

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.003

变电站电磁骚扰特性参数综述

问耀文¹, 程养春¹, 何宁辉², 沙伟燕², 吴旭涛², 李秀广²

(1. 华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206; 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750002)

摘要: 变电设备的智能运检离不开先进的设备状态感知技术。随着电力系统智能化发展,对于变电站电气设备状态感知传感器的需求逐年上升。变电站中的稳态电磁骚扰和瞬态电磁骚扰对状态感知传感器,特别是微功耗智能传感器的寿命造成巨大威胁,从而导致在线监测数据错误率高,误报警频发。文章通过统计分析变电站现场实际的低频电磁骚扰特性参数和高频电磁骚扰特性参数,为现场电气设备状态感知传感器应开展的电磁兼容试验要求提供理论支撑。

关键词: 状态感知; 传感器; 电磁骚扰; 稳态; 瞬态; 电磁兼容

Overview of Electromagnetic Disturbance Characteristic Parameters in Substation

WEN Yaowen¹, CHENG Yangchun¹, HE Ninghui², SHA Weiyang², WU Xutao², LI Xiuguang²

(1. Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750002, China)

Abstract: The intelligent operation and inspection of substation equipment cannot be separated from advanced equipment state sensing technology. With the intelligent development of power system, the demand for state sensing sensors of electrical equipment in substation has been increasing year by year. The steady state electromagnetic disturbance and transient electromagnetic disturbance in substation pose a great threat to the life of state sensing sensors, especially to the life of micro-power smart sensors, which lead to high error rate of online monitoring data and frequent false alarms. In this paper the statistical analysis of the actual steady-state and transient electromagnetic disturbance characteristics of substation provides theoretical support for the electromagnetic compatibility test requirements of the field electrical equipment state sensing sensors.

Key words: state sensing; sensors; electromagnetic disturbance; steady state; transient state; EMC

0 引言

随着电力系统智能化的发展,越来越多的智能化设施运用在电力设备上,以便实现电力设备可视化、信息化、自动化的功能。变电设备的智能运检离不开先进的设备状态感知技术,状态感知传感器的大量使用,使传感器的电磁兼容问题逐渐显现了出来。

变电站内设备运行过程中产生的强烈电磁环境会导致传感器面临复杂的电磁骚扰^[1-3]。复杂的

电磁干扰信号所产生的感应电流会导致传感器内部芯片损坏,造成数据采集或传输错误,使数据流中出现数据丢失和空白数据等情况导致误报警,可能会让电力工作人员对变压器状态评估时产生误判^[4-6]。

在状态检修观念日益普及,电力工业智能化、数字化快速发展的当下,实现对电力设备不停电在线监测非常重要。以华北电力大学在某110 kV变电站开展的变压器绕组变形在线监测为例,绕组变形在线监测装置需要在变压器附近安装一个就地

收稿日期:2025-11-10; 修回日期:2026-01-25

基金项目:宁夏自然科学基金资助项目(2021AAC03498)。

Project Supported by Ningxia Natural Science Foundation(2021AAC03498).

主机柜,传感器安装在变压器顶部套管升高座上,见图1。



(a) 传感器安装位置 (b) 就地主机柜安装位置

图1 在线监测装置现场安装图

Fig. 1 On-site installation drawing of on-line monitoring device

就地主机柜外壳虽具有一定的电磁屏蔽能力,但仍需考虑电源、电缆等的传导耦合;传感器暴露在空间电磁场中,除了考虑电缆的传导耦合,还需考虑空间电磁场的辐射耦合。变电站日常倒闸操作所产生的宽频瞬态电磁骚扰,作为典型的强瞬态电磁骚扰,时域内上升沿抖、幅值大,频域内频谱成分丰富且频带范围较宽^[7-10]。因此研究变电站的电磁骚扰特性参数具有重要意义。

1 低频电磁骚扰特性

变电站的低频电磁骚扰有工频电场和工频磁场,换流站的低频电场有交流侧工频电场和直流侧合成电场,换流站的低频磁场有交流侧工频磁场与直流侧恒定磁场^[11-13]。

1.1 工频电场统计分析

变电站和换流站内设备多且结构复杂,而带电设备的布置也是错综复杂,它的空间电场强度的计算比较困难^[14]。由于变电站和换流站内的高压设备都有接地金属外壳,它产生的电场均被屏蔽在壳内,在壳外很小,因此产生变电站工频电场的主要是裸露的高压带电导体。实际变电站中,影响工频电场分布的因素很多,譬如地理气候条件、电网设备情况等^[15]。

1.1.1 变电站工频电场

1)500 kV 及以下变电站。文[15]对珠海电网的7个110、220、500 kV 变电站布点测量,通过对文献数据的分析,得到各电压等级变电站电场强度最大值和平均值,见图2、3。

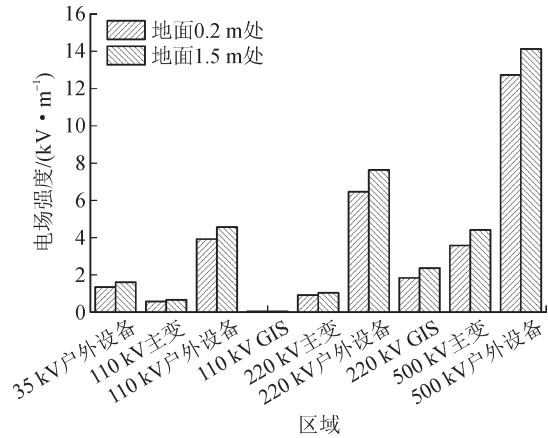


图2 变电站工频电场强度平均值

Fig. 2 Average value of power frequency electric field strength of substation

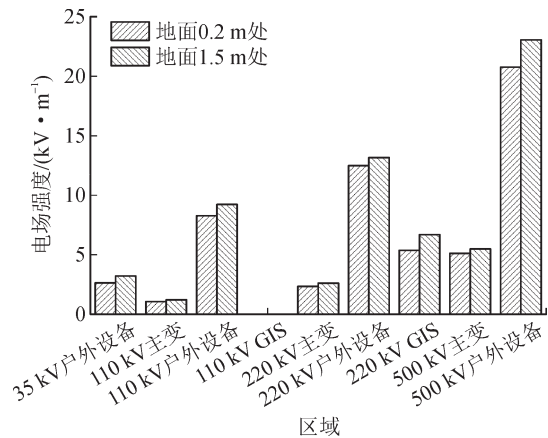


图3 变电站工频电场强度最大值

Fig. 3 Maximum value of power frequency electric field strength of substation

由图2、3可见500、220、110 kV 户外设备占据电场强度的前3位,是因为这些类型设备的带电导体都是裸露出来的,电场直接作用到周围的区域,电场强度随电压等级升高而增大。

文[16-18]测量和仿真了8座110、220、500 kV 的变电站工频电场,通过分析文献数据,得到各变电站工频电场最大值及出现位置,见表1。

表1 8座变电站工频电场最大值统计

Table 1 Statistics of maximum power frequency electric field in 8 substations

参考文献	变电站	工频电场最大值/(V·m ⁻¹)	最大值出现位置
文[16]	后奕 110 kV	4.100×10 ³	断路器附近
	新源 110 kV GIS	69.800	主变压器
	策城 220 kV	3.190×10 ³	母线下方避雷器
	三圣口 220 kV GIS	0.535	主变压器
	房山 500 kV	4.750	B相断路器
	门头沟 500 kV GIS	4.500×10 ³	B相避雷器
文[17]	500 kV	18.590×10 ³	断路器附近
文[18]	500 kV	11.890×10 ³	C相断路器

