



·脉冲功率技术·

1 MV 气体绝缘 Tesla 变压器支撑绝缘子的 闪络特性实验与优化设计*

葛建伟, 李俊娜, 李奇胜, 刘建, 史浩良, 李楚男, 陈旭良, 崔光曦

(西安交通大学电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 输出高电压等级的同时, 为实现 Tesla 变压器的小型化、轻量化设计, 研究了 0.5 MPa SF₆ 气体环境中支撑绝缘子沿面闪络特性与表面电场的关系, 利用有限元法建立了 Tesla 变压器的电场仿真模型, 结合实验研究分析了支撑绝缘子沿面闪络过程, 阐明了 Tesla 变压器关键绝缘部件的场等效实验方法和结论, 根据上述分析优化支撑绝缘子结构。优化后的支撑绝缘子凹侧沿面电场最大值下降约 81.5%, 切向电场强度平均值降低约 10.3%, 法向电场强度平均值降低约 30%, 沿面距离增长 11.8%, 电场不均系数从 5.03 下降为 1.20, 电场分布改善明显, 预计可以耐受 1 MV 负极性微秒脉冲电压。

关键词: Tesla 变压器; 支撑绝缘子; 微秒脉冲; 沿面闪络; 表面电场

中图分类号: TM854

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230075

Experiment and optimal design of flashover characteristics of support insulators for 1 MV gas insulated Tesla transformer

Ge Jianwei, Li Junna, Li Qisheng, Liu Jian, Shi Haoliang,
Li Chunan, Chen Xuliang, Cui Guangxi

(State Key Laboratory of Electrical Insulation, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To realize the miniaturization and lightweight design of Tesla transformer with high output voltage, the relationship between the surface flashover characteristics of support insulators and the surface electric field in a 0.5 MPa SF₆ gas environment is studied. The electric field simulation model of Tesla transformer is established using the finite element method. Combined with experimental research, the surface flashover process of support insulators is analyzed, and the field equivalent experimental methods and conclusions of key insulation components of Tesla transformer are clarified. Based on the above analysis, the structure of support insulators is optimized. After optimization, the maximum electric field along the concave side of the support insulator decreases by about 81.5%, the average value of tangential electric field intensity decreases by about 10.3%, while the average value of normal electric field intensity decreases by about 30%, the distance along the surface increases by 11.8%, and the electric field unevenness coefficient decreases from 5.03 to 1.2. The electric field distribution is significantly improved, and the optimized insulator can withstand 1 MV negative polarity microsecond pulse voltage.

Key words: Tesla transformer, support insulator, microsecond pulse, surface flashover, surface electric field

为了满足 Tesla 变压器小型化与轻量化的要求, SF₆ 气体逐渐取代变压器油作为绝缘介质, 盆形绝缘子在隔离高低电位的同时也改变了电场分布, 绝缘子-电极-气体系统因而成为绝缘最薄弱的环节, 这会使绝缘材料的界面容易发生沿面闪络, 即在绝缘子表面发生贯穿性电击穿过程^[1-3]。影响绝缘子沿面特性的主要因素有沿面电场分布^[4-7]、脉冲电压波形^[8-10]、绝缘子材料^[11-12]等。刘琳研究了雷电冲击电压下影响支柱绝缘子闪络电压与电场分布特征之间的关系, 表明绝缘子闪络电压与电场的切、法向分量显著相关^[5]。张波指出气体环境中盆形绝缘子表面

* 收稿日期: 2023-04-03; 修订日期: 2023-07-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(52177157)
联系方式: 葛建伟, 547041449@qq.com。
通信作者: 李俊娜, uvlina@126.com。

