

适应季节性负荷的配电变压器与台区线路协调规划方法

刘晨苗¹, 刘宗歧¹, 刘明华¹, 刘文霞¹, 全少理²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市昌平区 102206;

2. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南省郑州市 450052)

Coordinated Planning Method of Distribution Transformer and Distribution Line for Seasonal Load

LIU Chenmiao¹, LIU Zongqi¹, LIU Minghua¹, LIU Wenxia¹, QUAN Shaoli²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power

University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company Economic and

Technological Research Institute, Zhengzhou 450052, Henan Province, China)

摘要: 为改善农村煤改电地区设备利用效率低的问题, 并兼顾供电可靠性, 提出一种适应季节性负荷的配电变压器与台区线路优化规划方法。主要思路是建立配变间低压联络线, 根据季节性负荷特点, 通过联络线开关状态变化, 转换运行方式, 使部分配变低负荷季节退出运行。以综合费用最小为目标构建配电变压器网络双层规划模型, 上层采用 Voronoi 法规划配电变压器, 下层采用 Prim 算法规划低压供电线路, 并结合遗传算法进行优化求解。最后, 通过对典型供电区域进行配变规划验证了该方法的可行性, 并且能够降低配变损耗, 提高供电的可靠性和经济性。

关键词: 季节性负荷; 配电变压器网络; 综合费用; 双层优化; 规划方法

Abstract: Taking into account power supply reliability, this paper proposed an optimal planning method adapting to seasonal load for distribution transformer network in order to improve equipment utilization efficiency in rural coal-to-electricity conversion areas. The main idea was firstly to establish low-voltage tie-line between distribution transformers, and according to seasonal load characteristics, some distribution transformers could withdraw from operation in low-load season by switching the tie-line operation state and mode. In this method, a bi-level programming model of distribution transformer network was constructed to minimize the overall cost. Voronoi method was used to plan the distribution transformer at the upper level; Prim algorithm was used to plan the low-voltage power supply line at the lower level, and genetic algorithm was used to seek the optimal solution. Finally, the feasibility of the method was verified by the distribution planning of typical power supply areas, and it can reduce the distribution transformer loss and improve the reliability and economy of power supply.

Keywords: seasonal load; distribution transformer network; the overall cost; bi-level optimization; planning method

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0414

0 引言

近年来, 为促进农村发展, 国家提出了美丽乡村计划^[1], 并先后实施加快小城镇电网改造升级、井井通电、户户通电、村村通动力电等多项农网专项工程以及煤改电供暖工程^[2]。由于农业灌溉和电供暖等负荷^[3]具有很强的季节性, 并网运行后大大降低了设备利用率, 供电经济性显著下降。为此, 利用负荷互补性和运行灵活性, 研究提高配电变压器网络运行效率的方法并优化规划^[4-6], 对支持供电企业可持续发展具有重要意义。

针对含高比例季节性负荷区域, 提高供电经济性的规划方法, 主要有优化配电变压器配置和采用有载调容配电变压器 2 种方法。文献^[7]考虑不同变压器类型过载能力的差异, 建立了计及负荷增长风险的配电变压器全寿命周期成本模型, 并提出配电变压器设备类型和容量的优化规划方法; 文献^[8]通过分析有载调容变压器的经济运行方式和临界经济容量, 给出了有载调容配变的经济运行策略和安全运行策略; 文献^[9]针对农村电网提出了一种自适应负荷型配电变压器, 可在不切断负荷的情况下, 根据负荷的实际情况, 实现变压器额定容量运行方式的自动切换; 文献^[10]根据有载调容配电变压器和常规配变的损耗

关系以及全年视在功率,提出有载调容配变更换判据,然后基于有载调容配变更换成本效益分析,提出了一种电能替代下的城市配电网有载调容配变规划方法。综上所述,优化配电变压器配置只能适当降低供电的投资成本^[11-12],变压器损耗依然很大。而采用有载调容配变存在设备造价较高^[13]、档位调节不灵活致使损耗减少有限、变压器设备检修和故障将引起负荷停电等几个问题,限制了其广泛应用。

