

solkor Rf 线路纵差保护的 analysis

广东省电力勘测设计院 张华贵

英国Reyrolle厂生产的Solkor Rf线路纵差保护,其中带有隔离变压器的15kV产品,在110kV珠海—澳门双回路短线5.43公里上运行,从1984年7月1日投运以来,共经受了区外短路11次(不含澳门侧短路)纵差保护没发生误动作,保护正常可靠。

一、引进纵差保护选型比较

表一 主继电器比较

项 目	(日) HCB—6	(英) Solkor Rf	(英) Translay S
1.动作时间	20ms	40ms	30ms
2.导引线电容	有电容补偿	无电容补偿	无电容补偿
3.动作电流	与故障相无关	与故障相有关	与故障相有关
4.穿越k、3 稳定性	用制动线圈	用非线性电阻	用非线性电阻
5.单侧电源时	两侧能掉闸	两侧能掉闸	两侧能掉闸
6.制造上	较复杂	简单	复杂
7.厂家对CT要求	5 P30	Class‘X’级	Class‘X’级
8.厂家对导引线要求	10kV/15kV	5kV/15kV	5kV/15kV

表二 导引监视装置比较

项 目	HCB—6	Solkor Rf	Translay s
1.导引线短路	可监视	可监视	可监视
2.导引线开路	可	可	可
3.导引线交叉	可	可	可
4.导引线接地	可	不可	不可
5.制造上	较复杂	简单	复杂

根据上述日本生产的HCB及英国生产的Solkor Rf及Translay S三种国外纵差的比较,从简单可靠方面考虑,珠—澳线选取Solkor Rf。

二、Solkor Rf继电器的动作分析

Solkor Rf线路纵差保护,外部短路不动作,内部短路动作,详见参考文献1。今进一步分析在两侧电源大小不等时,线路内部短路继电器的动作。

图中应用克希荷夫第一、第二定律列出方程式

$$\because U_{0A} = U_{w0}$$

$$U_{OA} = i_1 R_a + i_3 R,$$

$$U_{WO} - U_{2P} = -i_3 R_r + i_2 (2R_P + R_a) + i_3' R,$$

$$U_{2P} = U_{PD} = i_1' R_a + i_3' R,$$

$$\text{又} \because i_1 = i_2 + i_3$$

$$i_3' = i_2 + i_1'$$

制造上, 当选取 $R_a = 2R_P$

$$\text{可得出 } i_3 = i_3' = \frac{i_1 + i_1'}{2} \text{ 电流相等}$$

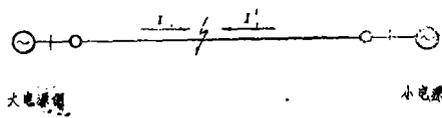


图 1



图 2

内部短路 $Solk_{01}$ R_f 正半波等效回路图 2 所示, 因 $i_3 = i_3'$, 当两侧 R_r 继电器动作时, 归算至 CT 二次侧总的动作电流为 $2I_{set}$, 它是由两侧不同大小的电流 I_1 和 I_1' 供给, 故在大小电源时:

$$\frac{(I_1 + I_1')_{DZ}}{n_{CT}} = 2I_{set}$$

式中, I_{set} 见表四值

$$\text{当 } I_1 = I_1' \text{ 时, } \frac{I_{1DZ}}{n_{CT}} = I_{set}$$

单侧电源时, 无负荷情况下 $I_1' = 0$ $I_{1DZ}/n_{CT} = 2I_{set}$, 见表三值。

表三

公共匝数	No	二次交流动作值		Rr 直流动作值	
N = 3	珠海侧 (供侧)	I_{AO}	2	安	11.7 毫安
		I_{BO}	2.5	安	11.7 毫安
		I_{CO}	3.12	安	11.6 毫安
		I_{AB}	9.7	安	11.6 毫安
		I_{Bc}	10	安	11.6 毫安
		I_{cA}	4.9	安	11.6 毫安
		I_{BBc}			
N = 3	澳门侧 (受侧)	I_{AO}	1.85	安	11 毫安
		I_{BO}	2.22	安	11 毫安
		I_{CO}	3	安	11 毫安
		I_{AB}	9	安	11 毫安
		I_{Bc}	8.8	安	11 毫安
		I_{cA}	4.6	安	11 毫安
		I_{ABc}			

