

特高压人工交流污秽试验电源关键参数的选型计算分析

孙利朋¹, 李志愿², 蒋正龙¹, 李勤朴¹, 方 针¹

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 长沙 410007; 2. 中国新时代国际工程公司, 西安 710001)

摘要: 特高压交流污秽试验电源是进行特高压及以下电压等级被试品人工交流污秽和覆冰试验的主要设备,其参数选择是否正确直接关系到试验结果的可靠性。笔者提出了交流污秽试验电源关键参数的计算方法,并分析了各关键参数对特高压及以下电压等级被试品进行交流污秽试验的影响。计算结果表明:对不同电压等级的被试品进行交流污秽试验时,为获得理想的试验结果,应选用不同阻值的保护电阻;进行特高压被试品的交流污秽试验时,污秽试验变压器的抗短路能力至少为其额定电流的9倍,进行超高压及以下电压等级的被试品的交流污秽试验时,污秽试验变压器的抗短路能力至少为其额定电流的6倍。

关键词: 人工污秽; 特高压; 污秽; 试验电源

Calculation and Selection of the Key Parameters of Power Supply for UHV AC Artificial Contamination Test

SUN Lipeng¹, LI Zhiyuan², JIANG Zhenglong¹, LI Qinpu¹, FANG Zhen¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China;

2. China New Era International Engineering Corporation, Xi'an 710001, China)

Abstract: The power supply for ultra-high voltage (UHV) AC contamination test is a main equipment in artificial contamination and icing tests at AC UHV level or below, so the test reliability depends on the selection of its parameters. The authors put forward a method for calculating key parameters of the power supply, and analyze the influences of the key parameters on the artificial contamination test at AC UHV level or below. Calculation results show that: for different test voltage level, protective resistor with corresponding resistance should be selected in order to obtain satisfactory results of the AC contamination test; the withstand short circuit capacity of the transformer should be at least 9 times of its rated current for UHV AC contamination test, and at least 6 times for EHV or lower voltage contamination test.

Key words: artificial contamination; UHV; contamination; test power supply

0 引言

输电线路的污闪和覆冰事故是电力系统安全稳定运行的严重威胁之一,开展人工污秽和覆冰试验可以分析电网污闪和冰闪事故的原因,为电气设备外绝缘设计和选型提供数据支持^[1-6]。特高压交流污秽试验电源是进行特高压人工交流污秽和覆冰试验的主要设备^[7-9],与其他绝缘试验设备相比,它的参数要求比较苛刻,且不同国家对其参数要求也不一致,

按照中国的国家标准和 IEC 的规定^[9-11],它需要比其他型式的绝缘子试验有较高的短路电流 I_{SC} ,且 I_{SC} 要高于 6 A,最高泄漏电流脉冲的幅值 I_{lmax} 与短路电流 I_{SC} 满足 $I_{SC}/I_{lmax} \geq 11$;在被试品发生闪络时,规程^[12]要求它电压波动较小,最大波动值不宜超过 6%。

此外,原联邦德国要求其在 1 A 预放电电流下负荷端的电压降最大不超过 5%;日本要求其高压侧的短路电流在 5~6 A;原苏联要求试验设备的额定电流等于电压为 50%放电电压的泄漏电流时,试品上的电压降小于 10%^[13]。

为满足特高压设备的交流污秽和覆冰试验需

收稿日期:2015-02-13; 修回日期:2015-03-06

基金项目:国家电网公司科技项目(SGKJ[2007]871)。

Project Supported by Science and Technology Foundation of SGCC (SGKJ[2007]871).

求, 文中的交流污秽试验设备电压选为 800 kV, 从经济性出发, 交流污秽试验变压器采用上下两级串联方式, 其下级电压等级为 500 kV, 上级电压等级为 300 kV。根据国内外交流污秽试验变压器的容量选择配置要求来看, 其高压侧输出电流不小于 4 A, 因此, 其容量为 3 200 kV·A。

1 交流污秽试验电源的一次组成及各部分参数说明

一次部分的主接线图见图 1, 交流污秽试验变压器的 10 kV 电源由 220 kV 榔梨变电站经约 250 m 的 10 kV 电缆引至 10 kV 调压器 T_1 , 再经约 50 m 的 10 kV 电缆引至交流污秽试验变压器 T_2 , 当被试品发生短路时, 整个系统经保护电阻 R 接地。

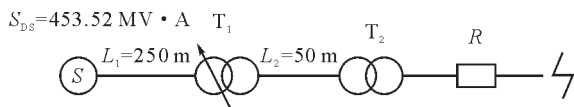


图 1 交流污秽试验电源的一次部分主接线图

Fig. 1 The primary wiring diagram of AC artificial pollution test power supply

220 kV 榔梨变电站共有 2 台 220 kV 主变, 主变参数见表 1。

表 1 变电站主变参数

Table 1 The parameters of main transformer in the substation

参数	数值	
额定电压/kV	(230±8×1.25%)/121/11	
额定容量/(MV·A)	180/180/90	
空载电流/%	0.18	
空载损耗/kW	104.00	
阻抗电压/%	H-L	44.70
	H-M	13.72
	M-L	33.34
	H-L	285.10
负载损耗/kW	H-M	528.80
	M-L	233.50

