山地风电场箱式变压器雷击损害事故分析及防范措施

湖南省某山地风电场10号风机报变压器故障停机，经检查发现箱式变压器出现损坏。据了解，事故当天风电场区域有雷电。因此，根据风电场雷电危害特点和早先提供的事故情况的文字资料进行分析，引起这次雷击损坏事故的原因可能是零相电缆接地不合理，涌流保护器安装不合理，接地电阻偏大等。对此提出了相应的整改建议，避免雷击事故的再次出现。

王　稳/中水电新能源株洲风力发电有限责任公司

王　稳/工程师

关键词/Keywords

风电场·

箱式变压器·

事故·

雷击·

整改·

1　箱式变压器雷击损坏事故情况调查

2017年5月2日湖南省某山地风电场10号风机报变压器故障停机，后检查发现事故导致箱式变压器损坏，箱式变压器室顶部严重变形，散热片防护罩变形，690 V低压侧涌流保护器引线（线径为4 mm^2）烧断，690 V侧b、c相铜排热缩套烧坏，一次线有损坏，690 V主断路器外壳被熏黄，b相铜排与零相铜排之间有严重电弧烧伤痕迹，c相绝缘垫块损坏；35 kV侧的b、c相熔断器熔断，A相熔断器完好，变压器吊罩检查，发现变压器绝缘油变黑，变压器绕组紧固件散落，绕组烧毁。事故当天风电场区域有雷电。

2　可能引起事故的原因分析

根据风电场雷电危害特点和早先提供的事故情况的文字资料，引起这次事故的原因可能有以下几种情况。

（1）低压侧b相铜排与零排之间的电弧放电

风电机组、箱式变压器及集电线路系统接线如图1所示，对于事故机组，其集电线路为35 kV电缆，电缆长度为1.8 km，电缆金属护套两端均为直接接地。

但根据所提供的资料、事故照片和现场察看，分析认为引发这次事故的主要原因是发电机组－箱式变压器690 V系统中的中性点连线（零相连接电缆）在箱式变压器柜体内不正确接地引起。现场察看时发现零相电缆有编织铜线和柜体接地金属构架连接，即零相电缆直接接地（见图1）。这种接线式可能有问题，因为如果这样接线，实际上是将连接在零相电缆上的涌流保护器短接。首先是零相涌流保护器根本起不到保护作用，并且将升高的地电位引到低压绕组中性点。

按图1的系统接线，雷击发生时，由于零相电缆和接地网连接，零相电缆的电位随接地网电位升高而升高，安装在零相连接电缆对地之间的涌流保护器被短

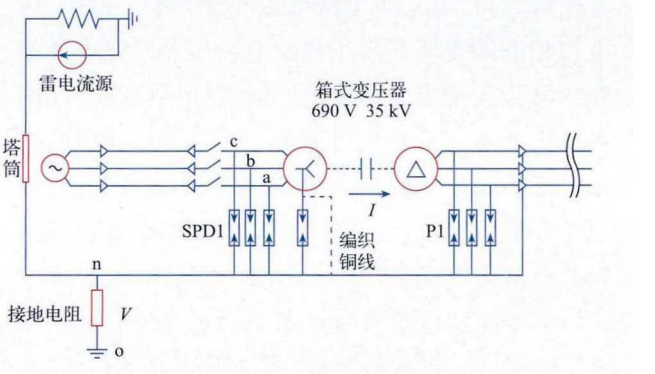

图1　事故变压器风电机组－箱式变压器系统接线图

接，涌流保护器在任何时候都不会动作。

也是由于零相连接电缆和接地网连接，雷击发生时，零相电缆的电位随接地网电位升高而升高。电位升高后，雷电流流动的方向是向电位低的方向。因此，雷电流只会通过高低压绕组之间的电容向变压器高压绕组方向流动。

为说明涌流保护器被短接和电位升高时可能形成的危害，可将变压器低压绕组部分简化为如图2所示的分布参数图。对于脉冲电流，影响的主要是电容和电感，为简化分析，忽略电阻，则低压绕组每一匝的电感为L，每一匝相对于高压绕组之间的分布电容为C_i。