2)750 kV 变电站。文[19]对西北某 750 kV 变电站的工频电场进行测量,变电站的测量选择在 750 kV 侧。测试表明变电站内 750 kV 区域的场强在 1.60~7.90 kV/m 范围内。最大场强出现在主变压器 750 kV 侧至 GIS 设备的馈线下方。

3)1 000 kV 变电站。文[20]通过仿真分析了某 1 000 kV 特高压变电站电抗器周围地面垂直 1.5 m 平面处的电场强度。电场强度的最大值出现在距离 C 相电抗器 32 m 处,偏离 C 相电容器轴线约 2 m 处,最大值为 9.928 kV/m。

文[21]对国内 3 个 1 000 kV 的变电站的工频电磁场分布进行测量,统计结果见表 2。

表 2 3 座 1 000 kV 变电站工频电场最大值统计

Table 2 Statistics of maximum power frequency electric field of three 1 000 kV substations

1 000 kV 变电站	工频电场最大值/(kV·m ⁻¹)	最大值出现位置
兰江(浙中)变电站	8.67	A 相导线对地投影外 3 m 附近
莲都(浙北)变电站	8.98	C 相导线对地投影外 3 m 附近
福州变电站	11.36	A 相导线对地投影外 3 m 附近

1.1.2 换流站工频电场

1)±800 kV 换流站。文[22]测量了某±800 kV 特高压换流站电磁环境。通过对测量数据分析可以得出,合成场强正值最大值为 6.56 kV/m,负值最大值为-10.8 kV/m。且正负极线路之间,由于相互抵消合成场强变的很小。

2)±1 100 kV 换流站。文[23]通过对某±1 100 kV 换流站建立仿真模型,得到了不同条件的工频电场分布。由分析结果可知,变电站通道的工频电场强度随进线管母高度的上升而降低,随相间距的减小而减小。当交流滤波器场的进线管母高度为 16.5 m,同时相间距为 14.2 m 时,在交流滤波器场附近上产生的最大工频电场为 11.8 kV/m。

1.2 工频磁场统计分析

变电站的工频磁场是由大电流的导体和设备产生,且随距离加大而快速减小,没有加装屏蔽的重载母线及进出线对附近磁场影响较大^[24]。

1.2.1 变电站工频磁场

1)500 kV 及以下变电站。文[25-26]测量了 18 座不同电压等级变电站的电磁环境,测量结果见图 4。由图 4 可知,110 kV 变电站与 220 kV 变电站的工频磁场接近,GIS 变电站其工频电磁场强度比常规的敞开式空气绝缘开关设备 AIS 明显减少,500 kV 变电站最大磁场强度为 13.53 A/m。

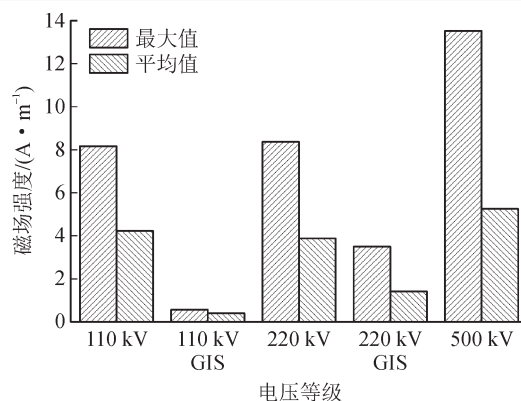


图 4 110~500 kV 变电站工频磁场最大值和平均值

Fig. 4 Maximum value and average value of power frequency magnetic field in 110~500 kV substation

2)750 kV 变电站。文[19]对西北某 750 kV 变电站的工频磁场进行测量,测量时 750 kV 系统负荷较小,变电站内磁感应强度也很小。磁感应强度的垂直分量最大值为 1.1 μT,水平分量最大值为 1 μT(1 A/m 磁场强度在自由空间对应的磁感应强度为 1.26 μT)。

3)1 000 kV 变电站。对国内 3 个 1 000 kV 的变电站的工频电磁场分布进行测量。

兰江(浙中)变电站工频磁场分布为:主变周围的磁场强度最大值出现在北侧,最大可达 45 μT;高抗周围的磁场水平最大值出现在西侧,最大可达 88 μT。站内巡视道路上大部分区域的工频磁场不超过 10 μT。低抗附近区域的工频磁场较大,距离设备较近的区域最高将近 500 μT。

1 000 kV 莲都(浙北)变电站工频磁场分布为:主变周围的磁场强度最大值出现在东侧。当主变功率较大时,最大可达 20 μT;高抗周围的磁场水平最大值出现在西侧,最大值不超过 40.8 μT。大负荷功率工况下,站内巡视道路上大部分区域的工频磁场不超过 20 μT。低抗附近区域的工频磁场较大,距离设备较近的区域可达 1.6 mT。

1 000 kV 福州变电站工频磁场分布为:主变周围的磁场强度最大值出现在东侧。当主变功率较大时,最大可达 124 μT;高抗周围的磁场水平最大值出现在西侧,最大值不超过 8 μT。试运行期间,站内巡视道路上大部分区域的工频磁场不超过 10 μT,其中低抗道路上的工频磁场最大值达到 22 μT。低抗附近区域的工频磁场较大,距离设备较近的区域可达 3.1 mT。

1.2.2 换流站工频磁场

文[23]测量了某±800 kV 特高压换流站磁感应强度。通过结果可知磁感应强度的最大值为 1.402 μT,出现在场界的南侧。在其他区域,如 1 000 kV 滤波

场的最大值为 $0.734\ 6\ \mu\text{T}$, $1\ 000\ \text{kV}$ GIS的最大值为 $1.122\ \mu\text{T}$, $\pm 800\ \text{kV}$ 直流场的最大值为 $0.036\ 1\ \mu\text{T}$ 。

1.2.3 电抗器工频磁场

电抗器会产生变电站中最大的工频磁场。干式空心电抗器的优点是起始电压均衡,使用过程中声音低,劣势是运行过程中存在很大的泄漏磁场^[27-28]。

文[27]测量了某 $35\ \text{kV}$ 电抗器附近的工频磁场。测量结果显示磁场强度最大值出现在电抗器的正下方,达到 $4\ 394\ \text{A/m}$ 。以电抗器组中心为圆心,半径大于 $9.5\ \text{m}$ 的位置,工频磁场强度低于 $100\ \text{A/m}$ 。

文[28]仿真分析了某 $500\ \text{kV}$ 变电电抗器组附近的工频磁场强度。仿真结果表明单相电抗器的最大磁场强度可达 $3\ 810\ \text{A/m}$,品字排列的电抗器组磁场强度能达到 $3\ 910\ \text{A/m}$ 。在离中心大于 $5\ \text{m}$ 的位置,工频磁场强度小于 $400\ \text{A/m}$,在离中心距离大于 $8\ \text{m}$ 的位置,工频磁场强度小于 $100\ \text{A/m}$ 。

