

A Practical Method for the Optimized Allocation of Sectionalizing Switches in Rural Distribution System

Lijuan Hu, Wanxing Sheng, Ying Liang, Xiaohui Song

China Electric Power Research Institute, CEPRI, Beijing, China

Email: hulijuan1544@sina.com

Abstract: Based on the analysis of new rural load characteristics, according to the State Grid Corporation of China's new rural electrification standard and the features of new rural typical power supply modes, this paper proposes a practical method for determining the optimized allocation of sectionalizing switches in new rural medium-voltage(MV) distribution system. According to the reliability requirements of new rural power supply system, two types of network structure-the radial network mode and the hand-in-hand ring network mode are considered in this paper. Meanwhile, the load distribution state is also considered. The proposed method establishes an analytical model for determining the optimized number and locations of sectionalizing switches based on the state of new rural distribution system and selects two typical supply areas to calculate and then gives a reference conclusion which can be applied directly to the actual system. Compared with the intelligent algorithms mentioned in other literatures, this approach is more intuitive and simple, and therefore more practical.

Keywords: Sectionalizing Switches; Optimized Allocation; Load Distribution; Dynamic Programming

农村配电网分段开关优化配置的实用方法

胡丽娟, 盛万兴, 梁 英, 宋晓辉

中国电力科学研究院, 北京, 中国, 100192

Email: hulijuan1544@sina.com

摘 要: 本文依据国家电网公司新农村电气化标准和新农村典型供电模式特点, 在分析了新农村负荷特点的基础上, 提出了农村中压配电网分段开关优化配置的实用方法。根据新农村供电可靠性要求, 考虑了单辐射线路和拉手环网两种线路结构, 并针对不同负荷分布情况, 给出了相应的分段开关的安装个数和位置。本方法根据农村配电网的特点, 建立了分段开关配置的解析模型, 选取了两类典型区域进行计算, 给出了可直接用于实际电网的结论, 相比其它文献中提到的开关优化配置的各种智能算法, 具有直观易懂、简单易行的特点, 更有实用价值。

关键词: 分段开关; 优化配置; 负荷分布; 动态规划

1 引言

配电网是电力系统安全、可靠、经济运行的重要组成部分, 其可靠性直接影响着国民经济的发展和人民的生活水平。2007 年国家电网公司发布了《新农村电气化建设实施纲要》和《新农村电气化标准体系》, 确定了以“户户通电、供电可靠、安全经济、供电和谐”为主要标志的新农村电气化建设总体目标。我国农网覆盖范围广, 大多采用单辐射接线模式的架空线路, 故障率高, 可靠性低, 实现手拉手的环网结构、对线路进行分段可大大提高农村配电网的可靠性, 因此新农村典型供电模

式中提出了应对中压配电线路进行合理分段^[1]。增设分段开关, 一方面可提高可靠性、减少停电损失, 另一方面也会增加投资费用和运行维护费用, 因此需要对分段开关的数量和位置进行优化, 实现经济效益的最大化。

分段开关优化配置涉及可靠性成本和可靠性收益两方面, 是一个非线性、不可微、离散的组合优化问题。文献[2]采用了基于二分法的优化配置方法, 外层优化采用二分法确定最优开关个数, 内层采用枚举法确定开关位置, 计算量大, 且未考虑负荷分布情况; 文献[3]引入辖区指数的概念, 在理论上给出了分段开关最佳装设位置的效益计算方法, 考虑了负荷分布的

情况,但是需要针对每条线路进行潮流计算,在工程实际中应用较复杂;文献[4]只考虑了单辐射网,未考虑手拉手接线情况;文献[5]提出配电网分段开关优化配置模型求解的动态规划算法,求解中选择开关配置位置及其类型作为动态规划的状态,配置开关设备台数为阶段数,实现动态规划计算,在模型中提出可行性准则、对称性准则、有效性准则、优胜劣汰准则、最优性准则等,利用上述准则可大大减少计算量。

