

基于配变低压电气量典型特征的故障研判综合平台

李博江¹, 郑蜀江¹, 詹惠瑜², 吴志², 顾伟², 范瑞祥¹, 邓志祥¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330077; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210000)

摘要:中低压配电网故障数量多、故障类型复杂,且故障监测水平较低,无法及时发现及清除故障。针对此问题,该文通过分析10 kV配变在不同负载率、绕组连接组别、三相不平衡率及系统电压等条件下的运行工况,发现中低压线路断线、配变单相缺相、低压线路单相接地等典型故障的低压侧电气量变化规律,总结制定相关的故障研判规则,为中低压故障研判提供依据。最后,以此为基础搭建包含数据集成、故障预警、故障研判等功能为一体的综合性故障研判平台。该平台已经成功应用于江西电网的实际运维、抢修和决策中。结果表明,该平台能及时发现中低压配电网故障,减少用户停电时间,提升供电可靠性。

关键词:断线;故障特征;研判平台;低压电气量;可靠性

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.012 中图分类号:TM73 文章编号:1673-9140(2020)06-0090-09

Fault diagnosis integrated platform based on typical characteristics of electrical signal on the low voltage side of distribution network

LI Bojiang¹, ZHENG Shujiang¹, ZHAN Huiyu², WU Zhi²,
GU Wei², FAN Ruixiang¹, DENG Zhixiang¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330077, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210000, China)

Abstract: The medium and low voltage distribution network has a large number of faults with complex types. The low level of fault monitoring makes it impossible to discover and clear the faults in time after a fault occurs. In response to his problem, this paper analyzes the operating conditions of 10 kV distribution transformers at different load rates, winding connection groups, three-phase unbalance rates, and system voltages. The changing law of electrical signal on the low-voltage side is obtained for typical faults such as the disconnection of medium and low voltage lines, single-phase loss of distribution transformers, and single-phase grounding of low voltage line. Then relevant fault diagnosis rules are summarized and formulated to provide a basis for the judgment of medium and low voltage faults. On this basis, a comprehensive fault judgment platform including the data integration, fault warning, fault research and other functions is built and successfully applied in the actual operation and maintenance, repair and decision-making in Jian-

收稿日期:2018-06-14;修回日期:2018-09-30

基金项目:国网江西省电力有限公司科技项目(SGJXDK00JS1700084)

通信作者:吴志(1987-),男,博士,主要从事配电网规划及优化的研究;E-mail:zww@seu.edu.cn

gxi power grid. The results show that the platform can detect faults in low and medium voltage distribution network timely, reduce user power outage time and improve power supply reliability.

Key words: disconnection; fault feature; judgment platform; low voltage electrical quantity; reliability

目前中低压配网故障监测水平较低,调度只能根据 SCADA 系统信息监测整条配电线路停运或单相接地故障,而对于配电线路部分区段、部分台区、部分低压线路发生故障无法及时发现,导致用户停运时间较长^[1-4]。配电网已基本实现对公变在线监测,而配变作为联系用户与电网的电能传输媒介,一次侧绕组关联高压线路、二次侧绕组关联低压线路及用户,可明锐的感知高低压故障。因此,不仅限于直接监测数据,从配变低压侧电气量的变化情况,总结不同故障类型相对应的电气量变化规律,并制定相关的研判规则应用到管控系统,可为配电网实际运维提供指导,从而减少用户停电事件,提高供电安全性和可靠性。

配电线路故障监测技术目前已有不少研究,对于断线故障也有较多分析^[5-7]。文献[5]提出了基于配电控制终端的故障定位和隔离方法,应用纵联电流差动保护实现故障的快速处理;文献[6]提出了基于灰色经验融合的电网故障研判模型;文献[7]提出了分层控制结构、自愈控制策略和节点评估法。同时,这些配网故障监测方法都无法最大化监测价值^[8],即缺乏利用监测信息实现中低压故障研判。实时故障预警、提供抢修指导等功能。因此,建立一个综合性研判平台使得配网故障的监测系统化、完备化、功能模块化是提升监测水平、发挥监测效益的最佳途径。

该文通过细化分析配电变压器在多种故障类型下电压和电流的变化情况,总结不同故障类型下的配变低压侧电气量变化过程,提出中低压故障研判方法。并在此基础上,建立配电网故障综合研判平台,能有效加快故障抢修进度,促进电力故障的及时排除。

1 配变故障研判综合平台

1.1 平台搭建背景

长期以来,当配网发生故障时,在故障上报后进行现场抢修前,对于故障信息是不能分析并准确定

位故障源的,只能依赖于用户的描述以及抢修人员现场的确认^[9],即对故障类型、影响范围等不能及时进行准确判断。现有电力用户通过供电公司报修电话进行故障报修,受理人员进行报修受理,记录用户报修信息,并将信息转发给抢修服务远程工作站,工作站人员再根据报修的地域,向各急修班派发抢修工单,急修班收到抢修工单再调度相应资源到现场确认故障类型及抢修^[10]。上述现状导致故障处理依赖于抢修人员到现场后的确认,从而影响抢修的进度和抢修资源的调度^[11]。

