



شاخص‌های تصمیم‌ساز در انتخاب نوع فناوری انتقال توان الکتریکی با ظرفیت‌های بالا

سعید اسمعیلی، 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 ، s_esmaeili@elec.iust.ac.ir

EHVAC، UHVAC و HVDC صورت می‌گیرد [۱ و ۲]. شناخت فلسفه استفاده از این خطوط، توجیه پذیری احداث و مزیت‌سنجی استفاده از فناوری‌های قابل پیاده‌سازی می‌تواند امری بسیار مهم برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری درباره احداث خطوط جدید باشد. در این راستا [۳-۵]، شاخص‌های فنی مناسب برای انتخاب فناوری مناسب را معرفی کرده‌اند. در [۳ و ۴]، منحنی‌های بارپذیری فناوری‌های مختلف با توجه به محدودیت حرارتی و تلفات خطوط ارائه شده است. در [۵]، منحنی بارپذیری خطوط AC با توجه به محدودیت حرارتی و پایداری ولتاژ خطوط ترسیم شده است. در [۶ و ۷] منحنی بارپذیری فناوری‌های AC و DC با توجه به شاخص‌های فنی ارائه شده است.

به‌منظور احداث کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا، بایستی فناوری‌های مختلف مدنظر قرار گرفته و انتخاب مناسب از بین آن‌ها صورت پذیرد. بدین‌منظور در این مقاله بر خلاف مقالات قبلی، سه شاخص فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی در نظر گرفته می‌شود. برای شاخص فنی، محدودیت حرارتی، پایداری ولتاژ، تلفات و پایداری زاویه‌ای ماندگار در نظر گرفته شده و منحنی‌های بارپذیری به صورت فاصله-توان ارائه می‌شوند. برای شاخص زیست‌محیطی، حریم خطوط به عنوان معیار انتخاب نوع فناوری معرفی می‌شود و برای شاخص اقتصادی هزینه احداث خط، احداث پست و بهره‌برداری به صورت جزء به جزء ارائه می‌شود. در یک جمع‌بندی کلی، فرد برنامه‌ریز با در دست داشتن میزان توان انتقالی بین دو ناحیه با فاصله مشخص، ابتدا به کمک منحنی‌های بارپذیری فناوری‌های ممکن را مشخص نموده و در مرحله بعد با توجه به دو شاخص زیست‌محیطی و اقتصادی فناوری منتخب را تعیین می‌کند.

چکیده — در سالیان اخیر با افزایش بار مصرفی و با توجه به فاصله‌ی زیاد مراکز تولید و مراکز مصرف برق، نیاز به انتقال توان در فواصل طولانی و با حجم‌های بالا افزایش یافته است. این انتقال توان می‌تواند توسط کریدورهای انتقال توان در قالب فناوری‌های EHVAC، UHVAC و HVDC صورت گیرد. شناخت فلسفه استفاده از این خطوط، توجیه پذیری احداث و مزیت‌سنجی استفاده از فناوری‌های قابل پیاده‌سازی می‌تواند امری بسیار مهم برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری درباره احداث خطوط جدید باشد. از این رو در این مقاله هدف اصلی با در نظرگیری این فلسفه کلی که منابع اولیه انرژی و مراکز عمده مصرف در فواصل دور از یکدیگر قرار دارند، مزیت‌سنجی استفاده از هر کدام از فناوری‌ها انتقال توان با ظرفیت بالا با توجه به سه شاخص فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی می‌باشد. در واقع فرد برنامه‌ریز با در دست داشتن میزان توان انتقالی بین دو ناحیه با فاصله مشخص، ابتدا به کمک منحنی‌های بارپذیری ارائه شده در این مقاله، می‌تواند فناوری‌های ممکن را مشخص نموده و در مرحله بعد با توجه به دو شاخص زیست‌محیطی و اقتصادی فناوری منتخب را تعیین نماید.

واژه‌های کلیدی — کریدور انتقال توان؛ انتقال توان با ظرفیت بالا؛

فشار قوی؛ HVDC، UHVAC؛ برنامه‌ریزی توسعه انتقال.

۱. مقدمه

با افزایش بار مصرفی و با توجه به فاصله‌ی زیاد مراکز تولید و مراکز مصرف برق، نیاز به انتقال برق در فواصل طولانی و با حجم‌های بالا افزایش یافته است که این امر توسط کریدورهای انتقال توان به صورت فناوری

