

计及负载率的农村 10 kV 配电网最优分段研究

熊星星¹, 许跃进¹, 刘学会², 范宇航¹

(1. 中国农业大学, 北京 100083; 2. 福建省电力有限公司龙岩供电公司, 福建 龙岩 364000)

摘要: 在过去对配电线路分段的研究中, 大多没有考虑线路的转供能力, 认为只要通过分段开关将故障段分离, 非故障段的全部负荷可经联络线恢复供电。而在实际运行中, 配电网发生故障需要通过联络线转移负荷时, 由于线路自身负载率的限制, 联络线的转供率通常达不到 100%, 将出现停电损失。探讨不同负载率下手拉手自环网线路的最优分段情况, 提出并建立了线路计及负载率最优分段的可靠性、经济性评估数学模型, 利用模型计算分析了不同负载率下线路的最优分段位置及其变化规律。并基于最优分段位置, 通过分段数-年总费用曲线法分析得到该接线模式下最优分段数与供电半径、产电比和负载率的关系, 为电网建设中最优分段的选择提供有实用价值的参考和借鉴。

关键词: 配电线路; 负载率; 转供率; 线路分段; 最优分段数

Research on optimal sectioning of 10 kV rural power network considering load rate

XIONG Xingxing¹, XU Yuejin¹, LIU Xuehui², FAN Yuhang¹

(1. China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Longyan Power Supply Company, Fujian Power Co., Ltd., Longyan 364000, China)

Abstract: In most research on optimal sectioning of the 10 kV rural distribution network, the load transfer rate of lines is usually not considered. They just think that as long as the faulty section is separated by the section switch, the electricity of non-faulty section can be restored through the tie lines. While in practice, when distribution network breaks down, the failure load is transferred by tie line. Due to its own load rate, the non-faulty line cannot afford the whole failure load, the outage cost appears. This paper probes the optimal sectioning of hand in hand self-looped connecting mode under different load rates. This paper propounds and builds a reliability and economy evaluation mathematical model considering load rate. Using the model, it calculates and analyzes the changing law of the optimal location of sectional switches with load rate increasing. Then based on the optimal location result, by plotting the section numbers-total cost profile, the paper gets the relationships among the optimal section numbers, power supply radius, electricity production ratio and load rate, providing a meaningful reference to the choice of optimal sectioning in grid building.

Key words: distribution line; load rate; load transfer rate; line sectionalizing; optimal section numbers

中图分类号: TM715

文章编号: 1674-3415(2015)19-0072-06

0 引言

农村 10 kV 配电网直接与用户相连, 是农村电网的重要组成部分, 很大程度上决定着整个电力系统的供电能力和供电质量^[1-5]。研究 10 kV 配电网线路最优分段的变化规律, 对实现电网的经济、可靠运行具有重要的实际意义^[6-7]。

目前, 有关配电线路分段研究工作的文献较多, 研究方法归纳起来主要有: 基于二分法确定分段位置和最优分段数的双层优化方法^[8], 结合遗传

算法全局搜索特性和禁忌搜索算法局部搜索特性的混合算法^[9], 基于产电比的最优分段研究^[10-14], 负荷转移优化策略及实现方法^[15]。以上研究方法各有特点和优势, 但不足的是默认线路的转供率为 100%, 没有考虑线路负载率对分段的影响。实际上, 由于承担转移负荷的线路已担负一定的自身负荷, 其转供能力通常不能达到 100%, 因此线路的转供能力与负载率有重要联系。基于负荷测录系统^[16]可以得到线路的负载情况, 比如满载运行的线路, 其转供能力为零, 此时联络线并不能发挥应有的作用。

