

文章编号:1671-6833(2016)04-0015-05

基于改进蚁群算法的专用输电工程电气设备优化选型

江岳文,钱佳琦

(福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108)

摘 要: 针对专用输电工程的建设现状,采用优化方法选择输电工程的主要电气设备如高压断路器、输电线路、变压器等,建立考虑一次性投资、年运行维护费用和停电损失费用的优化模型,并利用优化模型从众多符合技术参数要求的电气设备中选择成本效益最大化的投资方案,该方案兼顾经济性与可靠性,使得年综合运行费用最低.然后采用蚁群算法求解,针对该算法寻优较慢的缺点,利用改进的邻域蚂蚁“标兵”学习算法进行寻优,最后通过对居民专用输电工程算例的计算与分析,表明该模型和算法的有效性.

关键词: 专用输电工程;电气设备选型;改进蚁群算法

中图分类号: TM64 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.004

0 引言

专用输电工程指电网经营企业利用专用工程为某一类用户提供输电服务的工程.根据目前专用工程的建设现状,可以由用户出资建设,投运后,电网经营企业只向用户收取运行维护费;或由电网经营企业投资建设,投运后,电网经营企业向用户收取投资及其回报费、运行维护费两部分;或第三方(用户和电网经营企业以外的企业)投资建设,投运后,电网经营企业只向用户收取运行维护费,第三方企业向用户收取投资及其回报费^[1].不论哪种投资建设模式,专用输电工程电气投资费用中占主要的设备如线路、高压侧断路器、专用变压器等,可根据输电工程的电气参数和环境状况进行选择与校验,不同地方或不同项目工程在电气设备的选择方面具有共性.专用输电工程中的土建费用、清赔费用以及变电站类型则对于每个变电站而言都是个案,不具有共性,不同的项目工程所产生的费用会相差较多,不具有类可比性.因此,笔者主要针对专用输电工程中主要电气设备的选择展开研究.

对于输电工程,为了减少停电时间,获得较高的可靠性,需要付出更高的投资,如何在可靠性和投资费用中寻找一个最佳平衡点,这是笔者考虑电气设备选型的出发点.传统电气设备的选择是

根据电气量如额定电压和电流大小、环境等条件进行选择,通过短路电流来校验,选择满足电气要求的设备^[2].该方法尚缺乏对设备投资、可靠性等的综合评估,在众多设备技术参数都满足要求的前提下,难以综合决策或评估哪类电气设备比较合适.

文献[3]开发了设备选型软件,即把设备归类,各类设备选型存入数据库中,根据用户对设备选择的条件选择相应的设备,该选择方法类似于传统选择方法.文献[4]把可靠性和经济性结合起来考虑设备的投资费用、检修维护费用、电能损耗费用和停电损失费用,研究配网开关设置的数量与地点,采用遗传算法求解,但并没有涉及设备选型的优化.文献[5]则利用最佳负债配置率方法选择变压器的台数和容量,以年综合费用目标最小为准则,兼顾可靠性和经济性.考虑可靠性和经济性相结合,并应用于电网规划方面的文章较多,如文献[6-8],而把二者结合应用在输电工程电气设备综合优化选型上的文献目前较少.笔者基于目前专用输电工程建设的需要,在所选择的设备都已满足技术参数的前提下,考虑设备的投资费用、运行维护费用以及可靠性水平等,使得所选设备年综合费用(包括设备投资费用、电能损耗费用、运行维护费用、停电损失费用等)最低,并且满足可靠性要求.

收稿日期:2015-12-03;**修订日期:**2016-03-19

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2013J01176)

通信作者:江岳文(1977—),女,湖南岳阳人,福州大学副教授,博士,主要从事电力系统优化运行研究,Email:jiangyuewen2008@163.com.

由于蚁群算法在求解组合优化问题上优势明显^[9],笔者拟采用该算法进行设备的选型优化,实现专用输电工程主要电气设备的选择,在可靠性与经济性的权衡中寻找最优设备选型组合,满足设定的目标和约束。

1 专用输电工程设备优化选型数学模型

专用输电工程的电气设备主要包括高压断路器、输电线路、变压器等。考虑这些设备的投资费用、运行维护费用、电能损耗费用以及由于设备故障而导致的缺电成本费用。在满足设定可靠性水平要求下,以年综合费用最小为目标函数,具体如下。

目标函数:

$$\min F = A + C + L.$$

(1)

约束条件:

(1) 主要电气设备投资资金的约束

$$\sum_{m=1}^e P_m \leq W.$$

(2)

(2) 专用输电工程可靠性要求

$$\sum_{m=1}^e \beta_m T_{\text{LOSS}} \leq t_h.$$

(3)

式中: A 为设备每年的等值投资费用; C 为专项输电工程的年运行维护费用与电能损耗费用之和; L 为因为设备故障而造成的年停电损失费用; P_m 为设备一次性投资费用; e 为主要电气设备元件个数; W 为规划的主要电气设备总投资金额上限; t_h 为专用输电工程年允许停电小时数上限; β_m 为设备的年故障次数; T_{LOSS} 为设备故障后平均修复时间。

式(1)中, A 采用等额资金回收计算法求得设备每年的等值投资费用,即

$$A = \sum_{m=1}^e P_m \frac{h(1+h)^{n_m}}{(1+h)^{n_m}-1}.$$

(4)

式中: h 为年投资回报系数; n_m 为设备使用年限。

式(1)中, C 为年运行费用,包括一年中各类设备的运行维护费用和电能损耗费用,即

$$C = \sum_{m=1}^e \alpha_1 P_m + \alpha \Delta A.$$

(5)

式中: α_1 为设备检修维护费率,按照目前电网经营企业的平均运行维护成本设置; α 为损耗的电能电价; ΔA 为变压器和线路年有功电能损耗之和,按最大负荷损耗时间 τ 来估算电能损耗费用如下:

$$\Delta A = \Delta A_l + \Delta A_t = \Delta P_{\text{max}} \cdot \tau + n_t \cdot \Delta P_0 \cdot (8\,760 - T_{\text{out}}) + n_t \left(\frac{S_{\text{max}}}{n_t \cdot S_n} \right)^2 \Delta P_k \cdot \tau.$$

(6)

式中: ΔA_l 、 ΔA_t 为线路、变压器年有功电能损耗; ΔP_{max} 为线路最大负荷损耗有功功率; n_t 为变压器的台数; S_{max} 为变电站最大负荷; S_n 为变压器的额定容量; ΔP_0 、 ΔP_k 为变压器空载功率损耗和负载功率损耗, T_{out} 为变压器停电检修的时间。

式(1)中, L 为停电损失费用,即

$$L = \rho \sum_{m=1}^e \beta_m T_{\text{LOSS}} \cdot P_{\text{LOSS}}.$$

(7)

式中: P_{LOSS} 为设备故障后的失负荷功率; ρ 为缺电成本,元/kWh。

2 基于蚁群算法的专用输电设备选型

专用输电工程的主要电气设备包括专用输电线路、高压断路器、变压器等。笔者采用蚁群算法对设备进行选型,即寻优变量为不同类型设备型号的组合,使得目标函数(1)在满足约束条件(2)、(3)的前提下最优。

2.1 蚁群算法(ant colony optimization, ACO)

生物学家研究发现,自然界中的蚂蚁觅食是一个群体性行为,并非单只蚂蚁在独自寻找食物。因为蚂蚁在寻找食物的过程中会释放一种信息素,并且还能接收到其他蚂蚁释放的信息素。在寻找食物过程中,有的路径上信息素浓度特别高,表征这条路径离食物源最近。于是越来越多的蚂蚁移到该条路径上,其它路径上的信息素随着时间的推移逐渐衰减,最终形成了一个最短的路径,即问题的最优解^[10]。

根据专用输电线路电气设备的配置,电气设备主要形成的集合有高压断路器集合 B_c 、输电线路集合 L_c 、变压器集合 T_c 等等。每一个集合中有 h_B 、 h_L 、 h_T 等型号的设备,每一种型号设备代表 1 个节点。节点与节点之间形成路径,如图 1 所示。

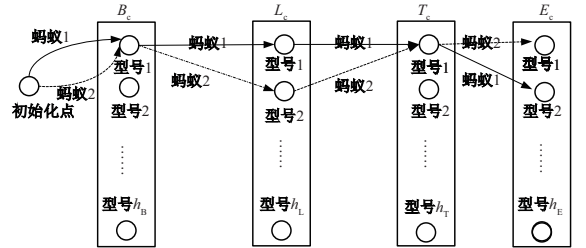


图 1 蚂蚁寻优路径示意图

Fig. 1 The search route for ants

每只蚂蚁每次只能从一个集合中选取一个节

点,并到下一个集合中选取一个节点,直至所有集合中都选取一个节点,则表示完成了一次任务,并形成一解.假设在 t 时刻,蚂蚁 k 在 B_c 集合的节点 i 选取 L_c 集合中节点 j 的概率为

