



بهینه‌سازی انرژی بازیابی به کمک تجهیزات کلیدزنی در شبکه‌های توزیع

حامد هاشمی دزکی^۱ حسین عسکریان ایبانه^۱ علی عاقلی^۱ کاظم مظلومی^۲

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

واژه‌های کلیدی: تجهیزات کلیدزنی، سکسیونر، انرژی بازیابی، بهینه‌سازی

چکیده

۱- مقدمه

بررسی آماری انجام گرفته نشان می‌دهد که بیشترین خاموشی‌های مشترکین انرژی الکتریکی ناشی از بروز خطا در شبکه‌های توزیع می‌باشد [۱]. با بهبود قابلیت اطمینان شبکه، ارائه خدمات مطلوب به مشترکین میسر است. تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی در شبکه‌های توزیع نقش موثری در بهبود قابلیت اطمینان ایفا می‌کنند. از اینرو تحقیقات و مطالعات زیادی در این زمینه انجام گرفته است. در مراجع [۲] تا [۱۱] در مورد بهینه‌سازی هزینه کل سیستم توزیع، شاخص‌های قابلیت اطمینان از قبیل SAIFI، SAIDI و ... تحقیقات مختلفی انجام شده است. در [۴] و [۶] سعی نویسندگان بر بهبود شاخص SAIFI بوده است و با انتخاب تابع هدف مبتنی بر کاهش شاخص SAIFI محل بهینه قرارگیری تجهیزات مشخص شده است. در [۸] تا [۱۰] و [۱۲] تابع هدف با تاکید بر

در شبکه‌های توزیع با بروز خطا و عملکرد تجهیزات حفاظتی بخشی از شبکه به سبب ساختار شعاعی آن بی‌برقی را تجربه خواهند کرد. با کمک تجهیزات کلیدزنی می‌توان قابلیت اطمینان را افزایش و انرژی توزیع نشده را کاهش داد. در این مقاله شاخص جدیدی به نام R.I معرفی می‌گردد. مقدار این شاخص بر اساس توپولوژی مدار، محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی محاسبه می‌گردد. محل بهینه تجهیزات کلیدزنی در شبکه با بهینه‌سازی شاخص معرفی شده مشخص می‌شود. با اعمال نتایج بهینه بدست آمده با کمترین تعداد تجهیز کلیدزنی می‌توان انرژی بازیابی شبکه را حداکثر کرده و در نتیجه شاخص‌های قابلیت اطمینان را افزایش داد.

بخش دوم در شاخص R.I جواب بهینه مسئله را از جواب بدیهی بهینه سازی این شاخص دور می کند. جواب بدیهی مسئله قرار دادن تجهیز در تمام بخش های شدنی فیدر است که مطلوب طراح و آنالیزور شبکه نخواهد بود. لذا این ضریب جریمه، جواب بهینه را به گوشه ای از فضای شدنی هدایت خواهد کرد که تعداد تجهیزات مورد نیاز حداقل باشد.

$$R.I = \sum_{i=1}^3 \text{factore}(i) - M \times \sum_{j \in SW} X_{sj} \quad (1)$$

در رابطه (۱) پارامترهای مورد استفاده به شرح زیر است:

M : ضریب جریمه

SW : محل های کاندیدای قرارگیری تجهیزات کلیدزنی

X_{sj} : متغیر باینری مبنی بر وجود یا عدم وجود تجهیز کلیدزنی در شاخه z ام

در توضیح بخش اول شاخص R.I باید گفت که این شاخص از ۳ بخش تشکیل شده است. فاکتور اول در رابطه (۲) آورده شده است. این فاکتور آن بخش از انرژی بازیابی شبکه را محاسبه خواهد کرد که در شاخه های اصلی نصب شده اند. فاکتور دوم در رابطه (۳) ذکر شده است. این فاکتور انرژی بازیابی بارهایی را محاسبه خواهد کرد که در شاخه های جانبی نصب گردیده اند. فاکتور سوم نیز انرژی بازیابی شده در شبکه را به کمک تغذیه از فیدر مجاور را محاسبه خواهد کرد. فاکتور سوم در رابطه (۴) آورده شده است.