法向电场容易聚集电子^[3],调整绝缘子结构可以改善电场^[13]。张乔根研究了 SF₆ 气体中球-板电极中陡波与雷电波的击穿规律,发现陡波的耐压比雷电波的耐压高,但是当出现电场集中时,陡波作用下的耐受电压比雷电冲击下的耐压低^[10]。孙楚昱研究了 SF₆ 气体中有机玻璃、交联聚苯乙烯和聚酰亚胺三种材料在脉冲电压下的闪络特性,研究表明 SF₆ 中聚酰亚胺材料的沿面绝缘性能最好,有机玻璃最差^[11]。本文结合上述实验研究了微秒脉冲下 SF₆ 气体环境中的大型盆形绝缘子沿面闪络的影响因素,并针对这些因素提出了适用于 Tesla 变压器支撑绝缘子的构型以及两侧腔体结构。在 Tesla 变压器实验平台测试支撑绝缘子沿面闪络阈值电压,分析闪络电压与沿面电场的关系,提出了调整支撑绝缘子构型以及两端屏蔽的方法改善沿面电场分布。根据 Tesla 变压器的实际结构建立电场仿真模型,利用有限元法计算支撑绝缘子沿面电场分布,阐明关键绝缘部件等效实验方法和结论,分析绝缘子结构的改善预计可以使其耐受 1 MV 负极性微秒脉冲电压。

1 实验平台和方法

采用 Tesla 变压器为实验平台,用于验证支撑绝缘子的绝缘性能。如图 1 所示, Tesla 实验平台采用线绕式空心变压器,初级绕组固定在外筒壁上,次级绕组在内外筒之间的锥型结构上,两个盆形绝缘子位于 Tesla 变压器两端。充电回路采用直流电源给电容充电,然后用机械开关击穿,通过电磁耦合作用在内筒产生脉冲电压。支撑绝缘子选取有机玻璃为绝缘材料,以实验平台的安装尺寸为设计依据。Tesla 变压器内筒穿过支撑绝缘子中间,支撑绝缘子通过尼龙螺钉固定在外筒两端,支撑绝缘子的凹面与 Tesla 变压器的腔体接触。支撑绝缘子及其周围的结构如图 2 所示,在绝缘子凹凸两面设置如图 2 中 2、4 所示的屏蔽槽以及圆弧形的屏蔽。

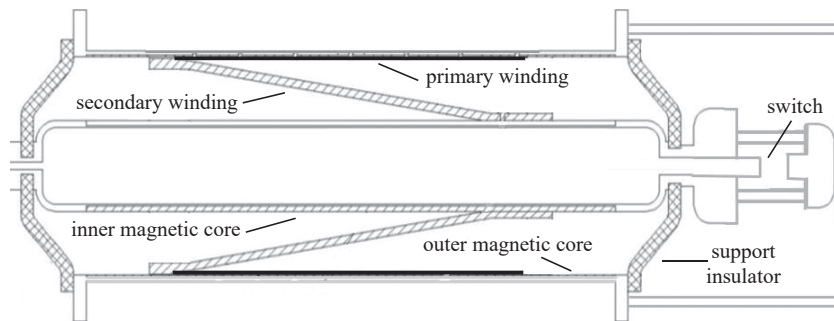


Fig. 1 Structure of Tesla transformer platform

图 1 Tesla 变压器平台结构

Tesla 变压器的电路模型如图 3 所示, L_p 、 C_1 为变压器初级侧的电感和电容, L_s 、 C_s 为次级侧的电感和电容, SW1 是与内筒连接的主开关, R_L 是开关与外筒壁连接的负载电阻。 R_S 代表绝缘子在内外筒之间的等效并联电阻, 如果绝缘子不发生闪络, R_S 设置为 1 M Ω , 此时次级电容 C_s 上承载的电压就是 Tesla 变压器的输出电压。在次级开关不击穿时, 可得 Tesla 变压器处于失谐状态的次级电压输出, 如图 4 所示, 初级电容 C_1 充 5 kV 电压时, 在次级绕组上产生的脉冲前沿时间 1.67 μ s, 变比为 149。为了减小次级绕组上脉冲的振荡, 同时保证绝缘子在脉冲前沿击穿, 测试支撑绝缘子可以耐受脉冲的最大值, 根据初级绕组上施加的电压, 调整 Tesla 变压器开关中气体的压力, 使开关在峰值附近击穿。输出电压下降时, 若负载电阻上有电压, 是开关击穿; 若负载电阻上没有电压, 判断是绝缘子发生了沿面闪络。