随着电力电网的信息化的全面建设^[12-20],数据表明,从配变监测系统可完整获取关联数据。加上 4G 等移动通讯技术使得远程语音、视频等大数据量通讯的发展,为建设故障研判平台创造了条件。

1.2 平台建立意义

建立故障研判综合平台,是从深层次解决电网抢修问题,促进了故障研判及监测系统的网络化和智能化。建立故障研判综合平台有多方面意义:

1)通过细化分析用户电能表和变压器上电压和电流的情况,明确了故障类型,确定了故障影响范围,减小了抢修人员到现场后的工作量,加快了抢修的进度,利于电力故障的及时排除;

2)研判完成后将同一低压线路故障和/或变压器故障生成已知故障,并将其作为同一停电事件反馈至抢修调度人员,避免了同一低压线路故障和/或变压器故障重复派出抢修人员,节约了抢修资源;

3)研判完成后在配电网 GIS 系统上标注故障影响区域,直观的展示了故障的影响范围;同时依据配电网 GIS 系统上展示的抢修现场信息,便于抢修指挥人员了解故障现场详情,指挥抢修;

4)通过向用户反馈故障原因、向用户反馈预计恢复供电时间、向用户反馈已恢复供电信息,优化了用户体验;

5)通过提取所述报修故障用户编号,根据所述报修故障用户编号在营销管理系统中查找与之对应的低压电表箱信息;根据所述低压电表箱信息在配电网生产管理系统和 GIS 系统中获取与之对应的低

压电表箱的地理位置;准确获得报修故障用户对电能表的地理位置,保证了后续研判的顺利进行。

2 配变故障研判综合平台架构

配变故障研判综合平台可纳入现有的配电管理系统中,其系统框架如图 1 所示。

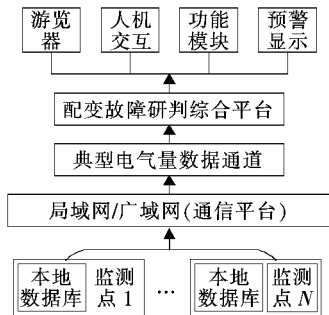


图 1 配变故障研判综合平台框架

Figure 1 Integrated platform framework for distribution transformer fault judgment

该平台通过对配电网典型低压侧电气量特征监测数据智能分析,经过功能模块处理,可以实现故障信息上报后即可提前自动研判故障地点、类型及影响范围,可全面快捷地为供电部门和用户提供如下信息:

- 1) 监测时间内,配电网低压侧电气量特征;
- 2) 现有用电信息采集系统上报故障信息和现有配电自动化管理系统上报故障信息;
- 3) 配电网检测线路的拓扑结构;
- 4) 通过现有配电网生产管理系统获得故障相关联的低压电表箱设备;
- 5) 故障时段,配电网故障的诊断结果;
- 6) 全面合理的抢修建议。

2.1 平台功能介绍

配变故障研判综合平台功能如图 2 所示。该平台主要由 4 个模块组成:数据传输及预判模块是平台数据基础来源,可以是配电网电气量监测设备或软件仿真上传的特征电气量数据,为处理模块提出判断依据;处理模块对监测数据进行智能分析,进而判断未来可能发生的故障信息,功能模块分故障信息接收、故障设备定位、故障信息筛选、线路拓扑分析、设备运行信息分析和综合抢修措施 6 个部分,各个模块可相互配合,分析结果信息为其他模块

共享;查询系统模块主要是对历史报表的存档,为应用层解决电能质量问题服务;应用模块通过历史数据的查询进行仿真模拟,对故障发生能有适当的提前预警,为供电部门进行技术检修和供电规划等实际应用提供技术支持。

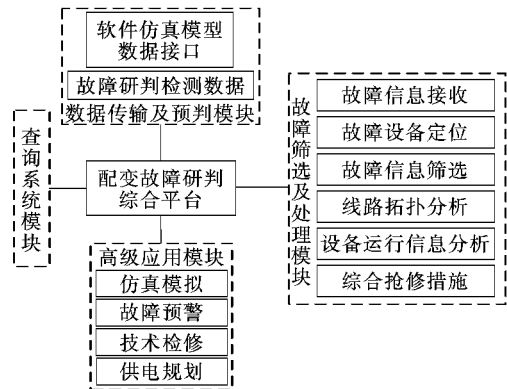


图 2 配变故障研判综合平台功能

Figure 2 Integrated platform function for distribution transformer fault judgment

2.2 数据传输及预判模块

该模块将系统所监测到的低压侧相电压及相电流值作为直接判断依据,将现场测量的线电压值及高压侧电流作为间接判定依据,通过综合获取直接及间接数据可对配电变压器所发生的故障类型进行研究分析。

2.2.1 相电压一低两高

1) 中性线断线。对于三相四线制低压供电系统,在正常运行时,中性点的电压值为

$$\dot{U}_{oo'} = \frac{\dot{U}_{ao}Y_a + \dot{U}_{bo}Y_b + \dot{U}_{co}Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_o} \quad (1)$$