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in L_c} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & f \in L_c; \\ 0, & f \notin L_c. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 表示设备 i 与设备 j 之间信息素的浓度,设初始 $\tau_{ij}(0) = \tau_0$,即各路径上信息素相等; $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数, $\eta_{ij}(t) = F_j^{-1}$, F_j 表示所选择的 j 设备的年综合费用,包括年等值投资费用、电能损耗费用、年运行维护费用以及由于 j 设备故障引起的停电损失费用; α 、 β 分别代表信息素重要因子和启发函数重要因子.

完成一次完整的设备选择后每只蚂蚁走过的路径即为问题的一个解,所有蚂蚁构成的解形成解空间,使目标函数(1)最优的解即为本次计算的最优解.在所有蚂蚁完成一次路径寻优结束后,即进行信息素浓度更新,信息素浓度更新后再参与下一次路径的寻优,更新式如下:

$$[\tau_{ij}(t+1)] = (1-\rho)[\tau_{ij}(t)] + \Delta\tau_{ij}. \quad (9)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^n \Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{f_k(x)}, & (a); \\ 0, & (b). \end{cases} \quad (10)$$

式中:(a)指第 k 只蚂蚁选择从某一设备集合中的设备 i 至另一集合中设备 j 的路径,如果不是,则(b)成立; $f_k(x)$ 为文中的目标函数(1)的值; ρ 为信息素挥发因子.

针对蚁群算法搜索速度较慢的特点^[11],为了增加蚂蚁之间交流信息的机会,通过蚂蚁之间的相互学习、相互合作更快寻找到最优“食物路径”.笔者提出充分发挥单只蚂蚁与邻域之间的协作与学习策略:即为各只蚂蚁随机配置一定数目的邻居.假设蚂蚁 k 与其邻里蚂蚁 b 之间通过各自适应值的比较,发现 $f_k(x) \leq f_b(x)$ ($f_b(x)$ 为蚂蚁 k 邻里之间适应值最小),则蚂蚁 k 为一只寻找食物源的“标兵”,其经过的路径将作为邻域之间的最佳路径;否则为一只寻找食物源的“后进生”,需要向邻域蚂蚁 b 学习,式(11)则反映了“后进生”蚂蚁和“标兵”协作与学习的过程.

$$\Delta\tau_{ij}^k = \Delta\tau_{ij}^k + \text{rand}(0,1)(\Delta\tau_{ij}^b - \Delta\tau_{ij}^k). \quad (11)$$

通过(11)式蚂蚁之间的邻域学习,增强邻域蚂蚁在“标兵”蚂蚁所经过的节点 i 与节点 j 这条支路上的信息素浓度,吸引更多蚂蚁选择“标兵”

蚂蚁的路径,从而提高程序寻优的效率.

2.2 程序流程设计

基于改进蚁群算法(IACO)的输电工程设备选型优化算法流程图如图2所示.

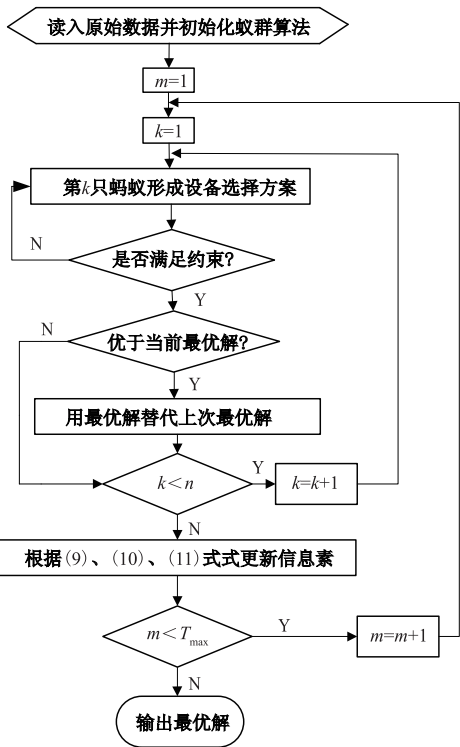


图2 算法流程图
Fig.2 Algorithm flowchart

3 算例分析

10 kV 专用输电工程,为某一居民小区供电,线路长度 826 m,配变容量选择 2 000 kVA(2 台)或 1 250 kVA(3 台),该工程最大负荷为 3 560 kVA.该小区最大年负荷利用小时数 3 000 h,功率因数平均为 0.95,年最大负荷损耗时间为 1 400 h,变压器年平均利用率为 0.8,年投资回报系数 $i = 8\%$, $\alpha_1 = 2.2\%$; $\alpha = 0.5$ 元/kWh; $\rho = 35$ 元/kWh.