当榔梨变电站内 1 台主变独立运行时 10 kV 侧母线短路容量是 453.52 MV·A, 2 台主变并列运行时 10 kV 侧母线短路容量是 759.80 MV·A, 220 kV 侧是 10 787.7 MV·A, 110 kV 侧是 2 204.83 MV·A。在交流污秽试验过程中, 被试品经常发生闪络短路, 并由此引起榔梨变电站的 10 kV 母线电压波动与闪变。根据单台主变和 2 台主变并列运行时的短路容量来看, 当交流污秽试验发生被试品闪络短路时, 2 台主变并列运行时的电压波动值是单台主变运行时的

59.69%, 因此, 笔者仅按照发生最严重的电压波动情况计算(即单台主变运行情况)。

调压器 T_1 为上海桑普变压器厂生产, 容量为 3 200 kV·A, 其结构为柱式自耦调压器, 在其 0~50% 的电压输出中, 阻抗输出不是线性关系, 而在 50%~100% 的电压输出中, 阻抗输出基本呈线性关系, 主要阻抗参数见表 2。

表 2 调压器主要阻抗参数

Table 2 The main impedance parameters of regulator

调压器位置	$U_k/\%$	I_{1k}/A	P_k/W	I_{2k}/A
100.0% U_{2H}	1.853	322.9	50 696	305
87.5% U_{2H}	3.592	282.3	57 476	
75.0% U_{2H}	3.789	241.7	57 741	
62.5% U_{2H}	5.052	201.0	51 360	
50.0% U_{2H}	2.689	160.4	38 564	
37.5% U_{2H}	8.484	119.8	51 632	
25.0% U_{2H}	11.590	79.1	58 187	
12.5% U_{2H}	26.270	38.5	57 873	

试验变压器 T_2 为串级式变压器, 其额定电压为 10.5/(500+300) kV, 共 2 级, 下级额定电压为 10.5(低压绕组(低压绕组有 2 个, 可并可串))/500(高压绕组)/10.5(联耦绕组) kV, 上级额定电压为 10.5(低压绕组)/300(高压绕组) kV; 总额定容量为 3 200 kV·A, 其中下级的额定容量为 3 200(低压绕组)/3 200(高压绕组)/1 200(联耦绕组) kV·A, 上级额定电压为 1 200(低压绕组)/1 200(高压绕组) kV·A; 阻抗电压为下级单独使用时, $U_k\%=2\%$, $U_R\%=0.25\%$, 两级串联使用时, $U_k\%=5\%$, $U_R\%=0.25\%$ 。

2 关键参数的计算

2.1 榔梨变电站主变侧参数计算

当 220 kV 榔梨变电站的单台主变运行且交流污秽试验发生被试品闪络短路时, 主变侧的各参数计算如下:

电阻电压 $U_{R(H-L)}$ 为

$$U_{R(H-L)} = 2 \times P_{H-L} / S = 0.317\% \quad (1)$$

式(1)中: P_{H-L} 为主变高压侧对低压侧的负载损耗; S 为主变容量。

电抗电压 $U_{X(H-L)}$ 为

$$U_{X(H-L)} = \sqrt{U_{Z(H-L)}^2 - U_{R(H-L)}^2} \approx 44.70\% \quad (2)$$

式(2)中, $U_{Z(H-L)}$ 和 $U_{R(H-L)}$ 分别为主变高压侧对低压侧的阻抗电压和电阻电压。

10 kV 侧阻抗 Z_S 为

$$Z_S = \frac{U^2}{S_{ds}} = 0.243 \text{ } 1 \text{ } \Omega \quad (3)$$

式(3)中: S_{ds} 为单台主变运行时的系统短路容量; U 为主变高压侧额定电压。

由于 $U_{x(H-L)}$ 远远大于 $U_{R(H-L)}$,因此,在进行试品短路(闪络)电流计算时,忽略主变及系统的电阻。

2.2 交流污秽试验变压器参数计算

将交流污秽试验变压器分别按照:两低压线圈并联,两高压线圈串联,其变比为10.5 kV/800 kV;两低压线圈并联,仅采用污秽试验变压器的下级输出,其变比为10.5 kV/500 kV;两低压线圈串联,仅采用污秽试验变压器的下级输出时,其变比为10.5 kV/250 kV,3种方式进行短路阻抗计算,且分别将短路阻抗折算至高压侧,其计算方法为

$$Z_B \approx X_B = \frac{U^2}{S_{TR}} \times U_{dX}; \quad (4)$$

$$R_B = \frac{U^2}{S_{TR}} \times U_{dR}. \quad (5)$$

式(4)、(5)中: Z_B 、 X_B 分别为交流污秽试验变压器的短路阻抗和短路电抗; U^2 为交流污秽试验变压器的高压侧额定电压; S_{TR} 为交流污秽试验变压器的额定容量; U_{dX} 、 U_{dR} 分别为交流污秽试验变压器的电抗电压和电阻电压。

