

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180726

电缆配电网的线-变-表拓扑异常辨识方法

夏澍, 王乃盾, 史媛, 韩浩江

(国网上海市电力公司市北供电公司, 上海 200072)

摘要: 线-变-表拓扑异常是造成分线线损率统计值不合理的一个主要原因。同时考虑到部分分线涉及的设备量较多、异常情况复杂, 仅靠现场排查难度很大。为了克服这一难题, 针对电缆配电网接线方式, 提出了一种线-变-表拓扑异常辨识方法。为了保证分析的客观性, 基于分线线损率计算公式, 分析了拓扑异常对线损率的影响, 并分别针对单环式和双射式两种基本的电缆配电网接线方式, 提炼了相应的拓扑异常类型。为了提高现场排查效率, 推导了不同异常类型情况下线损率实际值与统计值的关系式, 并提出了拓扑异常辨识方法, 能够在现场核查前预判出异常原因。最后, 通过实际算例计算, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 分线线损率; 电缆配电网; 拓扑异常; 辨识方法

Line-transformer-meter topology anomaly identification method for cable distribution network

XIA Shu, WANG Naidun, SHI Yuan, HAN Haojiang

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

Abstract: The line-transformer-meter topology anomaly is a major reason for unreasonable statistical value of line loss rate. Taking into account that the equipment involved in the part of lines is more and abnormal situation is complex, it is very difficult to find out the reason only by on-site inspection method. To overcome this problem, a method of line-variable-table topology anomaly identification for cable distribution network connection is presented in this paper. To ensure the objectivity of analysis, the influence of topology anomaly on the line loss rate is analyzed based on the calculation formula of the line loss rate, and the corresponding topology anomaly types are refined for the single-loop wiring and bi-directional wiring. To improve the efficiency of site investigation work, the relationship between the actual value and the statistical value of line loss rate under different types of anomalies is deduced, and a method of identifying topological anomalies is proposed to predict the anomalies before the on-site inspection. Finally, a numerical example is presented to verify the validity of the method.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52091418005N) and National Natural Science Foundation of China (No. 51507100).

Key words: line loss rate; cable distribution network; topology anomaly; identification method

0 引言

线损率是电力公司的一项重要的经济和技术指标^[1-2]。近年来, 随着电能表覆盖率和拓扑数据信息化程度的不断提高, 在保证供电侧采用的计量电量都是同一时段的情况下, 国网公司已经全面开展“分区、分压、分线、分台区”同期线损管理工作^[3-5]。其中 10 kV 分线线损分析工作是线损管理工作的一

项重要内容, 主要围绕国网一体化电量与线损管理系统来进行的, 通过对线损率不合理的线路进行分析, 找出线损率异常原因, 并及时消缺治理。目前已有少量文献从管理的角度给出了线损率异常分析流程和处理策略^[6-7], 但都缺少量化分析, 没有构建相应的数学模型并提出具体的处理方法。

在 10 kV 分线线损率的同期统计值计算时, 供电侧线-变-表拓扑关系来源于电力生产管理系统 (Production Management System, PMS)^[8-9]。但由于同步异常、系统缺陷、人员疏忽等因素, 可能导致 PMS 系统中的拓扑关系存在异常, 不仅影响到线损

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (52091418005N); 国家自然科学基金项目资助 (51507100)

率的计算, 还关系到现场作业人员的安全。同时考虑到部分分线涉及的售电侧设备较多、异常情况复杂^[10-12], 仅靠现场排查难度很大, 而目前还缺乏线-变-表拓扑异常分析方面的研究。

此外, 10 kV配电网包含架空网和电缆网, 随着中心城区架空线入地工程的不断深入, 电缆配电网占比越来越高^[13-15]。在电缆配电网接线方式中, 单环式和双射式接线方式是两种基本的接线方式^[16-18], 应用最为广泛, 同时可以演化出双环式等复杂接线方式, 因此需要予以重点研究。

为此, 本文首先分析了线-变-表拓扑异常对线损率的影响。然后分别针对单环式和双射式两种基本的电缆配电网接线方式, 提炼了相应的拓扑异常类型, 并推导了不同异常类型情况下线损率实际值与统计值的关系式。进而提出了线-变-表拓扑异常辨识方法。最后通过实际算例, 对所提方法的有效性进行了验证。