同理,各相电流值为

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_{ao} - \dot{U}_{oo'}}{z_a}, \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_{bo} - \dot{U}_{oo'}}{z_b}, \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_{co} - \dot{U}_{oo'}}{z_c} - \dot{I}_o = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \quad (2)$$

若由于某种原因中性线发生断路,则负荷中性点必然会产生位移,其位移量计算公式为

$$\dot{U}_{oo'} = \frac{\dot{U}_{ao}Y_a + \dot{U}_{bo}Y_b + \dot{U}_{co}Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} \quad (3)$$

若三相负荷平衡,则中性点位移量为零,即 $\dot{U}_{oo'} = 0$,三相电压值仍保持平衡。若三相负荷严重不平

衡且中性线断线,设 $Z_a = R/2, Z_b = Z_c = R$, 则 $\dot{U}_{a0'} = \dot{U}_{a0}/4$, a 相电压为 $\dot{U}_{a0'} = 3\dot{U}_{a0}/4$, b 相电压为 $\dot{U}_{b0'} = 1.145\dot{U}_{a0}e^{-j130.89^\circ}$, c 相电压为 $\dot{U}_{c0'} = 1.145\dot{U}_{a0}e^{j130.89^\circ}$, 矢量示意如图 3 所示。即 b、c 两相电压升高、a 相电压降低,线电压值维持不变。

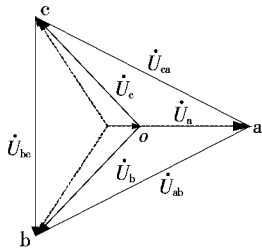


图 3 中性线断线且三相不平衡条件下的电压矢量
Figure 3 Voltage vector diagram under neutral line disconnection and three-phase unbalanced condition

2) 低压侧单相接地。假设配变低压侧 b 相套管引线处或内部发生单相短路,根据对称分量法可将低压侧电流和电压分解为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a0} &= \frac{1}{3}\dot{I}_d^{(1)}, \dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}a\dot{I}_d^{(1)}, \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}a^2\dot{I}_d^{(1)} \\ \Rightarrow \dot{I}_{b0} &= \frac{1}{3}\dot{I}_d^{(1)}, \dot{I}_{b1} = \frac{1}{3}\dot{I}_d^{(1)}, \dot{I}_{b2} = \frac{1}{3}\dot{I}_d^{(1)} \\ \Rightarrow \dot{I}_{c0} &= \frac{1}{3}\dot{I}_d^{(1)}, \dot{I}_{c1} = \frac{1}{3}a^2\dot{I}_d^{(1)}, \dot{I}_{c2} = \frac{1}{3}a\dot{I}_d^{(1)} \end{aligned} \quad (4)$$

若配变绕组采用的是三角形—星形联结 Dyn11 型,则高压侧正序电流分量在相位上滞后低压侧正序电流分量 30° , 高压侧负序电流分量在相位上均超前 30° , 零序电流由于只在变压器内部流通,不出现在变压器各线电流中,其表达式为

$$\begin{aligned} I_{B1} &= \dot{I}_{b1}e^{-j30}/n = \frac{1}{3}e^{-j30}\dot{I}_d^{(1)}/n \\ I_{B2} &= e^{j30}I_{b2}/n = \frac{1}{3}e^{-j30}\dot{I}_d^{(1)}/n \\ \Rightarrow \dot{I}_B &= \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = \frac{\dot{I}_d^{(1)}}{\sqrt{3}n} \\ \Rightarrow \dot{I}_A &= a\dot{I}_{B1} + a^2\dot{I}_{B2} = 0 \\ \Rightarrow \dot{I}_C &= a^2\dot{I}_{B1} + a\dot{I}_{B2} = -\frac{\dot{I}_d^{(1)}}{\sqrt{3}n} \end{aligned} \quad (5)$$

同理,可得出配变低压侧其他相别发生单相短路接地故障的电气特征量,具体如表 1 所示。

由上述分析可知,当发生中性线断线或单相接地短路故障时,配电变压器低压侧输出相电压都可能出现一相电压降低、二相电压升高,但中性线发生断路时,零序电流为零;而低压侧单相接地时,配变不对称运行,中性线将流过零序电流。

表 1 配变单相短路故障时高低压侧电气量特征

Table 1 Characteristics of electrical quantities on high and low voltage sides of distribution transformer undersingle-phase short circuit fault

