

不同网络结构及可靠性要求环境下 FTU 的最优配置

郑玲玲¹, 王铮², 杨丽徙¹

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网河南省电力公司信息通信公司, 河南 郑州 450052)

摘要: 为了解决配电网馈线自动化中不同网络结构、不同供电可靠性需求下配电终端的优化配置问题, 对配网供电可靠性与馈线自动化终端配置的敏感性进行了分析。采用故障模式与后果分析法, 提出了基于配网可靠性发展目标的配电终端优化配置方法。在综合考虑技术性、经济性、可拓展性的基础上, 分析了无配电终端、全“二遥”终端配置和“二遥”、“三遥”终端混合配置三种模式下, 配电网典型结构的线路故障停电时间和配电网平均供电可用率; 得到了配电网平均供电可用率和配电终端优化配置的通用计算方法。算例验证了研究方法的合理性和实用性。

关键词: “二遥”终端; “三遥”终端; 优化配置; 网络结构; 供电可靠性

FTU optimal configuration under different distribution network structures and reliability requirement

ZHENG Lingling¹, WANG Zheng², YANG Lixi¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company Information & Telecommunication Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: To optimize the allocation of remote terminal unit of distribution automation system, which meets the requirement of different network structures and different power supply reliability, the sensitivity between power supply reliability and the number of feeder terminal units (FTUs) is analyzed. The method of middle voltage distribution network FTUs optimal configuration are proposed based on the consequences of failure mode and effect analysis. On the basis of considering technical, economic and scalability factors, line failure outage time and average service available index (ASAI) are analyzed in three cases: line without configuration of terminal unit, line with configuration of monitoring terminal unit only and line with mixed configuration of monitoring terminal unit and controlling terminal unit. The generic expression of ASAI is deduced, as well as the number of FTUs. Example demonstrates the rationality and practicality of research methods.

Key words: monitoring terminal unit; controlling terminal unit; optimal configuration; network structures; power supply reliability

中图分类号: TM72

文章编号: 1674-3415(2015)24-0069-06

0 引言

作为配电自动化的核心内容之一, 馈线自动化通过在开关设备或环网单元上配置具有“二遥”(遥信和遥测)或“三遥”(遥信、遥测和遥控)功能的配电终端, 能够实现对开关设备和环网单元的监测和控制, 并完成故障的快速定位、隔离和转供^[1-3], 是提高配电网可靠性的重要手段^[4-5]。

配电终端配置方案的优劣, 对于配电网的供电可靠性水平和配电网的投资水平有着重要的影响。目前, 配电开关优化配置的研究工作通常基于经济

性或可靠性建立目标函数, 采用遗传算法^[6]、动态规划法^[7]、故障模拟法^[8]等方法寻找最优解, 确定开关改造和终端配置的最优位置。现有研究很少着眼于配电网的阶段性发展需求, 仅文献[9-10]从投入产出比和配电网可靠性两个角度, 对“二遥”和“三遥”终端的数量配置问题进行了研究。随着我国电力市场的发展和配电自动化建设工作的深入, 针对配网自动化投资大、要求高的特点, 开展兼顾技术性、经济性和可拓展性的配电终端优化配置方法的研究很有必要。

本文从供电可靠性的角度出发, 提出了配电终

端优化配置的原则和整体思路,通过研究中压配电网典型结构供电可靠性与配电终端数量的关系,提出了基于配网可靠性发展目标的配电终端优化配置方法,旨在有效解决不同网络结构下,配电自动化不同发展阶段的配电终端如何配置、循序发展的问题。

1 配电终端优化配置的原则和思路

1.1 优化配置原则

配电终端的配置应结合配电网网架的基本情况和配电网供电可靠性发展目标,分阶段、有计划地规划实施,其优化配置应满足以下要求:

(1) 技术性要求。选取平均供电可用率(Average Service Available Index, ASAI)为技术性指标。配电终端在不同阶段的配置方案应满足配电网在该阶段的供电可靠性目标 $ASAI_g$, 即

$$ASAI \geq ASAI_g \quad (1)$$

(2) 经济性要求。根据配电自动化技术导则和配电自动化建设与改造标准化设计技术规定,具有“二遥”功能的配电终端对一次设备和通信通道要求较低,一旦线路上要配置“三遥”终端,除需考虑相应一次设备的改造投资外,还应考虑光纤通信网络的建设,与仅配置“二遥”终端的情形相比较,两者将是一笔巨大的投资。

为保证经济性,在满足可靠性要求的前提下,可以优先配置“二遥”终端,当所有开关设备均配置“二遥”终端仍不能满足供电可靠性要求时,才考虑改造为“三遥”终端。

(3) 可拓展性要求。为了避免无序建设、重复建设、大拆大建等现象,配电终端的配置应考虑其可拓展性要求,应尽可能沿线路均匀分布,保证每个分段上负荷水平相当。当配电网供电可靠性目标提高时,有一个合理的拓展方案。

1.2 配电终端优化配置的整体思路

中压配电网的网络拓扑结构,决定了其内在的、本质的特性^[11-13]。对于已知网络结构,给定所需计算参数,可以近似估算出该网络结构下平均供电可用率基本值 $ASAI_0$ 、全部安装“二遥”终端时的平均供电可用率 $ASAI_2$ 以及全部安装“三遥”终端时的平均供电可用率 $ASAI_3$ 。平均供电可用率的取值范围为(0, 1), 上述三种情形将配电网平均供电可用率划分为四个区间 $I_1(0, ASAI_0]$ 、 $I_2(ASAI_0, ASAI_2]$ 、 $I_3(ASAI_2, ASAI_3)$ 和 $I_4[ASAI_3, 1)$ 。

不同的配电网平均供电可用率目标 $ASAI_g$ 区间,对应于不同的配电终端的规划配置方案。配电终端规划方法如图 1 所示。

采用配电网集中式故障处理方法^[14],根据故障后健全区段有无转供电源,将配电网分为辐射式网络结构、环式网络结构(包括手拉手环式网络结构、多分段多联络网络结构等)两种典型结构进行分析。

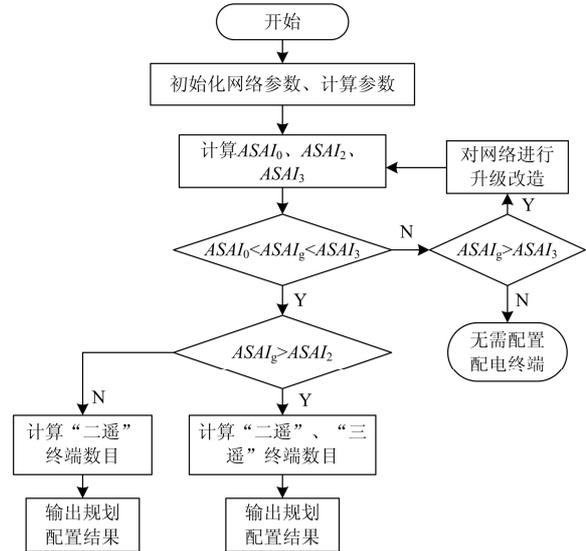


图 1 配电终端规划配置流程

Fig. 1 Distribution terminal planning configuration process

2 无配电终端的配电网可靠性分析

对于网络中任意一条线路 i , 假设负荷和开关设备沿线路均匀分布^[15], 如图 2 所示。

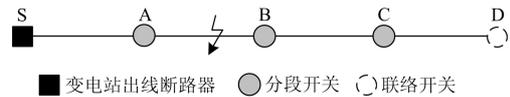


图 2 不含配电终端的线路

Fig. 2 Feeder without terminal unit

采用故障模式后果分析法^[16],以 AB 段发生永久性故障为例,说明两种典型结构下配电网故障处理方法。

2.1 辐射式网络结构

AB 段故障后,变电站出线断路器跳闸于故障电流,人工巡线确定故障位置,跳开故障点上游相邻开关 A,完成故障隔离;合上变电站出线开关,恢复对上游健全区段的供电。线路 i 上故障引起的用户累计停电时间为

$$T_i = \frac{m_i L_i \lambda}{N_i} \left[\frac{N_i - 1}{2} (t_2 + t_3) + \frac{N_i + 1}{2} (t_1 + t_2 + t_3) \right] \quad (2)$$

