ولتاژ استاتیک توسط نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است.

واژه‌های کلیدی — کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا؛ خطوط EHVAC خطوط HVDC؛ چشم‌انداز شبکه برق؛ فناوری‌های کریدورهای انتقال توان

۳. تحلیل محدودیت‌های فنی کریدورهای

EHVAC انتقال توان با ظرفیت بالا

در وضعیت کلی، کریدور خطوط EHVAC مطابق شکل (۱) موردنظر می‌باشد. این کریدور از هر دو سمت تغذیه می‌گردد و در هر دو سمت نیز بار قرار خواهد داشت. این کریدور وابسته به طول و مقدار توان قابل عبور از آن، ممکن است دارای راکتورها و خازن‌های موازی باشد. مقدار راکتورها با توجه به شرایط بی‌باری تعیین شده و همواره روی خط خواهند بود. مقادیر خازن با توجه به شرایط بارداری مورد نیاز می‌باشند و در پست‌های اولیه و انتهایی به طرف سوم ترانسفورماتور (منظور ولتاژ پایین‌تر از شبکه) بهره‌برداری شده و همواره دارای کلید می‌باشد تا در شرایط بارداری متصل گردد. توجه شود بجای این خازن می‌توان از تجهیزات دیگر نظیر تزریق‌کنندگان توان راکتیو، کنترل ولتاژ یا tap ترانسفورماتور برای کنترل ولتاژ آن بهره برد.



شکل ۱: شمایی از کریدور انتقال توان با ظرفیت بالا به صورت دوسو تغذیه برای تحلیل این شبکه، دو وضعیت کلی بهره‌برداری شامل وضعیت نرمال^۱ و وضعیت هشدار^۲ در نظر می‌گیریم [۸]. در وضعیت نرمال که اکثر اوقات شبکه در این حالت بهره‌برداری می‌شود، قیود ولتاژ در محدوده $0.95 < V < 1.05$ بوده و در وضعیت هشدار که شبکه گاهی در این وضعیت بهره‌برداری می‌گردد، قیود ولتاژ می‌تواند تا محدوده $0.9 < V < 1.1$ نیز بهره‌برداری گردد.

برای بررسی شبکه در وضعیت نرمال، دو حالت کلی را مدنظر قرار می‌دهیم:

(۱) حالتی که باری از خط عبور نکند (No Load): این حالت با فرض دوسو تغذیه بودن شبکه (وضعیت نرمال) می‌باشد؛ لذا قیود مطرح در این حالت نیز شامل قید وضعیت نرمال خواهد بود.

کرده است. مرجع [۵] نیز این مفاهیم را در مورد شبکه کشور هند بررسی کرده است. مراجع [۶] و [۷] نیز به بررسی مفهوم بارپذیری خطوط انتقال با ظرفیت بالا پرداخته‌اند. در این مقاله نیز سعی شده است با بررسی مسائل فنی و ارائه الگوریتم منطقی، به شناسایی فناوری کریدورهای انتقال توان الکتریکی با ظرفیت بالا و پیاده‌سازی آن در ایران بپردازیم.

بر این اساس در بخش دوم این مقاله کریدورهای شناسایی شده در افق ۱۴۱۰ معرفی شده است. در بخش سوم تحلیل جامعی از محدودیت‌های فنی کریدورهای EHVAC آورده شده است. در ادامه و در بخش سوم این مقاله، الگوریتم جامع شناسایی متغیرهای تصمیم‌ساز در کریدورهای EHVAC و HVDC توضیح داده شده است و سپس هرکدام از این موارد به تفصیل توضیح داده شده است. این تحلیل جامع در انتها با بررسی شاخص قابلیت اطمینان و همچنین شاخص اقتصادی در خطوط EHVAC و HVDC، به مقایسه این دو فناوری برای اعمال بر کریدورهای انتخابی ایران می‌پردازد. پس از آن و در بخش پنجم مقاله الگوریتم ذکر شده روی کریدورهای ایران پیاده‌سازی شده است و در انتها نیاز نهایی فناوری کریدورهای برق ایران به عنوان مسیر پیش‌رو معرفی شده است.

۲. کریدورهای شناسایی شده برای افق ۱۴۱۰

با توجه به مطالعات انجام گرفته در [۱]، ۸ کریدور انتقال توان با ظرفیت بالا برای شبکه برق ایران پیشنهاد شده است. اطلاعات مربوط به این ۸ کریدور در جدول (۱) آورده شده است. مقادیر مسافت بین دو سمت کریدور و توان عملیاتی مورد نیاز برای هر کریدور نیز به تفکیک آمده است.

