

基于动态规划法的配电网联络线优化规划研究

王艳松¹, 孙桂龙², 曹明志¹

(1. 中国石油大学信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国天辰工程有限公司, 天津 300400)

摘要: 为了有效提高配电网的供电可靠性, 以单电源树状配电网为对象研究自成环网的联络线规划。基于节点与节点联通矩阵分析联络线连接位置对故障下游负荷转移的影响, 提出了故障区间相对于联络环从属关系的分区停电损失计算方法。以停电损失和建设费用加权和最小为目标函数, 以适应不同运行方式的保护整定值为约束, 建立联络线规划数学模型。将联络线的优化规划看成一个多阶段决策问题, 以联络线的条数作为阶段数, 联络线的联结位置为状态, 应用动态规划法求解树状配电网联络线优化规划问题。以 IEEE33 节点算例和现场工程实例进行仿真分析, 对联络线的建设费用和停电损失费等经济指标进行了分析比较, 验证了算法的有效性。

关键词: 配电网; 联络线优化规划; 可靠性; 停电损失; 动态规划

Research on the optimization of the tie lines based on dynamic programming for distribution network

WANG Yansong¹, SUN Guilong², CAO Mingzhi¹

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. China Tianchen Engineering Corporation, Tianjin 300400, China)

Abstract: In order to improve the reliability of distribution power supply, the tie-line planning is optimized to form its owner ring for a single power source tree distribution network. The tie lines connection position impacts load transfer, which is analyzed by the node and node unicom matrix, and then outage cost calculation method is put forward based on the affiliation of fault section relative to the tie lines. The mathematician model of tie lines planning is founded, in which the weight sum of outage cost and construction cost is regarded as the objective function, and with a constraint to adapt to the different operation modes of protection setting values. The optimization of the tie lines can be regarded as a multistage decision problem and solved by using dynamic programming principle. The locations of the tie lines are chosen for the state of the dynamic programming, and the number of the tie lines is chosen for the number of dynamic planning stage. The results show the effectiveness of the algorithm by analysis of the IEEE33 node system example and field-oil engineering example, and in which the economic indicators, such as the construction cost and outage cost etc. are compared.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2012EEL20).

Key words: distribution network; optimization planning of tie lines; reliability; outage cost; dynamic programming

0 引言

近年来, 国内对配电网进行大规模地改造和建设, 接线方式从简单的辐射型网络到“手拉手”接线, 再到多分段多联络接线, 以及分布式电源的接入使配电网变成了辐射型多电源配电网, 配电网的结构日益复杂。配电网安装分段开关、接入分布式电源和架设联络线是提高供电可靠性有效技术措施。当线路发生故障时, 配电网的联络线起着负荷转移和

供电恢复的作用, 在整个配电系统规划中占有举足轻重的位置, 对配电网联络线进行科学合理的规划具有非常重要的现实意义。

文献[1]以用户停电损失、线路建设费用和运行费用为目标, 应用改进的最小生成树算法求解变电站之间的网架电网规划。文献[2]应用内外两层规划方法实现配网线路网架和分布式电源接入的规划, 考虑了内外层规划结果的相互影响。文献[3]构建分布式电源接入规划的低碳化目标函数, 研究分布式电源接入规划。文献[4]构建 DG 投资商、配电公司和用户多利益体的分布式电源接入模型。文献[5]建

