[中性点接地]

不同容量变压器并列运行时切换中性点的影响

文/林　伟[1]　李　想[2]
1. 福建水口发电集团有限公司；2. 国网福州供电公司

当并列运行的两台变压器容量及参数不一致时，切换中性点接地开关将对其零序网络产生影响。从短路电流计算的角度，用实际算例来分析切换中性点接地开关对线路保护和主变压器保护的影响，证明中性点接地开关的切换将影响线路保护的灵敏性及保护范围；而对主变压器保护而言，将影响保护动作方式和保护动作电流的大小。

110 kV电压等级电网属于中性点直接接地系统，为了保持系统零序网络的相对稳定，调度规定：当变电站（或水电站升压站）相同电压等级（110 kV及以上）母线拥有两台及以上的变压器并列运行时，只需安排一台变压器中性点直接接地即可，原则上采用大容量变压器接地。在实际电网运行过程中，为了保持系统中性点接地数量不发生改变，调度运行常通过切换中性点接地开关来满足电网检修等各类需要。当两台不同容量变压器并列运行时，由于变压器零序阻抗不同，中性点接地开关的切换对零序网络造成一定的影响。

部分学者以是否影响保护动作为判据，得出中性点接地开关的切换对线路保护不产生影响的结论；部分学者提出通过变压器零序保护配置（变压器中性点间隙保护、零序互跳保护等）保护措施来消除切换中性点接地开关的影响；也有学者认为，用零序保护和间隙保护配合，并加装母线联络开关，可提高保护的选择性。

切换变压器中性点接地开关，是否对线路保护的灵敏性、可靠性造成影响，是否对变压器本身造成影响还有待分析。本文以三明竹洲水电站110 kV变电站为例，通过综合序网图来分析切换中性点接地开关对线路保护及变压器保护产生的影响，通过短路电流计算和故障模拟，证明线路保护和变压器保护受运行方式的影响情况，以期为水电站生产调度运行和继电保护工作提供参考。

竹洲水电站概况及主接线图

竹洲水电站位于福建省沙溪干流上、三明市三元区莘口镇，上游距离永安市区33 km，下游距三明市区13 km，是沙溪流域开发中的第二个梯级电站。电站坝址河谷开阔，河床约225 m，呈“U”字形。电站系发电和航运相结合的中型水利枢纽工程，共装3台单机容量18 MW的贯流式水轮发电机，总装机容量54 MW，多年平均发电量为1.892 0亿 kW·h（后调整为1.68亿 kW·h），保证出力8.87 MW，装机年利用小时数3 504 h。

电站电气一次设备主要有：3台单机容量18 MW灯泡贯流式水轮发电机组；2台不同容量变压器；1条110 kV母线和1条110 kV荆竹线。

1号机与1#主变压器组成一机一变单元接线，2号机、3号机与2#主变压器组成两机一变扩大单元接线，1#主变压器与2#主变压器110 kV侧并列运行，发电负荷经110 kV荆竹线外送至110 kV荆东变汇入大电网。

1#主变压器容量为20 000 kV·A，2#主变压器容

量为40 000 kV·A，正常运行时主变压器中性点接地开关投2#主变压器。

110 kV荆竹线配置保护为接地距离保护、相间距离保护及零序保护，未装设专用开关。线路故障保护动作时，需通过切除两台主变压器高压侧开关及线路对侧开关实现故障隔离。