1 线-变-表拓扑异常对线损率的影响

10 kV 分线线损率的计算公式为

$$\begin{cases} \beta_i = \frac{W_{Gi} - W_{Si}}{W_{Gi}} \times 100\% \\ W_{Si} = \sum_{j=1}^{N_i} W_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

式中: β_i 为线路 i 的线损率; W_{Gi} 为线路 i 供电侧关联电度表的计量电量; W_{Si} 为线路 i 售电侧总电量; W_{ij} 和 N_i 分别为售电侧公变、专变关联电度表的计量电量和总数。对于线路 n , 其售电侧的公变或专变电量 W' 原本属于 W_{nj} , 但由于 PMS 中线-变-表拓扑关系出现异常, 导致 W' 在线损率计算中被归属到了 W_{mj} , 即线路 m 中。这样会导致线路 n 的线损率明显增加, 甚至超过合理范围; 而线路 m 的线损率明显减少, 会出现负线损的情况。上述现象容易发生在电缆配电网中互为备用的接线方式上。发生此情况, 就需要进行分析和消缺。下面具体分析一下单环式和双射式接线方式可能出现的线-变-表拓扑异常情况。

2 单环式接线方式下拓扑异常分析

2.1 单环式接线方式

单环式接线方式如图 1 所示, 是由不同中压母线引出单回线路构成的, K_n 和 K_m 分别对应线路 n 和线路 m 的出线开关, K_{r2} 是正常运行方式下的开环点^[19]。当任一线路故障时, 可以通过操作开关, 将负荷转供到另一条线路上。

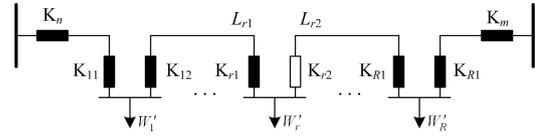


图 1 单环式接线方式

Fig. 1 Single-loop wiring

2.2 拓扑异常分析

对于单环式接线方式, 出现线-变-表拓扑异常的情况主要有两种: 一种是接线错误, 即线路 L_{r1} 错误接到了开关 K_{r2} , L_{r2} 错误接到了 K_{r1} ; 另一种是现场和 PMS 图形开关状态不一致, 常见的错误类型如表 1 所示。

表 1 开关状态错误类型

Table 1 Error types of switch status		
类型	现场开关状态	图形开关状态
类型 1	K_n 闭合、 K_m 闭合	K_n 闭合、 K_m 闭合
	K_{r1} 闭合、 K_{r2} 断开	K_{r1} 断开、 K_{r2} 闭合
类型 2	K_n 闭合、 K_m 闭合	K_n 断开、 K_m 闭合
	K_{r1} 闭合、 K_{r2} 断开	K_{r1} 闭合、 K_{r2} 闭合
类型 3	K_n 闭合、 K_m 闭合	K_n 闭合、 K_m 断开
	K_{r1} 闭合、 K_{r2} 断开	K_{r1} 闭合、 K_{r2} 闭合
类型 4	K_n 断开、 K_m 闭合	K_n 闭合、 K_m 闭合
	K_{r1} 闭合、 K_{r2} 闭合	K_{r1} 闭合、 K_{r2} 断开
类型 5	K_n 闭合、 K_m 断开	K_n 闭合、 K_m 闭合
	K_{r1} 闭合、 K_{r2} 闭合	K_{r1} 闭合、 K_{r2} 断开

当发生接线错误和开关状态错误类型 1 时, 会导致原属于线路 n 的电量 W'_r 被错误关联到了线路 m 上, 造成线路 n 和 m 线损率的统计值为

$$\beta'_n = \frac{W_{Gn} - (W_{Sn} - W'_r)}{W_{Gn}} \times 100\% = \beta_n + \frac{W'_r}{W_{Gn}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\beta'_m = \frac{W_{Gm} - (W_{Sm} + W'_r)}{W_{Gm}} \times 100\% = \beta_m - \frac{W'_r}{W_{Gm}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: β'_n 和 β'_m 分别为线路 n 和 m 线损率的统计值; β_n 和 β_m 分别为线路 n 和 m 线损率的实际值。进而可得

$$\begin{cases} \beta_n = \beta'_n - \frac{W'_r}{W_{Gn}} \times 100\% \\ \beta_m = \beta'_m + \frac{W'_r}{W_{Gm}} \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