جدول ۱: کریدورهای پیشنهادی برای شبکه برق ایران [۱]

شماره کریدور	نام کریدور	مسافت بین دو کریدور (کیلومتر)	توان عملیاتی انتقالی کریدور (مگاوات)
۱	آذربایجان - زنجان	۳۱۵	۷۱۵
۲	طبرس - اصفهان	۵۷۰	۱۹۶۱
۳	خوزستان - تهران	۹۷۵	۲۸۷۸
۴	گیلان - زنجان	۲۵۰	۱۲۶۸
۵	سمنان - مازندران	۲۳۵	۱۸۴۰
۶	سمنان - تهران	۲۲۰	۲۷۰۹
۷	طبرس - سمنان	۵۵۰	۳۰۳۷
۸	بوشهر - اصفهان	۶۱۵	۵۱۹۶

¹ Normal State

² Alert State

شامل طول کریدور و توان عملیاتی مشخص می‌گردد. در ادامه با بدست آوردن ظرفیت پایداری زاویه‌ای استاتیک هر کریدور، اگر این مقدار جوابگوی توان عملیاتی بود، از کریدور تک مداره بهره می‌بریم و در غیر اینصورت به تعداد مدارهای موازی هر کریدور اضافه می‌کنیم تا بتواند توان عملیاتی موردنظر را عبور دهد. با مشخص شدن تعداد مدارهای کریدور، مقادیر و مکان راکتورهای هر خط را با توجه به وضعیت بی‌باری مشخص می‌کنیم. سپس با عبور دادن توان عملیاتی از خط، افت ولتاژ خط را بدست آورده و اگر این افت ولتاژ بیش از حد مجاز باشد، از تزریق کننده موازی توان راکتیو بهره می‌بریم. در قدم بعدی با مشخص شدن جبران‌سازهای موازی توان راکتیو، وضعیت پایداری ولتاژ استاتیک کریدور را بررسی کرده و در صورت ناپایداری در توان عملیاتی، از خازن جهت بهبود پایداری بهره می‌بریم. در این مرحله می‌توان مقدار ظرفیت هر خط را نیز مشخص کرد. در انتها با مشخص شدن ساختار فنی هر کریدور، می‌توان شاخص اقتصادی آن را بدست آورد و با مقایسه آن با شاخص قابلیت اطمینان، این دو شاخص را به عنوان متغیرهای تصمیم‌ساز برای انتخاب نوع فناوری هر کریدور اعمال کرد. جزئیات گفته شده در بالا در بخش بعدی به تشریح بیان شده است.

(۲) حالتی که بار کامل از خط عبور کند (Full load): این حالت نیز با فرض دوسو تغذیه بودن شبکه بوده و قیود مطرح در آن شامل قید وضعیت نرمال می‌باشد.

برای بررسی شبکه در وضعیت هشدار نیز دو حالت کلی را مدنظر قرار خواهیم داد:

(۳) خروج خط در سمت دوم (No Load): این حالت زمانی رخ می‌دهد که به فرض کلید CB4 عمل کرده و باعث خروج بار و ژنراتور در سمت بار گردد. لذا زمانیکه این وضعیت رخ دهد، هیچ باری از خط انتقال عبور نخواهد کرد و سبب افزایش ولتاژ در انتهای خط خواهد شد. با توجه به وضعیت هشدار، قیود مورد نظر در این بخش همان قیود وضعیت هشدار خواهد بود.

(۴) خروج ژنراتور در سمت دوم (Full load): این حالت نیز زمانی رخ می‌دهد که به فرض کلید CB5 عمل کرده و باعث خروج ژنراتور در سمت بار گردد. لذا زمانیکه این وضعیت رخ دهد، شبکه یکسو تغذیه شده و بار کامل از خط عبور خواهد کرد. با توجه به وضعیت هشدار، قیود مورد نظر در این بخش نیز همان قیود وضعیت هشدار می‌باشد.

مقادیر پارامترهای خط انتقال ۷۶۵ و ۴۰۰ کیلوولت براساس [۸] محاسبه شده است.

