

超高压 GIS 中隔离开关不同操作方式对快速瞬态过电压的影响研究

李东妍^{1,2}, 荣命哲¹, 张 猛², 王晓华¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;
2 西安西开高压电气股份有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 研究了乌江 550 kV 水电站超高压 GIS 中隔离开关的 3 种操作方式下产生的快速瞬态过电压(VFTO)。经计算得出 3 种方式下的变压器绕组端部对地 VFTO 电压波形, 以及变压器绕组饼 0~1 之间电压波形; 分别计算出 3 种方式对应的变压器支路切合短管线过电压、变压器绕组纵向各计算点对地过电压、变压器绕组各饼纵向 VFTO 过电压等数据。结果表明, 变压器带电、变压器侧的隔离开关操作(方式 3)的 1~3 个线饼的最大梯度电压超过允许范围, 因此要避免方式 3 的操作。

关键词: 超高压; 气体绝缘组合电器; 隔离开关; 操作方式; 快速瞬态过电压

中图分类号: TM591

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0055-04

Effect of Isolating Switch Operation on Very Fast Transient Over-voltage in Extra-high Voltage GIS

LI Dong-yan^{1,2}, RONG Ming-zhe¹, ZHANG Meng², WANG Xiao-hua¹

(1. State Key Lab. of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2 Xi'an Shiky High Voltage Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The very fast transient over-voltage caused by three operation modes of isolating switch of extra-high voltage GIS in a 550 kV substation is investigated. The transformer winding's end to ground VFTO waveforms and the voltage waveforms of transformer winding pies between 0 and 1 are obtained. The over-voltage of making and breaking short cable of transformer, over-voltage of longitudinal calculating point to ground of transformer winding, and winding pies longitudinal VFTO are calculated, respectively. The results show that the maximum gradient voltage of 1 to 3 winding pies will exceed the critical value under the condition where the isolating switch operates in mode 3 and the transformer is charged. Therefore, the operation mode 3 should be avoided.

Key words: ultra-high voltage; GIS; isolating switch; operation mode; VFTO

0 引言

气体绝缘组合电器(GIS)具有占地面积小、可靠性高、检修周期长、运行费用低等优点, 在电力系统得到广泛地应用。研究表明, 超高压 GIS 中隔离开关和断路器的操作会伴有高频振荡的快速瞬态过电压(VFTO)^[1]。如当 GIS 断路器处于开断状态下, 带电侧隔离开关分、合与断路器之间的 GIS 短管道, 就会形成 ns 级的电压突升或跌落, 形成 VFTO 并在 GIS 管线中产生行波。虽然大多数情况下 VFTO 幅值在 1.5 p.u. 到 2.5 p.u. 左右, 只有极少的可能超过

3.0 p.u.。VFTO 在超高压电力系统运行操作中具有造成事故的潜在隐患, 其不仅影响 GIS 本身运行的可靠性, 而且对系统高压设备的绝缘构成威胁。在所有与 GIS 相连的电气设备中, 电力变压器受外部 VFTO 的危害最大, 会引起变压器绕组匝间电压分布极不均匀, 威胁变压器匝间绝缘安全。当 GIS 管线分支回路较多时, 操作过电压在各分支回路折反射, 形成不同频率的振荡波, 它们相互叠加, 产生拍频波, 引起极高幅值的 VFTO, 对直接和非直接连接的变压器都有危害。变压器等绕组类电气设备的内绝缘大都没有自恢复能力, 修复起来十分困难, 一旦发生事故将造成巨大的经济损失。另外, VFTO 作用

收稿日期: 2008-10-16; 修回日期: 2009-01-23

作者简介: 李东妍(1968), 女, 博士研究生, 现从事高压电器设备设计、监测与故障诊断技术研究。

下的SF₆,气隙击穿电压并不比其在雷电作用下的击穿电压低,因此VFTO对于GIS装置内部也是有危害的,尤其是对GIS装置支持绝缘子(盆式绝缘子)绝缘安全等有威胁^[2,3]。

VFTO过电压与GIS隔离开关切合时间、隔离开关节点在GIS装置中位置、GIS的运行接线方式密切相关。因此特别有必要对超高压GIS中隔离开关不同操作方式对VFTO的影响进行研究,避免出现导致VFTO幅值过高的操作方式,从而降低事故率,优化电力系统操作规范,这对电力系统的安全可靠运行具有十分重要的指导意义。