同理可以推导出其他开关状态错误类型下线损率实际值与统计值的关系式, 具体如表 2 所示。

上述分析可以看出, 错误类型 1 和 2 可能导致线路 n 线损率为负值同时线路 m 线损率为较大正值, 错误类型 3 和 4 可能导致线路 m 线损率为负值

同时线路 n 线损率为较大正值。

表 2 不同错误类型下线损率

Table 2 Line rate under different error types

类型	线损率实际值与统计值的关系式
类型 2	$\left(\beta_n = \beta'_n - \frac{\sum_{j=1}^r W'_j}{W_{Gn}} \times 100\%, \beta_m = \beta'_m + \frac{\sum_{j=1}^r W'_j}{W_{Gm}} \times 100\% \right)$
类型 3	$\left(\beta_n = \beta'_n + \frac{\sum_{j=r}^R W'_j}{W_{Gn}} \times 100\%, \beta_m = \beta'_m - \frac{\sum_{j=r}^R W'_j}{W_{Gm}} \times 100\% \right)$
类型 4	$\left(\beta_n = \beta'_n + \frac{\sum_{j=1}^r W'_j}{W_{Gn}} \times 100\%, \beta_m = \beta'_m - \frac{\sum_{j=1}^r W'_j}{W_{Gm}} \times 100\% \right)$
类型 5	$\left(\beta_n = \beta'_n - \frac{\sum_{j=r}^R W'_j}{W_{Gn}} \times 100\%, \beta_m = \beta'_m + \frac{\sum_{j=r}^R W'_j}{W_{Gm}} \times 100\% \right)$

3 双射式接线方式下拓扑异常分析

3.1 双射式接线方式

双射式接线方式如图 2 所示, 是由不同中压母线引出双回线路, 形成双射接线^[20]。当采用双射式接线方式时, 部分情况下会增加分段开关 K_{Z1} 、 K_{Zr} 、 K_{ZR} , 并配有自切保护功能。当任一线路故障时, 自切保护动作, 可将负荷转供到另一条线路上。

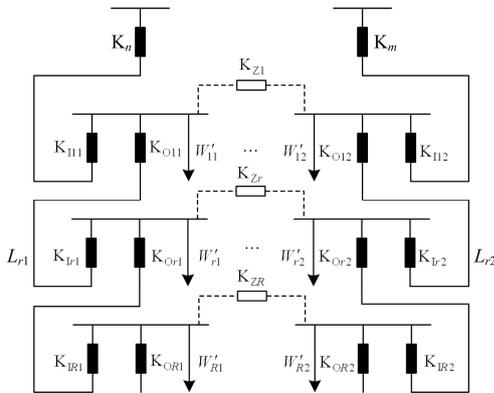


图 2 双射式接线方式

Fig. 2 Bi-directional wiring

3.2 拓扑异常分析

对于单环式接线方式, 出现线-变-表拓扑异常情况主要有三种: 1) 变-表拓扑异常; 2) 接线错误; 3) 现场和 PMS 图形开关状态不一致。

(1) 变-表拓扑异常

图 2 中 W'_{r1} 和 W'_{r2} 中可能包含用户、配变及其他

负荷, 具体如图 3 所示。

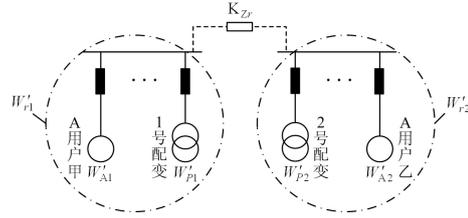


图 3 供电范围

Fig. 3 Power supply range

图 3 中 W'_{A1} 和 W'_{A2} 分别对应同一用户的甲和乙表电量, 而这两个表的变-表关系很可能关联反了, 即 W'_{A1} 被错误关联到了 A 用户乙, 而 W'_{A2} 被错误关联到了 A 用户甲, 造成线路 n 和 m 线损率的统计值为

$$\beta'_n = \frac{W_{Gn} - (W_{Sn} - W'_{A1} + W'_{A2})}{W_{Gn}} \times 100\% = \beta_n + \frac{(W'_{A1} - W'_{A2})}{W_{Gn}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\beta'_m = \frac{W_{Gm} - (W_{Sm} + W'_{A1} - W'_{A2})}{W_{Gm}} \times 100\% = \beta_m - \frac{(W'_{A1} - W'_{A2})}{W_{Gm}} \times 100\% \quad (6)$$