شاخص های اقتصادی و هزینه های تحمیلی به سیستم و شرکت های توزیع تعبیه شده است. در این مقاله انرژی بازیابی شده در سیستم توزیع، با تعیین بهینه محل قرارگیری تجهیزات کلیدزنی حداکثر می شود. برای محاسبه انرژی بازیابی شده در شبکه توزیع و تبیین تابع هدف مناسب، مدل ریاضی نوینی برای انرژی بازیابی شده در شبکه های توزیع به کمک تجهیزات کلیدزنی ارائه می گردد. تابع هدف متناظر با انرژی بازیابی شده با کمک الگوریتم ژنتیک بهینه می شود. در ضمن نتایج قرارگیری بهینه تجهیزات کلیدزنی در شبکه توزیع نمونه معرفی می گردد.

۲- مدل ریاضی انرژی بازیابی شده در شبکه

با بروز خطا در شبکه های توزیع بخشی از شبکه توزیع بی-برق می شود و قطعی برق را تجربه می کند. حال می توان با کمک تجهیزات کلیدزنی موجود در شبکه توزیع، تغییر وضعیت آنها تعدادی از مشترکین شبکه توزیع را قبل از تعمیر و رفع کلی خطا از بی برقی رها کنید. در [7,8] در مورد انرژی توزیع نشده مدل ریاضی ارائه گردیده است. در این مقاله برای بازیابی انجام گرفته با قدرت مانور و تغییر توپولوژی شبکه به وسیله تجهیزات کلیدزنی مدل ریاضی نوینی ارائه شده است. نحوه محاسبه انرژی بازیابی در این مدل با استفاده از پارامترهایی از قبیل توپولوژی شبکه، محل قرارگیری تجهیزات، نرخ بروز خطای دائم و بار نصب شده در هر بخش فیدر توزیع انجام گرفته است.

در رابطه (۱) شاخص R.I بیان شده است. این شاخص از دو بخش کلی تشکیل شده است. یک بخش معرف انرژی بازیابی در شبکه است و بخش دیگر نقش ضریب جریمه را به عهده می گیرد.

$$factor(1) = \sum_{i=1}^{mb} X_{si} \left(\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{mb} \lambda_{mj} \times A(i, j) \times \sum_{k=1}^{blb(i)} \sum_{l=1}^{ts(k)} L(k, l) \times A(fdmb, i-1) \times \prod_{m=fdmb(k)}^{i-1} (1 - X_{sm}) \\ & + \sum_{n=fbl(1)-fbl(i)+1}^{fbl(1)} \sum_{p=1}^{ts(n)} \lambda(n, p) \times A(1, ts(n)) \times A(1, fumb(n)) \times \\ & \times \sum_{q=1}^{blb(i)} \sum_{r=1}^{ts(q)} L(q, r) \times \prod_{t=fdmb(q)}^{i-1} (1 - X_{st}) \times A(fdmb(q), i-1) \end{aligned} \right) \quad (2)$$

$$factor(2) = \sum_{i=1}^{mb} X_{si} \left(\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{mb} \lambda_{mj} \times A(i, j) \times \sum_{k=1}^{i-1} L_{mk} \times A(k+1, i-1) \times \prod_{l=k+1}^{i-1} (1 - X_{sl}) \\ & + \sum_{n=fbl(1)-fbl(i)+1}^{fbl(1)} \sum_{p=1}^{ts(n)} \lambda(n, p) \times A(1, ts(n)) \times A(i, fumb(n)) \times \\ & \sum_{q=1}^{i-1} L_q \times \prod_{r=q+1}^{i-1} (1 - X_{sr}) \times A(1, i-1) \end{aligned} \right) \quad (3)$$

$$factor(3) = \sum_{i=1}^{mb} X_{si} \left(\begin{aligned} & \left\{ \sum_{k=1}^{blb(i)} \sum_{l=1}^{ts(k)} \lambda(k, l) \times A(1, l) + \sum_{w=1}^{i-1} \lambda_w \right\} \\ & \times \left\{ \sum_{n=fbl(1)-fbl(i)+1}^{fbl(i)} \sum_{p=1}^{ts(n)} L(n, p) + \sum_{v=i+1}^{mb} L_{mv} \right\} \end{aligned} \right) \quad (4)$$

پارامترهای موجود در روابط (۲)، (۳) و (۴) عبارتند از:

$ts(n)$: تعداد بخش های شاخه جانبی n ام

mb : تعداد شاخه های اصلی

$fumb(i)$: اولین شاخه اصلی بالادست شاخه جانبی i ام

λ_{mj} : نرخ بروز خطا در شاخه j ام اصلی

$fdmb(i)$: اولین شاخه اصلی پایین دست شاخه جانبی i ام

L_{mk} : بار نصب شده در شاخه k ام اصلی

$A(i, j)$: تابع کمکی منطقی که در رابطه (۵) بیان شده

است.