立了含分布式发电的配电网网架双层规划模型, 上层规划以年综合费用最小为目标, 下层规划是以分布式电源出力切除量最小为目标。文献[6]以所有联络线总投资费用最小寻优站内联络和站间联络的两联络线路的配置。文献[7]在优化辐射状网架结构基础上对站内、站间的联络线和联络开关进行优化配置, 实现多分段多联络。文献[8]考虑基态运行方式下的过负荷约束和辐射状网络约束, 以线路的年综合费用和过负荷惩罚费用之和最小为目标函数, 确定最经济的配电网方案。文献[9]以线路综合造价最小为目标, 实现负荷分配及变电站选址并对变电站及负荷进行连线规划, 满足辐射性和连通性的约束条件且距离最短。文献[10]考虑潮流约束, 以一次性建设投资、运行费用和网损费用为多目标, 进行输电网规划。文献[11-12]建立了考虑分段开关、联络线等配网设备投资最小和事故负荷损失指标(CLLI)最小的多目标规划模型, 实现了配网规划中分段开关和联络线的优化配置。文献[13-14]建立了分布式风电源和联络线投资综合最小、网损最小以及供电可靠性最佳的多目标规划模型。文献[13]先规划联络线, 再确定 DG 位置和容量。文献[14]将 DG 接入容量和联络线位置统一编码优化。但文中事故负荷损失指标仅考虑 $N-1$ 运行时切过负荷的损失作为可靠性指标。文献[15]分析 MG 发电特性对配电网网损和用户供电可靠性的影响效应的基础上, 建立含 MG 配电网的规划的数学模型, 应用细菌群体趋药性(BCC)算法求解树状网架结构。文献[16]将系统动力学与熵权法有机结合, 提出了配电网规划带时间标度的动态综合评价指标。

上述文献主要是在配网馈线之间进行联络构成两端供电或多端供电的手拉手式的联络接线方式。目前, 配电网中还有相当一部分树状馈线在没有备用电源引入, 也没有邻近馈线的情况下, 架设联络线使树状配电网自成环网是提高供电可靠性的唯一措施。因此本文以单电源树状配电网架为基础, 研究树状馈线自成环网的联络线优化规划, 对提高供电可靠性和保证二级及以上负荷供电具有重要的意义。

1 联络线优化的数学模型

联络线投资与维护费用反映了供电方投资和运营成本的经济性; 联络线位置直接影响用户的停电损失费用, 反映了供电的可靠性, 也是用户对供电部门满意度的直接体现。如果只考虑单方利益是片面的, 不能让供受双方都满意, 因此本文综合考虑

供电方的联络线投资维护费用和不同用户停电损失, 通过权系数反映供电方投资费用和用户停电损失费用的权重, 对联络线的位置进行规划的数学模型为

$$\min f = \alpha_1 C_e + \alpha_2 C_l \quad (1)$$

式中: C_e 表示联络线的等年值投资与维护费用, 反应经济性; C_l 为系统年停电损失费用, 反应可靠性; α_1 、 α_2 为权系数, 根据配电网所带负荷级分别取值, 一二级负荷 $\alpha_1 < 0.5$, 三级负荷 $\alpha_1 > 0.5$, 且满足 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

1.1 投资与维护费用

联络线建设费用通常用等值年计算, 年维护费用按等值年投资费用比例支出。因此, 联络线路的年等值投资和维护费用为

$$C_e = \sum_{i=1}^m Cl(i)k(1+\alpha\%) \frac{\gamma(1+\gamma)^n}{(1+\gamma)^n - 1} \quad (2)$$

式中: C_e 为年费用; m 为联络线的数量; C 为每千米联络线投资费用, 通常 10 kV 线路综合投资费用取 8 万元/km; $l(i)$ 为第 i 条联络线的长度; k 为曲折系数, 取 1.1; $\alpha\%$ 为维护费用所占投资费用的比例(取 5%); γ 为年利率, 取 0.1; n 为联络线使用寿命, 取 20 年。

