

发电厂 500 kV GIS 升压站主变压器合闸过电压分析

刘守豹, 侯玉成, 董理, 赵宇航

(大唐水电科学技术研究院有限公司, 广西南宁 530007)

摘要: 发电厂 GIS 升压站具有高度封闭化的特点, 在 GIS 断路器操作过程中产生的暂态过电压过程复杂。以某发电厂 500 kV GIS 升压站主变压器合闸过程中出现的绕组绝缘损坏事故为分析对象, 采用电磁暂态分析软件 ATP - EMTP 建立发电厂一次设备及变压器绕组分布参数等值电路, 对故障变压器合闸过电压及变压器内部电压分布进行了仿真计算。分析结果表明, 变压器合闸过程中未出现超过其理论耐受能力的过电压; 通过合闸时刻变压器绕组电压分布与绕组损坏情况对比表明, 变压器绕组绝缘击穿的原因是其自身绝缘缺陷。

关键词: 变压器; 合闸; 快速暂态过电压; 分布参数; 梯形等值电路; ATP - EMTP

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2020)01 - 0026 - 05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.01.006

Analysis on Switching Overvoltage of Main Transformer in 500 kV GIS Booster Station of Power Plant

Liu Shoubao, Hou Yucheng, Tong Li, Zhao Yuhang

(Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract: The GIS boost station in power plant is highly enclosed, and the transient overvoltage process is very complicated during the operation of GIS switches. Taking the winding insulation failure occurred in the closing process of main transformer in a 500 kV GIS boost station of a power plant as analysis object, the equivalent circuit of primary equipment and transformer winding distribution parameters is established by using the electromagnetic transient analysis software ATP - EMTP. Simulation calculation is carried out for the closing overvoltage of the transformer and the voltage distribution inside the transformer. The analysis results show that there is no over-voltage exceeding the theoretical tolerance during the transformer closing process, and the comparison between the voltage distribution of the transformer winding and the damage of the transformer winding shows that the fast transient overvoltage is not the cause of the transformer winding insulation breakdown and the real cause is the insulation defect itself.

Key words: transformer; closing; very fast transient overvoltage; distributed parameter; trapezoidal equivalent circuit; ATP - EMTP

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 以其占地面积小、运行稳定和维护方便等优点, 被广泛应用于电力系统中^[1-5]。在 GIS 断路器、隔离开关操作过程中会形成快速瞬态过电压 (very fast transient overvoltage, VFTO), 快速暂态过电压的特点是幅值大、波头陡、时间短^[6-9]。

对于发电厂 GIS 升压站, 其封闭化程度更高, 从变压器高压侧至出线均采用 GIS 管道连接, 因此 GIS 操作过程中所产生的暂态过程更加复杂^[10-11]。

对于 GIS 操作过程中出现的故障, 在未获得暂态过电压信息的情况下, 通常采用仿真手段进行事后分析。开展 GIS 升压站暂态过程分析的关键在于建立等效分布参数模型^[12-16], 尤其是 GIS 和变压器的分布参数模型。

下面以某发电厂 500 kV GIS 升压站主变压器合闸时发生的变压器高压绕组绝缘击穿事故为分析对象, 采用电磁暂态分析软件 ATP - EMTP 建立发电厂一次设备分布参数模型, 对于 GIS 采用单芯电缆模拟, 对于变压器建立绕组梯形等值电路, 对各种工况下的主变压器合闸过电压进行量化计算。分析表明该发电厂 GIS 合空载变压器所产生的过电压未

超过主变压器理论耐受值,且主变压器绕组故障特征不符合VFTO击穿现象,过电压不是导致主变压器绝缘事故的根本原因。

1 故障简介

某发电厂在完成500 kV 4号主变压器年度检修和预防性试验后,对4号主变压器恢复送电。4号主变压器合闸前1号机组运行,2、3、5号机组备用,500 kV I、II组母线运行,500 kV第一串、第三串合环运行,4号主变压器两侧断路器热备用,两回出线下网负荷为430 MW,40 Mvar,电厂一次设备主接线如图1所示。

