

# 中压架空电缆混合线路分段优化计算

郭卫朝<sup>1</sup> 曲永政<sup>1</sup> 王锴<sup>2</sup> 石书梅<sup>1</sup> 王向阳<sup>1</sup> 陈杨<sup>3</sup>

1.平顶山电力设计院有限公司; 2.国网平顶山供电公司; 3.郑州润杰电力勘测设计有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i10.8473

**[摘要]** 对馈线进行合理分段是配电网规划设计的重要内容, 研究不同接线模式下的最优分段数对提升配电网的可靠性具有重要意义。与以往对单一结构形式下典型接线的最优分段计算不同, 本文基于单联络接线模式, 采用解析法推导了架空电缆混合线路的可靠性指标, 构建出了可靠性指标与线路分段数的表达关系, 通过对其分析, 可知馈线长度和架空电缆用户所占比重对最优分段数影响较大。进一步综合考虑经济性和可靠性, 得出了架空电缆混合线路的最优分段数表达式。最后通过算例计算, 验证了理论推导的准确性和可靠性。

**[关键词]** 配电网; 单联络; 架空电缆混合线路; 最优分段数; 可靠性; 经济性

**[中图分类号]** TM715

## Segmented optimization calculation of medium voltage overhead cable hybrid line

Guo Weichao<sup>1</sup> Qu Yongzheng<sup>1</sup> Wang Kai<sup>2</sup> Shi Shumei<sup>1</sup> Wang Xiangyang<sup>1</sup> Chen Yang<sup>3</sup>

1. Pingdingshan Electric Power Design Institute Co., Ltd.;

1.State Grid Pingdingshan Power Supply Company;

3. Zhengzhou Runjie Electric Power Survey and Design Co., Ltd.

**[Abstract]** Reasonable segmentation of feeders is an important part of distribution network planning and design. Studying the optimal number of segments under different wiring modes is of great significance for improving the reliability of distribution networks. Unlike previous calculations of optimal segmentation for typical wiring under a single structural form, this paper derives the reliability index of hybrid overhead cable lines using analytical methods based on the single link wiring mode. The expression relationship between reliability index and the number of line segments is constructed. Through analysis, it is found that the length of the feeder line and the proportion of overhead cable users have a significant impact on the optimal segmentation number. Further considering both economy and reliability, the optimal number of segments expression for hybrid overhead cable lines has been derived. Finally, the accuracy and reliability of the theoretical derivation were verified through numerical calculations.

**[Key words]** distribution network; Single contact; Hybrid overhead cable lines; Optimal number of segments; Reliability; economy

## 引言

据统计, 电力系统超过 80% 的故障是由中压配电网故障引起的<sup>[1~4]</sup>, 增加馈线分段可缩小故障区域和停电范围, 提高故障后非故障区域负荷的转供能力<sup>[5]</sup>, 进而提升供电可靠性。在一定范围内, 分段数越多, 故障区段越小, 可靠性越高, 但分段数过多又会导致线路投资过高并增加设备故障率, 制约配电网可靠性的提升。因此, 从可靠性和经济性出发, 研究馈线最优分段在配电网规划和建设中都具有重要意义。

本文在单联络接线模式下, 以架空电缆混合线路为研究对象, 考虑电缆用户和架空用户的比重, 分析增加分段数对系统可靠性指标的影响。

## 1 馈线可靠性估算公式

### 1.1 假设条件

为了计算和讨论方便, 结合实际情况, 做出如下假设和简化:

- 1) 同一结构形式下的馈线负荷沿线路均匀分布;
- 2) 不考虑多重故障和计划停电的影响, 仅考虑一阶故障;
- 3) 假设上级电源完全可靠且开关两侧不配置隔离开关;
- 4) 用户负荷均配备熔断器, 且熔断器能可靠切断配变自身故障, 因此可不计及配变故障的影响;
- 5) 不考虑电压和容量约束, 联络线能可靠转供受影响的用户负荷;
- 6) 架空系统和电缆系统开关均采用断路器;