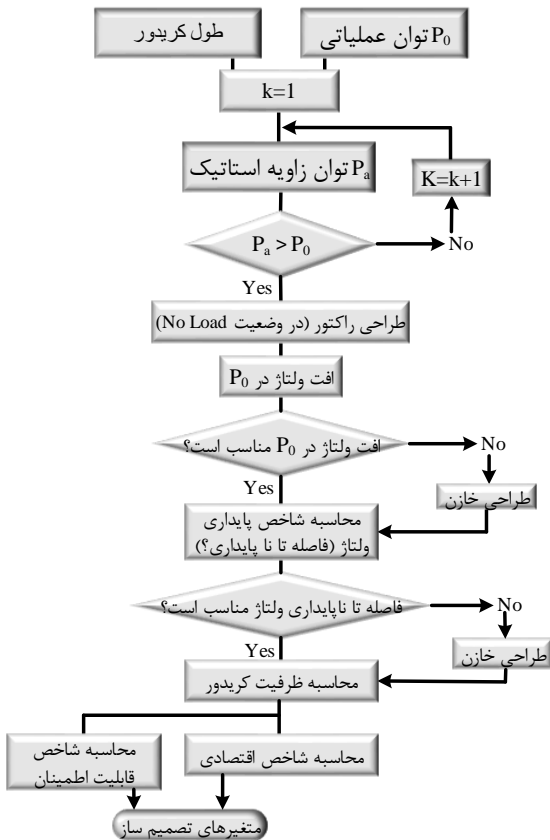
۴. شناسایی متغیرهای تصمیم‌ساز کریدورهای انتقال توان

در این بخش به شناسایی متغیرهای تصمیم‌ساز جهت شناسایی فناوری کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا می‌پردازیم. توجه شود شاخص اصلی در شناسایی فناوری موردنظر، مقایسه میان شاخص اقتصادی و قابلیت اطمینان در هر نوع فناوری می‌باشد. این دو عامل برای خطوط HVDC با توجه به مراجع ذکر شده مشخص خواهد شد. برای خطوط EHVAC نیز می‌بایست وضعیت خطوط شامل راکتورها و خازن‌ها را نیز بررسی کرد. در ادامه این روند ذکر خواهد شد.

۴.۱. شناسایی متغیرهای تصمیم‌ساز کریدورهای

انتقال توان EHVAC

الگوریتم کلی شناسایی ساختار فنی کریدورهای انتقال توان EHVAC در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق این شکل ابتدا مشخصات کریدور



شکل ۲: الگوریتم جامع شناسایی متغیرهای تصمیم‌ساز خطوط EHVAC

۴,۱,۱. پایداری زاویه‌ای استاتیک

حداکثر توان قابل انتقال از خط AC با توجه به محدودیت زاویه‌ای استاتیک مطابق رابطه (۱) بدست خواهد آمد [۹]:

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \sin(\delta) \quad (1)$$

در رابطه فوق، P توان انتقالی از خط انتقال، V_1 و V_2 به ترتیب ولتاژ ابتدا و انتهای خط انتقال، X' راکتانس خط انتقال با توجه به مدل پراکنده خط انتقال و δ اختلاف زاویه بین ولتاژ ابتدا و انتهای خط می‌باشد. معمولاً به منظور هماهنگی با رله‌ها و وجود یک حاشیه اطمینان، خطوط با میزان زاویه قدرت ۳۰ درجه بهره‌برداری می‌شوند [۱۰]. با توجه به رابطه (۱) و اعمال آن روی هشت کریدور موردنظر، می‌توان مقدار توان قابل عبور به‌ازای محدودیت زاویه‌ای استاتیک را بدست آورد. جدول (۲) نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. همچنین تعداد مدارهای هر کریدور برای انتقال توان عملیاتی بدست آمده است که در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): نتایج نهایی حاصل از محدودیت زاویه‌ای استاتیک در سطح ولتاژ

۷۶۵ و ۴۰۰ کیلوولت

شماره کریدور	نام کریدور	توان عملیاتی بین دو کریدور (مگاوات)		ظرفیت با توجه به محدودیت زاویه‌ای استاتیک / تعداد مدار	
		۷۶۵ کیلوولت	۴۰۰ کیلوولت	۷۶۵ کیلوولت	۴۰۰ کیلوولت
۱	آذربایجان - زنجان	۷۱۵	۱ / ۸۴۶	۱ / ۳۴۵۲	۱ / ۸۴۶
۲	طیس - اصفهان	۱۹۶۱	۵ / ۴۸۸	۱ / ۱۹۹۲	۵ / ۴۸۸
۳	خوزستان - تهران	۲۸۷۸	۹ / ۳۲۳	۳ / ۱۳۱۹	۹ / ۳۲۳
۴	گیلان - زنجان	۱۲۶۸	۲ / ۱۰۵۹	۱ / ۴۳۲۰	۲ / ۱۰۵۹
۵	سمنان - مازندران	۱۸۴۰	۲ / ۱۱۲۵	۱ / ۴۵۸۹	۲ / ۱۱۲۵
۶	سمنان - تهران	۲۷۰۹	۳ / ۱۲۰۰	۱ / ۴۸۹۶	۳ / ۱۲۰۰
۷	طیس - سمنان	۳۰۳۷	۷ / ۵۰۴	۲ / ۲۰۵۶	۷ / ۵۰۴
۸	بوشهر - اصفهان	۵۱۹۶	۱۲ / ۴۵۷	۳ / ۱۸۶۶	۱۲ / ۴۵۷