1.2 停电损失费用

在树状配电网每段线路上均安装分段开关一方面增加了设备投资, 另一方面由于系统设备数量增加造成故障的几率有可能增大, 反而造成系统可靠性降低, 因此在工程实践中, 只有一部分线路段安装分段开关, 当配电网发生短路故障时, 通过馈线自动化实现故障定位和隔离, 并对非故障区域恢复供电。非故障区间相对于故障区间又分为上游和下游, 上游负荷不停电, 发生故障时没有停电损失, 下游负荷停电损失与联络线的规划方案有关, 联络线将树状配电网联络成一个或多个环, 称为联络环。为了计算下游负荷的停电损失, 首先要建立配电网的联通矩阵, 分析任一点为发点或收点的联通子图, 确定任一点的上游节点集合和下游节点集合, 然后基于故障区间和联络环的从属关系对配电网进行停电损失的分区计算。

如图 1 所示环网设计的配电网, 通常联络线(虚线)开断呈树状开环运行。

用节点-节点的连通矩阵 G 来表示配电网的连通拓扑结构, $G_{ij} = 1$ 表示节点 i 和节点 j 连通, $G_{ij} = 0$ 表示节点 i 和节点 j 不连通(在联通矩阵中以空表示)。对应图 1 所示配电网的树状拓扑图的节点-节点连通矩阵 G 为式(3)。

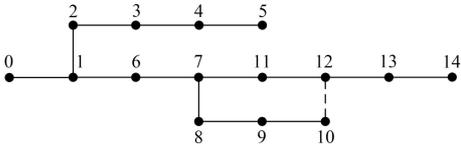


图 1 15 节点配电网络拓扑图(虚线代表联络线)

Fig. 1 15 nodes system topological diagram (The dotted line represents the tie-lines)

$$\mathbf{G} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccccccccccccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & 1 & 1 & 1 & 1 & & & & & & & & & & \\ & & 1 & 1 & 1 & & & & & & & & & & \\ & & & 1 & 1 & 1 & & & & & & & & & \\ & & & & 1 & 1 & & & & & & & & & \\ & & & & & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & & & 1 & 1 & 1 & & & & \\ & & & & & & & & 1 & 1 & & & & \\ & & & & & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & & & & & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & & & & & & & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & & & & & & & & 1 & 1 \\ & & & & & & & & & & & & & 1 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (3)$$

连通矩阵第 i 行中对应 $G_{ij} = 1$ 的列号 j 的集合构成了以该节点 i 为发点的子连通图，对应着节点 i 的下游节点集合；连通矩阵的第 j 列中对应 $G_{ij} = 1$ 的行号 i 的集合，构成了以该节点 j 为收点的子连通图，对应着节点 j 的上游节点集合。针对支路两端的节点编号，取大的节点号作为线路编号。

联络线规划就是在树状网络添加连支，每条联络线构成一个基本回路，对网络各节点编码构成联络线控制变量码串，且要求码串只有两个非零元素，例如图 1 所示联络线 L 的控制变量码串为

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

联络线 L 的两端节点号为 [5 14]，与编码中非零元对应的列号 $\text{nonzeroColum}(L) = [5 \ 14]$ 一致。

根据联络线编码中非零元的列号和联通矩阵可以搜索联络线 L 构成的环中包含的节点集合，即联通矩阵 \mathbf{G} 第 5 列和第 14 列非零元所对应的行号节点集合 loop (除去公共行号 1)：

$$\text{Loop}(L) = [2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14]$$

设配电网有 n 个节点， m 个分段开关，其中，第 k 个分段开关与其所在线路段的首端节点编号 i 的对应关系表示为 $s(k) = i$ 。线路 i 故障的定位区间

为 $[s(k), s(k+1)]$ ，判断故障区间的两端节点是否属于环内节点集合 loop ，并根据所属情况按下列方法分区进行停电损失的计算。

a. 当故障区间在环内，则停电损失包括故障区间负荷在故障检修期间的停电损失和下游负荷恢复期间的停电损失，即

$$C_{I1} = \sum_{j=s(k)}^{s(k+1)} \lambda_j l_j [t_1 \sum_{i=s(k)}^{s(k+1)} P_i G(j, i) C_i + t_2 \sum_{i=s(k+1)}^n P_i G(j, i) C_i] \quad (4)$$