7) 假设架空(电缆)系统中馈线故障率为 $\lambda_{jk,lf}$  ( $\lambda_{dl,lf}$ ) (次/km·年), 对应的故障修复时间为 $t_{jk,lf}$  ( $t_{dl,lf}$ ) (h/次), 对应的故障定位、隔离及倒闸操作时间为 $t_{jk,df}$  ( $t_{dl,df}$ ) (h/次); 开关故障率为 $\lambda_w$  (次/台·年), 对应的故障修复时间为 $t_w$  (h/次)。

## 1.2 理论推导

### 1.2.1 架空系统单联络接线

假设某单联络多分段架空线总用户数为 $M_{jk,i}$ , 共分 $N_{jk,i}$ 段, 线路长为 $L_{jk}$ , 每分段用户数为 $M_{jk,i}/N_{jk,i}$ 。

架空系统单联络接线模式下SAIDI简化估算式(1):

$$SAIDI_{jk,i} = \frac{N_{jk,i}-1}{2N_{jk,i}} L_{jk,i} \lambda_{jk,lf} t_{jk,df} + \frac{L_{jk,i}}{N_{jk,i}} \lambda_{jk,lf} t_{jk,lf} + \frac{2(N_{jk,i}-1)}{N_{jk,i}} \lambda_w t_w + \frac{(N_{jk,i}-2)(N_{jk,i}-1)}{2N_{jk,i}} \lambda_w t_{jk,df} \quad (1)$$

### 1.2.2 电缆系统单联络接线

假设某单联络多分段电缆线总用户数为 $M_{dl,i}$ , 被环网柜共分 $N_{dl,i}$ 段, 线路长为 $L_{dl}$ , 分支线长为 $L_{dl,b}$ , 每分段用户数为 $M_{dl,i}/N_{dl,i}$ , 环网柜内开关数量为 $H_i$ 。

电缆系统单联络接线模式下SAIDI简化估算式(2):

$$SAIDI_{dl,i} = (L_{dl,i} - L_{dl,b}) \frac{N_{dl,i}+1}{2N_{dl,i}} \lambda_{dl,lf} t_{dl,df} + \frac{L_{dl,b}}{N_{dl,i}(H_i-2)} \lambda_{dl,lf} t_{dl,lf} + \lambda_w H_i [t_w + \frac{(N_{dl,i}-1)}{2} t_{dl,df}] \quad (2)$$

### 1.2.3 架空电缆混合接线

#### 1) 架空负荷SAIDI估算

架空负荷SAIDI估算表达式:

$$SAIDI_{jk,i} = \frac{N_i^{eq}-1}{2N_i^{eq}} L_{jk,i}^{eq} \lambda_{jk,lf}^{eq} t_{jk,df}^{eq} + \frac{L_{jk,i}^{eq}}{N_i^{eq}} \lambda_{jk,lf}^{eq} t_{jk,lf}^{eq} + \frac{2(N_i^{eq}-1)}{N_i^{eq}} \lambda_w t_w + \frac{(N_i^{eq}-2)(N_i^{eq}-1)}{2N_i^{eq}} \lambda_w t_{jk,df}^{eq} \quad (3)$$

#### 2) 电缆负荷SAIDI估算

电缆负荷SAIDI估算表达式:

$$SAIDI_{dl,i} = (L_{dl,i}^{eq} - L_{dl,b}) \frac{N_i^{eq}+1}{2N_i^{eq}} \lambda_{dl,lf}^{eq} t_{dl,df}^{eq} + \frac{L_{dl,b}}{N_i^{eq}(H_i-2)} \lambda_{dl,lf}^{eq} t_{dl,lf}^{eq} + \lambda_w H_i [t_w + \frac{(N_i^{eq}-1)}{2} t_{dl,df}^{eq}] \quad (4)$$

#### 3) 馈线负荷SAIDI估算

根据架空线和电缆线所带负荷的比重, 可得整条馈线负荷SAIDI估算表达式:

$$SAIDI_i = \frac{M_{jk,i}}{M_{jk,i}+M_{dl,i}} SAIDI_{jk,i} + \frac{M_{dl,i}}{M_{jk,i}+M_{dl,i}} SAIDI_{dl,i} \quad (5)$$

## 2 考虑可靠性与经济性的最优分段数

### 2.1 基于可靠性的最优分段数

#### 2.1.1 架空系统单联络接线

由式(1)可知, 若 $N_{jk,i}$ 为连续值, 则 $SAIDI_{jk,i}$ 为一条连续可导的曲线, 因此, 以 $N_{jk,i}$ 为变量对 $SAIDI_{jk,i}$ 求导取整