که در آن، V_1 و V_2 به ترتیب ولتاژ ابتدا و انتهای خط انتقال بوده و A_1 و B_1 ضرایب ثابت مدلسازی خط می‌باشند. با معلوم بودن میزان V_2 ، می‌توان میزان حداکثر جریان عبوری و متعاقب آن حداکثر توان انتقالی را به صورت تابعی از طول خط محاسبه نمود. معمولاً برای این امر افت ولتاژ حداکثر ۵ درصد (مقدار مجاز) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در خطوط AC با افزایش سطح ولتاژ سیستم، جریان عبوری کاهش می‌یابد که منجر به کاهش افت ولتاژ خواهد شد. در ضمن با افزایش سطح ولتاژ در خطوط AC، خازن خط بیشتر شده و منجر به کاهش راکتانس مجموع خط و در نهایت کاهش افت ولتاژ می‌شود. پس با افزایش سطح ولتاژ در خطوط AC، افت ولتاژ کمتر و میزان توان قابل انتقال ناشی از این محدودیت افزایش می‌یابد. در خطوط DC مقدار امپدانس کمتر از خطوط AC بوده و افت ولتاژ کمتر خواهد بود. در ضمن در خطوط DC با استفاده از مبدل‌های موجود در دو طرف خط، کنترل ولتاژ وجود دارد.

• میزان تلفات خطوط

تلفات یک خط انتقال با میزان مقاومت خط و توان دوم جریان رابطه مستقیم دارد که در صورت ثابت ماندن میزان توان انتقالی، تلفات اهمی با مجذور ولتاژ خط رابطه معکوس دارد. لازم به ذکر است که در خطوط AC، با افزایش سطح ولتاژ شبکه، جریان عبوری کاهش یافته و تلفات خط که مضربی از توان دوم جریان می‌باشد، کاهش می‌یابد. همچنین در خطوط DC به علت عدم وجود اثر پوستی، تلفات کمتر از خطوط AC خواهد بود. در این مقاله در بخش فنی، تلفات خط انتقال در قالب قید با یک مقدار مشخص و در بخش اقتصادی به عنوان هزینه در نظر گرفته شده است.

• محدودیت پایداری زاویه‌ای ماندگار

پایداری زاویه‌ای ماندگار در پاسخ به اغتشاشات کوچک بوجود آمده در سیستم می‌باشد. در واقع در صورت بروز اغتشاش کوچک، بایستی سیستم پایداری خود را حفظ نماید که به عنوان یک پارامتر تاثیرگذار در منحنی بارپذیری خط انتقال بایستی مورد بررسی قرار گیرد تا از ناپایداری شبکه جلوگیری به عمل آید. میزان توان قابل انتقال با توجه به حد پایداری حالت ماندگار به کمک (۲) قابل محاسبه می‌باشد:

$$P_{\max} = 3E_s E_2 \sin \delta_{\max} / X \quad (2)$$

که در آن،

$$X = X_{net} + X_L \quad (3)$$

در بخش دوم این مقاله شاخص‌های توجیه‌پذیری و مزیت‌سنجی استفاده از فناوری انتقال توان با ظرفیت بالا ارائه شده است. در بخش سوم، پیاده‌سازی شاخص‌ها انجام شده است. در پایان، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. شاخص‌های توجیه‌پذیری و مزیت‌سنجی

استفاده از فناوری‌های انتقال توان با ظرفیت

بالا

در این بخش شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی موجود برای مزیت‌سنجی و توجیه‌پذیری استفاده از فناوری انتقال توان با ظرفیت بالا معرفی می‌شوند تا با استفاده از آن، بتوان با توجه به فاصله و میزان توان قابل انتقال بین دو ناحیه مشخص، فناوری مناسب را تعیین نمود. بدین منظور در این بخش ابتدا شاخص‌های فنی برای ترسیم نمودارهای بارپذیری خطوط بررسی می‌شوند. سپس شاخص‌های زیست‌محیطی و اقتصادی معرفی می‌شوند.

۲.۱. شاخص‌های فنی

به منظور ترسیم منحنی بارپذیری، چهار شاخص محدودیت حرارتی، پایداری ولتاژ، میزان تلفات خطوط و پایداری زاویه‌ای ماندگار معرفی می‌شوند [۶ و ۷].