变压器结构	故障相别	故障现象	低压侧电压	低压侧电流	高压侧电流
Yyn0	a	a 相熔丝熔断, 低压 a 相电流大于其他两相	U_a 降低, U_b, U_c 升高, 线电压不变	$I_a = I_d^{(1)}, I_b, I_c$ 流过负荷电流	$\dot{I}_A = \frac{2\dot{I}_d^{(1)}}{3n}, \dot{I}_B = \dot{I}_C = -\frac{\dot{I}_d^{(1)}}{3n}$
	b	b 相熔丝熔断, 低压 b 相电流大于其他两相	U_b 降低, U_a, U_c 升高, 线电压不变	$I_b = I_d^{(1)}, I_a, I_c$ 流过负荷电流	$\dot{I}_B = \frac{2\dot{I}_d^{(1)}}{3n}, \dot{I}_A = \dot{I}_C = -\frac{\dot{I}_d^{(1)}}{3n}$
	c	c 相熔丝熔断, 低压 c 相电流大于其他两相	U_c 降低, U_a, U_b 升高, 线电压不变	$I_c = I_d^{(1)}, I_a, I_b$ 流过负荷电流	$\dot{I}_C = \frac{2\dot{I}_d^{(1)}}{3n}, \dot{I}_A = \dot{I}_B = -\frac{\dot{I}_d^{(1)}}{3n}$
Dyn11	a	a、b 相熔丝熔断, 低压 a 相电流大于其他两相	U_a 降低, U_b, U_c 升高, 线电压不变	$I_a = I_d^{(1)}, I_b, I_c$ 流过负荷电流	$\dot{I}_C = 0, \dot{I}_A = \frac{\dot{I}_d^{(1)}}{\sqrt{3}n}, \dot{I}_B = -\frac{\dot{I}_d^{(1)}}{\sqrt{3}n}$
	b	b、c 相熔丝熔断, 低压 b 相电流大于其他两相	U_b 降低, U_a, U_c 升高, 线电压不变	$I_b = I_d^{(1)}, I_a, I_c$ 流过负荷电流	$\dot{I}_A = 0, \dot{I}_B = \frac{\dot{I}_d^{(1)}}{\sqrt{3}n}, \dot{I}_C = -\frac{\dot{I}_d^{(1)}}{\sqrt{3}n}$
	c	a、c 相熔丝熔断, 低压 c 相电流大于其他两相	U_c 降低, U_a, U_b 升高, 线电压不变	$I_c = I_d^{(1)}, I_a, I_b$ 流过负荷电流	$\dot{I}_B = 0, \dot{I}_A = -\frac{\dot{I}_d^{(1)}}{\sqrt{3}n}, \dot{I}_C = \frac{\dot{I}_d^{(1)}}{\sqrt{3}n}$

2.2.2 相电压一高两低

若三相负荷严重不平衡且中性线断线时,假使 $Z_a = R, Z_b = 0.5R, Z_c = R/3$, 则中性点位移量为 $\dot{U}_{o'o} = 0.2887e^{j150^\circ}$, a 相电压为 $\dot{U}_{ao'} = 1.258\dot{U}_{ao}e^{-j6^\circ35'}$, b 相电压为 $\dot{U}_{bo'} = 1.04\dot{U}_{bo}e^{-j16^\circ8'}$, c 相电压为 $\dot{U}_{co'} = 0.76\dot{U}_{ao}e^{-j10^\circ54'}$, 其向量示意如图 4 所示, 可知配电变压器在发生中性线断线时, 且三相负荷不平衡度较大, 则有可能出现一相电压升高、两相降低。

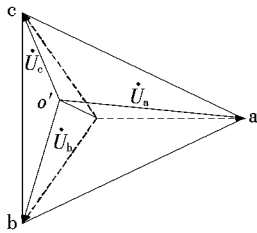


图 4 中性线断线且三相不平衡条件下的电压向量
Figure 4 Voltage vector diagram under neutral line disconnection and three-phase unbalanced condition

2.2.3 相电压一正常二降低

对于中性点不接地系统, 联接组别为 Dyn11 的配变, 假设高压侧 A 相断线时, 则高压侧绕组 AX 与 CZ 绕组串联再与 BY 绕组并联接入系统, 其向量示意如图 5 所示, 可知当配变高压侧 A 相缺相运行时, 反电动势 E_B 不变, A、C 相反电动势降为原来的 1/2, 且相位变成同方向, 即当 Dyn11 配电变压器高压侧 A 相缺相运行时, 低压侧 b 相输出电压正常, a 相、c 相降为原电压值的一半, 且线电压降为原线电压值的 0.866 倍。若二次侧 a 相、c 相负荷不对称时, 假设 I_a 大于 I_c , 则 A 相铁芯柱中合成磁通 φ_A 小于 φ_C , 二次侧输出 a 相电压将低于 c 相电压。根据磁通闭合原理 $\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C = 0$, 由于 A、C 相绕组电流方向相同, 与 B 相电流相反, 产生的磁通方向也将相反, 这时磁通关系变为 $\varphi_B = \varphi_A + \varphi_C$, 则考虑低压负载不平衡且系统电压维持不变, 负荷重的故障相电压小于负荷轻的相电压, 且两相相电压矢量之和等于另一相正常相电压。

由上述分析, 当 Dyn11 型配电变压器高压侧某一相断线时, 若负荷对称, 低压侧将 1 个相电压正常、2 个相电压降低, 且 1 个线电压为零、2 个线电压值均降低; 若负载不对称, 低压侧将 1 个相电压正常、2 个相电压降低, 负荷重的相电压小于负荷轻的

