نشریه انرژی ایران
۱۰۹ سال ۱۱ شماره ۲۷ اسفند ۱۳۸۶

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال در جهت بهینه نمودن کفایت خطوط به کمک الگوریتم ژنتیک

سعید جلیل‌زاده[۱]، حسین حدادیان[۲]، میثم مهدوی[۲]، هادی حسینیان[۲]، سجاد گلوانی[۲]

تاریخ دریافت مقاله:

تاریخ پذیرش مقاله:

کلمات کلیدی

برنامه‌ریزی توسعه انتقال، کفایت خطوط ، الگوریتم ژنتیک

چکیده

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال یکی از بخشهای اساسی برنامه‌ریزی توسعه سیستمهای قدرت است که مهمترین هدف آن مشخص کردن تعداد، زمان و مکان احداث خطوط انتقال جدید برای افزودن به سیستم انتقال می‌باشد. تاکنون روشهای متنوعی برای حل مسئله برنامه‌ریزی استاتیکی توسعه شبکه انتقال ارائه شده است که در هیچ یک از آنها میزان کفایت خطوط پس از پایان سال افق برنامه‌ریزی، مورد توجه قرار نگرفته است. بدین معنا که شبکه توسعه یافته، بعد از چه مدت کفایت خود را از دست داده و نیاز به توسعه مجدد خواهد داشت. این مقاله کفایت شبکه انتقال را بعد از توسعه مورد بررسی قرار داده و با لحاظ نمودن این امر، برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال را در جهتی انجام داده است که شبکه توسعه یافته، حداکثر کفایت را در تامین بارها داشته و دیرتر دچار اضافه بارگذاری گردد. نتایج بدست آمده از اجرای ایده پیشنهادی بر روی شبکه معروف گارور مؤید آن است که با انتخاب منطقی هزینه سرمایه‌گذاری، شبکه ای به مراتب مقاومتری از نظر از دست رفتن کفایت خطوط به دست خواهد آمد.

۱ استادیار برق دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان، ایران
۲ گروه برق، دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان، ایران

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مقدمه

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال یکی از بخشهای اساسی برنامه‌ریزی توسعه سیستمهای قدرت است که هدف از انجام آن مشخص کردن زمان، مکان، و تعداد خطوط انتقال جدید در راستای بهینه‌سازی هزینه ساخت و بهره‌برداری این خطوط جهت نیل به کفایت در تحویل توان الکتریکی به مراکز بار می‌باشد [۱، ۲ و۳] که این امر با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از قیود فنی، اقتصادی و قابلیت اطمینان میسر می‌گردد. در این راستا بودجه سرمایه گذاری منطقی و قابل قبول بایستی از جانب مالکان شبکه با توافق مشتری که انواع معیارهای قابلیت اطمینان مرتبط با سرمایه گذاری را در نظر می‌گیرند تعیین شود[۴].

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال درحالت کلی به دو نوع استاتیکی و دینامیکی طبقه‌بندی می‌شود. در نوع استاتیکی تعداد و مکان احداث خطوط مورد نیاز برای یک سال افق مشخص تعیین می‌شود، در حالی که در نوع دینامیکی علاوه بر دو مورد مزبور زمان نیاز به احداث خطوط جدید نیز مشخص می‌گردد [۵ و۶].