$fbl(i)$: اولین شاخه جانبی جلوی شاخه اصلی i

$$A(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if exist none protective object in position } i \text{ to } j \\ 0 & \text{other wise} \end{cases} \quad (5)$$

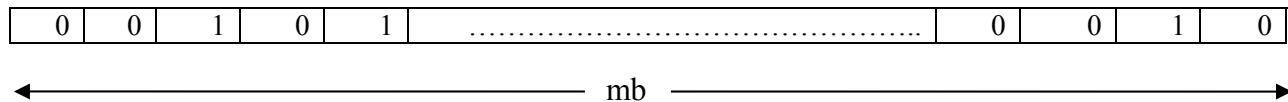
های موجود در آن نیز پیچیدگی و حجم بالای محاسبات را می طلبد. با در نظر گرفتن گستردگی فضای جستجوی جواب بهینه (با توجه به گستردگی بالای شبکه های توزیع عملی) و ماهیت تابع هدف، پیدا کردن جواب مسئله و حل بهینه به سمت استفاده از الگوریتم های هوشمند سوق داده می شود.

۳- بهینه سازی تابع هدف

حداکثر کردن مقدار انرژی بازیابی در شبکه توزیع یک مسئله بهینه سازی است. بیان ریاضی این بهینه سازی در رابطه (۶) آورده شده است. از اینرو که تابع هدف معرفی شده دارای ماهیت غیرخطی است. تعداد عبارات و متغیر

$$Max \ R.I = \left\{ \sum_{i=1}^3 \text{factore}(i) - M \times \sum_{j \in SW} X_{sj} = f(X_{sj}) \right\}$$

$$\text{subject to} \begin{cases} X_{sj} = 1 \text{ or } 0 \quad j \in \text{PossiblePositionToSwitchAllocate} \\ \sum_{j=1}^{mb} X_{sj} \times \text{SwitchCost} \leq \text{ExpectedCapital} \end{cases} \quad (6)$$



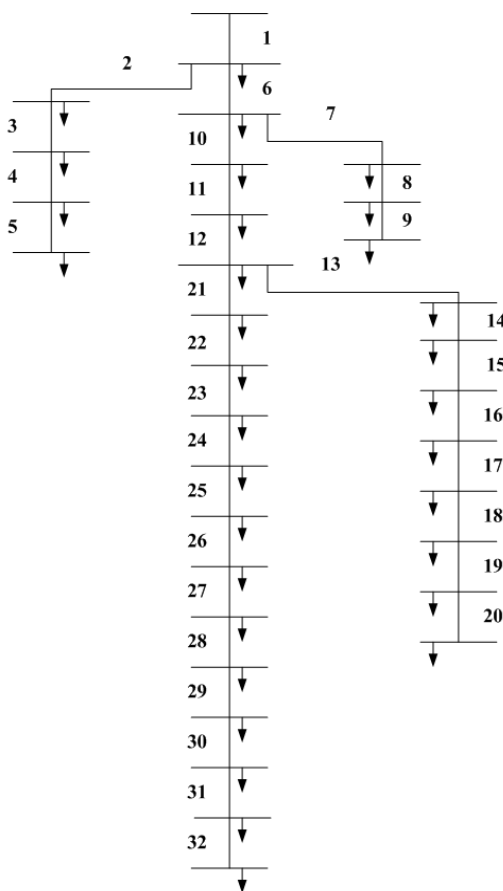
شکل (۱): نمایش یک کروموزوم نمونه در بهینه‌سازی تابع هدف

فرایند بهینه‌سازی محل قرارگیری تجهیزات کلیدزنی در شبکه توزیع نمونه انجام شده است. شبکه نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است. شبکه نمونه از [13] استخراج شده است. بر پایه ساده‌سازی محاسبه تابع هدف و ملموس شدن عبارات موجود در تابع هدف ذکر شده نحوه شماره‌گذاری بخش‌های شاخه‌های اصلی و جانبی در این مقاله با [13] متفاوت است. شبکه نمونه با شماره-گذاری مورد استفاده در این مقاله در شکل (۲) نشان شده است.