1.3 统计分析结果汇总

本节统计分析了各电压等级变电站和换流站低频电磁骚扰情况,总结出变电站和换流站的低频骚扰最大值见表3。

表3 变电站和换流站内低频电磁骚扰最大值

Table 3 Low frequency electromagnetic disturbance maximum in substations and converter stations

变电站类型	电场强度/($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$)	磁场强度/($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)
$\pm 1\ 100\ \text{kV}$ 换流站	11.800	
$1\ 000\ \text{kV}$ 变电站	11.360	69.841
$\pm 800\ \text{kV}$ 换流站	10.800	1.113
$750\ \text{kV}$ 变电站	7.900	0.870
$500\ \text{kV}$ GIS变电站	4.503	
$500\ \text{kV}$ 变电站	23.074	13.530
$220\ \text{kV}$ GIS变电站	6.689	3.497
$220\ \text{kV}$ 变电站	12.475	8.347
$110\ \text{kV}$ GIS变电站	0.698×10^{-1}	0.562
$110\ \text{kV}$ 变电站	9.240	8.154

DL/T 1498.1—2016《变电设备在线监测装置技术规范》要求工频磁场试验等级为4级,对应的磁场强度为 $100\ \text{A/m}$ 。表3统计的数据不包含电抗器附近的数据,某变电站 $35\ \text{kV}$ 电抗器正下方工频磁场强度最大可达 $4\ 394\ \text{A/m}$,但电抗器磁场强度会随着距离迅速衰减,当设备与电抗器的距离大于 $9.5\ \text{m}$ 时,工频磁场强度低于 $100\ \text{A/m}$ 。所以现行试验第4等级要求的磁场强度仅适用于除电抗器外的区域,对于电抗器区域设备的试验等级X等级应不低于 $4\ 500\ \text{A/m}$ 。

2 高频电磁骚扰特性

变电站和换流站的高频电磁骚扰主要是变电站内开关操作、电晕放电及雷击等引起的电磁骚扰。与低频电磁骚扰相比,高频电磁骚扰的频率成分更丰富,其频谱较宽,频率高达上吉赫兹,极易通过耦合二次电缆产生骚扰电压或从设备外壳的孔缝泄露电磁场对二次设备造成干扰,站内产生的问题也往往出现在高频情况下。

2.1 开关操作产生的瞬态电场和磁场特性分析

2.1.1 变电站开关操作产生的瞬态电磁骚扰

1)空间电磁骚扰。文[29]测量了某 $220\ \text{kV}$ GIS变电站开关操作时的空间电磁场,测得距地面高度 $2\ \text{m}$ 处的时域和频域曲线见图5。

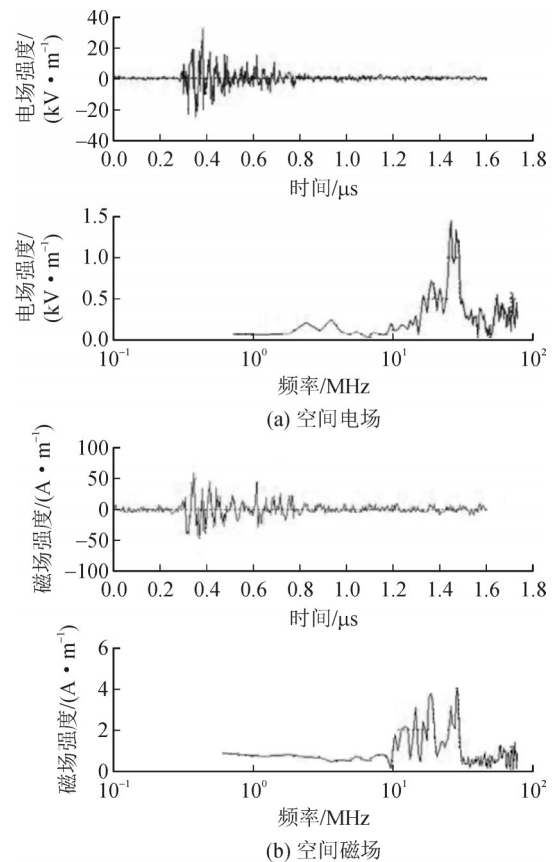


图5 空间电磁场时域及频域波形

Fig. 5 Time domain and frequency domain waveform of space electromagnetic field

图5中,空间电场最大幅值为 $30\ \text{kV/m}$,空间磁场最大幅值为 $50\ \text{A/m}$ 左右。电磁场测量主频为 $15\ \text{MHz}$ 与 $25\ \text{MHz}$ 左右。

文[30]通过对不同电压等级和不同类型的变电站由于开关操作而造成的瞬态电磁场测量得出如下结论:不同电压等级的空气绝缘变电站由于开关操作引起的瞬态电磁场见表4。从表4可以看出,其

中最大的电场强度可以达到 16 kV/m, 最大磁场强度可以达到 212 A/m。其主频分布在 0.5~3 MHz, 测量点在母线中间位置下方的地面。不同电压等级的 GIS 变电站的瞬态电磁场见表 5。从表 5 可以看出, 最大电场强度可以达到 7 kV/m, 最大磁场强度可以达到 110 A/m, 主磁场强度分布在 10~115 MHz。

表 4 不同电压等级空气绝缘变电站(AIS)的瞬态电磁场

Table 4 Transient electromagnetic fields in air-insulated substations(AIS) with different voltage levels

参数	115 kV (敞开式)	220 kV (敞开式)	500 kV (敞开式)
最大值/(kV·m ⁻¹)	9.3	7.0	16.0
电场强度			
主频分布/MHz	2.0~3.0	1.0~2.0	0.5
持续时间/ms	25×10 ⁻³ ~10	≤10	≤10
波形类型	单极性	单极性	单极性
磁场强度			
最大值/(A·m ⁻¹)	49	84	212
主频分布/MHz	2.0~3.0	1.0~2.0	0.5
持续时间/μs	10	10	10
波形类型	双极性	双极性	

表 5 不同电压等级气体绝缘变电站(GIS)的瞬态电磁场
Table 5 Transient electromagnetic fields in gas-insulated substations(GIS) with different voltage levels

参数	220 kV(GIS)	500 kV(GIS)
最大值/(kV·m ⁻¹)	5	7
电场强度		
主频分布/MHz	0.115	20.000
持续时间/μs	1	4
波形类型	双极性	双极性
最大值/(A·m ⁻¹)	50	110
磁场强度		
主频分布/MHz	40	10
持续时间/μs	4	10
波形类型	双极性	双极性

2)瞬态场在二次电缆上的耦合。文[31]对 500 kV 变电站实测瞬态数据利用区间统计进行分析, 统计结果见表 6。

结果表明, 断路器切合空载长线或重合闸所引发的骚扰频率要普遍高于隔离开关切合空载母线或空载短线所引发的骚扰频率; PT 端共模电压的峰峰值要高于 CT 端共模电压的峰峰值, 而且 PT 端的频谱也要比 CT 端的频谱复杂得多, CT 端的主导频

