

500kV 并联电抗器零序功率方向保护的运行分析

王维俭 清华大学(100084) 黄润铿 云南电力局(650041)

摘要 本文对 500kV 并联电抗器的匝间短路、区内区外单相接地短路和非全相运行时, 零序功率方向保护的动作为, 进行了系统的分析, 目的是澄清是非、统一认识、改进工作。

关键词 并联电抗器 零序功率方向保护

我国 500kV 并联电抗器采用零序功率方向保护比较普遍, 运行中有成功的经验, 也有一些异常动作行为, 并引起有关技术人员认识上的不同意见, 有必要进行认真的分析, 以便统一认识。不当之处, 请同仁指正。

1 电抗器内部匝间短路

众所周知, 纵差保护不能反应电抗器匝间短路; 为了对电抗器内部匝间短路这一比较多发的故障有保护作用, 常增设零序功率方向保护, 后者还具有零序补偿阻抗 X_{oc} ^{[1][2]}。

设电抗器 A 相发生部分绕组的匝间短路, 并设该部分绕组在短路前有电压 ΔU_A ; 匝间短路采用叠加原理进行分析, 即在短路部分叠加一个故障分量电压 $-\Delta U_A$, 其它两相故障分量电压 $\Delta U_B = \Delta U_C = 0$, 所以有零序电压 $3U_0$ 为

$$3U_0 = -U_A$$

图 1 即为 A 相匝间短路分析用的零序等效电路, 其中 X_{DK1} 和 X_{DK2} 各为故障点两侧的

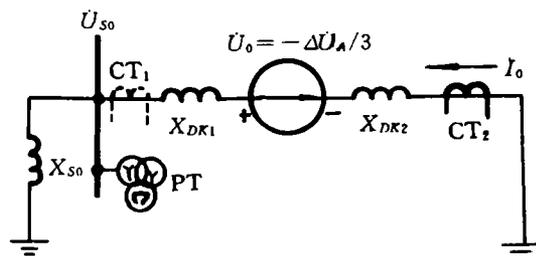


图 1 电抗器 A 相匝间短路的零序等效电路

电抗器零序电抗, X_{S0} 为系统零序电抗。

如图 1 所示, 零序电流 I_0 的正向定义为自右向左, 则有

$$I_0 = \frac{U_0}{j(X_{S0} + X_{DK1} + X_{DK2})} = -j \frac{U_0}{X_{S0} + X_{DK1} + X_{DK2}}$$

电抗器首端零序电压 U_{S0} 为

$$U_{S0} = jI_0 X_{S0} = \frac{X_{S0}}{X_{S0} + X_{DK1} + X_{DK2}} U_0 \quad (1)$$

补偿阻抗 X_{oc} 的零序压降 U_{oc} 为

$$U_{oc} = jI_0 X_{oc} = \frac{X_{oc}}{X_{S0} + X_{DK1} + X_{DK2}} U_0 \quad (2)$$

保护装置中电抗互感器的输出电压 U_{KH} 为

$$U_{KH} = jK_m I_0 = \frac{K_m}{X_{S0} + X_{DK1} + X_{DK2}} U_0 \quad (3)$$

收稿日期: 1995-08-06

《继电器》1995 年第 4 期 3

式中 K_m 为电抗互感器的互感系数。

由式 1、2、3 可知： \dot{U}_{s0} 、 \dot{U}_{oc} 和 \dot{U}_{KH} 均与 \dot{U}_0 同相。

零序功率方向保护的判据为

$$-90^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_{s0} + \dot{U}_{oc}}{\dot{U}_{KH}} \leq 90^\circ \quad (4)$$

由此可见，电抗器发生匝间短路时，上述动作判据的零序功率方向保护将正确动作。

若匝间短路的匝数很少， \dot{U}_{s0} 就很小，有可能使无补偿作用 ($\dot{U}_{oc} = 0$) 的比相式零序功率方向保护拒动；显然增设零序补偿阻抗 X_{oc} ，引入补偿电压 \dot{U}_{oc} ，将提高匝间短路的灵敏度。但是 X_{oc} 和 \dot{U}_{oc} 的引入是否影响电抗器外部接地短路时保护的选择性和内部接地短路时保护的灵敏度？下文分析之。