本文根据新农村电网的负荷分布情况,针对单辐射和手拉手两种接线方式,对问题进行简化处理,建立了用决策变量表达的解析模型,给出了配电网分段开关优化配置的实用方法。在计算中,负荷分布考虑均匀分布、递增分布、递减分布三种情况,对所得的模型,采用动态规划方法来求解,给出可供工程实际直接应用的结论。

2. 配置分段开关的经济因素

配置分段开关是为了提高供电可靠性,减少停电损失,但是获得可靠性收益的同时也需要增加分段开关的投资和运行维护费用,因此配置分段开关的经济性涉及可靠性收益和可靠性成本两个方面。分段开关优化配置问题就是在最大限度的提高可靠性的同时寻求最大的经济效益。

2.1 配置分段开关的可靠性成本

配置分段开关的可靠性成本包括分段开关的投资费用和运行维护费用。在进行经济性比较时,本文均采用以年为周期,即采用比较年费用的方法。将分段开关的投资现值转化为考虑复利的等年值,实现分段开关优化配置的可靠性成本如式(1)所示:

$$N_{\text{cost}} = [S_{\text{cost}} + M_{\text{cost}}] * (n-1) \quad (1)$$

$$S_{\text{cost}} = C_1 \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1}$$

$$M_{\text{cost}} = \alpha * C_1$$

式中: n 为单条线路的分段数, $n-1$ 为分段开关个数;

C_1 为单个分段开关的价格,本文取 3 万元;

m 为经济运行年限,取 20 年;

α 为年运行维护费用占投资费用的比例,取 3%。

r 为电力工业投资回收率,取 10%;

N_{cost} 表示配置分段开关后折合到每一年所增加的成本;

S_{cost} 为运行年限内折合到每一年单个分段开关的

投资成本;

M_{cost} 为单个分段开关的年运行维护费用;

2.2 配置分段开关的可靠性收益

停电损失常用的评估方法主要有平均电价折算倍数法、产电比法和总拥有费用法等,本文采用平均电价折算倍数法。平均电价折算倍数法是以当时的平均电价乘以折算倍数来估计因可靠性低而造成的停电损失费用。不同接线方式下配置开关减少的停电损失不一样,针对新农村配电网特点,主要讨论单辐射接线和手拉手接线方式两种情况。

2.2.1 单辐射接线方式下的可靠性收益

单辐射接线方式下配置开关后可保证某一段线路出现故障或检修时,由开关将故障隔离,保证其上游停电损失仅为开关倒闸操作的时间内的损失,而未装开关时,上游负荷停电损失为整个停电时间内的停电损失,这两个时间段内停电损失之差即为装了开关后减少的停电损失,整条线路年减少的停电损失即可靠性收益 C_{save} 用公式(2)表示如下:

$$C_{\text{save}} = C_0 \sum_{i=1}^n L_i \sum_{j=i+1}^{i-1} P_j \lambda_j L_j (t_1 - t_2) \quad (2)$$

其中, n 为线路的分段数;

C_0 为损失单位电量折合成社会经济损失的系数,本文采用平均电价*折算倍数(25);

L_i 为第 i 段线路的长度,单位: km;

λ 表示单位线路年故障率,取 0.2 次/年*公里;

P_j 为第 j 段线路上的负荷量,单位: kW;

t_1 为每次故障平均停电持续时间,取 4.5h;

t_2 为开关倒闸时间,手动开关取 0.5h,自动开关倒闸时间可忽略不计;

2.2.2 手拉手接线方式的可靠性收益

考虑配置开关后两段或两段以上同时故障或检修的概率很小,所以只考虑只有一段出现故障或检修的情况,手拉手接线方式下某段线路故障或检修时,开关将故障段隔离,其上游和下游都可在开关跳闸后恢复供电,上下游减少的停电损失之和即为可靠性收益,可靠性收益 C_{save} 如式(3)所示:

$$C_{\text{save}} = C_0 \sum_{i=1}^n L_i \left(\sum_{j=1}^{i-1} P_j + \sum_{j=i+1}^n P_j \right) \lambda_j L_j (t_1 - t_2) \quad (3)$$