其中,与网络结构相关的参数有线路分段数 N_i 、线路上用户数 m_i 、线路长度 L_i ;与故障处理相关的参数有线路故障率 λ 、线路故障平均修复时间 t_1 、线路故障巡查时间 t_2 和倒闸操作时间 t_3 。

2.2 环式网络结构

AB段故障后, 变电站出线断路器跳闸于故障电流, 人工巡线确定故障位置, 跳开故障点相邻开关 A 和 B, 完成故障隔离; 合上变电站出线开关和下游联络开关, 恢复对故障点上游和下游健全区段的供电。线路 i 上故障引起的用户累计停电时间为

$$T_i = \frac{m_i L_i \lambda}{N_i} [(N_i - 1)(t_2 + t_3) + (t_1 + t_2 + t_3)] \quad (3)$$

2.3 配电网平均供电可用率

故障引起配电网的平均供电可用率 AF 为

$$AF = 1 - \frac{\sum_i T_i}{8760 \times \sum_i m_i} \quad (4)$$

它与配电网平均供电可用率 $ASAI$ 的关系为

$$ASAI = 1 - \frac{1 - AF}{\gamma} \quad (5)$$

式中, γ 为故障停电户数占总停电户时数的百分比, 通常基于历史统计数据将其设定为常数。

定义参数 α 为配电线路转供系数, 若故障区段可通过备用电源恢复供电, α 取值为 0, 否则取值为 1。综合式(1)~式(5), 得到配电网平均供电可用率的通用表达式为

$$ASAI_0 = 1 - \frac{\sum_i \frac{m_i L_i \lambda}{N_i} \left[\frac{N_i - 1}{1 + \alpha} (t_2 + t_3) + (1 - \alpha) \frac{1 - N_i}{2} (t_1 + t_2 + t_3) \right]}{8760 \gamma \sum_i m_i} \quad (6)$$

3 实现“二遥”的配电网可靠性分析

当配电网供电可靠性目标 $ASAI_g$ 位于区间 $I_2(ASAI_0, ASAI_2)$ 时, 线路上应配置“二遥”终端。对于网络中任意一条线路 i , h 台“二遥”终端如图 3 所示沿线路均匀分布, 联络开关全部配置“二遥”终端。

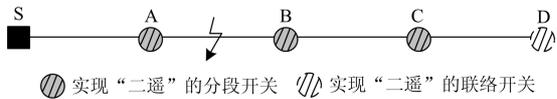


图 3 全“二遥”配置的线路

Fig. 3 Feeder with monitoring terminal unit

全“二遥”配置的配电网故障处理结果与无配电网终端的故障处理结果类似, 但配电网主站通过收集“二遥”终端上传的故障信息, 缩短了故障巡查时间, 近似认为 $t_2=0$ 。得到全“二遥”终端配置时, 配电网平均供电可用率为

$$ASAI = 1 - \frac{\sum_i \frac{m_i L_i \lambda}{h+1} \left[\frac{h}{1+\alpha} t_3 + (1+\alpha) \frac{h}{2} (t_1 + t_3) \right]}{8760 \gamma \sum_i m_i} \quad (7)$$

每条线路上“二遥”终端数 h (不包括联络开关) 应满足下式约束, 取最小整数:

$$h \geq \frac{L_i \lambda t_1}{8760 \gamma (1+\alpha) (1-ASAI_g) - L_i \lambda [t_3 + \alpha(t_1 + t_3)]} - 1 \quad (8)$$