因此, 线路负载率决定其转供能力, 并将对线路最优分段位置及最优分段数产生影响。由此可知, 配电网分段研究中不考虑线路负载率的做法并不合理。

为使配电线路分段研究更接近实际情况, 本文在文献[13]的基础上, 探讨了负载率对手拉手自环网接线模式的最优分段位置与最优分段数的影响, 建立了计及负载率的经济性、可靠性评估数学模型。依据线路负载率大小即联络线转供能力, 推导负载率在不同范围内的停电损失数学模型, 并进一步优化求解得到最优分段位置。最后, 基于最优分段位置的计算结果, 利用分段数-年总费用曲线法对最优分段数进行综合比较, 得到该接线模式下线路最优分段数与供电半径、产电比和负载率之间的关系。

1 最优分段建模的总体思路

我国农村电网中压线路多为环网接线配置模式^[17]。现假设承担转移负荷的线路负载率为 α , 则其转供率为 $(1-\alpha)$, 即相邻线路发生故障时, 该条线路最多只能承担 $(1-\alpha)P_m$ (P_m 为线路满载运行时的传输功率)的故障负荷, 若故障负荷大于 $(1-\alpha)P_m$, 则超出部分无法通过联络线恢复供电。因此, 负载率的大小将影响故障线路的缺供电量和停电损失, 进而影响线路的最优分段位置及最优分段数。

本文从经济性和可靠性两方面来综合评估线路的最优分段, 考虑负载率的影响, 提出了计及负载率的可靠性与经济性数学评估模型, 采用停电损失作为可靠性评估指标^[18-21], 其年总费用模型^[22-25]为

$$NF = Z + k \times ENS \quad (1)$$

式中: NF 为年总费用; Z 为已转化为年费用模型的投资费用, 包括配电站、架空线路和开关设备的年投资; k 为产电比; ENS 为计及负载率的缺供电量。

2 计及负载率的最优分段位置研究

配电网线路最优分段为兼顾经济性与可靠性的分段开关最佳位置。由于线路负载率的大小决定联络线的转供能力, 转供能力影响线路故障时的停电损失, 而线路最优分段与停电损失密切相关, 因此, 线路的负载率将影响配电网线路最优分段。下面以手拉手自环网接线模式为例, 对线路在不同负载率下的停电损失及最优分段位置进行分析。

2.1 计及负载率的停电损失

手拉手自环网接线模式如图 1 所示, 现以该接

线模式四分段为例, 讨论线路故障后在不同负载率下的停电损失及最优分段。

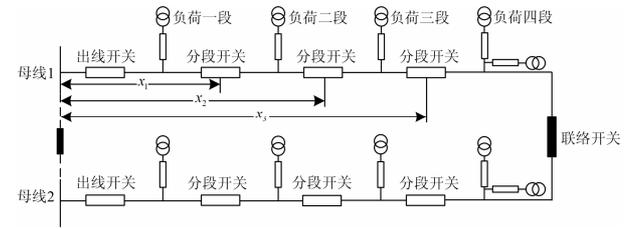


图 1 手拉手自环网接线模式

Fig. 1 Hand in hand self-looped connecting mode

设线路的 3 个分段开关位置距离线路首端的距离分别为 x_1 (km)、 x_2 (km)、 x_3 (km), 负荷沿线路均匀分布, 下面按照负载率及转供能力分四种情况讨论。

1) 联络线可转供负荷大于二、三、四段负荷之和, 即负载率满足 $(1-\alpha)P_m \geq \frac{(R-x_1)\alpha P_m}{R}$, 整理得

$$\frac{x_1}{R} \geq \frac{2\alpha-1}{\alpha} \quad (2)$$

当分段开关的位置与供电半径 R 的比值符合上式时, 若系统中一条线路发生故障, 无论是第几段出现故障, 将联络开关闭合, 联络线均可以 100% 转供负荷。此时计及负载率的停电损失模型为

$$Loss_1 = k \times ENS_1 = \frac{10^4 \alpha k P_m}{R} \{ \gamma x_1 [x_1 t_x + (R-x_1)t_l] + \rho + \mu + \omega \} \quad (3)$$

式中:

$\rho(x_1, x_2) = \gamma(x_2 - x_1)[(x_2 - x_1)t_x + x_1 t_f + (R - x_2)t_l]$;
 $\mu(x_2, x_3) = \gamma(x_3 - x_2)[(x_3 - x_2)t_x + x_2 t_f + (R - x_3)t_l]$;
 $\omega(x_3) = \gamma(R - x_3)[(R - x_3)t_x + x_3 t_f]$; k 为产电比; ENS_1 为线路缺供电量; α 为线路的负载率; P_m 为每条线路满载运行时的传输功率; γ 为架空线路平均停电故障率; R 为供电区域的供电半径; t_x 为架空线路故障平均修复时间; t_l 为联络开关平均切换操作时间; t_f 为分段开关平均切换操作时间。

2) 联络线的可转供负荷小于二、三、四段负荷之和大于三、四段负荷之和。即负载率满足以下条件:

$\frac{(R-x_2)\alpha P_m}{R} \leq (1-\alpha)P_m < \frac{(R-x_1)\alpha P_m}{R}$, 整理得

$$\frac{x_1}{R} < \frac{2\alpha-1}{\alpha}, \frac{x_2}{R} \geq \frac{2\alpha-1}{\alpha} \quad (4)$$

当分段开关的位置与供电半径的比值符合上式时, 若系统中一条线路的第一段出现故障, 联络线不能 100% 转供负荷, 故障线路非故障段将产生损失负荷; 其他任一段出现故障时, 联络线可以 100%

转供负荷。此时计及负载率的停电损失模型为

$$Loss_2 = k \times ENS_2 = \frac{10^{-4} \alpha k P_m}{R} (\psi + \rho + \mu + \omega) \quad (5)$$

式中:

$$\psi(x_1, \alpha) = \gamma x_1 [x_1 t_x + [(R - x_1) - \frac{(1-\alpha)}{\alpha} R] t_x + \frac{(1-\alpha)}{\alpha} R t_l]$$

3) 联络线可转供负荷小于三、四段负荷之和大于第四段负荷。即负载率满足 $\frac{(R - x_3) \alpha P_m}{R} \leq (1 - \alpha) P_m <$

$\frac{(R - x_2) \alpha P_m}{R}$, 整理得:

$$\frac{x_2}{R} < \frac{2\alpha - 1}{\alpha}, \frac{x_3}{R} \geq \frac{2\alpha - 1}{\alpha} \quad (6)$$

当分段开关的位置与供电半径的比值符合上式时, 系统中一条线路的第一段或第二段出现故障时, 联络线不能 100% 转供负荷, 故障线路的非故障段将产生损失负荷; 其他任一段出现故障时, 联络线可以 100% 转供负荷。此时计及负载率的停电损失模型为

$$Loss_3 = k \times ENS_3 = \frac{10^{-4} \alpha k P_m}{R} (\psi + \lambda + \mu + \omega) \quad (7)$$

式中:

$$\lambda(x_1, x_2, \alpha) = \gamma(x_2 - x_1) [(x_2 - x_1) t_x + x_1 t_l + \frac{(1-\alpha)}{\alpha} R t_l + [(R - x_2) - \frac{(1-\alpha)}{\alpha} R] t_x]$$

4) 联络线可转供负荷小于负荷四段。即负载率满足 $(1 - \alpha) P_m < \frac{(R - x_3) \alpha P_m}{R}$, 整理得:

$$\frac{x_3}{R} < \frac{2\alpha - 1}{\alpha} \quad (8)$$

当分段开关的位置与供电半径的比值符合上式时, 系统中一条线路的任何一段出现故障时, 联络线均不能 100% 转供负荷, 故障线路非故障段将产生损失负荷。此时计及负载率的停电损失模型为

$$Loss_4 = k \times ENS_4 = \frac{10^{-4} \alpha k P_m}{R} \{ \psi + \lambda + \mu + \omega + \gamma(x_3 - x_2) [(R - x_3) - \frac{1-\alpha}{\alpha} R] t_x + (\frac{R}{\alpha} - 2R + x_3) t_l \} \quad (9)$$