درکشورهای در حال توسعه به خاطر اینکه اکثر نیروگاههای تولید برق در فواصل صدها کیلومتری از مراکز بار قرار گرفته اند مسئله برنامه‌ریزی استاتیکی توسعه شبکه انتقال (STNEP [1]) بایستی به طور دقیق مورد ارزیابی قرار گیرد. پس از مقاله گارور در سال ۱۹۷۰ روشهای مختلفی از جمله GRASP [۳]، جداسازی بندر [۶]، HIPER [۷]، الگوریتم شاخه و کران [۸]، آنالیز حساسیت [۹]، الگوریتم ژنتیک [۱،۱۰،۱۱،۱۲]، فولاد شبیه سازی شده [۱۳]، جستجوی تابو [۱۴]، برای حل مسئله STNEP ارائه شد که در هیچکدام از این روشها، به کفایت شبکه بعد از اعمال برنامه‌ریزی توسعه اشاره‌ای نشده است. بدین معنا که شبکه‌ای که مورد توسعه استاتیکی قرار گرفته، بعد از چه مدت کفایت خود را از دست داده و نیاز به توسعه مجدد خواهد داشت. با عنایت به این نکته که کفایت شبکه در تامین بارها امری حیاتی بوده و از دست رفتن آن (اضافه بارگذاری) منجر به خاموشی و از دست دادن بار می‌شود، هر چه قدر شبکه توسعه یافته از این لحاظ قدرتمندتر بوده و خطوط آن دیرتر دچار اضافه بارگذاری گردند، اقتصادی‌تر بوده و موجب بهره‌برداری مطلوبتر خواهد گشت. در ادامه بعد از معرفی تابع هدف و روش حل ارائه شده برای آن، با اجرای الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه ۶ شینه گارور نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مدلسازی ریاضی مساله

تابع هدف ترکیبی از هزینه توسعه و زمان کفایت خطوط می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$F_E = \sum_{i,j\in\Omega} CL_{ij} n_{ij} + C_o T \qquad (۱)$$

1-Static Transmission Network Expansion Planning

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

که در آن:

F_E: هزینه توسعه بهینه شبکه.

CL_{ij}: هزینه احداث خط در کریدور i-j .

n_{ij}: تعداد مدارات جدید اضافه شده به کریدورi-j .

T: زمان از دست رفتن کفایت شبکه توسعه داده شده بر حسب سال.

Ω: مجموعه تمامی کریدورهای شبکه.

C_o: ارزش اقتصادی سالانه کفایت خطوط[۱].

اما قیود مسئله با توجه به [۵] و [۱۱] عبارتند از:

$$Sf + g - d = 0 \quad (۳)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (۴)$$

$$0 \le g \le \overline{g}$$

$$0 \le n_{ij} \le \overline{n_{ij}}$$

$$C \le C_{\max}$$

N-1 Safe Criterion

$$(i, j) \in \Omega$$

که در آن:

S : ماتریس تلاقی شاخه با گره.

f: ماتریس توانهای جاری شده در هر کریدور با عناصرf_{ij} .

g : بردار تولید.

d : بردار مصرف.

N : تعداد باسهای شبکه.

۱- این ضریب متناسب با ارزش تولید از دست رفته می باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

θ: زاویه هرشین.

γ_{ij} : عکس راکتانس کل مدارات در کریدور i-j .

n_{ij}^{0} : تعداد مدارات احداث شده در کریدور i-j .

$\overline{n_{ij}}$: حداکثر تعداد مدار قابل احداث در کریدورi-j .

$\overline{f_{ij}}$: حداکثر توان قابل عبور از کریدور i-j .

$\overline{g}$: ماکزیمم توان قابل تولید در هر شین.

C_{max} : ماکزیمم بودجه پیش بینی شده برای توسعه شبکه.

با تعریف تابع هدف به صورت فوق، نهایتا طرحی به دست خواهد آمد که از دو بعد اقتصادی و کفایت در تامین بارها نسبت به سایر طرحها بهینه تر است. با توجه به اینکه در این مقاله هدف، به دست آوردن تعداد مدارات لازم برای افزودن به شبکه تا رساندن آن به بیشترین کفایت با کمترین هزینه ممکن در یک سال افق تعیین شده می باشد، متغیرهای ما گسسته خواهند بود. بنابراین مسئله بهینه سازی فوق یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح (Integer Programming) می‌باشد که برای حل این مسئله روشهای مختلف و متنوعی از قبیل کلاسیک ریاضی، کلاسیک غیر ریاضی و ابتکاری وجود دارد [۱۵]. در این پژوهش اولا به دلیل انعطاف‌پذیری و سهولت پیاده‌سازی، و ثانیا با توجه به آنچه که در [۱۰] بدان اشاره شده، از الگوریتم ژنتیک با کدینگ دهدهی (DCGA[1]) استفاده گردیده است.