特殊情况下, 当所有开关均配置“二遥”终端时, 配电网平均供电可用率的通用表达式为

$$ASAI_2 = 1 - \frac{\sum_i \frac{m_i L_i \lambda}{N_i} \left[\frac{N_i - 1}{1+\alpha} t_3 + (1-\alpha) \frac{1-N_i}{2} (t_1 + t_3) \right]}{8760 \gamma \sum_i m_i} \quad (9)$$

4 实现“三遥”的配电网可靠性分析

当配电网供电可靠性目标 $ASAI_g$ 位于区间 $I_3(ASAI_2, ASAI_3)$ 时, 采用“二遥”、“三遥”终端混合配置的方式。对于网络中任意一条线路 i , k_3 台“三遥”和 h 台“二遥”终端如图 4 所示沿线路均匀分布, 联络开关全部配置“三遥”终端。

定义两个相邻“三遥”终端安装点之间的线路为“最小三遥区段”, 对于安装有 k_3 台“三遥”终端的线路, 最小三遥区段数为 k_3+1 , 每个最小三遥区段内“二遥”终端数为 $k_2=N_i/(k_3+1)-1$ 。例如, 图 4 中“三遥”终端 B 将线路分隔为两个最小三遥区段 SB 和 BD, 每个最小三遥分段内又分别有 1 台“二遥”终端 A 和 C。

对于安装“三遥”终端的情况, 近似认为故障巡查时间 $t_2=0$, 倒闸操作时间 $t_3=0$ 。以 AB 段发生永久性故障为例, 说明“三遥”和“二遥”终端混合配置时, 两种典型结构下配电网故障处理方法。

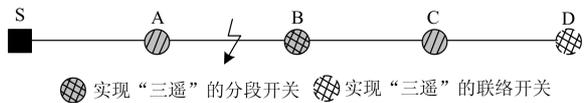


图 4 “二遥”、“三遥”混合配置的线路

Fig. 4 Feeder with monitoring and controlling terminal unit

4.1 辐射式网络结构

AB 段故障后, 变电站出线断路器跳闸于故障电流, 配电网主站根据配电网终端上传的故障信息, 确定故障位于 AB 段内, 判断故障所在最小三遥分段上游断路器 S 已经跳闸, 无需遥控操作; 通过人工操作, 跳开开关 A, 将故障隔离在最小范围; 合上变电站出线开关, 恢复对 SA 段的供电。线路 i 上故障引起的用户累计停电时间为

$$T_i = m_i L_i \lambda \left[\frac{k_3 + 2}{2(k_3 + 1)} (t_1 + t_3) - \frac{k_2}{2N_i} t_1 \right] \quad (10)$$

4.2 环式网络结构

AB 段故障后，变电站出线断路器跳闸于故障电流，配电主站根据配电终端上传的故障信息，确定故障位于 AB 段内，遥控跳开故障所在最小三遥区段 SB 下游开关 B，合上联络开关 D，将故障隔离在最小三遥区段；再通过人工操作，跳开开关 A，将故障隔离在最小范围；合上变电站出线开关，恢复对 SA 段的供电。线路 i 上故障引起的用户累计停电时间为

$$T_i = m_i L_i \lambda \left[\frac{1}{k_3 + 1} (t_1 + t_3) - \frac{k_2}{N_i} t_1 \right] \quad (11)$$

综合式(4)~式(5)、式(10)~式(11)，引入参数 α ，得到“二遥”和“三遥”终端混合配置时，配电网平均供电可用率的通用表达式为

$$ASAI = 1 - \frac{\sum_i m_i L_i \lambda \left[\left(1 + \frac{\alpha k_3}{2}\right) \frac{1}{k_3 + 1} (t_1 + t_3) - \frac{k_2}{(1 + \alpha) N_i} t_1 \right]}{8760 \gamma \sum_i m_i} \quad (12)$$