实际上, 厂家为了增加外部短路纵差保护的稳定性, R_a 略大于 $2R_p$, 则可得 $i_s \approx i'_s$ 。

单侧电源线路内部故障纵差保护动作值的测定, 可在一侧加入电流即模拟无负荷情况下测出 $2I_{s'}$ 值。以珠澳线路纵差保护为例。

两侧电源线路内部故障纵差保护动作值的测定, 可在两侧加入同相位同数值电流即模拟 $I_1 = I_1'$ 时测出 $I_{s'}$ 值见表四所示。

表四

有效匝数	动作安匝	计算交流动作值	实 测
I_{AO} 5	5.5	1.1 安	1.09 安
I_{BO} 4	5.5	1.375 安	1.35 安
I_{CO} 3	5.5	1.85 安	1.8 安
I_{AB} 1	5.5	5.5 安	5.5 安
I_{BC} 1	5.5	5.5 安	5.5 安
I_{CA} 2	5.5	2.75 安	2.75 安
I_{ABC} $\sqrt{3}$	5.5	3.15 安	3 安

Solkor Rf 的电流制动特性见图 3、图 4 所示。

由于 Solkor Rf 在综合变流器的付方并联有非线性限压电阻, 穿越性故障时, 穿越电流愈大, 则继电器的动作电流也增大, 从而保证了穿越故障的稳定性。

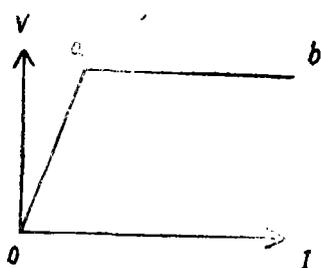


图 3 综合变流器理想限压特性

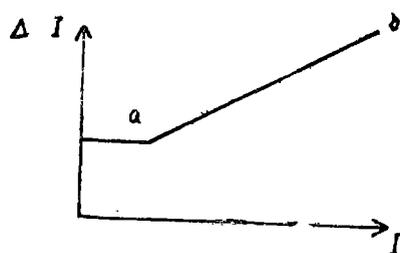


图 4 继电器理想制动特性

Solkor Rf 非线性限压电阻的作用

1. 当外部短路时, 穿越电流高达 50 倍额定电流下, 两导引线芯间的继电器电压小于 500 伏, 使导引线心间电压不会过高。

2. 当外部短路时, 穿越电流高达 50 倍额定电流下, 继电器因带有制动特性动作电流增大, 保证了继电器的稳定性。

单侧供电负荷电流的影响

Solkor Rf 线路纵差, 单侧供电时, 由于负荷电流的范围是 0—5 安, (二次电流值)。当内部短路时, 由于继电器非线性限压电阻的影响, 即继电器具有制动特性, 当负荷电流增大时, 继电器的交流动作值增大。如测得负荷电流为 0 时, $I_{AODZ} = 2$ 安, 负荷电流为 3 安时, $I_{AODZ} = 2.7$ 安。此时, 继电器的动作值大于表三无负荷情况下的动作值。

Solkor Rf对导引线的电阻及芯间电容是有一定的限制的, 厂家规定带隔离变的15kV耐压的产品, 当隔离变抽头取“1”时, 即1:1, 最大回路电阻为1760欧, 最大芯间电容1μf。

试验时, 单侧电源以AO单相接地故障为例, 最大回路电阻为1760欧, 芯间电容1μf时, $I_{AODZ} = 2.2$ 安, 和表四所列的交流动作值相近。而当芯间电容取2μf, 大于规定值1μf时, 则交流动作值增大至3.8安。可见超过最大芯间电容允许值, 则动作电流增大。

三、Solkor Rf对CT有一定的要求, 厂家规定:

1. CT的拐点

$$V_x \geq \frac{50}{I_H} + \frac{I_{KMox}}{n_{r}} (R_{c,r} + 2R_L)$$

2. 两侧CT的二次励磁电流的差值, 在CT输出电压为 $\frac{50}{I_H}$ 伏时, 不应大于 $\frac{1}{20}$ 安。

例如CT = 5安二次值, 则在10伏时, 不应大于0.25安。

从第一点要求看, 是防止外部短路最大电流时CT不致饱和而引起误动作。

从第二点要求看, 是防止外部短路时, 两侧CT不平衡电流应不大于继电器的最小动作值。由于Solkor Rf具有制动特性, 外部短路除防止 I_{KMox} 的误动作外, 还要防止外部短路电流较小值时, 此时制动作用不明显, 防止不平衡电流大于继电器最小动作值而误动, 在最不利的情况下, 综合变流器公共匝数取5匝, 即A—0匝数为7匝, 动作电流 $2I_{s,r} = 1.6$ 安为最小动作值, 考虑到两侧CT非故障相吸出电流误差, 两侧引线 $2R_L$ 大小的误差, 两侧非线性限压电阻和继电器的误差以及短路电流的暂态等因素。厂家定为10伏时, 两侧CT的励磁电流差不应大于0.25安。推荐用Class ‘X’级CT能很好地满足以上两点要求。

四、对导引线的要求

当电力线路发生接地故障时, 电力线路对保护安装处会产生地电位升 V_g , 另一方面, 电力线路的 $3I_0$ 电流会对导引线产生纵向感应电势 V_M , 如果导引线芯是两端绝缘的, 则导引线心对地的电压差为 $V = \dot{V}_g + 0.5 \dot{V}_M$ 的向量和

式中 $V_g = 3I_0 R_g$ R_g 为变电站的接地电阻, $3I_0$ 为流过接地网 R_g 的三倍零序电流值。 $\dot{V}_M = j\omega M e 3I_0$, $j\omega M$ 为单位长度电力线路与导引芯线间的互感阻抗, L 为线路长度, K 为屏蔽系数, 架空线路上的避雷线的屏蔽作用没有电力电缆金属外护皮的屏蔽作用大, 由于避雷线的屏蔽作用小, 在110~220kV的架空线路上采用导引线保护时, 导引线芯对地的耐压水平一般取15kV/分, 至于电力电缆, 其外皮屏蔽作用大, 而且 $3I_0$ 由于电力电缆金属外皮的分流作用而下降, 其导引线芯对地的耐压水平有可能选取5kV/分级。110kV珠澳线为架空线路, 其导引线选取15kV/分级。

Solkor Rf线路纵差, 为防止导引线故障保护误动作, 用电流起动元件或电压起动元件闭锁出口掉闸。当电流起动元件的灵敏度足够时, 可取用电流起动元件, 当电流起

动元件的灵敏度不足时，应取用低电压起动元件。

Solkor Rf 线路纵差的导引线监视装置，是一个单向性的直流回路。送侧为整流电源，经耐15kV的整流变接入。因而送侧导引监视装置体积较大。受侧直流继电器经二极管串接。继电器耐压15kV，导引线正常工作时，导引回路直流流入受侧监视继电器，当导引线开路，短路或芯线反接，受侧监视继电器无电流。这种导引线监视方法简单。但导引线故障后，两侧要通电话交换信息。

五、Solkor Rf 对线路电容电流的整定考虑

大电流接地系统，C相单相接地，非故障线路的非故障相A、B流有电容电流 i_c ，当非故障线路装有Solkor Rf线路纵差时，经综合变流器的安匝数为：

$$\left| i_c W_{A0} + i_c e^{-j120^\circ} W_{B0} \right| < \frac{W_{A0} I_{AODZ}}{K_H}$$

$$i_c < \frac{W_{A0} I_{AODZ}}{K_H | W_{A0} + W_{B0} e^{-j120^\circ} |}$$

式中： $W_{A0} = 5$ ， $W_{B0} = 4$ 匝

$K_H = 3$ 考虑暂态的可靠系数

则得非故障线路保护不误动的

$$i_c < \frac{1}{3} I_{AODZ} \quad I_{AODZ} \text{ 见表三值}$$

大电流接地系统，非故障线路的Solkor Rf应不动作，而故障线路的Solkor Rf则动作掉闸。（图5为单侧供电）

小电流接地系统中，C相一点接地，非故障线路的非故障相A、B流有电容电流 $\sqrt{3} i_c$ ，当非故障线路装有Solkor Rf线路纵差时，经综合变流器的安匝数为：

$$\left| \sqrt{3} i_c W_{A0} + \sqrt{3} i_c e^{-j120^\circ} W_{B0} \right| < \frac{W_{A0} I_{AODZ}}{K_H}$$

$$i_c < \frac{W_{A0} I_{AODZ}}{\sqrt{3} K_H | W_{A0} + W_{B0} e^{-j120^\circ} |}$$