表 6 500 kV 变电站实测瞬态数据统计

Table 6 Statistics of transient data measured in 500 kV substation

操作内容	测量项	数据组数	时域特征参数	频域特征参数
隔离开关切合空载母线和空载短线	PT 端共模电压	6	$S_i=3.26 \sim 5.34 \text{ kV}/\mu\text{s}, T_i=52 \text{ ns}, T_m=17 \mu\text{s}, E_g=35 \sim 45 \text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}, U_{pp}=508 \sim 541 \text{ V}$	$F_u: 5.88 \sim 7.48 \text{ MHz}, DF: 0.2 \sim 2.0 \text{ MHz}, 5 \sim 8 \text{ MHz}$
	PT 端差模电压	5	$S_i=0.6 \text{ kV}/\mu\text{s}, T_i=110 \text{ ns}, T_m=12 \mu\text{s}, E_g=8.7 \text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}, U_{pp}=125 \text{ V}$	$F_u: 3.07 \sim 3.26 \text{ MHz}, DF: 250 \sim 450 \text{ kHz}, 1 \sim 2 \text{ MHz}$
	CT 端共模电压	5	$S_i=1.5 \text{ kV}/\mu\text{s}, T_i=58 \text{ ns}, T_m=17 \mu\text{s}, E_g=16 \text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}, U_{pp}=221 \sim 231 \text{ V}$	$F_u: 5.77 \sim 6.15 \text{ MHz}, DF: 0.2 \sim 2.5 \text{ MHz}$
断路器切合空载长线和重合闸	CT 端共模电压	7	$S_i=2.5 \text{ kV}/\mu\text{s}, T_i=56 \text{ ns}, T_m=17 \mu\text{s}, E_g=23 \text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}, U_{pp}=328 \sim 340 \text{ V}$	$DF: 0.5 \sim 2.0 \text{ MHz}$
	PT 端共模电压	19	$S_i=66 \text{ kV}/\mu\text{s}, T_i=21 \text{ ns}, T_m=19 \mu\text{s}, E_g=92 \text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}, U_{pp}=2.8 \text{ kV}$	$F_u: 14.64 \sim 18.64 \text{ MHz}, DF: 0.4 \sim 1.0 \text{ MHz}, 6 \sim 8 \text{ MHz}, 13 \sim 18 \text{ MHz}$
	PT 端差模电压	15	$S_i=1.3 \text{ kV}/\mu\text{s}, T_i=118 \sim 131 \text{ ns}, T_m=16 \mu\text{s}, E_g=13 \text{ V}^2 \cdot \mu\text{s}, U_{pp}=338 \sim 354 \text{ V}$	$F_u: 2.68 \sim 2.98 \text{ MHz}, DF: 100 \sim 500 \text{ kHz}, 1 \sim 2 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}$

率主要集中在 5 MHz 以内, PT 端的主导频率有高于 10 MHz 的情况, 部分波形在 13、15、18 MHz 还有较高的频率分量。

文[32]测量了及南通、高邮、济南 3 个 500 kV GIS 变电站及 1 100 kV GIS 特高压试验回路智能组件的端口骚扰电压。测量结果表明 500 kV 等级下汇控柜智能组件端口共模骚扰电压的最大值小于 0.5 kV, 差模骚扰电压的最大值小于 0.2 kV, 在电磁兼容标准抗扰度要求 1 级内。1 100 kV GIS 不同情况端口骚扰电压见表 7。

表 7 1 100 kV GIS 不同情况端口骚扰电压

Table 7 1 100 kV GIS port disturbance voltage in different situations

接线情况	骚扰电压/kV	
	传感器侧	汇控柜侧端口
汇控柜侧单端接地	7.1	1.0
传感器侧单端接地	1.0	4.0
汇控柜侧等效负载短路	7.0	
汇控柜侧两端接 50 Ω 电阻	5.0	

文[33]对 1 000 kV GIS 由于开关触头间的电弧击穿与重燃产生瞬态电磁场耦合到二次电缆的数

值进行检测,4条被测电缆与GIS平行放置在水平地面,4条电缆的接地方式不同分别是:①双端接地;②仅在控制室侧接地;③仅在开关侧接;④双端悬浮。测量结果表明,特高压的瞬态过电压在文中布置条件下的二次屏蔽电缆上感应的骚扰电压的峰值最高超过4 kV,峰峰值最高超过9 kV。实验结果的时域分析见表8。

表8 1 000 kV GIS 由于开关操作引起的二次侧电缆的骚扰电压的结果时域分析

Table 8 Result time domain analysis of 1 000 kV GIS secondary side cable disturbance voltage caused by switching operation

屏蔽接地方式	开关操作	峰值电压最大值/V	峰峰值电压最大值/V	单次脉冲持续时间/ μ s
双端接地	合闸	394.9	733.9	9.2
	分闸	295.8	591.4	9.4
控制室	合闸	295.3	525.8	9.8
	分闸	203.1	339.6	8.9
单端接地	合闸	4 557.0	8 077.0	68.7
	分闸	4 387.0	7 375.0	66.4
双端悬浮	合闸	4 617.0	9 007.0	61.1
	分闸	4 472.0	8 926.0	53.2

2.1.2 换流站开关操作产生的瞬态骚扰

文[34]在某 ± 800 kV 特高压换流站开展了冲击电流入地试验,得到了骚扰信号的特征参数。浪涌骚扰电压的波前时间大概为 2.1μ s,上升时间为 0.7μ s,持续时间为10 s。二次设备端口获得的骚扰电压会大于4 kV,骚扰电压的频率主要集中在20、200~300 kHz,频带宽度大概为10 MHz。

2.2 电晕引起的电磁辐射

电晕放电最重要的危害是产生无线电杂音,它的频谱范围较宽,已达到部分无线电、电视广播的频率。无线电杂音的强度随电晕放电加剧而增大的并能够对其他电器设备形成电磁干扰,导致设备系统性能下降、无法工作甚至损坏、通信故障、损坏电网保护装置、误动或拒动、导致电网事故。

文[35]对通化市境内的220 kV 高集岗变电站扩建后变电站周围及新建高压输电线路周边的电磁环境进行了实际的测量,根据实际测得的数据对220 kV 高集岗变电站及其新建线路的电磁环境进行评估和分析。测量结果见表9(测量频点为0.5 MHz)。

由监测结果可以看出,在变电站周围无线电干扰的最大值为38.29 dB,低于《高压交流架空送电线无线电干扰限值》(GB 15707—2017)规定的220 kV 电压等级53 dB(μ V/m)的评价标准。

表9 220 kV 高集岗变电站无线电干扰值测量结果

Table 9 Measurement result of radio interference value of 220 kV Gaojigang substation

测点位置	无线电干扰测量值/(dB $\cdot\mu$ V \cdot m ⁻¹)
变电站厂界南侧20 m处	38.29
变电站厂界西侧20 m处	36.42
变电站厂界北侧20 m处	37.72
变电站厂界东侧20 m处	37.27