1 超高压GIS中隔离开关不同操作方式对VFTO的计算

为防止在各种过电压情况下造成停电和人身伤亡或设备损坏,确保乌江水电站550kV设备安全运行,对该电站的VFTO过电压进行分析和计算,并提出过电压的保护方案。

笔者采用世界上通用的电磁暂态程序-EMTP进行数值仿真计算,其程序的基本原理是:从电力系统的元件特性来分,大体上分为两类:第1类其参数本质上是集中的,如发电机、变压器、避雷器、电抗器及电容器等;第2类是输电线路及地下电缆,其参数具有分布的特性。将系统中所有的集中参数采用梯形积分法则,将电感、电容支路变为一个等效电阻与一个历史电流源的并联支路,对分布参数(输电线路及电缆)通过特征线法化为等效电阻与历史电流源来描述,这样系统中的所有元件除电源(包含历史电流源)、开关外,都成为阻性元件,使系统的暂态过程都在阻性电路中求解。

主要研究计算内容有:针对原设计接线形式,分别计算不同运行情况下隔离开关操作时产生的VFTO过电压在GIS内部及主变高压套管连接处的频率、幅值。

VFTO的计算结果均以过电压倍数来描述,550kV电压等级即为

$$1.0 \text{ p.u.} = 550 / \sqrt{3} \times \sqrt{2} = 449.073 \text{ kV (峰值)}。$$

2 隔离开关不同操作方式下VFTO的计算

2.1 计算模型

(1)变压器的模型

要准确地计算隔离刀闸切合短管线在变压器设备上产生的快速暂态过电压,需要建立与变压器结构有关的分布参数模型,实测绕组在几十兆赫兹频率下的电感、入口电容、匝间电容等,目前还无法做到。计算中变压器模型采用电感-电容-电阻所组成的链形回路,变压器本体的模型见图1,变压器参数如

下: 变压器绕组与变压器外壳之间 $C_{1(\text{总})}$:高压对油箱为610 pF,低压对铁心为9450 pF; 变压器绕组匝间电容 $C_{2(\text{总})}$:高压为124 pF; 低压为3800 pF; 变压器绕组间电容 $C_{3(\text{总})}$ 为2130 pF; 每一相绕组有2个线圈,高压为917匝,低压为52匝; 高压套管及其连接段的电感 $L_{1(\text{总})}$ 为10.5 μH; 高频下等效电阻4 Ω; 高压绕组分为10段按10个线饼考虑,标号见图1。

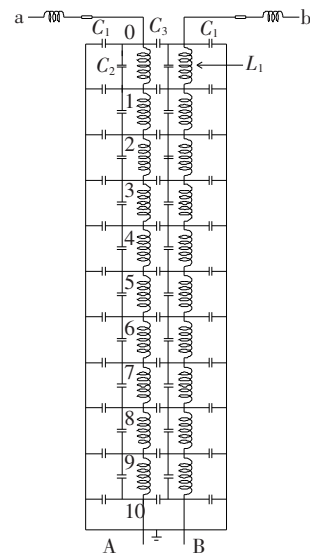


图1 变压器模拟图

(2)GIS模型

GIS管线段采用单相分布参数模型,见表1。按乌江550kV水电站超高压GIS实际布置结构的具体电容值建模,断路器为分级电容模型。GIS避雷器MOA安装在最靠近变压器旁。

(3)隔离刀闸的重燃

计算时模拟了隔离刀闸投切过程中的电弧多次重燃,考虑了被操作的短管道存在的残余电荷的大小和极性等因素。

2.2 母线侧隔离开关操作(方式1)

方式1的隔离开关操作电气接线示意图见图2。母线经线路带电,变压器侧隔离开关DS83已合上,断路器CB81处于断开位置,GIS断路器至母线隔离开关之间的管道有1.0 p.u.的残余电荷;避雷器按最靠近变压器旁布置。

