

[继电保护]

配电变压器的继电保护整定实践

文/滑 祥
万国数据服务有限公司

结合干式配电变压器、低压配电柜在实际现场运行中出现的故障案例，对于干式变压器匝间短路故障、低压配电柜故障进行原因剖析。总结出相关设备的继电保护整定指导建议，最后就配电系统的相关问题给出意见。

工业与民用配电系统中配电设备主要包括10 (20) /0.4 kV的配电变压器及0.4 kV低压配电柜。随着社会经济的蓬勃发展，大型商业广场、写字楼及工矿企业使用了大量的低压配电设备。按照设计标准要求，设置在民用建筑内的变压器，应选择干式变压器、气体绝缘变压器。数据中心考虑防火要求，楼内配电系统均采用防火性能更安全的干式变压器。配电变压器的继电保护合理设置及下级低压柜的配合对于配电系统故障能发挥很大的实际作用。

配电设备的故障简述

1. 干式配电变压器的故障

(1) 干式变压器的绝缘结构

干式变压器的绝缘可分为主绝缘和纵绝缘。主绝缘包括绕组对地之间的绝缘、不同相绕组之间的绝缘和同相的不同电压等级绕组之间的绝缘三部分。纵绝缘是指同一绕组的不同电位部分的绝缘，包括相邻导线之间的匝间绝缘、圆筒式绕组不同层之间的层间绝缘。

干式变压器运行中要承受电场、热量对绝缘的影响。绝缘材料在电场、热及其他因素的影响下，导致绝缘老化，从而逐渐导致绝缘击穿。其中主要包括电老化、热老化及局部放电老化。

(2) 主要的故障或异常

1) 绕组及其引出线的相间短路。

2) 中压系统采用中性点经电阻或接地变压器接地时，绕组或其引出线的单相接地短路。

3) 绕组的匝间短路引起的过电流。

4) 过负荷。

5) 变压器绕组温度过高。按照规范要求，应装设相应的保护装置。

树脂浇注干式变压器的层间、匝间短路较为常见。匝间短路的原因多数是由于绝缘中含气隙或者在绕组绕制过程中由于工艺原因，在匝间绝缘处绝缘树脂未填满以及绝缘树脂流失，造成绝缘首先发生局部放电，从而导致匝间绝缘损坏。

2. 低压配电柜的故障

低压配电系统普遍采用TN-S系统，其异常或故障主要包括后端负载的过负荷、相间或单相接地短路。

故障案例

配电变压器在正常设计使用环境下，其合理使用寿命大于20年。下面以实际运维管理中遇到的故障为例，探讨继电保护设置合理的关联性。

1. 配电变压器故障事故

某品牌SCB11-2500/10型号树脂浇注干式变压器，采用AN/AF冷却方式，绝缘系统温度H级，制造于2019年1月。应用在数据中心的低压配电室中，房间环境温湿度均按照规范要求落实，运行环境良好，房间温度25℃左右。正常运行时其负载率

小于45%。2021年末及2022年初该站点先后发生两台配电变压器的短路故障，造成后端负载由另外一侧配电变压器通过低压带载的情况发生。两次事故最终分析直接原因均为匝间短路故障。多匝导线熔断如图1所示，导线表面绝缘漆碳化如图2所示。

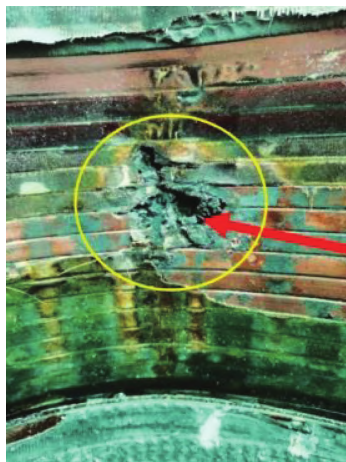


图1 多匝导线熔断



图2 导线表面绝缘漆碳化

配电变压器在发生故障前，正常运行负荷电流三相均为27 A左右，故障发生(B相匝间短路)后，B、C相电流增加至400 A左右。反时限过电流保护动作，故障的配电变压器被切除。最终分析：导体匝间短路，形成短路电流，短路导体极速发热，烧毁层间绝缘，造成层间短路，产生的热能从绕组内壁上端部释放，导致绕组内壁上端部以及相对应的低压绕组表面出现碳黑现象。