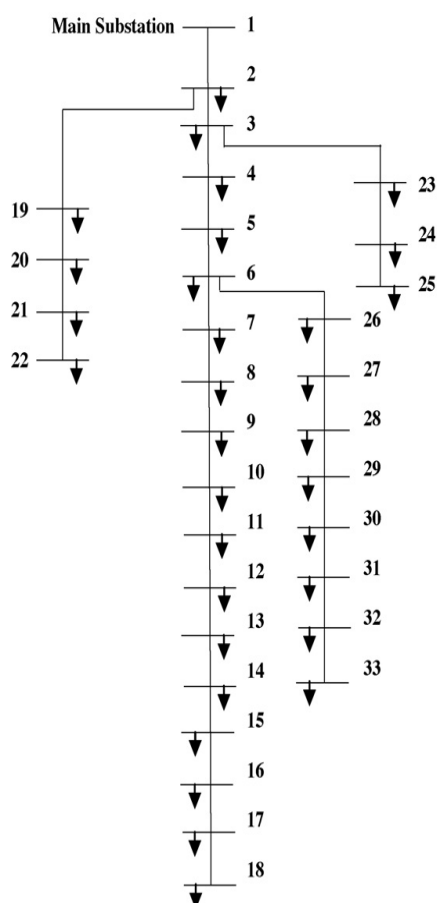
جدول (۱): پارامترهای در نظر گرفته شده در فرآیند بهینه‌سازی

ردیف	نرخ بروز خطای دائم در سال در ۱۰۰ کیلومتر	۲۰
۱	شاخه‌های محل قرارگیری فیوز	۲، ۷، ۱۱، ۱۳، ۲۳، ۲۷
۲	شاخه‌های محل قرارگیری ریکلوزر	۱
۳	مقدار ضریب جریمه M	۱۵۰۰

در مسائل بهینه‌سازی انجام گرفته در مقالات اخیر از راه‌های مختلف بهینه‌سازی جهت حل مسئله و پیدا کردن جواب بهینه استفاده شده است. مراجع [5,11] از تئوری مورچگان در بهینه‌سازی تابع هدف خود سود برده‌اند. در [9,8] از روش جستجوی ممنوع (tabu search) استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در موارد مختلف به کار گرفته شده است. [6,7,10] نمونه مراجعی هستند که از الگوریتم ژنتیک به عنوان روش و راه-حل بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی تابع هدف استفاده شده است. هر کروموزوم مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک شامل تعداد ژنی برابر تعداد بخش‌های شاخه اصلی است. هر ژن ماهیت متغیر باینری (۰) یا (۱) را خواهد داشت. اگر مقدار ژن m ام یک کروموزوم (۰) باشد به این معناست که تجهیز کلیدزنی در بخش m ام شاخه اصلی وجود ندارد و ژن ۱ در شاخه m ام معرف وجود تجهیز در این موقعیت است. شکل (۱) نمایش یک کروموزوم نمونه است.



شکل (۳): شبکه توزیع نمونه مستخرج از [13] با روش شماره گذاری شاخه ای



شکل (۲): شبکه توزیع نمونه مستخرج از [13]

در تحلیل نتایج بدست آمده بایستی گفت با قرار دادن ۴ تجهیز کلیدزنی در فیدر مورد مطالعه می توان در یک بازه یکساله به اندازه ۶۴۹۰ کیلووات را در تفاوت زمانی بی برقی بدون بازیابی انرژی و زمان لازم جهت انجام عملیات کلیدزنی و مانور را از زمان انرژی توزیع نشده کاهش داد. با اعمال نتایج پیشنهادی به فیدر و قرار دادن تجهیزات کلیدزنی در محل های مشخص شده شاخص SAIDI نیز کاهش خواهد یافت.

تفاوت ۶۰۰۰ واحدی بین مقدار بهینه تابع هدف و مقدار انرژی بازیابی شده ناشی از ضریب جریمه قرار داده شده است (مقدار ضریب جریمه M در تعداد تجهیز).

پارامترهای در نظر گرفته شده در فرآیند بهینه سازی در جدول (۱) آورده شده است.

اطلاعات شبکه ۳۳ باس توزیع نشان داده شده در شکل های (۲) و (۳) در جدول (۳) آورده شده است.

محل های پیشنهادی بهینه جهت قرارداد سکیونر یا سکشنالایزر به منظور حداکثرسازی انرژی بازیابی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): نتایج بهینه سازی تابع هدف

۱	محل های پیشنهادی جهت قرارداد تجهیز کلیدزنی	۱۱، ۱۲، ۲۱، ۲۳
۲	مقدار بهینه تابع هدف	۴۹۰/۹۹