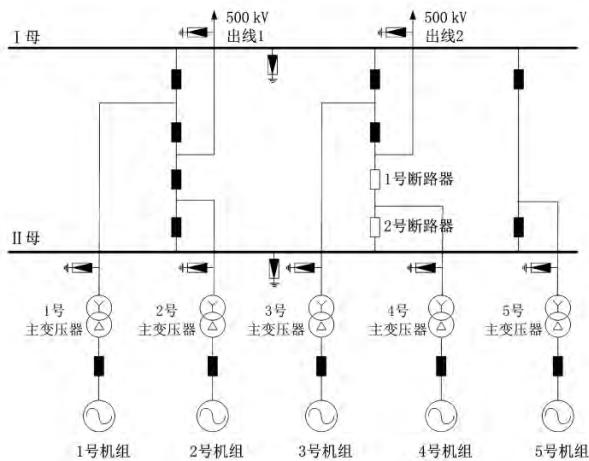


图1 电厂一次设备接线

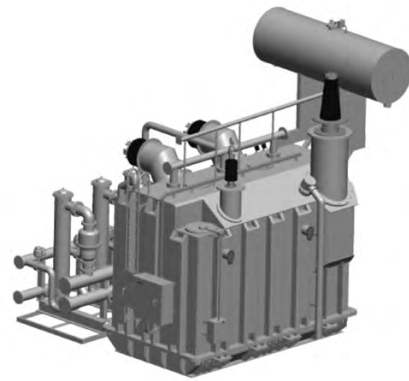
在合上2号断路器时,4号主变压器保护动作,断路器跳闸。跳闸原因为合闸时刻4号主变压器A相高压绕组绝缘故障。4号主变压器A相结构如图2所示,解体后4号主变压器高压绕组绝缘击穿情况如图3所示。

从图3 高压绕组绝缘损坏情况可知:

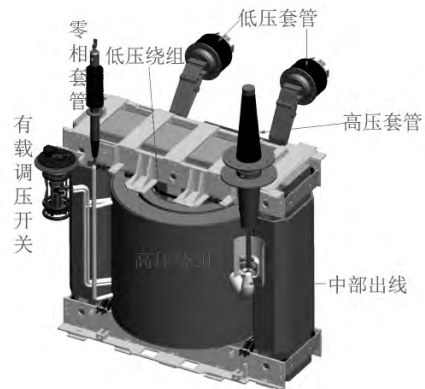
- 1) 高压绕组发生绝缘贯穿性击穿而非局部击穿;
- 2) 高压绕组下半部分绝缘损坏较上半部分严重,其中尾端损坏最严重;
- 3) 高压绕组首端绝缘损坏程度较轻,最上端基本完好。

2 仿真模型的建立

建立变压器合闸过电压电磁暂态分析模型,首先是建立整体模型,该模型中变压器采用集中参数



(a) 变压器外观

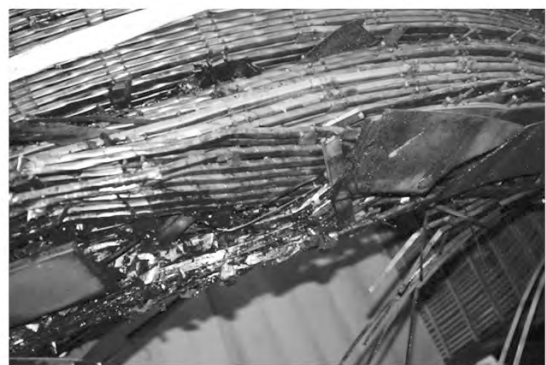


(b) 变压器绕组和套管

图2 变压器结构



(a) 高压火线出头往右第1-8档内侧导线绝缘碳化情况



(b) 下端部导线扭曲变形情况

图3 高压绕组绝缘损坏情况

加分布电容模拟;其次建立变压器梯形等值电路,实

现对变压器内部过电压的模拟。

GIS 由单芯电缆模拟,变压器由单相双绕组变压器组合而成,变压器高压侧入口电容为 1070 pF (厂家提供数据);因快速瞬态过电压分析中分布电容对分析结果的影响较大,在分析中充分考虑 GIS 母线、变压器套管、绕组对地及绕组之间的电容分布;次要电容根据厂家提供参数(如表 1 所示)进行设置。

表 1 次要电容值

设备名称	电容值/pF	示意图
断路器	C1: 380	
	C2: 400	
	C3: 840	
隔离开关	C1: 122	
	C2: 109	
	C3: 53	

为了对变压器内部波过程进行分析,需要建立绕组梯形等值电路。对于多绕组变压器,应对绕组分布电容参数进行提取^[17-18],建立的梯形等值电路^[19-20]示意图见图 4。