蚁群算法参数:蚂蚁数 $n = 15$; $\alpha = 1$; $\beta = 5$; $\rho = 0.1$;最大迭代次数 $T_{\max} = 50$; $Q = 100$.主要电气设备型号备选表见表 1~3.

表1 断路器备选型号表
Tab.1 Types for breakers

型号	$\beta_m /$ (次·a ⁻¹)	$T_{\text{LOSS},m} /$ h	$P_m /$ 万元	n_m / a
BA	5.0	0.8	0.80	6
BB	3.0	0.8	1.45	10
BC	3.0	0.8	4.35	10
BD	2.0	0.8	7.89	15
BE	0.9	0.8	4.96	15
BF	0.6	0.8	8.75	15

表 2 线路备选型号表

型 号	$r/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$x/(\Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{m})$	$\beta_m/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$	T_{LOSS}/h	$P_m/\text{万元}$	n_m/a
LA	1.26	0.399	5.038 6	6.5	11.25	20
LB	1.26	0.399	5.038 1	6.5	12.08	20
LC	0.9	0.389	5.029 7	6.5	12.79	20
LD	0.63	0.379	5.021 3	6.5	14.02	20

表 3 变压器备选方案表

方 案	容量/ (kVA · 台 ⁻¹)	$\Delta P_0/\text{kW}$	$\Delta P_k/\text{kW}$	$\beta_m/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$	T_{LOSS}/h	$P_m/(\text{万元} \cdot \text{台}^{-1})$	n_m/a
TA	2 000/2	2.85	17.8	0.138	151	81	15
TB	2 000/2	2.85	17.8	0.129	151	105	15
TC	1 250/3	1.95	12.8	0.138	151	57	15
TD	1 250/3	1.95	12.8	0.129	151	74	15

3.1 电气设备选型比较

笔者分析 5 种不同的目标函数即考虑设备投资费用、运行费用和停电损失费用之和;考虑设备投资费用和运行费用之和;仅考虑电气设备投资费用;仅考虑设备运行费用;仅考虑停电损失费用,得出采用改进的蚁群算法选择设备组合的结果如表 4 所示。

表 4 方案比较

目标	断路器 型号	线路 型号	变压 器方 案	目标函 数值/ 万元	实际年 综合运 行费用/ 万元	供电 可靠 率
$\min F = A + C + F(a)$	BF	LD	TA	503.21	503.21	0.993 73
$\min F = A + C$	(b) BA	LD	TA	56.567	588.07	0.992 53
$\min F = A$	(c) BA	LA	TA	39.691	593.54	0.992 51
$\min F = C$	(d) BA	LD	TA	16.594	588.07	0.992 53
$\min F = L$	(e) BF	LD	TD	435.11	543.77	0.994 00

由表 4 可以看出,采用不同的建设目标,则选择的设备不同,其供电可靠性和年综合运行费用也不同。其中,目标(c)只考虑投资费用的大小,该建设方案所产生的年运行费用最高,比综合考虑经济性与可靠性的投资方案(a)高出 90.33 万元。由于缺电成本高达 35 元/kWh,因此以不考虑可靠性成本为建设方案的目标(b)所造成的停电损失费用比(a)多出 88.95 万元。综合考虑经济性与可靠性的投资方案(a)的可靠性虽然比仅考虑可靠性的投资方案(e)略差,但实际年运行费用下降了 7.5%,这一点也充分说明可靠性与经

济性对项目的建设和运行起到相辅相承的作用。仅考虑可靠性则会造成过多的投资和年运行费用;仅考虑可投资,则需要付出较大的缺电成本,成本效益不能达到最大化。

3.2 算法优越性比较

由于寻优路径为专用工程主要电气设备的选型,寻优路径较少,寻优速度较快,无论是标准算法还是改进的邻域蚂蚁“标兵”学习算法耗时都比较短。但通过运行程序 20 次,改进的蚁群算法能取得更快的收敛速度,寻优时间缩短近 16.2%,采用 ACO 的平均收敛时间为 0.26 s,采用 IACO 的平均收敛时间为 0.22 s。20 次运行中最优收敛曲线见图 3 所示。