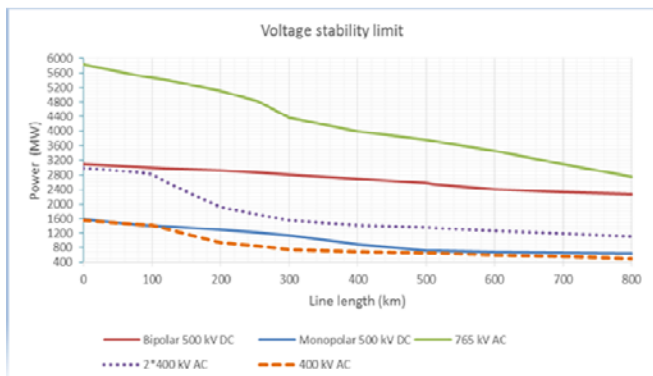
• محدودیت حرارتی

خطوط انتقال در اثر حرارت زیاد مقاومت مکانیکی خود را از دست داده که می‌تواند عمر مفید مورد انتظار آن را کاهش دهد. در ضمن با افزایش دما و انبساط هادی خط، شکم خط در وسط یک اسپین افزایش می‌یابد. اگر درجه حرارت به طور مداوم و طولانی مدت بالا باشد، خط انتقال به طور دائمی کشیده شده و باعث خواهد شد حاشیه اطمینان و امنیت خط نسبت به زمین کمتر از میزان مجاز ایمنی خط باشد. در خطوط AC با افزایش سطح ولتاژ، جریان عبوری کاهش می‌یابد که خود منجر به کاهش حرارت تولید شده خواهد شد. در ضمن در خطوط DC برخلاف خطوط AC بحث اثر پوستی مطرح نمی‌باشد و از تمام سطح مقطع سیم استفاده شده و میزان حرارت تولید شده کاهش می‌یابد.

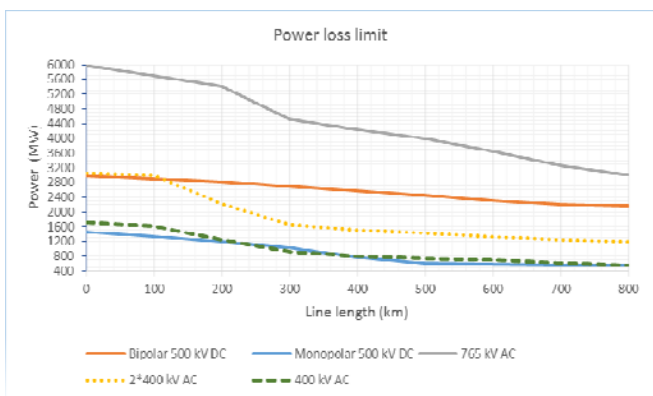
• پایداری ولتاژ

میزان افت ولتاژ توسط رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

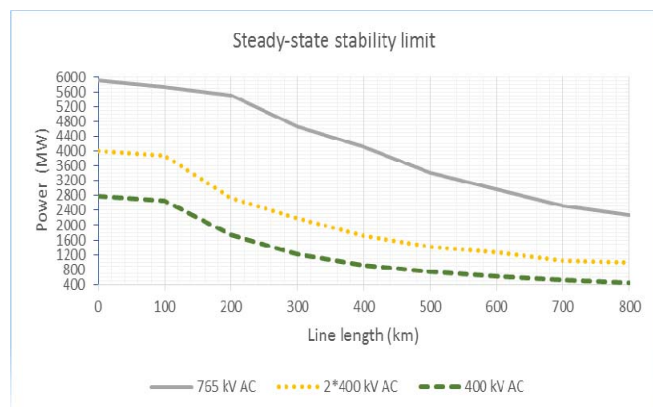
$$\Delta V = |V_1| - |V_2| = |A_1 V_2 + \sqrt{3} B_1 I_2| - |V_2| \quad (1)$$



شکل (۲): مقایسه فناوری‌های مختلف با توجه به محدودیت پایداری ولتاژ



شکل (۳): مقایسه فناوری‌های مختلف با توجه به محدودیت تلفات خط



شکل (۴): مقایسه فناوری‌های مختلف با توجه به محدودیت پایداری زاویه‌ای

در شکل‌های (۵) - (۹)، منحنی بارپذیری هر کدام از فناوری‌ها ترسیم شده است.

که X_{net} برابر با V^2/A_{sc} می‌باشد و A_{sc} قدرت اتصال کوتاه خط انتقال بوده و X_L کل راکتانس در طول خط می‌باشد.

به ترتیب با در نظرگیری مقادیر ۱ و ۱/۰۵ پریونیت برای ولتاژ سمت دریافت و ارسال و سطح اتصال کوتاه برحسب گینگولت آمپر و زاویه قدرت ثابت ۳۰ درجه (در نظرگیری ضریب اطمینان مناسب)، می‌توان میزان بارپذیری خط انتقال را با توجه به پایداری ماندگار محاسبه نمود.

• منحنی‌های بارپذیری

در این مقاله به منظور پیاده‌سازی شاخص‌های فنی فوق پنج فناوری زیر در نظر گرفته شده است [۶].

۱- خط ۴۰۰ کیلو ولت AC تک مداره: هادی ACSR بوده و مقاومت و راکتانس واحد طول خط به ترتیب ۰/۲۶۱ و ۰/۰۲۱ اهم می‌باشند.

