

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.09.032

防止紧凑型变压器重瓦斯误动作的仿真研究

李 雷¹, 王俊波¹, 徐 鑫¹, 张 博², 鲁铁成²

(1. 广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 为了降低电网暂态冲击引起紧凑型变压器本体重瓦斯误动作概率, 通过变电站实际参数建立 ATP/EMTP 仿真模型, 计算不同杆塔绝缘子串闪络形成稳定电弧时的短路电流, 精确预测雷击输电线路引起重瓦斯误动作的范围和概率。在此基础上提出加强线路绝缘、在变压器入口前串联小电感和变压器中性点接小电抗等 3 种限制短路电流的措施, 以降低变压器重瓦斯误动。分析所提措施对实际电网的影响, 得出可行性方案。分析结果表明, 综合运用 3 种措施对限制短路电流具有显著效果, 能有效降低变压器重瓦斯误动概率。
关键词: 紧凑型变压器; 暂态冲击; 重瓦斯误动作; 保护措施; ATP/EMTP 仿真

Simulation Research for Preventing Malfunction of Heavy Gas in Compact Transformer

LI Lei¹, WANG Junbo¹, XU Xin¹, ZHANG Bo², LU Tiecheng²

(1. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company, Guangdong Foshan 528000, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To reduce the malfunction probability of the heavy gas in compact transformer due to the transient impulse from power grid, an ATP/EMTP simulation model is built using actual parameters of a substation to calculate the short-circuit current when flashover on different tower insulator string form stable arc. The short-circuit current is used to accurately predict the range and probability of heavy gas malfunction caused by lightning stroke on transmission line. Consequently, three protection methods, i.e., enhancing the line insulation, connecting small inductors in series before the inlet of transformer, and connecting small reactors at neutral points of transformer, are proposed to restrict short-circuit current and reduce gas malfunction. Moreover, the effects of the proposed methods on actual power grid are analyzed to obtain a feasible scheme. It is shown that integrated usage of the three methods can achieve significant effectiveness in restricting the short-circuit current and reducing the malfunction probability of heavy gas in compact transformer.

Key words: compact transformer; transient impulse; heavy gas malfunction; protection method; ATP/EMTP simulation

0 引言

随着变压器核心技术的发展以及 CAD 等辅助技术的优化设计, 变压器的结构尺寸有逐渐减小的趋势^[1-2]。目前, 高电压等级电网中普遍采用紧凑型变压器, 这种变压器的优点是结构紧凑、占地面积小, 费用经济。但近年来, 由紧凑型变压器本体重瓦

斯保护误动作而造成的变压器跳闸的故障在电网中时常发生, 对电力系统正常运行造成十分严重的影响。

运行经验表明, 电网暂态冲击(突发短路)是引起紧凑型变压器本体重瓦斯保护误动作的主要原因。由于雷击和其他操作引起的电网暂态冲击在电力系统中时有发生。变压器绕组在受到短路电流产生的电磁力的作用下, 会产生振动和变形, 进一步造成油流涌动。当油管内油流超过一定速度时, 将引起变压器本体重瓦斯误动作^[3-6]。因此, 研究电网暂态

收稿日期: 2017-03-22; 修回日期: 2017-05-26

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(K-GD2014-0189)。

Project Supported by Science and Technology Project of Guangdong Grid Company(K-GD2014-0189).

冲击程度对于瓦斯误动作的影响以及如何降低瓦斯误动作的概率,已成为设计、制造、运行部门共同关注的一个重要课题。

现有研究多是针对重瓦斯保护本身而提出的措施,如加强检修维护以提高瓦斯继电器可靠性,采取延时跳闸的方法来减少重瓦斯误动等等^[7-9]。这些措施并没有结合具体的电网结构,具有一定的局限性,如延时跳闸可能会扩大故障范围及严重程度等。文中以一个 500 kV 变电站 220 kV 出线遭受雷击的案例为基础,结合具体的电网结构、运行方式以及电网可能发生的暂态冲击,运用 ATP/EMTP 仿真分析,提出避免发生变压器重瓦斯误动作的措施,以提高供电可靠性。