每条线路上“三遥”终端数 k_3 (不包括联络开关) 应满足下式，取最小整数：

$$k_3 \geq \frac{L_i \lambda t_3}{8760 \gamma (1 + \alpha) (1 - ASAI_g) - L_i \lambda [t_1 / N_i + \alpha (t_1 + t_3)]} - 1 \quad (13)$$

每条线路上“二遥”终端数为

$$h = N_i - k_3 - 1 \quad (14)$$

特殊地，当所有开关均配置“三遥”终端时，配电网平均供电可用率的通用表达式为

$$ASAI_3 = 1 - \frac{\sum_i m_i L_i \lambda \left(1 + \alpha \frac{N_i - 1}{2}\right) t_1}{8760 \gamma \sum_i m_i} \quad (15)$$

5 实例分析

为了验证本文提出方法的合理性和正确性，对国内中部某地级市市区 A 类供电区域配电网中的配电线路进行配电终端的优化配置。该配电网的网络结构和用户分布如图 5 所示。该配电网沿线分布有公用变、专用变和分支线，其中专用变和分支线经断路器引出，因此它们故障后不会引起主干线路上的用户停电。

为了计算该配电网可靠性指标，将该配电网分解为三条配电线路 L1~L3 进行计算，三条配电线路包含的区域如图 5 中虚线所示，其中 L2 和 L3 重复包含了开关 S2、开关 3 和开关 4 围成的区域，计算

整个配电网可靠性时需减掉重复计算的部分。为简化计算，将主干线路上的每个负荷引出点或分支引出点视为一个等效用户。每条线路的参数如表 1 所示。设定供电可靠性计算参数^[17]见表 2。

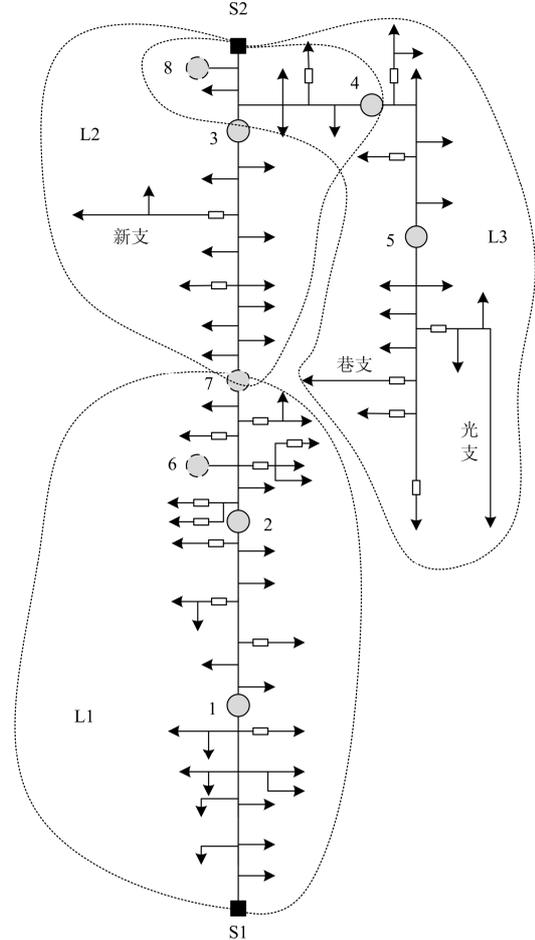


图 5 某实际配电网网络结构图

Fig. 5 An actual distribution network structure

表 1 配电线路参数

Table 1 Distribution line parameters

线路名称	L1	L2	L3	新支	巷支	光支
线路长度/m	2 043	1 098	1 706	220	64	346
用户个数	22	15	18	1	1	1
线路分段数	3	2	3	1	1	1