式中： λ_j 为第 j 段线路的故障率，次/(km.年)； l_j 为第 j 段线路的长度，km； t_1 为故障检修时间，h； t_2 为备用联络线备自投合闸时间，h； P_i 为负荷点 i 的有功功率，kW； C_i 为用户单位停电损失费用，元/kWh，不同负荷类型取值不同。

b. 其他情况：当故障区间 $[s(k), s(k+1)]$ 在环外；或当故障区间一部分为环内的节点，另一部分为环外节点。则联络线不能实现负荷的转移，故障区间负荷和下游负荷停电时间均为故障检修停电时间 t_1 ，则停电损失为

$$C_{I2} = \sum_{j=s(k)}^{s(k+1)} \lambda_j l_j t_1 \sum_{i=s(k+1)}^n P_i G(j, i) C_i \quad (5)$$

式中各物理量的意义同式(4)。

因此，任一故障区间造成的停电损失，根据联络线规划方案进行环内判断，按式(4)或式(5)进行计算，系统年停电损失费用按故障率对任一分段开关形成的故障区间的停电损失累加求和

$$C_I = \sum C_{I1} + \sum C_{I2} \quad (6)$$

1.3 约束条件

为了保证配电网调度的灵活性和运行的可靠性，通常配电网闭环设计开环运行，只有线路首端设有电流保护装置，可以保护线路全长。本文在树状配电网基础上规划联络线，当 $N-1$ 故障时通过联络线和开关操作改变运行方式，提高供电可靠性。为了保证线路首端继电保护装置在各种运行方式下能可靠动作，应满足配电网 $N-1$ 运行方式下的最长供电路径不大于正常 N 运行方式下最长供电路径的长度，其约束条件表示为

$$\sum_{i=1}^{node_1} l_i G(i, node_1) + \sum_{j=node_2+1}^n l_j G(node_2, j) \leq l_{\max} \quad (7)$$

式中： $G()$ 表示联通矩阵的元素； l_i 、 l_j 为各段线路的长度； $node_1$ 、 $node_2$ 分别为联络线两端节点编号；

$\sum_{i=1}^{node_1} l_i G(i, node_1)$ 为 $N-1$ 运行方式下联络线路上游

供电路径: $\sum_{j=node_2+1}^n l_j G(node_2, j)$ 为 $N-1$ 运行方式下联络线路下游供电路径; l_{\max} 为正常 N 运行方式下最长供电路径的长度。

2 联络线优化的动态规划模型

2.1 动态规划法的基本原理

动态规划是解决多阶段决策最优化问题的一种有效方法, 每一阶段的决策必须相对于前一阶段的状态和决策, 产生当前状态。动态规划法的阶段数可以是确定的, 也可以是不确定的。

联络线的规划建设有时由于资金限制或其他方面的考虑并不是一次性就完成的, 要分阶段进行建设, 将联络线的优化看成一个多阶段决策问题, 从而建立了与动态规划的桥梁, 以联络线的数目为阶段, 联络线的位置为状态, 以投资维护费用与停电损失加权作为指标函数。根据最优化原理, 能保证每个阶段联络线的位置都是最优的, 具有很好的继承性。不论是对于已确定联络线数目, 还是对不确定联络线数目的联络线优化问题, 动态规划法都能很好的解决。本文应用动态规划法求解不确定联络线条数, 通过目标函数最优确定联络线规划的阶段数, 即联络线的条数。

设配电网的节点数为 n , 规划联络线的条数为 m 。对应用动态规划求解联络线优化规划的状态量和关键变量函数进行设计。

① 阶段: 将一个问题分为几个阶段, 这些阶段是相互联系的, 可分阶段依次进行求解。本文将联络线的条数定为阶段数, 首先求解第一条联络线的优化位置, 在此基础上依次优化第二条、第三条、……联络线的位置。阶段变量用 k 表示。