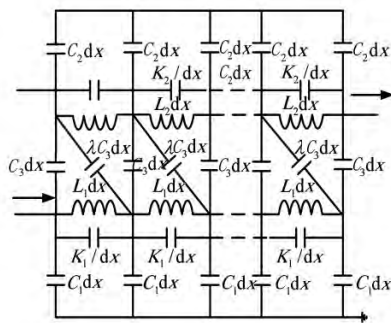


图 4 变压器绕组梯形等值电路

图 4 中,高压绕组、低压绕组单位长度的电感分别用 L_1 、 L_2 表示;高压绕组、低压绕组单位长度对地电容分别用 C_1 、 C_2 表示;编号相同的单位长度高压、低压绕组之间的互容用 C_3 表示;编号相邻的单位长度高压、低压绕组之间的互容用 λC_3 表示。

用 X 表示高低压绕组的高度,建立高压绕组电感 $L_{高}$ 、低压绕组电感 $L_{低}$ 、高压绕组对地电容 $C_{高}$ 、低压绕组对地电容 $C_{低}$ 、高压绕组和低压绕组互容 $C_{高-低}$ 、高压绕组纵向电容 $K_{高}$ 、低压绕组总的纵向电容 $K_{低}$ 建立等式 (1) 如下:

$$\begin{cases} L_{高} = L_1 X \\ L_{低} = L_2 X \\ C_{高} = C_1 X \\ C_{低} = C_2 X \\ C_{高-低} = C_3 + \lambda C_3 \\ K_{高} = K_1 / X \\ K_{低} = K_2 / X \end{cases} \quad (1)$$

式中 λ 为单位长度的高压、低压绕组正对电容与相邻电容的比例系数,此处取值 0.5。变压器绕组空间因素 $\alpha = \sqrt{C_{高}/K_{高}}$ (或 $\alpha = \sqrt{C_{低}/K_{低}}$), α 的范围一般在 2.5 ~ 7.5 之间,此处取值 5.0。

根据变压器出厂试验结果,变压器部分电容测试值如表 2 所示,根据实测值建立变压器绕组梯形等值电路及升压站过电压仿真模型如图 5 所示。

表 2 4 号主变压器电容量测试值

测试项目	电容量测试值/pF		
	A	B	C
高压侧套管对地	346	345	346
零相套管	573	583	565
高压对低压及地	6033	6034	6082
低压对高压及地	15 840	15 850	15 800
高压、低压对地	16 220	16 250	16 200

图 5 变压器梯形等值电路中,在高压绕组从上至下依次排列 11 个测试点,测试点 1 设置于高压绕组的入口处,测试点 11 设置于高压绕组尾端。

3 合闸时变压器入口处的过电压

在不同的合闸时刻(合闸时刻 A 相相角不同),对应的最大过电压如表 3 所示。

表 3 不同合闸时刻的过电压

合闸时刻 A 相相角/(°)	过电压最大幅值/kV	相序
0	816	A
30	892	C
60	843	C
90	862	B
120	845	B
150	860	A