式中： $W_{A0} = 5$ ， $W_{B0} = 4$ 匝

$K_H = 3$ ，考虑暂态的可靠系数

则得非故障线路保护不误动的 $i_c < \frac{1}{9} I_{AODZ}$

$$\text{式中 } i_c = \frac{V}{\lambda_c} \phi \text{， } I_{AODZ} \text{ 见表三值。}$$



图4

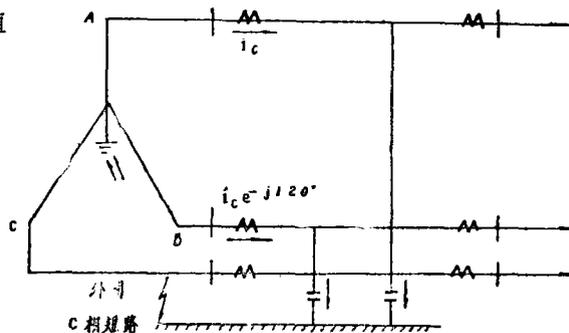


图5

（下转72页）

形滚切规律布置,并计算标准齿(精切齿)C点对垂直中心线偏移值X,安装对刀时按此偏移量X调正滚刀位置,图5所示。因擒纵轮的齿数较少,其外径尺寸不大,故可将刀具齿形放大50倍画在有机玻璃图板上,以供磨刀和检验使用。

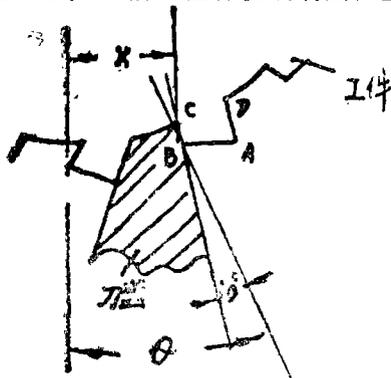


图 4

角的方法解决。滚刀图见图6所示,材料用YG6X。

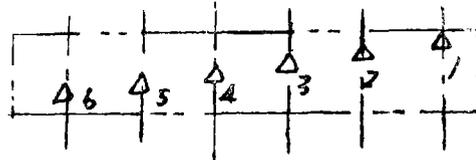


图 5

5. 关于滚刀重磨问题:

由于滚刀是在光学曲线磨床上加工齿形,齿背曲线采用直线型,重新刃磨后角变化大,引起齿形畸变,可采用适当加大前角的方法解决。

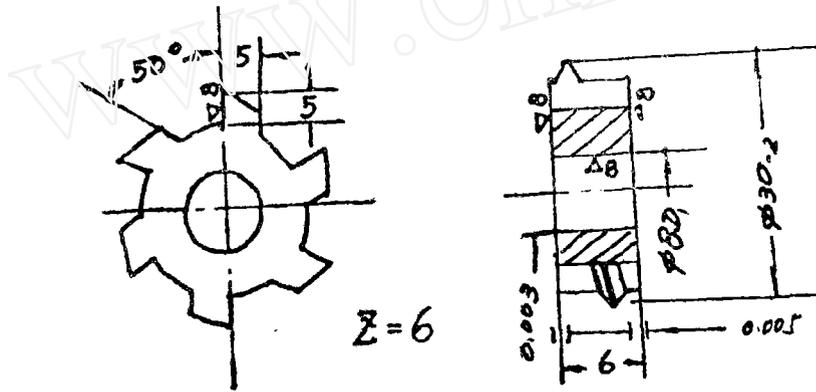


图 6

(上接封三)

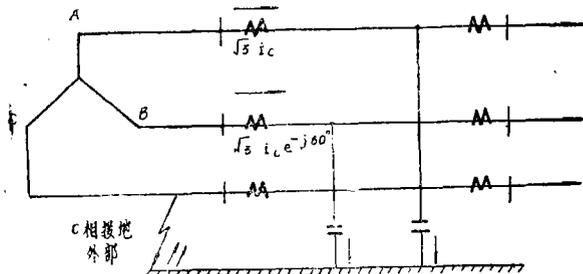


图 6

应注意故障线路除了非故障相流过电容电流外,其故障相还流有全网的电容电流,故障线的 Solkor Rf 的 I_{AODZ} 整定值若躲不过则可能误动作(故障线路还须校核 A 相一点接地)。