2.3 各设备短路阻抗参数汇总计算

2.3.1 各设备短路阻抗参数汇总计算方法

计算的步骤如下:

1)将调压器高压侧的阻抗、220 kV 椰梨变电站10 kV 侧阻抗和第1段电缆的阻抗相加后,按调压器输出电压变比的平方折算至调压器的低压侧;

2)将1)步骤阻抗折算值与第2段电缆阻抗值相加后,按污秽试验变压器变比的平方折算至污秽试验变压器的高压侧;

3)将2)步骤折算值与污秽试验变压器的阻抗值相加,得到各设备短路阻抗汇总值。

2.3.2 各种工况下阻抗值参数汇总

1)试验变压器两低压线圈并联,两高压线圈串联时,其变比为10.5 kV/800 kV,此时的系统阻抗参数计算结果见表3。

2)试验变压器两低压线圈并联,仅采用污秽试验变压器的下级输出时,其变比为10.5 kV/500 kV,此时的系统阻抗参数计算结果见表4。

3)试验变压器两低压线圈串联,仅采用污秽试验变压器的下级输出时,其变比为10.5 kV/250 kV,此时的系统阻抗参数计算结果见表5。

2.4 不同保护电阻下220 kV 椰梨变电站低压侧母线电压降和负载端电压降计算方法

1)进行试验变压器高压侧短路电流计算。将上

表3 试验变压器的变比为10.5 kV/800 kV时的系统阻抗计算结果

Table 3 The system impedance calculation results of test transformer under the ratio of 10.5 kV/800 kV Ω

空载输出电压位置	所有设备汇总电抗	所有设备汇总电阻
100.0% U_{2H}	15 825.9	3 976.6
87.5% U_{2H}	18 116.3	4 327.2
75.0% U_{2H}	16 585.8	4 290.2
62.5% U_{2H}	16 865.1	4 150.0
50.0% U_{2H}	16 969.4	3 857.7
37.5% U_{2H}	12 213.3	3 035.0
25.0% U_{2H}	15 825.9	3 976.6
12.5% U_{2H}	18 116.3	4 327.2

表4 试验变压器变比为10.5 kV/500 kV时的系统阻抗参数计算

Table 4 The system impedance calculation results of test transformer under the ratio of 10.5 kV/500 kV Ω

空载输出电压位置	所有设备汇总电抗	所有设备汇总电阻
100.0% U_{2H}	3 838.2	1 553.4
87.5% U_{2H}	4 732.9	1 690.3
75.0% U_{2H}	4 135.1	1 675.9
62.5% U_{2H}	4 244.2	1 621.1
50.0% U_{2H}	4 284.9	1 506.9
37.5% U_{2H}	2 427.1	1 185.6
25.0% U_{2H}	3 939.2	1 500.5

表5 试验变压器变比为10.5 kV/250 kV时的系统阻抗参数计算

Table 5 The system impedance calculation results of test transformer under the ratio of 10.5 kV/250 kV Ω

空载输出电压位置	所有设备汇总电抗	所有设备汇总电阻
100.0% U_{2H}	2 443.9	534.8
87.5% U_{2H}	2 667.6	569.1
75.0% U_{2H}	2 518.1	565.4
62.5% U_{2H}	2 555.6	523.2
50.0% U_{2H}	2 091.1	442.8
37.5% U_{2H}	2 469.2	521.6
25.0% U_{2H}	2 346.2	566.4

述系统、调压器、线路、工频试验变压器等元件的阻抗汇总值均折合至试验变压器高压侧,然后根据调压位置确定的空载电压除以回路总阻抗即为短路电流;

2)椰梨变11 kV母线的电压波动计算。按照GB/T 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》的估算方法为

$$d = \frac{R_L \Delta P + X_L \Delta Q}{U_N^2} \times 100\%。 \quad (6)$$

式(6)中: d 为电压变动; R_L, X_L 分别为电网阻抗的电阻和电抗分量,在计算时,将原试验变压器高压侧的阻抗折算至调压器原边; U_N 为系统标称电压,11 kV; ΔP 和 ΔQ 分别为短路时的有功功率和无功功率的变化量,由于在污秽试验变压器试验时,在闪络之前流过被试品(主要是绝缘子串)的电流很小,几乎为零,因此, ΔP 和 ΔQ 可以近似认为是短路时的有功功率和无功功率。