后可得最优分段数:

$$N_{best} = \left\lfloor \sqrt{\frac{L_{jk,i} \lambda_{jk,lf} (2t_{jk,lf} - t_{jk,df}) + 2\lambda_w (t_{jk,df} - 2t_w)}{\lambda_w t_{jk,df}}} \right\rfloor \quad (6)$$

式中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整。

#### 2.1.2 电缆系统单联络接线

由式(2)可知, 若 $N_{dl,i}$ 为连续值, 则 $SAIDI_{dl,i}$ 为一条连续可导的曲线, 因此, 以 $N_{dl,i}$ 为变量对 $SAIDI_{dl,i}$ 求导取整后可得最优分段数:

$$N_{best} = \left\lfloor \sqrt{\frac{2L_{dl,b} \lambda_{dl,lf} t_{dl,lf} + (L_{dl,i} - L_{dl,b})(H_i - 2) \lambda_{dl,lf} t_{dl,df}}{(H_i - 2) \lambda_w H_i t_{dl,df}}} \right\rfloor \quad (7)$$

#### 2.1.3 架空电缆混合接线

由式(5)可知, 若 $N_i^{eq}$ 为连续值, 则 $SAIDI_i$ 为一条连续可导的曲线, 因此, 以 $N_i^{eq}$ 为变量对 $SAIDI_i$ 求导取整后可得最优分段数:

$$N_{best} = \left\lfloor \sqrt{\frac{M_{jk,i} T_{jk}^{eq} + M_{dl,i} T_{dl}^{eq}}{\lambda_w (M_{jk,i} t_{dl,df}^{eq} + M_{dl,i} H_i t_{dl,lf}^{eq})}} \right\rfloor \quad (8)$$

$$T_{jk}^{eq} = L_{jk,i} \lambda_{jk,lf}^{eq} (2t_{jk,lf}^{eq} - t_{jk,df}^{eq}) + 2\lambda_w (t_{jk,df}^{eq} - 2t_w) \quad (9)$$

$$T_{dl}^{eq} = \lambda_{dl,lf}^{eq} \left[ \frac{2L_{dl,b} t_{dl,lf}^{eq}}{(H_i - 2)} + (L_{dl,i}^{eq} - L_{dl,b}) t_{dl,df}^{eq} \right] \quad (10)$$

由式(8)~(10)可得如下结论: ①最优分段数与架空线和电缆线所带负荷的比重有关; ②主干线越长, 最优分段数越大; ③线路停运参数越差, 最优分段数越大。

### 2.2 考虑可靠性和经济性的最优分段数

总成本可描述为分段开关费用和停电损失费用之和, 可表示为:

$$C_y = C_1 + C_2 = c_b(N-1) + c_p CP \times SAIDI \quad (11)$$

式(11)中:  $C_y$ 表示总成本;  $C_1$ 表示设备成本;  $C_2$ 表示可靠性成本;  $c_b$ 表示设备折算成等年值的年费用;  $N$ 表示分段数;  $c_p$ 表示单位电量GDP;  $C$ 表示总用户数;  $P$ 表示平均用户负荷。

对于架空系统单联络接线, 由式(3)和式(11)可推出架空系统单联络接线的成本函数:

$$C_y = C_1 + C_2 = c_b(N_{jk,i}-1) + c_p CP \times \left\{ \frac{N_{jk,i}-1}{2N_{jk,i}} L_{jk,i} \lambda_{jk,lf} t_{jk,df} + \frac{L_{jk,i}}{N_{jk,i}} \lambda_{jk,lf} t_{jk,lf} + \frac{2(N_{jk,i}-1)}{N_{jk,i}} \lambda_w t_w + \frac{(N_{jk,i}-2)(N_{jk,i}-1)}{2N_{jk,i}} \lambda_w t_{jk,df} \right\} \quad (12)$$

对变量 $N_{jk,i}$ 求导后可得最优分段数:

$$N_{best} = \left\lfloor \sqrt{\frac{c_p CP [L_{jk,i} \lambda_{jk,lf} (2t_{jk,lf} - t_{jk,df}) + 2\lambda_w (t_{jk,df} - 2t_w)]}{2c_b + c_p CP \lambda_w t_{jk,df}}} \right\rfloor \quad (13)$$