۴,۱,۲. تعیین راکتورهای موازی خط انتقال در وضعیت بی-

EHVAC باری برای خطوط

در این بخش، با توجه به کریدورهای پیشنهاد شده در ایران و همچنین تعداد مدارهای هر خط، مکان و اندازه راکتورهای هر خط را بدست خواهیم آورد. برای شناسایی راکتورهای خطوط، می‌بایست مطالعات را در حالت بی‌باری انجام دهیم [۱۱-۱۴]. برای این منظور، ابتدا وضعیت سوم گفته شده در بخش ۳ (بی‌باری در وضعیت هشدار) را مورد بررسی قرار می‌دهیم و راکتورهای هر کریدور را تعیین می‌کنیم؛ سپس با راکتورهای شناسایی شده، وضعیت اول (بی‌باری در وضعیت نرمال) را نیز می‌سنجیم تا جبران‌سازی در این وضعیت نیز تأیید گردد. توجه شود کلیه شبیه‌سازی‌های انجام شده در

این بخش با توجه به نرم‌افزار Dig Silent صورت گرفته است. نتایج نهایی راکتورهای بدست آمده در هر ۸ کریدور موجود در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): نتایج نهایی راکتورهای کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا

شماره	نام کریدور	راکتورهای پیشنهاد شده (مگاوار)
۱	آذربایجان - زنجان	$Q_R=0$
۲	طیس - اصفهان	$Q_R=200$
		$Q_R-m=300$
۳	خوزستان - تهران	$Q_{R-1/3-1}=550$
		$Q_{R-1/3-2}=550$
		$Q_{R-2/3-3}=550$
۴	گیلان - زنجان	$Q_{R-2/3-1}=550$
		$Q_{R-2}=500$
		$Q_{R-1}=500$
۴	گیلان - زنجان	$Q_R=0$
۵	سمنان - مازندران	$Q_R=0$
۶	سمنان - تهران	$Q_R=0$
۷	طیس - سمنان	$Q_{R-m-2}=250$
		$Q_{R-m-1}=250$
۸	بوشهر - اصفهان	$Q_{R-2}=175$
		$Q_{R-1}=175$
		$Q_{R-m-2}=325$
		$Q_{R-m-2}=325$
		$Q_{R-1}=325$
		$Q_{R-2}=275$
		$Q_{R-1}=275$

۴,۱,۳. تحلیل در وضعیت بارداری و تعیین پایداری ولتاژ

EHVAC خطوط

در این بخش به بررسی کریدور در وضعیت بارداری کامل می‌پردازیم. ابتدا بار عملیاتی هر کریدور را عبور می‌دهیم، در صورتی که این بار سبب افت ولتاژ بیشتر از محدوده تعیین شده باشد، نیاز به خازن‌گذاری خواهیم داشت. در قدم بعدی با جبران‌سازهای موازی بدست آمده، وضعیت پایداری ولتاژ استاتیک را بدست می‌آوریم و مجدد اگر کریدور ناپایدار بود، خازن موازی قرار می‌دهیم تا خط را به سمت پایداری سوق دهد.

۴,۱,۳,۱. تعیین خازن موازی هر کریدور با توجه به

وضعیت بارداری خط

در این بخش مقدار توان عملیاتی هر کریدور را عبور می‌دهیم و سپس وضعیت پروفیل ولتاژ آن را بررسی می‌کنیم [۱۵]. نتایج نهایی خازن‌های بدست آمده در هر ۸ کریدور موجود در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): نتایج نهایی خازن‌های کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا

شماره کریدور	نام کریدور	مقدار خازن موازی در پست کریدور
۱	آذربایجان - زنجان	$Q_C = 0$ Mvar
۲	طیس - اصفهان	$Q_C = 75$ Mvar
۳	خوزستان - تهران	$Q_C = 0$ Mvar
۴	گیلان - زنجان	$Q_C = 0$ Mvar
۵	سمنان - مازندران	$Q_C = 0$ Mvar
۶	سمنان - تهران	$Q_C = 0$ Mvar
۷	طیس - سمنان	$Q_C = 0$ Mvar
۸	بوشهر - اصفهان	$Q_C = 0$ Mvar

وضعیت پایداری ولتاژ استاتیک در این بخش با در نظرگیری راکتورها و خازن‌های موازی بدست آمده است. نتایج نهایی این بخش در جدول (۵) نشان داده شده است.

