سیزدهمین کنفرانس شبکه های توزیع نیروی برق
۱۱و ۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۷- گیلان

روش جدید مدلسازی شبکه‌های توزیع و بازآرایی به منظور کاهش تلفات با استفاده از الگوریتم ژنتیک

کاظم زارع دکتر محمود رضا حقی‌فام
بخش مهندسی برق - دانشگاه تربیت مدرس
Email: k_zar@ modares.ac.ir

چکیده – بازارایی شبکه در سیستمهای توزیع با تغییر حالت کلیدها و معمولا برای کاهش تلفات انجام می‌گیرد. بازآرایی، یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده‌ای می‌باشد. با یک جستجوی جامع، بطور قطع می‌توان جواب بهینه را پیدا کرد، ولی این روش، زمان بر است. در این مقاله، ابتدا یک روش مدلسازی موثر شبکه معرفی شده و سپس بر اساس الگوریتم ژنتیک و روش موثر فوق، ساختار بهینه شبکه با کمترین تلفات مشخص می‌شود. الگوریتم ارائه شده بر روی دو شبکه نمونه شبیه‌سازی شده و با ساختار پایه مقایسه شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه شده در مدلسازی سریع شبکه‌های توزیع و کاهش میزان تلفات موثر می‌باشد.

کلید واژه – بازآرایی، سیستمهای توزیع، کاهش تلفات، مدلسازی

۱- مقدمه

سیستمهای توزیع، شامل گروهی از شبکه های به هم پیوسته شعاعی هستند. آرایش شبکه توزیع با تغییر حالت کلیدها تغییر کرده و بارها بین فیدرها انتقال می‌یابد. در شبکه های توزیع، معمولا دو نوع کلید استفاده می شود: سکشنالایزرها (که معمولاً بسته اند) و کلیدهای مانوری (که معمولاً باز هستند). هر دو نوع کلید هم برای حفاظت و هم برای مدیریت آرایش شبکه طراحی می شوند. برنامه ریزی و بهره‌برداری سیستمهای توزیع شامل مسائل بهینه‌سازی زیادی است، نظیر توسعه شبکه با کمترین هزینه، بازآرایی شبکه با توابع هدف مشخص (مانند متعادل کردن بار پست یا فیدر، کاهش تلفات، بازیابی بار با کمترین کلیدزنی، افزایش قابلیت اطمینان، افزایش بارپذیری شبکه و ...). بازآرایی شبکه، پروسه تغییر ساختار سیستم توزیع با تغییر حالت کلیدها می باشد. به خاطر وجود ترکیب های مختلف کلیدها ، مسئله بازآرایی، یک مسئله بهینه سازی پیچیده ترکیبی می باشد. یک فاکتور اصلی در زمان اجرای عملی بازآرایی، شعاعی ماندن شبکه است . در واقع ، خیلی ازمسائل بهینه سازی ، یافتن یک شبکه شعاعی بهینه از میان ترکیبهای مختلف می باشد بطوریکه شرایط بهره برداری بهبود یابد.

امروزه بهره برداری بهینه شبکه های توزیع یک چالش مهندسی است. دلیل اصلی برای استفاده از تکنیکهای بهینه‌سازی، می نیمم کردن هزینه‌هاست. از نقطه نظر بهینه‌سازی، الگوریتمهای مختلفی برای بازآرایی شبکه به منظور کاهش تلفات ارائه شده است. هم چنین از دید بازیابی بار، بازآرایی شبکه، مسیر مناسب تغذیه بارهای مختلف را مشخص میکند بطوریکه بیشترین بار با کمترین کلیدزنی، بازیابی شود. لازم به ذکر است که در همه تکنیکهای بازآرایی، قیود بهره

برداری نظیر ولتاژ نقاط بار ، جریان مجاز سکشنها باید در نظر گرفته شوند.