相电压, 两相相电压矢量之和等于另一相正常相电压, 低压侧 3 个线电压均降低。

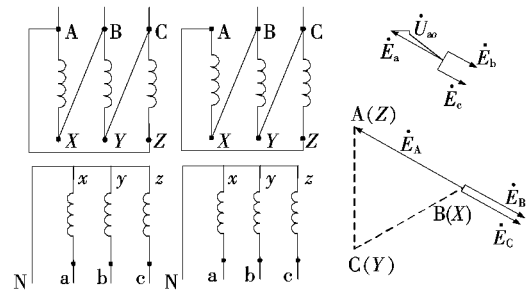


图 5 Dy11 联接绕组配变缺相电压矢量

Figure 5 Diagram of Dy11 connection winding distribution transformer phase missing voltage vector

2.2.4 相电压一为零二降低

对于中性点不接地系统, 联接组别为 Yyn0 的配变, 假设高压侧 B 相发生缺相, 则高压侧 A、C 相两相绕组将串联接入电网, 其绕组各承受线电压 U_{AC} 的 1/2, 使得高压一次侧的反电动势由原来的 E_{OA} 、 E_{OC} 降为 E_{XA} 、 E_{ZC} , 其数值大小变为原大小的 0.866 倍, 且方向相反。

由类似分析可知, 负荷对称时, 故障相相电压为零, 非故障相电压矢量之和等于线电压; 负载不对称时, 故障相电压不为零且其数值大小因负荷情况变化, 非故障相电压矢量之和等于线电压。

2.2.5 相电流一为零

假设配变低压侧 a 相出口发生断线现象, 由于三相芯式变压器零序磁通的磁阻较大和低压侧中性线的存在, 配变一次侧三相电压不受负载不对称的影响, 二次侧 b 相、c 相将与中性线自成回路, 互不干扰, 电压维持不变, 但 a 相电压用户停电。

因此, 当配电变压器低压侧某一相发生断线时, 不论三相负荷是否平衡, 总会表现为某一相电流为零, 其余两相单相用户用电正常, 中性线将通过一定电流的特征。

2.2.6 相电压三升高

假设某台区绕组接线为 Yyn0, 若高压侧 B 相绕组首尾接反, 如图 6 所示, 可知 B 相铁芯磁通反向, 并通过 A 相与 C 相铁芯形成回路, 但 A 相与 C 相绕组产生的主磁通 Φ_A 、 Φ_C 不变, 并在 B 相合成 $\Phi_{AC} = \Phi_A + \Phi_C = -\Phi_B$ 的磁通, 因此, B 相绕组反接导致流过 B 相绕组的合成磁通为 $-2\Phi_B$ 。同时, B 相磁通流过 A 相及 C 相铁芯的磁通为 $-\Phi_B/2$, A、C

相合成磁通分别为 $\Phi'_A = \frac{\sqrt{7}}{2} \Phi_A e^{j19^\circ 6'}$, $\Phi'_C = \frac{\sqrt{7}}{2} \Phi_C e^{-j19^\circ 6'}$, 其矢量示意如图 7 所示。

由矢量图可知, 低压侧二次输出线电压变化不大, 但相电压升高, 其中有一相电压数值升高至 2 倍。同理, 可得出 Yyn0 型配变不同相别发生绕组反接高低压侧电气量变化情况, 如表 2 所示。

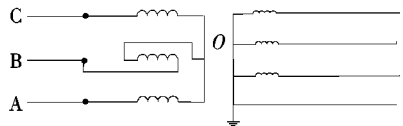


图 6 Yyn0 配变高压侧 B 相绕组反接

Figure 6 Reverse connection of B phase winding on high voltage side of Yyn0 distribution transformer

由上述分析可得, Yyn0 配电变压器高压侧某相绕组发生反接, 反接相对应的二次侧电压变为正常值的 2 倍, 非反接相的相电压升高为原 1.32 倍, 绕组极性反接导致低压侧相电压抬升, 过电压将损坏用户设备, 严重影响用户正常用电。

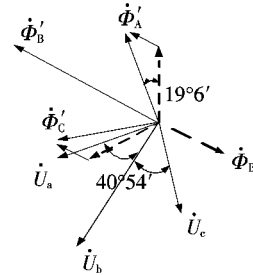


图 7 高压侧 B 绕组反接电压及磁通矢量

Figure 7 Diagram of high voltage side on winding B reversed voltage and flux vector

表 2 Yyn0 绕组反接电压特征

Table 2 Characteristics of Yyn0 winding reversed voltage

反接情况	故障相别	故障现象	低压侧电压
高压侧	A	低压侧输出相电压异常明显, 线电压较原电压差别不大, 中性点带电	$U'_a = 2U_a, U'_b = 1.32U_b, U'_c = 1.32U_c, U'_{ab} = 0.764U_{ab}, U'_{ac} = 0.764U_{ac}, U'_{bc} = U_{bc}$
	B		$U'_a = 1.32U_a, U'_b = 2U_b, U'_c = 1.32U_c, U'_{ab} = 0.764U_{ab}, U'_{bc} = 0.764U_{bc}, U'_{ac} = U_{ac}$
	C		$U'_a = 1.32U_a, U'_b = 1.32U_b, U'_c = 2U_c, U'_{ab} = U_{ab}, U'_{ac} = 0.764U_{ac}, U'_{bc} = 0.764U_{bc}$
低压侧	A	低压侧输出相电压正常, 线电压异常明显, 单相用电正常, 三相三线用户电机	$U'_a = U_a, U'_b = U_b, U'_c = U_c, U'_{ab} = 0.577U_{ab}, U'_{ac} = 0.577U_{ac}, U'_{bc} = U_{bc}$
	B		$U'_a = U_a, U'_b = U_b, U'_c = U_c, U'_{ab} = 0.577U_{ab}, U'_{ac} = U_{ac}, U'_{bc} = 0.577U_{bc}$
	C	无法正常工作, 中性线电流很大	$U'_a = U_a, U'_b = U_b, U'_c = U_c, U'_{ab} = U_{ab}, U'_{ac} = 0.577U_{ac}, U'_{bc} = 0.577U_{bc}$

