

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.12.036

典型40.5 kV穿柜套管绝缘击穿案例仿真和分析

杨定乾¹, 陈 贇², 丁 杨¹, 金 铭¹, 罗文华¹

(1. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要:穿柜套管绝缘击穿引发变压器出口短路案例屡见不鲜, 文中将套管绝缘击穿分为空气绝缘击穿与环氧绝缘击穿两类。为明确两种击穿的诱因, 结合某省第3季度穿柜套管绝缘击穿案例, 针对屏蔽体悬浮及内含气隙的穿柜套管展开电场仿真研究。仿真结果表明空气绝缘击穿多由内等电位屏蔽悬浮造成, 环氧绝缘击穿多由缺陷气隙放电或击穿引起的绝缘劣化变性造成, 该结果与案例分析一致。为研究屏蔽改进在防止气隙放电方面的作用, 借鉴800 kV气体绝缘组合电器中屏蔽裙边处理改善边缘效应的措施, 对屏蔽改进后含气隙的穿柜套管展开电场仿真研究, 仿真结果表明裙边改进对缺陷气隙的优化作用不大。根据仿真结果, 防止穿柜套管绝缘击穿类事故不能单单依靠优化屏蔽体手段。仿真和分析结果为穿柜套管结构设计及现场安装具有一定指导意义。

关键词:穿柜套管; 环氧绝缘; 边缘效应; 屏蔽体; 劣化; 击穿

Simulation and Analysis for Typical Insulation Breakdown Faults of Bushing Through 40.5 kV Cabinet

YANG Dingqian¹, CHEN Yun², DING Yang¹, JIN Ming¹, LUO Wenhua¹

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Company Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China;
2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: Transformer outlet short circuit caused by insulation breakdown of bushing through cabinet happens frequently. In this paper, insulation breakdown of the bushing cabinet is classified as air insulation breakdown and epoxy insulation breakdown. To clarify the causes of two kinds of breakdown, the insulation breakdown faults of bushing through cabinet happened in a certain province in the third quarter are analyzed, and the bushings with suspended shield or air gap are simulated on electric field. According to the results, the air insulation breakdown was caused in most cases by internal equipotential suspended shield, and the epoxy insulation breakdown generally resulted from the insulation deterioration due to air-gap discharge or breakdown. The results are in line with the case analysis. In order to study the effect of shielding improvement on air gap discharge, considering the shield-skirt treatment measures to improve the fringe effect of 800 kV gas insulated switchgear, the shield of the bushing with air gap is improved, and the electric field of the bushing is simulated. It is shown that shield-skirt improvement exerts little effect on suppressing air-gap discharge. Thereby, conclusion is drawn that only shield optimization is not available to prevent insulation breakdown of the bushing through cabinet. The obtained simulation and analysis results may provide a reference for design and installation of the bushing through cabinet. Simulation and analysis results for the cabinet bushing has certain guiding significance to the design and installation.

Key words: bushing through cabinet; epoxy insulation; fringe effect; shield; deterioration; breakdown

0 引言

随着坚强智能电网的发展, 变电站对 35 kV 电

收稿日期: 2017-06-18; 修回日期: 2017-08-23

压等级设备可靠性要求愈加提高,目前已广泛采用开关柜等屋内配电装置^[1-4]。开关柜内穿柜套管承担着母线对柜体的绝缘,其自身质量和安装质量好坏直接决定 35 kV 系统的可靠性。据统计,某省第三季度 35 kV 母线相间短路 4 次,均由穿柜套管绝缘击穿导致,这其中有两例事故造成了 220 kV 变压器损坏,穿柜套管的重要及故障后的危害由此可见一斑。目前广泛使用的环氧树脂干式穿柜套管,结构紧凑、不需维护^[5-7],但是安装过程中高等电位屏蔽悬浮会引起母排与套管间空气绝缘击穿,制造过程中存在的气隙缺陷,运行时会放电击穿诱发绝缘材料老化^[8-10],其持续发展严重威胁 35 kV 母线对开关柜的绝缘。因此通过对穿柜套管的电场分析,确定屏蔽体悬浮及缺陷气隙对穿柜套管电场分布的影响^[11-19],对穿柜套管的设计及安装具有重要指导意义。

1 40.5 kV 穿柜套管绝缘击穿故障案例

某省 2015 年第三季度 40.5 kV 开关柜穿柜套管绝缘击穿故障共 6 例,其中空气击穿导致母排绝缘护套损伤的 2 例,环氧绝缘击穿导致母排单相接地点诱发相间短路的 4 例。对这些案例进行系统分析后发现,空气击穿基本上都因内屏蔽等电位连接不牢靠,环氧绝缘击穿基本上都因套管内部存在气隙缺陷。为进一步明确等电位连接、缺陷气隙、屏蔽体各自对套管内电场强度分布的影响,选取以下 3 个典型案例,围绕案例进行仿真分析。

1.1 空气绝缘击穿类故障

2015 年 8 月某 220 kV 变电站 35 kV 站用变进线开关柜穿柜套管内屏蔽与母线未进行等电位连接,导致运行过程中矩形母线对穿柜套管内壁放电,现场检测暂态地电波幅值超标,柜内放电超声幅值明显,在进行等电位连接后检测数据恢复正常,表明内部不再放电。

发生故障的穿柜套管见图 1,套管内壁存在明显白色放电灼痕,母排复合绝缘护套有一电弧熔洞,放电击穿点位于矩形母排 T 面。

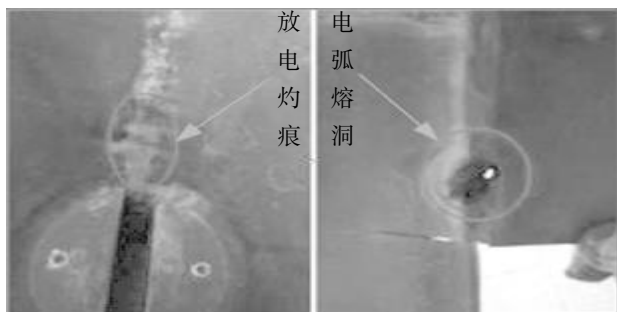


图 1 空气绝缘击穿套管

Fig. 1 Bushing with air insulation breakdown

1.2 环氧绝缘击穿类故障

2015 年 7 月某新投运 220 kV 变电站 35R4 电容器组进线开关柜 A 相穿柜套管绝缘劣化,导致 35 kV 母线 A 相单相接地,使得非故障相 B、C 对地电压提高,诱发了 B 相穿柜套管的绝缘击穿,使故障发展为两相弧光短路,并最终在电弧产生的粉尘、等离子体作用下发展为三相短路。最后致使该段母线上 220 kV 变压器低压绕组严重变形,返厂大修。