2.2 不同负载率下的最优分段位置求解

当供电区域的供电半径一定, 对固定的接线模式和线路分段数, 分段开关的位置不会影响网络的建设投资费用, 只是影响网络的供电可靠性。则使某接线模式下的供电可靠性最高而停电损失最小的分段开关位置为线路的最优分段。

线路最优分段位置分析基本思路: 假设线路的

分段数为 N , 则分段开关数为 $N-1$ 。各分段开关距离线路始端的位置分别为 $x_1(\text{km})$ 、 $x_2(\text{km})$ 、 $x_3(\text{km})$ 、 \dots 、 $x_{N-1}(\text{km})$, 应用故障模式后果分析法计算该条线路每一分段故障时的缺供电量, 累加求和便得到该条线路的总缺供电量。由上文可知, 得到的停电损失数学模型是关于分段位置 x_1 、 x_2 、 \dots 、 x_{N-1} 的非线性多元函数, 对函数优化求解即可确定最优分段位置^[12]。

仍以手拉手自环网接线模式四分段为例, 上文已经得到不同负载率下的停电损失数学模型, 对其进行非线性规划求解, 则可得到不同负载率下手拉手自环网四分段线路的最优分段位置与供电半径的比值 x/R , 结果如表 1。

表 1 手拉手自环网四分段各负载率下 x/R 的值

Table 1 Numerical value of x/R under different load rate with hand in hand self-looped four section connection mode

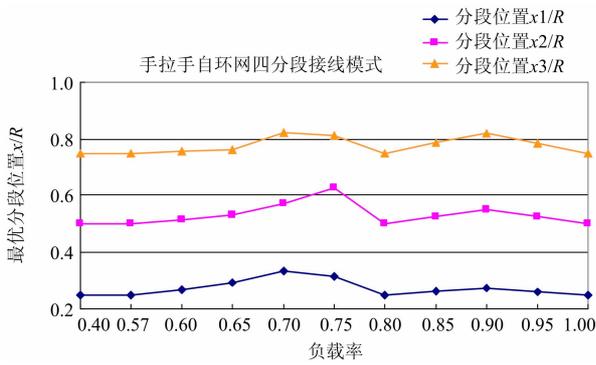
负载率 α	最优分段位置 x_1/R	最优分段位置 x_2/R	最优分段位置 x_3/R
≤57%	0.250	0.500	0.750
60%	0.267	0.513	0.758
65%	0.293	0.529	0.764
70%	0.334	0.571	0.824
75%	0.313	0.625	0.813
80%	0.250	0.500	0.750
85%	0.263	0.523	0.789
90%	0.274	0.548	0.821
95%	0.261	0.523	0.784
100%	0.250	0.500	0.750

注: 本文计算中, 参考文献[26], t_x 取 4 小时/次, t_l 取 1 次/小时, t_f 取 0.5 次/小时, γ 取 0.05 次/(km·年)。

从表 1 的结果来看, 对于手拉手四分段接线模式, 分段开关 1 的最优位置由负载率 ≤57% 时的 0.25 分点, 移动到负载率为 70% 时的 0.334 分点, 移动距离为线路总长的 8.4%, 其相对位移高达 33.4%。由此可见负载率对线路分段开关的最优位置有着显著的影响。特别是分段数较少时影响就越大。

为了能够直观地表示手拉手自环网四分段接线模式下线路最优分段位置随负载率变化而变化的情况, 对表 1 中的数据绘制曲线, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出: 随着线路负载率的不断提高, x_1/R 、 x_2/R 、 x_3/R 的值均有不同幅度的波动。当线路负载率 $\alpha \leq 57\%$ 时, 负载率的变化对线路最优分段没有影响, 此时分段开关处于最初将线路平均分段时的位置; 当 $57\% < \alpha \leq 80\%$ 时, 随着负载率的增大, 最优分段位置逐渐向联络开关侧(即线路末端)移动, 后移一定距离后, 若分段开关继续向联