榔梨变电站 11 kV 侧母线电压相对值为 $1-d$ 。

3)负载端的电压降估算方法为

$$\Delta U = \frac{I_{\max} \sum R}{U} \times 100\% \quad (7)$$

式(7)中: $I_{\max}$ 为最大的临闪泄漏电流脉冲幅值(也称为预放电电流); $\sum R$ 为所有设备的汇总电阻和保护电阻的总和; U 为试验电压。

2.5 在各种工况下的电压计算情况分析

根据上述计算分析,调压器、试验变压器和系统的阻抗值均已确定,对短路电流和榔梨变电站 11 kV 母线电压波动值和负载端电压降的计算主要取决于保护电阻值,因此,在以下计算中主要通过保护电阻的取值计算来分析该交流污秽试验电源能否满足交流污秽试验的需要。保护电阻的选取,一方面要尽量满足试验时的各方面参数的需求;尽可能保证较大的短路电流,同时要减小对榔梨变电站 11 kV 母线电压的波动和负载端的电压降;另一方面由于交流污秽试验电压有较大的分散性,因此在对同一电压等级被试品试验时,试验电压范围要尽量大,同时要尽量仅采用一种阻值的保护电阻。

按照 GB/T 4585—2004《交流系统用高压绝缘子人工污秽试验方法》中的规定,最大的临闪泄漏电流脉冲幅值是在绝缘子串爬电比距为 25 mm/kV 的情况下,其值为 1.35 A,此时的短路电流值要大于 14.85 A,而规程中对与爬电比距大于 25 mm/kV 的绝缘子串的临闪泄漏电流脉冲幅值没有明确规定。根据绝缘子串污闪^[14-18]的研究,绝缘子串的临闪泄漏电流脉冲幅值可达到 1.5 A,此时的短路电流值要大于 16.5 A。此外,根据目前的覆冰研究^[19-21]发现,绝缘子串的临界闪络电流在覆冰情况下要明显比普通污秽情况下的要大,但目前没有权威的测量值。因此,在选取保护电阻时,要尽量获得较大的短路电流和较小的负载端电压降,以满足覆冰试验的需求。

目前,现有的国家标准中对于负载端的电压降没有明确规定,而原联邦德国的标准中明确规定在最大的临闪泄漏电流脉冲幅值(也称为预放电电流)

为 1 A 时,负载端的电压降不应超过 5%,因此,文中的负载端电压降(记为 ΔU_{1A})计算参照原联邦德国的标准进行校核(需保证调压器输出 50%及以上电压)。

2.5.1 特高压被试品的试验电压选择与计算

1 100 kV 产品的试验电压主要范围考虑为 $(1 \pm 10\%)1100/\sqrt{3}$ kV,等效于调压器的 71.4%~87.5%分接位置,750 kV 产品的试验电压主要范围考虑为 $(1 \pm 10\%)800/\sqrt{3}$ kV,等效于调压器的 51.9%~63.5%分接位置,要求保护电阻在该电压分接范围内满足短路电流的要求和榔梨变 11 kV 母线电压波动的要求。这 2 种特高压被试品加压范围内的保护电阻计算见表 6。

表 6 2 种特高压被试品加压范围内的保护电阻的计算

Table 6 The protective resistance calculations of two kinds of UHV sample under the test voltage range

调压器输出电压	保护电	短路电	$\Delta U_{1A}/\%$	榔梨变 11 kV 母	
位置	阻/ Ω	流/A		线电压波动/ $\%$	
第 1 种	100.0% U_{2H}	15 000	32.38	2.37	6.16
	87.5% U_{2H}	15 000	26.42	2.76	4.99
	75.0% U_{2H}	15 000	23.59	3.22	3.82
	71.0% U_{2H}	15 000	22.26	3.37	3.50
	62.5% U_{2H}	15 000	19.71	3.77	2.82
	50.0% U_{2H}	15 000	18.36	4.51	1.89
第 2 种	100.0% U_{2H}	12 000	35.57	2.00	7.06
	87.5% U_{2H}	12 000	28.70	2.33	5.75
	75.0% U_{2H}	12 000	25.81	2.72	4.44
	71.0% U_{2H}	12 000	24.32	2.84	4.07
	62.5% U_{2H}	12 000	21.53	3.17	3.30
	50.0% U_{2H}	12 000	20.65	3.76	2.25

从表 6 中数据可以看出:对于特高压绝缘子的污秽试验,仅考虑调压器的 50%及以上的分接位置,保护电阻采用 2 种,分别为 15 k Ω 和 12 k Ω 。对于 1 100 kV 被试品的试验,当选用 15 k Ω 的保护电阻时,在其试验电压范围内,榔梨变 11 kV 母线侧的电压波动不超过 5%,负载端的电压降不超过 4%,短路电流 22.3~26.4 A,可以满足交流污秽试验的需求,同时也为覆冰试验留有裕度。

对于 750 kV 被试品的试验,当选用 12 k Ω 的保护电阻时,在其试验电压范围内,榔梨变 11 kV 母线侧的电压波动不超过 4%,负载端的电压降不超过 4%,短路电流 20.6~21.5 A,也可以满足交流污秽试验的需求,同时也为覆冰试验留有裕度。