故障套管见图 2。套管环氧主绝缘因内部放电劣化变性,套管产生碎裂,套管与开关柜外壳之间残留有放电产生的碳黑。

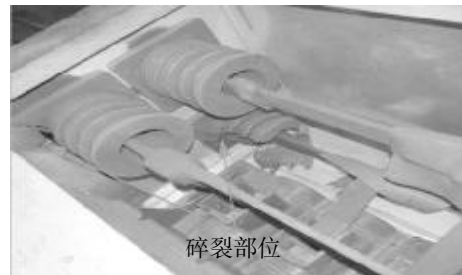


图 2 环氧绝缘击穿套管

Fig. 2 Bushing with epoxy insulation breakdown

2015 年 8 月某 220 kV 变电站 35 kV 出线开关柜 C 相穿柜套管绝缘劣化导致 35 kV 母线 C 相单相弧光接地,单相接地运行近两小时后 B、C 两相短路,并迅速发展为三相短路,所幸该站两台 220 kV 变压器经受住了短路冲击,未出现绕组变形等大问题。对该套管解体发现外屏蔽尖角附近存在气隙空穴缺陷,放电通道为两屏蔽之间贯穿性放电通道。

故障套管见图 3。网状等电位屏蔽周围存在气隙,套管环氧主绝缘间有放电弧道,弧道沿面光滑,说明电弧高温曾使环氧材料熔融,弧道周围环氧复合材料有玻璃化现象。

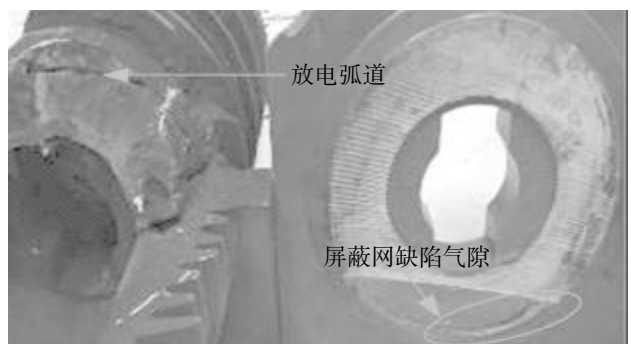


图 3 套管内部放电弧道及气隙

Fig. 3 Bushing with arc canal and air-gap

2 穿柜套管电场分布仿真分析

2.1 穿柜套管模型建立

典型的穿柜套管结构见图 4。图 4 包含安装螺母、高电位屏蔽(内屏蔽)、地电位屏蔽(外屏蔽)、等电

位连接线及环氧套管。高电位屏蔽通过等电位连接线与贯穿套管的母排相连，地电位屏蔽通过等电位连接线与安装螺母即开关柜外壳相连。

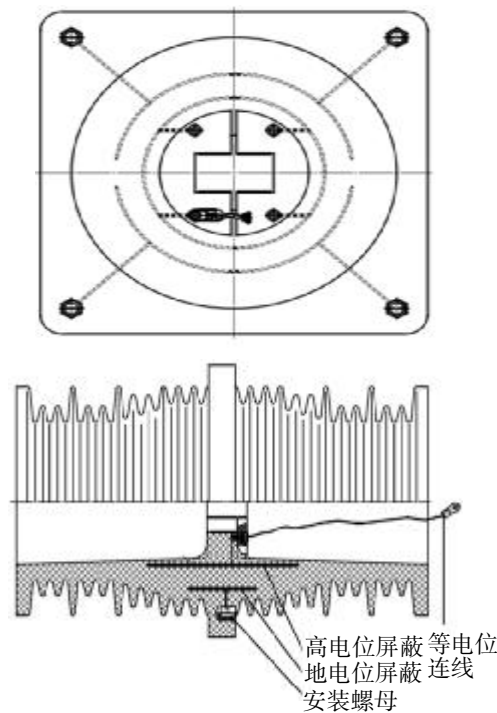


图 4 穿柜套管结构图

Fig. 4 Structural drawing of cabinet bushing

根据厂家提供的设计尺寸,建立穿柜套管模型,模型 2D 剖面见图 5。所建立模型仅用来分析套管内部空气绝缘域、环氧绝缘域以及气隙的电场分布,故忽略套管伞裙,穿柜套管结构参数见表 1,穿柜套管各部分介电常数及电导率见表 2。为更好研究电场分布情况,设立 L 和 R 两个路径,L 路径横向贯穿套管,R 路径则贯穿 3 个气隙。L 路径起止点坐标:(0,-200,0),(0,200,0);R 路径起止点坐标:(0,-123,27),(0,-85,65)。为方便起见,将三维路径一维化,标定路径起始坐标为 0 坐标,标定后一维路径坐标为 L:(0,0,0),(400,0,0);R:(0,0,0),(55,0,0)。