文[36]以500 kV 徐家变电站为例,探析了变电站周围的无线电干扰强度,为500 kV 变电站建设控制电磁污染提供理论依据。无线电干扰场强测量结果见表10。

表10 500 kV 徐家变电站无线电干扰监测结果

Table 10 Radio interference monitoring results of 500 kV Xujia substation

频率/MHz	测试结果/(dB $\cdot\mu$ V \cdot m ⁻¹)			
	东	南	西	北
0.15	38.5	35.7	36.4	39.0
0.50	20.7	21.2	26.2	21.0
1.50	21.6	22.4	23.0	23.4
3.00	17.8	16.4	21.5	15.6
10.00	43.3	53.8	36.5	41.9
30.00	43.3	33.7	40.0	42.4

由表10可知,变电站围墙四周0.5 MHz 的无线电干扰水平范围为20.7~26.2 dB(μ V/m)。低于《高压交流架空送电线无线电干扰限值》(GB 15707—2017)规定的500 kV 电压等级55 dB(μ V/m)的评价标准。

文[17]为了分析研究无线传感器所布设的电磁环境,分别对110、220、220 kV 五种不同类型、不同电压等级的变电站高频电磁环境进行测量,测量结果见表11。

由表11 可以看到高频电磁骚扰的频率分量主要集中在80~110 MHz、0.85~1 GHz、2.1 GHz、2.4 GHz 频率附近。通过结果得知,500 kV 变电站内的主变、断路器、母线等电气设备附近可能会产生2.4 GHz 左右的高频电磁骚扰,且最大值超过《信息技术设备、多媒体设备和接收机电磁兼容第1部分:发射要求》(GB/T 9254.1—2021)规定的限值76 dB(μ V/m),可能会无线传感器通信产生同频干扰,进而影响无线传感器的正常工作。

2.3 雷电引起的瞬态电磁骚扰

变电站在遭受雷击时,雷电流会通过避雷器流入地下,但避雷器的高频特性会导致接地阻抗为感性,使得入地点周围的地电位增大,进而对电子设备产生干扰。

表 11 不同类型变电站内射频电场的最大值

Table 11 Maximum values of RF electric fields in different types of substations

变电站	测量位置	频点范围	最大值/(dB· $\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)
后奕 110 kV	1号主变	88.000~112.000 MHz	50
		850.000~960.000 MHz	70
		2.140 GHz附近	72
	断路器	88.000~107.000 MHz	62
		880.000~960.000 MHz	73
		2.144 GHz附近	73
策城 220 kV	2号主变	87.000~107.000 MHz	72
		850.000~950.000 MHz	60
		1.817 GHz附近	55
	B相断路器	2.142 GHz附近	47
		88.000~107.000 MHz	72
		850.000~950.000 MHz	68
三圣口 220 kV GIS	2号主变	1.821 GHz附近	50
		2.140 GHz附近	54
		85.000~107.000 MHz	61
	母联 2245 断路器	850.000~950.000 MHz	70
		1.280 GHz附近	38
		88.000~107.000 MHz	61
房山 500 kV	2号主 变B相	850.000~960.000 MHz	45
		2.429 GHz附近	45
		66.000~117.000 MHz	50
	房都线 5034C 相断路器	880.000~960.000 MHz	50
		1.288 GHz附近	40
		2.140 GHz附近	36
门头沟 500 kV GIS	2号主 变B相	87.600~106.000 MHz	82
		936.000 MHz	91
		2.450 GHz	83
	5022A相	104.000 MHz	76
		871.000 MHz和 937.000 MHz	92
		2.144 MHz	76
5022A相	2号主 变B相	87.600 MHz	83
		871.000 MHz	91
		2.450 GHz	84
	5022A相	106.000 MHz	84
		871.000 MHz	90
		2.430 GHz	77

文[37]对变压器在遭受雷电冲击时空间磁场的大小进行了计算分析并实测验证,首先对变压器在遭受雷电全波冲击时空间磁场的大小进行了计算与实测,计算结果表明在变压器附近处的最大的瞬态磁场可以达到 53 A/m。之后对变压器在遭受雷电截波时变压器附近处的最大的瞬态磁场可以达到 160 A/m。

文[38]分析计算了雷击变电站时变电站内部的

电磁骚扰,计算结果见表 12。

表 12 雷击变电站时瞬态骚扰计算值

Table 12 Calculation value of transient disturbance when lightning strikes substation

计算项	计算值
保护小室区域最大瞬态电场峰值/(kV·m ⁻¹)	214.2
保护小室区域最大瞬态磁场峰值/(A·m ⁻¹)	4 570
双端接地二次电缆屏层电流峰值/A	2 069
双端接地二次电缆芯线共模电压峰值/V	4 434

在雷电流取 200 kA 时电磁瞬态干扰出现最大值,虽然雷电流幅值大于 200 kA 的概率较低,但以此数据作为设备的标准的参考还是比较有价值的。

文[39-41]对于雷电波侵入二次系统中过电压值进行了仿真。在仿真时雷电波采用 2.6/50 μs ,幅值为 80 kA 的雷电波时过电压的幅值为 100~200 V 之间。对于雷电电压峰值在 250~400 kV 的情况下,低压侧的过电压的幅值分布在 360~640 V。对于雷电峰值较高以及防雷较差的情况下低压电源侧的过电压可以达到 636 V。

文[42]在某高压试验大厅内,试验雷击一台 220 kV GIS 智能开关的外引线时智能组件汇控柜信号端口的瞬态电磁骚扰的测量工作。对两个 SF₆密度继电器端口上的骚扰量进行了测量。

在 SF₆密度继电器 1QS 上共获得 8 组有效测量数据,在 SF₆密度继电器 2QS 上共获得 5 组有效测量数据,对测量数据进行了统计分析,获得统计值见表 13。

表 13 雷电骚扰统计

Table 13 Statistics of maximum harassment

最值	峰值/V	峰峰值/V	上升时间/ μs
最大值	46.40	85.20	0.284
最小值	17.80	28.80	0.004
平均值	36.83	65.33	0.260

2.4 统计分析结果汇总

本节通过统计分析各电压等级变电站和换流站高频电磁骚扰数据,得到如下结论。

1)由开关动作引起的瞬态电磁场达到 30~50 kV/m,瞬态磁场达到 212 A/m。在 1 000 kV GIS 站,开关动作引起的瞬态电磁场在 100 m 信号电缆耦合到的信号强度达到 9 kV,则推算在 10 m 长的信号电缆中的耦合可达 900 V。在 500 kV 变电站中,二次接线中耦合到的信号强度达到 600 V。

2)变电站和换流站由于开关操作二次设备引起的电磁干扰最大值见表 14。

表 14 开关操作引起的二次设备电磁骚扰最大值

Table 14 The maximum value of secondary electromagnetic disturbance caused by switching operation

项目	最大峰峰值	最大峰值
直流电源(差模干扰)/kV	1.7	1.0
直流电源(共模干扰)/kV	0.7	0.4
交流电源共模干扰/kV		1.7
TA 二次侧骚扰电压/kV	4.5	2.4
TA 二次侧骚扰电流/A	900	
TV 二次侧共模电压/kV	6.0	4.0

