

基于多系统交互的电缆线路同期线损率异常分析

陈佳瑜, 夏 澍, 施 灵, 许鸣吉

(国网上海市电力公司市北供电公司, 上海 200072)

摘要: 10 kV 分线线损率异常原因多样, 分析排查手段有局限性。通过变电站、线路和台区三个区段之间的数据采集与监视 (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)、电能量采集和用电信息采集等多系统交互, 提出两种 10 kV 电缆线路同期线损率异常分析方法。该方法作为排查手段, 分别在未配置和已配置配电网自动化的情形下实现, 在同期线损计算“T+2”的原则下可相互配合。所提方法在提升线路合理率的同时, 有效缩短分析时长, 提高分析效率。最后以案例实施验证了两种方法的有效性。

关键词: 10 kV 分线; 电缆线路; 线损率; 同期系统; 多系统交互; 配电网自动化

Analysis of abnormal line loss rate of cable line based on multi-system interaction

CHEN Jiayu, XIA Shu, SHI Ling, XU Mingji

(Shibei Electricity Supply Company, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200072, China)

Abstract: There are various reasons for the abnormal line loss rate of the 10 kV sub-line, and the analysis and troubleshooting methods are limited. Through multi-system interaction between the three sections of substation, line, and station area, data acquisition and monitoring (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA), electric energy acquisition, and electricity consumption information acquisition, two type analysis methods of 10 kV abnormal line loss rate of cable line are proposed. The two methods are used as investigation methods, which can be implemented with and without distribution network automation, and can cooperate with each other under the principle of “T+2” in the calculation of line loss at the same time. The proposed method can effectively shorten the analysis time and improve the analysis efficiency while improving the reasonable rate of the line. Finally, a case is used to verify the effectiveness of the two methods.

Key words: 10 kV sub-line; cable line; line loss rate; synchronization system; multi-system interaction; distribution network automation

0 引言

配电网线损率是供电企业一项重要的经济技术指标, 直接反映企业管理水平及经济效益^[1-3]。

在“分区、分压、分线和分台区”的四分线损管理模式下, 10 kV分线线损率计算数据庞大, 系统来源广泛, 不合理原因繁杂, 涉及供电侧关

口、拓扑结构和售电侧关口等多个方面。在国网公司大力推行同期线损^[4-5]管理的背景下,快速高效地分析出10 kV分线线路线损率异常的原因显得尤为重要。

文献[6]从统计线损中计量装置的误差分析了对线损数据准确性的影响;文献[7]提出了考虑馈线聚类特性的10 kV配电网线损率测段模型;文献[8]通过基于熵权法的灰色关联筛选出损耗高的10 kV线路,并实施节能改造,降低线损率。以上文献提出了降低10 kV配电网线损率的方法,但偏重于理论分析,缺乏实际分析应用。文献[9]基于多系统之间的信息交互,针对专用线路和公共线路,分别提出10 kV同期线损分析步骤,但未对电缆线路进行具体分析;文献[10]在信息化手段应用的背景下,研究线损分析在配电网自动化中的应用,但未提出具体分析方法;文献[11]基于配电网自动化的应用,提出了线损分析的设计思路和方案可行性,但着重于现场无功补偿装置的安装;文献[12-13]从算法角度,优化配电网异常线损率分析,但缺乏实用性。

针对以上不足,本文提出两种基于变电站、线路和台区三个区段之间同期线损、SCADA^[14]、电能量采集^[15]、GIS^[16]、PMS2.0^[17]和用电信息采集^[18]等多系统交互的10 kV电缆线路线损率异常分析方法。在配电网自动化系统^[19]未全面有效覆盖的情况下,两种方法从电缆线路拓扑结构出发,根据有无配电网自动化系统,分别给出不同的分析方法。方法针对10 kV线路条数众多的问题,可相互配合,操作性强,可有效提高线损率异常分析效率,广泛用于降损工作。

1 线损率异常因素

10 kV分线线损率计算公式^[20-22]为

$$\begin{cases} \mu_{xs} = \frac{W_i - W_o}{W_i} \times 100\% \\ W_o = \sum_{j=1}^{N_k} W_j \end{cases} \quad (1)$$