进而可得

$$\begin{cases} \beta_n = \beta'_n - \frac{(W'_{A1} - W'_{A2})}{W_{Gn}} \times 100\% \\ \beta_m = \beta'_m + \frac{(W'_{A1} - W'_{A2})}{W_{Gm}} \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

W'_{p1} 和 W'_{p2} 分别对应同一配电站 1 号和 2 号配变的电量, 而这两个表的变-表关系也很可能关联错误, 同理可以推导出此问题对线损率的影响。

(2) 接线错误

接线错误主要出现的情况是: 线路 L_{r1} 错误接到了开关 K_{Lr2} , L_{r2} 错误接到了 K_{Lr1} 。这种错误造成线路 n 和 m 线损率的实际值与统计值的关系式为

$$\begin{cases} \beta_n = \beta'_n - \frac{(\sum_{j=r}^R W'_{j1} - \sum_{j=r}^R W'_{j2})}{W_{Gn}} \times 100\% \\ \beta_m = \beta'_m + \frac{(\sum_{j=r}^R W'_{j1} - \sum_{j=r}^R W'_{j2})}{W_{Gm}} \times 100\% \end{cases} \quad (8)$$

(3) 现场和 PMS 图形开关状态不一致

造成现场和 PMS 图形开关状态不一致情况的原因主要有: 现场自切保护动作而图形上还是常规运行状态, 或者是图形上是自切保护动作状态而现

场是常规运行状态。具体类型如表 3 所示。

表 3 不同错误类型下的开关状态

Table 3 Switch states under different error types

类型	现场开关状态	图形开关状态
类型 1	K_{1r1} 断开、 K_{2r} 闭合、 K_{1r2} 闭合	K_{1r1} 闭合、 K_{2r} 断开、 K_{1r2} 闭合
类型 2	K_{1r1} 闭合、 K_{2r} 闭合、 K_{1r2} 断开	K_{1r1} 闭合、 K_{2r} 断开、 K_{1r2} 闭合
类型 3	K_{1r1} 闭合、 K_{2r} 断开、 K_{1r2} 闭合	K_{1r1} 断开、 K_{2r} 闭合、 K_{1r2} 闭合
类型 4	K_{1r1} 闭合、 K_{2r} 断开、 K_{1r2} 闭合	K_{1r1} 闭合、 K_{2r} 闭合、 K_{1r2} 断开

当发生上述开关状态错误时, 可推导出线损率实际值与统计值的关系式, 具体如表 4 所示。

表 4 不同错误类型下线损率

Table 4 Line rate under different error types

类型	线损率实际值与统计值的关系式
类型 1	$\left(\beta_n = \beta'_n + \frac{\sum W'_{j1}}{W_{Gn}} \times 100\%, \beta_m = \beta'_m - \frac{\sum W'_{j1}}{W_{Gm}} \times 100\% \right)$
类型 2	$\left(\beta_n = \beta'_n - \frac{\sum W'_{j2}}{W_{Gn}} \times 100\%, \beta_m = \beta'_m + \frac{\sum W'_{j2}}{W_{Gm}} \times 100\% \right)$
类型 3	$\left(\beta_n = \beta'_n - \frac{\sum W'_{j1}}{W_{Gn}} \times 100\%, \beta_m = \beta'_m + \frac{\sum W'_{j1}}{W_{Gm}} \times 100\% \right)$
类型 4	$\left(\beta_n = \beta'_n + \frac{\sum W'_{j2}}{W_{Gn}} \times 100\%, \beta_m = \beta'_m - \frac{\sum W'_{j2}}{W_{Gm}} \times 100\% \right)$

