

核电厂低压配电系统接地故障保护分析与改进

核电站多次出现因低压用电设备发生单相接地故障引起的低压变压器零序保护越级动作问题。分析TN系统接地故障保护设计要求，并就具体问题进行分析给出改进措施，可作为低压配电系统接地故障保护设计参考。

黄小悦/深圳中广核工程设计有限公司

0 引言

厂用电系统的可靠供电是保障核电厂安全稳定运行的前提，低压配电系统是厂用电系统中的重要环节，它在核电厂分布广泛，系统庞大，电气系统中的故障较常出现在低压系统，在低压系统的故障中接地故障占多数，因此，接地故障保护的正确合理设计是确保低压系统稳定可靠运行的重要环节，而接地保护设计相对复杂，考虑因素较多，需引起足够重视。

1 问题与现状

1.1 典型事件

2013年6月，A核电厂水泵电动机（4SEK004MO，45 kW）内部发生接地故障，电源开关未动作，低压厂用变压器零序保护动作跳闸，低压厂用配电盘（4LKT001TB）断电。2016年10月，B核

电厂风机电动机（2RRM003ZV，90 kW）内部发生接地故障，低压厂用变压器零序保护先于熔断器熔断动作，低压厂用配电盘（2LLE001TB）断电。

国内多个核电厂发生的多起事故，均由低压用电设备单相接地故障引起，而用电设备保护元件未及时动作，触发低压厂用变压器零序过电流保护断开中压开关，整列低压配电盘失电。这些越级跳闸事件说明低压厂用系统接地保护设计存在一定的缺陷和改进空间。

1.2 原因分析

核电厂低压配电系统为中性点直接接地系统，低压厂用变压器中性点均设置有零序过电流保护，触发变压器高压侧开关跳闸。

在核电厂低压配电设计中，当电动机额定功率不小于55 kW时，设置零序过电流保护；当电加热器额定电流大于100 A时，馈线回路配置零序过电流保护。A、B两电厂低压系统设备配置情况如表1所示。

从表1可以看出，对于A电厂，由于故障回路断路器瞬时脱扣器整定电流 I_3 （1 280 A）大于变压器中性点零序过电流保护整定电流（365 A），这两个回路

表1 两电厂低压系统设备配置情况

	变压器中性点 零序过电流保护	低压馈线回路配置	故障回路	故障回路 零序过电流保护
A 电厂	定时限，365 A，0.4 s	断路器+接触器+ 热继电器	45 kW，90 A，断路器 $I_3=1\ 280\text{ A}$	无
B 电厂	I段：甚反时限，300 A； II段：1 500 A，延时0.5 s	熔断器+接触器+ 热继电器	90 kW，166 A，aM熔断器 $I_n=250\text{ A}$ ，接触器分断能力 $8I_e=2\ 080\text{ A}$	30 A，60 ms动作，接触器跳闸

关键词/Keywords

TN系统·
零序过电流保护·
反时限·

的接地故障保护不能实现完全配合, 因此导致A电厂越级跳闸事件的发生。B电厂90 kW回路配置了零序过电流保护, 表面上看可以与变压器中性点零序过电流保护实现选择性配合, 但在B电厂事件中, 90 kW风机馈线回路接地故障电流(2 700 A)超过了接触器分断能力, 零序过电流继电器动作试图跳开接触器时, 接触器发生粘连, 故障没有切除, 变压器中性点零序过电流保护动作时间先于熔断器熔断, 触发变压器高压侧开关跳闸。

2 接地保护设计分析及改进

TN系统中, 当配电线路采用过电流保护电器兼作间接接触防护电器时, 其动作特性应符合下式要求^[1]

$$Z_s I_a \leq U_0 \quad (1)$$

式中, Z_s 为接地故障回路的阻抗, Ω ; I_a 为保证间接接触保护电器在规定时间内切断故障回路的动作电流, A; U_0 为相导体对地标称电压, V。

当不符合规定时, 应采用剩余电流动作保护电器。

2.1 断路器回路

(1) 设计实施

当短路保护电器为断路器时, 被保护线路末端的短路电流不应小于断路器瞬时或短延时过电流脱扣器整定电流的1.3倍^[1], 即

$$I_d \geq 1.3 I_3 \quad (2)$$

式中, I_d 为接地故障电流, A; I_3 为断路器瞬时或短延时过电流脱扣器整定电流, A。

当不满足上述要求时, 应采用零序过电流保护或增大电缆截面积的方式以增大短路电流。

需要关注的是, 部分厂家的某些断路器脱扣器单相动作值比三相动作值大(如ABB的Tmax系列塑壳断路器带磁脱扣的单相动作电流值为 $1.5 I_3/2.0$), 这时需按断路器实际单相动作值来校验, 因此对单相接地短路电流值要求更高了。