为了尽可能寻找合闸时刻最大过电压幅值,在对 A 相相角 [5 55] 区间每隔 5° 细化,计算得到合闸

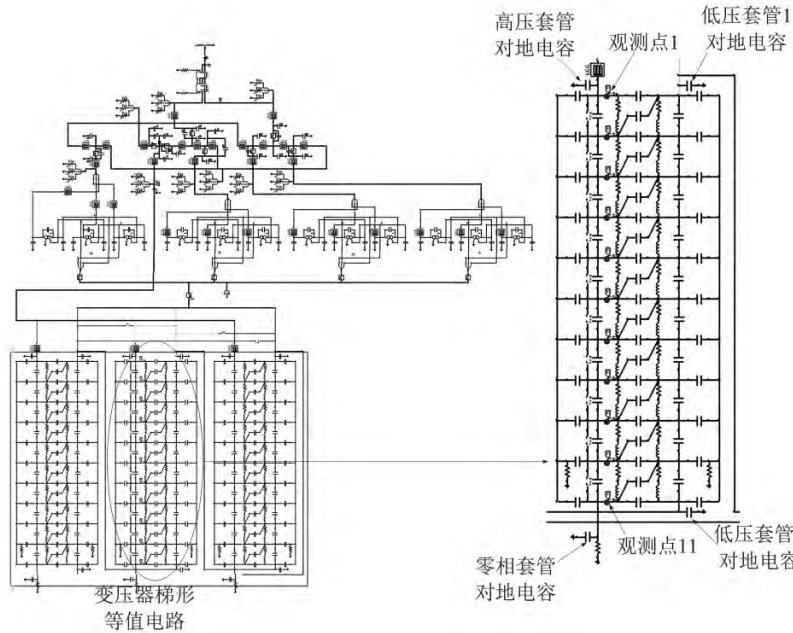


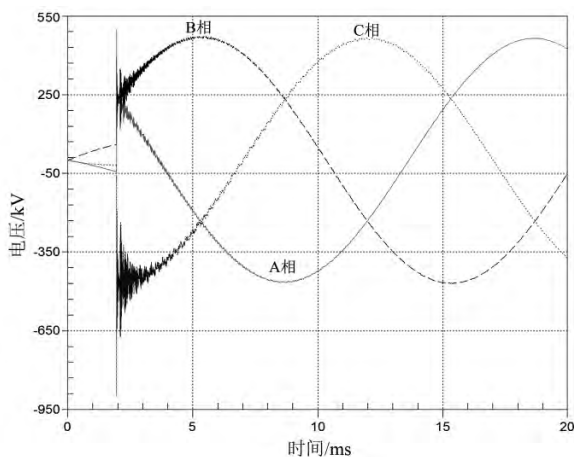
图5 变压器绕组梯形等值电路及升压站过电压仿真模型

过电压如表4所示。

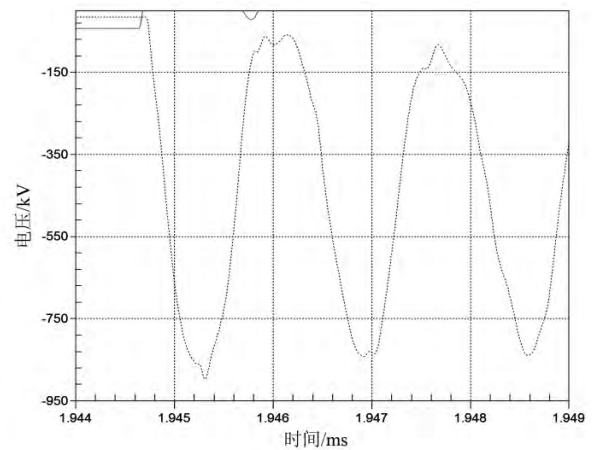
表4 A相相角[5, 55]区间的合闸过电压

A相相角/(°)	过电压最大幅值/kV	相序
5	786	A
10	818	C
15	846	C
20	866	C
25	882	C
30	892	C
35	898	C
40	897	C
45	891	C
50	881	C
55	864	C

对应表4中A相相角为35°时,合闸过电压波形如图6所示。



(a) 三相电压波形



(b) B相电压波形放大

图6 A相相角为95°时的合闸过电压波形

仿真分析小结:

1) 当变压器合闸操作过程中未出现电弧时,产生的最大操作过电压幅值为898 kV,小于变压器操作冲击耐受电压1175 kV及其雷电过电压耐受值1550 kV;