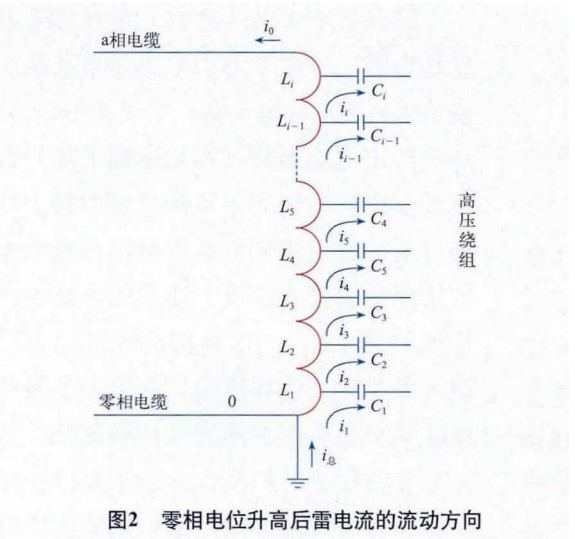

图2 零相电位升高后雷电流的流动方向

对变化率很快的雷击脉冲电流，在低压绕组上的电流及电压分布情况，考虑到对于雷电流，三相绕组中的情况是相同的，故取任意一相（a相）绕组的分布网络。

当风机电网电位升高后，电流的流向只能是电位低方向，35 kV电缆远端电位为零，和35 kV电缆相连的变压器高压绕组电位低，所以电流往变压器高压绕组方向流动。高、低压绕组之间的电流主要通过分布电容耦合，对应于低压绕组的每一匝，都有一个电容C_i和高压绕组耦合，流过的电流分别为i_1、i_2、$i_3\cdots i_i$，则地网流向35 kV电缆方向的总电流为：$i_{总}=i_1+i_2+i_3+\cdots+i_i$。

其中流过a相绕组第一匝L_1的电流为$i_{L1}=i_1+i_2+i_3+\cdots+i_i$，流过绕组第二匝$L_2$的电流为$i_{L2}=i_2+i_3+\cdots+i_i$。依此类推，则流过绕组的最后一匝的电流为$i_i$。由于在a相电缆侧所有设备部件均处于风机塔内，不可能有电荷向风机塔运动。因此，电流经低压绕组的最后一匝后，流向a相电缆方向的电流几乎为零，电流在低压绕组的最后一匝和a相电缆之间的电压降几乎为零，故低压绕组的最后一匝和电缆处于等电位状态。因此，并联于低压绕组的涌流保护器两端的电压是整个绕组两端的电压。

其中流经绕组每一匝的电流和该匝的位置有关，流过第一匝的电流最大，流过最后一匝的电流最小，在第一匝形成的电压降最大，最后一匝形成的电压降最小，从而使得低压绕组匝间电压分布是非均匀分布。绕组匝数越多，第一匝和最后一匝电压降的比值越大。

根据变压器绕组绝缘结构，若绕组相对地绝缘为均匀分布，即整个绕组相对地绝缘为每一匝绝缘的和，当涌流保护器两端的电压接近其动作电压值而没有动作前，第一匝和其附近匝的匝间电压早就超过匝间绝缘能够承受的最大电压值，从而在匝间绝缘处引起击穿，造成匝间短路。最初绕组匝间短路后，雷电流形成的电压施加在剩余绕组上，剩余绕组匝间电压会进一步增加，引起后面的绕组匝间放电的联锁反应，最终引起整个绕组损坏，在损坏绕组间产生很大的工频短路电流，造成整体变压器损坏。

雷电流在电容C_i和绕组电感L_i上形成电压降，对于变化率很大的脉冲电流，电感对电流的影响远大于电容。在整个分布网络分压过程中，脉冲电流在感性元件上的压降比容性元件上的压降大。因此，电压降主要在感性绕组两端，而在高低压绕组间的分布电容上的电压降可能不一定很大。变压器高压绕组的绝缘强度比较高，电感、电容分压还不足以引起高压绕组击穿。