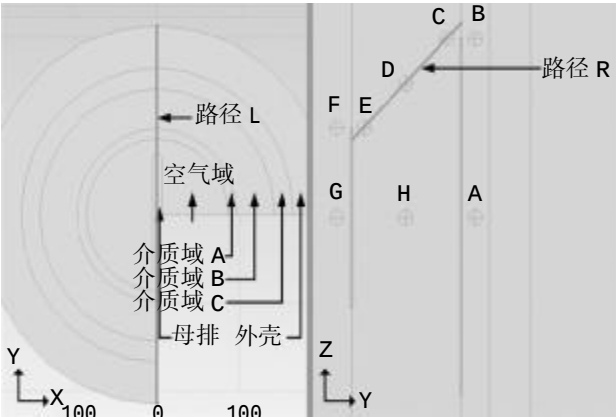


图 5 穿柜套管模型剖面图

Fig. 5 Profile map of cabinet bushing model

表 1 穿柜套管模型结构参数

Table 1 Structure parameter of cabinet bushing model

bushing model		mm	
参数	数值	参数	数值
母排宽度	120	内屏蔽直径	170
母排厚度	10	内屏蔽宽度	120
环氧套管内径	150	内屏蔽厚度	1
环氧套管外径	290	外屏蔽直径	250
环氧套管长度	545	外屏蔽宽度	60
外壳内径	290	外屏蔽厚度	1
外壳外径	400	气隙球直径	5
外壳厚度	10	外屏蔽间断	20

表 2 穿柜套管模型电气量参数

Table 2 Electric parameters of cabinet bushing model

材料	电导率/(S·m ⁻¹)	相对介电常数
环氧套管	0.00	3.50
空气	0.00	1.00
内屏蔽、外屏蔽、母排	3.78×10 ⁻⁷	70 000.00

仿真施加载荷方面,因是中性点不接地系统,故高电位 U_m 选取设备最高线电压峰值:57.00 kV,低电位选择 0,母排始终为高电位,外壳始终为低电位。对于等电位屏蔽,仿真过程中需要分析其自身悬浮对电场分布的影响,因此根据屏蔽悬浮情况,设立内外均不悬浮、内屏蔽悬浮、外屏蔽悬浮、内外均悬浮 4 种载荷方式,以下简称为“内等外等”、“内悬外等”、“内等外悬”及“内悬外悬”,详细情况见表 3。

表 3 仿真模型电压载荷参数

Table 3 Voltage loadon simulation model

屏蔽悬浮情况	内屏蔽	外屏蔽	母排	外壳
内等外等	57.00	0	57.00	0
内悬外等	—	0	57.00	0
内等外悬	57.00	—	57.00	0
内悬外悬	—	—	57.00	0

2.2 空气绝缘击穿原因仿真分析

对已建立模型在 COMSOL 软件中进行有限元计算,选择中心点均为(0,0,0)的径向、轴向两个剖面结果进行对比分析。内、外屏蔽均不悬浮情况下套管电场分布仿真结果见图 6。从图 6 中可以看出,母排与套管之间空气绝缘可分为两部分,一部分被内屏蔽包裹,该部分电场强度最低,普遍小于 0.20 MV/m;另一部分不被内屏蔽包裹,该部分电场强度稍高,但均低于 1.50 MV/m,这说明内屏蔽对空气绝缘域电场分布有优化作用。

内、外屏蔽均不悬浮情况下,内外屏蔽之间环氧绝缘电场强度最高,内屏蔽与母排之间、外屏蔽与外

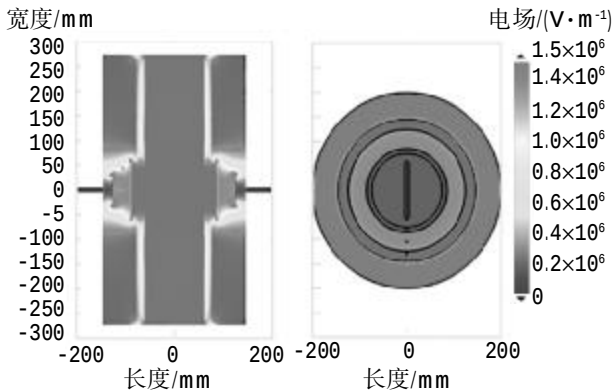


图 6 内等外等情况下套管电场分布

Fig. 6 Electric-field distribution(EFD) under the both equal case

壳之间的环氧绝缘电场强度最低,这一结果表明 57.00 kV 的电压主要由内外屏蔽之间环氧绝缘负担,内屏蔽与母排之间的空气、环氧绝缘,以及外屏蔽与外壳之间的环氧绝缘基本未承担电压载荷。

采用间断外屏蔽的套管,在内、外屏蔽均不悬浮情况下套管电场分布仿真结果见图 7。与连续屏蔽相比,屏蔽间断部位电场分布有明显畸变,其他部位则大体一致,空气区域电场分布没有大的不同。间断部位电场分布的畸变缘于“边缘效应”,即屏蔽体边缘部位因曲率很大,可等效为小直径柱状电极,由柱状电极电场分布情况可知,电极附近电场强度很高,其他区域电场强度明显下降。仿真结果表明外屏蔽的间断仅以边缘效应的形式影响环氧绝缘域内电场分布,不会影响空气域,因此外屏蔽间断与空气绝缘的击穿没有直接关系。

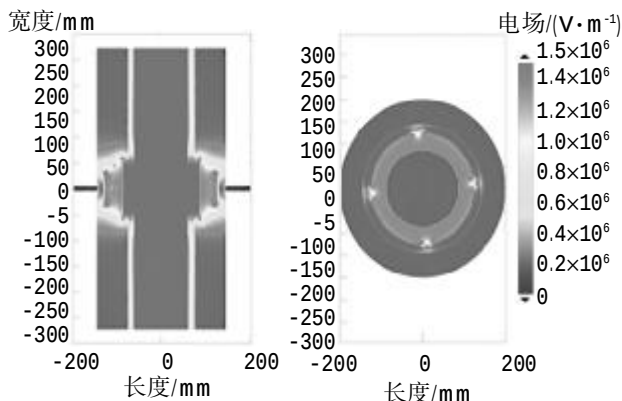


图 7 内等外等情况下外屏蔽间断套管电场分布

Fig. 7 EFD of gap shield under the both equal case

内屏蔽悬浮情况下套管电场分布仿真结果见图 8。与其他区域相比母排与套管内壁之间空气域电场强度最高,且空气域电场分布畸变明显,母排窄面附近电场强度大于 1.50 MV/m,最大电场强度 7.29 MV/m,高于 3.00 MV/m 的空气击穿场强,宽面中心区域电场强度低于 1.0 MV/m,相比之下环氧绝缘区域电场强度较小,普遍低于 0.60 MV/m。该结果

