

# 某核电站新增联络变 VFTO 计算与分析

林睿, 黄旭丹, 肖焕辉

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 某核电站原来#1、#2号联络变因VFTO导致变压器线圈被烧损,在新增#3联络变改造项目时,设计需充分考虑VFTO对新联络变压器的影响,避免再次发生类似事故。采用ATP电磁暂态计算程序,建立了电站中各GIS设备的电气模型,对420 kV/525 kV GIS中扩建联络变间隔内隔离开关操作引起的VFTO进行仿真计算,通过对10种典型操作方式进行计算和评估,结果表明操作隔离开关附近的过电压值最高,为2.95 p.u.,变压器入口处过电压最大为1.60 p.u.,设备的绝缘等级等参数具备承受VFTO过电压的能力。

**关键词:** VFTO; GIS; 快速暂态过电压; 联络变; 绝缘等级

中图分类号: TM401

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)S1-0055-06

## VFTO Calculation and Analysis of the New Interconnecting Transformer in a Nuclear Power Station

LIN Rui, HUANG Xudan, XIAO Huanhui

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** One Nuclear Power Station No. 3 Unit reconstruction project has improved the transformer design due to No. 1&2 Units had ever suffered failures of the interconnecting transformer coil by VFTO, so the new No.3 interconnecting transformer should be fully considered the impact of VFTO to avoid the similar incidents. This article analyzed 10 routine operations about the VFTO impact to the equipment by using the ATP electromagnetic transient calculation program. The results shown that the overvoltage value near isolating switch is the highest, which is 2.95 p.u., the maximum overvoltage at the transformer entrance is 1.60 p.u., the insulation level of the equipment could fulfill the requirement of VFTO.

**Key words:** VFTO; GIS; interconnecting; transformer; insulation

气体绝缘组合电器(GIS)因具有结构紧凑、占地小、免维护、运行可靠等优点,在超高压系统和核电站得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。运行经验表明,GIS中的断路器(CB)和隔离开关(DS)操作时会产生波前极陡、高频振荡的快速暂态过电压(VFTO)<sup>[5-6]</sup>。断路器因有灭弧装置,不易发生重燃,因此在VFTO造成的事故中以隔离开关的操作尤为常见。VF-

TO不仅危及GIS内部设备的绝缘,还会以行波的形式传播并耦合到外部,威胁二次设备及相连的高压设备的绝缘,尤其是有绕组的设备,如变压器、电抗器等<sup>[2-4]</sup>。从已有的研究成果可知,VFTO的幅值、频率、波形与GIS的接线方式、结构尺寸、设备参数、变压器和GIS的连接方式以及被操作线路的残余电荷等因素有关<sup>[7-8]</sup>。另外,VFTO与隔离开关操作方式,包括系统运行方式、被操作开关的位置、操作顺序等密切相关<sup>[9]</sup>,因此研究隔离开关操作方式对VFTO的影响有一定的现实意义。

本文结合国内某核电站改造工程的实例,采用ATP电磁暂态计算程序,对电站内420/525 kV GIS中联络变间隔内隔离开关操作引起的快速暂态过

收稿日期: 2016-11-07

基金项目: 中国能建广东院科技项目“核电关键核心技术研究”(EX03901W)

作者简介: 林睿(1979),女,广东广州人,高级工程师,硕士,主要从事核电厂电气设计工作(e-mail)linrui@gedi.com.cn。

电压(VFTO)进行仿真计算,并评估 VFTO 对设备绝缘的威胁。

## 1 工程概况

为提高联网系统的安全性和供电可靠性,国内某核电站的改造工程拟增加一台 525/420 kV 联络变压器,即在原有开关站的 500 kV 与 400 kV 侧分别新增一个不完整串 GIS,联络变压器两侧通过 GIL 分别接入两侧新增 GIS,形成新的互联。该站原来#1、#2号联络变曾因 VFTO 导致变压器线圈被烧损的故障,因此在新增#3联变改造项目的的设计时应充分考虑 VFTO 对新联变变压器的影响,避免再次发生类似事故。