۴،۱،۴. تعیین ظرفیت هر کریدور

برای بدست آوردن ظرفیت توان انتقالی از کریدورهای شناسایی شده ایران، از اطلاعات بدست آمده از هر کریدور استفاده می‌کنیم. سپس مقدار توان عبوری از هر خط را تا جایی افزایش می‌دهیم تا محدودیت‌های زیر در آن رعایت گردد:

(۱) محدودیت توان زاویه‌ای استاتیک

(۲) محدودیت توان ولتاژ استاتیک

(۳) محدودیت پروفیل ولتاژ در وضعیت نرمال

(۴) محدودیت پروفیل ولتاژ در وضعیت هشدار

در نهایت می‌توان نتایج این بخش را در جدول (۶) نشان داد.

جدول (۶): نتایج نهایی تعیین ظرفیت هر کریدور

شماره کریدور	نام کریدور	ظرفیت نامی کریدور (مگاوات)
۱	آذربایجان - زنجان	۳۰۵۰
۲	طیس - اصفهان	۱۹۶۱
۳	خوزستان - تهران	۳۲۵۰
۴	گیلان - زنجان	۳۶۰۰
۵	سمنان - مازندران	۳۷۵۰
۶	سمنان - تهران	۳۹۵۰
۷	طیس - سمنان	۳۹۵۰
۸	بوشهر - اصفهان	۵۲۵۰

۴،۲. شاخص اقتصادی خطوط EHVAC و HVDC

با توجه به کریدورهای بدست آمده و بررسی‌های فنی انجام گرفته روی هر کدام، می‌توان شاخص اقتصادی مرتبط با کریدور را با توجه به احداث خطوط EHVAC و HVDC مشخص کرد. این هزینه شامل هزینه احداث خط، پست، بهره‌برداری و جبران‌سازی توان راکتیو مرتبط با خطوط AC می‌باشد که برحسب میلیون دلار بیان شده است [۱۶]. با پیاده‌سازی هزینه اقتصادی گفته شده روی هر ۸ کریدور شناسایی شده و با توجه به مشخصات فنی گفته شده، تصمیم‌سازی برای اینکه کدام فناوری منتخب می‌باشد انجام خواهد گرفت.

۴،۱،۳،۲. بررسی پایداری ولتاژ استاتیک با توجه به وضعیت

بارداری خط

برای تدوین رویه بررسی پایداری ولتاژ استاتیک، از شاخص Q-V بهره گرفته شده است. همانطور که می‌دانیم ارتباط بین توان اکتیو و توان راکتیو با اندازه ولتاژ و زاویه ولتاژ بر اساس رابطه (۲) بیان خواهد شد [۸].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2)$$

به طوریکه ΔP تغییر افزایشی در توان اکتیو باس، ΔQ تغییر افزایشی در توان راکتیو تزریقی به باس، $\Delta \theta$ تغییر افزایشی در زاویه ولتاژ باس و ΔV تغییر افزایشی در اندازه ولتاژ باس می‌باشد.

رابطه (۲)، المان‌های ماتریس ژاکوبین، حساسیت بین توان جاری شده و تغییرات ولتاژ را نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان ارتباط بین تغییرات توان راکتیو تزریقی و اندازه ولتاژ باس را بصورت رابطه (۳) بیان نمود.

$$\Delta Q = J_R \cdot \Delta V \quad (3)$$

به طوریکه:

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] \quad (4)$$

در رابطه فوق، J_R ماتریس ژاکوبین کاهش یافته سیستم می‌باشد. در حقیقت این ماتریس، شیب منحنی Q-V را نشان می‌دهد. با محاسبه این مقدار می‌توان نشان داد شبکه دارای پایداری ولتاژ استاتیک می‌باشد یا خیر. به گونه‌ای که در صورت مثبت بودن این مقدار، شبکه پایدار بوده و در صورت منفی بودن این مقدار، شبکه ناپایداری ولتاژ دارد. یعنی می‌توان گفت:

$$J_R > 0 \Rightarrow \text{Voltage is Stable} \quad (5)$$

$$J_R < 0 \Rightarrow \text{Voltage is Unstable}$$

جدول (۵): نتایج نهایی پایداری ولتاژ استاتیک

شماره کریدور	نام کریدور	J_R به ازای عبور توان عملیاتی	وضعیت پایداری / فاصله تا ناپایداری ولتاژ (مگاوات)	بیشترین توان به ازای پایداری ولتاژ (مگاوات)
۱	آذربایجان - زنجان	۶۷،۸۲	پایدار / ۲۷۸۰	۳۴۹۵
۲	طیس - اصفهان	۱۵،۹۷	پایدار / ۱۲۹	۲۰۹۰
۳	خوزستان - تهران	۴۶،۳۴	پایدار / ۷۵۷	۳۶۳۵
۴	گیلان - زنجان	۵۳،۷۲	پایدار / ۳۰۱۲	۴۲۸۰
۵	سمنان - مازندران	۸۴،۹۴	پایدار / ۲۶۹۰	۴۵۳۰
۶	سمنان - تهران	۸۳،۷۴	پایدار / ۲۱۰۶	۴۸۱۵
۷	طیس - سمنان	۳۳،۷۶	پایدار / ۱۲۲۳	۴۲۶۰
۸	بوشهر - اصفهان	۳۱،۷۶	پایدار / ۵۰۹	۵۷۰۵

۴.۳. شاخص قابلیت اطمینان خطوط EHVAC و

HVDC

آنچه به عنوان قابلیت اطمینان در این مقاله مدنظر می‌باشد، تعیین مقدار انرژی مورد انتظار توزیع نشده (EENS) برای خطوط مختلف شامل

HVAC، EHVAC و HVDC می‌باشد و با توجه به اینکه تجهیزات و ساختار هر کدام از این خطوط مختلف می‌باشد، لذا شاخص مقدار EENS برای هر یک از آنها متفاوت خواهد بود. تعیین این شاخص در مراجع [۱۷] به تفصیل آورده شده است.

جدول (۷): بررسی جنبه‌های مختلف کریدورهای انتقال توان شناسایی شده در ایران

فناوری منتخب	متغیرهای تصمیم‌ساز			هزینه‌ها (میلیون دلار) (MUSD)			مشخصات فنی کریدور			نام کریدور	شماره کریدور
	EENS	ظرفیت نامی	مجموع هزینه	بهره‌برداری	احداث خط	احداث پست	تعداد مدار	سطح ولتاژ	فناوری		
۴۰۰ کیلوولت HVAC	۸۱,۵	۸۴۶	۳۷۷	۳۳	۲۷۰	۷۴	۱	۴۰۰	HVAC	آذربایجان- زنجان	۱
	۸۱,۵	۳۰۵۰	۶۹۸	۶۳	۵۱۰	۱۲۵	۱	۷۶۵	EHVAC		
	۸۴,۷	۹۲۰	۸۶۸	۱۴۴	۲۱۹	۵۰۵	۱	۵۰۰	HVDC		
۷۶۵ کیلوولت EHVAC	۲۴۱,۸	۲۴۴۰	۲۵۸۹	۲۴۰	۲۰۳۹	۳۱۰	۵	۴۰۰	HVAC	طیس-اصفهان	۲
	۲۲۶,۸	۱۹۶۱	۱۲۲۲	۱۱۱	۸۹۵	۲۱۶	۱	۷۶۵	EHVAC		
	۲۴۹	۲۳۲۰	۱۲۹۱	۲۱۵	۵۴۷	۵۲۹	۲	۵۰۰	HVDC		
۸۰۰ کیلوولت HVDC	۳۸۶,۲	۲۹۰۷	۷۲۵۶	۶۵۹	۶۱۳۷	۴۶۰	۹	۴۰۰	HVAC	خوزستان-تهران	۳
	۳۵۸,۸	۳۲۵۰	۵۱۶۶	۴۶۹	۴۲۲۷	۴۷۰	۳	۷۶۵	EHVAC		
	۳۸۲,۷	۴۱۰۰	۲۳۱۴	۳۸۵	۱۲۱۰	۷۱۹	۲	۸۰۰	HVDC		
۴۰۰ کیلوولت HVAC	۱۴۶,۹	۲۱۱۸	۴۵۸	۴۱	۲۳۹	۷۸	۲	۴۰۰	HVAC	گیلان-زنجان	۴
	۱۴۳,۸	۳۶۰۰	۵۷۳	۵۲	۴۱۶	۱۰۵	۱	۷۶۵	EHVAC		
	۱۵۴,۷	۲۴۰۰	۸۹۶	۱۴۹	۲۳۸	۵۰۹	۲	۵۰۰	HVDC		
۴۰۰ کیلوولت HVAC	۲۱۳	۲۲۵۰	۴۶۰	۴۲	۳۲۰	۹۸	۲	۴۰۰	HVAC	سمنان-مازندران	۵
	۲۰۸,۴	۳۷۵۰	۵۴۶	۴۹	۳۹۲	۱۰۵	۱	۷۶۵	EHVAC		
	۲۲۴,۴	۲۴۰۰	۸۹۲	۱۴۸	۲۲۴	۵۲۰	۲	۵۰۰	HVDC		
۷۶۵ کیلوولت EHVAC	۳۱۵,۵	۳۶۰۰	۶۴۲	۵۸	۴۸۶	۹۸	۳	۴۰۰	HVAC	سمنان-تهران	۶
	۳۰۶,۶	۳۹۵۰	۵۱۷	۴۷	۳۶۵	۱۰۵	۱	۷۶۵	EHVAC		
	۳۱۸,۴	۲۸۰۰	۱۰۷۲	۱۷۸	۲۰۴	۶۹۰	۱	۸۰۰	HVDC		
۸۰۰ کیلوولت HVDC	۳۷۹,۷	۳۰۳۷	۲۸۹۳	۲۷۱	۲۲۴۰	۲۹۵	۶	۴۰۰	HVAC	طیس-سمنان	۷
	۳۶۳,۵	۳۹۵۰	۱۹۸۰	۱۸۰	۱۴۶۶	۲۳۴	۲	۷۶۵	EHVAC		
	۳۸۵,۶	۵۶۰۰	۱۶۸۲	۲۸۰	۶۸۲	۷۲۰	۲	۸۰۰	HVDC		
۸۰۰ کیلوولت HVDC	۶۹۵,۷	۵۴۸۴	۶۰۸۸	۵۵۳	۵۰۲۰	۵۱۵	۱۲	۴۰۰	HVAC	بوشهر-اصفهان	۸
	۶۲۷,۴	۵۲۵۰	۳۴۰۱	۳۰۹	۲۶۶۸	۴۲۴	۳	۷۶۵	EHVAC		
	۶۶۲,۵	۵۶۰۰	۱۷۷۹	۲۹۶	۷۶۴	۷۱۹	۲	۸۰۰	HVDC		