在运行规划相结合方面,文献^[14]在考虑主动配电网灵活运行的网架结构的基础上,建立主动配电网扩展规划双层模型。文献^[15]建立了ADN中计及网络重构的DG鲁棒优化模型。综上所述,考虑配电网重构进行主动配电网规划,能够提高配电网运行经济性,为配电变压器规划提供了新思路。因此,为提高农村煤改电地区设备利用效率,降低损耗,兼顾供电可靠性,本文提出一种适应季节性负荷的配电变压器网络优化规划方法。建立配变间低压联络线,根据季节性负荷特点,通过联络线开关状态变化,转换运行方式,使部分配变低负荷季节退出运行,同时解决了故障负荷转移的问题,提高农村电网的可靠性。该方法分2个阶段对配电变压器网络进行双层规划:第一阶段进行变压器容量位置的规划、并采用Voronoi图法形成供电范围以及生成适应考虑季节性运行方式转换的变压器低压侧联络线;第二阶段根据prim算法优化低压供电网络;然后进行全年的模拟运行仿真,通过全寿命周期成本最小获取最优方案。该方法为煤改电地区电网的发展提供了新的思路,有利于降低空载损耗,提高供电可靠性和经济性,并对推进企业、维持可持续发展具有重要意义。

1 配电变压器网络双层优化规划模型

1.1 上层模型:基于Voronoi的配电变压器规划

1.1.1 基于总费用最小的配电变压器优化规划模型

配电变压器网络规划总费用包括配电变压器、低压线路和变压器低压联络线的投资费用以及包含维护和损耗的运维费用,考虑资金的时间价值,总费用计算公式如下:

$$\begin{cases} \min C = \alpha C_{IV} + C_{OPE} \\ \alpha = \frac{\tau}{1 - (1 + \tau)^{-T_p}} \\ C_{IV} = C_T + C_{CON} + C_{LL} \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_{IV} 为系统建设投资成本; C_{OPE} 为运行维护成本; τ 为银行利率; T_p 为全寿命周期; α 为设备等值年系数; C_T 为配电变压器建设成本; C_{CON} 为配电变压器之间的联络线建设成本; C_{LL} 为低压线路建设成本,由下层模型计算。

投资费用各组成部分的计算公式如下:

$$\begin{cases} C_T = \sum_{i=1}^{N_T} C_{T_i} \\ C_{CON} = \sum_{a=1}^{N_{CON}} C_{CON_a} = \sum_{a=1}^{N_{CON}} L_{CON_a} P_{CON_a} \end{cases} \quad (2)$$

式中: N_T 和 N_{CON} 分别为待选配电变压器和联络线总数; C_{T_i} 为第 i 个配电变压器建设投资成本,与配电变压器型号和容量有关; C_{CON_a} 为第 a 条联络线的建设投资成本; L_{CON_a} 为第 a 条联络线长度; P_{CON_a} 为第 a 条联络线单位长度建设投资成本。

根据《农村电力网规划设计导则》规定,配电变压器容量应根据农村电力发展计划选定,一般按5年考虑,具体计算公式为

$$\begin{cases} S_H = R_S P_H \\ R_S = \frac{K_1 K_3}{\cos \varphi K_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_H 为配电变压器在计划年限内(5年)所需容量; R_S 为容载比; P_H 为当年的用电负荷; K_1 为负荷分散系数; K_2 为配电变压器经济负荷率; K_3 为电力负荷发展系数; $\cos \varphi$ 为功率因数。

基于上层配电变压器规划方案和联络线规划方案以及下层返回的低压线路规划方案进行模拟仿真,计算系统维护成本和系统损耗成本,具体公式为

$$C_{OPE} = C_M + C_L \quad (4)$$

式中: C_{OPE} 为运行维护成本; C_M 为系统维护成本; C_L 为系统损耗成本。

运行维护费用的各组成部分的计算如下:

$$\begin{cases} C_M = \sum_{i=1}^{N_T} C_{MT_i} + \sum_{c=1}^{N_{LL}} C_{M_{LL_c}} + \sum_{a=1}^{N_{CON}} C_{M_{CON_a}} \\ C_L = C_{LT} + C_{LL} + C_{LCON} \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_{MT_i} 为第 i 个配电变压器的维护成本;

C_{MLL_c} 为第 c 条低压线路的维护成本； C_{MCON_a} 为第 a 条联络线的维护成本； C_{LT} 为配电变压器的损耗成本； C_{LL} 为低压线路的损耗成本； C_{LCON} 为联络线的损耗成本。系统损耗成本的各组成部分的计算公式如下：