### 1.1 电气主接线图

某核电站 GIS 主接线方案见图 1。接线方式为 3/2 断路器接线。本期工程建设在 400 kV 和 500 kV 各设一个不完整串,1组 900 MVA 联络变,出线为预留;前期工程由 4 回出线 and 2 组主变、2 组联络变组成。

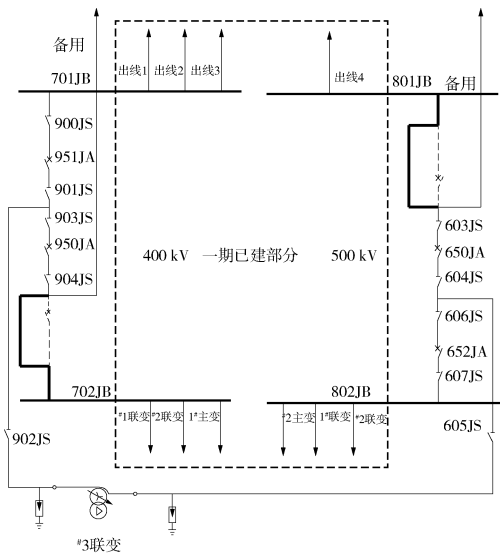


图 1 420/525 kV GIS 建设主接线图

Fig. 1 Singleline diagram of 420/525 kV GIS

### 1.2 电站设备相关参数

本期工程电站设备相关参数如表 1 所示。

## 2 计算研究内容

本文采用 ATP 电磁暂态计算程序,对电站 420 kV GIS 中联络变间隔内隔离开关操作引起的的快速暂态过电压(VFTO)进行仿真计算,并评估 VFTO

表 1 变电站内设备等值参数

Tab. 1 Equivalent parameters of main equipment in substation

设备名称	设备代号	等值计算参数/
变压器#3	TR3	对地电容 1 500 pF(525 kV 侧)/2 000 pF(420 kV 侧)
断路器	CB	断口电容 520 pF/对地电容 28.5 pF
隔离开关	DS	断口电容 20 pF
套管	BS	150 pF
电压互感器	VT	50 pF
避雷器	MOA	43 pF(PSA444F)/50 pF(PSB360FT)
接地开关	ES	45 pF

对设备绝缘的威胁<sup>[10-11]</sup>。根据实际变电站设备的结构和布局,采用 S. Ogawa 提出的 GIS 电路模型,建立 GIS 母线、变压器、断路器、隔离开关、接地开关、绝缘子、套管、避雷器等模型,研究了主变和进线的隔离开关在不同操作方式下产生的 VFTO 过电压。VFTO 过电压幅值较大的点一般位于被操作的开关附近、孤岛部分、电气末端(如母线末端)等处,并且 VFTO 对主变的匝间绝缘危害较大<sup>[12-14]</sup>,所以在计算中重点关注以下节点处的过电压:各主变入口处,主变电压互感器处,被操作隔离开关附近设备上,以及整个变电站内 VFTO 最大幅值。通过对几种典型操作方式下 VFTO 的仿真计算,分析了 VFTO 过电压是否会对该变电站的主变绝缘及其他设备绝缘产生威胁,是否需要采取专门措施抑制 VFTO。

计算研究采用 S. Ogawa 提出的 GIS 元件的电路模型。由于整个系统近似为三相对称,可用单相电路进行模拟<sup>[15-18]</sup>。如表 2 所示,在 GIS 中,直管道母线一般较短,在计算中略去损耗,GIS 管道母线用波阻抗  $Z=63 \Omega$ 、波速  $v=290 \text{ m}/\mu\text{s}$  的无损传输线等值。断路器、隔离开关闭合状态以及电流互感器等效为连线,断路器、隔离开关断开状态通过断口电容与对地电容模拟,接地开关断开状态、避雷器、电压互感器、套管和电缆终端均用集中电容模拟<sup>[19-20]</sup>。