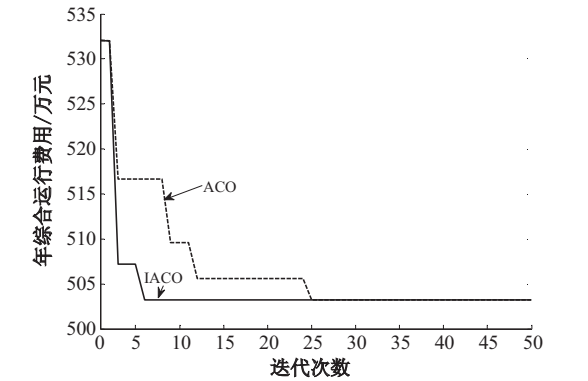


图 3 标准蚁群算法与改进蚁群算法收敛速度比较

Fig.3 Comparison of the convergence between ACO and IACO

4 结论

笔者根据专用输电工程的建设特点,提出利用优化方法对主要电气设备如高压断路器、输电线路、变压器等进行选型,考虑设备的投资费用、年运行维护费用和停电损失费用,以年综合费用最小为目标,受约束于可靠性和总投资水平,采用改进的蚁群算法对问题进行求解,通过算例计算分析得出:

- (1)形成的优化模型能有效地把可靠性和经济性进行结合,选择的主要电气设备投资方案既具有较高的供电可靠性,又具有年综合运行费用最低的特点;
- (2)蚁群算法具有对组合优化问题求解的优越性,为了提高其搜索的速度,采用蚂蚁邻域学习法进行改进,算例结果表明该方法的有效性;
- (3)模型与算法也可用于对专用输电工程经济性、可靠性、运行费用等多角度的定量评估,评价输电工程项目的合理性与科学性。

参考文献:

[1] 董军,蒋雪. 输电项目评价研究现状综述[J]. 华东电力,2010,38(3):314-318.

[2] 马翠萍. 苏丹 ASSALAYA 增压泵站电气一次优化设计与设备选型[J]. 水科学与工程技术, 2010(3):74-76.

[3] 韩娜,许跃进. 农村低压电网规划设计应用软件开发[J]. 中国农业大学学报,2009,14(4):119-123.

[4] 史燕琨,王东,孙辉,等. 基于综合费用最低的配电网开关优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9):136-141.

[5] 殷德聪,许跃进,吴昊,等. 基于最佳配置负载率的配电变压器容量优化与配置[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19):145-149.

[6] 程林,焦岗,田浩. 可靠性与经济性相协调的配电网规划方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11):106-110.

[7] 颜伟,吕冰,赵霞,等. 分布式风电源与配网联络线协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2013,41(15):1-6.

[8] ZIARI I, LEDWICH G, GHOSH A, et al. Integrated distribution systems planning to improve reliability under load growth[J]. IEEE Trans on power delivery, 2012, 27(2): 757-765.

[9] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on evolutionary computations,1997,1(1):53-66.

[10] 焦留成,邵创创,程志平. 一种求解连续空间约束优化问题的蚁群算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015,36(1):20-23.

[11] HO S L, YANG S, BAI Y, et al. An ant colony algorithm for both robust and global optimizations of inverse problems[J]. IEEE transactions on magnetics,2013, 49(5):2077-2080.

The Optimum Selection of Electrical Equipment Types for Specialized Transmission Project Based on Improved Ant Colony Optimization Algorithm

JIANG Yuewen, QIAN Jiaqi

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University Fuzhou, 350116, China)

Abstract: This paper discusses the construct situations of specialized transmission project. The main equipment was selected by optimum ways, such as high voltage breakers, lines and transformers. The optimized mode takes one-off investing cost, annual operation and maintenance cost and outage cost into account. The cost-effectiveness maximization investing case was determined by the optimized mode from many feasible equipments. This case is economic and reliable. At the same time, it has the lowest synthetically cost for every year. This paper uses improved ant colony optimization algorithm to solve optimum selection of equipments because of a slower convergence speed of the normal algorithm. Neighboring ants learn from “example ant” in order to search superior routes. The calculation and analysis for resident transmission project proves the effectiveness of mode and algorithm is proved.

Key words: specialized transmission project; optimum selection of equipment; improved ant colony optimization algorithm(IACO)