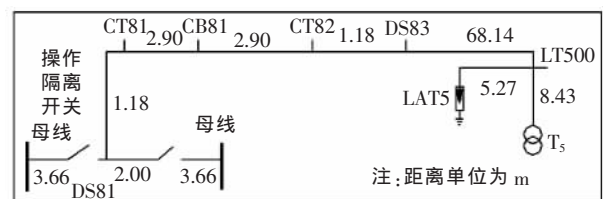


图2 方式1隔离开关操作电气接线示意图

方式1下母线隔离开关DS81闭合操作中多次

重燃产生的 VFTO 通过断路器均压电容传递到变压器上。变压器管线支路的 VFTO 过电压见表 1。计算出的变压器绕组端部对地和绕组各饼纵向 VFTO 分

别见表 2、3。变压器绕组端部对地和绕组饼间的 VFTO 电压波形分别见图 3、4。

表 1 在 VFTO 研究中元件的模拟

元件	等效电路	注意
GIS 母线管道	无损耗分布参数输电线路 60 pF/(相·米)	从实际的尺寸来计算波阻抗; 考虑盆式绝缘子、弯头等因素的影响, 通过计算得出波的传播速度接近为真空中光速的 0.95 倍 ^[2]
盆式绝缘子	电容	10~30 pF
弯管, 已合闸的隔离开关, 已合闸的断路器	无损耗分布参数输电线路; 断路器 CB 400 pF/相 隔离开关 DS 140 pF/相	考虑盆式绝缘子、弯头等因素的影响, 通过计算得出波的传播速度接近为真空中光速的 0.95 倍 ^[2]
断开的断路器	把断路器分成许多段, 因其开断, 用分级电容来连接它们。也可用一个等效于全体分级电容串联组合的电容器去连接母线	从断路器的实际尺寸来计算各段的参数
断开的隔离开关	电容	从隔离开关的实际尺寸来计算各段的参数
电力变压器	见 IEC 60071.2-1996 附录 E ^[3]	
电流互感器	它可用一个 π 段来表达	由于它们的保护空气间隙的击穿, 通常可忽略它
充气套管	它可用一无损耗输电线路来表示, 该线路端接一个对地电容(在空气侧)架空瓷套管 BSG:100PF/相	大约为 250 Ω
套管(电容类型)	和模拟损耗的集中电阻串联的若干输电线路油气套管 GAS/OIL:450 pF/相	模拟随着其位置沿着套管上升时波阻抗增加可能是合理的, 但是对于正常的研究集中电容是合适的。
避雷器	当过电压低于保护水平时, 可用电容来模拟 避雷器 LA:150 pF/相	在 GIS 中隔离开关操作通常不引起避雷器导通

表 2 变压器支路切合短管线过电压

操作	DS81	CT81	CB81	CT82	DS83	LAT5	T ₅	LAT5 电流
方式 1	746.4	826.4	877.8	332.7	360.9	480.7	457.0	/
方式 2	561.2	552.7	634.9	449.1	515.7	440.5	625.4	/
方式 3	894.5	656.6	790.3	707.4	675.6	1 141.7	1 150.0	2 013.8A

表 3 变压器绕组纵向各计算点对地过电压

计算点	过电压/kV		
	方式 1	方式 2	方式 3
0(高压端)	457.8	625.4	1 150.0
1	256.3	350.8	607.8
2	134.4	184.5	310.4
3	77.6	107.2	194.5
4	44.8	63.0	117.2
5	26.5	37.7	73.9
6	16.4	24.0	46.9
7	9.6	14.2	28.5
8	6.2	8.8	19.8
9	4.2	3.8	8.2
10(低压端)	0.0	0.0	0.0

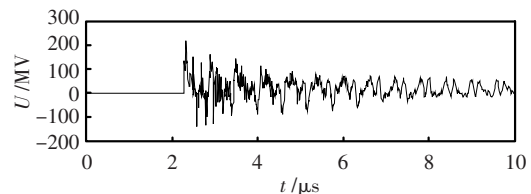


图 4 方式 1 隔离开关闭合操作, 变压器绕组饼 0-1 之间电压波形

2.3 母线带电, 变压器侧的隔离开关操作(方式 2)