（2）35 kV侧熔断器熔断

35 kV侧熔断器熔断是由于690 V低压侧b相铜排与零排之间电弧放电后，引起变压器低压侧690 V系统短路，低压侧断路器保护动作跳闸，35 kV侧通过110 kV变压器直接和电网连接。低压侧断路器保护动作跳闸后，35 kV系统通过绕组间电磁耦合向变压器提供短路故障电流。变压器高压侧的

电流剧增，由于变压器35 kV侧为多台风机共用断路器，故障电流未能引起断路器动作，最终引起变压器高压侧b、c相熔断器熔断。

（3）其他部件损坏

根据事故后的照片可以看出，事故后变压器内绕组损坏，变压器油严重变色，绝缘件碳化，变压器绕组和部分绝缘件存在严重的机械力作用下的变形。这些正是变压器绕组短路故障后的典型特征，说明变压器损坏的主要原因是绕组短路。

事故箱式变压器柜内损坏情况照片如图3所示。根据事故照片，图3中a、b和c三相涌流保护器上部引线是和690 V电缆连接。事故后，引线状态良好，绝缘无损坏，无大电流引起过热现象，但最右边的涌流保护器上表面有电荷烧伤痕迹。

根据照片，柜内有部分引线烧断，其中三条双股导线（黄、绿和红）外绝缘有大电流过热现象。

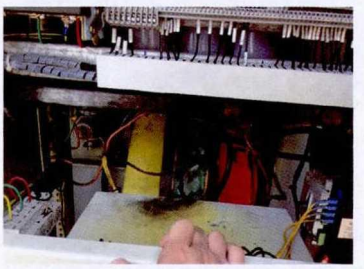

图3 事故箱式变压器柜内损坏情况照片

3 箱式变压器防雷技术改进措施及应用

引起风电场雷电事故的原因可能是多方面的。目前，国内关于风电机组防雷保护的标准多参照IEC 61400－24，但该标准中风力发电机组升压箱式变压器在风机内部，而国内箱式变压器一般位于机组外部，并不完全适用。针对凤凰山风电场雷击事故分析和目前国内风电场雷电事故频发现状，有必要进一步完善风电场雷电危害的防护措施。

1）系统接线中，零相电缆接地是存在问题的。对风电场系统接线进行整改，将零相电缆接地的编织铜线解开。正确的接线应如图4所示。这时若发生雷击，雷电流造成风机接地网地电位升高，而箱式变压器通过35 kV将远方的低电位（相对于雷电引起的电位升高）引到变压器高压绕组。由于变压器高、低压绕组之间存在静电感应，变压器低压绕组在雷击瞬间亦会处于比较低的电位，风机地电位升高后，箱式变压器中和接地网连接的柜体金属外壳、构架和变压器金属外壳等，相对于变压器低压绕组、三相电缆、零相连接电缆和电缆连接的设备或部件之间都有可能形成很高的电位差。在三相690 V电缆及零相连接电缆引线对地之间安装涌流保护器后，可对地电位升高在它们之间形成的电位差加以限制，从而保护690 V系统相连的电缆、变压器低压绕组变频器等设备及部件不受雷电危害。

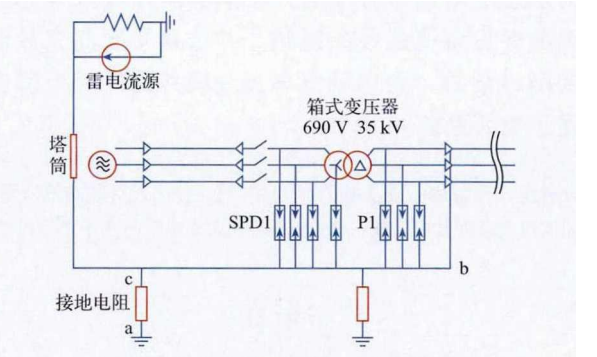

图4 涌流保护器的正确接线示意图

2）调整箱式变压器柜内各中引线的布置，调整涌流保护器的安装位置，尽可能地缩短涌流保护器的连接线等。涌流保护器的安装要求：①涌流保护器的位置应尽可能靠近接线排，最好直接布置在接线排的前、后；②涌流保护器引线太长，涌流保护器的引线应尽可能短，三相连接线的总长$L=L_a+L_b+L_c$应小于50 cm；③对于用于高电压回路中的涌流保护器，三相引线最后相互分开，不应绑在一起。