3 分段开关优化配置的数学模型

目标函数: $\max C_e = C_{\text{save}} - N_{\text{cost}}$

其中, C_e 表示配置分段开关后的净收入, 当 C_e 为正时配置分段开关才是经济可行的, 使 C_e 取最大值时的配置方案是最优的。

线路上负荷分布对分段开关的定位有很大影响, 根据负荷情况合理定位分段开关可使可靠性收益增大, 实现经济性目标。负荷分布有很多情形, 考虑新农村电网特点, 本文只讨论沿线路均匀分布、递增、递减三种情形。

3.1 单辐射接线模式的模型

3.1.1 负荷均匀分布情况的模型

单辐射线路负荷均匀分布时, 设线路上总负荷量为 P , 总长度为 L , 投入分段开关后每段线路长度依次为 L_i ($i=1, 2, \dots, n-1$), 对应的负荷量为 $L_i/L \cdot P$, C_{save} 可简化为:

$$C_{save} = C_0 \sum_{i=1}^{n-1} L_i \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_{i-1}}{L} P \lambda (t_1 - t_2) + C_0 \frac{L_1 + \dots + L_{n-1}}{L} P [L - (L_1 + \dots + L_{n-1})] \lambda (t_1 - t_2) - [S_{cost} + M_{cost}] \cdot n$$

$$C_e = C_{save} - [S_{cost} + M_{cost}] \cdot (n-1)$$

将上式整理得, C_e 最大时, $L_i = L/n$ ($i=1, 2, \dots, n$),

$$n = \sqrt{\frac{C_0 L P \lambda (t_1 - t_2)}{2[S_{cost} + M_{cost}]}}$$

实际应用中, n 按四舍五入法取整数, 分段开关个数为 $n-1$, 每段线路长度相等, 所以分段开关在线路上等间隔分布。

3.1.2 负荷递增分布情况的模型

负荷沿线路递增分布时, 长为 L 的线路上总负荷为 P , 从电源点 (线路首端) 到负荷点的距离为 x , x_i 为第 i ($i=1, 2, \dots, n-1$) 个分段开关距首端的距离, 负荷沿线路分布密度为 $xP/(1/2 \cdot L^2)$, C_{save} 可表示为:

$$C_{save} = C_0 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} x_i^2 \frac{P \lambda (x_{i+1} - x_i)}{1/2 L^2} (t_1 - t_2) + C_0 \frac{1}{2} x_n^2 \frac{P (L - x_n) \lambda (t_1 - t_2)}{1/2 L^2}$$

C_e 可表示为:

$$C_e = \frac{1}{2} C_0 P \lambda (t_1 - t_2) [x_1^2 (x_2 - x_1) + \dots + x_{n-1}^2 (x_n - x_{n-1}) + x_n^2 (L - x_n)] - [S_{cost} + M_{cost}] \cdot n$$

3.1.2 负荷递减分布情况的模型

负荷沿线路递减分布时, 分布密度为 $(L-x)P/(1/2 \cdot L^2)$, C_e 可表示为:

$$C_e = C_0 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{L x_i - \frac{1}{2} x_i^2}{\frac{1}{2} L^2} P \lambda (x_{i+1} - x_i) (t_1 - t_2) + C_0 \frac{L x_n - \frac{1}{2} x_n^2}{\frac{1}{2} L^2} P (L - x_n) \lambda (t_1 - t_2) - [S_{cost} + M_{cost}] \cdot n$$