1 暂态冲击引起变压器重瓦斯误动分析

依据 500 kV 变电站的实际测量参数,建立 ATP/EMTP 仿真模型。该站有一组三菱 500 kV 单相 SUB 紧凑型变压器,220 kV 侧线路有沧高甲乙线、沧后甲乙线、沧鹅甲乙线六回出线,均以同塔双回路输出。

在紧凑型变压器中,由于变压器结构紧密,内部空间狭窄,变压器绕组间隔小,短路后流过绕组的电流在变压器漏磁场中产生的短路电磁力使绕组发生形变,挤压变压器油向油枕流动,当流过瓦斯继电器的油流速度超过一定数值时,将冲击变压器挡板使重瓦斯误动作而跳闸^[10]。该 SUB 型变压器重瓦斯保护的油体流速整定值设为 1.5 m/s,根据三菱公司提供的数据,当变压器变中侧通过 13 kA(有效值)以上故障电流时,将会引起油管内油流速度超过 1.5 m/s,导致重瓦斯保护开关闭合,发出跳闸信号。因此,能够引起 13 kA 及以上的短路电流的范围被视为对变压器稳定安全运行有威胁性的区域。

雷击线路时,最易发生输电线路一相闪络导致变压器跳闸。但当雷电流幅值超过一定数值时,也可能造成同一基杆塔多处绝缘子串发生闪络,因此,需对其各基杆塔发生两回线路同相单相短路进行仿真。由于沧后线、沧鹅线与沧高线情况类似,文中以沧高线为例进行详细分析,得出不同地方短路时,变压器入口处的短路电流大小,由此得到可能导致变压器重瓦斯误动作的短路点范围。220 kV 沧高线不同杆塔绝缘子串闪络形成稳定电弧时短路电流见表 1。

为简化计算,输电线路 7 号及以后杆塔取 1-6 号塔中未加强绝缘子串冲击耐压水平杆塔的平均值。结合当地雷电流出现概率公式计算各基杆塔遭雷击时变压器重瓦斯误动作的概率,预测雷击引起重瓦

表 1 沧高线不同杆塔绝缘子串闪络形成稳定电弧时短路电流

Table 1 Insulator connect of different towers becoming stable arc short circuit current in Cang-Gao line

杆塔位置	杆塔工频接地电阻/ Ω	一回线路单相短路电流有效值/kA		两回线路单相短路电流有效值/kA		
		线路	变压器入口处	线路甲	线路乙	变压器入口处
1 号	0.68	21.78	21.79	11.01	10.84	21.84
2 号	6.90	15.82	16.01	8.38	7.62	16.16
3 号	3.40	17.15	17.25	9.12	8.37	17.58
4 号	0.68	19.65	19.68	10.53	9.80	20.35
5 号	4.90	15.37	15.51	8.31	7.58	16.01
6 号	8.30	13.85	14.07	7.55	6.84	14.58
7 号	6.90	13.88	14.08	7.61	6.92	14.69
8 号	12.30	12.46	12.76	6.88	6.21	13.35
9 号	8.40	12.86	13.09	7.14	6.47	13.80
10 号	10.00	12.28	12.54	6.84	6.21	13.27
11 号	3.60	13.89	14.02	7.79	7.15	15.05
12 号	6.50	12.52	12.70	7.04	6.43	13.62
13 号	5.30	12.61	12.77	7.13	6.53	13.79
14 号	7.60	11.74	11.95	6.66	6.07	12.91
15 号	5.00	12.19	12.35	6.96	6.37	13.47
16 号	6.90	11.43	11.62	6.54	5.97	12.68
17 号	10.80	10.53	10.80	6.05	5.49	11.77
18 号	6.20	11.16	11.35	6.45	5.89	12.49
19 号	5.80	11.05	11.23	6.41	5.87	12.43
20 号	3.90	11.41	11.55	6.67	6.14	12.93