3)根据对骚扰信号的频谱分析发现GIS操作骚扰主频最大达40 MHz, AIS操作骚扰主频最大为4 MHz。

4)在500 kV 变电站由电晕引起的高频电磁骚扰在2.4 GHz 频点会产生较大骚扰,可能会对传感器通信产生影响。

5)雷电在二次接线中耦合到的瞬态电压波的幅值,最高达到640 V。

6)对文[31]的数据分别利用80%/80%准则^[43]计算限值 L ,结果见表15。

表 15 文[31]数据限值计算结果

Table 15 Reference [31] data limit calculation results

操作内容	测量项	U_{pp}/kV	F_{ul}/MHz
隔离开关切合空载 母线和空载短线	PT 端共模电压	2.380	15.6
	PT 端差模电压	0.251	14.1
	CT 端共模电压	0.676	15.6
断路器切合空载长 线和重合闸	CT 端共模电压	0.761	
	PT 端共模电压	6.500	32.3
	PT 端差模电压	0.851	22.4

DL/T 1498.1—2016《变电设备在线监测装置技术规范》要求浪涌(冲击)试验等级为4级,对应的开路试验电压为4 kV。由表15可以得到,骚扰电压的峰峰值随操作内容及测量项的变化差异较大,其中最大值出现在断路器切合空载长线和重合闸时PT端共模电压,达到6.5 kV,超过了浪涌及振铃波抗扰度试验电压4 kV。

3 故障案例

3.1 智能终端面板灯闪烁,后台显示信号消失

文[44]以智能终端为研究对象,研究智能终端所受干扰的情况。

故障现象:变电站在实际合分开关的过程中,智能终端的面板出现了灯闪烁现象,后台显示智能终端装置的直流信号消失。

故障分析:相关人员对引起故障的原因及电磁干扰的传播途径,进行排查试验。经过现场试验及实验室电磁兼容(EMC)环境模拟测试,表明辐射是

机箱内干扰传播的主要途径,在装置电源回路的传导干扰也有一定影响。

模拟试验与现场的区别是现场曾经出现的电源跌落可以低到1 V左右,而模拟试验中最低只有4 V左右。原因是现场端子接线远比试验中接线数量要多,且大量线束捆扎在一起,耦合电容较大。同时观察现场干扰波形的幅值很大,已经超出示波器所能测量的上限,上升沿、下降沿都很陡峭,目测很难估计出干扰波形的频率分量。现场干扰波形的频率比EFT试验中所施加的干扰量高,因此会造成上述结果。

现场装置的干扰途径主要是通过板件外接引线耦合进入到装置,然后通过板内传导耦合以及机箱内空间辐射传播。在个别插件上可以采取一些封堵的措施,但很难根治。

3.2 保护控制装置HMI面板白屏自动重启

文[45]通过实际工作中碰到的一例电磁兼容问题,从故障现象分析导致设备故障的原因。

故障现象:某降压所3041 隔离开关后,相邻的302 开关柜的二次保护控制装置故障总信号动作,控制方式由远方控制方式自动转为当地控制方式。现场作业人员描述保护控制装置HMI 面板白屏自动重启后,恢复正常显示。

故障分析:带电分合3041 隔离开关10次,相邻的302 柜保护控制装置HMI 出现5次白屏自动重启。而在3041 隔离开关不带电的情况下分合,相邻的302 柜保护控制装置HMI 正常,未见前述故障现象。

隔离开关带电操作时,断口间会出现几十次乃至几百次重复燃弧及断弧的过程,在系统中的电感及电容所构成的振荡回路中产生一系列很复杂的过渡过程,从而在母线及引线上产生幅值及频率均较高的暂态电压和电流,母线如同一根高频天线,以瞬态电磁场的形式向周围空间辐射能量,还会通过连接到母线上的设备(如电容分压式带电显示器)直接耦合到低压回路。结合上述测试结果,可以初步判断导致302 柜保护控制装置异常的原因是带电分合3041 隔离开关。

故障处理:检查中发现302 柜为二期工程新加装的开关柜,保护控制装置为较新的中文版,HMI 为塑料外壳,未加装金属屏蔽罩。EMC 整改时将HMI 加装尺寸合适的金属屏蔽罩。EMC 整改时将保护控制装置HMI 的电源线、数据线以及主机的二次线均加上磁环。EMC 整改后,保护控制装置故障现象消失。

3.3 500 kV 变电站隔离开关分合闸不到位抢弧故障

文[46]阐述了500 kV阳江变电站隔离开关操作时所出现的故障问题,分析了故障过程的经过以及现场所做的应对措施。

故障现象:阳江500 kV变电站运行人员将500 kV 2号主变由检修转运行时,在操作合上第1串联络隔离开关QS50122,运行人员在端子箱按下合闸按钮后,隔离开关开始合闸,当合闸到三相动触头与静触头产生电弧时,隔离开关电动机突然停止, QS50122悬空且其三相动静触头电弧一直存在,电弧发出巨响。

故障分析:500 kV高压变电站隔离开关操作时,隔离开关触头之间的拉弧所产生的高频电流波和电压波会通过高频CT耦合到二次回路,当二次回路存在绝缘薄弱点,就可能会导致绝缘击穿,引起故障。高频CT的结构和罗氏线圈基本一样,通过对罗氏线圈原理的研究,能够更好的对电磁干扰耦合机理的进行分析。

故障处理:为防止二次回路出现过电压的措施。在二次回路上并联加装电涌保护器(过电压抑制装置),使从一次侧耦合过来的瞬时过电压限制在设备或系统所能承受的电压范围内。

4 结论

为了解决目前电气设备状态感知传感器电磁兼容试验标准针对性不强,传感器普遍存在抗电磁骚扰能力差的问题,文中通过统计分析典型变电站的稳态和瞬态电磁骚扰参数,获得了各类电磁骚扰参数特征,并对由电磁骚扰引起的典型故障案例进行分析。

1)对于低频电磁骚扰,工频磁场除由电抗器产生的骚扰外,其余均满足DL/T 1498.1—2016变电设备在线监测装置技术规范的要求100 A/m。电抗器产生的电磁骚扰强度会随着距离迅速衰减,在设备布置时需考虑设备与电抗器及母线的距离。

2)对于高频电磁骚扰,设备端口产生的骚扰电压在大多数情况下都低于DL/T 1498.1—2016变电设备在线监测装置技术规范的要求的试验电压,但断路器切合空载长线和重合闸时PT端的共模电压为6.5 kV,超过了浪涌及振铃波抗扰度试验电压4 kV,建议提高浪涌及振铃波抗扰度试验电压至6.5 kV。

参考文献:

[1] 于 钊,刘建坤. 坚强智能电网应关注的问题和关键技术[J]. 电

力系统通信,2010(10):1-5.

YU Zhao, LIU Jiankun. Major issues and key technologies to a strong and smart grid in China[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010(10):1-5.

[2] 杨壮壮. 快速暂态过电压对二次设备干扰的电磁兼容研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.

YANG Zhuangzhuang. Electromagnetic compatibility research of fast transient overvoltage interference on secondary equipment[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2018.

[3] 傅质馨,李潇逸,袁 越. 泛在电力物联网关键技术探讨[J]. 电力建设,2019,40(5):1-12.

FU Zhixin, LI Xiaoyi, YUAN Yue. Research on key technologies of ubiquitous power Internet of things[J]. Electric Power Construction, 2019,40(5):1-12.

[4] 安 勃. 变电站内无线传感器的电磁兼容问题研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.