现广东省已运行有 110kV 2 回 Solkor Rf 及 10kV 2 回 Solkor Rf 的线路纵差保护并取得一

些经验。广东的珠海及深圳两个特区将安装更多的 Solkor Rf 线路纵差保护。

参考文献:

1. Solkor Rf 线路纵差保护的应用 《继电器》1985年1期 许昌继电器研究所

表1 发电机中性点接地方式和基波零序电压接地保护算例

(插在87年第一期6页后)

		1026MV A	300MW	1026MV A为国外的, 300MW为国产机组		
原始数据	发电机额定容量	1026MV A	300MW			
	发电机额定电压	22k V	18 kV			
	频率	60Hz	50Hz			
	发电机各相对地电容 C_f	0.343 μ f/ ϕ	0.174 μ f(a) 0.176 μ f(c)	0.178 μ f(b)	300MW发电机实测三相对地电容不相等	
	主变高低压绕组间耦合电容 C_M	0.006952 μ f/ ϕ	0.0088 μ f/ ϕ	0.0047 μ f/ ϕ	高压侧电压各为345kV 220 kV 500kV	
	发电机机端每相外接电容 C_e	0.0333 μ f/ ϕ	0.016 μ f/ ϕ	0.116 μ f/ ϕ	0.116 μ f中包括冲击波吸收电容0.10 μ f	
	主变压器电压变比	21.5/345 k V	18/220 kV	18/500kV		
高压侧接地 故障时最大零序电压 E_{H0}		50 kV	60kV	115kV	由系统实际情况决定, 一般为0.33~0.60高压侧相电压	
	发电机最高允许相对地电压 $E_{\phi max}$	22 kV	18kV	18 kV		
单相接地计算电容	$3C_f = C_a + C_b + C_c$	1.029 μ f	0.528 μ f	0.528 μ f		
	$3C_x = 3(C_f + C_e)$	1.1289 μ f	0.576 μ f	0.876 μ f		
	$X_{co} = 1/\omega C_x$	7050 Ω	16587 Ω	10908 Ω		
	单相接地电容电流 $I_c = 3\omega C_x U_e \sqrt{3}$	5.41A	1.88A	2.89A	均超过18kV及上的安全接地电流1A	
根据选传传递过弧电压圈条RL	高压侧接地故障时允许传递到发电机的零序电压 $E_t = E_{\phi max} - U/\sqrt{3}$	9.3k V	7.6kV	7.6kV	因为 $I_c >$ 安全接地电流, 采用消弧线圈补偿, 当完全补偿时消弧线圈 $X_L = 1/3\omega C_x = X_{co}/3$	
	根据传递过电压条件决定的发电机最大等值零序阻抗 $Z_0 = E_t/\omega C_M \sqrt{E_{H0}^2 - E_t^2}$	72230 Ω	46213 Ω	44879 Ω		
	由传递过电压条件决定的消弧线圈常数 $K = \frac{2Z_0}{3X_L}$	20.5	5.57	8.23	假设发电机介质损耗等值电阻 $R_{co} \approx 3R_L$	
	消弧线圈回路电阻 $R_L = X_L/K$	114.6 Ω	993 Ω	147 Ω	此电阻包括消弧线圈自身电阻及附加电阻, 通过电流很小	
谐振接地方式下的中性和保护点位移值	三相电容不对称系数 $K_{co} = (C_a + aC_b + a^2C_c)/3C_f$	0.00011*	0.00521	0.00342	*由已经正常工况下中性点基波电压1.4伏(一次值)推出	
	中性点不接地时正常中性点基波电压 $U_{d0} = K_{co} U_e/\sqrt{3}$	1.4V	54.1 V	35.5V	300MW机根据三相电容不对称求出的 U_{d0} 远大于1.4V	
	消弧线圈等效并联电导 $g_L = R_L/(R_L^2 + X_L^2)$	2.67×10^{-6}	3.15×10^{-6}	3.29×10^{-6}		