表 2 可靠性计算参数

Table 2 Reliability calculation parameters

γ /%	λ /(次/km·a)	t_1 /h	t_2 /h	t_3 /h
80	0.1	5	1	1

采用 2~4 节的计算模型，得到配电网三条线路以及整个配电网在不同终端配置情况下的配电网平均供电可用率，见表 3。

表 3 线路和配电网的平均供电可用率

类型	a	$ASAI_0/\%$	$ASAI_2/\%$	$ASAI_3/\%$
L1	0	99.991 1	99.993 5	99.995 9
L2	0	99.992 8	99.994 4	99.996 0
L3	1	99.984 3	99.987 2	99.990 1
配电网	-	99.989 3	99.991 7	99.994 6

按照该地区配电网发展要求, 该配电网平均供电可用率目标值如表 4 所示。

表 4 该地区供电可靠性目标值

年份	2010	2020	2025
$ASAI_g/\%$	99.983	99.990	99.994

根据不同目标规划年 $ASAI_g$ 所在区间, 确定终端配置方案; 再对每条线路上配电终端的数目进行初算, 结果如表 5 所示。

表 5 终端配置数目初算

$ASAI_g$ 所属区间	终端配置方案	终端配置数目初算			
		类型	L1	L2	L3
$ASAI_{g2010} \in I_1$	(1) 无需配置配电终端	-	-	-	-
$ASAI_{g2020} \in I_2$	(2) 仅配置“二遥”终端	$h \geq$	-	-	2
$ASAI_{g2025} \in I_3$	(3) 需配置“三遥”终端	$k_3 \geq$	1.5	1	2

其中, “-”表示无需配置该类型的配电终端; 若 $ASAI_g > ASAI_2$, 直接取 $k_2 = N_i - 1$; 若 $ASAI_g > ASAI_3$, 直接取 $k_3 = N_i - 1$ 。根据经济性原则, 每条线路上“二遥”或“三遥”终端数目取不小于初算数据的最小整数。

对上述方案进行可靠性验证, 得到方案(2)下配电网 $ASAI=99.9912\% > ASAI_{g2020}$, 方案(3)下配电网 $ASAI=99.9943\% > ASAI_{g2025}$, 满足目标规划年的技术性要求。由于配电网的平均供电可用率反映的是三条线路供电可靠性的综合水平, 若每条线路的供电可用率达标, 则整个网络的平均供电可用率必能达标。反过来, 在整个网络的平均供电可用率达标的情况下, 容许个别线路的供电可用率低于目标值。

该配电网阶段性配电终端优化配置的结果为: 2010年前无需进行配电终端的配置; 到2020年在开关3、开关4、开关5和开关8处配置“二遥”终端; 到2025年, 在所有开关处配置“三遥”终端, 在此不再单独作图表示。

该方法采取优先配置“二遥”终端, 在全“二遥”终端的基础上进行“三遥”终端改造的规划原则, 可以在保证经济性和可靠性的同时, 有效避免

重复建设和大拆大建, 在工程应用中具有良好的可拓展性。

6 结论

通过对中压配电网供电可靠性与配电终端数量进行敏感性分析, 提出了满足不同网络结构以及目标规划年可靠性要求的配电终端优化配置的实用化方法。该方法综合考虑了不同网络结构对配电网供电可靠性的影响以及馈线自动化的阶段性发展需求, 配置方案具有良好的拓展性。算例分析证明了方法的合理性和实用性, 为中压配电网配电终端的优化配置提供了依据。

参考文献

- [1] 孙洁, 王增平, 王英男, 等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 56-62.
SUN Jie, WANG Zengping, WANG Yingnan, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 56-62.
- [2] HAN G Z, XU B Y, SUONAN J L, et al. IEC 61850-based feeder terminal unit modeling and mapping to IEC 60870-5-104[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2046-2053.
- [3] 李辰雷, 卫志农, 韩连山. 序优化理论在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 41-48.
LI Chenlei, WEI Zhinong, HAN Lianshan. Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 41-48.
- [4] 王宗耀, 苏浩益. 配网自动化系统可靠性成本效益分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 98-103.
WANG Zongyao, SU Haoyi. Cost-benefit analysis model for reliability of distribution network automation system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 98-103.
- [5] 李练兵, 张秀云, 王志华, 等. 故障树和 BAM 神经网络在光伏并网故障诊断中的应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 248-254.
LI Lianbing, ZHANG Xiuyun, WANG Zhihua, et al. Fault diagnosis in solar photovoltaic grid-connected power system based on fault tree and BAM neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 248-254.
- [6] SHAMMAH A A E, EI-ELA A A, AZMY A M. Optimal location of remote terminal units in distribution systems using genetic algorithm[J]. Electric Power Systems