对比式(6)和式(13)可知, 仅考虑可靠性的最有分段数将大于或等于考虑经济性后的最优分段数。当 $c_p CP \gg 2c_b$ 时, 则无须考虑经济性对最优分段数的影响。

类比架空系统单联络接线最优分段表达式的推导, 可得另外两种接线的最优分段表达式, 受篇幅所限, 结果如表1。

表1 可靠性最优和综合最优条件下不同接线模式的最优分段数  
Table 1 Optimal number of segments in different connection modes under the conditions of optimal reliability and comprehensive optimization.

| 接线模式      | 可靠性最优                                                                                                                                                                                                                                                                       | 综合最优                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 架空系统单联络接线 | $N_{\text{best}} = \left\lceil \sqrt{\frac{T_{\text{jk}}}{\lambda_w t_{\text{jk},\text{df}}}} \right\rceil$                                                                                                                                                                 | $N_{\text{best}} = \left\lceil \sqrt{\frac{c_p CPT_{\text{jk}}}{2c_b + c_p CP\lambda_w t_{\text{jk},\text{df}}}} \right\rceil$                                                                                                                                                                                                           |
| 电缆系统单联络接线 | $N_{\text{best}} = \left\lceil \sqrt{\frac{T_{\text{dl}}}{\lambda_w H_i t_{\text{dl},\text{df}}}} \right\rceil$                                                                                                                                                             | $N_{\text{best}} = \left\lceil \sqrt{\frac{c_p CP\lambda_{\text{dl},\text{fr}} T_{\text{dl}}}{2c_b + c_p CP\lambda_w H_i t_{\text{dl},\text{df}}}} \right\rceil$                                                                                                                                                                         |
| 架空电缆混合接线  | $N_{\text{best}} = \left\lceil \sqrt{\frac{M_{\text{jk},i} T_{\text{jk}}^{\text{eq}} + M_{\text{dl},i} T_{\text{dl}}^{\text{eq}}}{\lambda_w (M_{\text{jk},i} t_{\text{jk},\text{df}}^{\text{eq}} + M_{\text{dl},i} H_i t_{\text{dl},\text{fr}}^{\text{eq}})}} \right\rceil$ | $N_{\text{best}} = \left\lceil \sqrt{\frac{c_p CPM_{\text{jk},i} T_{\text{jk}}^{\text{eq}} + c_p CPM_{\text{dl},i} T_{\text{dl}}^{\text{eq}}}{2c_b (M_{\text{jk},i} + M_{\text{dl},i}) + c_p CP\lambda_w (M_{\text{jk},i} t_{\text{jk},\text{df}}^{\text{eq}} + M_{\text{dl},i} H_i t_{\text{dl},\text{fr}}^{\text{eq}})}} \right\rceil$ |

注：  $T_{\text{jk}} = L_{\text{jk},i} \lambda_{\text{jk},\text{fr}} (2t_{\text{jk},\text{fr}} - t_{\text{jk},\text{df}}) + 2\lambda_w (t_{\text{jk},\text{df}} - 2t_w)$ 、 $T_{\text{dl}} = \lambda_{\text{dl},\text{fr}} [2L_{\text{dl},b} t_{\text{dl},\text{fr}} / (H_i - 2) + (L_{\text{dl},i} - L_{\text{dl},b}) t_{\text{dl},\text{df}}]$

### 3 算例分析

以河南某城区的3条不同结构形式下典型接线为例。一条10kV单联络架空线路，架空线长6.95km，无大分支，共48个用户；一条10kV单联络电缆线路，电缆线长5.85km，大分支长1.95km，环网柜内配备4个断路器，共40个用户；一条10kV单联络架空电缆混合线路，架空线长为3.9km，电缆线长为6.3km，电缆分支线长为1.3km，环网柜内配备4个断路器，共60个用户。