AN Bo. Research on electromagnetic compatibility of wireless sensor in substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[5] 王 沛. 变电站内空间电磁场对无线传感单元耦合机理的研究[D]. 北京:华北电力大学,2022.

WANG Pei. Research on coupling mechanism of spatial electromagnetic field to wireless sensor unit in substation[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2022.

[6] 钱佳斌. GIS设备开关操作引起的电磁骚扰问题及抑制技术研究[D]. 南京:东南大学,2016.

QIAN Jiabin. Research on electromagnetic disturbance caused by switch operation of GIS equipment and its suppression technology [D]. Nanjing:Southeast University, 2016.

[7] 孙竹森,张禹方,张广州,等. 500 kV变电站电磁骚扰和防护措施的研究(一)[J]. 高电压技术,2000,26(1):16-18.

SUN Zhusen, ZHANG Yufang, ZHANG Guangzhou, et al. Research on electromagnetic harassment and proective measure of 500 kV substation(I)[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 16-18.

[8] 孙竹森,张禹方,张广州,等. 500 kV变电站电磁骚扰和防护措施的研究(二)[J]. 高电压技术,2000,26(2):26-27.

SUN Zhusen, ZHANG Yufang, ZHANG Guangzhou, et al. Research on electromagnetic harassment and proective measure of 500 kV substation(II)[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(2):26-27.

[9] 葛斯乔,刘卫东,丁登伟,等. 变电站就地化电子装置电源的电磁骚扰耦合和抑制[J]. 高电压技术,2021,47(12):4483-4492.

GE Siqiao, LIU Weidong, DING Dengwei, et al. Electromagnetic disturbance coupling and suppression of on-site electronic device power port in substations[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12):4483-4492.

[10] 白 锋,齐 磊,崔 翔,等. 特高压变电站的稳态电磁骚扰特性预测[J]. 高电压技术,2009,35(8):1836-1841.

BAI Feng, QI Lei, CUI Xiang, et al. Prediction of steady-state electromagnetic disturbance in UHV substation[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(8):1836-1841.

- [11] 张卫东,崔翔. 变电站和换流站电磁骚扰的测量与特征分析[J]. 广东输电与变电技术,2009,11(1):1-9.
ZHANG Weidong, CUI Xiang. Measurement and analysts of electromagnetic disturbances in substations and converter stations[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2009, 11(1): 1-9.
- [12] 沈明. 针对变电站的电磁环境相关问题的研究综述[J]. 电子世界,2014(16):151.
SHEN Ming. Review of research on electromagnetic environment related problems of substation[J]. Electronics World, 2014 (16): 151.
- [13] 陈泳延. 变电站和换流站二次设备的电磁屏蔽方法优化研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.
CHEN Yongyan. Research on optimization of electromagnetic shielding method for secondary equipment in substation and converter station[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [14] 傅艳军. 110 kV 变电所工频电场测量与分析[D]. 上海:上海交通大学,2005.
FU Yanjun. Measurement and analysis of power frequency electric field in 110 kV substation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005.
- [15] 张泽林. 珠海地区电网 500 kV, 220 kV, 110 kV 变电站工频电场强度的测量与分析[D]. 广州:华南理工大学,2012.
ZHANG Zelin. Measurement and analysis of power frequency electric field strength of 500 kV, 220 kV and 110 kV substations in Zhuhai area[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [16] 李继琨. 物联网无线温度传感单元在变电站中的电磁兼容性研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
LI Jikun. Research on electromagnetic compatibility of Internet of things wireless temperature sensing unit in substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [17] 徐祿文,李永明,刘昌盛,等. 重庆地区 500 kV 变电站内工频电磁场分析[J]. 电网技术,2008,32(2):66-70.
XU Luwen, LI Yongming, LIU Changsheng, et al. Analysis on power frequency electric and magnetic fields within 500 kV substations in Chongqing area[J]. Power System Technology, 2008, 32(2):66-70.
- [18] 罗鹏. 超高压变电站工频电磁场计算分析与应用[D]. 重庆:重庆大学,2015.
LUO Peng. Calculation analysis and application of power frequency electromagnetic field in ultra-high voltage substation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [19] 万保权,张广洲,路遥,等. 750 kV 兰州东官亭输变电工程工频电磁场测量[J]. 高电压技术,2007,33(5):41-45.
WAN Baoquan, ZHANG Guangzhou, LU Yao, et al. Measurement on the electromagnetic environment of 750 kV Lanzhou - Dongguanting power transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5):41-45.
- [20] 徐鹏,柯艳国,汪晨,等. 1 000 kV 特高压变电站垂直空间电磁环境分布的测试与分析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报,2021,26(3):52-57.
XU Peng, KE Yanguo, WANG Chen, et al. Test and analysis of electromagnetic environment distribution in vertical space of 1 000 kV UHV substation[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2021, 26(3):52-57.
- [21] 杜志叶,阮江军,干喆渊,等. 变电站内工频电磁场三维数值仿真研究[J]. 电网技术,2012,36(4):229-235.
DU Zhiye, RUAN Jiangjun, GAN Zheyuan, et al. Three-dimensional numerical simulation of power frequency electromagnetic field inside and outside substation[J]. Power System Technology, 2012, 36(4):229-235.
- [22] 谢连科,臧玉魏,郭兆枫,等. ± 800 千伏特高压某换流站电磁环境测试分析[J]. 中国辐射卫生,2019,28(5):564-568.
XIE Lianke, ZANG Yuwei, GUO Zhaofeng, et al. Test and analysis of the electromagnetic environment of ± 800 kV ultra-high voltage converter station[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2019, 28(5):564-568.
- [23] 王延召,周兵,张业茂,等. ± 1100 kV 换流站交流滤波器场的工频电场仿真[J]. 中国电力,2019,52(6):121-127.
WANG Yanzhao, ZHOU Bing, ZHANG Yemao, et al. Simulation of the power frequency electric field in the AC filter area of the HVDC converter station[J]. Electric Power, 2019, 52(6):121-127.
- [24] 张波,何金良,刘吉克,等. 云数据中心与高压变电站共站时的工频磁场环境特征[J]. 高电压技术,2015,41(11):3812-3820.
ZHANG Bo, HE Jinliang, LIU Jike, et al. Characteristics of power frequency magnetic field environment inside Internet data centers co-sited with high voltage substations[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11):3812-3820.
- [25] 刘嘉文,李丽. 变电站 220 kV 及以上区域工频电磁场强度特性分析[J]. 广东电力,2011,24(1):6-9.
LIU Jiawen, LI Li. Property analysis of power - frequency electromagnetic field intensity in 220 kV and above sectors in substation[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(1):6-9.
- [26] 辛亮,傅正财,陈敏华,等. 220 kV 典型设计变电站的工频磁场分析[J]. 供用电,2007,24(6):1-4.
XIN Liang, FU Zhengcai, CHEN Minhua, et al. Analysis on power frequency magnetic field in typical designed 220 kV substation[J]. Distribution & Utilization, 2007, 24(6):1-4.
- [27] 杜华珠,文习山,鲁海亮,等. 35 kV 三相空心电抗器组的磁场分布[J]. 高电压技术,2012,38(11):2858-2862.
DU Huazhu, WEN Xishan, LU Hailiang, et al. Magnetic field distribution around 35 kV three-phase air-core reactors[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11):2858-2862.
- [28] 李丽,刘嘉文. 35 kV 并联电抗器工频电磁场分布特性研究[J]. 电力科技与环保,2012,28(1):5-6.
LI Li, LIU Jiawen. The research of power frequency electric field intensity of 35 kV shunt reactor[J]. Electric Power Environmental Protection, 2012, 28(1):5-6.
- [29] 干喆渊,赵军,张建功,等. GIS 隔离开关操作过程中管壳空间暂态电磁辐射计算[J]. 高电压技术,2016,42(3):980-986.
GAN Zheyuan, ZHAO Jun, ZHANG Jiangong, et al. Computation of transient electromagnetic field emission from enclosure during GIS disconnecter switching operations[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3):980-986.
- [30] 卢斌先. 变电站开关瞬态场干扰耦合机理研究[D]. 北京:华北电