实验中采用递进加压方法测量绝缘子闪络电压, 从次级电压幅值超过 600 kV 开始加压, 每个电压状态运行 3~5 次, 若未发生闪络则提高初级电容电压继续实验, 初级递进步长不大于 0.5 kV, 直至绝缘子发生闪络, 取该状态下的平均电压为绝缘子初次闪络电压。获得初次闪络电压后, 降低变压器初级电容电压继续实验, 直至连续运行 5 次以上, 绝缘子不发生闪络, 取该状态下的平均电压为绝缘子的绝缘恢复电压。

2 实验结果及分析

Tesla 变压器腔体里充 0.5 MPa 的 SF₆ 气体, 实验平台逐渐提高初级电压, 绝缘子承受不同幅值的微秒负脉冲电压。图 5 展示多次耐压实验的闪络结果, 支撑绝缘子在 830 kV 电压等级下第五发发生沿面闪络, 初次闪络电压幅值为 827.52 kV。当次级电压幅值下降到 760.8 kV 时, 绝缘子恢复绝缘能力。在实验的基础上, 利用有限元仿真软件对 Tesla 变压器以及支撑绝缘子的电场分布进行了仿真计算。仿真模型为实际实验平台的轴对称模型, 几何模型与变压器实际尺寸一致。在该模拟中, 内筒施加负脉冲电压的峰值, 外筒接地, 等效模拟了沿面闪络发生时的