جدول (۳): اطلاعات شبکه ۳۳ باس توزیع

شماره شاخه	گره ابتدایی	گره انتهایی	راکتانس	بار نصب شده	نرخ خطای دائم در سال
1	1	2	0.0477	100	0.00954
2	2	19	0.1565	90	0.0313
3	19	20	1.3554	90	0.27108
4	20	21	0.4784	90	0.09568
5	21	22	0.9373	90	0.18746
6	2	3	0.2511	90	0.05022
7	3	23	0.3083	90	0.06166
8	23	24	0.7091	420	0.14182
9	24	25	0.7011	420	0.14022
10	3	4	0.1864	120	0.03728
11	4	5	0.1941	60	0.03882
12	5	6	0.707	60	0.1414
13	6	26	0.1034	60	0.02068
14	26	27	0.1447	60	0.02894
15	27	28	0.9337	60	0.18674
16	28	29	0.7006	120	0.14012
17	29	30	0.2585	200	0.0517
18	30	31	0.963	150	0.1926
19	31	32	0.3619	210	0.07238
20	32	33	0.5302	60	0.10604
21	6	7	0.6188	200	0.12376
22	7	8	1.2351	200	0.24702
23	8	9	0.74	60	0.148
24	9	10	0.74	60	0.148
25	10	11	0.065	45	0.013
26	11	12	0.1238	60	0.02476
27	12	13	1.155	60	0.231
28	13	14	0.7129	120	0.14258
29	14	15	0.526	60	0.1052
30	15	16	0.545	60	0.109
31	16	17	1.721	60	0.3442
32	17	18	0.574	90	0.1148

۴- نتیجه گیری

در این مقاله در راستای افزایش انرژی بازیابی شده در شبکه های توزیع شاخص R.I معرفی گردید. مدل ریاضی این شاخص نیز بر اساس پارامترهایی از قبیل توپولوژی شبکه، محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی و.. بیان شد. سپس فرآیند بهینه سازی تابع هدف ذکر شده به کمک الگوریتم ژنتیک بر روی یک شبکه نمونه توزیع ۳۳ باسه انجام گرفت. می توان گفت با اعمال نتایج بدست آمده از بهینه سازی تابع هدف ذکر شده با تعداد محدودی کلید و تجهیز کلیدزنی مقدار انرژی بازیابی شده در شبکه توزیع بنحو بسزایی افزایش یافته و شرکت های توزیع قدرت مانور بسزایی بدست می آورند.

۵- مراجع

- [1] R. Billinton and R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Power System*. New York, USA: Plenum Press, 1984.
- [2] G. Celli and F. Pilo, "Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks," *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1167-1172, Jul. 1999.
- [3] Roy Billinton and Satish Jonnavithula, "Optimal switching device placement in radial distribution systems," *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1646-1651, Jul. 1996.
- [4] F. Soudi, K. Tomasovic, "Optimized distribution protection using binary programming," *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 218-224, Jan. 1998.
- [5] J. Teng, Y. Liu, "A novel ACS-based optimum switch relocation method," *IEEE Trans.on Power Systems*, vol. 18,

- 1171-1178, Mar. 2009.
- [۱۲] حامد هاشمی، حسین عسکریان ایبانه، سید حسین حسینیان، کاظم مظلومی، "تعیین بهینه تعداد، نوع و محل تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی شبکه های توزیع بر اساس شاخص انرژی توزیع نشده"، ۲۴، امین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ایران، ۲۰۰۹.
- [13] Mohamed M. Hamada, Mohamed. A.A. Wahab, Nasser. G.A. Hemdan, "Simple and efficient method for steady-state voltage stability assessment of radial distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 152-160, Sep. 2010.
- no. 1, pp. 113-120, Feb. 2003.
- [6] F. Soudi, K. Tomasovic, "Optimal trade-off in distribution protection design," *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 292-296, Apr. 2001.
- [7] L. G. W. Silva, R. A. F. Pereira, J. R. S. Mantovani, "Allocation of protective device in distribution circuits using nonlinear programming models and genetic algorithms," *Electrical Power System Research*, 2004.
- [8] L. G. W. Silva, R. A. F. Pereira, J. R. Abbad, J. R. S. Mantovani, "Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm," *Electric Power System Research*, vol. 78, pp. 372-381, Apr. 2008.
- [9] L. G. W. Silva, R. A. F. Pereira, J. R. S. Mantovani, "Optimised allocation of sectionalizing switches and protection devices in distribution networks by using reactive tabu search algorithm," in *18th International Conference of Electric Distribution*, Turin, 2005.
- [10] L. G. W. Silva, R. A. F. Pereira, J. R. S. Mantovani, "Optimized allocation of sectionalizing switches and control and protection devices for reliability indices improvement in distribution systems," in *2004 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, Latin America*, 2004.
- [11] W. Tippachon, D. Rerkpreedapong, "Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization," *Electric Power System Research*, vol. 79, pp.