الگوریتم ژنتیک با کدینگ دهدهی

الگوریتم ژنتیک معمول، روشی است که می تواند برای حل دستگاه معادلات غیر خطی و مسائل بهینه سازی پیچیده بکار رود. این الگوریتم با استفاده از اعداد تصادفی و بر مبنای انتخاب طبیعی عمل می‌کند و نیازمند داشتن تخمین اولیه خوبی از جواب مسئله نمی‌باشد، یعنی به دست آوردن پاسخ یک مسئله پیچیده می تواند از تخمینهای اولیه ضعیف شروع و در روند تکاملی بقای اصلح به دقت لازم برسد [۱۶]. الگوریتم ژنتیک در فرم استاندارد آن بر روی رشته های باینری، موسوم به کروموزومها، که پاسخهای محتمل مسئله می باشند عمل می کند. این نوع الگوریتم، در بسیاری از مسائل عملی از جمله برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال با استفاده از سه عملگر تولید مثل، تزویج و جهش به نتایج خوبی می رسد. این عملگرها که از فرایند تکامل طبیعی اقتباس شده اند، جمعیت کروموزومها را به سوی تکامل، که به معنی بزرگتر شدن تابع معیار است، پیش می برند. در حل مسئله مورد بحث این مقاله، که در آن پارامترها صحیح می باشند، نگرش جدیدی برای تشکیل کروموزوم و نحوه کار عملگرها به کار رفته است که باعث سهولت پیاده سازی و افزایش سرعت همگرایی شده است. در این نگرش هر کروموزوم به جای مجموعه ای از بیتهای باینری، مجموعه‌ای از اعداد صحیح نامنفی در نظر

1- Decimal Codification Genetic Algorithm

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

گرفته می‌شود. نقطه تزویج تنها می تواند مرز بین اعداد صحیح انتخاب شود و عملگر جهش، پس از انتخاب یکی از اعداد صحیح در کروموزوم، مقدار آن را به طور تصادفی تغییر می‌دهد. عملگر تولید مثل، مشابه فرم استاندارد، تکثیر هر کروموزوم را متناسب با اندازه تابع هدف آن انجام می‌دهد. بدین ترتیب کروموزومهایی که دارای تابع هدف بهتر هستند در نسل بعدی بیشتر ظاهر.

ساختار کروموزوم در حل مسئله

با توجه به [۱۰]، سه روش برای کدگذاری خطوط انتقال در الگوریتم ژنتیک و تشکیل کروموزوم وجود دارد:

۱) کدگذاری دودویی برای هر کریدور.

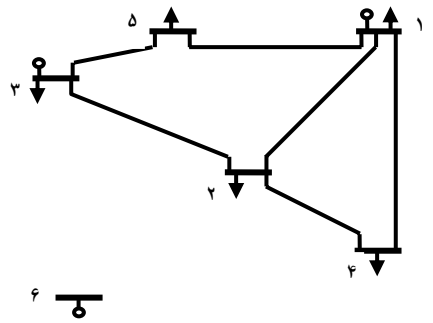
۲) کدگذاری دودویی با بیتهای مستقل برای هر خط.

۳) کدگذاری دهدهی برای هر کریدور.

گر چه کدگذاری دودویی در الگوریتم ژنتیک متداول است، اما بدلیل امکان تولید فرزندانی کاملا متفاوت با والدین خود و نهایتا احتمال وقوع واگرایی در الگوریتم مزبور [۱۰]، در این مقاله از روش سوم استفاده شده است. بدین ترتیب در ساختار کروموزوم انتخابی هر ژن بیانگر تعداد مدارات خطوط انتقال (احداث شده و جدید) در هر کریدور می باشد.