② 状态: 每个阶段开始时所处的自然状况叫做状态。联络线规划的一个状态就代表一条联络线。首先要形成每一阶段的状态, 每个状态有两个节点集合的子码串组成, 码串用 0、1 编码表示联络线的节点位置状态, 码串的长度对应着候选节点数。例如第一阶段的码串对应着: 第一条分支线的节点编码子串和其他分支线与主干线(除去分支节点)的节点编码子串, 第二阶段的码串组成对应着: 第二条分支节点(除去第一阶段码串为 1 的节点)编码子串、其他分支线与主干线(除去分支节点)的节点(除去第一阶段码串为 1 的节点)编码子串, 依此类推, 随着阶段数 k 的增加, 码串的位数依次递减 2 位, 则第 k 阶段状态用 X_k 变量表示

$$X_k = \{x_{k1}, x_{k2}\}$$

x_{k1} 、 x_{k2} 分别为两个子码串, 每个子码串中 0、

1 随机取值, 且满足每个子码串只有一位 1, 其余为 0, 从而保证一条分支线只与其他分支线或主干线相连节点相连的约束。

③ 决策: 决策可看成是两个不同阶段状态之间的“桥梁”, 是某一状态可做出的选择的集合。本文的决策就是如何选择下一条联络线的规划位置, 即从 k 条联络线到 $k+1$ 条联络线的决策, 第 k 阶段状态 X_k 的决策用决策变量 $u_k(X_k)$ 表示, 规划各条联络线的位置相互影响, 因此第 k 阶段状态 X_k 的决策是状态 X_k 的函数。

④ 策略: 策略是各阶段决策的有序组合。对于每一个多阶段决策问题都有一个最优策略, 是所有策略中能使指标函数取得最优值的策略。本文的策略就是各阶段各联络线规划方案的组合 $\{u_1(X_1), \dots, u_k(X_k), \dots, u_L(X_m)\}$, 最优策略就是各阶段满足规划数学模型最优的联络线规划方案的组合 $\{optu_1(X_1), \dots, optu_k(X_k), \dots, optu_L(X_m)\}$ 。

⑤ 状态转移方程: 状态转移方程表示第 k 阶段状态 X_k 做出决策 $u_k(X_k)$ 而转移到第 $k+1$ 阶段状态 X_{k+1} , 是相邻两个阶段状态转移关系的表达式, 记为 $X_{k+1} = T_k(X_k, u_k)$ 。

⑥ 指标函数和最优值函数: 指标函数是衡量一个策略的重要指标, 本文以满足约束的停电损失与投资费用加权作为指标函数。最优函数是指标函数的最小值, 用按公式(1)表示第 k 阶段的指标函数 f_k 和最优函数 $\min f_k$ 。

3 算例分析

3.1 IEEE33 节点配电网算例分析

以 IEEE33 节点电网^[17]为例来研究联络线的优化配置方案, 其拓扑结构如图 2 所示。

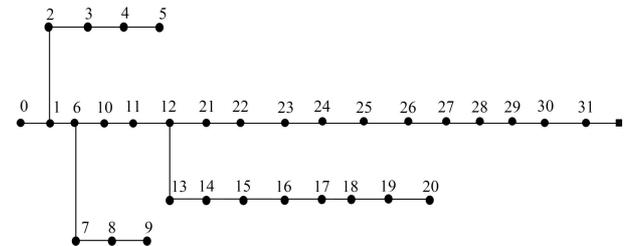


图 2 IEEE33 节点电网的简化拓扑图

Fig. 2 Simplified network diagram for IEEE 33-node system

图 2 所示配电网各段线路上均安装分段开关, 应用本文提出的动态规划法, 取线路故障率为 0.1 次/km.年, 进行的联络线优化规划, 其第一阶段的最小目标函数为 59.6017 万元/年, 联络线规划方案为 20-26; 第二阶段的最小目标函数 51.9127 万元/年,