从表 4 中可以看出, 错误类型 2 和 3 可能导致线路 n 线损率为负值同时线路 m 线损率为较大正值, 错误类型 1 和 4 可能导致线路 m 线损率为负值同时线路 n 线损率为较大正值。

4 线-变-表拓扑异常辨识流程

由单环式和双射式接线方式下拓扑异常分析可以看出, 主要异常原因包括变-表拓扑错误、接线错误、现场和 PMS 图形开关状态不一致。线-变-表拓扑异常辨识流程如下。

步骤 1: 对互为备用的线路进行线损率异常分析, 若部分线路线损率不合理, 同时存在负线损的情况, 但打包在一起线损率合理, 则说明可能出现线-变-表拓扑异常问题, 转步骤 2。

步骤 2: 从互为备用线路售电侧电量中筛选出同一用户甲乙表和同一配电站 1 号和 2 号配变表等情况, 根据式(7)做交换试验, 若还原后线路线损率

合理, 则表示可能存在变-表拓扑错误, 存入疑似错误集合。

步骤 3: 针对互为备用线路拓扑进行拆分, 分成单环式和双辐射式接线方式, 并结合线路线损率和图形开关状态, 按照表 2 和表 4 进行电量还原试验, 若某种错误类型还原后线路线损率合理, 则表示可能存在这种错误, 存入疑似错误集合。

步骤 4: 按照疑似错误进行现场排查和消缺。

5 实例分析

为了验证所提线-变-表拓扑异常辨识方法的有效性, 对某供电公司的一组互为备用的线路进行分析。其中: 共 16 联谊开关站甲的周线损率为-148.91%, 共 57 联谊开关站乙的周线损率为 40.16%, 两条线路对应的具体分量信息分别如表 5 和表 6 所示。经分析, 两条关联线路线损一正一负, 同时两条线路打包线损率为 1.68%, 是合理的, 可初步判断存在线-变-表拓扑异常。

首先分析变-表拓扑错误的情况。该组线路涉及 8 个供电用户, 其中北京泰德和联谊泵站存在甲乙表, 针对这两个用户点, 根据式(7)计算调换用户表计后的线损, 从而判断是否存在用户表接反的问题。计算结果如表 7 所示。

由表 7 的计算结果可看出, 调换用户表计后, 共 16 和共 57 线路线损并未合理。同理也对配变进行了交换试验, 还原后线路线损率也都不合理, 可暂时排除变-表拓扑出现异常, 需要进一步对其进行线-变拓扑分析。

表 5 共 16 的线损分量信息

Table 5 Line loss component information of Gong 16

设备类型	设备名称	电量/kWh
断路器	共 16 联谊开关站甲开关	50 140
配变	联谊路 501 弄一号站_1 号配变	13 572
配变	共富 476 弄箱变 A_箱变	7 190.4
配变	共富路 476 弄二号站_一号配变	10 488
配变	联谊路 501 弄二号站_一号配变	10 744
配变	联谊路 501 弄三号站_一号配变	11 536
配变	大楼箱变_箱变	8 330
配变	共富路 476 弄一号站_1 号配变	13 408
所用变	联谊开关站_10 千伏 1 号站用变	1 380
用户	财跃云	605
用户	北京泰德甲	5 760
用户	三毛网购	29 640
用户	城建祥和	5 804
用户	联谊泵站	376.8
用户	智慧湾甲	5 205
用户	市政供应	764

表 6 共 57 的线损分量信息

Table 6 Line loss component information of Gong 57

设备类型	设备名称	电量/kWh
断路器	共 57 联谊开关站乙开关	199 876
配变	共富 476 弄箱变 B_箱变	3 067.2
配变	共富路 476 弄一号站_2 号配变	17 136
配变	共富路 476 弄二号站_二号配变	9 836
配变	联谊路 501 弄二号站_二号配变	14 068
配变	联谊路 501 弄三号站_二号配变	9 184
配变	联谊路 501 弄一号站_2 号配变	16 280
所用变	联谊开关站_10 千伏 2 号站用变	0
用户	辐射技术	24 649
用户	金杨贸易	11 865
用户	北京泰德乙	13 520
用户	智慧湾乙	1 384