配电变压器的损耗成本 C_{LT} 为

$$\begin{cases} C_{LT} = \sum_{i=1}^{N_T} p_s W_{LT_i} \\ W_{LT_i} = \int_0^{T_{LT_i}^t} P_{LT_i}^t dt \\ P_{LT_i}^t = P_{0_i} + \beta^2 P_{K_i} \\ \beta = \left(\frac{S_i}{S_{Ni}} \right)^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中： W_{LT_i} 为第 i 个配电变压器的电能损耗； p_s 为系统电价； $P_{LT_i}^t$ 为第 t 时刻第 i 个配电变压器的有功功率损耗； $T_{LT_i}^t$ 为有功功率损耗数值是 $P_{LT_i}^t$ 的持续时间； P_{0_i} 为第 i 个配电变压器的空载综合功率损耗； P_{K_i} 为第 i 个配电变压器的额定负载综合功率损耗； β 为配电变压器的负载率系数； S_i 为第 i 个配电变压器输出的视在功率； S_{Ni} 为第 i 个配电变压器额定容量。

低压线路的损耗成本 C_{LL} 为

$$\begin{cases} C_{LL} = \sum_{c=1}^{N_{LL}} p_s W_{LLL_c} \\ W_{LLL_c} = \int_0^{T_{LLL_c}^t} P_{LLL_c}^t dt \\ P_{LLL_c}^t = (I_{LLL_c}^t)^2 R_{LL_c} \end{cases} \quad (7)$$

式中： W_{LLL_c} 为第 c 条低压线路的电能损耗； p_s 为系统电价； $P_{LLL_c}^t$ 为第 t 时刻第 c 条低压线路的有功功率损耗； $T_{LLL_c}^t$ 为有功功率损耗数值是 $P_{LLL_c}^t$ 的持续时间； $I_{LLL_c}^t$ 为第 t 时刻第 c 条低压线路的电流； R_{LL_c} 为第 c 条低压线路的电阻。

联络线的损耗成本 C_{LCON} 为

$$\begin{cases} C_{LCON} = \sum_{a=1}^{N_{CON}} p_s W_{LCON_a} \\ W_{LCON_a} = \int_0^{T_{LCON_a}^t} P_{LCON_a}^t dt \\ P_{LCON_a}^t = (I_{LCON_a}^t)^2 R_{CON_a} \end{cases} \quad (8)$$

式中： W_{LCON_a} 为第 a 条联络线的电能损耗； p_s 为系统电价； $P_{LCON_a}^t$ 为第 t 时刻第 a 条联络线的

有功功率损耗； $T_{LCON_a}^t$ 为有功功率损耗数值是 $P_{LCON_a}^t$ 的持续时间； $I_{LCON_a}^t$ 为第 t 时刻第 a 条联络线的电流； R_{LCON_a} 为第 a 条联络线的电阻。

本文考虑了不同运行方案下配电变压器负载率约束，功率平衡约束、节点电压约束和线路传输功率约束：

1) 配变负载率约束。

主要分为 3 部分：①每个小负荷季节配变容量须在对应负荷点所需配变容量范围内；②每个大负荷季节配变容量须在对应负荷点所需配变容量范围内；③小负荷季节配变容量占总配变容量占比与小负荷季节所需配变容量占大负荷季节所需配变容量占比相近。具体如下：

$$\begin{cases} \sum_{d=1}^{N_i} S_{Hmi_d} \times (1 - 20\%) \leq S_{mi} \leq \sum_{d=1}^{N_i} S_{Hmi_d} \times (1 + 20\%) \\ \frac{\sum_{d=1}^{N_i} S_{Hmi_d}}{\sum_{d=1}^{N_i} S_{HXi_d}} \times (1 - 20\%) \leq \frac{S_{mj}}{\sum_{i=1}^{N_j} S_{j_i}} \leq \frac{\sum_{d=1}^{N_i} S_{Hmi_d}}{\sum_{d=1}^{N_i} S_{HXi_d}} \times (1 + 20\%) \\ \sum_{d=1}^{N_i} S_{HXi_d} \times (1 - 20\%) \leq S_{Xi} \leq \sum_{d=1}^{N_i} S_{HXi_d} \times (1 + 20\%) \end{cases} \quad (9)$$

式中： N_i 为第 i 个配变分配负荷点总数； S_{Hmi_d} 为小负荷季节第 d 个负荷点所需配变容量； S_{mi} 为小负荷季节第 i 个配变的额定容量； S_{HXi_d} 为大负荷季节第 d 个负荷点所需配变容量； S_{Xi} 为大负荷季节第 i 个配变的额定容量； S_{mj} 为第 j 个配变组中小负荷季节运行配变的额定容量； N_j 为第 j 个配变组配变个数； S_{j_i} 为第 j 个配变组的第 i 个配变的额定容量。