由于不需要分析变压器内部过电压分布情况,并且根据以往的经验,在计算模型中,用入口电容等效变压器与用其它复杂模型等效的计算结果吻合很好,所以变压器用理想电源及入口电容和等值电感进行等效,525 kV 侧  $L=109 \text{ mH}$ ,420 kV 侧  $L=70 \text{ mH}$ 。

电弧的重燃和熄弧采用基于动态电弧模型的 MODELS 模块模拟。动态电弧模型是基于 Mayr 电弧理论对分段电弧模型的一种改进, 在弧道电阻的变化过程描述中考虑了电弧散热功率以及电弧电流的影响, 能有效的模拟燃弧的整个过程, 计算精度高<sup>[21-22]</sup>。利用 ATP-EMTP 软件自带的 MODELS 模块及语言, 基于动态电弧理论基础, 代入改进欧拉法公式进行编程, 实现符合动态电弧模型的控制函数, 得到隔离开关的电弧重燃模型。

表 2 变电站内设备等效模型

Tab. 2 Equivalent models of main equipment in substation

设备	等效 ATP 模型	设备	等效 ATP 模型
GIS 母线 管道		避雷器	
隔离 开关		隔离开 关电弧 模型	
断路器		电压 互感器	
变压器		接地 开关	

表 3 420 kV 和 525 kV 侧操作方式

Tab. 3 Operation modes of 420 kV and 525 kV

序号	902JS	901JS	951JA	900JS	903JS	950JA	904JS
1	合闸 操作	断开	—	—	断开	—	—
2	闭合	合闸 操作	断开	—	断开	—	—
3	闭合	断开	—	断开	合闸 操作	断开	—
4	闭合	断开	断开	合闸 操作	—	—	—
5	闭合	—	—	—	断开	断开	合闸 操作
序号	605JS	606JS	652JA	607JS	604JS	650JA	603JS
6	合闸 操作	断开	—	—	断开	—	—
7	闭合	断开	—	断开	合闸 操作	断开	—
8	闭合	合闸 操作	断开	—	断开	—	—
9	闭合	断开	断开	合闸 操作	—	—	—
10	闭合	—	—	—	断开	断开	合闸 操作

注: 序号 1—5 为 420 kV 侧操作方式, 序号 6—10 为 525 kV 侧操作方式。操作方式的前提均为另一侧带电的情况下的操作, 即操作的隔离开关变压器一侧是带压, 另一侧为残余电荷。

### 3 电站 GIS VFTO 仿真计算与分析

VFTO 与弧道电阻、残余电压有关, 弧道电阻越大、残余电压与电站电压差值越低, 则 VFTO 幅值就低。按最严重情况考虑, 给隔离开关孤岛部分充以  $-1.0 \text{ p.u.}$  的残余电压, 假设隔离开关在电站电压为  $+1.0 \text{ p.u.}$  时动作, 这时的 VFTO 过电压最大, 理论上可达  $3.0 \text{ p.u.}$ 。

根据国内实际针对快速隔离开关和慢速隔离开关的实验来看, 隔离开关每次的分合闸时间和速度主要决定了每次分合闸操作中电弧燃熄弧的次数以及发生最严重情况燃熄弧的概率, 而对于单次击穿的计算结果并没有多少影响<sup>[23]</sup>。因此, 在 VFTO 的计算中, 不考虑隔离开关的分合闸时间和速度。