(2) 断路器脱扣器整定

断路器作为保护电器的电动机回路, 其瞬动过电流脱扣器或过电流继电器瞬动元件的整定

电流应取电动机起动电流周期分量最大有效值的2~2.5倍^[2]。

按上述要求, 电动机回路断路器瞬时脱扣器 I_3 一般需整定为电动机额定电流的14倍左右, 个别电动机可能需要整定更大才能确保其正常起动。

(3) 变压器中性点零序过电流保护选择性配合

因馈线零序过电流保护整定值较小, 变压器中性点零序过电流保护与不配置零序过电流保护馈线回路配合即可满足选择性动作要求。断路器作为保护元件, 兼作接地保护的回路, 考虑断路器瞬时脱扣器正误差(20%)和变压器零序保护动作值负误差, 变压器零序过电流保护满足选择性要求可按下式整定

$$I_{op0} \geq 1.3 I_3 \quad (3)$$

式中, I_{op0} 为变压器零序保护整定值; I_3 为不带零序过电流保护的最大馈线回路断路器瞬时脱扣器整定值。

(4) 零序过电流保护配置

综上, 动作特性符合各式要求时, 配电线路采用过电流保护电器兼作接地故障保护, 零序过电流保护不是必须的。但从现场实际情况看, 接地故障多发生在设备内部, 故障电流相对较小, 不一定能达到断路器瞬时脱扣器动作值, 且若与变压器中性点零序过电流保护选择性配合, 配置零序过电流保护的断路器馈线回路功率也不应过大。变压器中性点零序过电流保护与断路器配合情况如表2所示。

表2 变压器中性点零序过电流保护与断路器配合

变压器中性点零序过电流保护	低压电动机馈线
$I_{op0} = 1.3 \times I_3 = 1\ 560\text{ A}$	45 kW, 断路器 $I_n = 100\text{ A}$, $I_3 = 1\ 200\text{ A}$
$I_{op0} = 1.3 \times I_3 = 3\ 120\text{ A}$	90 kW, 断路器 $I_n = 200\text{ A}$, $I_3 = 2\ 400\text{ A}$

当变压器中性点零序过电流保护整定值比较大时, 可以考虑增加反时限保护, 反时限部分与断路器的热过载曲线配合, 定时限部分与断路器瞬时脱扣器整定值配合, 这样变压器零序过电流保护范围就比较大。现在的数字式保护装置一般都能满足上述功能要求。

2.2 熔断器回路

(1) 熔断器选择

熔断器的技术参数除应符合电压、频率和环境等条件外，最主要的是正确选择熔体额定电流值（ I_r ），且应满足以下要求：①故障条件下在规定时间内切断故障回路；②用电设备起动过程中不应熔断；③故障时有选择性切断，即靠近故障点的熔体熔断，以上各级不应熔断；④熔断器具有切断最大故障电流的能力。

在设计中，根据对接地故障保护的要求，式（1）可转换成

$$I_d \geq K_r I_r \quad (4)$$

式中， I_d 为最小接地故障电流，A； I_r 为熔体额定电流，A； K_r 为接地故障电流与熔体额定电流的最小倍数。 $t < 5$ s时， $K_r = 4.5 \sim 7$ ； $t < 0.4$ s时， $K_r = 8 \sim 11$ 。

对②的要求，在设计中，对电动机回路按下式选择：

对aM型熔断器

$$I_r \geq (1.05 \sim 1.1) I_M \quad (5)$$

对gG型熔断器

$$I_r \geq (1.5 \sim 2.3) I_M \quad (6)$$

对上述③的要求，上下级熔体额定电流为1.6：1，即相差2级就可满足要求。

对单相接地故障，电厂多数情况只需满足5 s切除故障，由式（4）、式（5）可知，采用aM型熔断器作为保护元件的电动机回路，接地故障电流达到电动机额定电流的8倍左右就可满足要求；如果采用断路器作保护元件，接地故障电流需达到电动机额定电流的18（ 1.3×14 ）倍左右才能满足要求。

(2) 零序过电流保护配置

采用熔断器作为保护元件，对于接地故障保护，动作时间小于5 s时比较容易满足，如果满足不了，需要加大电缆截面积。在核电厂设计中，对大于55 kW的电动机馈线回路采用零序过电流保护动作于接触器跳闸，作为接地故障的辅助保护，在接地故障电流较小时也能较快切除故障。

但在设计中需重视零序过电流保护整定值与接触器分断能力及熔断器曲线之间的配合关系，确保大于接触器分断能力的故障由熔断器切除。前述B电厂的事件就是没注意这方面的配合关系，因此没有达到设计初衷。下面以表1中B电厂的回路配置为例说明熔断器馈线零序过电流保护的整定优化。