2 电抗器内部单相接地短路

设电抗器 A 相某点发生单相接地短路，故障点将电抗器分成两部分，即 X_{DK1} 和 X_{DK2} ，与图 1 相似，但无纵向电压 ΔU_A ，代之以横向零序电压 \dot{U}_0 ，且有

$$\dot{U}_0 = -j\dot{I}_0 X_{0\Sigma} \quad (5)$$

式中 $X_{0\Sigma}$ 为自故障点观察到的零序总电抗。

内部单相接地短路的零序等效电路如图 2 所示。

若零序电流取自电抗器中性点侧 (即 \dot{I}_{N0})，

$$\text{则有 } \dot{U}_{s0} = -j\dot{I}_{M0} X_{S0} \quad (6)$$

$$\dot{U}_{oc} = j\dot{I}_{N0} X_{oc} \quad (7)$$

$$\dot{U}_{KH} = j\dot{I}_{N0} K_m \quad (8)$$

忽略系统各部分的电阻，图 2 为纯电抗网络，在 \dot{U}_0 作用下， \dot{I}_{M0} 与 \dot{I}_{N0} 必同相，则 \dot{U}_{oc} 与 \dot{U}_{KH} 相位一致， \dot{U}_{s0} 为反相；根据动作判据式 4，

当 $|\dot{U}_{oc}| > |\dot{U}_{s0}|$ ，满足式 4，保护正确动作；

若 $|\dot{U}_{oc}| < |\dot{U}_{s0}|$ ，不满足式 4，保护拒动。

不难看出，具有补偿原理的零序功率方向

保护不能对电抗器的单相接地短路有 100% (无动作死区) 的保护作用，它主要用于匝间短路的保护，至于单相接地短路应另有纵差或零序差动保护。

零序功率方向保护对电抗器单相接地短路究竟能保护多大范围？设 α 为自电抗器中性点算起的故障部分绕组占全绕组的份额，并设

$$X_{oc} = \alpha X_{DK}, \quad \alpha < 1.0 \quad (9)$$

由临界条件 $|\dot{U}_{oc}| = |\dot{U}_{s0}|$ ，可导出在已定的 X_{oc} 下，保护反应单相接地短路的最大能力，即

$$|\dot{I}_{N0} X_{oc}| = |\dot{I}_{M0} X_{S0}| \quad (10)$$

$$\text{因为 } \dot{I}_{N0} X_{DK2} = \dot{I}_{M0} (X_{S0} + X_{DK1})$$

$$\text{所以 } \dot{I}_{M0} = \frac{X_{DK2}}{X_{S0} + X_{DK1}} \dot{I}_{N0}$$

以上式代入式 10，可得

$$X_{oc} = \alpha X_{DK} = \frac{X_{S0} X_{DK2}}{X_{S0} + X_{DK1}} \quad (11)$$

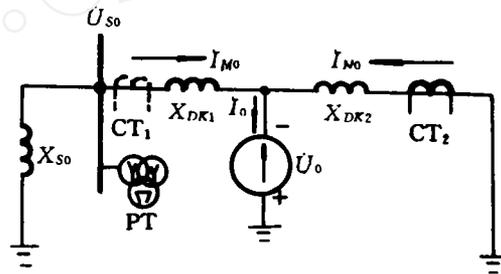


图 2 电抗器内部 A 相接地短路的零序等效电路

由此可知该保护所能反应的最大单相接地短路的保护范围 X_{DK2} 为

$$X_{DK2} = \frac{\alpha X_{DK}(X_{S0} + X_{DK1})}{X_{S0}} = \frac{\alpha X_{DK}(X_{DK} + X_{S0})}{\alpha X_{DK} + X_{S0}} \quad (12)$$

由式 12 可清楚看到,零序功率方向保护所能反应的单相接地短路保护范围(X_{DK2})与系统零序电抗 X_{S0} 、电抗器电抗 X_{DK} 和补偿电抗 X_{α} (即 αX_{DK}) 有关,一般选取 $\alpha = 0.6 \sim 0.8$, (当 $X_{S0} = 0$ 时才有 $X_{DK2} = X_{DK}$)。