注:冲击接地系数为 0.3。

斯误动作的输电线路范围。将沧高线短路电流超过 13 kA 情况统计汇总,得到表 2。

由表 2 计算结果可知,沧高线发生一回线路单相短路时,1、4 号塔的短路电流虽然会对变压器的形成威胁,但能使这些杆塔绝缘子串发生闪络的雷电流出现概率均很小,低于 1%。而 2、3、5-7、9 和 11 号塔绝缘子串发生闪络的雷电流出线概率则要高出很多,最高近 13%。同塔两回线路发生同相单相短路时,虽然在更大范围内的杆塔短路都有引起变压器本体重瓦斯动作的可能性,但出现能使其绝缘子串闪络的雷电流概率大幅降低,最高仅为 3.33%。

2 防止紧凑型变压器重瓦斯误动作措施

根据以上分析,220 kV 出线各基杆塔分别发生短路时,在较大范围内的短路电流会超过变压器本体重瓦斯误动作的数值(13 kA)。为了提高系统的稳定性,避免变压器本体重瓦斯误动作已成为一种迫切需求。文中提出 3 个改进措施,运用 ATP/EMTP

表2 沧高线形成的短路电流对变压器的威胁情况

Table 2 The threaten caused by short-circuit current to transformer in Cang-Gao line

杆塔位置	一回线路单相短路			两回线路单相短路			杆塔位置	一回线路单相短路			两回线路单相短路		
	主变危险情况	杆塔反击耐雷水平/kA	雷电流出现概率/%	主变危险情况	杆塔反击耐雷水平/kA	雷电流出现概率/%		主变危险情况	杆塔反击耐雷水平/kA	雷电流出现概率/%	主变危险情况	杆塔反击耐雷水平/kA	雷电流出现概率/%
1号	✓	259	0.11	✓	625	0.00	11号	✓	83	11.40	✓	145	2.25
2号	✓	78	12.99	✓	130	3.33	12号	×	—	—	✓	145	2.25
3号	✓	90	9.49	✓	160	1.52	13号	×	—	—	✓	145	2.25
4号	✓	179	0.92	✓	340	0.01	14号	×	—	—	×	—	—
5号	✓	83	11.40	✓	145	2.25	15号	×	—	—	✓	145	2.25
6号	✓	82	11.70	✓	145	2.25	16号	×	—	—	×	—	—
7号	✓	83	11.40	✓	145	2.25	17号	×	—	—	×	—	—
8号	×	—	—	✓	145	2.25	18号	×	—	—	×	—	—
9号	✓	83	11.40	✓	145	2.25	19号	×	—	—	×	—	—
10号	×	—	—	✓	145	2.25	20号	×	—	—	×	—	—

注:“✓”表示该杆塔发生雷击就有造成变压器重瓦斯动作的可能性;“×”表示该杆塔发生雷击没有造成变压器重瓦斯动作的可能性,下同。

进行详细的仿真分析。

2.1 加强线路绝缘

加强线路绝缘水平可以减小线路绝缘子串发生闪络的次数,这样间接减少了因短路电流过大而造成变压器本体重瓦斯动作的次数^[21]。同时,依据相关文献分析,加强线路绝缘并不会对变电站的绝缘配合造成严重的负面影响^[22],并且出线避雷器能吸收大部分突变能量^[13-14]。以沧高线发生一回线路单相短路为例,选取未加强绝缘且主变有危险的2、3、5-7、9、11号塔。

具体仿真计算结果见表3。通过表3分析发现,

发生一回线路单相短路时,当杆塔绝缘子串的冲击耐压水平由1 000 kV逐步提高至1 400 kV时,杆塔的反击耐雷水平普遍提高,能使其绝缘子串发生闪络的雷电流的概率普遍降低超过50%。同时,经仿真计算,将杆塔绝缘子串的冲击耐压水平由1 000 kV提高至1 400 kV时,发生两回线路同相同时单相短路概率也将极大降低。可见,虽然加强线路绝缘不能直接限制杆塔短路电流大小,但是可以提高杆塔的反击耐雷水平,使杆塔发生闪络的雷电流出现的概率减小,从而减少变压器本体重瓦斯动作的次数。