零序过电流保护与熔断器配合情况如图1所示。在熔断器曲线上，找出接触额定分断能力（2 080 A）电流对应的动作时间（1.2 s），加上一定裕度（如0.3 s），得出零序过电流保护延时（1.5 s），这样就能确保大于接触器分断能力的故障由熔断器切除。在接地故障电流为30～1 800 A时，零序过电流保护延时1.5 s切除故障；大于1 800 A的接地故障将由熔断器切断，大大加快了较小接地电流故障的切除时间。

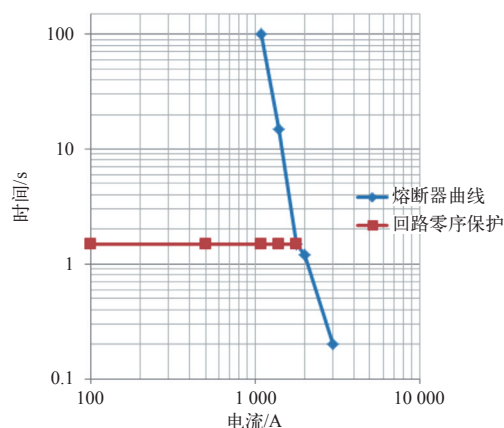


图1 零序过电流保护与熔断器配合

(3) 变压器中性点零序过电流保护选择性配合
变压器中性点零序过电流保护整定需满足设备保护和上下级保护选择性配合要求。

1) 保护动作电流大于正常运行时PEN线上流过的最大三相不平衡电流、谐波电流和正常泄漏电流之和，即

$$I_{op0} \geq 1.2 I_{PEN} \quad (7)$$

式中， I_{op0} 为变压器零序过电流保护整定值； I_{PEN} 为PEN线上最大三相不平衡电流值。

对核电厂N线不配出的配电系统，正常运行时PEN线基本没有电流。

2) 与配置零序过电流保护的馈线回路相配合, 满足

$$I_{op0} \geq 1.1 I_{0max} \quad (8)$$

式中, I_{0max} 为低压馈线零序过电流保护最大整定值。

3) 与不配置零序过电流保护的馈线回路相配合, 对熔断器作为保护元件的回路, 需满足当熔断器回路发生单相接地故障时, 变压器零序保护时间比熔断器熔断时间长 Δt , 即

$$t_{op0} \geq t_{0max} + \Delta t \quad (9)$$

式中, t_{op0} 为低压厂用变压器零序保护动作时间; t_{0max} 为低压馈线最大熔断器熔断时间。

4) 变压器低压侧或母线上发生单相接地短路时, 保护灵敏度系数大于 1.5, 即

$$I_d / I_{op0} \geq 1.5 \quad (10)$$

式中, I_d 为变压器低压侧单相接地故障电流, I_d 值相对变压器零序过电流保护整定值 I_{op0} 大得多, 此要求都能满足。

(4) 变压器中性点零序过电流保护整定

由于熔断器的反时限特性, 对馈线采用熔断器作为保护元件的变压器零序过电流保护一般采用反时限曲线实现保护配合, 下面仍以 B 电厂配置为例说明变压器零序过电流保护的整定计算。

SPAJ142C 四种标准的反时限特性曲线通用表达式为

$$t = \frac{K\beta}{\left(\frac{I_0}{I_0'}\right)^\alpha - 1} \quad (11)$$

式中, t 为反时限保护动作时间, s; K 为反时限保护时间系数; I_0 为零序过电流保护故障电流, A; I_0' 为零序过电流保护整定值, A; α 为反时限特性曲线常数; β 为反时限特性曲线常数。

1) 分别找出配置和未配置零序过电流保护的最大的馈线回路, 收集整理元件特性参数和曲线, 如表 3 所示。

表3 B电厂保护配置

序号	回路	电动机	熔断器	接触器	零序过电流保护
1	配置零序过电流保护的最大回路	90 kW, 166 A	NH00-250 A, aM	AF-260, 额定分断能力 $8I_n = 2\ 080$ A	30 A, 1.5 s
2	未配置零序过电流保护的最大回路	45 kW, 90 A	NH00-160 A, aM	AF-145, 额定分断能力 $8I_n = 1\ 160$ A, 交接电流 $I_{co} = 850$ A	无
3	变压器零序保护	ABB 的 SPAJ142C, 四种反时限特性			

交接电流 I_{co} : 热继动作曲线与熔断器动作曲线交点的电流值, 小于交接电流热继动作, 大于交接电流熔断器动作

2) 列出未配置零序过电流保护的最大的馈线回路 (回路 2) 在不同电流下保护元件 (热继/熔断器) 动作时间, 如表 4 第 1、3 列。

3) 列出配置零序过电流保护的最大的馈线回路 (回路 1) 在不同电流下保护元件 (零序/熔断器) 动作时间, 如表 4 第 1、4 列。

4) 变压器中性点零序过电流保护采用甚反时限特性, 式 (11) 中的常数 $\alpha = 2.0$, 常数 $\beta = 80.0$, 时间系数 $K = 1.0$, 零序过电流保护整定值 $I_0' > 400$ A。由此可得到对应不同电流的动作时间, 如表 4 第 2 列, 该时间应大于第 3、4 列对应时间。