方式 2 的隔离开关操作电气接线示意图见图 5。母线 I 经线路带电, 母线 I 侧隔离开关 DS81 已合上, 断路器 CB81 处于断开位置, 通过断路器 CB81 断口均压电容供电, 变压器侧的隔离开关 DS83 闭合操作中多次重燃产生的 VFTO 传递到变压器上。计算时考虑 GIS 断路器至 DS83 隔离开关之间的管道有 1.0 p.u. 的残余电荷; 避雷器安装在最靠近变压器旁。

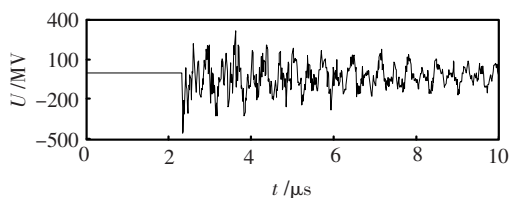


图 3 方式 1 隔离开关闭合操作, 变压器绕组端部对地 VFTO 电压波形

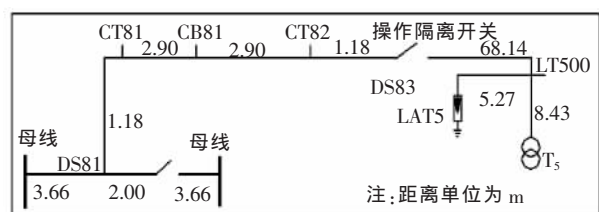


图 5 方式 2 隔离开关操作电气接线示意图

隔离开关 DS83 闭合操作中多次重燃产生的 VFTO 直接传递到变压器上。变压器管线支路的 VFTO 过电压见表 1。变压器绕组端部对地和绕组饼间的 VFTO 电压波形分别见图 6、7。

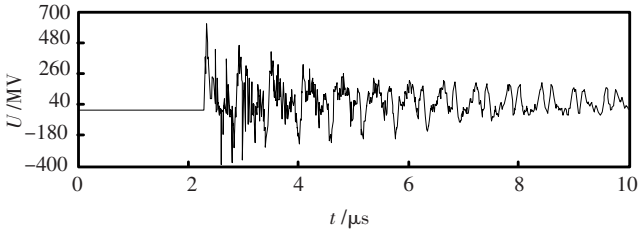


图 6 方式 2 隔离开关闭合操作, 变压器绕组端部对地 VFTO 电压波形

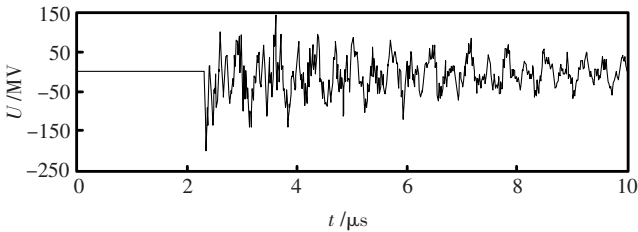


图 7 方式 2 隔离开关闭合操作, 变压器绕组饼 0-1 之间电压波形

2.4 变压器带电, 变压器侧的隔离开关操作(方式 3)

方式 3 的隔离开关操作电气接线示意图见图 8。发电机对变压器单元充电, 母线 I 侧隔离开关 DS81 和断路器 CB81 处于断开位置, 变压器侧的隔离开关 DS83 闭合操作中多次重燃产生的 VFTO 传递到变压器上。计算时考虑 GIS 断路器 CB81 至 DS83 隔离开关之间的管道有 1.0 p.u. 的残余电荷; 避雷器安装在最靠近变压器旁。

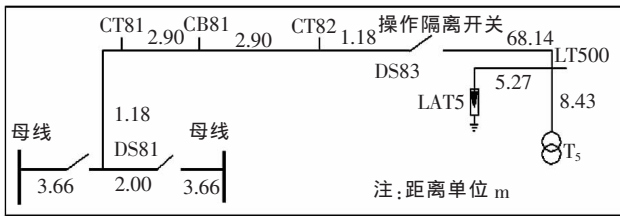


图 8 方式 3 隔离开关操作电气接线示意图

隔离开关 DS83 闭合操作中多次重燃产生的 VFTO 直接传递到变压器上。计算出的变压器绕组端部对绕组各饼纵向 VFTO 见表 4。变压器绕组端部对地和绕组饼间的 VFTO 电压波形分别见图 9、10。