2) 功率平衡约束。

$$\sum_{e=1}^{N_{node}} P_e^t + \sum_{e=1}^{N_T} P_{LT_e}^t + \sum_{e=1}^{N_{LL}} P_{LL_e}^t + \sum_{e=1}^{N_{CON}} P_{LCON_e}^t = P_Z^t \quad (10)$$

式中： P_e^t 为第 t 时刻第 e 个节点负荷值； N_{node} 为节点总数； P_Z^t 为大电网输送的有功功率值。

3) 节点电压约束。

$$U_e^{\min} \leq U_e \leq U_e^{\max} \quad (11)$$

式中： U_e 为第 e 个节点的电压值； U_e^{\max} 为第 e 个节点的允许电压最大值； U_e^{\min} 为第 e 个节点的

允许电压最小值。

4) 线路传输功率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{LL_c} \leq P_{LL_c}^{\max} \\ 0 \leq P_{CON_a} \leq P_{CON_a}^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{LL_c}^{\max}$ 为第 c 条低压线路的最大允许功率值; P_{LL_c} 为第 c 条低压线路的有功功率值; P_{CON_a} 为第 a 条联络线的有功功率值; $P_{CON_a}^{\max}$ 为第 a 条联络线的最大允许功率值。

1.1.2 基于 Voronoi 图的配变供电区域生成方法

划分配变供电区域通常采用就近原则, 由于负荷点分布不均, 会造成配变负载率差异较大。为此本文采用加权 Voronoi 图法为配变划分供电区域, 在传统 Voronoi 图法基础上加入系数 α_f 反应中心点 q_f 即配变变压器的供电能力, 通过多次迭代优化中心点系数, 达到合理分配供电区域的目的, 具体操作流程如下:

步骤 1 系数初始化。令 $\alpha_f=1$ ($f=1, 2, 3, \dots, n$) 并初次分配供电区域。

步骤 2 系数更新。由第 k 次划分的供电区域得到各配变负荷总量 $P_i(k)$, 结合配变容量 S_i , 计算负载率, 调整各配变的系数重新划分供电区域。如果负载率较低, 则需要减小对应配变的系数 α_i , 以划分更多的负荷, 因此, 第 $k+1$ 次迭代的系数计算方式如下:

$$\alpha_i(k+1) = \sqrt{P_i(k)/S_i} \quad (13)$$

步骤 3 判断。重复步骤 2, 直至各配变负载率满足要求或达到终止迭代次数。

1.1.3 低压联络线生成方法

在配变坐标容量和供电范围已知的基础上, 建立低压联络线。根据季节性负荷的特点, 确定小负荷季节需要退出运行的配变, 并建立其与运行配变之间的联络线, 同时将需要退出运行的配变的负荷转移至运行配变, 完成低压联络线规划, 具体流程如下:

步骤 1 选择小负荷季节运行配变。基于配变容量地址和供电范围方案以及小负荷季节所需配变容量, 在满足式 (9) 的基础上, 选择小负荷季节运行配变。

步骤 2 配变分配。将需要退出运行配变的负荷, 在满足式 (9) 的基础上, 以就近原则分配至运行配变。

步骤 3 判断。重复步骤 1 和步骤 2, 直至达到终止迭代次数, 并选出联络线建设成本最小的规划方案。

1.2 下层模型: 基于 Prim 算法的低压线路优化规划

1.2.1 基于建设成本最小的低压线路规划模型

在上层模型生成的配变和联络线规划方案的基础上, 采用 Prim 算法生成多组低压线路规划方案, 以建设成本最低求解最优方案:

$$\min C_{LL} = \sum_{c=1}^{N_{LL}} C_{LL_c} = \sum_{c=1}^{N_{LL}} l_{LL_c} p_{LL_c} \quad (14)$$

式中: C_{LL} 为低压线路建设成本; C_{LL_c} 为第 c 条低压线路的建设投资成本; l_{LL_c} 为第 i 条低压线路长度; p_{LL_c} 为第 c 条低压线路单位长度建设投资成本。

1.2.2 基于 Prim 算法低压供电线路优化生成方法

低压配电网生成通常采用枚举法, 即列举出所有低压配电网规划方案进行求解比较, 最终得出总建设投资成本最小的规划方案, 计算量大且不易操作。Prim(普里姆)算法, 能够实现寻找最小生成树, 该生成树不仅包含全部节点, 而且全部支路的系数之和最小。对低压线路进行规划过程中, 配变和负荷点等同于最小生成树中的节点, 且配变与负荷点的备选规划路线等同于最小生成树中的支路, 系数等同于每条低压线路的总成本, 通过反复生成最小生成树得到多组低压线路规划方案, 具体操作流程如下:

步骤 1 参数初始化。定义顶点集合 Q 、 Q_{new} 和边集合 B_{new} , 具体公式如下:

$$\begin{cases} Q = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, n_i\} \\ Q_{\text{new}} = \{(x_1, y_1)\} \\ B_{\text{new}} = \{\} \end{cases} \quad (15)$$

式中: (x_1, y_1) 为任意配电变压器的横纵坐标; (x_i, y_i) 且 $i=2, 3, \dots, n_i$ 为该配电变压器供电范围内负荷点的横纵坐标; $n-1$ 为该配电变压器供电范围内负荷点个数; B_{new} 为空集合。

步骤 2 低压线路规划。选取长度最小的边 (g_1, g_2) , 其中 $g_1 \in Q_{\text{new}}$, 而 $g_2 \notin Q_{\text{new}}$ 且 $g_2 \in Q$, 如果有超过一条符合上述要求的边即存在建设总成本相等的线路, 可以从中任意选择。

步骤 3 参数更新。把 b_2 储存至 Q_{new} 中, 把 (g_1, g_2) 储存至 Q_{new} 中。

步骤 4 条件判断。重复步骤 2 和步骤 3，直至 $Q_{new}=Q$ 。

步骤 5 结果输出。最小生成树即低压线路规划方案通过 Q_{new} 和 B_{new} 描述，并输出集合 Q_{new} 和 B_{new} 。

2 双层模型的求解及流程

遗传算法是一种基于仿生学的计算算法，以其简单、快速、鲁棒性好等特点广泛用于实参数优化问题，在非线性和不可微的连续空间问题上优于其他进化方法，其基本思想是：从某一随机产生的初始种群开始，以一定的操作规则按照变异、交叉、选择的流程不断迭代计算，并根据个体的适应值，优胜劣汰，引导搜索过程向最优解逼近。

适应季节性负荷的配电变压器网络优化规划总流程如图 1 所示。

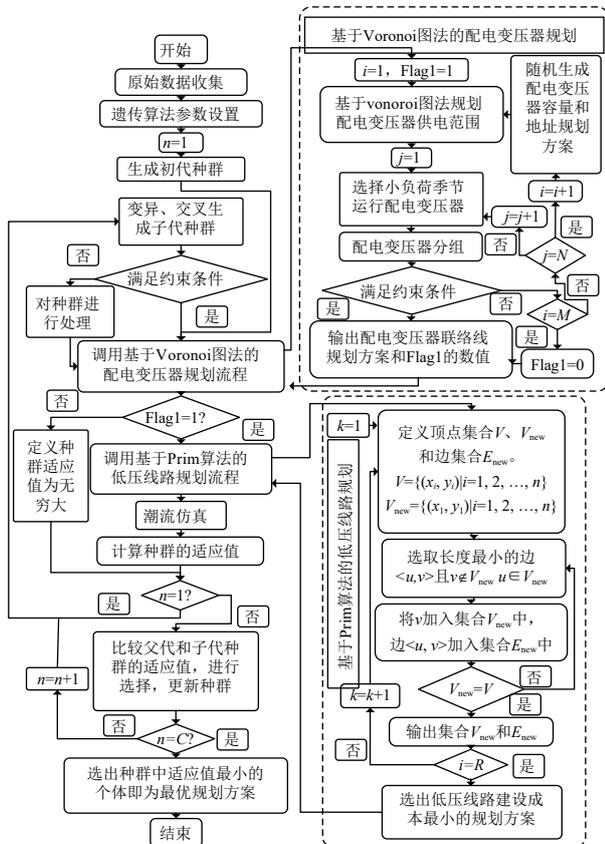


图 1 配电变压器网络优化规划流程图

Fig. 1 Flowchart of distribution transformer network planning optimization

3 算例分析

3.1 算例概述及参数

为验证本文规划方法的有效性，算例在 MATLAB R2014a 平台上对某典型 D 类供电区域进行配电变压器网络优化规划。仿真时间设定为一年，等值年系数定为 0.08。

该 D 类供电区域属于农村电网，总面积约为 375 亩，共 141 户常住居民，居民较为分散，冬季负荷预测结果为 847.692 kW，春夏秋季负荷预测结果为 96.162 kW。根据居民的分散程度将 5~10 户居民划分为一个负荷点，该 D 类供电区域共划分为 19 个负荷点。