مقالات زیادی در این زمینه انتشار یافته که براساس الگوریتمهای مختلف، به دنبال یافتن ساختار با کمترین تلفات بودند. Civanlar، شاید برای اولین بار، مسئله بازآرایی فیدر برای کاهش تلفات را بیان کرد [۱]. در مرجع [۲]، مسئله کاهش تلفات و متعادل سازی بار، بصورت یک مسئله برنامه ریزی صحیح ارائه شده است. الگوریتم آبکاری فولاد با روش جستجوی ممنوعه در رفرنس [۳] استفاده شده است. روش جستجوی ممنوعه تلاش برای یافتن راه حلی براساس الگوریتم بیشترین کاهش (تلفات) است. در رفرنس [۴] بهینه سازی براساس تئوری گراف و ماتریس حساسیت جریان ارائه شده است، این روش یک حل بهینه کلی را تضمین می کند ولی به یک جستجوی کامل نیاز دارد. در مرجع [۵]، الگوریتم ابتکاری براساس ضریب توان برای پیدا کردن ساختار با کمترین تلفات در شبکه های شعاعی ارائه شده است. بازآرایی با در نظر گرفتن بار متغیر درمرجع [۶] ارائه شده است. در این روش، مسئله بازآرایی با در نظر گرفتن انواع مدلهای بار (امپدانس، توان یا جریان ثابت) و براساس انواع بارهای مختلف (تجاری ، خانگی ، صنعتی یا ترکیبی) حل شده است. الگوریتم های مختلف دیگر نظیر برنامه نویسی جامع (EP) [۷]، فازی [۸]، و روش حرکت مورچگان [۹] نیز در مقالات موجود است. مرجع [۱۰] برای متعادل سازی بار از الگوریتم Petri net استفاده میکند. یکی دیگر از الگوریتمهای بهینه‌سازی که در مقالات مختلف استفاده شده است، الگوریتم ژنتیک می‌باشد. الگوریتم ژنتیک، کاربرد زیادی در مسائل بهینه سازی نظیر پخش توان بهینه، بازآرایی شبکه، مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاهها و ... پیدا کرده است.

در این مقاله، ابتدا شبکه توزیع بصورت مسیرهای تغذیه نقاط بار مدلسازی شده و سپس براساس الگوریتم ژنتیک، مسئله بازآرایی شبکه توزیع حل شده است. در نهایت روش فوق روی دو شبکه نمونه شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله آورده شده و با ساختار اولیه ازلحاظ میزان تلفات مقایسه شده است.

۲- مدلسازی براساس مسیرهای تغذیه

همانطور که می دانیم در یک شبکه به هم پیوسته حلقوی با چندین پست تغذیه، چندین مسیر مختلف برای اتصال باسها به پست تغذیه وجود دارد، در حالیکه در یک شبکه شعاعی، تنها یک مسیر تغذیه برای هر باس وجود دارد.

اتصالات در یک شبکه حلقوی و شعاعی را می توان براساس مسیرها مشخص کرد به عبارت دیگر می‌توان مشخص کرد که هر باس از طریق چه خطوطی می تواند به پست تغذیه متصل شود [۱۱] . فرض کنید مسیرهای مختلف تغذیه باس i ام به شرح زیر باشد:

$$P^i = \left\{p_1^i, p_2^i, p_3^i, ..., p_n^i\right\} \qquad (۱)$$

که در آن p_k^i ، شاخه های (خطوط) تغذیه باس i ام در مسیر k و n تعداد مسیرهای اتصال باس i را نشان می‌دهد. در یک شبکه شعاعی تنها یکی از مسیرهای p_k^i فعال بوده و بقیه قطع است. بنابراین برای اینکه بدانیم کدام یک از این مسیرها فعال می‌باشد، باید ابتدا همه مسیرهای تغذیه باسها را شناخته و ثانیاً شاخه های موجود در هر مسیر را بشناسیم. اگر ماتریس حالت کلیدها مشخص بوده و وضعیت خطوط معلوم باشد، می‌توان مسیرهای تغذیه همه باسها را مشخص کرد. برای اینکار ابتدا همه مسیرهای تغذیه باسها را شناسایی کرده و سپس برای هر مسیر، ضریب زیر را برای همه مسیرها مشخص می‌کنیم:

$$W_k^i = \begin{cases} 1 & if\ the\ branch\ p_k^i\ is\ active \\ 0 & if\ the\ branch\ p_k^i\ is\ not\ active \end{cases}$$

حال یک ماتریس ضرایب W را داریم که وضعیت مسیرها را مشخص می‌کند.