式中, μ_{xs} 为线损率; W_i 为供电侧输入电量; W_o

为售电侧输出电量; W_j 和 N_k 分别为售电侧台区和用户的电量和总数。

目前,日线损率 $\mu_{xs} \in [0, 10\%]$,月线损率 $\mu_{xs} \in [0, 6\%]$,认为线路合理,本文以日线损率进行讨论。

10 kV电缆线路拓扑结构如图1所示^[23],为35 kV/110 kV变电站出线,通过电缆送至下级开关站、配电站、箱式变电站和高压用户等设备。

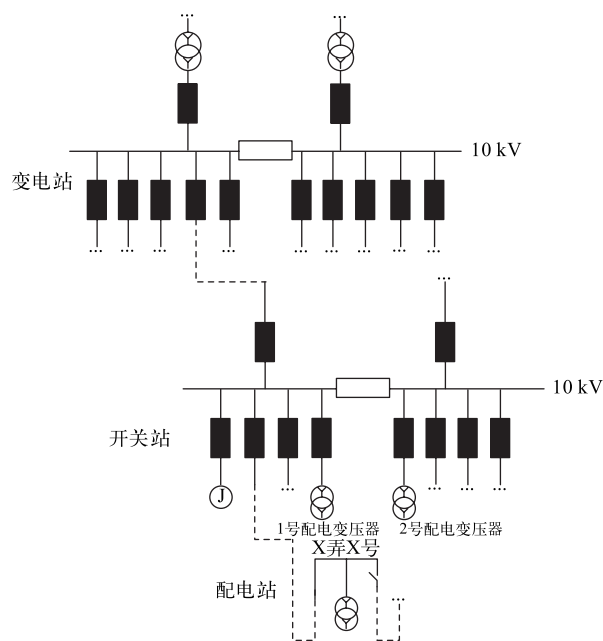


图1 10 kV 电缆线路拓扑结构

Fig. 1 10 kV cable line topology

从式(1)中可知,线损率计算只关注线路供电侧与售电侧的电量,不涉及中间拓扑环节。如原属于线路 n 的售电侧电量 W_{on} ,因拓扑关系出现异常,使其纳入线路 m 的售电侧电量计算,则不能通过线损率计算公式进行判断。只有线路从上至下级对应关系一致,才能保证线损率计算结果在合理范围内。若供电侧、售电侧及拓扑关联中任一因素出现异常,均会影响线路线损率,如计量流变相序接反、采集装置异常、线-变-台-表关系错误和台账信息重复等。

2 多系统数据交互

10 kV分线线损率计算在同期系统中实现,计算所需的所有数据均从各个源端系统推送至同

期。供电侧电量就是变电站出线电量，来源于电能信息采集系统，因用电信息采集与SCADA系统数据分别来源于10 kV分线计量和保护两组不同回路，该数据准确性可通过SCADA系统进行校验；拓扑图形来源于GIS，其中关联还涉及SG186、PMS2.0等系统；售电侧电量包含配电变压器电量、箱式变电站电量和高压用户电量，来源于用电信息采集系统，可通过该源端的历史电量数据进行校验。这些庞大的数据集集成于同期系统，实现线损率计算，并通过这些数据可以进行线损率异常分析。

通过变电站、线路和台区三个区段，实现多系统数据信息的交互，如图2所示。变电站对应母线平衡率，线路对应分线线损率，台区对应台区线损率。分解三个区段后，可对应进行问题分析。

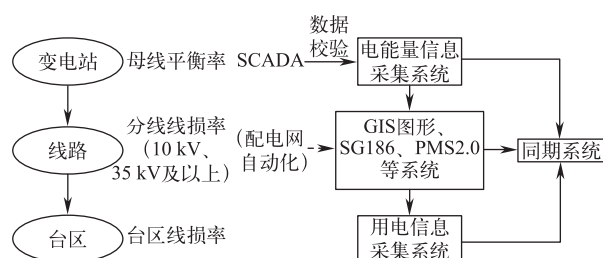


图2 多系统数据交互
Fig. 2 Multi-system data interaction

由图1可知，10 kV电缆线路供售电侧之间的拓扑关联涉及开关站、配电站和箱式变电站等。若线路未有效配置配电网自动化系统，则该线路所供开关站进出线电量信息无法获取，只能通过供电侧电量、售电侧电量和线损率计算结果进行分析，即为“自下而上”的分析方法，已知线损率不合理，再依次向上逐步核查原因；若线路已有效配置配电网自动化系统，则可获取线路所供开关站进出线电量信息，可以辅助分析连接线路供电侧与售电侧的数据正确性。同时因同期线损计算原则为“T+2”，即线损率两天后才计算，故通过配电网自动化系统能提前预判故障场景，加快问题发现处理的速度，即为“自下而上”的分析方法，已知各类电量数据，对预判线损率不