如表 3 所示, 本文考虑了以下 10 种操作方式下 VFTO 过电压。

操作方式 1 计算无线路运行时, 对变压器#3 420 kV 侧合闸的情况。隔离开关操作电气接线示意图如图 1 所示。

操作方式 2 计算无线路运行, 902JS 闭合时, 操作 901JS 对变压器#3 420 kV 侧合闸的情况。

操作方式 3 计算无线路运行, 902JS 闭合时, 操作 903JS 对变压器#3 420 kV 侧合闸的情况。

操作方式 4 计算母线 701JB 带压运行时, 对母线侧隔离开关 900JS 进行合闸。

操作方式 5 计算母线 702JB 带压运行时, 对母线侧隔离开关 904JS 进行合闸。

操作方式 6 计算无线路运行时, 对变压器#3 525 kV 侧合闸的情况。

操作方式 7 计算无线路运行时, 操作 604JS 对变压器#3 525 kV 侧合闸的情况。

操作方式 8 计算无线路运行时, 操作 606JS 对变压器#3 525 kV 侧合闸的情况。

操作方式 9 计算母线 802JB 带压运行时, 对母线侧隔离开关 607JS 进行合闸。

操作方式 10 计算母线 801JB 带压运行时, 对母线侧隔离开关 603JS 进行合闸。

以上 10 种操作方式的计算结果如表 3 所示。

表3 10种操作方式下的VFTO计算结果

Tab. 3 The VFTO calculation result of ten kinds of operating mode

方式1	TR3	VT	902JS	901JS	SA
	1.22	2.17	2.34	2.25	2.13
方式2	TR3	VT	901JS	951JA	SA
	1.21	1.70	1.65	1.85	2.08
方式3	TR3	VT	903JS	950JS	SA
	1.23	1.72	1.85	1.96	1.95
方式4	TR3	VT	901JS	951JA	900JS
	1.07	1.40	2.09	2.95	2.33
方式5	TR3	VT	903JS	950JA	904JS
	1.03	1.25	2.20	2.93	2.43
方式6	TR3	VT	605JS	604JS	SA
	1.60	2.25	2.37	2.35	2.1
方式7	TR3	VT	604JS	650JA	SA
	1.40	1.55	1.65	1.79	1.59
方式8	TR3	VT	606JS	652JA	SA
	1.53	1.67	2.14	1.78	1.73
方式9	TR3	VT	606JS	652JA	607JS
	1.05	1.41	2.11	2.92	2.43
方式10	TR3	VT	604JS	650JA	603JS
	1.03	1.27	2.20	2.93	2.55

操作方式1中变压器入口VFTO的频率分布如图2所示。由于传播到变压器入口的频率经过了衰减,所以频率大都分布在1 MHz以下。

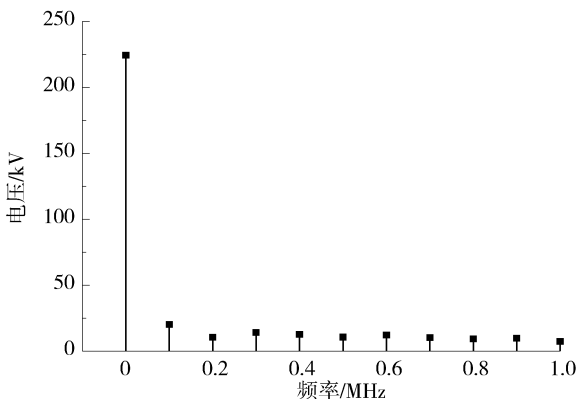


图2 变压器入口VFTO的频率分布

Fig. 2 The frequency distribution of VFTO in transformer entry

## 4 VFTO计算结果分析

综合上述所有操作方式下的VFTO计算结果,可以看出:

针对420 kV侧#3联络变压器VFTO计算中,方式1投入设备最少,电站整体产生的过电压情况

较为严重,主变入口处VFTO最大值1.22 p.u.,其中隔离开关上VFTO最大值为2.34 p.u.;方式2、3由于操作点距变压器距离相近,且投入设备数量也相近,其计算结果相差不大,大部分设备上的过电压幅值小于方式1的计算结果;由于VFTO整体幅值并不太大,而变压器入口电容较大,因此,方式1、2、3传播到变压器入口处的波在经过折反射之后其能量大幅削减,幅值均较低;方式4、5母线带压运行时操作母线侧隔离开关,操作隔离开关上过电压达到2.43 p.u.,在操作隔离开关附近的断路器上产生的VFTO幅值为所有操作方式中最大的,最大值达到了2.95 p.u.,传播到变压器入口处的波能量大幅削减,幅值较低。