همانطور که می‌دانیم از قیود بازآرایی در شبکه توزیع، یکی شعاعی ماندن آن و دیگری تغذیه شدن همه باسهاست برای اطمینان از برآورده شدن این قیود، در هر ساختار مورد نظر، ماتریس زیر را تشکیل می‌دهیم:

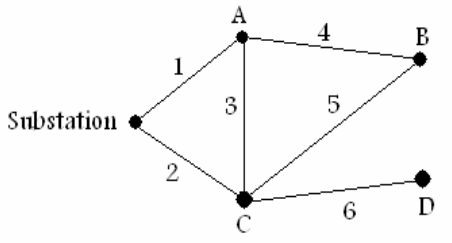
$$W = [W_k^i \ , i = 1,2,...,n], n\ is\ the\ number\ of\ paths$$

۱- ساختار ما شعاعی است اگر برای هر باس :

$$\sum_{k \in P^i} W_k^i = 1 \quad for\ any\ bus\ i$$

۲- همه بارها تغذیه شده‌اند اگر رابطه فوق برقرار باشد.

برای وضوح بیشتر روش فوق، شبکه شکل (۱) را در نظر بگیرید که در آن A, B, C, D نقاط اتصال بار و خطوط ۱ تا ۵ ، خطوط تغذیه را نشان می دهد.



شکل (۱)- شبکه نمونه برای تشریح الگوریتم

به عنوان مثال مسیرهای تغذیه باس B را می توان به شکل زیر بیان کرد :

$$P^B = \begin{cases} p_1^B = 1,4 \\ p_2^B = 1,3,5 \\ p_3^B = 2,3,4 \\ p_4^B = 2,5 \end{cases}$$

جدول (۱)، کلیه مسیرهای تغذیه همه باسها را نشان می دهد. البته در عمل، همه مسیرهای را نباید در نظر گرفت، چرا که طولانی شدن مسیر باعث افزایش مقاومت شبکه می شود. بنابراین می‌توان مسیرهای طولانی را حذف کرد. مثلاً می توان مسیر p_2^D را به دلیل طولانی شدن آن حذف کرد. برای اینکار می‌توان میزان مقاومت هر مسیری را محاسبه کرد و در صورتیکه از یک مقدار مشخصی بیشتر باشد آن را از فضای جستجو خارج کرد. حال فرض کنید خطوط ۳ و ۵ قطع باشند، در اینصورت تنها مسیرهای تغذیه، $p_3^D, p_1^C, p_1^B, p_1^A$ ، خواهد بود چرا که W_k^i متناظر سایر مسیرها برابر صفر است هم چنین داریم:

$$\sum_{k \in P^i} W_k^i = 1 \quad , i = A, B, C, D$$

جدول (۱) – کلیه مسیرهای تغذیه شبکه شکل (۱)

شماره باس	شماره مسیر	شاخه‌های مسیر
A	p_1^A	1
	p_2^A	2,3
	p_3^A	2,4,5
B	p_1^B	1,4
	p_2^B	1,3,5
	p_3^B	2,3,4
	p_4^B	2,5
C	p_1^C	2
	p_2^C	1,3
	p_3^C	1,4,5
D	p_1^D	1,3,6
	p_2^D	1,4,5,6
	p_3^D	2,6