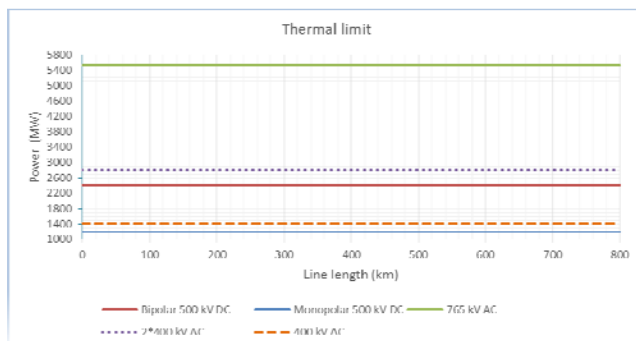
۲- خط ۴۰۰ کیلو ولت AC دو مداره: هادی ACSR بوده و مقاومت و راکتانس واحد طول خط به ترتیب ۰/۲۶۱ و ۰/۰۲۱ اهم می‌باشند.

۳- خط ۷۶۵ کیلو ولت AC تک مداره: هادی ACSR بوده و مقاومت و راکتانس واحد طول خط به ترتیب ۰/۰۳۲ و ۰/۰۰۱۲ اهم می‌باشند.

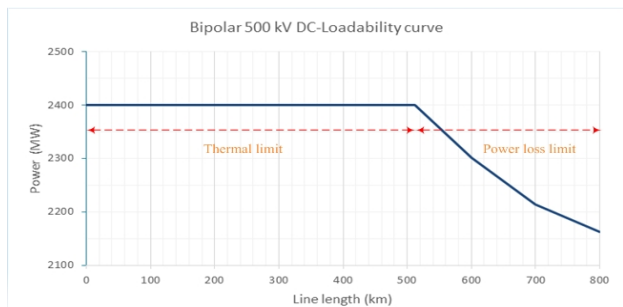
۴- خط ۵۰۰ کیلو ولت DC تک قطبی: هادی ACSR بوده و مقاومت واحد طول خط ۰/۰۱۶۹ اهم با حداکثر چگالی جریان عبوری ۱/۱۶ آمپر بر میلی متر مربع می‌باشد.

۵- خط ۵۰۰ کیلو ولت DC دو قطبی: هادی ACSR بوده و مقاومت واحد طول خط ۰/۰۱۶۹ اهم با حداکثر چگالی جریان عبوری ۱/۱۶ آمپر بر میلی متر مربع می‌باشد.

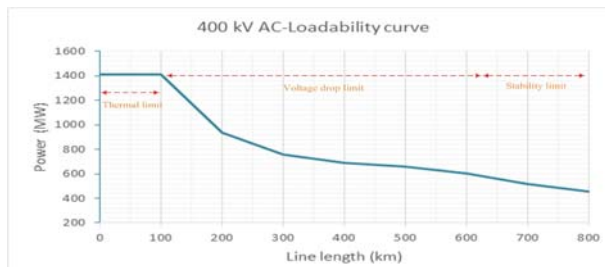
به منظور مقایسه و انتخاب فناوری قابل پیاده‌سازی، منحنی بارپذیری با توجه به محدودیت حرارتی، پایداری ولتاژ، تلفات خط و پایداری زاویه‌ای به ترتیب در شکل‌های (۱) - (۴) نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌های بارپذیری ارائه شده، برای هر کدام از محدودیت‌های فنی، می‌توان فناوری مناسب را با توجه به طول خط و ظرفیت عملیاتی انتخاب نمود.



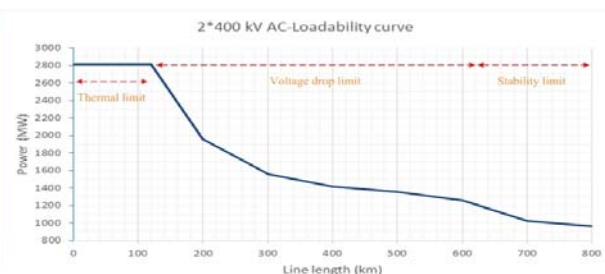
شکل (۱): مقایسه فناوری‌های مختلف با توجه به محدودیت حرارتی



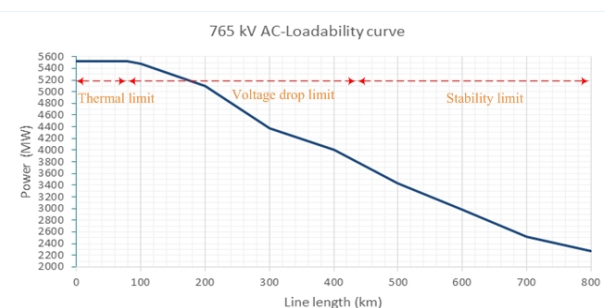
شکل (۹): منحنی بارپذیری خط ۵۰۰ کیلوولت DC دو قطبی



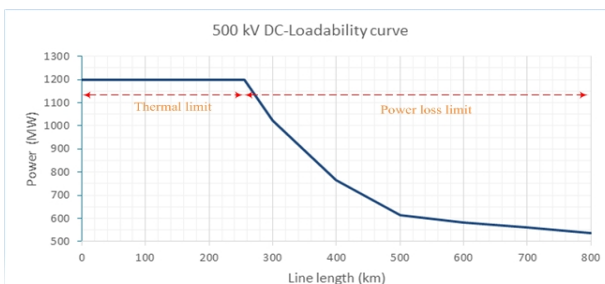
شکل (۵): منحنی بارپذیری خط ۴۰۰ کیلوولت AC تک مداره