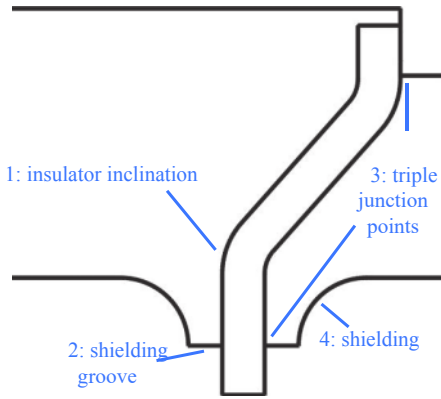


Fig. 2 Structure of support insulator

图 2 支撑绝缘子结构

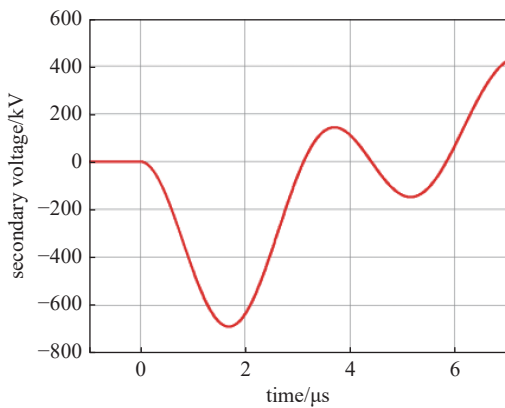


Fig. 4 Secondary voltage waveform under detuning state

图 4 失谐状态下的次级电压波形图

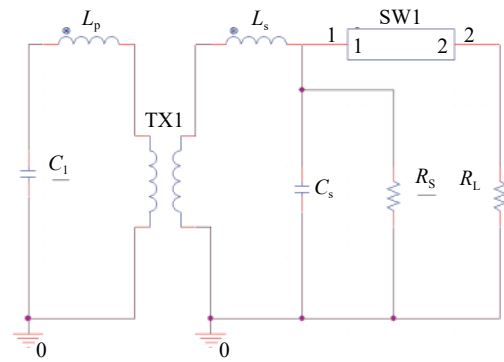


Fig. 3 Circuit schematic of Tesla transformer platform

图 3 Tesla 变压器电路原理图

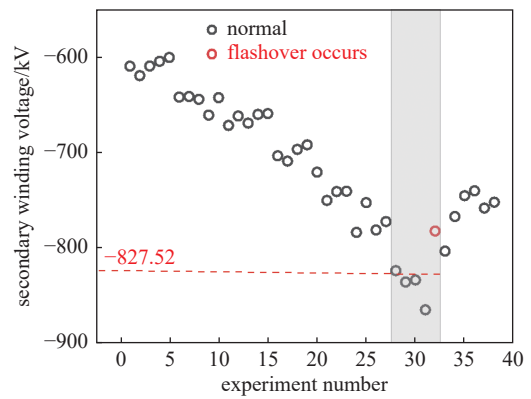


Fig. 5 Results of flashover under different withstand voltage experiment

图 5 多次耐压实验的闪络结果

电场分布,有机玻璃和 SF₆ 气体的相对介电常数分别取 3 和 1。

从图 6 中可以看到, Tesla 变压器腔体内的高场强区主要在内筒的两个球头附近,从内筒到外筒电场强度逐渐降低。外筒支撑绝缘子三结合点处的电场明显高于沿面的电场强度,因为三结合点处是金属外壁、有机玻璃和 SF₆ 气体的交界处,电场畸变最为严重。腔体内电场方向是从外筒指向内筒,电子沿着电场线反方向撞击到绝缘子表面,这加剧了碰撞电离过程。同时在绝缘子表面积聚的电荷,畸变沿面电场的同时,又促进放电通道的延伸发展。这两个因素都会降低沿面闪络电压。图 6 中上侧为绝缘子的凸面,下侧为绝缘子的凹面。因为 Tesla 变压器两端支撑绝缘子周围的屏蔽结构对称,电场分布趋势基本一致,所以本文就对图 1 左端的支撑绝缘子及其周围变压器的结构进行分析并设计。

图 7 显示达到沿面闪络电压时,沿着支撑绝缘子高度方向上的沿面电场强度分布,横坐标起点对应绝缘子内筒三结合点处。发现绝缘子凹面的电场强度整体高于绝缘子凸面电场强度,凹侧外筒三结合点处的电场强度最大。除了三结合点外,支撑绝缘子凸面最大场强为 52 kV/cm,凹面最大场强为 62 kV/cm,最大电场都位于倾角起始位置处。绝缘子两侧电场强度从内筒三结合点开始呈现下降的趋势,出现一个明显的拐点后开始上升,到达倾角起始位置处沿面电场达到最大值,绝缘子倾斜面上电场强度基本维持稳定,在倾角结束位置电场出现突变,绝缘子凸侧电场强度下降而凹侧电场强度剧烈上升。

从上述趋势可以看出,绝缘子的结构对绝缘子的沿面电场分布有显著影响。内筒处设计的屏蔽结构显著降低了绝缘子内筒两侧三结合点的电场强度,这是因为屏蔽结构形成了等电位区域。由于绝缘子凸侧没有与外筒相连,所以电场会下降,而凹侧外筒三结合点处没有屏蔽,电场强度呈现剧烈上升的趋势。盆形绝缘子的设计会使凹面接近内筒,在凹面倾角起始位置以及内筒屏蔽结构上都会有明显的电场畸变。假如内筒屏蔽结构与绝缘子凹侧距离过近,内筒处发射的电子就可能促进沿面闪络的发展,这也会缩短绝缘子凹侧的有效绝缘距离。相比于绝缘子的凸面,凹面沿面的电场强度更高,沿面距离更短,外筒三结合点的电场畸变更加明显。通常用电场不均匀系

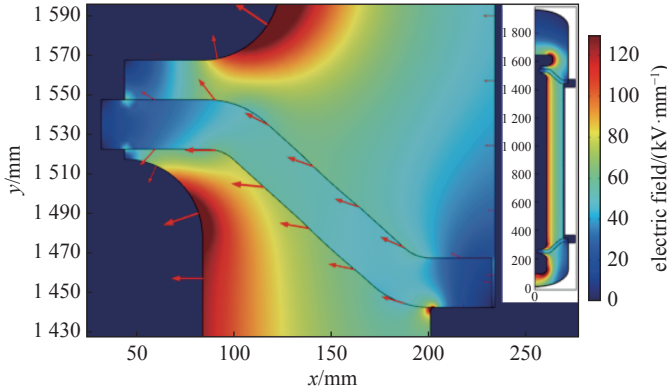


Fig. 6 Electric field distribution of Tesla transformer and support insulator (PMMA)

图 6 Tesla 变压器和支撑绝缘子(有机玻璃)的电场分布云图

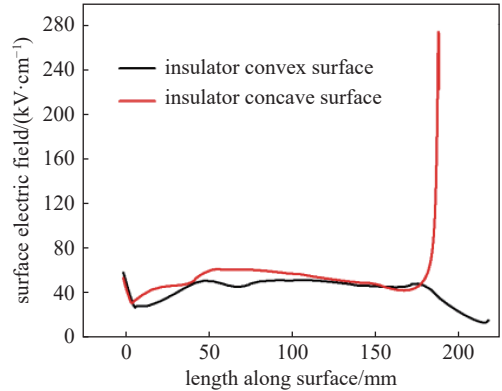


Fig. 7 Electric field strength diagram along the surface of insulator on both sides