	发电机三相对地介质损耗并联电导 $g_{co} = R_{co}/(R_{co}^2 + X_{co}^2)$	6.21×10^{-6}	9.45×10^{-6}	9.87×10^{-6}	$R_{co} \approx 3R_L, X_{co} = 3X_L, g_{co} = 3g_L$	
	补偿网络阻尼率 $d = (g_L + 3g_{co})/3\omega C_x$	0.0973	0.348	0.24	也可适当改变 X_L 和 R_L , 使 d 而脱谐度 $V \approx 0$ 此时 $U_0 = U_{d0}/\sqrt{U_d^2 + d^2}$	
	谐振接地方式下中性点位移电压 $U_0 = U_{d0}/d$	14.39V (0.113%)	155.5V (1.5%)	148V (1.43%)	此电压可现场实测	
	基波零序电压保护动作值 $U_{0dz} > U_0$	5%	5%	5%	延时(躲过系统接地故障)动作于信号或跳闸	
谐振接地方式下最大接地故障电流 $3I_{0max} = 3U_e/\sqrt{3} Z_0$	0.5276A	0.6746A	0.6947A	均小于安全接地电流1A		
高地阻方接式	中性点一次接地电阻值 $R_{01} \leq 1/3\omega C_x$	2350 Ω	5529 Ω	3636 Ω		
	最大接地故障电流 $3I_{0max} \geq \sqrt{2}I_c$	7.65A	2.66A	4.09A	机组越大, 电压越高, $3I_{0max}$ 越大, 更应采用消弧线圈	
低地阻方接式	高压侧接地故障发电机中性点最大电流 $3I_{01} = 3 \cdot \frac{1.1U_{eH}}{\sqrt{3}} \omega C_M 10^3$	1.723A	1.158A	1.406A	U_{eH} 高压额定线电压(5)	
	中性点接地电阻值 $R \leq 0.05U_e/3\sqrt{3}I_0$	405.5 Ω	448.7 Ω	369.6 Ω	基波接地保护动作电压为0.05(5%)	
机端经5K Ω 单相接地	中性点一次接地电阻值 $R \leq 1.05U_e/R\sqrt{3}$	32.89A	24.3A	29.5A	如此之大, 对大型机组危害甚大! 不应推广!	
	谐地振方接式	中性点电流 $3I_0 = 3 \frac{U_e/\sqrt{3}}{Z_0 + 3R_d}$	0.4368A	0.509A	0.521A	
高地阻方接式	零序电压 $U_0 = I_0 Z_0$	*10.52kV	7.84kV (75.5%)	7.79kV (75%)	*百分值为82.8%	
	保护灵敏度 $K_{Lm} = U_0/U_{0dz}$	16.56	15.1	15	很灵敏	
	故障点功耗 $W = (3I_0)^2 R_d$	954W	1295W	1357W	很小	
	中性点电流 $3I_0 = \frac{3U_e \sqrt{3}}{3R_d + 3R_{co} \parallel (-jX_{co})}$	2.02A	1.26A	1.473A		
零序电压 $U_0 = I_0 3R_{co} \parallel (-jX_{co})$	3.358kV	4.93kV	3.79kV	百分值为26.4%, 47.4, 36.4%		
保护灵敏度 $K_{Lm} = U_0/U_{0dz}$	5.28	9.49	7.29			
故障点功耗 $W = (3I_0)^2 R_d$	20402W	7944W	10851W	与谐振接地方式比较, 功耗高达21.39倍!		
机端经20K Ω 单相接地	谐地振方接式	$3I_0$	0.288A	0.294A	2.297A	
	U_0	6.93kV	4.52kV	4.45kV	百分值各为54.56%, 43.5%, 42.8%	
	K_{Lm}	10.9	8.7	8.56		
高地阻方接式	W	1658W	1729W	1764W		
	$3I_0$	0.60A	0.45A	0.474A		
	U_0	0.997kV	1.77kV	1.22kV	百分值为7.85%, 17%, 11.8%, 比谐振接地小	
	K_{Lm}	1.57	3.4	2.35	比谐振接地方式低很多	
W	7200W	4050W	4493W	比谐振接地方式很多		