2.2.7 相电压一升高二正常

若变压器高压侧或低压侧绕组发生匝间短路, 相当于减少了高低压侧绕组线圈匝数, 从而改变了变压器输出电压。输出电压数值大小可由公式计算得出, 即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1 \quad (6)$$

因此, 当高压侧发生匝间短路时, 低压侧电压将变低; 当低压侧发生匝间短路时, 输出电压将变高。

2.2.8 相电压一降低二正常

与高压侧绕组发生匝间短路情况类似, 系统电压正常时, 若配变监测系统监测到某台区低压侧一相电压降低、而其余两相电压正常的情况, 则该台区低压侧绕组有可能存在匝间或层间短路。

2.2.9 相电压一正常二升高

若配变低压侧套管相序标错, 假设低压套管上的 c、N 相、a、b 相的标识位置发生相互调换。a 相电压数值及相位等于原 U_{bc} , b 相电压数值及相位等于原 U_{ac} , c 相电压数值及相位与原 U_c 反向。因此, 若配变一相电压正常, 其余两相电压变成为线电压, 则有可能是低压侧套管相序标错。

2.2.10 线电压一正常二为相电压

对于联接组别为 Dyn11 的配变, 设高压侧 B 相绕组尾端与 C 相绕组首端连接部分发生断路, 则 B 相绕组铁芯柱的励磁电流为零。由于 A 相、C 相的电压电流正常, A 相与 C 相的合成磁通将经过 B 相铁芯形成回路, B 相将通过与正常运行时的磁通为反方向, 其矢量示意如图 8 所示, 可知当高压侧 B 相绕组发生断路时, 由于在 B 相铁芯柱上产生的是大小相等、方向相反的磁通, 则在二次侧感应出的电

压也将反向,二次侧的相序由原来的顺时针旋转 a、b、c,变成了逆时针 a、b、c,且低压侧相电压值不变,非故障两相线电压正常,但是与故障相相关联的线电压则变为正常相电压值。若对于三相四线制供电的系统,其单相用电正常,但对于三相电机,由于磁场的改变,电动机将反转。若对于三相三线制供电的动力用户,假使电机所带负荷基本平衡,由于没有中性线电位置零作用,中性点将发生位移,其位移量为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{oo'} &= \frac{\dot{U}_{ao} - \dot{U}_{bo} + \dot{U}_{co}}{3} = \frac{-2\dot{U}_{bo}}{3} \\ \Rightarrow \dot{U}_{ao'} &= \dot{U}_{ao} - \dot{U}_{oo'} = 0.882\dot{U}_{ao} e^{-j40^\circ 54'} \\ \Rightarrow \dot{U}_{bo'} &= -\dot{U}_{bo} - \dot{U}_{oo'} = \frac{\dot{U}_{bo}}{3} \\ \Rightarrow \dot{U}_{co'} &= \dot{U}_{co} - \dot{U}_{oo'} = 0.882\dot{U}_{co} e^{j40^\circ 54'} \end{aligned} \quad (7)$$

同理,可得出 Dyn11 型配变高压侧绕组发生断线低压侧电气量特征,如表 3 所示。

由上述分析可知,Dyn11 型配变高压侧绕组若发生断线,二次侧将出现三相相电压正常,但线电压一正常二为相电压。

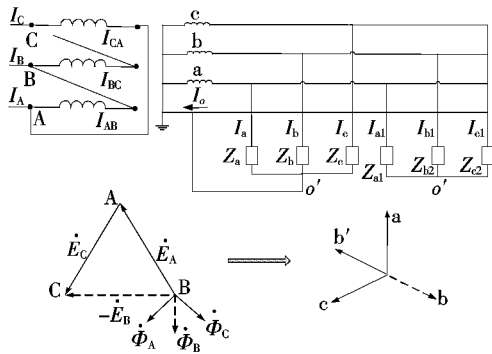


图 8 Dyn11 高压侧 B 相绕组断线故障

Figure 8 Dyn11 connection B phase winding breakage on high voltage side

表 3 Dyn11 绕组断线电气特征量

Table 1 Electrical characteristics of Dyn11

winding breakage		
故障相别	故障现象	低压侧电压
A	单相用电用户正常;三相用户电机无法启动;三相四线制供电系统,中性线电流很大,有可能烧断中性线	U_a, U_b, U_c 大小不变 $U_{ab} = U_{ac} = U_{bc} / 1.732$
B		U_a, U_b, U_c 大小不变 $U_{ab} = U_{bc} = U_{ac} / 1.732$
C		U_a, U_b, U_c 大小不变 $U_{ac} = U_{bc} = U_{ab} / 1.732$