若零序电流取自电抗器首端的互感器 CT1, 则有

$$U_{0C} = jI_{M0}X_{0C} \quad (13)$$

$$U_{KH} = jI_{M0}K_m \quad (14)$$

$$U_{S0} = -jI_{M0}X_{S0} \quad (15)$$

不难看出:仍有 U_{S0} 与 U_{0C} 、 U_{KH} 反相,而 U_{0C} 与 U_{KH} 同相;同理根据动作判据式 4 有:

$$|U_{0C}| > |U_{S0}| \text{ 时,继电器正确动作,}$$

$$|U_{0C}| < |U_{S0}| \text{ 时,继电器拒动.}$$

作为动作临界条件,有

$$|U_{0C}| = |U_{S0}|$$

$$\text{即 } X_{0C} = X_{S0} \quad (16)$$

上式表示:当电流取自电抗器首端时,为了内部单相接地故障保护能正确动作,补偿电抗 X_{0C} 不得小于系统零序电抗 X_{S0} ;由于 X_{S0} 随运行方式而变,而 X_{0C} 一般不能在运行中随时改变,因此若为保证零序功率方向保护在电抗器内部单相接地短路能正确动作,要求

$$X_{0C} \geq X_{S0, \max} \quad (17)$$

式中 $X_{S0, \max}$ 为最小运行方式下的最大系统零序电抗。

通过以上分析可知:对于电抗器内部单相接地短路,零序功率方向保护的电流取自中性点侧(CT2)或首端(CT1),它的补偿电抗 X_{0C} 的整定是不同的,分别按式 11 或式 16 确定;还应明确,当电流取自电抗器首端(CT1)时,补偿电抗 X_{0C} 直接由系统零序电抗 X_{S0} 决定,它比电流取自中性点侧时更受系统运行方式的影响。但是该保护的匝间短路动作行为与电流取自 CT1 或 CT2 无关。

3 电抗器在非全相运行时零序功率方向保护的動作分析

当电抗器联接的超高压线路单相跳闸时,电抗器呈现非全相运行状态,此时零序功率方向保护会不会误动作?实际运行中动作行为不同。

设 A 相跳闸,断口处有电压为

$$\Delta U_A \neq 0, \quad \Delta U_B = \Delta U_C = 0$$

$$\text{故有 } \Delta U_{A0} = \Delta U_A/3 = \Delta U_{A1} = \Delta U_{A2}$$

$$\text{并有 } I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = 0$$

$$I_{A1} = E_A/j[X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma}]$$

式中 E_A 为系统 A 相正序电势;

$X_{1\Sigma}$ 、 $X_{2\Sigma}$ 、 $X_{0\Sigma}$ 为自断口处观察到的三序总电抗。

若零序功率方向继电器的电压取自母线侧(即从母线互感器取 $3U_0$)、电流取自电抗器首端(I_{M0}),则

$$U_{S0} = -jI_{M0}X_{S0} \quad (18)$$

$$\dot{U}_{OC} = j\dot{I}_{M0}X_{OC} \quad (19)$$

$$\dot{U}_{KH} = j\dot{I}_{M0}K_m \quad (20)$$

由式4和式18~20可知:当 $X_{OC} < X_{S0}$ 时, $|\dot{U}_{S0}| > |\dot{U}_{OC}|$,式4的分子分母异号,不满足动作判据,即线路单相跳闸、电抗器非全相运行时,所述零序功率方向保护不会误动作。

若零序功率方向继电器的电压仍取自母线侧,但电流取自电抗器中性点侧(\dot{I}_{N0}),则

$$\dot{U}'_{S0} = -j\dot{I}_{M0}X_{S0} \quad (21)$$

$$\dot{U}_{OC} = j\dot{I}_{N0}X_{OC} = -j\dot{I}_{M0}X_{OC} \quad (22)$$

$$\dot{U}_{KH} = j\dot{I}_{N0}K_m = -j\dot{I}_{M0}K_m \quad (23)$$

根据式4,上述三式满足动作判据,零序功率方向保护必将误动。

若零序功率方向继电器的电压取自线路侧,电流取自电抗器首端(\dot{I}_{M0}),则

$$\dot{U}'_{S0} = j\dot{I}_{M0}X_{DK} \quad (24)$$

$$\dot{U}_{OC} = j\dot{I}_{M0}X_{OC} \quad (25)$$

$$\dot{U}_{KH} = j\dot{I}_{M0}K_m \quad (26)$$

这时零序功率方向保护必将在非全相运行时误动作。

若该继电器的电压仍取自线路侧,而电流取自中性点侧(\dot{I}_{N0}),则

$$\dot{U}'_{S0} = j\dot{I}_{M0}X_{DK} \quad (27)$$

$$\dot{U}_{OC} = j\dot{I}_{N0}X_{OC} = -j\dot{I}_{M0}X_{OC} \quad (28)$$

$$\dot{U}_{KH} = j\dot{I}_{N0}K_m = -j\dot{I}_{M0}K_m \quad (29)$$

当 $X_{OC} < X_{DK}$ (注意, X_{DK} 应包括电抗器中性点的小接地电抗)时, $\dot{U}'_{S0} + \dot{U}_{OC}$ 与 \dot{U}_{KH} 异号,不满足动作判据,零序功率方向保护不会误动。