图 2 不同负载率下 x/R 的变化曲线Fig. 2 Curve of x/R under different load rate

络开关侧移动, 则通过转供负荷来减少的停电损失将不足以抵偿由分段开关后移导致线路前段故障时增加的停电损失, 此时, 最优分段开关位置将向母线侧(即线路首端)移动; 当 $\alpha = 80\%$ 时, 分段开关位置回到初始平均分段时的位置; 当 $80\% < \alpha < 100\%$ 时, 随着负载率的增大, 分段开关位置的变化类似于上文所述情况; 当 $\alpha = 100\%$ 时, 分段开关回到初始位置, 此时相当于单辐射四分段接线模式, 联络线的转供能力为零。

3 不同负载率下的最优分段数研究

利用上文最优分段位置的研究结果, 可以进一步分析不同负载率下的最优分段数。首先假设某一接线模式在确定的分段数下, 分段开关已置于计及负载率的最优分段位置, 计算此时不同分段数的最小停电损失, 然后对该接线模式计算其不同分段数的投资等年值, 与相应的最小停电损失相加, 得到不同分段数的总费用, 绘制分段数—总费用曲线^[13-14], 则该曲线的最低点即为该接线模式经济性、可靠性俱佳的最优分段数方案。

3.1 计及负载率的年总费用模型

仍以手拉手自环网接线模式为例, 其年总费用数学模型为

$$NF = (K_{dk} + K_{vk})[(n-1)C_f + \frac{1}{2}C_l] + k \times ENS \quad (10)$$

式中: K_{dk} 为开关设备投资等年值系数; K_{vk} 为开关设备的年检修率; n 为线路的分段数; C_f 为分段开关的造价; C_l 为联络开关的造价; $k \times ENS$ 为计及负载率的停电损失费用。

3.2 求解不同负载率下最优分段数

利用上述数学模型, 本文对不同供电半径、产电比和负载率下的手拉手自环网接线模式最优分段数进行了计算, 结果如表 2~表 5 所示。

表 2 $R=2$ km 时手拉手自环网接线模式不同负载率下最优分段数

Table 2 Optimal section numbers of hand in hand self-looped connecting mode under different load rate when $R=2$ km

产电比	负载率	最优分段数
$k=10.0$	$\leq 100\%$	1
	$\leq 65\%$	1
$k=15.0$	70%~85%	2
	90%~100%	1
	$\leq 60\%$	1
$k=22.5$	65%~100%	2
	$\leq 100\%$	2

表 3 $R=5$ km 时手拉手自环网接线模式不同负载率下最优分段数

Table 3 Optimal section numbers of hand in hand self-looped connecting mode under different load rate when $R=5$ km

产电比	负载率	最优分段数
$k=10.0$	$\leq 100\%$	2
	$\leq 75\%$	2
$k=15.0$	80%~90%	3
	95%~100%	2
$k=22.5$	$\leq 100\%$	3
	$\leq 65\%$	3
$k=25.0$	70%~90%	4
	95%~100%	3

对比总结表 2~表 5 计算结果可知: 对于手拉手自环网接线模式, 供电半径越长, 最优分段数越多; 产电比越大, 对应的分段数越多; 在一定范围内, 负载率越大最优分段数越多, 但当负载率增大到一定程度时, 由于此时通过联络线转供的停电负荷已经很少, 转供能力很差, 依靠增加分段开关数来减少停电损失的做法得不偿失, 故最优分段数将有所减少。

表 4 $R=8$ km 时手拉手自环网接线模式不同负载率下最优分段数

Table 4 Optimal section numbers of hand in hand self-looped connecting mode under different load rate when $R=8$ km