2.3 故障筛选及处理模块

功能模块分故障信息接收、故障设备定位、故障信息筛选、线路拓扑分析、设备运行信息分析和综合抢修措施 6 个部分,其中,所述故障信息接收模块用于对上报的故障信息进行接收和校验;所述设备定位模块用于通过现有配电检测系统获取与故障信息相关的源设备的实际地理位置;所述故障信息筛选模块用于对设备定位后的故障信息进行筛选,排除已生成的计划停电故障信息和已确认的故障信息;所述线路拓扑分析模块用于对筛选出的故障信息所属的配用电线路进行拓扑分析,得到该配用电线路的拓扑结构和关联拓扑结构的线路带电设备列表;所述设备运行信息分析模块用于将线路带电设备列表中的线路带电设备逐级进行设备运行信息召测分析,并判断线路带电设备是否存在故障。

2.4 高级应用模块

高级应用模块用于根据设备历史运行信息和拓扑结构进行仿真模拟,对故障发生能有适当的提前预警,并计算存在故障的配用电线路的影响区域。

以 S11-M-200/10 变压器为例,一般考虑配变在不同负载率、绕组连接组别、三相不平衡率及系统电压等运行工况下,发生中低压线路断线、配变单相缺相、低压线路单相接地、中性线断线等故障情况的仿真。通过改变三相负载调节三相不平衡及配变负载率,测量低压电压、故障前后的不平衡率,还可以得到,配变高压发生中性线断线故障后,低压相电压将出现一相电压升高二相电压降低、最高电压可达 256 V,足以损坏用电设备;低压相电压将出现一相降低二相升高、最低电压降至 198.7 V,影响电压合格率;三相不平衡率故障后 Yyn0 较 Dyn11 下降更严重,约为原来的 50% 左右。

3 配变故障研判综合流程及应用示例

目前,该故障平台已实际应用于江西省运维监测系统,对于全省 143 240 台公变,已接入配变监测系统的公变 143 013 台,接入率为 99.84%;完整监测 141 668 台,监测率为 98.92%,在线率为 96.6%。对于全省 90 698 台专变,已接入配变监测系统的专变 47 148 台,接入率为 51.98%;完整监测 39 588 台,监测率为 43.65%,在线率为 83.97%。

3.1 判别流程

根据变电站—配电线路—配变台区供电网络拓扑图以及出现缺相台区个数,判断是否单个台区、支线或主干线缺相故障,具体判断方法:

1)若仅监测到一个台区出现上述特征表数据,则该台区极有可能发生高压侧保险丝熔断、支线或次支线线路断线,则管控系统可推送建议运维单位在该台区熔断器处、搭火处、支线或次支线搭火处等处查找故障点;

2)若配变监测系统监测到多个台区上述特征表数据,并根据网络拓扑图关系,若是出现故障的台区隶属于一条分支线或是次支线,则管控系统可推送建议运维单位在该支线或次支线搭火处等处查找故障点,尤其是开关或隔离刀闸处。若是出现故障的台区不隶属于一条分支线或是次支线,而是隶属于 2 条及以上分支线,且不同的分支线不在搭火于主干线的相同杆,则管控系统可推送建议运维单位重点查找主干线断线情况。

3.2 在线监测实例

实例 1 2015 年 5 月 9 日 15 时 30 分左右,某台区用户反应三相冷风机烧坏、一相没电、一相照明灯亮度偏暗。查询配变监测系统,发现当天 15:30—17:30 时,该台区低压侧出口电压异常。15:30 时分配变低压侧的 A、B、C 三相输出电压分别为 197、0、203.6 V,16:00 时配变低压侧的 A、B、C 三相输出电压分别为 174、51、225.2 V。台区出口相电压出现一正常二降低,现象符合文 2.4 所述,监测数据表明配变高压侧存在缺相故障。运维人员台区现场检查发现创业大道 I 级次支线 01 号杆隔离刀闸 B 相负荷侧引流线线夹断裂,造成 T 接于该次支线的创业大道配电变压器 B 相失去电源,而引起台区缺相运行。

实例 2 2015 年 6 月 2 日 6 时 30 分左右,某台区有居民反应照明灯偏暗或不亮,有部分家庭用电正常,查询配变监测系统,发现当天 00:00—07:00 时,该台区低压出口相电压异常。04:00 时配变低压侧的 A、B、C 三相输出电压分别为 129.3、231.8、102.5 V,05:00 时配变低压侧的 A、B、C 三相输出电压分别为 132、234.5、103.7 V,A 与 C 两相相电压值不稳定,但基本维持在原正常电压的一半进行波动,数据表明,配变高压侧 A 相存在缺相运行现象。现场检查发现台区 T 接于主干线的电源线路发生断线。

4 结语

目前,该平台已基本实现对 10 kV 配变缺相及线路断线情况进行在线监测,监测模块运行良好,取得较好的故障查找效果,但其他故障研判规则的准确性仍存在一定差距。随着智能电表全覆盖、配电自动化系统建设推进,将逐步实现变电站—配电线路—配变台区—接电点—表箱—用户表计网络拓扑,并利用大数据分析,可实现对故障进行更精准研判,全面提升配电精益化管控。