اجرای روش پیشنهادی بر روی شبکه مورد مطالعه

شبکه آزمون در این مقاله، شبکه معروف گارور می باشد که تمامی جزئیات آن در [۷] آمده و در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



شکل ۱: شبکه۶ باسه گارور

در این شبکه خطوط موجود ۴۰۰ کیلوولت بوده و پستهای ۱، ۳ و ۶ پستهای ژنراتوری شبکه می باشند. لازم به ذکر است که در اینجا سال افق برنامه‌ریزی سال ۲۰۱۶ (۱۰سال بعد) می باشد. اما با اجرای روش پیشنهادی بر روی شبکه مزبور تحت هزینه های سرمایه گذاری مختلف (C_{max} از ۲۰ تا ۹۰ میلیون دلار) نتایج ذیل بدست آمد: (اعداد داخل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدولها بیانگر خطوط لازم برای افزودن به شبکه تا سال افق برنامه‌ریزی می باشد.) لازم به ذکر است، مقدار C_{max} توسط سرمایه گذار تعیین می شود و وظیفه طراح این است که با این هزینه محدود طرحی را که کفایت بیشتر و هزینه توسعه کمتری دارد را پیشنهاد کند.

جدول ۱: خطوط افزوده شده به شبکه با
C_{max}= ۲۰ و ۲۵ million $US

کریدور	تعداد مدارات	هزینه توسعه (میلیون دلار)
۴ – ۶	۳	۱۷/۸۴۹
زمان از دست رفتن کفایت شبکه: ۹ سال پس از توسعه (سال ۲۰۲۵)		

جدول ۲: خطوط افزوده شده به شبکه با
C_{max}= ۳۰ million $US

کریدور	تعداد مدارات	هزینه توسعه (میلیون دلار)
۲ – ۶	۲	۲۷/۸۳۷
۳ – ۵	۱	
۴ – ۶	۲	
زمان از دست رفتن کفایت شبکه: ۱۴ سال پس از توسعه (سال ۲۰۲۹)		

جدول ۳: خطوط افزوده شده به شبکه با
C_{max}= ۳۵ million $US

کریدور	تعداد مدارات	هزینه توسعه (میلیون دلار)
۲ – ۶	۳	۳۳/۷۸۷
۳ – ۵	۱	
۴ – ۶	۲	
زمان از دست رفتن کفایت شبکه: ۱۶ سال پس از توسعه (سال ۲۰۳۲)		

جدول ۴: خطوط افزوده شده به شبکه با
C_{max}= ۴۰ million $US

کریدور	تعداد مدارات	هزینه توسعه (میلیون دلار)
۲ – ۶	۳	۳۷/۸۲۴
۳ – ۵	۲	
۴ – ۶	۲	
زمان از دست رفتن کفایت شبکه: ۱۸ سال پس از توسعه (سال ۲۰۳۴)		

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول ۵: خطوط افزوده شده به شبکه با

C_{max}= ۴۵ million $US

کریدور	تعداد مدارات	هزینه توسعه (میلیون دلار)
۶ – ۲	۳	۴۲/۷۲۴
۵ – ۳	۲	
۶ – ۴	۴	
زمان از دست رفتن کفایت شبکه: ۲۰ سال پس از توسعه (سال ۲۰۳۶)		

جدول ۶: خطوط افزوده شده به شبکه با

C_{max}= ۵۰ million $US

کریدور	تعداد مدارات	هزینه توسعه (میلیون دلار)
۶ – ۲	۳	۴۷/۲۴۵
۵ – ۳	۲	
۶ – ۴	۴	
زمان از دست رفتن کفایت شبکه: ۲۰ سال پس از توسعه (سال ۲۰۳۶)		