525 kV侧#3联络变压器VFTO计算中,方式6投入设备最少,电站整体产生的过电压情况较为严重,主变入口处VFTO最大值1.60 p.u.,其中隔离开关上VFTO最大值为2.37 p.u.;方式7、8的结果分析与方式2、3类似;方式9、10操作隔离开关上过电压达到2.55 p.u.,在操作隔离开关附近的断路器上产生的VFTO幅值为所有操作方式中最大的,最大值达到了2.93 p.u.,传播到变压器入口处的波能量大幅削减,幅值较低。

对420 kV侧和525 kV侧计算结果进行比较可以看出:525 kV侧VFTO计算结果整体大于420 kV计算结果。其主要原因在于,在计算建模过程中,变压两侧设备所取参数相同,525 kV侧变压入口电容取值甚至小于420 kV侧变压器入口电容,而高压侧隔离开关操作过程中所产生的VFTO幅值更高,能量更大,相同参数的设备对于其能量的分散抑制作用有限,导致传播到变压器入口处VFTO幅值更高,而变压器入口电容的减小,也将减小其对于VFTO的抑制作用,因此,525 kV侧VFTO计算结果要大于420 kV侧计算结果。

以下为分别针对电站中变压器和GIS本体的设计参数结果分析:

1)根据变压器厂商的验证报告,联络变压器对于在525 kV侧和420 kV对于VFTO的耐受电压分别为1 300 kV和1 175 kV,本次计算中,对于525 kV侧,变压器入口最大VFTO幅值为1.60 p.u.,即685.86 kV,远小于变压器耐受电压1 300 kV;对于420 kV侧,变压器入口最大VFTO幅值为1.23 p.u.,即527.25 kV,远小于变压器耐受电压

1 175 kV, 因此, 变压器不会遭到损坏。

但根据国内外针对 VFTO 的研究表明: VFTO 对变压器的影响主要是高频振荡分量对主变匝间绝缘的影响。同样根据变压器厂商提供的验证报告, 扩建变压器对于 525 kV 侧和 420 kV 侧首端匝间绝缘耐受值分别为 80 kV 和 74 kV, 报告中同时指出, 当 VFTO 振荡频率不超过 1MHz 时, 如图 2 所示, 其首端匝间承受 VFTO 幅值不超过总 VFTO 幅值的 3%, 分别对 525 kV 侧、420 kV 侧首端匝间承受最大电压进行计算如下:

525 kV 侧:  $685.86 \times 0.03 = 20.58 \text{ kV} < 80 \text{ kV}$

420 kV 侧:  $527.25 \times 0.03 = 15.82 \text{ kV} < 74 \text{ kV}$

根据以上计算结果可知, 变压器不会遭到损坏, 且仍存在较大的裕度。

2) 电站中各个设备出现的 VFTO 最大值出现在操作点附近, 对于 420 kV 侧: 最大 VFTO 幅值达到 2.95 p. u., 即 101.1 kV, 本次计算针对的 GIS 400 kV 系统的雷电冲击耐受电压试验标准为 1550 kV, 取 0.8 的安全系数, 即  $0.8 \times 1550 = 1240 \text{ kV}$ , 最大过电压小于该值, 因此 VFTO 过电压对 GIS 本体的主绝缘不构成威胁。对于 525 kV 侧: 最大 VFTO 幅值达到 2.93 p. u., 即 1254 kV, 本次计算针对的 GIS 500 kV 系统的雷电过电压试验标准为 1675 kV, 仍然取 0.8 的安全系数, 即  $0.8 \times 1675 = 1340 \text{ kV}$ , 最大过电压小于该值, 因此, VFTO 过电压也对 GIS 本体的主绝缘不构成威胁, 但这两种方式下 VFTO 幅值仍偏大, 应尽量减少此种操作方式<sup>[24]</sup>。