表明内屏蔽悬浮情况下,57.00 kV 电压载荷由母排和外屏蔽之间的空气、环氧绝缘共同承担,因空气介电常数低,导致空气承担着约 80% 的电压载荷,另外母排形状为矩形,窄面曲率更大,导致窄面周围空气电场强度更高。仿真结果表明内屏蔽悬浮会导致母排与套管之间空气绝缘击穿。

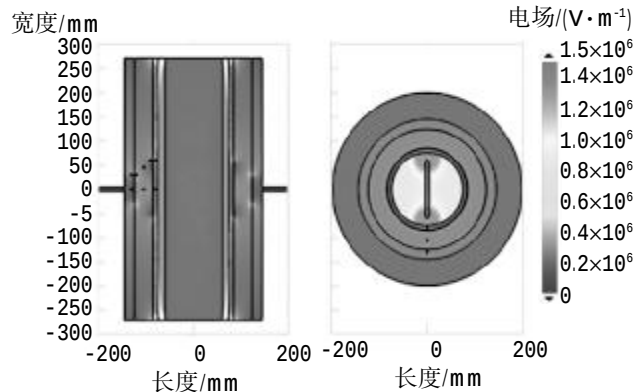


图 8 内悬外等情况下套管电场分布

Fig. 8 EFD under the suspended inner shield case

外屏蔽悬浮情况下套管电场分布仿真结果见图 9。外屏蔽与外壳之间环氧绝缘域电场强度最高,且电场分布畸变明显,外壳薄板附近电场强度大于 1.50 MV/m,相比之下母排与套管之间的空气以及内外屏蔽之间的环氧绝缘电场强度较低,普遍低于 0.60 MV/m。该结果表明外屏蔽悬浮情况下,57.00 kV 电压载荷由外壳和内屏蔽之间的环氧绝缘共同承担,因外壳较薄,形成了“针、板”电极,导致外壳周围环氧绝缘电场强度更高。仿真结果表明外屏蔽悬浮会引起外壳附近环氧绝缘电场畸变。

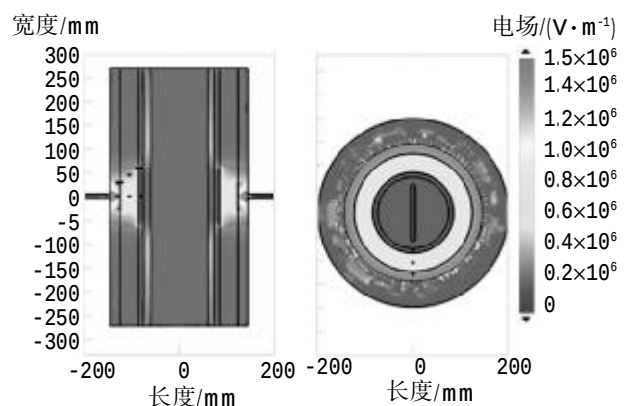


图 9 内等外悬情况下套管电场分布

Fig. 9 EFD under the suspended outer shield case

内、外屏蔽均悬浮情况下套管电场分布仿真结果见图 10。该情况下空气域电场分布与内屏蔽悬浮情况基本一致;外屏蔽与外壳之间环氧绝缘域电场分布与外屏蔽悬浮情况基本一致,但外壳附近电场畸变明显降低。该情况下空气域最大电场强度为 5.53 MV/m,与内屏蔽悬浮情况相比有所下降,但依

然大于 3.00 MV/m 的空气击穿场强, 仿真结果表明内、外屏蔽均悬浮依旧会引起母排与套管之间空气绝缘击穿。

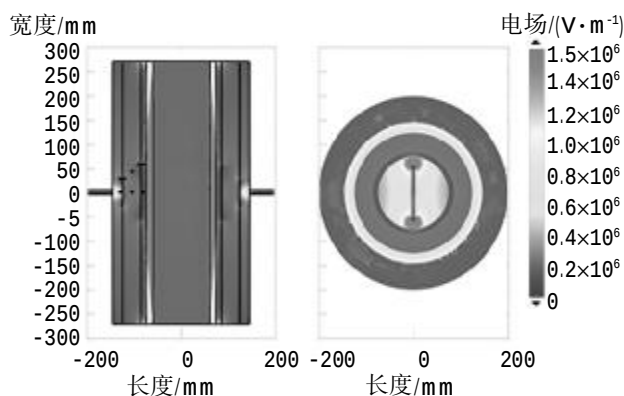


图 10 内悬外悬情况下套管电场分布

Fig. 10 EFD under the both suspended case

不同情况下空气域最大电场强度见表 4, 内悬外等情况下空气区域最大电场强度最高, 为 7.29 MV/m , 是空气击穿场强的 2.43 倍; 内悬外悬情况下空气区域最大电场强度为 5.53 MV/m , 也超过了空气击穿场强。

表 4 不同等电位连接下空气域最大电场强度

Table 4 Max intensity in the air under different case

等电位连接方式	空气域内最大电场强度 $E_{\max}$	MV/m
内等外等	1.99	
内等外悬	0.80	
内悬外等	7.29	
内悬外悬	5.53	

不同情况下沿路径 L 的电场分布曲线见图 11。外屏蔽悬浮情况下, 外壳与外屏蔽之间的环氧绝缘更高, 环氧绝缘最大电场强度靠近外壳边缘, 且随位移 x 的增加电场强度呈指数下降; 内屏蔽悬浮情况下母排与环氧套管内壁间空气域电场强度更高, 电场呈指数分布, 空气域最大电场强度靠近母排窄面, 且最大电场强度远超 3.00 MV/m 的空气击穿场强; 内、外屏蔽均未悬浮情况下, 内外屏蔽之间环氧绝缘电场强度更高, 但低于 1.7 MV/m 。

综上所述, 类似 1.1 节中的穿柜套管与母排间空气绝缘击穿故障, 主要原因是内屏蔽等电位连接线未连接或连接不可靠, 造成内屏蔽悬浮。内屏蔽悬浮情况下运行电压由母排和套管之间空气介质负担, 在“边缘效应”影响下空气域电场强度产生畸变, 母排窄面电场强度高而宽面电场强度低, 最大电场强度远超 3.00 MV/m 的空气击穿场强。