联络线规划方案为 5-22; 第三阶段的最小目标函数为 53.6758 万元/年, 比第二阶段的最小目标函数还要大, 联络线规划方案为 16-23, 所以联络线的最优数目为 2, 位置为 5-22 和 20—26。

在配电网各段线路上均安装分段开关, 投资大, 设备数量多, 安全隐患也增大, 实际配电网工程选择几个优化位置配置分段开关。以线路段末端节点号作为线路编号, 在图 3 中主干线分段开关优化配置的位置是: 1、6、12、22、26、29, 分支线分段开关优化配置的位置是 2、7、13、16。具有不同分段开关数目的树状网络, 其两条联络线规划方案和相应的各项经济指标如表 1 所示。

由表 1 可知, 配电网安装分段开关数目越多, 停电损失越少, 树状配电网分段开关位置和数量不同, 联络线的优化结果也不同; 可见联络线起到了故障时负荷转移的作用, 分段开关起到了故障时减

少停电范围的作用。因此, 安装分段开关和架设联络线都能减少停电损失, 提高供电可靠性。

表 1 IEEE33 节点电网联络线规划方案

Table 1 Tie lines optimization results of IEEE33 nodes network

安装分段 开关情况	联络线 位置	停电损失/(万元/年)		减少的停电损 失/(万元/年)
		优化前	优化后	
部分安装	5-22, 20-27	79.9038	48.5722	31.3266
全部安装	5-22, 20-26	68.732	34.6119	34.1201

假设在配电网各段线路全部安装分段开关(与 IEEE33 节点系统所示结构和开关配置一致)。针对大用户、工业用户、商业用户、农业用户和居民用户不同负荷类型, 其单位功率停电损失不同, 取线路故障率为 0.1/km.年, 应用本文提出的联络线动态规划法得到的联络线优化结果、年等值建设费用和年停电损失等经济指标见表 2。

表 2 不同负荷类型下 IEEE33 节点网络联络线优化方案

Table 2 Tie lines optimization results of IEEE33 nodes network under different load types

负荷类型	单位停电 损失/元	联络线位置	停电损失费用/(万元/年)		投资与维护费 用/(万元/年)	减少的停电损失费 用/(万元/年)
			优化前	优化后		
大用户	70.08	5-22,20-26	61.7519	37.5379	8.7165	24.2140
工业用户	90.68	5-22,20-26	68.732	34.6119	8.7165	34.1201
商业用户	60.69	5-22,20-26	53.4778	32.5082	8.7165	20.9696
农业用户	30.43	5-22,20-26	26.8138	16.2996	8.7165	10.5142
居民用户	10.93	5-22	9.6311	7.2795	3.3405	2.3516

由表 2 可知,在同一故障率下,对于不同类型的负荷进行联络线优化时,单位停电损失越大(如工业用户、商业用户和大用户),优化后减少的停电损失费用越多,供电可靠性越高。因此,对于工业、商业和大用户这些重要负荷,采用单电源环网架构可以大大减少停电损失,提高供电可靠性。对于农业和居民负荷,优化后减少的停电损失费用有限,相

对于投资成本,优化后可靠性和经济效果不明显,宜采用辐射网网架即可。

配电网的架设方式和架设环境不同,线路故障率也不同,针对工业用户,在 0.01~0.7 范围内分别取不同故障率,树状配电网联络线规划方案和各项经济效益也不同,如表 3 所示。

表 3 工业用户在不同故障率下的 IEEE33 节点网络联络线优化方案

Table 3 Tie lines optimization results of IEEE33 nodes network under different failure rate for industry user