表 7 变-表拓扑分析结果

Table 7 Analysis results of transformer-meter

供电点名称	调换表计后线损率/%	
	共 16	共 57
北京泰德	-164.39	43.35
智慧湾	-141.29	37.56

共 16 及共 57 的供电拓扑如图 4 所示，其中，实线为共 16 供电部分，虚线为共 57 供电部分。

从图 4 中可以看出，该组线路共涉及两个单环式接线，其中共 16 开关供电对象为大楼箱变和共富 476 弄箱变 A。由于共 16 线损率为负值，根据表 2 可知，每个单环式接线可能存在的是错误类型 1。计算拓扑修正后对应的线损率，结果如表 8 所示。

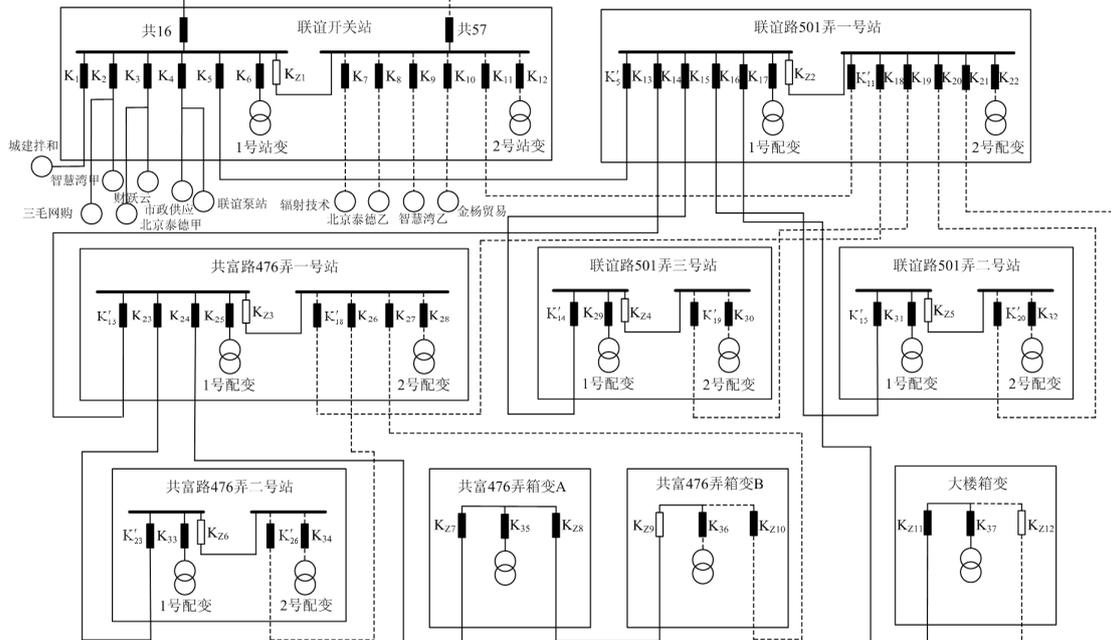


图 4 网架结构

Fig. 4 Network structure

从表 8 中可以看出，三种错误类型还原后的线损率仍不合理，可暂时排除线损超标是由单环式拓扑异常导致。下面对拓扑中的双射式接线进行分析。

表 8 单环式接线拓扑异常分析结果

Table 8 Topological anomaly analysis results of single-loop wiring

错误类型	修正后线损率/%	
	共 16	共 57
现场 K_{Z11} 断开, K_{Z12} 闭合	-132.30	35.99
现场 K_{Z7} 断开, K_{Z9} 闭合	-134.57	35.87
现场 K_{Z11} 、 K_{Z7} 断开, K_{Z12} 、 K_{Z9} 闭合	-117.96	31.70

由图 4 可知，共 16 拓扑中的双射接线共涉及 6 个站，分别是联谊开关站、联谊路 501 弄一号站、

联谊路 501 弄二号站、联谊路 501 弄三号站、共富路 476 弄一号站、共富路 476 弄二号站。由于共 16 的线损率为负值，按照表 4 可以看出，可能出现的是错误类型 2。采用自下而上的分析方法，对 6 个站的拓扑进行分析。计算拓扑修正后对应的线损率，具体结果如表 9 所示。