پس ساختار فوق (قطع بودن خطوط ۳ و ۵) یک ساختار شعاعی بوده و همه بارها تغذیه شده اند. هم چنین از ماتریس P (مسیرهای تغذیه همه باسها) می توان مشخص کرد که هر شاخه‌ای در چه مسیرهایی قرار دارد و بر این اساس ماتریسB را بدست می آوریم. حال بر اساس ماتریس B، می‌توان به راحتی با فرض قطع یا وصل بودن هر شاخه، مسیرهای فعال را مشخص نمود. به عنوان مثال، ماتریس B شبکه فوق را در جدول (۲) خواهیم داشت:

جدول (۲) – ماتریس B شبکه نمونه

شاخه	مسیرها
1	$p_1^A, p_1^B, p_2^B, p_2^C, p_3^C, p_1^D, p_2^D$
2	$p_2^A, p_3^A, p_3^B, p_4^B, p_1^C, p_3^D$
3	$p_2^A, p_2^B, p_3^B, p_2^C, p_1^D$
4	$p_3^A, p_1^B, p_3^B, p_3^C, p_2^D$
5	$p_3^A, p_2^B, p_4^B, p_3^C, p_2^D$
6	p_1^D, p_2^D, p_3^D

در این مقاله از روش فوق برای مدلسازی شبکه استفاده شده و سپس براساس الگوریتم ژنتیک ، مسئله بازآرایی حل شده است.

۳- الگوریتم بهینه سازی

تابع هدف را در این مسئله می‌توان به شکل زیر بیان نمود:

$$\min \ P_{loss} = \sum_{i=1}^{b} R_i I_i^2 \quad b = branch \ \ number \quad (۲)$$

علاوه بر دو قید شعاعی بودن شبکه و تغذیه شدن همه بارها ، هم چنین باید قیود ولتاژ شینها و جریان خطوط برقرار باشد. این قیود را می‌توان طبق روابط زیر بیان نمود:

$$I_{line} < I^{\max} \quad line = 1,...,b \qquad (۳)$$

$$V_i > V^{\min} \quad i = 1,...,nbus \qquad (۴)$$

یعنی مقدار ولتاژ باسها باید در حد مجاز بوده و جریان خطوط از مقدار ماکزیمم تجاوز نکند.

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، برای بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. طول هر کروموزوم به اندازه تعداد خطوط بوده و هر ژن آن نشان دهنده قطع (۰) و یا وصل (۱) بودن خط متناظر است. الگوریتم بازآرایی شبکه طی مراحل زیر اجرا می شود :

۱. وارد کردن اطلاعات مربوط به خطوط و میزان توان اکتیو و راکتیو مصرفی باسها.
۲. ساختار اولیه شبکه تحلیل شده و میزان تلفات آن محاسبه می شود .
۳. براساس الگوریتم مسیریابی، کلیه مسیرهای تغذیه (ماتریس P) مشخص می شود.
۴. جمعیت اولیه که شرط شعاعی بودن و تغذیه شدن کلیه بارها را رعایت میکند انتخاب می‌شود.
۵. عملهایcrossover و mutation انجام شده و ترکیبهایی که شرط شعاعی بودن و تغذیه کلیه بارها را رعایت کرده، انتخاب می‌شود.
۶. جمعیتهای حاصل از ردیف ۴ و ۵ انتخاب شده، پخش بار، انجام شده و میزان تلفات هر جمعیت محاسبه می‌شود .
۷. جمعیتهای ردیف ۶ براساس میزان تلفات بطور صعودی مرتب می‌شود.
۸. جمعیتهایی که روابط (۲) و (۳) در آنها برقرار باشد انتخاب می‌شود .
۹. اگر شرط توقف مثبت نباشد به مرحله ۵ برمی‌گردیم، در غیر اینصورت کمترین تلفات و ساختار متناظر نمایش داده می‌شود.

لازم به ذکر است که درهر مرحله تکرار، از یکسان بودن کروموزومها جلوگیری می شود.همچنین پخش بار براساس روش بازگشتی انجام شده و میزان تلفات براساس رابطه (۲) محاسبه می شود.