故障率/ (次/km.年)	联络线位置	停电损失费用/(万元/年)		投资与维护费 用/(万元/年)	减少的停电损失 费用/(万元/年)	经济净收益 /(万元/年)
		优化前	优化后			
0.01	5-22	6.8732	4.8228	1.3122	2.0504	0.7382
0.03	5-22,20-26	20.6196	10.6255	8.7165	9.9941	1.2776
0.05	5-22,20-26	34.366	17.7091	8.7165	16.6569	7.9404
0.1	5-22,20-26	68.732	34.6119	8.7165	34.1201	25.4036
0.3	9-16,20-30	206.1961	92.1129	10.306	114.0832	103.7772
0.5	9-16,20-32	343.6602	151.6065	12.1122	192.0537	179.9415
0.7	9-16,20-32	481.1243	212.249	12.1122	268.8753	256.7631

由表 3 可知, 线路故障率不同, 联络线的位置和条数不同, 当故障率为 0.01 次/km.年, 说明原网络可靠性较高, 只需架设 1 条联络线, 该联络线带来的年经济效益不明显。随着故障率增大, 当故障率为 0.03~0.7 次/km.年, 则需要架设 2 条联络线; 随着故障率的增大, 架设联络线减少的停电损失更加明显, 年经济收益大幅增大。因此, 同样的负荷类型, 故障率越大, 架设联络线减少的停电损失越大, 可靠性越高, 经济效果越好。

3.2 油田 10 kV 树状电网算例分析

我国大庆油田、胜利油田、华北油田、中原油

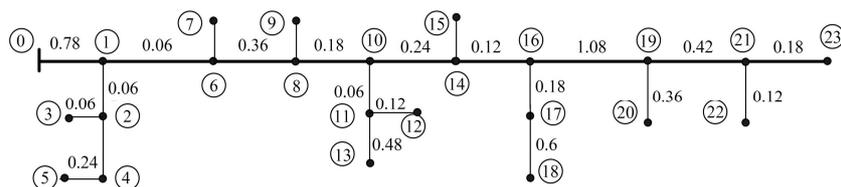


图 3 拓扑结构图

Fig. 3 Schematic diagram of distribution system

应用本文提出的动态规划法对树状配电网构成自环网的联络线优化规划方案如表 4 所示。

表 4 10 kV 树状配网的联络线规划方案

Table 4 Tie lines optimization results of 10 kV distribution network

联络线位置	停电损失/(万元/年)		投资与维护费用/(万元/年)	减少的停电损失/(万元/年)
	优化前	优化后		
5-8, 9-16	23.179	19.0276	1.3301	4.1522

由表 4 可知, 联络线规划前线路的停电损失为 23.1789 万元/年, 基于动态规划法进行联络线优化规划, 联络线的最优位置为 5-8、9-16, 联络线的年投资与维护费用 1.3301 万元/年, 年停电损失费用为 19.0276 万元/年, 每年减少的停电损失费用为 4.1522 万元/年。架设联络线不仅提高了二级负荷的供电可靠性, 而且有经济效益。

5 结论

基于动态规划法能够给出合理的树状配电网构成自环网的联络线优化配置方案, 对于二级负荷的树状配电网的改造具有重要的工程应用价值。

(1) 不同故障率、不同负荷类型对网络结构要求不同, 只有故障率比较高的二级及以上负荷的树状配电网架设联络线对提高供电可靠性有显著作用。

(2) 基于节点连通矩阵计算的线路最长路径, 并

田和辽河油田等供用电规模相当于几个地级市的供用电规模, 一般由自备电厂和国网供电, 用电负荷主要是油井开采和油气集输负荷, 均属于二级负荷。油田配电网的供电半径随着油田野外滚动式开采不断延伸, 供电范围和负荷不断增加, 但相当数量的配电线路是单电源供电, 一旦发生故障严重影响油井产量。某油田一条 10 kV 树状线路为油区采油设备供电, 采油设备均为二级负荷, 其拓扑结构如图 3 所示, 线路上配置了 5 个分段开关, 其位置位于线路段 6、10、16、19、21。在油区附近没有备用电源引入, 也无邻近馈线。