根据表 9 的分析结果，预判异常发生在联谊路 501 弄一号站，具体现象：现场 K'_5 断开， K_{Z2} 闭合；图形 K'_5 闭合， K_{Z2} 断开，疑似由于自切动作引起。依据预判结果，前往现场进行核查，现场开关 K'_5 因故障断开，联谊路 501 弄一号站自切动作，分段开关 K_{Z2} 合上，导致联谊路 501 弄一号站_1 号配变、共富 476 弄箱变 A、共富路 476 弄二号站_1 号配变、

表 9 双射式接线拓扑异常分析结果
Table 9 Topological anomaly analysis results of
bi-directional wiring

站名	错误类型	修正后线损率/%	
		共 16	共 57
共富路 476 弄二号站	现场 K'_{23} 断开, K_{26} 闭合	-127.99	34.91
共富路 476 弄一号站	现场 K'_{15} 断开, K_{25} 闭合	-86.91	24.61
联谊路 501 弄二号站	现场 K'_{14} 断开, K_{24} 闭合	-127.48	34.78
联谊路 501 弄三号站	现场 K'_{13} 断开, K_{23} 闭合	-125.90	34.39
联谊路 501 弄一号站	现场 K'_5 断开, K_{22} 闭合	1.21	1.81
联谊开关站	现场共 16 断开, K_{21} 闭合	100	-22.28

联谊路 501 弄二号站_1 号配变、联谊路 501 弄三号站_1 号配变、大楼箱变、共富路 476 弄一号站_1 号配变、联谊开关站_10 kV 一号站用变实际由共 57 供电, 与预判结果相同。将现场设备恢复至正常运行状况后, 共 16 和共 57 两条线路线损恢复合理, 这表明本文所提辨识方法是有效的。

另外, 利用本文所提的方法对 67 组打包统计线损率合理、分开统计不合理的线路进行异常辨识, 都能准确找出存在的线-变-表的拓扑异常原因, 排查结果如表 10 所示, 由此可见本文所提辨识方法具有较好的适用性。

表 10 排查结果

Table 10 Investigation results

异常原因	数量
变-表拓扑错误	28
接线错误	7
现场和 PMS 图形开关状态不一致	32

6 结论

本文针对单环式和双射式两种基本的电缆配电网接线方式, 提炼了相应的拓扑异常类型, 推导了不同异常类型情况下线损率实际值与统计值的关系式, 进而提出了一种线-变-表拓扑异常辨识方法, 并通过实际算例进行验证, 得出以下结论。

1) 当互为备用的线路发生线-变-表拓扑异常时, 若把所有线路打包在一起统计, 线损率合理; 若分开统计, 部分线路线损率不合理, 同时存在负线损的情况。

2) 所推导的拓扑异常前后线损率变化关系式能够直观反映拓扑异常对每条线路线损率的影响, 可以用于预判异常原因。

3) 所提出的线-变-表拓扑异常辨识方法能够有效地判断出异常原因, 具有较高的适用性。

结合本文梳理的线-变-表的拓扑异常原因, 后续可进一步将所提的异常辨识方法拓展到其他接线方式中。

参考文献

- [1] 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.
LENG Hua, CHEN Honglin, LI Xinran, et al. A method for synchronous line statistics of distribution network based on load or electricity consumption forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 108-114.
- [2] 刘盛, 朱翠艳. 应用数据挖掘技术构建反窃电管理系统的研究[J]. 中国电力, 2017, 50(10): 181-184.
LIU Sheng, ZHU Cuiyan. Application of data mining technology to build the anti-stealing management system[J]. Electric Power, 2017, 50(10): 181-184.
- [3] 王守相, 周凯, 苏运, 等. 基于随机森林算法的台区合理线损率估计方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 39-45.
WANG Shouxiang, ZHOU Kai, SU Yun, et al. Line loss rate estimation method of transformer district based on random forest algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 39-45.
- [4] 李滨, 刘铸峰, 黄柳军, 等. 县级电网线损管理综合对标评价[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3871-3879.
LI Bin, LIU Zhufeng, HUANG Liujun, et al. Comprehensive evaluation benchmark study on line loss management of county power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3871-3879.
- [5] 李健, 黄俊铭, 朱建全, 等. 基于过程状态特征化的配电网线损计算[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 55-61.
LI Jian, HUANG Junming, ZHU Jianquan, et al. Line loss calculation for distribution network based on state characterization[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 55-61.
- [6] 李端超, 王松, 黄太贵, 等. 基于大数据平台的电网线损与窃电预警分析关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 143-151.
LI Duanchao, WANG Song, HUANG Taigui, et al. Key technologies of line loss and stealing electricity prediction analysis based on big data platform[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 143-151.
- [7] 安佳坤, 贺春光, 邵华, 等. 一种面向时空全过程的线损变动分析方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 100-105.