配电变压器容量估算方法如式 (3) 所示，相关参数根据《农村电力网规划设计导则》规定并结合该 D 类供电区域负荷情况选取，农村低压电力网负荷分散系数 K_1 为 1.1，配电变压器经济负荷率 K_2 为 0.6~0.7，电力负荷发展系数 K_3 为 1.3~1.5，功率因数 $\cos\phi$ 为 0.8。

《配电网规划设计技术导则》^[16] 规定：①农村低压电力网单台配电变压器容量不宜超过 630 kVA；②低压电力网供电半径应低于 500 m；③农村低压电力网内三相电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ ；④铝绞线、架空绝缘电线的最小截面为 16 mm²。基于上述规定并结合该 D 类供电区域负荷情况本算例选 LGJ-35 型号导线。该地区 D 类供电区域电价为 0.525 元/kWh，线路折线系数取 1.1，遗传算法中，计划规划配电变压器个数最大值为 12，每个配电变压器包括容量、横坐标和纵坐标 3 个参数，因此染色体长度为 36，种群规模为 100，最终迭代次数为 100，交叉因子为 0.7，变异因子为 0.3。

3.2 算例结算结果

通过算例仿真，优化迭代 76 代得到最优方案，新建配变个数、容量、地址和运行方案以及低压线路和联络线建设条数和个数情况如表 1 所示，网架规划如图 2 所示，冬季运行方案如图 3 所示，春夏秋运行方案如图 4 所示。

由表 1 可知，为了满足负荷需求，共建设 5 个配电变压器、19 条低压线路以及 4 条联络线。由于该 D 类供电区域电供暖负荷较多，春夏秋三季负荷只有冬季负荷的 11.3%，因此冬季采用大负荷运行方案，即将配电变压器低压侧联络线开

表1 配电变压器网络规划方案表
Table 1 Distribution Transformer Network Planning Schemes

编号	1	2	3	4	5	各项费用/万元
容量/kVA	315	400	400	315	200	29.388
横坐标	114	224	343	338	322	—
纵坐标	212	319	177	400	130	—
春夏秋冬是否运行	否	否	是	否	否	—
低压线路长度/m(个数/条)	190.9(4)	173(5)	339.8(5)	120(3)	140.8(2)	32.406
联络线长度/m(个数/条)	—	—	691(4)	—	—	1.733
总费用	—	—	—	—	—	63.527

关断开，具体运行效率和平均损耗如表2，冬季大负荷运行方案网架结构如图3所示。

该D类供电区域春夏秋三季采用小负荷运行方案，即合上配电变压器低压侧联络线开关，将不在小负荷运行方案中的配电变压器即1号、2号、4号和5号配变退出运行，具体运行效率和平均损耗如表3所示，春夏秋三季小负荷运行

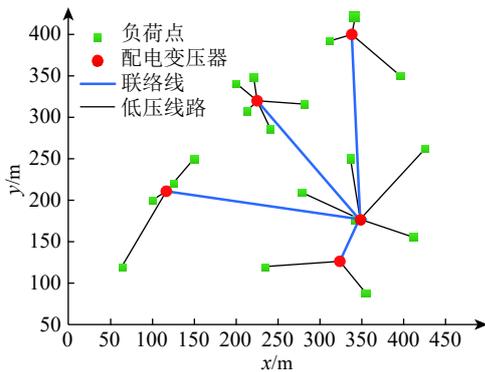


图2 某D类配电变压器网络优化规划方案图
Fig. 2 Optimal planning of a class D distribution transformer network

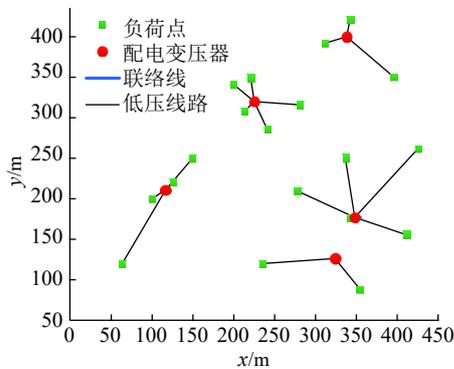


图3 某D类配电变压器网络冬季运行图
Fig. 3 Winter operational diagram of a class D distribution transformer network

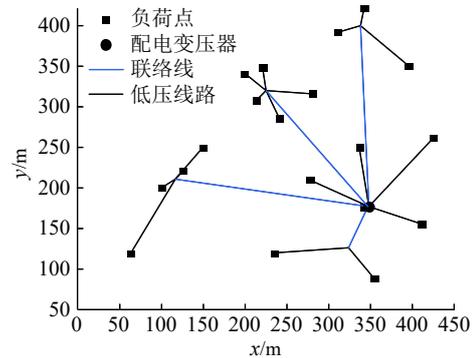


图4 某D类配电变压器网络春夏秋季运行图
Fig. 4 Spring, summer and autumn operational diagram of a class D distribution transformer network