شکل (۶): منحنی بارپذیری خط ۴۰۰ کیلوولت AC دو مداره



شکل (۷): منحنی بارپذیری خط ۷۶۵ کیلوولت AC تک مداره



شکل (۸): منحنی بارپذیری خط ۵۰۰ کیلوولت DC تک قطبی

ملاحظه می‌شود که برای فواصل کم، محدودیت حرارتی خطوط عامل محدودکننده می‌باشد. برای خط ۵۰۰ کیلوولت DC دو قطبی تا طول ۵۲۰ کیلومتر محدودیت حرارتی به عنوان عامل محدودکننده می‌باشد. برای خطوط AC پایداری ولتاژ و پایداری زاویه‌ای به عنوان عوامل محدود کننده بعدی است. در ضمن برای خطوط DC، تلفات خط به عنوان عامل محدودکننده است.

۲.۲. شاخص‌های زیست محیطی

اثرات احداث خطوط انتقال HVDC و HVAC بر روی محیط زیست شامل اثرات ناشی از میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، تداخل امواج رادیویی، نویزهای شنیداری و جریان زمین و مواد شیمیایی می‌باشد که در این مقاله منتجه این اثرات در قالب حریم خطوط انتقال به عنوان شاخص ارزیابی زیست محیطی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

حریم خطوط انتقال:

حریم خط فاصله افقی در هوا از طرفین هادی جریان برق در راستای افق می‌باشد و هدف آن کمال ارتفاع و دفع ضرر متجاوزان است. تاکنون یک حد مشخص و یکسان برای میدان مغناطیسی قابل تحمل معرفی نشده است و کشورهای مختلف مقادیر متفاوتی را در نظر می‌گیرند. معمولاً مقدار ۱۰۰ میکروتسلا برای بهره‌برداری در بلندمدت و ۳ میکروتسلا برای طراحی‌های جدید در نظر گرفته می‌شود.

در جدول (۱)، با استناد به [۱۸-۲۸]، میزان حریم مورد نیاز برحسب متر برای خطوط با سطوح ولتاژ مختلف نشان داده شده است.

با توجه به حریم‌های گوناگون ارائه شده برای خطوط فوق فشار قوی توسط مراجع مختلف در جدول (۱)، در این مقاله برای خطوط AC به مرجع مجموعه دوره‌های آموزشی نظارت تکمیلی تاسیسات برقی (آشنایی با حریم شبکه‌های برق ایران) تهیه شده توسط معاونت برنامه ریزی و

هرکدام از فناوری‌ها در مقدار هزینه پایه ارائه شده در جدول (۲) ضرب شود.

مهندسی [۱۸] استناد شده و حریم خطوط ۵۰۰ کیلوولت DC، ۵۲ متر در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۲): هزینه پایه احداث خطوط انتقال

نوع خط انتقال	هزینه پایه (دلار بر مایل)
خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت تک مداره	۹۵۹۷۰۰
خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت دو مداره	۱۵۳۶۴۰۰
خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت تک مداره	۱۳۸۳۸۰۰
خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت دو مداره	۲۱۹۰۳۰۰
خط انتقال ۷۶۵ کیلوولت تک مداره	۲۶۸۷۶۰۰
خط انتقال ۷۶۵ کیلوولت دو مداره	۴۳۰۰۱۶۰
خط انتقال ۵۰۰ کیلوولت DC دو قطبی	۱۵۳۶۴۰۰

جدول (۳): ضریب تصحیح نوع هادی

نوع خط انتقال	ACSS	ACSR	HTLS
خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت تک مداره	۱/۰۸	۱	۳/۶
خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت دو مداره	۱/۰۸	۱	۳/۶
خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت تک مداره	۱/۰۸	۱	۳/۶
خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت دو مداره	۱/۰۸	۱	۳/۶
خط انتقال ۷۶۵ کیلوولت تک مداره	۱/۰۸	۱	۳/۶
خط انتقال ۷۶۵ کیلوولت دو مداره	۱/۰۸	۱	۳/۶
خط انتقال ۵۰۰ کیلوولت DC دو قطبی	۱/۰۸	۱	۳/۶

جدول (۴): ضریب تصحیح ساختار دکل

نوع خط انتقال	مشبک	تلسکوپی
خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت تک مداره	۰/۹	۱
خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت دو مداره	۰/۹	۱
خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت تک مداره	۱	۱/۳
خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت دو مداره	۱	۱/۳
خط انتقال ۷۶۵ کیلوولت تک مداره	۱	۱/۶
خط انتقال ۷۶۵ کیلوولت دو مداره	۱	۱/۶
خط انتقال ۵۰۰ کیلوولت DC دو قطبی	۱	۱/۵

• ساختار دکل

با توجه به استفاده از دو نوع ساختار تلسکوپی و مشبک برای احداث دکل خطوط انتقال، ضرایب تصحیح جدول (۴)، برای هرکدام از فناوری‌ها در مقدار هزینه پایه ارائه شده در جدول (۲)، ضرب می‌شود.