合理的线路进行分析。

3 线损率异常分析方法

下面针对未配置和已配置配电网自动化系统情形分别讨论线损率异常分析方法。

3.1 未配置配电网自动化系统情形

无配电网自动化系统情形下，采取“自下而上”的末端排查方式，对线损率异常线路进行原因核查，即对已发生线损率异常的线路查找原因。

线路A表示线损率异常线路，以日线损率 μ_A 为例进行讨论。

1) 对线路拓扑关联进行排查，若无异常，转步骤2)。

2) 对供电侧电量进行核查，利用SCADA系统与用电信息采集系统中数据进行对比。SCADA中线路A日平均电流 I_A ，日平均电压 U_A ，则可得A日电量为

$$W_{AS} = \sqrt{3} U_A I_A h \quad (2)$$

式中， U_A 为线电压； h 为时间，即24 h。

若 $W_{AS} > W_{iA}$ 或 $W_{AS} < W_{iA}$ ，则表示现场供电侧计量回路异常、用电信息采集系统中负荷缺失等；若 $W_{AS} = W_{iA}$ ，则表示供电侧电量无异常，转步骤3)。

3) 售电侧分量采集异常，对采集问题进行消缺；若采集正常，转步骤4)。

4) 从同期系统中获取台区线损率，在源端用电信息采集系统中获取售电侧各分量的历史数据，并进行比对，电量异常进行消缺。若无异常，转步骤5)。

5) 现场逐一核查售电侧分量铭牌、接线等是否正常。

根据 μ_A 的大小，可将不合理线路分为负损线路和正损线路。在拓扑关联正常的情况下，根据式(1)，针对负损线路，即 $W_{iA} < W_{OA}$ ，重点对供电侧进行问题排查；针对正损线路，即 $W_{iA} > W_{OA}$ ，重点对售电侧进行问题排查。

线损率异常分析流程如图3所示。

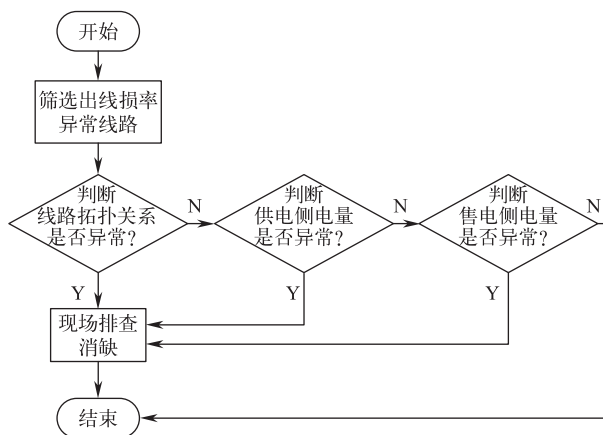


图3 无配电网自动化系统下线损率异常分析流程

Fig. 3 Offline loss rate abnormal analysis process without power grid automatic system

3.2 已配置配电网自动化系统情形

有配电网自动化系统情形下,采取“自下而上”的方式提前预判线损率不合理场景,即可根据拓扑关联中上下级之间功率差值提前判断异常原因,及时定位问题,并进行消缺。

由图1可知,10 kV电缆线路从变电站出来后依次送到下级开关站、配电站等。

由用电采集系统可获得某配电变压器/箱式变电站在 t 时刻的功率为

$$P_{pt} = P_{at} + P_{bt} + P_{ct} \quad (3)$$

其中, $\begin{cases} P_{at} = U_{at} I_{at} \cos \psi_{at} \\ P_{bt} = U_{bt} I_{bt} \cos \psi_{bt} \\ P_{ct} = U_{ct} I_{ct} \cos \psi_{ct} \end{cases}$, 为A、B、C相在 t 时刻的功率。