表3 沧高线一回线路单相短路时,绝缘子串加强绝缘前、后形成短路电流时对变压器威胁情况对比

Table 3 The threaten before and after short-circuit current being strengthened by insulator string, when a return line of Cang-Gao line showed single-phase short circuit

杆塔位置	主变危险情况	未加强绝缘 $U_{50\%}=1\ 000\text{ kV}$		加强绝缘到 $U_{50\%}=1\ 200\text{ kV}$		加强绝缘到 $U_{50\%}=1\ 300\text{ kV}$		加强绝缘到 $U_{50\%}=1\ 400\text{ kV}$	
		杆塔反击耐雷水平/kA	雷电流出现概率/%	杆塔反击耐雷水平/kA	雷电流出现概率/%	杆塔反击耐雷水平/kA	雷电流出现概率/%	杆塔反击耐雷水平/kA	雷电流出现概率/%
2号	✓	78	12.99	94	8.55	101	7.12	109	5.77
3号	✓	90	9.49	108	5.93	117	4.68	126	3.70
5号	✓	83	11.40	100	7.31	108	5.93	116	4.81
6号	✓	82	11.70	98	7.70	107	6.08	115	4.93
7号	✓	83	11.40	100	7.31	108	5.93	116	4.81
9号	✓	83	11.40	100	7.31	108	5.93	116	4.81
11号	✓	83	11.40	100	7.31	108	5.93	116	4.81

2.2 变压器出口前串联小电感

在变压器出口前串联小电感时,相当于增加了线路的电气长度,使零序电流回路阻抗增大,以此来减小短路电流^[15-16]。但由于阻抗增大,电压降低,需

考虑串联电感不至影响系统正常供电电压。根据主变额定容量(1 000 MW)以及额定电压(242 kV),计算变压器母线额定相电压幅值为197.6 kV,以额定负载为基准,校验变压器入口前所串电感是否能满足

供电电压要求。

仿真分析时选取沧高线第一基杆塔作为研究对象,因其接地电阻最小,且离变压器最近,发生两回线路同相单相短路时,其短路电流最大,当变压器出口处串联了小电感以后,如果该基杆塔发生两回线路同相闪络形成稳定工频电弧时,短路电流小于 13 kA,那么在相同情况下,其余杆塔也不会发生短路引起变压器的重瓦斯误动作。采用不同电感值进行仿真计算,得出计算结果见表 4。

表 4 220 kV 出线端串联电感对母线电压、短路电流的影响

Table 4 The effect of series inductance of 220 kV transformer outlet end on bus voltage and short circuit current

电感值/mH	母线处 电压/kV	电压降低 百分比/%	变压器出口 电流/kA
22	193.8	1.9	13.31
23	193.7	2.0	13.07
24	193.5	2.1	12.84
25	193.4	2.1	12.62
26	193.3	2.2	12.41
27	193.1	2.3	12.20
28	193.0	2.3	12.00
29	192.8	2.4	11.81

表 5 能同时满足限制电流和绝缘水平的串联小电感值

Table 5 Small series inductance that could limit current and at the same time

杆塔位置		一回线路单相短路			两回线路单相短路		
		变压器中性点所串	变压器中性	变压器入口电	变压器中性点所串	变压器中性点	变压器出口电
		电感值/mH	点电压/kV	流/kA	电感值/mH	电压/kV	流/kA
1 号	沧后	71	85.10	15.81	71	85.15	15.84
	沧高	72	85.83	15.76	72	85.93	12.71
	沧鹅	73	85.22	13.07	73	85.32	13.08
2 号	沧后	60	72.89	12.97	62	74.90	13.00
	沧高	47	62.76	12.98	49	65.01	12.99
	沧鹅	75	85.30	13.71	74	85.29	13.86
3 号	沧后	80	85.52	14.03	78	85.35	14.34
	沧高	75	83.17	12.97	77	85.46	13.08
	沧鹅	33	47.27	12.98	40	55.18	12.82
4 号	沧后	47	59.50	12.99	55	67.22	12.92
	沧高	80	85.20	14.31	78	85.52	14.75
	沧鹅	40	53.74	12.94	46	60.44	12.94
5 号	沧后	43	54.67	12.88	50	62.08	12.92
	沧高	44	56.43	12.93	52	64.78	12.94
	沧鹅	57	67.41	12.83	62	72.84	12.99