2.5.2 500 kV 和 330 kV 电压等级被试品的试验电压选择与计算

在进行 500 kV 和 330 kV 被试品试验时,仅需要采用试验变压器的下级,且其低压 2 个线圈并联

接线,此时的试验变压器变比为 10.5 kV/500 kV。

500 kV 被试品的试验电压主要范围考虑为 $(1\pm 10\%)550/\sqrt{3}$ kV,等效于调压器的 57.16%~69.86%分接位置,330 kV 产品的试验电压主要范围考虑为 $(1\pm 10\%)365/\sqrt{3}$ kV,等效于调压器的 37.93%~46.36%分接位置,要求保护电阻在相应电压分接范围内满足短路电流和榔梨变 11 kV 母线电压波动的要求。500 kV 和 330 kV 被试品加压范围内保护电阻的计算结果见表 7。

表 7 500 kV和330 kV被试品加压范围内保护电阻的计算结果

调压器输出电压位置	保护电阻/ Ω	短路电流/A	$\Delta U_{1A}/\%$	榔梨变 11 kV 母线电压波动/%	
第 1 种	100.0% U_{2H}	10 000	41.07	2.31	2.35
	87.5% U_{2H}	10 000	34.69	2.67	2.32
	75.0% U_{2H}	10 000	30.28	3.11	1.64
	71.0% U_{2H}	10 000	28.69	3.45	1.54
	62.5% U_{2H}	10 000	25.45	3.72	1.26
	50.0% U_{2H}	10 000	21.84	4.60	0.58
	37.5% U_{2H}	10 000	15.42	5.97	0.46
	25.0% U_{2H}	10 000	10.27	9.20	0.19
第 2 种	100.0% U_{2H}	5 000	65.84	1.31	5.43
	87.5% U_{2H}	5 000	53.38	1.53	5.08
	75.0% U_{2H}	5 000	47.76	1.78	3.75
	71.0% U_{2H}	5 000	45.14	1.94	3.51
	62.5% U_{2H}	5 000	40.11	2.12	2.01
	50.0% U_{2H}	5000	37.62	2.60	1.53
	37.5% U_{2H}	5 000	24.67	3.30	1.10
	25.0% U_{2H}	0	32.60	5.20	1.60

从表 7 中数据可以看出:对于 500 kV 被试品的污秽试验,仅考虑调压器的 50%及以上的分接位置,保护电阻采用 10 k Ω 时较为恰当,在其试验电压范围内,榔梨变 11 kV 母线侧的电压波动不超过 3%,短路电流超过 21.8 A,甚至可以达到 30 A,负载端的电压降不超过 4%,可以满足交流污秽试验的需求,同时也为覆冰试验留有较大的裕度。但如果保护电阻采用 10 k Ω 进行 330 kV 被试品试验时,其最小短路电流约 15 A,负载端的电压降达到 6%,难以满足污秽试验的需要,取值偏大。

对于 330 kV 被试品的试验,当选用 5 k Ω 的保护电阻时,在其试验电压范围内,榔梨变 11 kV 母线侧的电压波动不超过 2%,短路电流超过 24 A,甚至可以达到 37 A,负载端的电压降不超过 4%,可以

满足交流污秽试验的需求,同时也为覆冰试验留有较大的裕度。如果保护电阻采用 5 k Ω 进行 500 kV 被试品试验时,其最小短路电流约 37.6 A,榔梨变电站 11 kV 侧电压波动小于 4%,可以满足污秽试验的需要,也可以满足覆冰试验的短路电流裕度要求,但短路电流较大,对整个试验装置的短路冲击较大。

2.5.3 110~330 kV 电压等级被试品的试验电压选择与计算

在进行 110~330 kV 被试品试验时,仅需要采用试验变压器的下级,且其低压 2 个线圈串联接线,此时的试验变压器变比为 10.5 kV/250 kV。

330 kV 产品的试验电压范围考虑为 $(1\pm 10\%)365/\sqrt{3}$ kV,等效于调压器的 75.86%~92.72%分接位置,220 kV 产品的试验电压范围考虑为 $(1\pm 10\%)252/\sqrt{3}$ kV,等效于调压器的 52.38%~64.02%分接位置,110 kV 产品的试验电压范围考虑为 $(1\pm 10\%)121/\sqrt{3}$ kV,等效于调压器的 25.15%~30.74%分接位置,要求保护电阻在相应电压分接范围内满足短路电流和榔梨变 11 kV 母线电压波动的要求。110~330 kV 被试品加压范围内保护电阻的计算结果见表 8。

表 8 110~330 kV被试品加压范围内保护电阻的计算结果
Table 8 The protective resistance calculations of 110~330 kV samples under the test voltage range