表2 冬季配电变压器运行情况参数表
Table 2 Parameters of distribution transformer operation in winter

编号	容量/kVA	负荷/kW	运行效率/%	空载损耗 /W	负载损耗 /W
1	315	162.324	69.68	480	1 243.82
2	400	228.456	77.23	560	2 119.36
3	200	108.216	73.16	340	928.95
4	315	156.312	67.10	480	1 358.02
5	400	192.384	65.03	560	1 502.92

表3 春夏秋季配电变压器运行情况参数表
Table 3 Parameters of distribution transformer operation in spring, summer and Autumn

编号	容量/kVA	负荷/kW	运行效率/%	空载损耗 /W	负载损耗 /W
3	200	96.162	66.12	340	758.554

方案网架结构如图4所示。

不同季节不同网架结构，小负荷季节将冗余的配电变压器退出运行，可以优化网架结构，降低空载损耗，提高电网设备利用率，有利于配电

网的经济运行。随着农村经济的不断发展，农村配电网供电负荷峰谷差将持续增加，考虑季节性负荷的配电变压器网络优化规划的优势将更加明显。

3.3 与传统规划和采用有载调容配电变压器方案对比

为了说明本文方法的优越性，分别基于常规配电变压器采用传统规划方法布局和基于有载调容配电变压器采用文献 [10] 的规划方法布局，方案结果如下。

如表 4 所示，灵活切换方案与传统方案相比年总费用降低了 3.5%，在小负荷季节将冗余的配电变压器退出运行，降低了 25% 配变损耗，极大地减少了运行成本。与采用有载调容配电变压器方案相比年总费用降低了 1.5%，由于有载调容配电变压器造价较高，配变建设费用要比灵活切换方案多出了 6.8%。因此，灵活切换方案可以优化网架结构，降低空载损耗，提高电网设备利用率，降低供电成本，提高企业经济效益。

表 4 方案建设费用明细对比表

Table 4 Detailed comparisons of construction costs between different schemes

费用名称	单位	灵活切换方案	调容配变方案	传统方案
配电变压器	万元	2.351	2.51	2.351
联络线	万元	0.139	0	0
低压线路	万元	2.592	2.592	2.592
配变损耗冬季	万元	0.940 8	0.940 8	0.980 8
配变损耗春夏 秋季	万元	0.152 2	0.223 2	0.512 2
线路损耗	元	0.128	0.128	0.128
总费用	万元	6.175	6.266	6.396

3.4 灵活切换方案适应性分析

通过对灵活切换方案的分析，可以得出该方案的适应性与季节性负荷的大小、持续时间以及负荷密度有关。在算例基础上依次改变上述参数的大小，进行多次模拟仿真，得到灵活切换方案在该算例背景下，3 个参数分别对应的适应性边界条件为：季节性负荷为 418.155 kW，即为原季节性负荷的 0.56 倍，季节性负荷持续时间为 181 天，负荷密度为原负荷密度 0.53 倍，即以季节性负荷参数为例，当季节性负荷大于 418.155 kW，即大于原季节性负荷的 0.56 倍，其他参数不变的

情况下，灵活切换方案适用于该地区，即在该地区采用灵活切换方案进行规划，可以提高运行经济性。

4 结论

针对含高比例季节性负荷区域，本文提出了适应季节性负荷的配电变压器网络优化规划方法，建立配变间低压联络线，通过联络线开关状态变化，转换运行方式，使部分配变低负荷季节退出运行。该方法以综合费用最小为目标构建配电变压器网络双层规划模型，并结合遗传算法、Voronoi 和 Prim 算法进行求解。算例结果表明，该方法为煤改电地区电网的发展提供了新的思路，有利于降低空载损耗，达到了提高供电可靠性和经济性双重目的，并对推进企业、维持可持续发展具有重要的意义。