## 5 结论

本文对某核电站 420 kV/525 kV GIS 中扩建联络变间隔内隔离开关操作引起的快速暂态过电压 (VFTO) 进行仿真计算, 建立了电站中各 GIS 设备的电气模型, 通过对 10 种典型操作方式下的 VFTO 进行计算, 得到以下结论:

1) 对典型操作方式下的 VFTO 进行计算得出: 操作隔离开关附近的过电压值最高, 为 2.95 p. u. 和 2.93 p. u., 经过计算得到, 最大过电压值均在 GIS 设备承受范围内, 过电压对 GIS 内部各设备不构成威胁; 对于 PT 对 VFTO 的耐压分析, 目前国内外研究中均作为 GIS 本体耐压的一部分考虑分析, 因此, 认为 GIS 本体不受 VFTO 影响时, 认为

VFTO 对于 GIS 中 PT 不构成威胁;

2) 变压器入口处过电压最大为 1.23 p. u. 和 1.60 p. u.; 在这几种操作方式下无线路运行时投入变压器和母线带压操作刀闸所产生的过电压较高, 主变上的过电压幅值一般较低。上述计算残余电荷电压按的是最严重的情况计算的, 因而计算结果应该是偏严格的, 分别对变压器整体耐压和匝间耐压进行了分析, 认为过电压对变压器不构成威胁。

3) 在隔离开关的操作过程中, 会发生很多次的电弧击穿和重燃现象, 每次击穿和重燃都可能造成过电压的产生, 而当上一次燃弧在隔离开关和断路器的短线之间留下的残余电荷恰好为 -1 p. u. 时, 而隔离开关另一侧的电压恰好为 1 p. u. 时, 下一次的击穿将会造成最严重的过电压, 即为最极端情况的燃熄弧。

## 参考文献:

- [1] 胡国根. 电力系统过电压分析与计算 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [2] CANADIAN H W D. 电力系统电磁暂态计算理论 [M]. 李永庄, 林集明, 曾昭华译. 北京: 水利水电出版社, 1991.
- [3] ATP-EMTP Rule Book. Canadian-American EMTP Users Group [M]. [S. l.]: [s. n.], 1997.
- [4] 孙伟, 王韵, 武增尧, 等. 500 kV GIS 中快速暂态过电压的测量 [J]. 高压电器, 1998(4): 11-14.  
SUN W, WANG Y, WU Z Y, et al. Measurement of the very fast transient overvoltage in 500 kV GIS [J]. High-voltage Electrical Apparatus, 1998(4): 11-14.
- [5] FUJIMOTO N, BOGGS S A. Characteristics of GIS disconnector induced short rise-time transients incident on externally connected power system components [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(1): 223-233.
- [6] YANABU S, MURASE H. Estimation of fast transient overvoltage in gas-insulated substation [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1990, 5(1): 278-283.
- [7] CHANG C, WANG H, LOU J N. Transient analysis of capacitance switching for industrial power system by pspice [J]. Electric Power Systems Research, 1998(45): 29-38.
- [8] 高有华, 王尔智. GIS 母线、管线暂态电路模型及快速暂态过电压计算 [J]. 沈阳工业大学学报, 2001, 23(3): 203-206.  
GAO Y H, WANG E Z. Transient modeling of bus, bushing in GIS and calculation of very fast transient overvoltage [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2001, 23(3): 203-206.
- [9] 刘英, 韩彦华, 施围, 等. 110 kV GIS 投切空载变压器过电