3）风机塔的接地电阻是根据风机组厂家的防雷要求确定的，而箱式变压器的生产厂家采用的防雷技术仍然是普通箱式变压器的技术，并没有对箱式变压器的接地电阻值作要求。普通箱式变压器是没有考虑直击雷防护措施的。风电场设计中也没有就风机塔、箱式变压器和电缆护套接地互连后的防雷特性给出设计说明。所以，为解决这一问题，建议将风机塔和箱式变压器接地断开，使他们分别接地。主要考虑是使接地网电位升高对变压器形成的反击危害变为雷击线路后的雷击过电压形式，便于防范。

（下转第84页）

小于内部设定信号W_s，即在“$W_c > W_s$？”的查询比较中，结论相反，所以从比较器的N端输出，继续“循环访问”；当主变压器温度超标，在“$W_c > W_s$？”的查询比较中，结论相同，监测信号则从比较器的Y端输出。

Y端输出的信号将分为三路传送。

1）第一路送给液晶显示屏，在“循环访问”中，程序是按变电站名、主变压器编号和时间间隔逐条进行查询比较的。所以，当发现温度超标时，装置内部将做出记录和存储，并在Y端输出测试信号，同时将主变压器编号、超标时间和超标数据等在液晶屏中做出显示。

2）第二路起动电子开关，根据超标数据的大小，只输出报警指令，或者既输出报警又输出冷却起动，甚至保护跳闸的控制指令。

3）第三路根据比较判断，相关信号又传送给上位机，进行多台次主变压器监测的整合与归类等处理，使之更加系列化、规范化。随后再经接口电路，传送给通信网络，使远方集控中心和安全生产部门也能了解相关主变压器运行情况，对监测到的温度超标等故障现象做出及时防护与维修处理，以免事故的蔓延扩大。

3 结束语

针对主变压器温度监测控制的重要性，运用了压力、热电为传感采样器的单一与复合测试的应用方式，改进不足，汇集优点，力争最佳监控效果。同时引入智能手段进行优化处理，增强了温度超标故障的分析判断能力，利用CPU微处理器和RS 485通信接口，在扩大变电站及主变压器监测范围中发挥了极大作用。本监测装置的研制投用，将大幅提高电力系统的安全水平，增强发输配的运行稳定性。

参考文献

[1] 刘常满．温度测量与仪表维修问答 [M]．北京：中国计量出版社，2000．

[2] 胡开明．变压器温度监控系统的设计 [J]．自动化技术与应用，2008 (27)：88-90．

[3] 马景利，智奇楠．变压器多路温度监控系统设计 [J]．天津职业技术师范大学学报，2012，22 (3)：17-20．

（收稿日期：2017－04－16）EA

(上接第39页)

4）该次事故的另一个原因是风机塔地网接地电阻偏高。对于风电机组接地电阻一般都是按风机制造厂要求，一般不应大于4 Ω。目前，风电场部分风电机塔的接地电阻均大于4 Ω。建议对风机塔接地网进行改造，尽可能降低地网接地电阻值，使之满足厂家要求。

5）有资料提到三角形联结的变压器在相间安装避雷器大雷电防护措施，主要考虑变压器低压侧雷电保护措施失效的情况下，低压侧地电位升高引起的过电压通过变压器绕组间的电磁耦合，在高压绕组两端形成过电压危及变压器绕组绝缘安全。因为在这种情况下，高压侧相安装的避雷器起不到保护作用。为完善变压器雷电防护措施，可在变压器高压绕组相间安装避雷器。

4 结束语

山地风电场箱式变压器防雷，国内目前还没有统一的技术规范和标准，箱式变压器防雷设计还是采用通常35 kV变压器的防雷技术。实际运行中，35 kV箱式变压器因雷击损坏事故频发，严重影响了风力发电场安全稳定运行。本文通过一个箱式变压器雷击损害事故为案例，提出风电场箱式变压器防雷技术要求，针对目前的防雷措施中存在的问题提出改进措施，完善风电场箱式变压器防雷技术措施，提高设备防雷水平，保障风电场箱式变压器安全、稳定运行。

（收稿日期：2017－06－20）EA