分析上述仿真结果,可提供两种限制短路电流的方案:①将 220 kV 侧六回出线大部分杆塔的短路电流限制在 13 kA 以下。对于某些闪络概率较低的

根据上述结果分析,当变压器 220 kV 侧出口前串联 25 mH 左右的小电感时,可把短路电流降低到 13 kA 以下,并且还留足够的裕度,又不影响正常供电电压,是比较好的选择。此时,其他各基杆塔在不同雷电流雷击输电线路的情况下,均不会发生短路电流超过 13 kA 的情况,能可靠避免变压器的重瓦斯误动作的情况^[17]。

2.3 变压器中性点接小电抗器

在变压器中性点串联小电抗以后,相当于改变了变压器绕组的零序漏抗,增加零序电流回路中的阻抗,以此来限制短路电流幅值^[18]。由于流经中性点的零序电流是一次侧与二次侧电流值差的 3 倍,当中性点串接电抗时,中性点所产生的过电压较大,对变压器的中性点的绝缘要求变高^[19]。对于直接接地类型变压器,当中性点串联小电抗时,其中性点的绝缘水平取直接接地变压器的绝缘水平^[20-21],即:短时工频耐受电压(有效值)为 85 kV,雷电冲击全波和截波耐受电压(峰值)为 185 kV^[22]。

通过仿真计算得出,将 220 kV 侧各回出线 1-5 号塔每基杆塔短路电流限制在 13 kA 以下,或杆塔短路时变压器中性点短时工频电压有效值不超过 85 kV 时,变压器中性点应串联的小电抗电感值。其电流仿真结果见表 5。

杆塔,允许其短路电流超过 13 kA,但需加强绝缘子串冲击耐压水平,使闪络概率更低。由于第一基杆塔已处于变电站内避雷针的保护范围,一般不容易

发生雷击事故,根据上述仿真计算结果以及考虑经济因素,选变压器中性点所串电感值为71~80 mH;②为保证六回出线各基杆塔短路时,变压器中性点电压不超过其短时工频耐压水平,同时限制大部分杆塔的短路电流在13 kA以下,此小电抗可选为60~62 mH。

当满足工频过电压的要求时,还必须对雷电侵入波下中性点电压是否超过其绝缘水平进行校核。校核时取:雷电流波形为2.6/50 μ s;220 kV侧雷电侵入波幅值选为避雷器10 kA下的残压,即488 kV;500 kV侧雷电侵入波幅值选为避雷器20 kA下的残压,即1 006 kV。具体仿真计算结果见表6。

表6 不同电抗值中性点雷电过电压

Table 6 The lightning overvoltage of neutral point under different reactance value

电感值/mH	中性点过电压峰值/kV	
	220 kV侧来波	500 kV侧来波
60	148.78	103.52
62	185.67	104.72
71	205.49	109.54
72	207.46	110.03
73	209.38	110.51
74	211.26	110.97
75	213.10	111.43
77	216.64	112.32
78	218.36	112.76
80	221.66	113.60

将上述仿真计算结果与GB 311.1—2012中相关数据比较,当中性点串联62 mH及以上的小电抗时,变压器中性点雷电过电压超过变压器中性绝缘冲击耐压水平,因此建议取60 mH。

由于自耦变压器高中绕组之间有直接耦合作用,中性点串联小电抗后,高压侧发生单相短路时,中性点电压发生偏移,使非故障相电压升高,传递到220 kV侧,可能超出该侧的绝缘水平,因此需要对其进行分析。500 kV侧单相短路时,220 kV侧出口电压见表7。