由配电网自动化系统可获得开关站某出线 k 在 t 时刻的功率为

$$P_{kt} = \sqrt{3} U_{kt} I_{kt} \quad (4)$$

式中, U_{kt} 为 t 时刻线电压; I_{kt} 为 t 时刻电流。

同理,根据SCADA系统可知变电站某10 kV电缆 b 出线在 t 时刻的功率为

$$P_{bt} = \sqrt{3} U_{bt} I_{bt} \quad (5)$$

由式(3)~式(5)得到配电变压器/箱式变电站、开关站出线和变电站出线的日功率为

$$\begin{cases} P_p = \sum P_{pt} \\ P_k = \sum P_{kt} \\ P_b = \sum P_{bt} \end{cases} \quad (6)$$

目前配电网自动化系统中每15 min采集一次电压、电流数据,故 t 之间的时间间隔为15 min,即一天有96个点。

线损率合理的情形下,变电站出线 b 的电量与开关站内所有出线 k_i 的电量相等,开关站出线 k 的电量与所有配电站 p_i 的电量相等,即

$$\begin{cases} P_b = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^n P_{k_i t} \\ P_k = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^n P_{p_i t} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $t=1,2,\dots,n,\dots,96$; N 为开关站线个数或配电站个数。

若各级功率之间偏差率 $\alpha > 6\%$ 时,即

$$\begin{cases} \alpha = \frac{|\Delta P_1|}{|P_b|} \times 100\% = \frac{|P_b - P_k|}{|P_b|} \times 100\% > 6\% \\ \alpha = \frac{|\Delta P_2|}{|P_k|} \times 100\% = \frac{|P_k - P_p|}{|P_k|} \times 100\% > 6\% \end{cases} \quad (8)$$

认为该10 kV电缆线路线损率不合理,根据同期系统“ $T+2$ ”计算原则,可进行线损率验证。

故通过配电网自动化系统,在多系统交互下,可预判线损率不合理情形。

4 案例实施

为了验证上述所提两种线损率异常分析方法的有效性,针对某供电公司线路杨52和杨19进行案例分析。

4.1 杨52案例分析

某供电公司10 kV电缆线路杨52通过同期系统获取线损率,发现自某月10日起该线路日线损率由合理变为23.5%。杨52拓扑结构如图4所示。

杨52送开关站TP300弄79号的10 kV二段母线,该开关站中31号出线送箱式变电站59号和49号;32号出线送箱式变电站27号和35号;33号出线送箱式变电站43号和65号。

首先对线路拓扑进行排查,发现供售电侧之间的关联均正确。

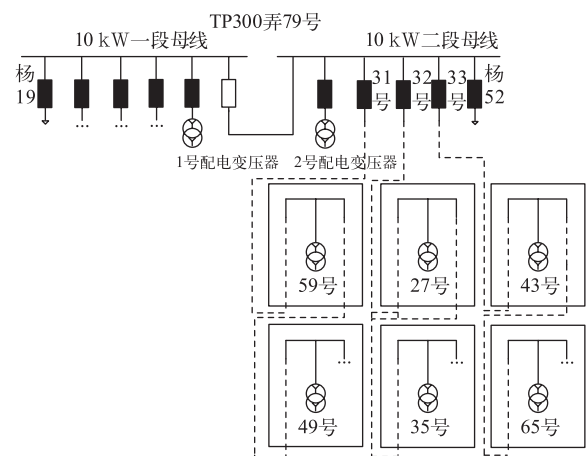


图4 线路杨52 拓扑结构
Fig. 4 Line Yang 52 topology

其次排查供电侧电量，通过SCADA系统中电压、电流数据依据式（2）计算出电量为

$$W_{y20} = \sqrt{3}U_{y20}I_{y20}h = \sqrt{3} \times 10.51 \times 38.94 \times 24 = 17\,012.59 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

与用电信息采集系统数据16 981.24 kW·h基本一致，可认为供电侧电量无异常。

最后对售电侧分量59号、49号、27号、35号、43号和65号箱式变电站的电量数据在同期系统中逐一核查，经过历史数据对比，发现27号箱式变电站数据异常偏小，10日之后电量比原来减少1/3，同时线损率发生异动。经现场核查发现该箱式变电站电压回路熔丝A相熔断，处理后线损率恢复至2.3%，在合理范围内。