调压器空载输出电压位置	保护电阻/ Ω	短路电流/A	$\Delta U_{1A}/\%$	榔梨变 11kV 母线电压波动/%
100.0% U_{2H}	5 000	41.32	2.21	1.82
87.5% U_{2H}	5 000	35.42	2.55	1.51
75.0% U_{2H}	5 000	30.70	2.97	1.10
62.5% U_{2H}	5 000	29.17	3.53	1.26
50.0% U_{2H}	5 000	26.80	4.35	1.03
37.5% U_{2H}	1 000	43.10	1.62	2.02
25.0% U_{2H}	1 000	33.23	2.51	1.16
12.5% U_{2H}	0	24.98	1.98	0.67

从表 8 中数据可以看出:对于 330 kV 和 220 kV 被试品的试验,当选用 5 k Ω 的保护电阻时,在其试验电压范围内,榔梨变 11 kV 母线侧的电压波动不超过 2%,短路电流超过 26 A,负载端的电压降不超过 5%,可以满足交流污秽试验的需求,也为覆冰试验留有较大的裕度。

对于 110 kV 被试品的试验,应当选用 1 k Ω 的保护电阻,此时,在其试验电压范围内,榔梨变 11 kV 母线侧的电压波动不超过 3%,短路电流超过 33 A,甚至可以达到 43 A,负载端的电压降不超过

3%,可以满足交流污秽试验的需求,同时也为覆冰试验留有较大的裕度。

3 交流污秽试验电源抗短路能力计算

对于不同电压等级的被试品,短路电流峰值系数为

$$K_F = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_i}} \quad (8)$$

式(8)中, T_i 为时间常数,且 $T_i = \Sigma X / (314 \times \Sigma R)$, ΣX 和 ΣR 分别为整个系统折算至高压侧的总电抗和电阻。

全电流峰值为

$$I_F = K_F \times I'_Z \quad (9)$$

式(9)中, I'_Z 为短路电流方均根值。

全电流最大有效值 I_F 出现在短路的第 1 周期,且 $I_F = I'_Z \sqrt{1 + 2(K_F - 1)^2}$ 。

文中对 1 100、500、330、220 kV 电压等级的被试品进行了计算,对 1 100 kV 被试品试验时的变压器变比为 10.5 kV/800 kV,对 500 kV 被试品试验时的变压器变比为 10.5 kV/500 kV,对 330 kV 和 220 kV 试验时的变压器变比为 10.5 kV/250 kV。

3.1 有保护电阻情况下,短路电流冲击电流有效值及峰值的计算

在有保护电阻情况下,对各电压等级被试品进行试验时,其全电流有效值与峰值基本一致,最大短路电流计算值见表 9。

表 9 有保护电阻时,不同电压等级被试品试验的最大短路电流值

Table 9 The maximum short-circuit current of different voltage grade samples with protective resistance

被试品电压等级/kV	调压器分接位置/%	电流峰值系数 K_F	全电流有效值/A
1 100	100	1.042 0	35.570
500	75	1.000 1	30.276
330及以下	100	1.000 0	41.320

3.2 升压变出口(无保护电阻)短路电流有效值、冲击电流有效值及峰值的计算

在无保护电阻情况下,对各电压等级被试品进行试验时,最大短路电流计算值见表 10。

3.3 试验设备抗短路能力分析

根据短路电流峰值和全电流最大有效值的计算,试验设备在有保护电阻的情况下,出现短路接地时,对于不同电压等级的被试品试验时,要求抗短路能力如下:

1)对于特高压被试品进行试验时,试验变压器

表 10 无保护电阻时,不同电压等级被试品试验的最大短路电流值

Table 10 The maximum short-circuit current of different voltage grade samples without protective resistance

被试品电压等级/kV	调压器分接位置/%	电流峰值系数 K_F	全电流峰值/A	全电流有效值/A
1 100	87.50	1.47	78.07	45.03
500	69.86	1.28	152.14	90.40
330	100.00	1.50	212.30	122.60
220	64.02	1.49	153.47	88.62

的额定电流为 4 A,要求其至少可以承受 9 倍的额定电流的短路冲击;

2)对于 500 kV 及以下被试品进行试验时,试验变压器的额定电流为 6.4 A,要求其至少可以承受 6 倍的额定电流的短路冲击。

试验设备在无保护电阻的情况下,在试验过程中出现出口短路的现象概率很小,同时,由于系统的短路阻抗很小,因此短路电流也很大,如果要求设备厂家做到这样的设备参数,将大大提高设备的造价,非常不经济,因此,在无保护电阻的情况下的短路计算仅作为一种设备极限选型的参考,其短路能力分析如下:

1)对于特高压被试品进行试验时,试验变压器的额定电流为 4 A,要求其至少可以承受 12 倍的额定电流的短路冲击;

2)对于 500 kV 及以下被试品进行试验时,试验变压器的额定电流为 6.4 A,要求其至少可以承受 20 倍的额定电流的短路冲击;