- Research, 2012, 89: 165-170.
- [7] 王天华, 王平洋, 范明天, 等. 用 0-1 规划求解馈线自动化规划问题[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 54-58.
WANG Tianhua, WANG Pingyang, FAN Mingtian, et al. Optimal feeder automation planning using binary programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 54-58.
- [8] 李瞳, 张建华, 刘自发, 等. 配电网开关改造最优规划方案[J]. 现代电力, 2008, 25(6): 35-38.
LI Tong, ZHANG Jianhua, LIU Zifa, et al. Optimal programming scheme for switch alteration in distribution systems[J]. Modern Electric Power, 2008, 25(6): 35-38.
- [9] 刘健, 程红丽, 张志华. 配电自动化系统中配电终端配置数量规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 44-50.
LIU Jian, CHENG Hongli, ZHANG Zhihua. Planning of terminal unit amount in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 44-50.
- [10] 刘健, 林涛, 赵江河, 等. 面向供电可靠性的配电自动化系统规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 52-60.
LIU Jian, LIN Tao, ZHAO Jianghe, et al. Specific planning of distribution automation systems based on the requirement of service reliability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 52-60.
- [11] 杨丽徙, 曾新梅, 方强华, 等. 基于抗毁性分析的中压配电网拓扑结构[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 65-69.
YANG Lixi, ZENG Xinmei, FANG Qianghua, et al. Medium voltage distribution network topology based on survivability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 65-69.
- [12] 宋若晨, 徐文进, 杨光, 等. 基于环间联络和配电自动化的配电网高可靠性设计方案[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1966-1972.
SONG Ruochen, XU Wenjin, YANG Guang, et al. A design scheme of high-reliable distribution network based on tie line between ring-shaped distribution networks and distribution automation[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1966-1972.
- [13] 尹项根, 陈庆前, 王博, 等. 基于四层集合模型的复杂电力系统脆弱性评估体系[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 225-233.
YIN Xianggen, CHEN Qingqian, WANG Bo, et al. Vulnerability assessment system of complicated power system based on four-level set model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 225-233.
- [14] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 继电保护与配电自动化配合的配电网故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 53-57, 113.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Relay protection and distribution automation based fault allocation and restoration for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 53-57, 113.
- [15] 苏浩益, 贺伟明, 吴小勇, 等. 基于云理论的配电自动化系统可靠性成本效益分析模型[J]. 广东电力, 2014, 27(8): 102-108.
SU Haoyi, HE Weiming, WU Xiaoyong, et al. Cost-benefit analysis model for distribution automation system reliability based on cloud theory[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(8): 102-108.
- [16] 李历波, 王玉瑾, 王主丁, 等. 规划态中压配网供电可靠性评估模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 84-88.
LI Libo, WANG Yujin, WANG Zhuding, et al. Two reliability evaluation models for medium voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(3): 84-88.
- [17] 郭永基. 电力系统可靠性[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 132-134.

收稿日期: 2015-03-01; 修回日期: 2015-04-28

作者简介:

郑玲玲(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网运行与规划; E-mail: cheshenmei@126.com

王 铮(1982-), 男, 硕士, 主要从事电力系统信息通信运行与管理工作; E-mail: 1280787633@qq.com

杨丽徙(1956-), 女, 博士, 教授, 主要从事电力系统规划与可靠性的研究与教学工作。E-mail: zdyanglixixi@zzu.edu.cn

(编辑 魏小丽)