• هزینه کلی احداث خط انتقال

رابطه زیر نحوه محاسبه هزینه کلی احداث خط انتقال را با توجه به پارامترهای مختلف معرفی شده بیان می‌کند.

جدول (۱): اندازه حریم خطوط انتقال AC

مرجع	اندازه حریم خط انتقال (متر) با توجه به سطح ولتاژ (کیلوولت)			
	۷۶۵	۵۰۰	۴۰۰	۳۴۵
[۸]	۶۱	۵۳	-	۴۵
[۹]	۶۱	-	۴۵	-
[۱۰]	۶۴	-	-	-
[۱۱]	۶۱	۵۳	-	-
[۱۲]	۵۴	۴۸	-	۳۵
[۱۳]	۶۱	-	-	۴۶
[۱۴]	۶۶	-	۴۶	-
[۱۵]	-	۴۴	-	۳۴
[۱۶]	۶۴	-	۵۲	-
[۱۷]	۵۶	-	۳۲	-
[۱۸]	۵۰	-	۲۸	-

۲،۳. شاخص اقتصادی

در این مقاله، شاخص اقتصادی به صورت جزء به جزء در سه زیر بخش هزینه‌های احداث خط انتقال، هزینه‌های احداث پست و هزینه‌های بهره‌برداری بررسی می‌شوند [۱۹].

الف) هزینه‌های احداث خط انتقال

در ادامه هزینه احداث اجزاء مختلف خط انتقال مورد بررسی قرار می‌گیرند.

• هزینه پایه احداث خطوط انتقال

هزینه پایه احداث خطوط انتقال با سطح ولتاژ و تعداد مدار مشخص در جدول (۲) نشان داده شده است [۱۹]. این هزینه‌ها مربوط به سال ۲۰۱۴ می‌باشد. لازم به ذکر است که جدول فوق با در نظرگیری هادی آلومینیومی تقویت شده با فولاد (ACSR)، دکل تلسکوپی (خطوط ۲۳۰ کیلوولت) و دکل مشبک (خطوط با ولتاژ بالای ۲۳۰ کیلوولت) محاسبه شده است.

• نوع هادی

با توجه به استفاده از سه نوع هادی ACSS، ACSR (Aluminum Conductor Steel Supported) و HTLS (High Tensile Low Sag) ضرایب تصحیح نوع هادی در جدول (۳) تعریف شده‌اند که بایستی برای

این تجهیزات شامل راکتور موازی، خازن سری و SVC می‌باشند که در جدول (۸)، هزینه سرمایه‌گذاری استفاده از آن‌ها به ازای دلار بر مگاوار ارائه شده است [۱۹]. این هزینه‌ها مربوط به سال ۲۰۱۴ می‌باشد.

جدول (۷): هزینه ترانس

هزینه ترانس (دلار/ مگاوات آمپر)	پست ۲۳۰ کیلوولت	پست ۴۰۰ کیلوولت	پست ۵۰۰ کیلوولت	پست ۷۶۵ کیلوولت
132/230 KV	۷۲۵۰			
132/400 KV		۱۰۳۵۰		
132/500 KV			۱۰۳۵۰	
132/765 KV				۱۲۴۵۰
230/400 KV	۱۰۵۰۰	۱۰۵۰۰		
230/500 KV		۱۱۴۰۰	۱۱۴۰۰	
230/765 KV			۱۲۷۰۰	۱۲۹۰۰
400/500 KV		۱۳۴۵۰	۱۳۴۵۰	
400/765 KV			۱۴۵۰۰	۱۴۵۰۰
500/765 KV				۱۵۱۰۰

جدول (۸): هزینه تجهیزات جبران‌سازی توان راکتیو

هزینه (دلار/ مگاوار)	پست ۲۳۰ کیلوولت	پست ۴۰۰ کیلوولت	پست ۵۰۰ کیلوولت	پست ۷۶۵ کیلوولت
راکتور موازی	۲۰۷۰۰	۲۰۷۰۰	۲۰۷۰۰	۲۰۷۰۰
خازن سری	۳۱۰۰۰	۱۰۳۵۰	۱۰۳۵۰	۹۷۰۰
SVC	۸۸۰۰۰	۸۸۰۰۰	۸۸۰۰۰	۸۸۰۰۰

• هزینه اضافی تجهیزات HVDC

بخش عمده هزینه احداث خط انتقال HVDC، مربوط به هزینه اضافی تجهیزات به کار رفته در پست شامل ترمینال مبدل‌ها، جبران‌سازی توان راکتیو و کلیدزنی‌های AC می‌باشد. این تجهیزات شامل می‌باشد. همانگونه که در جدول (۹) نشان داده شده است، برای پست ۵۰۰ کیلوولت، ۴۴۵ میلیون دلار هزینه اضافی در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. این هزینه‌ها مربوط به سال ۲۰۱۴ می‌باشد.