3)对于调压器,要求其至少可以承受 19 倍的额定电流的短路冲击。

4 结论

从上述计算过程来看,交流污秽试验电源在满足短路电流的需求下,需尽量选择合理阻值的保护电阻,一方面可以减小榔梨变电站 11 kV 母线的电压降,另一方面可以减小短路电流对设备的冲击。在进行不同电压等级被试品的试验时,为获得最佳的试验效果,其保护电阻取值和试验变压器的接线方式如下:

1)进行 1 100 kV 被试品试验时,试验变压器的高压侧两级串联,低压侧两级并联。保护电阻原则上选用 15 kΩ,以保证试品闪络时榔梨变电站 11 kV 母线侧电压跌落不超过 5%,负载端的电压降不超过 4%;

2)在进行 750 kV 被试品试验时,试验变压器的

高压侧两级串联,低压侧两级并联。保护电阻原则上选用 $12\text{ k}\Omega$,以保证试品闪络时榔梨变电站 11 kV 母线侧电压跌落不超过 5% ,负载端的电压降不超过 4% ;

3)在进行 500 kV 被试品试验时,仅采用试验变压器的下级,低压侧两级并联。保护电阻原则上选用 $10\text{ k}\Omega$,以保证试品闪络时榔梨变电站 11 kV 母线侧电压跌落不超过 3% ,负载端的电压降不超过 4% ;

4)在进行 330 kV 被试品试验时,仅采用试验变压器的下级,低压侧两级并联(也可以串联)。保护电阻原则上选用 $5\text{ k}\Omega$,以保证试品闪络时榔梨变电站 11 kV 母线侧电压跌落不超过 3% ,负载端的电压降不超过 4% ;

5)在进行 220 kV 被试品试验时,仅采用试验变压器的下级,低压侧两级串联。保护电阻原则上采用 $5\text{ k}\Omega$,以保证试品闪络时榔梨变电站 11 kV 母线侧电压跌落不超过 3% ,负载端的电压降不超过 5% ;

6)在进行 110 kV 被试品试验时,仅采用试验变压器的下级,低压侧两级串联。保护电阻原则上采用 $1\text{ k}\Omega$,以保证试品闪络时榔梨变电站 11 kV 母线侧电压跌落不超过 3% ,负载端的电压降不超过 3% 。

文中通过对被试品短路时的短路冲击电流峰值和有效值计算,分析了设备有保护电阻和无保护电阻时的设备抗短路能力要求,由于试验时,设备均带有保护电阻,且被试品闪络时,短路电阻很少出现短路现象,因此,设备抗短路能力要求如下:

1)对于特高压被试品进行试验时,试验变压器的额定电流为 4 A ,要求其至少可以承受 9 倍的额定电流的短路冲击;

2)对于 500 kV 及以下被试品进行试验时,试验变压器的额定电流为 6.4 A ,要求其至少可以承受 6 倍的额定电流的短路冲击。

参考文献:

- [1] 黄青丹, 陆国俊. 广州地区输电线路绝缘子污秽成分分析[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 85-91.
HUANG Qingdan, LU Guojun. Source analysis of the chemical composition on the line insulator in Guangzhou area[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 85-91.
- [2] 吕建红, 周年光. 基于大气环境质量的电网绝缘污秽等级划分[J]. 电瓷避雷器, 2012(4): 14-18.
LYU Jianhong, ZHOU Nianguang. The classification of insulator pollution severity of electric power grid based on atmospheric quality[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(4): 14-18.
- [3] 张本皇, 李恒真. 珠三角地区不同地形条件下绝缘子污秽积累规律的研究[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 1-6.
ZHANG Benhuang, LI Hengzhen. Study on the rule of insulator contamination accumulation of various landforms in the pearl river delta[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 1-6.
- [4] 赵世华, 蒋兴良. 环境参数对 110 kV 复合绝缘子覆冰增长过程的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2575-2581.
ZHAO Shihua, JIANG Xingliang. Impact of environmental parameters on the icing process of 110 kV composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2575-2581.
- [5] 陆佳政, 张红先. 基于极值 I 型概率分布模型的湖南地区电网覆冰重现期计算[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 464-466.
LU Jiazheng, ZHANG Hongxian. Calculation of Hunan power grid icing recurrence interval based on extreme-value type I probability distribution model[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 464-466.
- [6] 苑吉河, 蒋兴良, 易 辉, 等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 6-9.
YUAN Jihe, JIANG Xingliang, YI Hui, et al. The present study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 6-9.
- [7] 丁 薇, 张增福. 特高压交直流污秽试验电源特性研究[J]. 高压电器, 2012, 48(3): 1-5.
DING Wei, ZHANG Zengfu. Test research on power source characteristics of UHV AC and DC pollution test[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(3): 1-5.
- [8] 张楚岩, 张福增, 李锐海, 等. 绝缘子人工污秽试验加压方式的比较[J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 44-53.
ZHANG Chuyan, ZHANG Fuzeng, LI Ruihai, et al. Comparison of on-load voltage methods in artificial contamination test for insulators[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 44-53.
- [9] 蒋兴良, 易 辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [10] GB/T 4585—2004 交流系统用高压绝缘子人工污秽试验方法[S]. 2004.
- [11] DL/T 859—2004 高压交流系统用复合绝缘子人工污秽试验[S]. 2004.
- [12] GB/T 12326—2008 电能质量 电压波动和闪变[S]. 2008.
- [13] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [14] 张志劲, 刘小欢, 蒋兴良, 等. 污秽不均匀度对 XP-160 绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 280-286.
ZHANG Zhijin, LIU Xiaohuan, JIANG Xingliang, et al. Effect of non-uniform pollution on the AC flashover performance of XP-160 suspension ceramic insulator string[J].