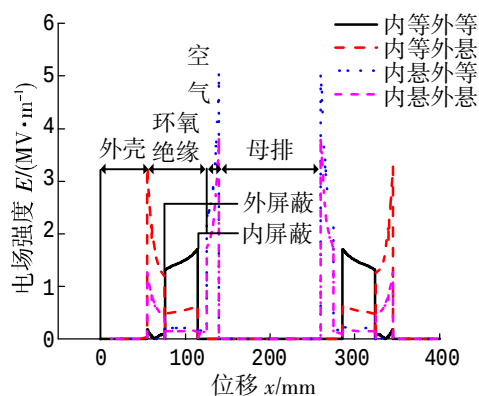


图 11 不同情况沿路径 L 电场强度

Fig. 11 Intensity along the path L under different case

2.3 环氧绝缘击穿原因仿真分析

环氧绝缘击穿无外乎自身电场强度超过击穿场强或者因局部放电导致自身变性劣化这两种原因。根据 2.2 节的仿真结果, 空气域电场分布主要受屏蔽悬浮情况影响, 与之不同的是环氧绝缘电场分布主要受屏蔽悬浮情况及“边缘效应”两方面影响。在外屏蔽悬浮时外壳周围环氧绝缘域电场分布发生明显畸变, 其他情况下均为屏蔽体“边缘效应”引起的边缘局部电场畸变。

套管内部局部放电主要指气隙的局部放电, 穿柜套管在环氧树脂浇注过程中可能存在气隙缺陷, 气隙电晕放电甚至是击穿过程中产生的热辐射、电离辐射、等离子体都会加速环氧复合材料老化, 极大地影响套管绝缘性能。

内外屏蔽均未悬浮情况下气隙域电场分布见图 12。

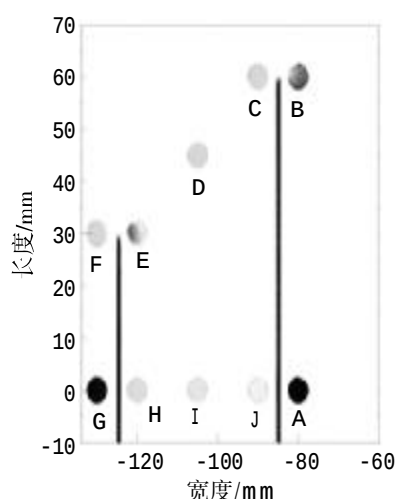


图 12 内等外等情况下连续屏蔽套管气隙电场分布

Fig. 12 Intensity of the air gaps under the both equal case

气隙 A、G 处于屏蔽与电极之间, 且远离屏蔽边缘, 因而电场强度基本为 0; 与 A、G 相同, 气隙 B、F 也处于屏蔽与电极之间, 但靠近屏蔽边缘, 在“边缘

效应”影响下其电场强度不为 0,且存在近屏蔽处场强高远屏蔽处场强低的分布趋势;气隙 D、H、I、J 位于内外屏蔽之间,远离屏蔽边缘因此不受边缘效应的影响,因空气介电常数低于环氧材料,所以气隙电场强要成倍于环氧材料;气隙 C、E 位于内外屏蔽之间且靠近屏蔽边缘,因此边缘效应的影响更加明显。

2.3.1 环氧绝缘域电场仿真分析

环氧绝缘击穿的一种可能原因是环氧域电场强度超过了击穿场强,为确定边缘效应是否会引起环氧绝缘击穿,选取连续、间断两种外屏蔽套管模型,在内外屏蔽均未悬浮的情况下,其环氧绝缘域最大电场强度对比结果见图 13。

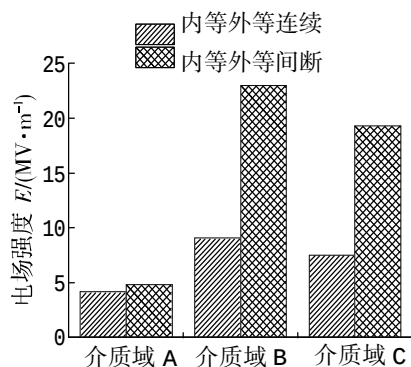


图 13 不同屏蔽下环氧介质最高场强对比

Fig. 13 Max intensity in the epoxy under different shield

介质域 A 是内屏蔽与套管内壁之间的环氧绝缘,因内屏蔽一样,所以连续屏蔽套管与间断屏蔽套管在该域内最大电场强度基本一致;介质域 B 是内屏蔽与外屏蔽之间的环氧绝缘,外屏蔽间断套管在该域内最大电场强度为 22.5 MV/m,远超外屏蔽连续套管在该域内的最大电场强度,但依旧未超过 30.00 MV/m 的环氧绝缘击穿电场强度;介质域 C 是外屏蔽与外壳之间的环氧绝缘,因其与介质域 B 交接,所以该域内最大电场强度与介质域 B 基本一致。

根据仿真结果,受边缘效应影响间断式外屏蔽套管内部环氧绝缘最大电场强更高,但是并未超过环氧绝缘的击穿电场强度,不会引起环氧绝缘击穿。

2.3.2 气隙域电场仿真分析

环氧绝缘击穿的另一可能原因是气隙放电导致的环氧复合材料变性劣化,为研究缺陷气隙是否会放电,在内、外屏蔽均未悬浮情况下,选取因边缘效应影响电场强度较高的 C、E 两个气隙为研究对象,对比外屏蔽连续、间断两种套管气隙中心部位电场强度,并对比沿同一路径 R 的电场强度曲线。