5) 如果不能满足 4) 的要求, 可以通过调整变压器零序过电流保护相关参数来实现, 一般调整零序过电流保护整定值 I_0' 。

表4 保护元件动作特性

电流/A	动作时间/s		
	变压器零序	回路 2 热继/熔断器	回路 1 零序/熔断器
500	142.2	27	1.5
600	64.0	20	1.5
700	38.8	18	1.5
800	26.7	17	1.5
850	22.8	16	1.5
900	19.7	9	1.5
1 000	15.2	4	1.5
1 200	10.0	1	1.5
1 500	6.1	0.4	1.5
1 800	4.2	0.2	1.5
2 000	3.3	0.1	1.2
3 000	1.4		0.2
4 000	0.8		

(续)

电流/A	动作时间/s	
	变压器零序	回路2热继/熔断器
5 000	0.5	
回路2的交接电流为850 A, 小于850 A的电流由热继动作, 大于850 A的电流由熔断器动作; 回路1配置零序过电流保护, 小于1 800 A的电流由零序保护动作, 大于1 800 A的电流由熔断器动作		

将表4的数据绘制成曲线, 如图2所示, 变压器零序过电流保护在全电流范围内都在回路1和回路2上方, 即可以实现接地保护的选择性配合。

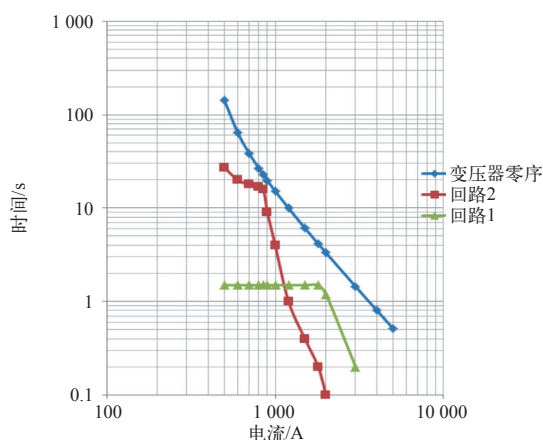


图2 变压器零序过电流保护与馈线配合

2.3 接地短路电流计算

判断过电流保护电器兼作接地保护是否满足要求, 需要计算电缆末端单相接地短路电流。在计算该电流时需注意接地电流的通路, 核电厂中设备的接地没有采用电缆PE线的方式, 而采用就近接到延电缆桥架敷设的接地裸铜线中, 电缆的相保阻抗计算不能直接采用文献[3]中的计算表格, 相保阻抗计算可以只考虑接地电流通路中的电阻(即相线和接地裸铜线电阻), 忽略相线和接地裸铜线之间的电抗(相线和接地线都在电缆桥架中, 距离较近), 现场测试结果表明, 忽略电抗导致的相保阻抗计算误差在10%以内。

3 结束语

接地故障是低压电气系统较常出现的故障, 对TN系统, 接地故障保护的正确合理设计和上下游保护之间的协调配合对确保供电可靠性非常重要, 而接地故障保护设计需考虑的因素相对较多, 也比较复杂, 必须引起高度重视, 确保保护的正确动作, 提高供电可靠性。

通过上述分析, 总结如下几点:

1) TN系统中, 动作特性符合要求时, 配电线路采用过电流保护电器兼作接地故障保护, 否则应配置零序过电流保护或增大电缆截面积。

2) 对断路器作保护电器的电动机回路, 由于瞬时脱扣器整定值较大, 从上下游接地故障保护的选择性配合和提高接地故障保护的灵敏度考虑, 配置零序过电流保护的回路功率不宜过大。

3) 对熔断器作保护电器的回路, 如果动作特性不能满足接地故障保护要求, 需增大电缆截面积。对熔断器回路配置的零序过电流保护, 需考虑与接触器的分断能力配合, 只作为较小接地故障电流时加快故障切除的辅助保护。

4) 从有利设备保护和与下游回路保护选择性配合考虑, 变压器中性点零序过电流保护采用反时限特性更合理, 对采用熔断器作为保护电器的回路, 采用反时限优势更明显。

参考文献

- [1] GB 50054—2011低压配电设计规范[S].
- [2] GB 50055—2011通用用电设备配电设计规范[S].
- [3] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册[M]. 北京: 电力出版社, 2005.

(收稿日期: 2017-01-03) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告