参考文献:

- [1] 曾祥君,陈磊,喻锐,等. 基于配电网双端信息融合的单相断线故障实时监测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020,35(3):12-18.
ZENG Xiangjun, CHEN Lei, YU Kun, et al. A real time monitoring method for the single-line break fault based on dual-terminal information in the distribution network [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020,35(3):12-18.
- [2] 邢晓东,石访,张恒旭,等. 基于同步相量的有源配电网自适应故障区段定位方法研究[J]. 电工技术学报, 2020,35(4):37-48.
XING Xiaodong, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. Research on adaptive section location method for active distribution network based on synchronized phasor measurement [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(4):37-48.
- [3] 张健磊,高湛军,陈明,等. 考虑复故障的有源配电网故障定位方法[J]. 电工技术学报, 2020,35(9):26-39.
ZHANG Jianlei, GAO Zhanjun, CHEN Ming, et al. Fault location method for active distribution networks considering combination faults [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(9):26-39.
- [4] 韦根,陈豪威,王媛媛,等. 含分布式电源配电网单相接地故障保护方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017,32(4):79-83.
WEI Gen, CHEN Haowei, WANG Yuanyuan, et al. Single-phase-to-ground fault protection methods for distribution network with distributed generators [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017,32(4):79-83.
- [5] 张丽虹,常成,熊炜,等. 基于智能控制终端的主动配电

- 网故障处理方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 22-29.
- ZHANG Lihong, CHANG Chen, XIONG Wei, et al. Research on fault processing of active power distribution network based on intelligent control terminal[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 22-29.
- [6] 吕小红, 张敏, 曹文忠, 等. 基于灰色经验融合的电网故障研判模型[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 27-33.
- LV Xiaohong, ZHANG Min, CAO Wenzhong, et al. Power grid fault judgment model based on gray experience fusion[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 27-33.
- [7] 李波, 田纯, 倪广魁, 等. 基于JADE平台的智能配电网自愈系统设计[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 9-17.
- LI Bo, TIAN Chun, NI Guangkui, et al. Design of self-healing system in smart distribution network based on JADE platform[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 9-17.
- [8] 马其燕, 秦立军. 智能配电网关键技术[J]. 现代电力, 2010, 27(2): 39-44.
- MA Qiyang, QIN Lijun. Key technologies of smart distribution grid[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(2): 39-44.
- [9] 余贻鑫. 智能电网的技术组成和实现顺序[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 1-5.
- YU Yixin. Technical composition of smart grid and its implementation sequence[J]. Southern Power Grid Technology, 2009, 3(2): 1-5.
- [10] 熊信银, 张步涵. 电气工程基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [11] 姚建国, 周大平, 沈兵兵, 等. 新一代配电网自动化及管理系统的设计和实现[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 89-93.
- YAO Jianguo, ZHOU Daping, SHEN Bingbing, et al. Design and implementation of a new generation distribution automation and management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 89-93.
- [12] 汪际峰. 南方电网一体化电网运行智能系统建设初探[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 1-5.
- WANG Jifeng. Preliminary study on intelligent system construction of integrated grid operation in Southern China Power Grid[J]. Southern China Power Grid Technology, 2012, 6(2): 1-5.
- [13] 王益民. 坚强智能电网技术标准体系研究框架[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 1-6.
- WANG Yimin. Research framework of technical standard system of strong & smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 1-6.
- [14] 赵江河, 陈新, 林涛, 等. 基于智能电网的配电自动化建设[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 33-36.
- ZHAO Jianghe, CHEN Xin, LIN Tao, et al. Distribution automation construction based on smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 33-36.
- [15] 沈兵兵, 吴琳, 王鹏. 配电自动化试点工程技术特点及应用成效分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 27-32.
- SHEN Bingbing, WU Lin, WANG Peng. Technical characteristics and application effect analysis of distribution automation pilot project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 27-32.
- [16] 刘健, 赵树仁, 张小庆. 中国配电自动化的进展及若干建议[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 6-10.
- LIU Jian, ZHAO Shuren, ZHANG Xiaoqing. Development of distribution automation in China and some suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 6-10.
- [17] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 148-154.
- LIU Li, CHEN Xuefeng, ZHAI Denghui. Status and prospects of fault recovery in intelligent distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 148-154.
- [18] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等. 配电网容错故障处理关键技术研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 253-257.
- LIU Jian, DONG Xinzhou, CHEN Xingying, et al. Robust fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 253-257.
- [19] 刘健, 赵倩, 程红丽, 等. 配电网非健全信息故障诊断及故障处理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 50-56.
- LIU Jian, ZHAO Qian, CHENG Hongli, et al. Robust fault diagnosis and restoration for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 50-56.
- [20] 刘涛, 潘玉美, 王英男, 等. 配电网具有容错性的快速故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 63-68.
- LIU Tao, PAN Yumei, WANG Yingnan, et al. Fast and robust fault location for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 63-68.