- 压研究 [J]. 高压电器, 2000, 36(4): 7-11.
- LIU Y, HAN Y H, SHI W, et al. Research of no-load transformer switching overvoltage of 110 kV GIS [J]. High-voltage Electrical Apparatus, 2000, 36(4): 7-11.
- [10] 何善庆. GIS 中的快速暂态现象 [J], 高压电器, 1995, 31(2): 41-43.
- HE S Q. Very fast transient phenomena in GIS [J]. High-voltage Electrical Apparatus, 1995, 31(2): 41-43.
- [11] BOJIC S, SEKSO A, UGLESIC I. Comparative research into switching over-voltage in the case of switching by SF6 circuit breaker in 400 kV network of Croatia [C]//IPST '95 International Conference on Power Systems Transients, Lisbon: [s. n.], 1995: 173-177.
- [12] OGAWA S, HAGINAMORI E, NISHIWAKI S, et al. Estimation of restriking transient overvoltage on disconnecting switch for GIS. IEEE transactions on power [J]. Delivery, 1986, 2(1): 95-102.
- [13] 鲁铁成, 李思南, 冯伊平, 等. GIS 中快速暂态过电压的仿真计算 [J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 3-5.
- LU T C, LI S N, FENG Y P, et al. Calculation of very fast transient overvoltage in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 3-5.
- [14] 钟连宏, 欧世尧, 周红霞. GIS 中快速暂态过电压的分析及计算 [J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 60-62.
- ZHONG L H, OU S Y, ZHOU H X. Analysis and calculation of very fast transient overvoltage in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 60-62.
- [15] 梁樑. 500 kV 钱江 GIS 变电站 VFTO 过电压研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- LIANG L. 500 kV Qianjiang GIS substation VFTO research [D]. Hanzhou: Zhejiang University, 2009.
- [16] 陈维江, 颜湘莲, 王绍武, 等. 气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压研究的新进展 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 1-11.
- CHEN W J, YAN X L, WANG S W, et al. Recent progress in investigations on very fast transient overvoltage in gas insulated switchgear [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 1-11.
- [17] 王钦冰. VFTO 及其在变压器绕组中的分布研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- WANG Q B. The research of VFTO and its distribution in transformer winding [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [18] 王森, 孙强, 卢江平, 等. GIS 变电站特快速暂态过电压研究的技术现状 [J]. 陕西电力, 2009, 37(6): 53-58.
- WANG S, SUN Q, LU J P, et al. Technology status of very fast front transient voltage study in GIS [J]. Shanxi Electric Power, 2009, 37(6): 53-58.
- [19] 王娜, 林莘, 徐建源, 等. 特高压 GIS 变电站中快速暂态过电压仿真及其特性分析 [J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3310-3315.
- WANG N, LIN X, XU J Y, et al. Simulation and characteristics analysis of very fast transient overvoltage in GIS substation with ultra high voltage [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3310-3315.
- [20] 李六零, 胡攀峰, 邱毓昌. 不同变压器绕组模型对计算快速暂态过电压的影响分析 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(10): 1160-1164.
- LI L L, HU P F, QIU Y C. Analysis of very fast transient overvoltage calculation affected by different transformer winding models [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(10): 1160-1164.
- [21] 林莘, 王娜, 徐建源. 动态电弧模型下特快速瞬态过电压特性的计算与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 157-164.
- LIN X, WANG N, XU J Y. Calculation and analysis of very fast transient over-voltage characteristic on the condition of dynamic arcing model [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 157-164.
- [22] 滕辉. 精确电弧模型下 GIS 中 VFTO 的计算与分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- TENG H. Calculation and analysis of VFTO in GIS with accurate arc model [D]. Nanning: Guangxi University, 2013.
- [23] 戴敏, 谷定燮, 孙岗, 等. 特高压气体绝缘开关设备特快速瞬态过电压的试验回路研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 28-37.
- DAI M, GU D X, SUN G, et al. Study on full-scale 1 000 kV gas insulated switchgear test circuit for very fast transient overvoltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 28-37.
- [24] 刘青. 隔离开关不同操作方式产生的快速暂态过电压 [J]. 高压电器, 2011, 47(4): 17-22.
- LIU Q. Very fast transient overvoltage caused by different switching modes of disconnecter [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 17-22.

(责任编辑 郑文棠)