۴- شبیه‌سازی الگوریتم بازآرایی بر روی شبکه های نمونه

الگوریتم فوق بر روی دو شبکه معروف انجام شده و نتایج آنها آورده شده است. در این شبیه‌سازیها قیود ولتاژ شینها لحاظ شده و محدوده مجاز تغییرات ولتاژ، $\mp 10\%$ در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به این شبکه ها در ضمیمه آورده شده است.

الف - شبکه civanlar

در این شبکه فرض شده که هر خط، دارای کلید می‌باشد. جدول (۳) ساختار اولیه، نهایی و میزان تلفات آنها را نشان می دهد. ملاحظه می شود که میزان تلفات در شبکه بازآرایی شده به میزان ۸/۴٪ کاهش یافته است. ولتاژ مینیمم برابر 0.973 *per unit* می‌باشد که در محدوده مجاز مورد نظر قرار دارد.

جدول (۳) – نتایج حاصل از بازآرایی شبکه civanlar

	سکشنهای باز	تلفات(kw)
قبل از بازآرایی	S7,S12,S16	486.23
بعد از بازآرایی	S9,S10,S16	445.99

ب. شبکه باران

این شبکه شامل ۳۷ خط، ۳۲ کلید و ۵ عدد کلید مانوری می‌باشد. نتایج حاصل از الگوریتم فوق در جدول(۴) مشخص است. ولتاژ مینیمم برابر 0.9345 *per unit* می‌باشد که در محدوده مجاز مورد نظر قرار دارد.

جدول (۴) – نتایج حاصل از بازآرایی شبکه Baran

کلیدهای باز	تلفات(kw)
S7,S9,S14,S28,S32	141.078

نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا یک روش مدلسازی موثر شبکه توزیع و نحوه استفاده از آن در بازآرایی معرفی شده و سپس بر اساس الگوریتم ژنتیک و روش اشاره شده، ساختار بهینه دو شبکه civanlar و Baran با کمترین تلفات مشخص شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه شده در مدلسازی سریع شبکه‌های توزیع کاهش میزان تلفات موثر می‌باشد.

مراجع:

[1] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, and S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," IEEE Trans. Power Del., vol. 3, no. 3, pp. 1217–1223, Jul. 1988.

[2] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, Apr. 1989.

[3] Y.J. Jeon and J.C. Kim, "Network Reconfiguration in Radial Distribution System Using Simulated Annealing and Tabu Search", IEEE PES Winter Meeting, Jan. 2000, pp. 23-27.

[4] A.B. Morton and I.M.Y. Mareels, “An Efficient Brute-force Solution to the Network Reconfiguration Problem,” IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000, pp. 996-1000.

[5] S. K. Goswami and S. K. Basu, “A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization,” IEEE Trans. Power Del., vol. 7, no. 3, pp. 1484–1491, Jul. 1992.

[6] Enrique López, Hugo Opazo, Luis García, and Patrick Bastard ,” Online Reconfiguration Considering Variability Demand: Applications to Real Networks”, IEEE Transaction on Power Systems, vol. 19, no. 1, FEBRUARY 2004, pp.549-553.

[7] W. M. Lin, F. S. Cheng, and M. T. Tsay, “Feeder loss reduction by switching operations with a hybrid programming technique,” in Proc. IEEE Transm. Dist. Conf., vol. 2, 1999, pp. 603–608.

[8] Q. Zhou, D. Shirmohammadi, and W. H. E. Liu, “Distribution feeder reconfiguration for service restoration and load balancing,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, pp. 724–729, May 1997.

[9] Enrico Carpaneto and Gianfranco Chicco “Ant-Colony Search-Based Minimum Losses Reconfiguration of Distribution Systems”, IEEE MELECON 2004, May 12-15,2004, Dubrovnik, Croatia.

[10] Yu-Lung Ke, Chao-Shun Chen, Meei-Song Kang, Jaw-Shyang Wu and Tsung-En Lee, “Power Distribution System Switching Operation Scheduling for Load Balancing by Using Colored Petri Nets”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 1, FEBRUARY 2004, pp. 629-635.