4.2 杨19案例分析

某供电公司10 kV电缆线路杨19的拓扑结构如图5所示，送开关站TP300弄79号的10 kV一段母线，该开关站中21号出线送箱式变电站61号和51号；22号出线送箱式变电站29号和33号；23号出线送箱式变电站41号、63号和71号。

某月15日通过配电网自动化系统发现开关站TP300弄79号一段母线功率不平衡，而此时同期系统中只能查看所送该段母线的线路杨19在13日的线损率，且在合理范围内，无法通过查看异常线损率进行原因分析。

故通过配电网自动化系统计算杨19下所送配电变压器和箱式变电站功率，见表1。

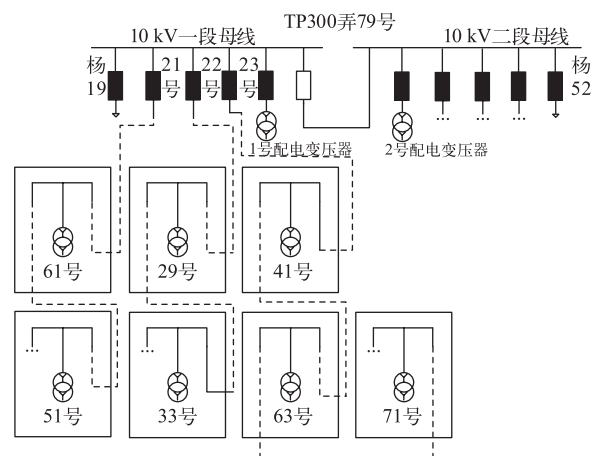


图5 线路杨19 拓扑结构
Fig. 5 Line Yang 19 topology

表1 某日线路杨19 配电变压器 / 箱式变电站功率
Tab. 1 The power of Yang 19 distribution substation/station
substation on a certain line

配电变压器 / 名称	功率 / W
TP300 弄 79 号站_1 号配电变压器	4 819.2
61 号箱式变电站	1 977.6
29 号箱式变电站	1 363.2
41 号箱式变电站	1 958.4
51 号箱式变电站	2 419.2
33 号箱式变电站	2 217.6
63 号箱式变电站	1 497.6
71 号箱式变电站	2 928.9

开关站出线功率见表2。

表2 TP300 弄 79 号开关站出线功率
Tab. 2 Outgoing power of No. 79 switchyard in TP300 line

开关站出线名称	功率 / W
21 号	4 401.5
22 号	3 671.7
23 号	6 485.3

通过SCADA系统计算杨19的出线功率为19 548.8 W。

对开关站出线21号 $\Delta P_{1(21)} = 4.7 \text{ W}$ ， $\alpha_{(21)} = 0.11\%$ ；对开关站出线22号 $\Delta P_{1(22)} = 90.0 \text{ W}$ ， $\alpha_{(22)} = 2.45\%$ ；对开关站出线23号 $\Delta P_{1(23)} = 300.4 \text{ W}$ ， $\alpha_{(23)} = 8.15\%$ ；对变电站出线杨19 $\Delta P_2 = 171.1 \text{ W}$ ， $\alpha_{(y19)} = 0.88\%$ 。

由式（8）可知， $\alpha_{(23)} \geq 6\%$ ，可判定该线路线损率不合理，且异常原因在开关站出线23号

与下级所送设备41号、63号和71号箱式变电站之间。

定位故障后，现场核查发现63号箱式变电站在15日现场施工完成后，铭牌标记错误，导致其关联台账信息错误，当天立即进行了更正。17日通过同期系统查询发现该线路15日线损率为-21.37%，不在合理范围内。16日线损率恢复至3%。

案例杨52、杨19分别验证未配置配电网自动化系统情形和已配置配电网自动化系统情形下，所提出的线损率异常分析方法的有效性。

4.3 多个案例验证

为进一步验证以上两种线损率异常分析方法的实用性，对某月10 kV电缆线路进行分析，结果见表3。

表3 某月10 kV 电缆线路异常原因分析

Tab. 3 Abnormal causes analysis of 10 kV cable lines in a certain month

异常原因	数量	分析方法
台区铭牌标记错误	5	2
台区表号登记错误	3	2
供电侧失电压失电流	2	1
台区熔丝熔断	8	1、2
用户电量缺失	6	1
台区计量异常	10	1、2