图 7 绝缘子两侧沿面电场强度图

数判断稍不均匀电场和极不均匀电场^[14-15], 电场不均匀系数定义为间隙中最大场强 E_{max} 与平均场强 E_{av} 的比值, 即

$$f = E_{max}/E_{av} \quad (1)$$

式中: E_{max} 为沿面最大电场; E_{av} 为沿面平均电场。根据计算, 绝缘子凹面电场平均电场为 54 kV/cm, 最大电场位于外筒三结合点处, 大约为 272 kV/cm, 电场不均匀系数 f 为 5.03(大于 5), 绝缘子凹面是极不均匀电场。要使 Tesla 变压器可以输出更高的电压, 需要重点对发生沿面闪络概率更大的绝缘子凹面进行优化设计。

3 1 MV 支撑绝缘子优化设计

绝缘子两侧需要与内筒保持距离, 距离近会产生明显的电场畸变, 距离远则无法屏蔽三结合点处的电场。为增大绝缘子与内筒两侧的距离, 采取重新分配两侧屏蔽槽的距离、增大绝缘子的倾角和扩大屏蔽结构半径等改进措施。为进一步改善三结合点的电场, 把绝缘子凹凸两侧三结合点位置的内筒分别向绝缘子两侧设计一个小的圆弧形屏蔽, 如图 8(b)中棕色圈 A 所示。因为绝缘子在外筒处需要固定, 此处受到螺栓孔位置的限制而不能设计太大的屏蔽结构, 所以采用增加支撑绝缘子凹面与外筒固定位置处厚度的方法, 扩大了绝缘子在外筒处三结合点附近的空间, 如图 8(b)中棕色圈 B 所示。考虑到材料特性对沿面电场的影响, 绝缘子采用有机玻璃或相对介电常数低而且绝缘性能更好的聚酰亚胺材料(本文以相对介电常数为 2.5 的聚酰亚胺材料为例)制作。使用有限元分析方式分别计算 1 MV 电压下改进前后的 Tesla 变压器支撑绝缘子沿面的电场强度, 结果如图 8 所示。

图 8 中我们可以根据图中颜色判断电场的大小, 由于外筒三结合点电场远大于量程, 所以显示为黑红色, 图中箭头为电场方向。对比改善前后支撑绝缘子附近电场我们可以发现, 改善后绝缘子沿面的颜色浅了很多, 这说明支撑绝缘子两侧尤其是凹侧外筒处的屏蔽结构对三结合点处的屏蔽效果明显, 电场强度大幅下降, 绝缘子采用介电常数更低的聚酰亚胺材料后, 凹凸两侧表面的红色区域少了很多, 即沿面电场强度降低且分布得更加平缓。图 9 分别是改善前的 Tesla 变压器内筒施加 830 kV、1 MV 电压以及改善后的 Tesla 变压器内筒施加 1 MV 电压这三种