对比GB 311.1—2012相关数据,变压器中性点串联60~80 mH的小电抗时,220 kV侧非故障相对地电压不会超过其绝缘水平。

综上所述,当变压器中性点串联电感值为60 mH的小电抗,220 kV侧各基杆塔分别发生短路故障时,变压器中性点过电压不会超过其绝缘耐压水平,且高压侧发生单相短路时,220 kV侧电压也不会超过其对地绝缘耐压水平。但是,此措施只能适用于220 kV侧大部分杆塔分别发生的短路电流在

表7 变压器中性点串联不同小电抗500 kV侧发生单相短路时220 kV侧电压

Table 7 After different series of small reactors, the voltage in 220 kV side when a single-phase short circuit was occurred in the 500 kV side

电感值/mH	220 kV侧出口非故障相电压/kV	中性点工频过电压(有效值)/kV
60	212.10	24.69
62	212.58	25.47
71	214.74	28.93
72	214.98	29.31
73	215.23	29.69
74	215.47	30.07
75	215.71	30.45
77	216.19	31.20
78	216.43	31.58
80	216.91	32.34

13 kA以下的情况。而短路电流不能被限制下来的杆塔包括:沧后1、3号塔,沧高1、3、4号塔以及沧鹅1、2号塔。对于沧高线而言,由前面仿真计算可知,沧高线1、4号塔出现能使其绝缘子串闪络的雷电流的概率均1%以下,因此,此时只需加强沧高3号塔绝缘即可。

3 结论

文中针对紧凑型变压重瓦斯误动作问题,提出加强线路绝缘、在变压器入口前串联小电感和在变压器中性点接小电抗等3种措施,得出如下结论:

1)加强线路绝缘水平能显著降低变压器本体重瓦斯动作的次数,同时不会对变电站的绝缘配合造成严重的负面影响;

2)在变压器出口前串联小电感依靠减小短路电流来降低重瓦斯误动,实际中需考虑串联电感对系统供电电压的影响;

3)变压器中性点接小电抗具有较好经济性,但需考虑中性点和220 kV侧过电压问题,同时部分杆塔的短路电流仍可能超过引起变压器重瓦斯误动作的限定值,此时可依据实际情况加强线路绝缘水平。

参考文献:

- [1] 唐鹏. CAD二次开发技术与变压器参数优化设计技术的研究及应用[D]. 广州:广东工业大学,2011.
TANG Peng. CAD secondary development of technology and the transformer parameter optimization design technology research and application[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.