气隙中心电场强度对比结果见图 14,结果表明气隙 C、E 中心电场强度基本不受外屏蔽形式的影响,其中气隙 C 的中心场强近似 1.55 MV/m,气隙 E

的近似 2.65 MV/m,气隙 E 中心场强超过了 2.20 MV/m 的空气起晕场强,因此会产生局部放电。

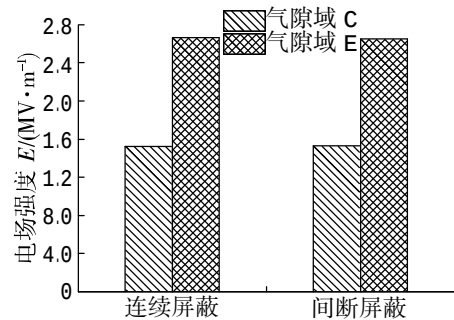


图 14 不同屏蔽下边缘气隙 C、E 电场对比

Fig. 14 Intensity of the air gaps C and E under different shield

沿同一路径 R 的电场强度曲线见图 15,在边缘效应影响下气隙 C、E 域内电场分布呈现特有的“近屏蔽处高而远处低”,因外屏蔽间断,所以两种结构下气隙 E 的电场分布存在明显不同,间断屏蔽下气隙 E 的最高场强近似为 3.85 MV/m,连续屏蔽下近似为 3.15 MV/m,均超过了空气击穿场强,与之不同的是气隙 C 的最高场强不足 2.00 MV/m。该结果表明缺陷气隙电晕、击穿导致的环氧复合材料绝缘劣化、变性甚至是熔融才是环氧绝缘击穿的根本原因。

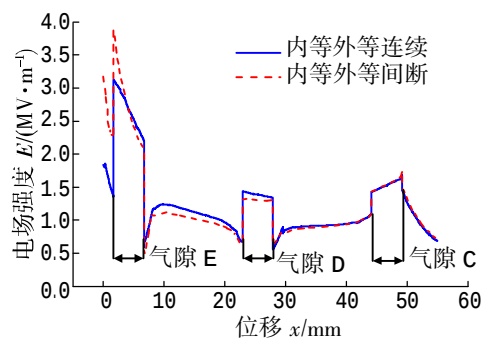


图 15 不同屏蔽下路径 R 的 E-x 曲线

Fig. 15 E-x wave along the path R under different shield

仿真结果解释了环氧绝缘击穿的原因,间断屏蔽尖端部位气隙最大电场强度可达 3.85 MV/m,远超 3.00 MV/m 的空气击穿场强,气隙的击穿导致环氧树脂劣化,持续劣化最后导致套管内部绝缘击穿,这一贯穿放电恰恰诱发了套管内部两层屏蔽之间弧光短路,图 3 中套管内部熔融通道就是内部弧光短路的结果。

3 降低屏蔽体边缘效应的裙边优化方法

为进一步消除屏蔽体边缘效应的不利影响,借鉴 800 kV 气体绝缘组合电器中屏蔽体裙边处理方法,建立连续屏蔽裙边处理后套管模型,进行有限元仿真计算。外翻裙边(裙边 A)的电场分布情况见图