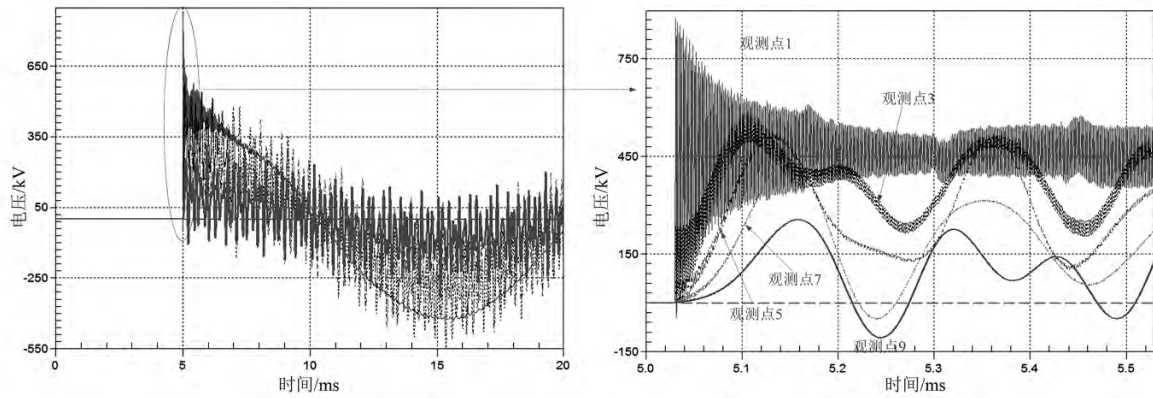
2) 合闸过电压波头陡,上升时间约0.6 μs。

4 合闸时变压器绕组内部的过电压

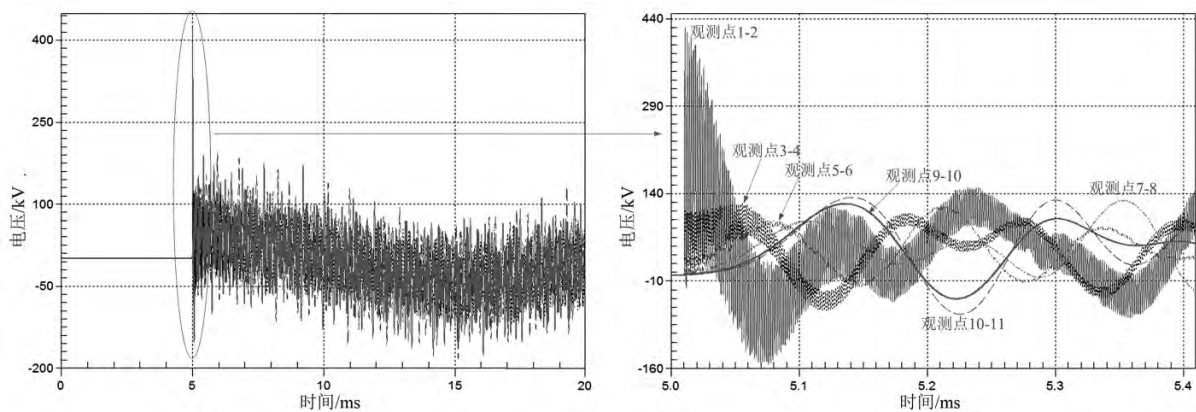
计算得到各个测试点及测试点间的电压波形如图7所示。

从变压器绕组匝间承受电压波形可知:

1) 前端绕组承受电压幅值最大,绕组间承受的过电压幅值并非从上至下依次递减,而是呈现先减



(a) 各个测试点电压波形



(b) 两测试点之间的电位差波形

图7 绕组内部电压分布

小后增加的规律;

2) 首端绕组承受电压幅值高但是波头陡,尾端绕组承受电压相对较低但是波头较缓;

3) 变压器首端和尾端绕组承受冲击电压时损坏概率大于中间绕组。

5 结 语

1) 4号主变压器合闸时未出现超过变压器理论耐受能力的过电压,过电压不是造成变压器事故的根本原因,仅是主变压器绕组绝缘损坏的诱因。

2) 从绕组内部电压分布来看,首端绕组匝间承受的过电压高于绕组其他部分,但其为陡波,或许会造成绕组间匝间局部绝缘击穿,但不会造成绕组绝缘贯穿性击穿;变压器尾端绕组承受的电压幅值虽然较首端绕组低,但其波头较平缓可造成更大面积的绝缘损坏。

3) 变压器绕组实际击穿情况为首端完好、尾端损坏严重,可知变压器绕组绝缘材料具备耐受高幅值陡波冲击的能力,但已无法承受波头平缓的低幅

值过电压,绕组材料存在绝缘缺陷。

4) 电力设备在运行状态改变时不可避免地存在电压波动,电压波动会造成电压升高,但是任何一次设备均有承受一定幅值过电压的能力,不应将设备在运行状态改变时发生的故障简单归因于过电压。

参考文献

[1] 贺启飞,郭洁,郝治国. 110 kV 小型化 GIS 中快速暂态过电压的研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(4): 88-92.

[2] 史彦楠. 220kV GIS 变电站雷电侵入波分析[D]. 济南: 山东大学, 2017: 1-6.

[3] 张萍,闫涛,李婷,等. VFTO 下大型电力变压器绕组的时域算法研究[J]. 控制工程, 2018, 25(6): 960-965.

[4] 曹叶飞,朱晓东,谭燕. 大电流中压交流气体绝缘金属封闭开关设备的散热结构设计[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 200-206.

[5] 吴其,刘晓明,杨田,等. 雷电冲击电压下 GIS 瞬时绝缘数值分析方法[J]. 高压技术, 2018, 44(5): 1-7.