由上可知:电抗器非全相运行时零序功率方向保护是否误动的问题,与补偿电抗 X_{OC} 的整定、电压和电流取自何处有关,在使用时必须倍加小心。

4 几点结论

通过上述分析,可得以下结论:

(1) 零序功率方向保护,无论其电压取自母线侧或线路侧,其电流取自首端或中性点,采用零序补偿电抗 X_{OC} ,对电抗器匝间短路保护灵敏度的提高,大有好处,但 X_{OC} 的整定应兼顾单相接地短路特别是非全相运行时的要求。

此保护主要服务于电抗器匝间短路的保护,因此 X_{OC} 的整定一般不应从单相接地短路保证动作而选取 $X_{OC} \geq X_{S0, \max}$,而应按下式选取

$$X_{OC} \approx (0.6 \sim 0.8)X_{DK}$$

其中 X_{DK} 为包括小接地电抗在内的电抗器零序电抗。

(2) 按上述整定 X_{OC} 的补偿型零序功率方向保护,对内部单相接地短路,只有部分保护作用(有动作死区),应另设纵差或零序差动保护。

从减小系统运行方式(指 X_{S0} 的变化)对接地短路保护性能的影响出发,零序功率方向保护的电流宜取自电抗器中性点侧。(下转12页)

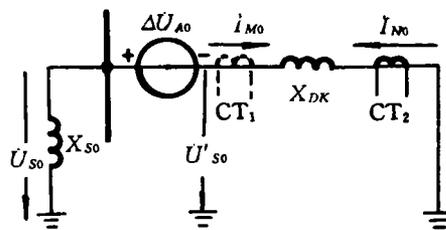


图3 非全相运行时(A相断开)
电抗器的零序等效电路

6 结论

(1) 本文系统地研究了继电保护整定计算中短路故障的分块算法, 扩大了解题规模, 并提高了整定计算速度。

(2) 本文算法结果精确、物理概念清晰, 具有互感与无互感线路处理方法统一、继电保护整定计算中各种故障计算公式统一、易于编制程序等特点。

表 1 算例计算结果

电气量	分量	正序	负序	零序
	补偿电流	I_c	-0.736	-0.736
I_i		-0.509	-0.509	-0.500
I_{f1}		-j0.059	-j0.059	-j0.150
$I_d = 1.0$ 时的 B、C 母线电压	$V_{B(r)}^{(d')}$	j0.108	j0.108	j0.050
	$V_{C(r)}^{(d')}$	j0.137	j0.137	j0.125
故障点入端阻抗 $Z_{d(r)}$		j0.167	j0.167	j0.208
故障点注入短路电流 $I_{d(r)}$		j1.844	j1.844	j1.844
B、C 母线实际电压	$V'_{B(r)}$	0.801	-0.199	-0.092
	$V'_{C(r)}$	0.747	-0.253	-0.230
故障线路电流 $I_{d(r)}$		j1.844	j1.844	j1.844

参考文献

- 1 东北电力学院、东北电管局. 高压电网继电保护整定计算软件包. 1991 年
- 2 曹国臣. 零序电流保护整定计算的新算法. 继电器, 1995. 1

(上接 6 页)

(3) 为了线路单相跳闸, 电抗器非全相运行时, 零序功率方向保护不误动, 其电压取自母线侧时, 电流应取自电抗器首端, 且必须满足 $X_{oc} < X_{s0}$ 。如果电压取自线路侧, 则电流应取自中性点侧, 且应使 $X_{oc} < X_{DK}$ 。

对于电压取自母线侧且电流取自中性点侧, 或者电压取自线路侧且电流取自电抗器首端的情况, 则不管 X_{oc} 如何整定, 零序功率方向保护必在非全相运行时误动作, 这已为运行实践证明, 请各单位务必认真处理。

参考文献

- 1 沈建石、胡浩明. 电力自动化设备. 1982. 2
- 2 沈建石、夏俊. 电力自动化设备. 1986. 1