16, 内翻裙边(裙边 B)的电场分布情况见图 17, 结果表明两种裙边处理电场分布无太大不同。

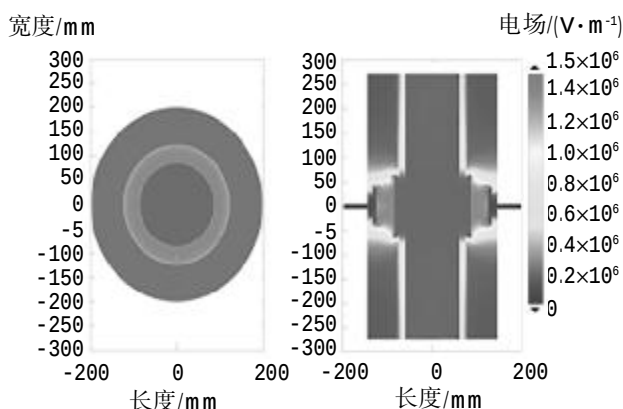


图 16 裙边 A 处理下套管电场分布

Fig. 16 EFD under the shield-skirt improvement A

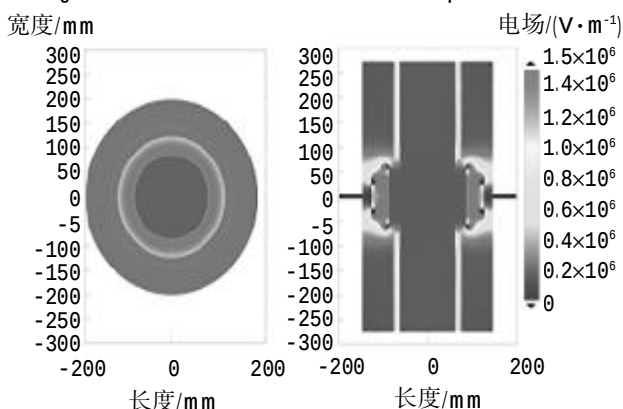


图 17 裙边 B 处理下套管电场分布

Fig. 17 EFD under the shield-skirt improvement B

对两种裙边处理模型气隙电场进行横向对比, 以明确哪种裙边处理效果最好, 其条形对比见图 18, 沿贯穿气隙路径的电场对比见图 19。

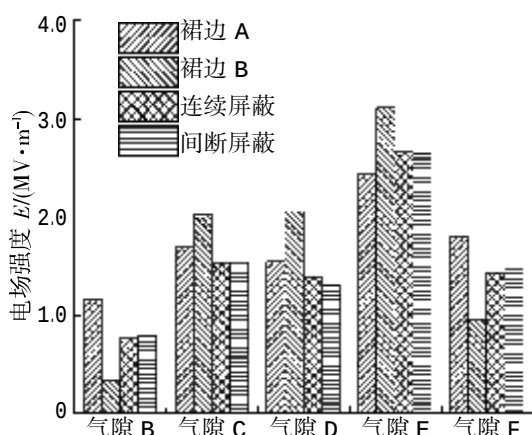


图 18 不同裙边处理下气隙中心电场对比

Fig. 18 Intensity of the air gaps under different improvement

与连续屏蔽相比裙边 B 处理后气隙 C、D、E 的中心电场强度不降反升, 原因在于内翻缩短了内外两屏蔽边缘之间距离。与之相反, 外翻加长了屏蔽边

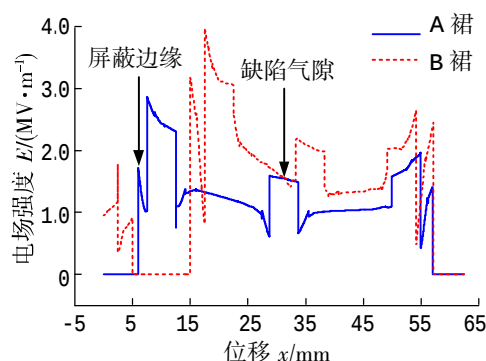


图 19 不同裙边处理下路径 R 的 E-x 曲线

Fig. 19 Sheds E-x along the path R under different improvement

缘之间的距离, 仿真结果表明裙边 A 下气隙 E 的中心电场强度较连续屏蔽明显降低, 气隙 C、D、E 的中心电场强度比裙边 B 低。

在 E-x 曲线上, 因 A、B 裙边模型中气隙位置存在差别, 所以两条曲线中气隙部位不能完全重合。A 裙边模型缺陷气隙电场强度低于 B 裙边, 说明 A 裙边具有更好效果, 但是气隙域局部电场强度依然大于 2.20 MV/m 的空气起晕场强, 结果表明即使是较好的裙边处理也不能杜绝缺陷气隙局部放电。

裙边处理后介质内部最大电场强度大幅降低, 说明裙边处理削弱了边缘效应; 与裙边 B 相比, 裙边 A 下 3 个介质域电场强度更为均匀, 说明外裙边较内裙边效果更好。

综合比较不同屏蔽穿柜套管的仿真结果, 在降低边缘效应方面, 屏蔽体改进后有环氧绝缘域电场强度大幅下降, 说明该措施有很好的优化效果; 在降低气隙电场强度防止气隙放电击穿方面, 屏蔽体改进后各参考气隙中心电场强度有一定程度降低, 但并未降至电晕起始电场强度以下。由 2.2 节分析可知, 穿柜套管内部环氧绝缘击穿的首要原因是边缘效应导致气隙场强升高引起气隙放电或击穿, 仿真结果表明屏蔽体优化不能实现避免气隙局部放电的目的。不同屏蔽下各气隙中心最大场强 $E_{\max}$, 见表 5。

表 5 不同屏蔽下各气隙中心最大场强 $E_{\max}$

Table 5 Max intensity in the air-gaps under

	different shield				M V/m
屏蔽形式	气隙中心电场强度 $E_{\max}$				
	气隙 B	气隙 C	气隙 D	气隙 E	气隙 F
裙边 A	1.14	1.70	1.55	2.43	1.80
裙边 B	0.33	2.01	2.05	3.11	0.95
连续屏蔽	0.75	1.53	1.39	2.66	1.43
间断屏蔽	0.79	1.53	1.30	2.65	1.48

穿柜套管出厂试验过程中都经过了严格的局部放电试验, 试验结果满足国家标准, 因此单单依靠出

厂试验不能确定穿柜套管无内部缺陷。另一方面从气隙放电到环氧绝缘击穿发展过程缓慢,少则数天多则数年,这也增大了排查气隙缺陷的难度。目前可靠的手段仅有周期性带电检测,以月为周期对开关柜进行超声、TEV 等局部放电巡检。

4 结论

1)穿柜套管空气绝缘击穿主要原因是内等电位屏蔽悬浮,造成母排周围电场严重畸变,母排表面附近空气电场强度远超击穿场强。

2)穿柜套管环氧绝缘击穿主要原因是内部存在气隙,部分位置气隙电场强度超过击穿场强,气隙击穿会导致环氧材料劣化变性。

3)屏蔽结构对主绝缘介质内最大电场强度影响很大,裙边处理措施可以大幅降低环氧绝缘域内最大电场强度,有效减弱主绝缘负担,但是该处理无法防止缺陷气隙的电晕或击穿。

4)穿柜套管内部气隙放电缺陷会导致环氧主绝缘老化,导致套管击穿,但整个过程持续缓慢,少则几日多则数年,通过定期局放类带电检测可以及早发现缺陷气隙放电。

参考文献:

- [1] 黄绍平,金国彬,李 玲. 成套开关设备使用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
HUANG Shaoping, JIN Guobin, LI Ling. Voltage switchgear practical technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [2] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
LIN Xin. Modern high-voltage electrical technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [3] 李华良,孙 敏,谢瑞涛,等. 中压开关设备试验典型故障分析及建议[J]. 高压电器,2013,49(11): 139-144.
LI Hualiang, SUN Min, XIE Ruitao, et al. Analyses and recommendations of typical faults in tests for MV switchgear [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 139-144.
- [4] 叶成刚. 35 kV 在役开关柜绝缘结构改进研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
YE Chengang. Research on insulation structure improvements of 35 kV in service switchgear panel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [5] 陈戎生,张惠勤,姚成开,等. 电力工程设计手册(电气一次部分)[M]. 北京:中国电力出版社,1989.
CHEN Rongsheng, ZHANG Huiqin, YAO Chengkai, et al. Power engineering design manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [6] 孙海涛,雷 颖,陈德桂,等. 中压 C-GIS 中穿墙套管的电场数值计算及优化设计[J]. 高压电器,2001,37(3): 6-8.
SUN Haitao, LEI Ying, CHEN Degui, et al. Electric field simulation and structure optimization of the wall bushing in medium voltage C-GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(3): 6-8.
- [7] 陈 希. 开关柜内部绝缘缺陷的检测与研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
CHEN Xi. Detection and research on the switch board's internal insulation fault[D]. Huhan: Huazhong University of Science & technology, 2012.
- [8] 齐 玉. 高压复合绝缘穿墙套管和电缆终端电场仿真及优化设计[D]. 北京:华北电力大学,2004.
QI Yu. Simulating electric field distributing and optimizing designs of HV compound insulation wall bushing and cable termination[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [9] 王 隽. 中压开关柜绝缘方式和绝缘事故分析[J]. 绝缘材料,2008,41(3): 15-17.
WANG Jun. Analysis on insulation mode and fault of medium-voltage switchgear[J]. Insulating Materials, 2008, 41(3): 15-17.
- [10] 何 建. 中压开关设备运行中存在的主要问题分析及对策[J]. 高压电器,2005,41(5): 385-387.
HE Jian. Analysis and treatment for the problems in the operation of medium-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5): 385-387.
- [11] 潘长明,刘 刚,熊 炬,等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器,2011,47(7): 90-93.
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [12] 肖智刚,董 明,任 明,等. 环氧树脂材料对极不均匀电场局部放电发展的影响研究[J]. 绝缘材料,2015,48(3): 60-67.
XIAO Zhigang, DONG Ming, REN Ming, et al. Influence of epoxy resin on partial discharge development under non-uniform field[J]. Insulating Materials, 2015, 48(3): 60-67.
- [13] 许学勤,张重远,李燕青,等. 接地内屏蔽对 SF₆ 套管电场分布影响的研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2008,34(6): 11-14.
XU Xueqin, ZHANG Zhongyuan, LI Yanqing, et al. Effects of grounding inner shield on the electric field distributions of SF₆ bushing[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2008, 34(6): 11-14.
- [14] 李 果,张 宇,李 勃,等. 高海拔,环氧树脂浇注电流互感器绝缘性的优化设计[J]. 高压电器,2010,46(4): 57-60.
LI Guo, ZHANG Yu, LI Bo, et al. The optimization of the current transformer with high-altitude and casting resin insulated[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4): 57-64.