(下转第76页)

需要全局考虑站内设备技术特点和运行维护习惯,采用符合标准化设计规范的新装置,根据不同改造对象和施工条件选择合适的“原屏改造”和“整屏更换”方案,通过预制电缆和可拼接屏柜提高更换效率,借助自动对点系统改进系统接入工作,多措并举减少施工停电时间。一次全面完善的改造,彻底消除设备潜在安全隐患,直接收获多年的安全稳定经济运行,开启系统新的生命周期。

参考文献

[1] 王治国, 笃峻, 王肖立, 等. 基于二维码技术的智能电网保护设备管理方法研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(5): 40-43.

[2] 李松. 变电站扩建二次继电保护改造技术[J]. 电工技术, 2018(8): 86-88.

[3] 丁宣文, 王平. 500 kV 智能变电站二次设备改造方案研究[J]. 四川电力技术, 2016, 39(6): 59-64.

[4] 李泳龙, 郑永康, 李小鹏, 等. 基于全场景系统的新一代智能变电站整组传动调试方法[J]. 四川电力技术, 2018, 41(3): 68-72.

[5] 胡星, 辛丽娜, 王亮. 基于虚拟主站的电力远动机

调试系统设计[J]. 机电工程技术, 2019, 48(1): 109-111.

[6] 刘俊红, 邓兆云, 李泽科, 等. 基于即插即用的智能变电站信息自动校核技术[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 137-143.

[7] 曹璠月. 变电站自动对点系统软件设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[8] 丁宣文, 刘明忠, 姜振超, 等. 220 kV 智能变电站不全停二次设备改造方案[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 70-75.

[9] 林利祥, 原毅青, 叶石丰, 等. 新型变电站综合自动化改造策略的研究与应用[J]. 电工电气, 2019(2): 39-43.

作者简介:
姚亮(1979), 高级工程师, 主要从事变电站二次系统工程技术研究和应用工作;
凌岩(1989), 工程师, 主要从事变电站二次系统工程技术工作;
孙晓龙(1989), 工程师, 主要从事变电站二次系统工程技术工作。

(收稿日期: 2019-10-12)

(上接第 30 页)

[6] 南保峰, 刘轩东, 冯磊, 等. GIS 中 VFTO 防护措施研究综述[J]. 电瓷避雷器, 2017(6): 81-85.

[7] 吴士普, 李璿, 臧英, 等. 550 kV GIS 站 VFTO 计算及抑制方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 90-96.

[8] 王磊. 750 kV 变电站 GIS 设备 VFTO 特性研究[J]. 中国电力, 2015, 48(5): 125-132.

[9] 卢斌先, 周娜, 石雨鑫. 电弧三维电磁场模型参数对 GIS 中 VFTO 的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 953-959.

[10] 孔旭, 郭飞, 梁涛, 等. 220 kV GIS 中断路器关合空载变压器所产生 VFTO 辐射电场的测量与波形特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 5087-5094.

[11] 郭涛. 超特高压 GIS 站变压器 VFTO 传播特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2016: 8-14.

[12] 刘玉, 鲁海亮, 徐碧川, 等. VFTO 作用下变压器绕组匝间电压及谐振研究[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 131-136.

[13] 高世强. 油浸式变压器绕组的分数阶模型辨识及其 VFTO 分布的计算方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1-5.

[14] 魏梅芳, 吴细秀, 余光召, 等. 1100 kV GIS 中 VFTO 的暂态特性研究[J]. 中国电力, 2016, 49(7): 1-7.

[15] 唐岩, 马山刚. 层式变压器绕组中特快速暂态过电压的仿真分析[J]. 变压器, 2017, 54(1): 12-16.

[16] 王磊, 万磊, 王浩, 等. 取消特高压 GIS 变电站隔离开关阻尼电阻的研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1746-1752.

[17] 秦家远, 孙利朋, 刘赞, 等. 感应雷入侵 110 kV 变电站导致主变损坏故障分析[J]. 变压器, 2018, 55(4): 75-78.

[18] 梁贵书, 高世强, 臧英, 等. 考虑频变特性的大型变压器绕组 VFTO 分布计算[J]. 变压器, 2018, 55(1): 1-5.

[19] 徐偲畅. 基于场路结合的 35 kV 变电站雷电侵入波分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 22-26.

[20] 李盘娟. 雷电冲击和 VFTO 在变压器绕组上分布的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017: 1-8.

作者简介:
刘守豹(1983), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统暂态分析与工程电磁场数值计算。

(收稿日期: 2019-11-04)