- AN Jiakun, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Analysis method of line loss fluctuation based on whole space-time process[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 100-105.
- [8] 章元德, 史亮, 陆薇, 等. 线损信息化统计中数据质量管控机制及实现[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 128-133.
- ZHANG Yuande, SHI Liang, LU Wei, et al. Realization of data management and control mechanism of line loss statistical information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 128-133.
- [9] 应俊, 梅军, 王勇. 配电主站馈线拓扑模型校核方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 83-89.
- YING Jun, MEI Jun, WANG Yong. Research on verification method of feeder topology model for distribution main station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 83-89.
- [10] 于金镒, 刘健, 徐立. 大型城市核心区配电网高可靠性接线模式及故障处理策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 74-80.
- YU Jinyi, LIU Jian, XU Li. Distribution grids of high reliability for core areas of large cities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 74-80.
- [11] 刘亮, 曾祥君, 邓名高, 等. 基于线路归一和网络解耦的配网故障测距方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 243-249.
- LIU Liang, ZENG Xiangjun, DENG Minggao, et al. Fault distance measurement method in distribution network based on line normalization and network decoupling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 243-249.
- [12] MANSOR N N, LEVI V. Integrated Planning of distribution networks considering utility planning concepts[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4656-4672.
- [13] 杨继超, 李文升, 韩颖, 等. 电缆线路对城市配网变电站无功影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 143-148.
- YANG Jichao, LI Wensheng, HAN Ying, et al. Research on the effects of cable on the reactive power of urban distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 143-148.
- [14] 孙伟华, 梁震, 王国友. 上海市区电网现状分析与智能化应用对策[J]. 华东电力, 2012, 40(10): 1820-1823.
- SUN Weihua, LIANG Zhen, WANG Guoyou. Analysis of urban power grid in shanghai and intelligent application countermeasures[J]. East China Electric Power, 2012, 40(10): 1820-1823.
- [15] WANG Longchang, GAO Houlei, ZOU Guibin. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [16] 姚瑛, 王浩鸣, 周亚楠, 等. 中压配电网典型接线方式分析[J]. 供用电, 2017, 34(11): 55-61.
- YAO Ying, WANG Haoming, ZHOU Yanan, et al. Analysis of the typical connection modes of medium voltage distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(11): 55-61.
- [17] MATEO C, PRETTICO G, GOMEZ T, et al. European representative electricity distribution networks [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 99: 4656-4672.
- [18] 吴奕姣, 张焰, 华月申. 中压配电网闭环运行的可靠性评估方法研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(3): 199-203.
- WU Yijiao, ZHANG Yan, HUA Yueshen. Study on reliability evaluation method of closed-loop operation in MV distribution network[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(3): 199-203.
- [19] 肖峻, 刚发运, 蒋迅, 等. 柔性配电网: 定义、组网形态与运行方式[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1435-1442.
- XIAO Jun, GANG Fayun, JIANG Xun, et al. Flexible distribution network: definition, morphology and operation mode[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1435-1442.
- [20] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 配电网模式化故障处理方法研究[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 97-102.
- LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Modeled fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 97-102.

收稿日期: 2018-06-14; 修回日期: 2018-07-19

作者简介:

夏 澍(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行、保护与控制; E-mail: 870828@ncepu.edu.cn

王乃盾(1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行、保护与控制。

(编辑 许威)