جدول (۹): هزینه تجهیزات اضافی پست HVDC

تجهیز اضافی	هزینه
مبدل‌ها	۲۷۵ میلیون دلار
جبران‌سازی توان راکتیو	۱۵۰ میلیون دلار
کلیدزنی‌های AC	۲۰ میلیون دلار
مجموع هزینه‌ها	۴۴۵ میلیون دلار

هزینه کلی احداث خط انتقال = هزینه پایه × ضریب تصحیح نوع هادی × ضریب تصحیح ساختار دکل

ب) هزینه‌های احداث پست

در ادامه هزینه احداث اجزاء مختلف پست مورد بررسی قرار می‌گیرند.

• هزینه پایه احداث پست

هزینه پایه احداث پست در جدول (۵) نشان داده شده است [۱۹]. این هزینه‌ها مربوط به سال ۲۰۱۴ می‌باشد.

جدول (۵): هزینه پایه احداث پست برای فناوری‌های مختلف

نوع پست	هزینه پایه احداث پست (دلار)
پست ۲۳۰ کیلوولت	۱۷۰۶۲۵۰
پست ۴۰۰ کیلوولت	۲۲۱۰۷۰۰
پست ۵۰۰ کیلوولت	۲۵۵۹۲۵۰
پست ۷۶۵ کیلوولت	۳۱۹۸۲۰۰

• قرارگیری خط و ترانس

نحوه آرایش خط و ترانس در حین ورود به پست به صورت حلقوی و یک و نیم‌کلیده می‌باشد که در جدول (۶)، هزینه به ازای قرارگیری هر خط/ترانس برای آرایش‌های مختلف نشان داده شده است [۱۹]. این هزینه‌ها مربوط به سال ۲۰۱۴ می‌باشد.

جدول (۶): هزینه به ازای قرارگیری هر خط/ ترانس برای آرایش‌های مختلف

نوع پست	هزینه به ازای قرارگیری هر خط/ترانس (دلار)	حلقوی	یک و نیم کلیده
پست ۲۳۰ کیلوولت	۱۴۴۲۰۰۰	۱	۱/۵
پست ۴۰۰ کیلوولت	۲۳۰۴۰۰۰	۱	۱/۵
پست ۵۰۰ کیلوولت	۲۸۸۴۰۰۰	۱	۱/۵
پست ۷۶۵ کیلوولت	۳۵۷۱۰۰۰	۱	۱/۵

• هزینه ترانس

یکی از بخش‌های اثرگذار بر هزینه‌های احداث پست، هزینه ترانس با توجه به سطح ولتاژ اولیه و ثانویه آن می‌باشد که در جدول (۷) ارائه شده است [۱۹]. این هزینه‌ها مربوط به سال ۲۰۱۴ می‌باشد.

• تجهیزات جبران‌سازی توان راکتیو

مشخص، ابتدا فناوری‌های ممکن را به کمک منحنی‌های بارپذیری مشخص نموده و در مرحله بعد با توجه به دو شاخص زیست‌محیطی و اقتصادی فناوری منتخب را تعیین نماید.