产电比	负载率	最优分段数
$k=10.0$	$\leq 75\%$	2
	80%~90%	3
	95%~100%	2
$k=15.0$	$\leq 100\%$	3
	$\leq 80\%$	3
$k=22.5$	85%~100%	4
	$\leq 100\%$	4

表 5 R=12 km 时手拉手自环网接线模式不同
负载率下最优分段数

Table 5 Optimal section numbers of hand in hand self-looped
connecting mode under different load rate when R=12 km

产电比	负载率	最优分段数
k=10.0	≤70%	3
	75%~90%	4
	95%~100%	3
k=15.0	≤100%	4
k=22.5	≤80%	4
	85%~100%	5
k=25.0	≤100%	5

注：本文计算中，参考文献[26]， t_c 取 4 小时/次， t_f 取 1 次/小时， t_r 取 0.5 次/小时， γ 取 0.05 次/(km·年)， K_{sk} 取值 0.117， K_{vk} 取值 0.03， C_f 与 C_l 造价均取 1.8 万元/台。

4 结论

1) 计及线路负载率的影响，对线路最优分段位置与最优分段数进行研究，建立了科学的、符合实际的线路最优分段计算模型，分析与计算结果可为电网规划建设提供有实用价值的参考和借鉴。

2) 对于手拉手自环网接线模式，负载率较小时，最优分段开关位置与负载率无关；随着负载率的增大，分段开关位置对负载率的变化越来越敏感，其变化趋势大致为先逐渐向联络开关侧移动而后慢慢向母线侧靠近；当 $80\% < \alpha < 100\%$ ，负载率的变化对靠近母线侧的分段开关最优分段的影响变得很小；最后当负载率为 100% 时，联络线的转供能力为零，线路相当于单辐射接线。

3) 线路的最优分段数与负载率密切相关。对于手拉手自环网接线模式，在一定范围内，负载率越大，线路的最优分段数越多；当负载率增加到一定程度时，由于此时联络线转供能力很小，靠增加投资改造配电线路的方法来减少缺供电量得不偿失，丧失了经济性，则此时线路分段数应减少。

参考文献

[1] 朴在林, 孟晓芳. 农村电力网规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[2] 陈拥军, 姜宪. 农村电网规划与设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 55-64.

[3] 盛万兴, 宋晓辉, 张莲瑛, 等. 新农村典型供电模式[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 30-79.

[4] 王巍. 城市配电网接线模式的技术经济分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

WANG Wei. Study on the technical and economical characters of urban distribution network connecting modes[D]. Beijing: North China Electric Power

University, 2008.

[5] 刘健, 段璟靓. 配电网极限线损分析及降损措施优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 27-35.

LIU Jian, DUAN Jingjing. Line loss limitation analysis and optimal planning of loss reduction for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 27-35.

[6] 樊丽娜, 许跃进. 农村中压配电网电压等级的优化选择[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 102-105.

FAN Lina, XU Yuejin. Optimized selection of voltage level in rural medium-voltage power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 102-105.

[7] 柳占杰, 许跃进. 基于电压制式的电网最优供电半径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 87-91, 101.

LIU Zhanjie, XU Yuejin. Research on the optimal grid radius based on standard voltage[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 87-91, 101.

[8] 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[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 44-49.

GE Shaoyun, LI Jianfang, ZHANG Baogui. Optimal configuration of sectional switches in distribution network based on bisection method[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 44-49.

[9] 王赛一, 王成山. 配电网中辐射线路的最优分段处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 50-54.

WANG Saiyi, WANG Chengshan. Optimal sectioned switches placements of radial lines in distribution network systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 50-54.

[10] 张国良. 基于最优分段的配电网接线模式研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.

ZHANG Guoliang. Study on the connection modes based on optimal section of urban mid-voltage distribution system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.

[11] 张波. 金华市婺城新区 10 kV 配电网接线模式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

ZHANG Bo. Study on the connection modes of 10 kV distribution network of Wucheng new bureau in Jinhua[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

[12] 王娟. 农村中压配电网典型接线模式的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.