负荷递增或递减时 C_e 取最大值的问题是一个动态规划问题, 采用动态规划算法, 以分段开关的个数作为阶段数, 可确定分段开关的个数和位置。

3.2 手拉手接线模式的模型

手拉手接线模式下负荷分布不均时建模方法与单辐射情况一样, 但计算量巨大, 实际电网中, 由于手拉手接线方式下负荷可以转移, 负荷分布对开关位置的影响较单辐射方式大大减小了, 因而可先按负荷均匀分布确定分段开关个数, 再根据负荷分布特点确定分段开关位置。 C_e 取最大值时, 开关个数为 $L_i = L/n$,

$$n = \sqrt{\frac{C_0 L P \lambda (t_1 - t_2)}{S_{cost} + M_{cost}}}$$

n 取整数, 分段开关个数为 $n-1$, 开关的位置在下节中给出。

4. 农村典型区域分段开关的优化配置

农村电力负荷主要由四部分组成: 居民生活用电、公共设施用电、乡镇工业用电、农业用电。农村负荷具有季节性变化大、负荷利用小时数少、区域差异大、负荷密度整体较低的特点^[1]。根据这些特点, 选取两类型区域下不同的负荷分布、负荷密度和供电半径进行讨论, 得到相应的分段开关配置方案。

4.1 第一类典型区域分段开关的优化配置

第一类典型区域为经济发展相对落后的地区, 这类区域特点为负荷水平低, 单条中压路线所带负荷的年均用电量在 2000~8000MW·h 之间, 负荷分布相对分散, 对电能质量要求不高, 中压线路以单辐射接线为主。

负荷分布相对均匀时, 按照上述模型, 选取此类区域的典型参数可计算出不同长度不同负荷量的线路最优分段开关数, 如表 1 所示。

实际配电网中, 负荷大致沿线路均匀分布时, 可按表 1 确定分段开关个数, 分段开关在线路上等距分成可获得最大的净收益。农村配电网可参照此方法配置分段开关。

Table 1. The number of sectionalizing switches for the first typical power supply area.**表 1.第一类典型区域分段开关的个数.**

线路长度 (km)	单条中压线路年均负荷量 (kW)			
	300	500	700	1000
3	1	2	2	3
5	2	2	3	4
7	2	3	4	5
9	3	4	4	5
11	3	4	5	6

负荷递增分布时,对于给定的线路,用整数规划与动态规划相结合的方法,可依次算出安装 $i(i=0, 1, 2, \dots)$ 个分段开关的状态时的净收益,净收益最大时对应的 i 值即需要安装的分段开关数,由此便可计算出不同供电半径及不同负荷密度下的最优分段开关个数,而根据对应的 X_i 的值便可确定开关的最优位置。表 2 为对应典型供电半径(线路长度)及带负荷量的线路应配置的分段开关个数,表 3 为负荷递增时,单辐射线路分段开关的配置位置。

Table 2. The number of sectionalizing switches for typical line under single radial connection mode where the load is incremental distribution along the line**表 2. 单辐射接线模式下负荷沿线递增时分段开关的个数**

线路长度 (km)	单条中压线路年均负荷量 (kW)			
	300	500	700	1000
3	1	1	2	2
5	1	2	2	3
7	2	2	3	4
9	2	3	4	5
11	2	3	5	6

Table 3. the locatoin of sectionalizing switches where the load is incremental distribution along the line**表 3. 负荷递增分布时分段开关的位置**

开关个数	第 1 段长度	第 2 段长度	第 3 段长度	第 4 段长度	第 5 段长度	第 6 段长度
1	0.67L	0.33L	-	-	-	-
2	0.52L	0.26L	0.22L	-	-	-
3	0.44L	0.22L	0.18L	0.16L	-	-
4	0.38L	0.19L	0.16L	0.14L	0.13L	-
5	0.51L	0.17L	0.14L	0.12L	0.12L	0.11L

表 3 中 L 是指线路总长度,每一段编号从电源点即线路首端开始。考虑农村电网的实际情况,分段数一般不会太多,因此只给出一到六段开关定位的参数。

特殊情况下分段数再增加时末端的分段间隔接近等距,超过六段时,前五段比例保持不变,后面的间距与第五段相等即可。

负荷递减时,由于精确定位计算相当复杂,且可获得的净收益与假设负荷均匀分布相比没有很大差距,所以实际工程中,负荷递减的情形可假设负荷均匀分布,参照其结论确定分段开关的个数,开关定位采用使每段负荷量相等的原则确定。