- 力大学,2006.
- LU Binxian. Research on coupling mechanism of transient field interference in substation switch[D]. Beijing:North China Electric Power University,2006.
- [31] 王 爽. 变电站开关操作瞬态电磁骚扰测量数据的管理与分析[D]. 保定:华北电力大学,2003.
- WANG Shuang. Management and analysis of transient electromagnetic disturbance measurement data in substation switch operation [D]. Baoding:North China Electric Power University,2003.
- [32] 吴恒天. GIS设备智能组件端口的骚扰电压特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2018.
- WU Hengtian. Research on disturbance voltage characteristics of GIS intelligent component port[D]. Beijing:North China Electric Power University,2018.
- [33] 张卫东,陈沛龙,陈维江,等. 特高压GIS变电站VFTO对二次电缆骚扰电压的实测与仿真[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):187-196.
- ZHANG Weidong, CHEN Peilong, CHEN Weijiang, et al. Measurement and simulation of disturbance voltage generated by VFTO in UHV GIS substation on the secondary cables[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(16):187-196.
- [34] 李彩云,张卫东,嵇建飞,等. 冲击电流作用下二次系统骚扰电压统计特性及与抗扰度试验符合性研究[J]. 电网技术,2021,45(4):1605-1612.
- LI Caiyun, ZHANG Weidong, JI Jianfei, et al. Disturbance voltage statistical characteristics of secondary system under impulse current and its consistency with immunity test[J]. Power System Technology,2021,45(4):1605-1612.
- [35] 程名扬. 通化市220 kV高集岗变电站及高压输电线路扩建后电磁环境评估[D]. 长春:吉林大学,2011.
- CHENG Mingyang. Evaluation of electromagnetic environment after the expansion of 220 kV Gaojigang substation and high voltage transmission line in Tonghua city[D]. Changchun: Jilin University,2011.
- [36] 傅一迪. 变电站电磁辐射环境影响探析——以庆南变电站为例[J]. 环境科学与管理,2012,37(12):79-83.
- FU Yidi. Environmental impacts of radiation from transformer substation——taking Gyeongnam substation as an example[J]. Environmental Science and Management,2012,37(12):79-83.
- [37] 赵 军,陈维江,高 飞,等. 变压器雷电冲击试验空间磁场对智能组件影响的计算分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(14):3981-3990.
- ZHAO Jun, CHEN Weijiang, GAO Fei, et al. Calculation and analysis of the influence of space magnetic field on intelligent components in transformer lightning shock test[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(14):3981-3990.
- [38] 齐 磊,李泓志,崔 翔,等. 雷击特高压变电站时电磁骚扰特性的预测[J]. 高电压技术,2009,35(8):1796-1801.
- QI Lei, LI Hongzhi, CUI Xiang, et al. Prediction of electromagnetic disturbance by lightning strike in UHV substation [J]. High Voltage Engineering,2009,35(8):1796-1801.
- [39] 李宏博,李卫国,李景禄. 变电站二次系统雷电侵入波的防护[J]. 电瓷避雷器,2008(4):33-38.
- LI Hongbo, LI Weiguo, LI Jinglu. Protection of lightning intrusion wave in substation secondary system[J]. Insulators and Surge Arresters,2008(4):33-38.
- [40] 吴 将,李卫国,马继先. 500 kV变电站二次设备雷击暂态过电压仿真研究[J]. 电瓷避雷器,2009(6):22-26.
- WU Jiang, LI Weiguo, MA Jixian. Simulation research on lightning transient overvoltage of secondary equipment in 500 kV substation [J]. Insulators and Surge Arresters,2009(6):22-26.
- [41] 曹 斌,付文光,梁高源,等. 基于ATP-EMTP的变电站二次系统雷电过电压仿真[J]. 高压电器,2012,48(12):86-91.
- CAO Bin, FU Wenguang, LIANG Gaoyuan, et al. Simulation of lightning overvoltage in substation secondary system based on ATP-EMTP[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(12):86-91.
- [42] 马海杰. 变电站电子设备关键端口电磁耦合特性与防护的研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
- MA Haijie. Research on electromagnetic coupling characteristics and protection of key ports of substation electronic equipment[D]. Beijing:North China Electric Power University,2016.
- [43] 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范第4-3部分:不确定度、统计学和限值建模批量产品的EMC符合性确定的统计考虑:GB/Z 6113. 403—2020[S].2021.
- Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—part 4-3:Uncertainties,statistics and limit modelling—statistical considerations in the determination of EMC compliance:GB/Z 6113. 403—2020[S].2021.
- [44] 张晓莉,刘慧海,张逸帆,等. 变电站智能电子装置抗扰度特性试验及故障分析[J]. 电气应用,2018,37(6):71-75.
- ZHANG Xiaoli, LIU Huihai, ZHANG Yifan, et al. Immunity characteristic test and fault analysis of intelligent electronic device in substation[J]. Electrotechnical Application,2018,37(6):71-75.
- [45] 王 鸿. 变电站保护与控制装置电磁兼容整改实例分析[J]. 电子世界,2016(16):96-97.
- WANG Hong. Substation protection and control device electromagnetic compatibility rectification instance[J]. Electronics World,2016(16):96-97.
- [46] 郭学才,王 鹏,杨 琳. 500 kV变电站隔离开关分合闸不到位抢弧故障分析[J]. 广东电力,2014,27(8):64-69.
- GUO Xuecai, WANG Peng, YANG Lin. Analysis on arcing fault of divide-shut brake lacking of isolation switch in 500 kV substation [J]. Guangdong Electric Power,2014,27(8):64-69.
- 问耀文(1997—),男,硕士,助理工程师,主要从事变压器在线监测技术研究(E-mail:705033996@qq.com)。
- 程养春(1974—),男,博士,教授,主要从事电力变压器和电缆诊断和状态评估技术研究(通信作者)(E-mail:chych@ncepu.edu.cn)。
- 何宁辉(1986—),男,博士,高级工程师,主要从事电力设备状态监测技术研究。
- 沙伟燕(1981—),女,硕士,高级工程师,主要从事电网设备状态信息监测技术研究。
- 吴旭涛(1982—),男,本科,正高级工程师,主要从事高压绝缘技术研究。
- 李秀广(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事电力设备试验与检测技术研究。