约束各种 $N-1$ 运行方式下最长路径不超过 N 运行方式下的最长路径, 满足配电网运行方式的灵活性和继电保护动作的可靠性。

(3) 本文基于分段开关优化配置后实现的联络线优化规划, 还应进一步实现分段开关配置和联络线优化架设的协同规划。

参考文献

- [1] 闫丽梅, 刘广成, 张艳, 等. 基于改进最小生成树算法的油田电网架优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 117-122.
YAN Limei, LIU Guangcheng, ZHANG Yan, et al. Research on frame optimization of oil-field power grid based on improved minimum spanning tree algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 117-122.
- [2] 张彼德, 何頔, 张强, 等. 含分布式电源的配电网双层扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 80-85.
ZHANG Bide, HE Di, ZHANG Qiang, et al. Double distribution network expansion planning including distributed power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 80-85.
- [3] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.

- [4] 施泉生, 郭良河, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 85-91.
SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 85-91.
- [5] 方陈, 张翔, 称浩忠, 等. 主动管理模式下含分布式发电的配电网网架规划[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 823-829.
FANG Chen, ZHANG Xiang, CHENG Haozhong, et al. Framework planning of distribution network containing distributed generation considering active management[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 823-829.
- [6] 张菁. 基于两联络接线模式的联络线优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
ZHANG Qing. Research on the optimization of the tie lines in urban distribution network based on two-tie connection mode[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [7] 李游. 基于改进遗传算法的配电网网架规划及软件开发[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
LI You. The research of distribution system planning based on improved genetic algorithm and the software development[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [8] 胡斌. 基于蚁群最优的配电网网架规划方法[J]. 继电器, 2005, 33(21): 54-57.
HU Bin. An ant colony optimization based method for power distribution network planning[J]. Relay, 2005, 33(21): 54-57.
- [9] 徐珍霞. 粒子群优化算法在配电网网架优化规划中的应用[J]. 继电器, 2006, 34(6): 29-33.
XU Zhenxia. Application of particle swarm optimization algorithm to distribution network planning[J]. Relay, 2006, 34(6): 29-33.
- [10] 王秀丽. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 11-15.
WANG Xiuli. Multi-objective and multi-district transmission planning based on NSGA-II and cooperative co-evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 11-15.
- [11] BOARDMAN J T, MECKIFF C C. A branch and bound formulation to electricity distribution planning problem[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104(8): 2112-2118.
- [12] SAHOO N C, GANGULY S, DAS D. Multi-objective planning of electrical distribution systems incorporating sectionalizing switches and tie-lines using particle swarm optimization[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2012, 3: 15-32.
- [13] GANGULY S, SAHOO N C, DAS D. A novel multi-objective PSO for electrical distribution system planning incorporating distributed generation[J]. Journal of Energy Systems, 2010, 1(3): 291-337.
- [14] 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.
YAN Wei, LÜ Bing, ZHAO Xia, et al. Coordinated allocation of DGs and tie lines in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 1-6.
- [15] 凡鹏飞, 张粒子, 熊浩清, 等. 基于改进 BCC 算法的含微电网的配电网网架规划[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 12-18.
FAN Pengfei, ZHANG Lizi, XIONG Haoqing, et al. Distribution network planning containing micro-grid based on improved bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 12-18.
- [16] 顾洁, 秦玥, 包海龙, 等. 基于熵权与系统动力学的配电网规划动态综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 76-83.
GU Jie, QIN Yue, BAO Hailong, et al. Comprehensive and dynamic evaluation of the distribution network planning based on entropy weight and system dynamics[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 76-83.

收稿日期: 2015-06-27; 修回日期: 2016-02-10

作者简介:

王艳松(1965-), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电网的优化规划、电网故障分析与定位和电能质量的分析与治理; E-mail: wys91517@163.com

孙桂龙(1989-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为配电网规划。E-mail: sunguilong1988@163.com

(编辑 张爱琴)