- [2] 孙申. 110 kV 油浸式电力变压器计算机辅助设计的研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2011.
SUN Shen. Computer-aided design of 110 kV oil-immersed power transformer[D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [3] 梁文腾. 500 kV 变压器空载合闸重瓦斯误动作事件分析及防范[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(3): 13-15.
LIANG Wenteng. Analysis on event of heavy gas protection malfunction closing 500 kV no-load transformer [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(3): 13-15.
- [4] 杨贤, 柯春俊, 周丹. 防止 500 kV 壳式变压器重瓦斯保护误动策略研究及应用[J]. 变压器, 2015, 53(3): 60-65.
YANG Xian, KE Chunjun, ZHOU Dan. Research on prevention strategy and its application for heavy gas, protection malfunction of 500 kV shell-type transformers[J]. Transformer, 2015, 53(3): 60-65.
- [5] 何文林, 李宏雯, 余睿, 等. 500 kV 变压器重瓦斯动作的原因分析[J]. 华东电力, 2006, 34(6): 72-74.
HE Wenlin, LI Hongwen, YU Rui, et al. Reasons for heavy gas protection operation of 500 kV transformers [J]. East China Electric Power, 2006, 34(6): 72-74.
- [6] 李璐, 陈正鸣, 邝石, 等. 气体继电器误动作分析及处理[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 145-147.
LI Lu, CHEN Zhengming, KUANG Shi, et al. Analysis and elimination of gas relay misoperation[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 145-147.
- [7] 张云峰. 变压器瓦斯保护误动原因分析及应对措施[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 300-302.
ZHANG Yunfeng. Reason and measure about transformer gas protection motion[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 300-302.
- [8] 姜海波, 闰兴龙, 康建准, 等. 油浸式平波电抗器重瓦斯保护误动分析及防治措施[J]. 电气应用, 2015, 34(1): 88-91.
JIANG Haibo, RUN Xinglong, KANG Jianzhun, et al. Oil-immersed smoothing reactors discouraged gas protection disoperation analysis and control measures[J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(1): 88-91.
- [9] 张金荣, 刘孝旭. 一起变压器重瓦斯动作分析及防范措施[J]. 变压器, 2012, 49(7): 58-61.
ZHANG Jinrong, LIU Xiaoxu. Analysis of transformer heavy gas action and preventive measures[J]. Transformers, 2012, 49(7): 58-61.
- [10] 檀英辉, 姚文军, 李佩军, 等. 500 kV 变压器瓦斯保护误动及整改[J]. 高压电气, 2012, 48(3): 117-122.
TAN Yinghui, YAO Wenjun, LI Peijun, et al. Malfunction analysis of a 500 kV Transformer gas relay with counter-measure[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(3): 117-122.
- [11] 肖国斌. 应用线路避雷器提高交流输电线路耐雷水平的研究[J]. 电瓷避雷器, 2003(5): 107-109.
XIAO Guobin. Application of line arrester to increase lightning withstand level of AC transmission lines of research[J]. Insulators and Surge Arresters, 2003(5): 107-109.
- [12] 肖勇. 加强线路绝缘对变电站绝缘配合影响的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
XIAO Yong. Strengthen research line insulation substation insulation coordination effects[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [13] 彭向阳, 吕鸿, 郭婷, 等. 加强线路绝缘对变电站侵入波及避雷器通流的影响[J]. 电瓷避雷器, 2012(4): 99-105.
PENG Xiangyang, LYU Hong, GUO Ting, et al. Influence of strengthening line insulation on substation lightning invasion wave and flow of MOA[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(4): 99-105.
- [14] 李德清. 限制短路电流措施特性分析[J]. 电气开关, 2013(1): 20-21.
LI Deqing. Characteristic analysis of limiting short-circuit current measures[J]. Electrical switches, 2013(1): 20-21.
- [15] 田洪, 王宁, 陈天翔, 等. 线路避雷器提高超高压大跨越架空线路绕击耐雷水平的仿真研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 63-68.
TIAN Hong, WANG Ning, CHEN Tianxiang, et al. Simulation research on improvement of lightning shielding level of long spans of EHV overhead lines by installing surge arresters[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 63-68.
- [16] 吴荻. 限制大电网短路电流水平的措施的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
WU Di. Study limitations large grid short circuit current level of measures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [17] 张慧忠, 徐志勇. 有效降低输电线路杆塔接地电阻的措施研究[J]. 电力学报, 2009, 24(4): 165-167.
ZHANG Huizhong, XU Zhiyong. Measurement study on reducing grounding resistance of pole and tower of power transmission line[J]. Journal of Electric Power, 2009, 24(4): 165-167.
- [18] 肖云. 变压器中性点接小电抗选择及保护整定计算的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
XIAO Yun. Application study of selection and protection relay neutral grounding via small reactor of transformer[D]. Beijing: School of Electronic and Electric Engineering Institute, 2013.
- [19] HAO Z G, ZHANG B H, YAN C G, et al. Research on integration of transformer protection and winding deformation detecting[J]. International Conference on Power System Technology 2010, 7(1): 1-8.
- [20] 许彦, 赵立飞, 童伟. 500 kV 自耦变单相短路电流的限制效果分析[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 15-17.
XU Yan, ZHAO Lifei, TONG Wei. Research on the effect of single-phase short current limiting of 500 kV autotransformers[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(2): 15-17.