بودن هزینه خطوط HVAC و همچنین نزدیک بودن شاخص EENS نسبت به دو حالت دیگر، این فناوری انتخاب شده است. در کریدورهای شماره ۲ و ۶ نیز به دلیل پایین بودن هزینه خط UHVAC و همچنین شرایط بهتر شاخص EENS، فناوری ۷۶۵ کیلوولت موردنظر خواهد بود. در نهایت در کریدورهای شماره ۳، ۷ و ۸، هزینه خطوط HVDC به مراتب کمتر بوده و همین عامل سبب گرایش این کریدورها به خطوط HVDC خواهد شد.

۵. پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی هشت

کریدور شناسایی شده در ایران

در این قسمت با پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی و آنچه در بخش قبل گفته شد روی کریدورهای شناسایی شده در ایران، مقایسه اقتصادی برای هر فناوری EHVAC و HVDC ارائه خواهد شد. جدول (۷) نتایج حاصل از این بررسی را نشان می‌دهد. در کریدورهای شماره ۱، ۴ و ۵ به دلیل پایین

منابع

۶. نیاز نهایی فناوری کریدورها به عنوان مسیر

پیش رو در کشور

با بررسی اجمالی جدول (۷) و با صرف‌نظر از خطوط HVAC به دلیل اینکه این خطوط هم‌اکنون نیز در کشور بهره‌برداری می‌شوند، در نهایت می‌توان ۵ کریدور انتقال توان با ظرفیت بالا برای ایران در اقیانوس ۱۴۱۰ ترسیم کرد. این ۵ کریدور در جدول (۸) نشان داده شده‌اند. نکته دیگری که می‌بایست مدنظر قرار داد اینست که اکنون نیز مسیرهای سمنان-تهران و همچنین خوزستان-اصفهان با خطوط مختلف ۴۰۰ کیلوولت در حال بهره‌برداری می‌باشند و شاید بتوان با چند مدار موازی دیگر از این سطح ولتاژ، این خطوط را برای سال‌های آتی بهبود بخشید. ولی در مورد سه کریدور دیگر به قطعیت می‌توان گفت نیاز مبرم به ایجاد خطوط جدید می‌باشد.