جدول ۷: خطوط افزوده شده به شبکه با

C_{max}= ۶۰ و ۵۵ million $US

کریدور	تعداد مدارات	هزینه توسعه (میلیون دلار)
۶ – ۲	۴	۵۳/۷۶۲
۵ – ۳	۳	
۶ – ۴	۳	
زمان از دست رفتن کفایت شبکه: ۲۲ سال پس از توسعه (سال ۲۰۳۸)		

جدول ۸: خطوط افزوده شده به شبکه با

C_{max}= ۶۵ million $US

کریدور	تعداد مدارات	هزینه توسعه (میلیون دلار)
۶ – ۲	۴	۵۴/۶۲۲
۵ – ۳	۳	
۶ – ۳	۱	
۶ – ۴	۳	
زمان از دست رفتن کفایت شبکه: ۲۳ سال پس از توسعه (سال ۲۰۳۹)		

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول ۹: خطوط افزوده شده به شبکه با
C_{max}= ۷۰ تا ۸۰ million $US

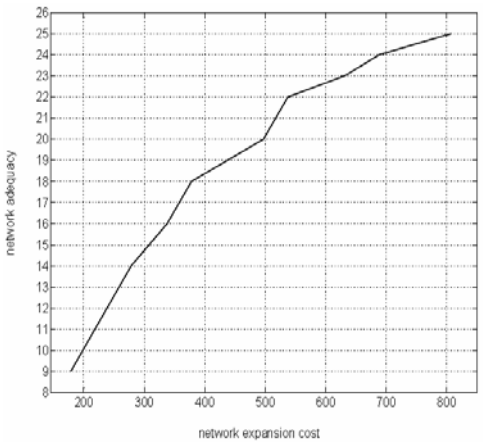
کریدور	تعداد مدارات	هزینه توسعه (میلیون دلار)
۶ – ۲	۴	۶۸/۸۹۰
۵ – ۳	۲	
۶ – ۴	۳	
۶ – ۵	۱	
زمان از دست رفتن کفایت شبکه: ۲۴ سال پس از توسعه (سال ۲۰۴۰)		

جدول ۱۰: خطوط افزوده شده به شبکه با
C_{max}= ۸۵ و ۹۰ million $US

کریدور	تعداد مدارات	هزینه توسعه (میلیون دلار)
۶ – ۲	۴	۸۰/۷۹۶
۵ – ۳	۳	
۶ – ۳	۱	
۶ – ۴	۴	
۶ – ۵	۱	
زمان از دست رفتن کفایت شبکه: سال ۲۰۴۱		

همانطور که مشاهده می شود با بالا رفتن هزینه سرمایه گذاری، با افزایش تعداد خطوط احداثی کفایت شبکه بیشتر شده و دیرتر دچار اضافه بارگذاری می شود. اما در این میان بایستی تعادلی میان هزینه سرمایه گذاری و میزان کفایت شبکه برقرار شود تا با یک هزینه سرمایه گذاری نسبی پایین به کفایت نسبی بالاتر شبکه دست یافت. با توجه به جداول فوق ملاحظه می شود که متناسب با رشد هزینه سرمایه‌گذاری، کفایت شبکه افزایش نیافته و مطابق شکل (۲) با یک روند اشباعی مواجه هستیم. لذا به نظر می رسد مقادیر پایینتر هزینه سرمایه گذاری، نسبت به مقادیر بالاتر، کفایت بهینه‌تری به شبکه می دهند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۲: منحنی کفایت- هزینه توسعه

نتیجه گیری:

با لحاظ نمودن پارامتر کفایت خطوط در برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال، ترکیبی که هم از نظر هزینه توسعه و هم به لحاظ میزان کفایت خطوط بهینه باشد، به دست می آید. همانطور که انتظار می رود با سرمایه گذاری بیشتر (و در واقع افزودن خطوط بیشتر به شبکه) شبکه مقاومتری از نظر اضافه بارگذاری حاصل می شود. اما با محدود نمودن و یا به عبارت بهتر منطقی نمودن این هزینه مشخص می شود که اگر هزینه توسعه بیشتر شود، شبکه ای که از نظر کفایت خطوط بهتر باشد بدست نخواهد آمد بلکه منحنی کفایت – هزینه توسعه گویای این واقعیت است که ترکیب بهینه به مقادیر کمتر هزینه توسعه نزدیکتر می باشد. شایان ذکر است، با توجه به نبودن مقالات مشابه در این زمینه، انجام این تحقیق با روشهای دیگر و مقایسه آن با روش پیشنهادی از اولویتهای آتی این پژوهش خواهد بود.

منابع

[1] A. R. Abdelaziz, "Genetic Algorithm Based Power Transmission Expansion Planning," *The 7th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, vol. 2, pp.642-645, Dec. 2000.

[2] V. A. Levi, and M. S. Calovic, "Linear Programming Based Decomposition Method for Optimal Planning of Transmission Network Investments," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol 140, No. 6 pp. 516-522, Nov. 1993.

[3] S. Binato; G. C. de Oliveira, and J. L. de Araujo, "A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning," *IEEE Transaction on Power System* , vol. 16, No. 2, pp. 247- 253, May 2001.

[4] J. Choi, T. Mount, and R. Thomas, "Transmission System Expansion Plans in View Point of Deterministic, Probabilistic and Security Reliability Criteria," *Proceedings of the 39th Hawaii International Conference on System Sciences* , 2006.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

[5] I. D. J. Silva, M. J. Rider, R. Romero, and C. A. Murari, "Tranmission Expansion Network Planning Considering Uncertainness in Demand," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 2, pp. 1424-1429, June 2005.

[6] S. Binato, M. V. F. Periera, and S. Granville, "A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Net work Design Problems," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol.16, Issue 2, pp. 235-240, May 2001.

[7] R. Romero, and A. Monticelli, "A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning," *IEEE Trans .on Power Systems*., vol. 9, pp. 373-380, Feb. 1994.

[8] STY. Lee, K. L. Hocks, and H. Hnyilicza, "Transmission Expansion of Branch and Bound Integer Programming with Optimal Cost Capacity Curves," *IEEE, Trans. on PAS, vol. PAS-93*, pp. 1390-1400, Aug. 1970.

[9]] M. V. F. Pereira, and L. M. V. G. Pinto, "Application of sensitivity analysis of load supplying capacity to interactive transmission expansion planning," *IEEE Trans. Power App. System.,*vol. PAS-104, pp.381-389, Feb. 1985.

[10]. A. Gallego, A. Monticelli, and R. Romero, "Transmission System Expansion Planning by an Extended Genetic Algorithm," *IEE Proceedings of Generation , Transmission and Distribution*, vol 145, No. 3, pp. 329 - 325, May 1998.

[11] Pan Zhiqi, Zhang Yao, and Zheng Fenglie, "Application of an Improved Genetic Algorithm in Transmission Network Expansion Planning," *6th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, vol. 1, pp. 318- 326, Nov. 2003.

[12] E. L. Silva, H. A. Gil, and J. M. Areiza, "Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm," *IEEE Trans. on Power System.*, vol. 15, pp. 1168-1175, Aug. 2000.

[13] R. Romero, R. A. Gallego, and A. Monticelli, "Transmission system expansion planning by simulated annealing," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, pp. 364-369, Feb. 1996.

[14] . A. Gallego, R. Romero, and A. Monticelli, "Tabu search algorithm for network synthesis," IEEE Trans. on Power System, vol. 15, pp. 490 -495̃, May 2000.

[۱۵] محمدرضا حسام زاده، حسین سیفی " برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال با لحاظ کردن عدم قطعیت "، سیزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، زنجان، اردیبهشت ۱۳۸۴.

[16] D. E. Goldberg, "Geneticalgorithm in search optimization and machine learning," *Addison-Wesly*, 1989.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]