- High Voltage Engineering, 2013, 39(2):280-286.
- [15] 刘云鹏, 王亮, 郭文义, 等. 基于灰关联度算法分析环境因素对海拔 ± 800 kV 线路绝缘子泄漏电流的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(2):318-323.
- LIU Yunpeng, WANG Liang, GUO Wenyi, et al. Influence of environmental factors on leakage current of ± 800 kV line insulators at high altitudes based on grey relation analysis[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):318-323.
- [16] 王黎明, 周凯, 赵晨龙, 等. 饱和受潮绝缘子外绝缘状态评估系统的试验验证[J]. 高电压技术, 2012, 38(9):1821-1827.
- WANG Liming, ZHOU Kai, ZHAO Chenlong, et al. Experimental verification on the assessment system of outdoor insulation state of saturated moist insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9):1821-1827.
- [17] 方春华, 王建国, 操平梅, 等. 污秽绝缘子泄漏电流与环境温、湿度相关分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(4):885-891.
- FANG Chunhua, WANG Jianguo, CAO Pingmei, et al. Correlation analysis of contaminative insulator leakage current & environmental temperature and humidity[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4):885-891.
- [18] 司马文霞, 徐康, 杨庆, 等. 气压和污秽不均匀度对污染绝缘子泄漏电流的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(3):663-670.
- SIMA Wenxia, XU Kang, YANG Qing, et al. Influence of air pressure and non-uniform pollution on the leakage current of insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3):663-670.
- [19] 蔡炜, 康丽, 刘云鹏, 等. 超高压线路绝缘子冰闪过程的泄漏电流波形变化特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(8):2038-2044.
- CAI Wei, KANG Li, LIU Yunpeng, et al. Leakage current waveform change rate of EHV transmission line insulator in icing-melting flashover process[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8):2038-2044.
- [20] 李毅, 周野, 钟浩, 等. 利用泄漏电流分帧与小波技术识别覆冰绝缘子闪络故障[J]. 高压电器, 2011, 47(2):27-30.
- LI Yi, ZHOU Ye, ZHONG Hao, et al. Recognition of flashover fault on the iced insulator based on frame segmentation and wavelet technology for leakage current[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2):27-30.
- [21] 黄成才, 李永刚. 基于复合绝缘子污闪模型的闪络特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2014(4):31-35.
- HUANG Chengcai, LI Yonggang. Analysis on flashover characteristics based on pollution flashover model of composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(4):31-35.
- 孙利朋(1982—), 男, 硕士, 工程师, 研究高电压与绝缘技术。
- 李志愿(1965—), 男, 本科, 高级工程师, 研究高电压与绝缘技术。
- 蒋正龙(1968—), 男, 博士, 高级工程师, 研究高电压与绝缘技术。
- (编辑 吴俊丽)

(上接第 15 页)

- Voltage Engineering, 2012, 38(10):2499-2505.
- [6] 郭贤珊, 宿志一, 乐波. 特高压直流换流站支柱绝缘子设计[J]. 电网技术, 2007, 31(24):1-6.
- GUO Xianshan, SU Zhiyi, YUE Bo. Design of post insulator for UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2007, 31(24):1-6.
- [7] 薛伟华, 崔岩. 架空线路对绝缘子的基本要求[J]. 灯与照明, 2014, 38(1):51-55.
- XUE Weihua, CUI Yan. Overhead line to insulator basic request[J]. Light & Lighting, 2014, 38(1):51-55.
- [8] 贾茹. 高压套管绝缘设计与性能分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- JIA Ru. Insulation design and performance analyses of the high voltage bushing[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [9] 郑殿春. 绝缘结构电场分析有限元法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- ZHENG Dianchun. The finite element method and application on analysis of electric field of insulation structure[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [10] 王泽忠. 简明电磁场数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- WANG Zezhong. Concise numerical calculation of electromagnetic field[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- 汪本进(1971—), 男, 工程师, 主要从事传统电力互感器、电子式互感器和直流互感器的特殊性能和试验技术研究。
- 吴细秀(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。
- (编辑 吴俊丽)