表3中分析方法1表示已配置配电网自动化系统情形；分析方法2表示未配置配电网自动化系统情形。

由多个案例分析结果可看出，两种方法可相互配合，快速识别线损率异常原因，有效提高分析效率。

5 结束语

针对10 kV电缆线路，本文依据变电站、线路和台区三者之间的多系统数据交互原则，分析电缆线路拓扑结构，提出两种未配置配电网自动化系统情形下和已配置配电网自动化系统情形下的线损率异常分析方法，并通过案例验证所提两种方法的有效性。此两种方法可在同期线损计算

“T+2”的原则下相互配合，有效提高异常线路分析排查效率，及时发现设备隐患，提升线路合理率，维护电网安全稳定运行。

参考文献

- [1] 余卫国, 熊幼京, 周新风, 等. 电力网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术, 2006(18): 54-57, 63.
- [2] 张恺凯, 杨秀媛, 卜从容, 等. 基于负荷实测的配电网理论线损分析及降损对策[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊1): 92-97.
- [3] 李滨, 严康, 罗发, 等. 最优标杆在市级电网企业线损精益管理中的综合应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 184-191.
- [4] 冷华, 陈鸿琳, 李欣然, 等. 基于功率或电量预测的智能配电网统计线损同期化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 108-114.
- [5] 王方雨, 刘文颖, 陈鑫鑫, 等. 基于“秩和”近似相等特性的同期线损异常数据辨识方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4771-4783.
- [6] 唐登平, 李俊, 孟展, 等. 统计线损数据准确性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 33-39.
- [7] 欧阳森, 冯天瑞, 安晓华. 考虑馈线聚类特性的中压配网线损率测算模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 33-39.
- [8] 刘浩, 多杰才让, 周丽. 区域中压配电网的节能改造[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(6): 145-150.
- [9] 李冰若, 夏澍. 基于多系统数据信息交互的10 kV分线线损分析[J]. 上海电力, 2018, 31(4): 27-31.
- [10] 王华盛. 线损分析在配网自动化中的运用研究[J]. 通讯世界, 2019, 26(6): 231-232.
- [11] 黄坚. 在配网自动化中的线损分析应用. 华东六省一市电机工程(电力)学会. 第十九届输配电研讨会论文集[C]. 华东六省一市电机工程(电力)学会: 浙江省科学技术协会, 2011: 5.
- [12] 徐凌燕, 杨凤欣, 张海鑫, 等. 基于AHP-CRITIC

- 算法的线损异常分析方法研究[J]. 信息技术, 2020, 44(12): 116-120.
- [13] 刘天明. 基于BP神经网络的配网线损计算[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [14] 丁明, 李晓静, 张晶晶. 面向SCADA的网络攻击对电力系统可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 37-45.
- [15] 胡宇. 电能量信息采集与监控系统的建设研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [16] 陈根永, 陈永华, 贾俊洁, 等. 基于GIS平台的配电网故障诊断算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 71-75.
- [17] Ani Vincent Anayochukwu. Development of an intelligent power management system for solar PV-wind-battery-fuel-cell integrated system[J]. Frontiers in Energy Research, 2021(9): 613958.
- [18] 陆俊, 李子, 朱炎平, 等. 智能配用电信息采集业务通信带宽预测[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1277-1282.
- [19] 薛永端, 徐丙垠, 李天友, 等. 配网自动化系统小电流接地故障暂态定位技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 27-32.
- [20] 岑炳成, 安海云, 周前, 等. 分压售电比例对线损率的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 169-173.
- [21] 江木, 孙云超, 刘巨. 10 kV配电网理论线损计算方法及应用对比[J]. 供用电, 2019, 36(11): 78-83.
- [22] 夏澍, 王乃盾, 史媛, 等. 电缆配电网的线-变-表拓扑异常辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 44-50.
- [23] 刘伟生, 王勇, 吴斌, 等. 配电网多级保护技术及其应用[J]. 供用电, 2020, 37(4): 58-64.
-
- ### 作者简介
- 陈佳瑜 (1993—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 继电保护, 配电网运行优化工作。
- 夏澍 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统运行、保护与控制。
- 施灵 (1965—), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统运行工作。
- 许鸣吉 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 电网调控运行。
- (收稿日期: 2021-11-16)