[11] Esther Romero Ramos, Antonio Gómez Expósito, Jesús Riquelme Santos, and Francisco Llorens Iborra, “Path-Based Distribution Network Modeling: Application to Reconfiguration for Loss Reduction”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 20, NO. 2, MAY 2005,pp.556-564.

ضمیمه

الف) اطلاعات شبکه civanlar.

این شبکه شامل ۱۶ نقطه بار، ۱۶ سکشن و سه پست تغذیه می‌باشد. سطح ولتاژ 23kv و Sbase=100MVA می‌باشد. اطلاعات مربوط به خطوط در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول (۵)- اطلاعات مربوط به شبکه civanlar

شماره	ابتدا	انتها	R (pu)	X (pu)	P (MW)	Q (Mvar)	Capacitor bank (Mvar)
1	1	4	.075	0.1	2	1.6	
5	4	5	0.08	0.11	3	1.5	1.1
4	4	6	0.09	0.18	2	0.8	1.2
6	6	7	0.04	0.04	1.5	1.2	
2	2	8	0.11	0.11	4	2.7	
8	8	9	0.08	0.11	5	3	1.2
9	8	10	0.11	0.11	1	0.9	
10	9	11	0.11	0.11	0.6	0.1	0.6
11	9	12	0.08	0.11	4.5	2	3.7
3	3	13	0.11	0.11	1	0.9	
13	13	14	0.09	0.12	1	0.7	1.8
14	13	15	0.08	0.11	1	0.9	
15	15	16	0.04	0.04	2.1	1	1.8
7	5	11	0.04	0.04			
12	10	14	0.04	0.04			
16	7	16	0.09	0.12			

مقادیر P وQ در جدول فوق مربوط به باس انتهایی می‌باشد.

ب) اطلاعات شبکه Baran

این شبکه شامل ۳۲ نقطه بار، ۳۲ سکشن، ۵ خط مانوری و یک پست تغذیه می‌باشد. سطح ولتاژ 12.66kv می‌باشد. اطلاعات مربوط به خطوط در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول (۶)- اطلاعات مربوط به شبکه Baran

شماره	ابتدا	انتها	R (ohm)	X (ohm)	P (Kw)	Q (Kvar)
1	1	2	.0992	.0470	100	60
2	2	3	.493	.493	90	40
3	3	4	.366	.1864	120	80
4	4	5	.3811	.1941	60	30
5	5	6	.819	.707	60	20
6	6	7	.1872	.6188	200	100
7	7	8	.7114	.2351	200	100
8	8	9	1.03	.74	60	20
9	9	10	1.044	.74	60	20
10	10	11	.1966	.065	45	30
11	11	12	.3744	.1238	60	35
12	12	13	.4680	1.155	60	35
13	13	14	.5416	.7129	120	80
14	14	15	.5910	.526	60	10
15	15	16	.7463	.545	60	20
16	16	17	1.289	1.721	60	20
17	17	18	.732	.574	90	40
18	2	19	.164	1.565	90	40
19	19	20	1.504	1.3554	90	40
20	20	21	.4095	.4784	90	40
21	21	22	.7089	.9373	90	40
22	22	23	.4512	.3083	90	50
23	23	24	.898	.7091	420	200
24	24	25	.896	.7011	420	200
25	25	26	.203	.1034	60	25
26	26	27	.2842	.1447	60	25
27	27	28	1.059	.9337	60	20
28	28	29	.8042	.7006	120	70
29	29	30	.5075	.2585	200	600

30	30	31	.9744	.963	150	70
31	31	32	.3105	.3619	210	100
32	32	33	.341	.5302	60	40
33	8	21	2	2		
34	9	15	2	2		
35	12	22	2	2		
36	18	33	.5	.5		
37	25	29	.5	.5		

لازم به ذکر است که مقادیر P وQ در جدول فوق مربوط به باس انتهایی می‌باشد.