منابع

- [1] Huang, Daochun, et al, "Ultra high voltage transmission in China: developments, current status and future prospects", Proceedings of the IEEE, Vol 97, pp. 555-583, 2009.
- [2] R D Begamudre, "Extra High Voltage A.C. Transmission Engineering", new age international publishers, third edition, 2006.
- [3] Kalair, A., N. Abas, and N. Khan. "Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (2016): 1653-1675.
- [4] Gutman, Richard, P. P. Marchenko, and R. D. Dunlop. "Analytical development of loadability characteristics for EHV and UHV transmission lines." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 2 (1979): 606-617.
- [5] Hao, Jin, and Wilsun Xu. "Extended transmission line loadability curve by including voltage stability constrains." *Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada. IEEE*, 2008.
- [6] Lauria, D., G. Mazzanti, and S. Quaia. "The loadability of overhead transmission lines—Part I: Analysis of single circuits." *IEEE Transactions on Power Delivery* 29.1 (2014): 29-37.
- [7] Lauria, Davide, Giovanni Mazzanti, and Stefano Quaia. "The loadability of overhead transmission lines—Part II: Analysis of double-circuits and overall comparison." *IEEE Transactions on Power Delivery* 29.2 (2014): 518-524.
- [8] Available at: https://web.ecs.baylor.edu/faculty/grady/_13_EE392J_2_Spring11_AEP_Transmission_Facts.pdf (2017/05/15)
- [9] Molburg, J. C., J. A. Kavicky, and K. C. Picel. The design, construction, and operation of long-distance high-voltage electricity transmission technologies. No. ANL/EVS/TM/08-4. Argonne National Laboratory (ANL), 2008.
- [10] Sakhavati, Aydin, et al, "765 kV transmission line design (Electrical section)", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2, no. 5, 2012.
- [11] Available at: <https://www.adb.org/projects/documents/iipff-2-jtcl-sdd> (2017/05/15)
- [12] Available at: http://www.virlab.virginia.edu/Energy_class/Lecture_notes/Renewable_Distributed_Grid_Supporting_materials/aep-interstate-project-why-765kv-ac.pdf (2017/05/15).
- [13] Weedy, B. M, "EHV transmission system planning in the USA", *Electric Power Systems Research*, Vol. 16, no.1, pp. 17-21, 1989.
- [14] Available at: https://www.depts.ttu.edu/techmrtweb/reports/complete_reports/0-6495_final_report.pdf (2017/05/15)
- [15] Available at: http://www.dairylandpower.com/power_delivery/BMP1_Volume1.pdf (2017/05/15).
- [16] Available at: <https://www.engerati.com/sites/default/files/Day1-1400-JohnPlacente-MEA13.pdf.pdf> (2017/05/15).
- [17] Huang, Daochun, et al, "Ultra high voltage transmission in China: developments, current status and future prospects", Proceedings of the IEEE, Vol. 97, no. 3, pp. 555-583, 2009.
- [18] مجموعه دوره های آموزشی نظارت تکمیلی تاسیسات برقی، آشنایی با حریم شبکه‌های برق ایران، معاونت برنامه ریزی و مهندسی، اسفند ۹۴.
- [19] Available at: https://www.wecc.biz/Reliability/2014_TEPPC_Transmission_CapCost_Report_B+V.pdf (2017/05/15).

• هزینه کلی احداث پست

فرمول زیر نحوه محاسبه هزینه کلی احداث پست را با توجه به پارامترهای مختلف معرفی شده بیان می‌کند.

هزینه کلی احداث پست = هزینه پایه + (هزینه به ازای موقعیت هر خط/ترانس × تعداد × ضریب موقعیت) + (هزینه تجهیزات جبران‌سازی × مگاوار توان جبران‌سازی) + هزینه ترانس + هزینه اضافی تجهیزات HVDC

ج) هزینه بهره‌برداری

هزینه بهره‌برداری شامل هزینه تلفات و تعمیر و نگهداری خطوط و پست‌ها می‌باشد که در این مقاله برای خطوط AC و DC به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد مجموع هزینه‌های احداث در نظر گرفته شده است.

۳. پیاده‌سازی

در این بخش به منظور پیاده‌سازی شاخص‌های ارائه شده در بخش قبلی، انتقال ۱۹۶۱ مگاوات توان بین اصفهان و طبرس در نظر گرفته شده است. با توجه به منحنی‌های بارپذیری، می‌توان ۵ خط ۴۰۰ کیلوولت AC، یک خط ۷۶۵ کیلوولت AC و یک خط ۵۰۰ کیلوولت DC دو قطبی استفاده نمود. میزان حریم برای این سه فناوری به ترتیب ۸۴، ۵۰ و ۵۶ متر می‌باشد. در ضمن هزینه نهایی به ترتیب ۲۵۸۹، ۱۲۲۲ و ۱۳۱۵ میلیون دلار می‌باشد. با توجه به سه شاخص تصمیم‌ساز معرفی شده در این مقاله، استفاده از فناوری ۷۶۵ کیلوولت AC برای احداث این کریدور پیشنهاد می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظرگیری این فلسفه کلی که منابع اولیه انرژی و مراکز عمده مصرف در فواصل دور از یکدیگر قرار دارند، توجه‌پذیری و مزیت‌سنجی استفاده از هر کدام از فناوری‌ها انتقال توان با ظرفیت بالا با توجه به سه شاخص فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی ارائه شد. در این راستا برای شاخص فنی، محدودیت حرارتی، پایداری ولتاژ، تلفات و پایداری زاویه‌ای ماندگار در نظر گرفته شد و منحنی‌های بارپذیری به صورت فاصله-توان ارائه شدند. برای شاخص زیست‌محیطی، حریم خطوط به عنوان معیار انتخاب نوع فناوری معرفی گردید و برای شاخص اقتصادی هزینه احداث خط، احداث پست و بهره‌برداری به صورت جزء به جزء ارائه شدند. در واقع، با توجه به رویه ارائه شده در این مقاله، فرد برنامه‌ریز می‌تواند با در دست داشتن میزان توان انتقالی بین دو ناحیه با فاصله