جدول (۸): نیاز نهایی فناوری کریدورهای قطعی شده در کشور

نام کریدور	فناوری منتخب	طول (کیلومتر)	ظرفیت (مگاوات)	
			تعداد مدار	عملیاتی نامی
طیس - اصفهان سمنان - تهران	۷۶۵ کیلوولت UHVAC	۵۷۰	۱	۱۹۶۱
			۱	۳۹۵۰
خوزستان - تهران طیس - سمنان بوشهر - اصفهان	۸۰۰ کیلوولت HVDC	۹۷۵	۲	۲۸۷۸
			۲	۵۶۰۰
			۲	۵۱۹۶

• نتیجه‌گیری

این مقاله به شناسایی چشم‌انداز کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا برای ایران در اقیانوس ۱۴۱۰ اختصاص یافته است. برای این منظور سه نوع فناوری HVAC، EHVAC و HVDC به عنوان فناوری‌های مدنظر برای هر کریدور انتخاب شدند. سپس با تحلیل جامع و تعیین متغیرهای تصمیم‌ساز شامل موارد اقتصادی و قابلیت اطمینان، هر کریدور به چه نوع فناوری نیاز دارد. در انتها مشخص شد می‌توان از میان ۵ کریدور نهایی، ۳ کریدور را با فناوری HVDC و دو کریدور دیگر را با فناوری EHVAC تجهیز نمود. در این مقاله نشان داده شد این تصمیم‌گیری علاوه بر اینکه تمامی قیود فنی ذکر شده در این مقاله را پوشش می‌دهد، از نظر اقتصادی نیز بهترین تصمیم خواهد بود.

[۱] پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق، بررسی و پیشنهاد نحوه شناسایی قطب‌های مازاد تولید و مصرف در کشور تا اقیانوس ۱۴۱۰ و تهیه نقشه مسیرهای بالقوه‌ی کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا، گزارش مرحله پنجم از پروژه مطالعات امکان‌سنجی استفاده از کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا برای شبکه برق ایران، بهمن ۱۳۹۵.

- [2] M. Candas, O.S. Meric, "The Application of Ultra High Voltage in the World", Journal of Power and Energy Engineering, p.453, 2015.
- [3] X. Zheng, H. Dong, H. Huang, "Debates on ultra-high-voltage synchronous power grid: the future super grid in China", IET Generation, Transmission & Distribution, 2015.
- [4] W. Jing-ru, Y. X. XU, "Development prospect of UHV AC power transmission in China [J]", Power System Technology, 2005.
- [5] H. Huang, et al, "Concept paper on development of UHVAC system in India", Siemens AG, Germany, 2010.
- [6] D. Lauria, G. Mazzanti, S. Quaia, "The loadability of overhead transmission lines—Part I: Analysis of single circuits", IEEE Transactions on Power Delivery, 2014.
- [7] L. Davide, G. Mazzanti, S. Quaia, "The loadability of overhead transmission lines—Part II: Analysis of double-circuits and overall comparison", IEEE Transactions on Power Delivery, 2014.
- [8] P. Kundur, "Power System Stability and Control", 1994.
- [9] J. D. Glover, M. S. Sarma, T. J. Overbye, "Power System Analysis and Design", Fifth edition, 1987.
- [10] Y. H. Song, A. T. Johns, "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", IET Power and Energy Series, Vol. 30, First Published 1999.
- [11] N. Vijaysimha, P. S. P. Kumar, "Shunt Compensation on EHV Transmission Line", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, Issue 6, June 2013.
- [12] Y. Miao, H. Cheng, Y. Yao, "Study of the Reactive Power Control for a Real UHVAC Power Transmission Project", International Transactions on Electrical Energy Systems, pp. 1223-1240, 2015.
- [13] C. Qi, S. Li-qum, "Research on High-Voltage Reactor Compensation of UHV Lines", International Journal of Computer, Consumer and Control, Vol. 3, No. 1, 2014.
- [14] J. Zhnag, Z. Chen, K. Gao, A. Yan, "A Novel Reactive Power Compensation Scheme of UHV AC Transmission Line", Power and Energy Engineering Conference, 2009.
- [15] M. Shicong, G. Jianbo, H. Qing, Z. Jian, D. Mian, Y. Zhao, "Guide for Voltage Regulation and Reactive Power Compensation at 1000kV AC and Above with IEEE P1860 Standard", International Conference on Power System Technology, 2014.

[۱۶] پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق، تدوین رویه‌ی انتخاب نوع فناوری و مشخصات فنی آن برای کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا از جنبه‌ی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی و پیاده‌سازی آن برای کریدورهای شناسایی شده در ایران، گزارش مرحله ششم از پروژه مطالعات امکان‌سنجی استفاده از کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا برای شبکه برق ایران، اردیبهشت ۱۳۹۶.

[۱۷] پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق، تدوین رویه‌ی مطالعات قابلیت اطمینان فناوری‌های HVDC و UHVAC و تحلیل قابلیت اطمینان این دو فناوری، گزارش مرحله ششم از پروژه مطالعات امکان‌سنجی استفاده از کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا برای شبکه برق ایران، اردیبهشت ۱۳۹۶.