3 VFTO 计算结果的分析

3 种运行方式下计算出的 VFTO 比较见图 11、12。

隔离开关闭合产生的 ns 级的 VFTO, 进入变压器, 作用在绕组上时, 计算出 3 种方式下的振荡频率为 2.8 MHz。

绕组最大对地过电压为 2.56 p.u., 即 1 150 kV 峰

表 4 变压器绕组各饼纵向 VFTO 过电压

计算点之间	过电压/kV		
	方式 1	方式 2	方式 3
0-1	201.5	274.6	542.2
1-2	122.0	166.3	314.6
2-3	56.8	77.3	134.2
3-4	32.8	44.2	77.3
4-5	18.3	25.3	43.3
5-6	10.1	13.7	28.7
6-7	6.8	9.8	18.4
7-8	3.8	5.4	12.3
8-9	3.4	4.9	11.6
9-10	2.7	3.8	8.2

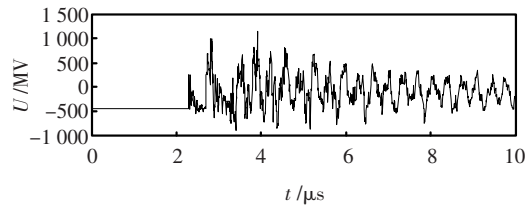


图 9 方式 3 隔离开关闭合操作, 变压器绕组端部对地 VFTO 电压波形

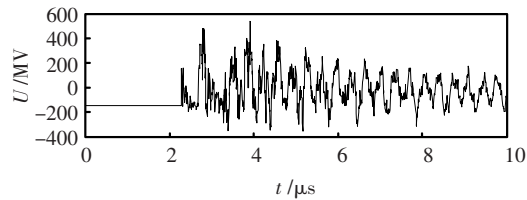


图 10 方式 3 隔离开关闭合操作, 变压器绕组饼 0-1 之间电压波形

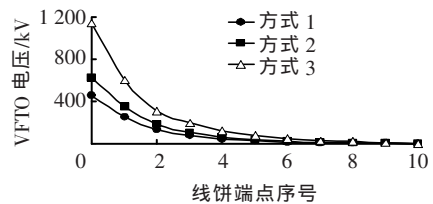


图 11 变压器绕组各饼对地过电压

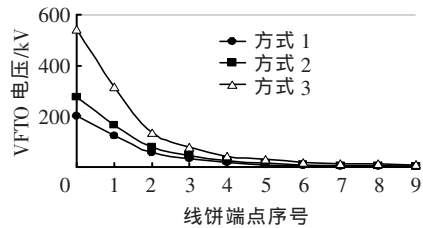


图 12 变压器绕组各饼纵向 VFTO 过电压

值; 绕组第 1 饼的 VFTO 过电压为 1.2 p.u., 即 542 kV, 为全雷电冲击电压 1 550 kV 的 35%, 均为方式 3 下隔离开关 DS83 闭合操作产生的, 它高于方式 1 和 2。方式 1 和 2 的 VFTO 相差不大, 方式 2 高于方式 1。方式 2 的绕组最大对地过电压为 1.39 p.u., 即 625 kV 峰值; 绕组第 1 饼的 VFTO 过电压为 0.61 p.u., 即

(下转第 62 页)

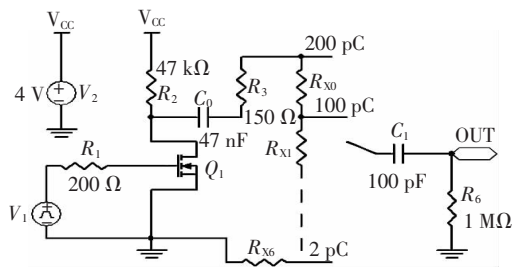


图9 局部放电信号发生器的原理图

表1 R_x 的阻值选择及输出电量

编号	R_{X0}	R_{X1}	R_{X2}	R_{X3}	R_{X4}	R_{X5}	R_{X6}
阻值/ Ω	75.00	37.50	22.50	7.50	3.75	2.20	1.50
理论电压/V	2.00	1.00	0.50	0.20	0.10	0.05	0.02
理论电量/pC	200	100	50	20	10	5	2