(下转第 235 页)

- [7] 肖孟, 文曾. 一种新型的绝缘子带电检测方法—紫外成像法[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 42-44.
XIAO Meng, WEN Zeng. New method to detect insulation on line-ultraviolet image method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 42-44.
- [8] 黎松, 平西建, 丁义洪. 开放源代码的计算机视觉类库 OpenCV 的应用[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(8): 134-136.
LI Song, PING Xijian, DING Yihong. Application of open source computer vision library[J]. Computer Applications and Software, 2005, 22(8): 134-136.
- [9] 秦小文, 温志芳, 乔维维. 基于 OpenCV 的图像处理[J]. 科技信息, 2009(32): 220.
QIN Xiaowen, WEN Zhifang, QIAO Weiwei. Image processing based on OpenCV[J]. Electronic Test, 2009(32): 220.
- [10] 马新明, 赵晓莉, 时雷, 等. 基于 OpenCV 的图像处理系统设计与实现[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(1): 87-90.
MA Xinming, ZHAO Xiaoli, SHI Lei, et al. OpenCV-based image processing system design and implementation[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2014, 48(1): 87-90.
- [11] 丁亮, 张永平, 张雪英. 图像分割方法性能评价综述[J]. 软件, 2010, 31(12): 78-83.
DING Liang, ZHANG Yongping, ZHANG Xueying. A survey of image segmentation techniques and performance evaluation[J]. Software, 2010, 31(12): 78-83.
- [12] 陈兵旗, 孙明. Visual C++实用图像处理专业教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 88-89.
CHEN Bingqi, SUN Ming. Visual C++ practical image processing professional course[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2004: 88-89.
- [13] 武瑛. 形态学图像处理的应用[J]. 计算机与现代化, 2013, 289(5): 90-94.
WU Ying. Application of morphology in image processing[J]. Computer and Modernization, 2013, 289(5): 90-94.
- [14] 陆宗骥, 金登男. Visual C++ .NET 图像处理编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 260.
LU Zongqi, JIN Dengnan. Visual C++ .NET image processing programming[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 260.
- [15] 王胜辉, 李楠, 廖鹏. 放电日盲紫外成像检测图像参数提取方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(6): 40-45.
WANG Shenghui, LI Nan, LIAO Peng. Study on parameters extraction method of discharge based on solar-blind ultraviolet imaging detection[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(6): 40-45.
- [16] 陈磊, 周仿荣, 马仪, 等. 悬式复合绝缘子电晕放电紫外图像光斑面积[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 60-67.
CHEN Lei, ZHOU Fangrong, MA Yi, et al. Ultraviolet image facular area vary characteristic and apparent discharge estimation of suspension composite insulator corona[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 60-67.
- [17] 王胜辉, 律方成, 李和明. 高压设备电晕紫外成像检测图像增强方法的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 15-19.
WANG Shenghui, LYU Fangcheng, LI Heming. Study on image enhancement method of high voltage equipment corona UV imaging detection[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 15-19.
- 李炼炼(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输变电设备高电压技术的试验研究工作(通信作者)。

(上接第 228 页)

- [15] 江汛, 王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 17-18.
JIANG Xun, WANG Zhongyi. Calculation and analysis for the electric field of composite high-voltage bushing[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 17-18.
- [16] 杨坤松. 动车组车顶绝缘子湿污和内部缺陷条件下电场分布研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
YANG Kunsong. Research on electric field distribution of roof insulator on EMU under wetting contamination and internal defects conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [17] 罗勇芬, 韦加雄, 何立柱, 等. 内电极和均压环配置法优化复合绝缘子的沿面电场和电位分布[J]. 电瓷避雷器, 2009(1): 7-11.
LUO Yongfen, WEI Jiaxiong, HE Lizhu, et al. Optimization of electric-field and potential distribution along composite insulators based on configuration method of internal electrodes and grading ring[J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(1): 7-11.
- [18] 王佳颖, 方春恩, 戴王松, 等. 35 kV 触头盒电场计算及优化设计[J]. 高电压技术, 2008, 33(12): 63-65.
WANG Jiaying, FANG Chun'en, DAI Wangsong, et al. Electric field calculation and optimal design of 35 kV contactor box[J]. High Voltage Engineering, 2008, 33(12): 63-65.
- [19] HARA M, NEGARA Y, SETOGUCHI M, et al. Particle-triggered pre-breakdown phenomena in atmospheric air gap under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 1071-1081.
- 杨定乾(1990—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力设备故障诊断及带电检测方面的工作。
- 陈赞(1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电网规划方面的工作。
- 丁杨(1990—), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事电网技术监督方面的工作。