根据公式(6)~(8)可得，架空线最优分段数为  $N_{\text{best}} = \lceil 9.84 \rceil = 10$ ，电缆线最优分段数为  $N_{\text{best}} = \lceil 3.51 \rceil = 4$ ，架空电缆混合接线模式1最优分段数为  $N_{\text{best}} = \lceil 5.34 \rceil = 5$ ，架空电缆混合接线模式2最优分段数为  $N_{\text{best}} = \lceil 8.86 \rceil = 9$ ，架空电缆混合接线模式3最优分段数为  $N_{\text{best}} = \lceil 6.82 \rceil = 7$ 。对比不同接线的最优分段数可知，电缆线的最优分段数明显小于架空线，主要是分段对电缆线的可靠性影响较小，在实际选取电缆线的分段数时，还需计及环网柜内开关数量的影响。对于架空电缆混合接线，架空用户和电缆用户所占比重不同，最优分段数取值也不尽相同，架空用户所占比重越大，最优分段数越大。

下面对成本进行计算，分段开关成本3万，运行年限为20年，投资回收率取9%，检修维护率取3.8%，通过计算可得等年值得年费用为0.347万元。通过GDP发电量计算可靠性成本：架空线总负荷为6048kW，线路平均用户负荷为126kW；电缆线总负荷为5920kW，线路平均用户负荷为148kW；架空电缆混合接线总负荷为7200kW，线路平均用户负荷为120kW；平均电价按2022年河南省单位电量GDP数据，取值为15.7元/kW·h进行成本计算。

在综合考虑可靠性和经济性时，架空线最优分段数为7，电缆线最优分段数为3，架空电缆混合接线模式1最优分段数为4，架空电缆混合接线模式2最优分段数为5，架空电缆混合接线模式3最优分段数为4。由综合最优公式亦可推出架空线最优分段数为  $N_{\text{best}} = \lceil 6.88 \rceil = 7$ ，电缆线最优分段数为  $N_{\text{best}} = \lceil 2.64 \rceil = 3$ ，架空电缆混合接线模式1最优分段数为  $N_{\text{best}} = \lceil 3.56 \rceil = 4$ ，架空电缆混合接线模式2最优分段数为  $N_{\text{best}} = \lceil 4.61 \rceil = 5$ ，架空电缆混合接线模式3最优分段数为  $N_{\text{best}} = \lceil 4.1 \rceil = 4$ 。由分析结果可知，在考虑经济性时，最优分段数将小于等于只考虑可靠性时的最优分段数。该结果与公式计算的结果也是相符的。

### 4 结论

本文通过对单联络结构下架空电缆混合线路可靠性估算公式的数学推导，得到可靠性指标SAIDI与分段数的表达关系

式，最终归纳出了最优分段数的理论计算公式。

本文通过综合考虑可靠性和经济性影响，最终也求得了与公式(6)~(8)类似的表达式。经分析，综合考虑可靠性和经济性影响的最优分段数要低于仅考虑可靠性影响的最优分段数。

综上，本文推导得出了最优分段数表达式，适用于估算实际配电网中出现的单联络结构下架空电缆混合线路的最优分段数，为分段开关的设置提供了理论支撑。

### 【参考文献】

- [1]ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes—basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813–820.
  - [2]徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京:中国电力出版社.
  - [3]刘小春, 王巍璋, 姚文昊, 等. 中压配电网故障处理模式配置研究综述[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 49–58.
  - LIU Xiaocun, WANG Weizhang, YAO Wenhao, et al. Review of the fault disposing modes configuration of medium-voltage distribution networks[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 49–58.
  - [4]谭阳红, 杨勃, 惠玲利, 等. 基于统一特征的配电网故障诊断方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(2): 150–156.
  - TAN Yanghong, YANG Bo, HUI Lingli, et al. Fault Diagnosis Method of Distribution Network Based on Unified Feature[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2023, 50(2): 150–156.
  - [5]王光华, 李晓影, 宋秉睿, 等. 基于深度强化学习的配电网负荷转供控制方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 253–260.
  - WANG Guanghua, LI Xiaoying, SONG Bingrui, et al. Load transfer control method of distribution network based on deep reinforcement learning[J]. Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 253–260.
- 作者简介：郭卫朝（1975.04—），男，平顶山人，研究生，高级工程师，主要从事电网运行与管理工作；  
陈杨（1992.10—），通讯作者，男，河南郑州人，研究生，主要从事电力系统规划与运行、新能源发电等研究工作。