测试, 测试结果为: 电压脉冲上升时间 t_r 小于 50 ns; 脉冲信号重复频率 N 为 50 Hz; 输出电荷电量为 200、100、50、20、10、5、2 pC, 共分 7 个输出电荷值。该局部放电校准仪采用 4 节电池供电, 不需要外接电源供电, 使用方便。其产品的技术指标满足标准的设计要求。

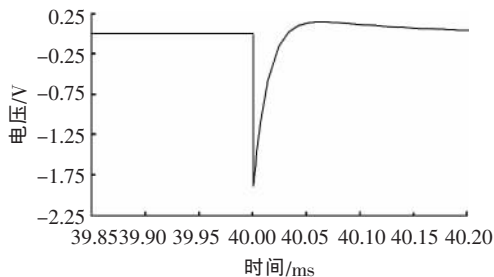


图10 电压输出波形

4 结语

利用校准仪的输出电量与电阻分压成正比

(上接第 58 页)

275 kV, 为全波雷电冲击电压 1 550 kV 的 17%。

一般认为 VFTO 不超过雷电全波冲击下该线饼的雷电梯度电压的 3 倍, 就认为绕组的导线匝绝缘和油道绝缘强度是足够的。500 kV 变压器若采用一般的纠结式绕组结构, 则在 1 550 kV 全波冲击电压作用下, 高压端 1~3 个线饼的最大梯度电压大约为 7%~9%, 若采用插入电容内屏蔽结构的绕组最大梯度电压可能要低一些。以 9% 计, 为 139 kV, 则 VFTO 允许值为 417 kV。根据表 3 计算结果, 方式 1 和 2 的 1~3 个线饼的最大梯度电压在允许范围内。方式 3 超过允许值, 因此要避免方式 3 的操作。

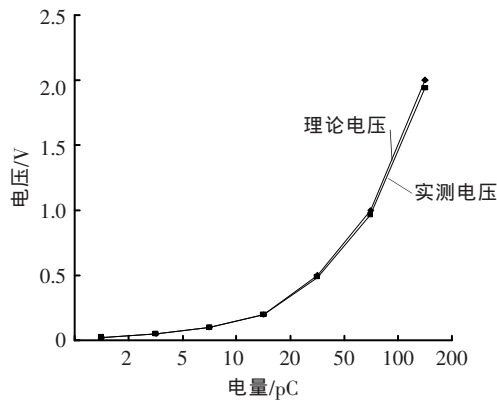


图11 实际输出电压与理论值的比较

关系, 设计出的局部放电校准仪通过改变电阻的比值可以实现多档电量的输出。其输出的实际电荷量及性能指标满足 IEC 60270-2000 标准中规定的指标^[5], 完全可以完成电力系统中容性设备局部放电测量仪器的校准工作。

参考文献:

- [1] 郭俊, 吴广宁, 张血琴, 等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005(2): 29-35.
- [2] 吴广宁. 大型发电机故障放电在线监测及诊断技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2001.
- [3] WENZEL D, BORSI H, GOCKENBACH E. New Digital Calibrator with Impressed Current Pulses for Partial Discharge Measurements[C]//Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, Japan, 1998: 717-720.
- [4] CARMINATI E, GANDELLI A, OSVATH P. A Standard Calibrator for PD Testing [C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, USA, 1992: 379-382.
- [5] IEC TC 42/141 CD. Draft for IEC 60270 Ed. 3[S].
- [6] WENZEL D, BORSI H, GOCKENBACH E. New Digital Calibrator with Impressed Current Pulses for Partial Discharge Measurements[C]//Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, Japan, 1998: 717-720.

4 结语

(1) VFTO 会引起变压器绕组匝间电压分布极不均匀, 威胁变压器匝间绝缘安全。

(2) 根据文中计算结果, 隔离开关操作方式 1 和 2 的 1~3 个线饼的最大梯度电压在允许范围内, 而操作方式 3 超过允许值, 因此要避免方式 3 的操作。

参考文献:

- [1] GB 1985-2004. 高压交流隔离开关和接地开关 附录 F[S].
- [2] IEC TR60071-4. 2004 Insulation co-ordination-part4: Computational Guide to Insulation Co-ordination and Modeling of Electrical Networks. Table 12[S].
- [3] IEC 60071-2. 1996. Insulation Co-ordination-part2: Application Guide. Annex E[S].