(下转第 197 页)

- [10] HE Jinliang, HU Jun, LIN Yuanhua. ZnO varistors with high voltage gradient and low leakage current by doping rare-earth oxide[J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2008, 51(6):693-701.
- [11] CHEN Qingheng, HE Jinliang, TAN Kexiong, et al. Influence of grain size on distribution of temperature and thermal stress in ZnO varistor ceramics[J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2002, 45(4):337-347.
- [12] 苗发金. 金属氧化物电阻片电容特性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(5):102-105.
MIAO Jinfa. Study on the capacitance characteristics of metal-oxide varistor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(5):102-105.
- [13] 王保山, 刘 斌, 张 曦, 等. 交流特高压避雷器电压分布的测量与分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(9):1781-1787.
WANG Baoshan, LIU Bin, ZHANG Xi, et al. Measurement and analysis about the potential distribution of the 1 000 kV metal-oxide surge arrester[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9):1781-1787.
- [14] 王保山, 刘 洋, 汤 霖, 等. 交流无间隙金属氧化物避雷器的电压分布特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2012(1):38-44.
WANG Baoshan, LIU Yang, TANG Lin, et al. Research on characteristics of voltage distribution of the metal oxide arrester without gap used for AC system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1):38-44.
- [15] 张金岗. 红外测温技术在氧化锌避雷器带电检测中的应用[J]. 高压电器, 2015, 51(6):200-204.
ZHANG Jingang. Application of infrared temperature measurement technology to live detection of zinc oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6):200-204.
- [16] 车文俊, 张晓星, 李明刚, 等. 1 000 kV GIS 型和瓷套型避雷器研发综述[J]. 高电压技术, 2010, 36(1):230-236.
CHE Wenjun, ZHANG Xiaoxing, LI Minggang, et al. Research and development overview of 1 000 kV GIS and porcelain housed surge arresters[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1):230-236.
- [17] 董莉娜, 胡 可, 王微波, 等. 小波消噪在 10 kV 金属氧化物避雷器在线检测中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(3):891-896.
DONG Lina, HU Ke, WANG Weibo, et al. Application of wavelet de-noise in on-line detection of 10 kV metal oxide arresters[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3):891-896.
- [18] 谭俊源, 唐 军, 刘晓庭, 等. 珠江三角洲某地区雷电特征对 10 kV 配网用避雷器故障的影响分析[J]. 高压电器, 2014, 50(4):113-119.
TAN Junyuan, TANG Jun, LIU Xiaoting, et al. Effects of lightning features on arrester faults in 10 kV distribution network in the pearl river delta[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4):113-119.
- [19] 周文俊, 喻剑辉, 陈 荣, 等. 雷电流全参数及避雷器状态在线监测研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(10):2054-2058.
ZHOU Wenjun, YU Jianhui, CHEN Rong, et al. Research on whole parameters of lightning current waveform and on-line monitoring of arresters[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10):2054-2058.
- [20] 李志兵, 颜湘莲, 王 浩, 等. 金属氧化物避雷器在陡波下的试验与模型分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(10):2698-2706.
LI Zhibing, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Analysis of test and model for metal oxide arrester under steep-front wave[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10):2698-2706.
- 邓 维(1973—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高压电气设备状态检测及技术监督管理等方面的研究。

(上接第 191 页)

- [21] 梁纪峰, 刘文颖, 梁 才, 等. 500 kV 自耦变中性点串联小电抗对接地短路电流限制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 96-99.
LIANG Jifeng, LIU Wenying, LIANG Cai, et al. Analysis of limiting effect of 500 kV autotransformer neutral grounding by small reactance ground short-circuit current [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 96-99.
- [22] GB 311.1—2012 中华人民共和国国家标准—绝缘配合第 1 部分: 定义、原则和规则[S]. 2012.
GB 311.1—2012 Insulation co-ordination—Part 1: Definitions principles and rules[S]. 2012.
- 李 雷(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统电气试验及研究工作。