参考文献

- [1] 国务院. 乡村振兴战略规划(2018-2022年) [R]. 北京: 中央农村工作领导小组办公室, 2018.
- [2] 国家发展改革委国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016-2020年) [R]. 北京: 国家发展改革委国家能源局, 2016.
- [3] 王剑晓, 钟海旺, 夏清, 等. 基于成本-效益分析的温控负荷需求响应模型与方法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 45-53.
WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Model and method of demand response for thermostatically controlled load based on cost-benefit analysis [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(5): 45-53 (in Chinese).
- [4] EL-FOULY T H M, ZEINELDIN H H, EL-SAADANY E F, et al. A new optimization model for distribution substation siting, sizing, and timing [J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2008, 30(5): 308-315.
- [5] 汪臻, 盛四清, 周庆捷. 不确定环境下配电网变电站选址定容 [J]. 电力建设, 2014, 35(3): 59-63.
WANG Zhen, SHENG Siqing, ZHOU Qingjie. Substation locating and sizing for distribution network in uncertain environment [J]. *Electric Power Construction*, 2014, 35(3): 59-63 (in Chinese).
- [6] 杨文字, 刘健. 配电网架的多阶段不确定性规划 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(6): 89-95.

- YANG Wenyu, LIU Jian. Distribution network multi-stage planning considering uncertainty [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(6): 89 - 95 (in Chinese).
- [7] 寇凌峰, 梁英, 王金丽, 等. 计及负荷增长风险的配电变压器选型方法 [J]. *电网技术*, 2015, 39(5): 1384 - 1389.
- KOU Lingfeng, LIANG Ying, WANG Jinli, et al. A type selection method for distribution transformers considering risk of load growth [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(5): 1384 - 1389 (in Chinese).
- [8] 范闻博, 韩筛根. 有载调容变压器安全经济运行控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(18): 98 - 102, 107.
- FAN Wenbo, HAN Shaigen. A control strategy for secure and economic operation of on-load capacity regulating transformer [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(18): 98 - 102, 107 (in Chinese).
- [9] 王金丽, 盛万兴, 方恒福, 等. 自适应负荷型配电变压器设计 [J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(18): 86 - 92, 119.
- WANG Jinli, SHENG Wanxing, FANG Hengfu, et al. Design of a self-adaptive distribution transformer [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(18): 86 - 92, 119 (in Chinese).
- [10] 苏宇, 王强钢, 雷超, 等. 电能替代下的城市配电网有载调容配电变压器规划方法 [J]. *电工技术学报*, 2009, 34(7): 1490 - 1504.
- SU Yu, WANG Qianggang, LEI Chao, et al. A planning method of on-load capacity regulating distribution transformers in urban distribution network after electric energy substitution [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 34(7): 1490 - 1504 (in Chinese).
- [11] WANG J, SHENG W, WANG L, et al. Study on technical and economical efficiency of amorphous alloy transformer and on-load capacity regulating transformer in distribution network application [C]// China International Conference on Electricity Distribution. Shenzhen: IEEE, 2014.
- [12] 梁惠施, 程林, 苏剑. 微网的成本效益分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(S1): 38 - 44.
- LIANG Huishi, CHENG Lin, SU Jian. Cost benefit analysis for microgrid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 31(S1): 38 - 44 (in Chinese).
- [13] 刘斌, 岳青, 孙毅卫, 等. 调容调压变压器现状及发展趋势研究 [J]. *变压器*, 2015, 52(5): 23 - 28.
- LIU Bin, YUE Qing, SUN Yiwei, et al. Research on present situation and trend of capacity regulating transformer [J]. *Transformer*, 2015, 52(5): 23 - 28 (in Chinese).
- [14] 葛少云, 张有为, 刘洪, 等. 考虑网架动态重构的主动配电网双层扩展规划 [J]. *电网技术*, 2018, 42(5): 1526 - 1536.
- GE Shaoyun, ZHANG Youwei, LIU Hong, et al. Bi-layer expansion programming method for active distribution network considering dynamic grid reconfiguration [J]. *Power Grid Technology*, 2018, 42(5): 1526 - 1536 (in Chinese).
- [15] 马丽叶, 王玉翠, 王楚通. 主动配电网中计及网络重构的分布式电源鲁棒规划 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(11): 94 - 101.
- MA Liye, WANG Yucui, WANG Chutong. Robust planning of distributed power supply considering network reconfiguration in active distribution network [J]. *Power System Automation*, 2018, 42(11): 94 - 101 (in Chinese).
- [16] 中国电力科学研究院, 国家电网公司. DL/T 5729-2016, 配电网规划设计技术导则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

收稿日期: 2019-05-13

作者简介:

刘晨苗(1992), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统配电网规划, E-mail: 1183763759@qq.com;

刘宗歧(1963), 男, 教授, 硕士生导师, 华北电力大学图书馆馆长, 研究方向为电力系统运行与控制、图书情报, E-mail: lzq@ncepu.edu.cn。