4.2 第二类典型区域分段开关的优化配置

第二类典型区域为经济水平较高的区域,这类区域特点是负荷水平较高,单条中压线路所带负荷的年用电量大约在 5000~15000MW*h 之间;对供电质量要求相对较高,中压配电网以拉手环网为主。负荷分布相对均匀时,按照上述手拉手接线模型,选取此类区域的典型参数可计算出不同长度不同负荷量的线路最优分段开关数,如表 4 所示。

Table 4. The number of sectionalizing switches for the second typical power supply area**表 4.第二类典型区域分段开关的个数**

线路长度 (km)	单条中压线路年均负荷量 (kW)			
	500	700	1000	1500
3	3	3	4	5
5	4	5	6	7
7	5	6	7	9
9	5	7	8	10
11	6	7	9	11

分段开关在线路上等距分布可获得最大净收益。

中压配电网以手拉手接线方式为主的二类典型区域,因为故障或检修时可以通过与其联络的线路供电,负荷分布的不均性对停电损失影响相对小很多,所以配置分段开关的个数可直接参考负荷均匀分布的结论,开关的位置按使每段负荷量相等的原则确定。

5. 总结

本文研究了农村配电网分段开关的优化配置问题,根据新农村电气化建设的要求和新农村负荷的特点,针对负荷分布情况,将非线性、不可微、离散的组合优化问题进行了简化,同时保证了分段开关优化配置的合理性和易行性。在建立了数学模式的基础上,结合农村地区的负荷特性,选取了两类典型供电区域下不同负荷密度和典型供电半径的情况进行计算,给出了典型供电区域的分段开关配置方案,所得结论与《新农村典型供电模式》中分段开关配置方法基本一

致，为其提供了理论依据。

References (参考文献)

- [1] The editorial committee of "Typical Power Supply Modes for the rural areas", Typical Power Supply Modes for the rural areas[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008, 23-28(Ch).
《新农村典型供电模式》编委会编, 新农村典型供电模式[M], 北京: 中国电力出版社, 2008, 23-28.
- [2] Ge Shaoyun, Li Jianfang, Zhang Baogui, Optimal Configuration of Sectional Switches in Distribution Network Based on Bisection Method[J], Power System Technology, 2007, 31(2), P44-49 (Ch).
葛少云, 李建芳, 张宝贵. 基于二分法的配电网分段开关优化配置. 电网技术, 2007, 31(2), P44-49.
- [3] Du Wenxue, Li Shuanghu, He Xiongwan, The set of parting switch optimal fitting position for power distribution network[J], Electrical Technology, 2003.2, P5-6(Ch).
杜文学, 李双虎, 何雄旺, 配电网线路分段开关最佳装设位置的设定[J], 电工技术, 2003.2, P5-6.
- [4] Yiming Mao, Karen N.Miu, Switch Placement to Improve System Reliability for Radial Distribution Systems with Distributed Generation[C], IEEE Transactions On Power Systems, 2003,18(4), P 1346-1352.
- [5] Xie Kaigui, Liu Baisi, Zhao Yuan, Placement of Optimal Switching Devices in Radial Electrical Distribution Network Based on Dynamic Programming[C], Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005.11, P29-34.
谢开贵, 刘柏私, 赵渊等, 配电网开关优化配置的动态规划算法, 中国电机工程学报, 2005, 11, P29-34.
- [6] Adel Moradi, M.Foutuhi-Firuzabad, Optimal Switch Placement in Distribution System Using Trinary Particle Swarm Optimization Algorithm[C], IEEE Transactions On Power Delivery, 2008,23(1), P271-279.
- [7] Chao-Shun Chen, Chia-Hung Lin, Hui-Jen Chuang, Chung-Sheng Li, Ming-Yang Huang, Chia-Wen Huang, Optimal Placement of Line Switch For Distribution Automation Systems Using Immune Algorithm[C], IEEE Transactions On Power Systems, 2006,21(3), P1209-1217.