基于以上背景，开展不同主变压器中性点接地开关接地时对线路保护及主变压器保护的影响分析。

切换中性点接地开关对线路保护的影响

1. 系统等效模型

竹洲水电站主接线图简化图如图1所示。

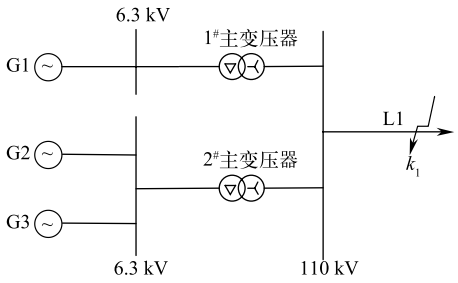
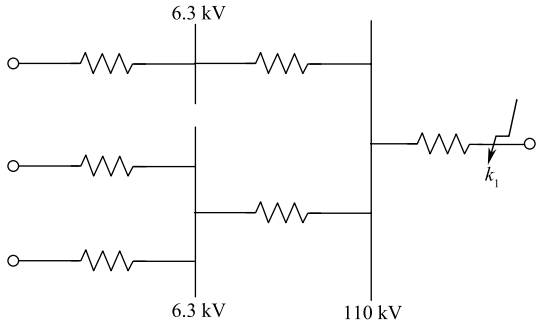
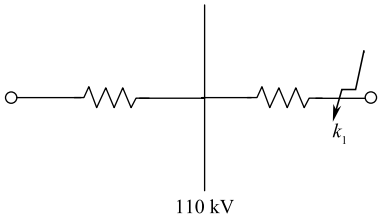


图1　竹洲水电站电气主接线简化图

当110 kV荆竹线线路L1于k_1点发生接地故障时，序网图如图2所示。



（a）等效正、负序网络



（b）等效零序网络图

图2　k_1点接地故障序网图

各序阻抗计算方式为

$$X_{\Sigma 1}=(X_{G1}+X_{T1})//(X_{G2}//X_{G3}+X_{T2})+X_{L} \quad (1)$$

$$X_{\Sigma 2}=X_{\Sigma 1} \quad (2)$$

$$X_{\Sigma 0}=X_{T0}+X_{L0} \quad (3)$$

式中，$X_{\Sigma 1}$为综合正序阻抗；$X_{\Sigma 2}$为综合负序阻抗；$X_{\Sigma 0}$为综合零序阻抗；X_{T0}为中性点接地主变压器的零序阻抗。

由式（1）～式（3）可知，切换中性点接地开关仅改变系统零序阻抗大小，X_{T0}的改变对线路故障时的测量阻抗没有影响，即接地距离保护没有影响。由此，分析线路保护的影响即可考虑其对零序电流保护的影响。

当线路L1于k_1点发生单相接地故障时，k_1点的零序电流为

$$\dot{I}_{k1}=\frac{\dot{E}}{X_{\Sigma 1}+X_{\Sigma 2}+X_{\Sigma 0}} \quad (4)$$

2. 灵敏度校验

根据继电保护整定原则，线路保护零序Ⅰ段带方向，需要配合线路按躲过本线路末端故障的最大零序电流整定，其整定电流一次值为1 540 A。

各元件阻抗参数见表1。

表1　元件阻抗参数

元件类型	元件阻抗		
	正序阻抗	负序阻抗	零序阻抗
1～3号发电机	0.12	0.12	—
1#主变压器	0.069	0.069	0.058
2#主变压器	0.035	0.035	0.030
线路L1	0.013	0.013	0.036

经计算可得，当1#主变压器中性点开关接地，线路L1末端发生单相接地故障时，零序电流为2 008.2 A，灵敏度K_1为1.304；当2#主变压器中性点接地，线路L1末端发生单相接地故障时，零序电流为2 298.8 A，灵敏度K_2为1.49，保护均能正确动作。

由以上分析可知，当不同容量变压器并列运行时切换中性点接地开关，由于变压器参数不同，影响线路保护动作的灵敏度，零序阻抗小的变压器单变接地时，保护的灵敏度更高。

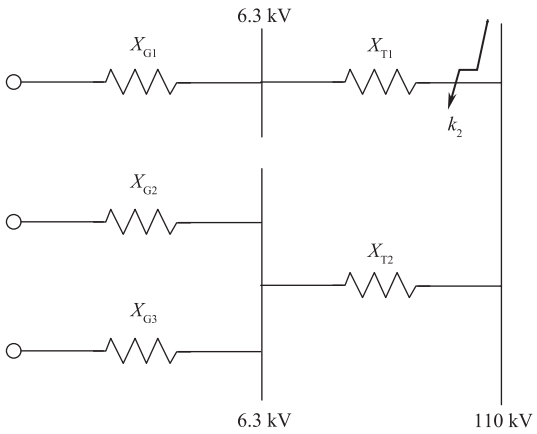
另一方面，在进行线路保护定值整定时，若以零序阻抗小的变压器单变接地运行方式进行整定，短路电流定值增大，线路保护的保护范围变小；反之，若以零序阻抗大的变压器单变接地运行方式进行整定，短路电流定值相对减小，线路保护范围变大。