WANG Juan. Research on the typical connection modes of rural mid-voltage grid[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008.

[13] 葛少云, 张国良, 申刚, 等. 中压配电网各种接线模式的最优分段[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 87-91.

- GE Shaoyun, ZHANG Guoliang, SHEN Gang, et al. Optional sectioning of connection modes in medium voltage distribution system[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 87-91.
- [14] 耿光飞, 唐巍. 农村停电损失估算方法研究[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(6): 91-94.
- GENG Guangfei, TANG Wei. Research on estimation methods of power outage network in rural power network[J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(6): 91-94.
- [15] 朱国防, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网电源侧故障下大范围负荷转移优化策略及实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 73-77.
- ZHU Guofang, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. Wide range of load transfer optimization strategy and its implementation method for the busbar voltage loss in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 73-77.
- [16] 熊文, 武鹏, 余浩斌. 基于负荷测录系统的配电网状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 84-87, 93.
- XIONG Wen, WU Peng, YU Haobin. State estimation of distribution network by the load monitor system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 84-87, 93.
- [17] 李明浩. 10 kV 架空配电网接线方式可靠性和经济性对比分析[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2006, 11(1): 1-6.
- LI Minghao. Analysis of reliability and economics of 10 kV distribution system connection mode[J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2006, 11(1): 1-6.
- [18] 殷德聪, 许跃进, 吴昊, 等. 基于最佳配置负载率的配电变压器优化与配置[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 145-149.
- YIN Decong, XU Yuejin, WU Hao, et al. Distribution transformer capacity optimization and allocation based on optimum allocated load rate[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(19): 145-149.
- [19] 陈庭记, 程浩忠, 何明, 等. 城市中压配电网接线模式研究[J]. 电网技术, 2000, 24(9): 35-38.
- CHEN Tingji, CHENG Haozhong, HE Ming, et al. Research on connection modes of urban middle voltage distribution networks[J]. Power System Technology, 2000, 24(9): 35-38.
- [20] 姚莉娜, 张军利, 刘华. 城市中压配电网典型接线方式分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 26-29.
- YAO Lina, ZHANG Junli, LIU Hua. Research on connecting modes of urban mid-voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 26-29.
- [21] 周莉梅, 范明天. 城市电网用户停电损失估算及评价方法研究[J]. 中国电力, 2006, 39(7): 28-31.
- ZHOU Limei, FAN Mingtian. Research on customer outage cost assessment and its evaluation method in urban electric power network[J]. Electric Power, 2006, 39(7): 28-31.
- [22] 侯春生. 浅谈银川地区配网线路的最优分段数[J]. 宁夏电力, 2011, 26(4): 87-89.
- HOU Chunsheng. Analysis on the power line optimization subsection of the distribution network in Yinchuan area[J]. Ningxia Electric Power, 2011, 26(4): 87-89.
- [23] IGNACIO R R, TOSE B A. Reliability and costs optimization for distribution networks expansion using an evolutionary algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(1): 111-118.
- [24] 王成山, 王赛一, 葛少云, 等. 中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 34-39.
- WANG Chengshan, WANG Saiyi, GE Shaoyun, et al. Economy and reliability analysis of different connection modes in MV distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 34-39.
- [25] 杨建, 许跃进, 吴昊, 等. 不同配变安装方式下农村低压电网经济供电半径研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 190-195.
- YANG Jian, XU Yuejin, WU Hao, et al. Economic power supply radius under different distribution transformer installation in rural low-voltage network[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 190-195.
- [26] 刘振亚. 国家电网公司变电工程典型造价[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

收稿日期: 2014-11-21; 修回日期: 2015-04-20

作者简介:

熊星星(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统规划与设计研究; E-mail: xingxingxiong@163.com

许跃进(1958-), 男, 教授, 主要从事电力系统运行、控制与规划研究。

(编辑 葛艳娜)