2. 低压柜短路事故

某新建工程，按照验收要求，对2 000 kV·A的干式配电变压器、低压配电柜做满负荷带载测试。

测试中，低压配电柜某馈线仓发生短路事故，引起变压器前置高压柜继电保护动作，高压开关分闸。该事故造成馈线柜仓位内的塑壳式断路器、二次接线及安装隔板等损毁。该起事故分析的结论是馈线塑壳断路器上方与垂直母线存在短路。故障发生后，链路上的低压联络开关、低压进线开关均未分闸，而是变压器高压侧的前置柜的综合保护动作，高压开关分闸。按照继电保护的选择性原则，此次存在越级跳闸的问题。

经查低压配电柜上低压总进线、联络断路器的施耐德MIC保护模块设置不合理，具体分析如下：

1) 变压器前置高压柜继电保护动作。综合保护记录的故障波形显示，一次侧动作电流960 A，持续时间0.5 s，过电流 I 段保护动作，断路器分闸。

2) 低压总进线开关配置。短延时保护：20 000 A 0.4 I_n ON（折算高压侧800 A）；瞬时保护：40 kA，0 s。

短路电流流过配电变压器、低压总进线、低压联络柜及短路点。电流值由高压侧折算约24 kA，短路电流未达到瞬时保护值（40 kA），此时两个开关的短延时保护均启动，由于采用了反时限曲线，动作时间大于0.5 s。根据现场测试数据，按照故障时电流测试，动作时间约1.78 s（低压总进线），估算0.6 s（低压联络）。通过以上数据判断，此次设备故障造成变压器前置柜高压开关分闸，保护装置正确动作。

保护的整定与设置

1. 配电变压器高压侧的保护整定

(1) 电流速断保护

保护装置的动作电流应躲过低压侧短路时流过保护装置的最大短路电流。即系统最大运行方式下，低压侧的出口三相短路场景，可靠系数用于电流速断保护时取1.3为保护装置的灵敏系数，按照系统最小运行方式下，保护装置安装处两相短路电流校验。灵敏系数要求不小于1.5。

动作时间整定，考虑到配电变压器属于高压末端配电，减少高压侧的级差配合。10 kV馈线柜、配电变压器的前置高压柜整定通常为0 s。

(2) 过电流保护

配电变压器的匝间短路、外部相间短路引起的

过电流,需配置过电流保护。

1) 仅设置为定时限时,保护装置的动作电流应躲过可能出现的过负荷电流。数据中心无论是动力变压器、还是IT变压器,建议取2倍变压器额定电流(I_e)。

2) 设置为反时限过电流+定时限过电流组合曲线时,故障电流较小时依靠反时限过电流切除;故障电流较大时,依靠定时限过电流保护切除。推荐反时限过电流整定值宜取小,建议取 $1.4I_e$,时间可以采用IEC NI曲线;定时限过电流整定取 $5I_e$,保护装置动作时限应与下一级保护动作时限相配合,一般取 $0.3\sim 0.5\text{ s}$ 。

(3) 零序电流保护

不同区域的电网公司,在10 kV系统接地方式上采用不同的接地方式。北方区域常采用中性点经消弧线圈接地,上海区域采用中性点经低电阻接地。根据不同接地方式,采用不同保护配置。

1) 采用经消弧线圈接地的配电系统,须安装小电流接地选线装置。当发生单相接地故障时,装置告警,由人工判断后手动切除故障线路。

2) 中性点经低电阻接地的系统,可采用零序电流保护功能。可以取自三相TA合成或专用零序ZTA来获取模拟量。保护整定时需注意保护装置内部的零序电流模拟量的来源选项,避免因TA电流比不一致,导致误整定。

(4) 非电量保护

变压器绕组温度过高,应装设可作用于信号或动作于跳闸的装置。数据中心干式配电变压器通常采用绝缘耐热等级为F或H级的产品,配置了温控器及散热风机。温控器的设置可以参考如下。

1) F级:风机停止 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,起动 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温报警 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$,超高温跳闸 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) H级:风机停止 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,起动 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温报警 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,超高温跳闸 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

实际现场应用中因温控器及附件出现异常,导致保护误动作的案例,因此建议取消超温跳闸出口,保留高温告警。

2. 低压总进线开关的保护设置

以常用的施耐德Materpact框架式断路器为例,通常配置Micrologic控制单元,常规配置长延时保护、短延时保护及瞬时保护。

(1) 长延时保护

主要是针对电缆或母线(相线和中性线)过载。电流设定需要躲过可能出现的过负载电流。动作延时的整定是基于6倍整定值(I_r)下的动作时间,因此参考设备厂商提供的曲线来选择合适的整定,不宜过大。