切换中性点接地开关对变压器保护的影响

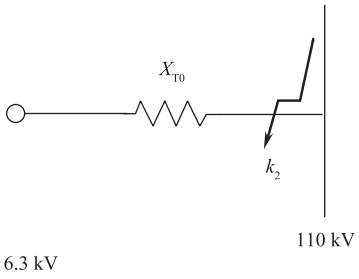
1. 系统等效模型

110 kV荆竹线线路L1在电站侧设有专用开关，保护动作出口将跳开两台主变压器的高压侧开关，线路保护的保护范围将从两台主变压器高压侧断路器直至线路末端，主变压器的高压侧后备保护的保护范围指向低压侧。

当主变压器高压侧k_2点发生接地故障时，序网图如图3所示。



（a）等效正、负序网络



（b）等效零序网络图

图3 k_2点接地故障序网图

各序阻抗计算方式为

$$X_{\Sigma 1}=(X_{G1}+X_{T1})//(X_{G2}//X_{G3}+X_{T2}) \tag{5}$$

$$X_{\Sigma 2}=X_{\Sigma 1} \tag{6}$$

$$X_{\Sigma 0}=X_{T0} \tag{7}$$

由图3可知，切换中性点接地开关将影响零序阻抗的大小，进而影响主变压器高压侧复压过电流保护和零序保护。

当主变压器中性点接地开关处于合位时，保护范围内发生接地故障，零序保护将动作；当中性点接地开关处于分位时，保护范围内发生接地故障，间隙保护动作。因此，切换中性点接地开关将改变主变压器保护中零序保护和间隙保护的动作情况，其保护整定计算各自独立，本文不再赘述。

2. 短路电流分析

当主变压器高压侧k_2点发生单相接地故障时，k_2点的短路电流为

$$\dot{I}_{k2,1}=\dot{I}_{k2,2}=\dot{I}_{k2,0}=\frac{\dot{E}}{X_{\Sigma 1}+X_{\Sigma 2}+X_{\Sigma 0}} \tag{8}$$

流过中性点接地变压器的保护安装处电流为

$$\dot{I}_{k2}=\dot{I}_{k2,1}+\dot{I}_{k2,2}+\dot{I}_{k2,0}=\frac{3\dot{E}}{X_{\Sigma 1}+X_{\Sigma 2}+X_{\Sigma 0}} \tag{9}$$

流过中性点不接地变压器的保护安装处电流为

$$\dot{I}_{k2}=\dot{I}_{k2,1}+\dot{I}_{k2,2}=\frac{2\dot{E}}{X_{\Sigma 1}+X_{\Sigma 2}+X_{\Sigma 0}} \tag{10}$$

由以上公式计算可得，当1#主变压器中性点接地，2#主变压器中性点不接地时，流过1#主变压器高压侧的短路电流为8 167 A，流过2#主变压器高压侧的短路电流为5 444 A。

当2#主变压器中性点接地，1#主变压器中性点不接地时，流过1#主变压器高压侧的短路电流为9 629 A，流过2#主变压器高压侧的短路电流为6 418 A。

由此可以看出，当中性点接地开关切换至零序阻抗较小的变压器时，流经两台主变压器高压侧的电流都将增大。

结束语

相同电压等级并列运行的两台变压器切换中性点接地开关不改变零序网络的构成，其对线路保护产生的影响由变压器零序阻抗参数决定。当变压器零序阻抗相同时，切换中性点接地开关对线路保护不产生影响；当变压器零序阻抗不同时，切换中性点接地开关将影响线路保护的灵敏性和线路保护的保护范围。

对于变压器本身而言，切换中性点接地开关将影响保护动作方式和保护动作电流的大小，零序阻抗小的变压器，短路电流大，零序阻抗大的变压器，短路电流小。

继电保护的“四性”相辅相成，相互制约，在继电保护的整定和电网调度运行上，如何“取舍”能最大程度保证电力设备的安全可靠运行，仍需钻研。EA

（收稿日期：2022-08-16）