(2) 短延时保护

主要是针对配电系统的非金属性短路,跳闸延时可用于保证断路器的上下级配合。MIC 5.0以上时间曲线选择配置有 $I^2t\text{ ON}$ 、 $I^2t\text{ OFF}$ 两种, $I^2t\text{ ON}$ 为反时限曲线,即10倍长延时(I_r)整定下的动作时间,如果短延时保护(I_{sd})整定低于 $10I_r$,其实际动作时间会长于设定标识。 $I^2t\text{ OFF}$ 为定时限,即超过短延时保护(I_{sd})整定值,控制单元动作脱扣。

数据中心应用场景中,宜按照 $I^2t\text{ OFF}$ 来设置,低压总进线通常延时为 $0.3\sim 0.4\text{ s}$ 。

(3) 瞬时保护

主要针对配电系统的金属性短路,快速切除故障,通常固定延时 20 ms 。关于低电压总进线处的瞬时保护是否投退,笔者认为数据中心2N架构对配置的低电压配电系统,宜投入瞬时保护,结合 0.4 kV 系统的短路容量,建议按照不大于6倍的开关壳体电流(I_n)整定。

应用探讨

1. 10 kV系统宜采用中性点经电阻接地方式

$6\sim 35\text{ kV}$ 配电网发展很快,城市配电网采用电缆的比重不断增加,运行方式经常变换,给消弧线圈的调谐带来困难,并易引发多相短路。数据中心的用户站10 kV系统中性点建议采用低电阻接地方式。在发生单相接地时候,可以通过零序电流保护切除故障线路及设备,一般采用接地故障电流为 $100\sim 1\,000\text{ A}$ 。A级数据中心通常都是2N架构配置,对于后端一级负荷,全量配置不间断电源系统。配电变压器及电缆的故障切除,并不会造成生产负载的实际影响,后端IT设备供电无感知。如果是中性点经消弧线圈接地的系统,配置的小电流接地选线装置可能由于多种因素(二次接线有误、装置原理及系统负荷状态),造成选线不准,需要现场人员多次试拉合高压开关等,不符合运维自动化、便利性的需求。

2. 低压配电中框架式断路器的设置问题

1) 低压总进线开关的短延时保护应采用定时限曲线, 而不应采用反时限动作曲线, 通常设置为 $0.3 \sim 0.4 \text{ s}$, 与上级高压过电流保护(定时限)形成时间上的配合。如果在短延时保护整定为反时限的场景下, 系统故障产生的短路电流超过短延时(I_{sd}), 而未达到瞬时保护(I_i)时, 此时动作时间与电流大小有关的反时限曲线, 其动作时间远大于刻度指示时间, 造成高压侧保护动作, 而低压自备投无闭锁信号, 母联开关合闸, 存在二次冲击的风险, 加重损坏程度。

2) 宜投入低压总进线开关的瞬时保护。针对瞬时保护投入, 低压侧近母线处短路选择性的问题, 这种主要是考虑单路电源, 在双路电源配置的情况下(2N架构), 主要考虑对低压母线的故障保护的速动性, 降低设备损伤及修复难度。后端依靠另外一侧来保障供电。

3. 配电变压器罩壳的防护标准

配电变压器目前采用的外壳防护等级为IP3X, 防止直径大于2.5 mm固体进入。实际现场中发现: 同样是IP3X的防护等级, 不同变压器制造厂家的防护罩壳的散热设计差距迥异, 造成的散热效果大为

不同。可结合现场实际情况、规范, 建议选用IP2X的罩壳。选择IP3X罩壳时, 复核其散热面积满足变压器运行环境要求。

结束语

配电变压器、低压配电设备在实际运行中, 由于产品设计、生产工艺、安装及实际运行等种种因素, 不可避免地出现设备故障。正确的继电保护设置与配合, 能够在故障场景下, 有选择性、快速地切除故障, 保证其余配电系统的稳定运行。EA

(收稿日期: 2022-03-30)

参考文献

- [1] 民用建筑电气设计标准: GB 51348—2019[S].
- [2] 路长柏, 等. 干式电力变压器理论与计算[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2003.
- [3] 李斌, 廖兴万, 马留军, 等. 有载调压配电变压器节能应用研究[J]. 电气应用, 2021, 40(6): 72-76.
- [4] 冯晓伟, 王本涛, 董金星, 等. 继电保护测试功率源实用化热设计与实践[J]. 电气应用, 2020, 39(8): 53-59.