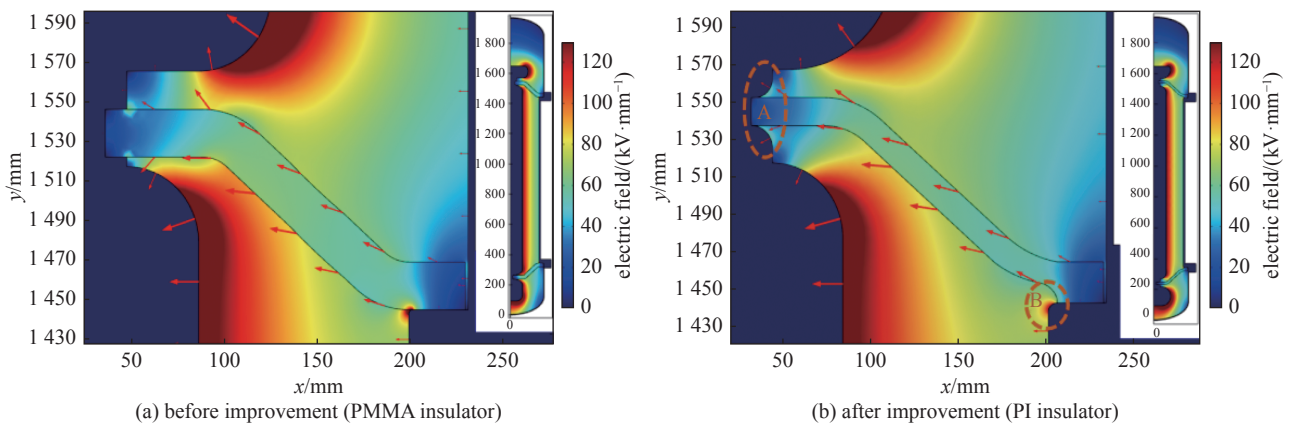


Fig. 8 Electric field distribution of 1 MV Tesla transformer and support insulator

图 8 1 MV Tesla 变压器和支撑绝缘子的电场分布云图

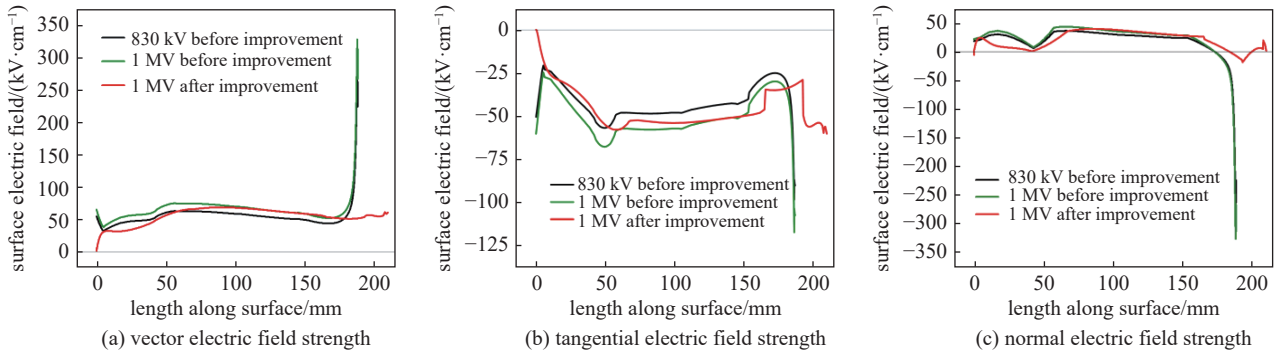


Fig. 9 Electric field strength along the concave side of supporting insulators under different states

图 9 不同状态下支撑绝缘子凹侧沿面电场强度

情况下, 支撑绝缘子凹侧沿面矢量电场以及切法向电场的对比。规定绝缘子沿面从内筒指向外筒为切向分量正方向, 垂直于绝缘子凹面向介质外为法向分量正方向。

图 9 和表 1 展示了不同状态下支撑绝缘子凹侧的电场强度。表 1 中的数值均为电场强度的代数值, 其中 E_T 和 E_N 分别表示切线方向和法线方向的电场分量, E_{TA} 和 E_{NA} 表示两个方向电场分量的平均值。改善前支撑绝缘子沿面绝缘距离 187 mm, 改善后增加到 209 mm, 增长了 11.8%。从内筒三结合点处开始, 绝缘子凹侧沿面电场开始先上升, 一直到绝缘子倾斜面开始下降, 在倾角结束时趋于平缓。图 9(a) 展示了绝缘子沿面矢量电场分布, 改善后绝缘子沿面电场优化效果明显。两侧三结合点特别是外筒三结合点处的电场强度得到了很大的改善, 下降约 81.5%, 这使得两侧三结合点处产生有效电子的概率降低了。图 9(b) 和图 9(c) 展示了绝缘子沿面切向和法向电场强度, 发现改善前的切向和法向电场强度在外筒三结合点附近极大, 但是法向电场会明显大于切向电场强度。沿面电场强度最大处的法向电场分量会对放电起始有很大的影响, 在闪络初始阶段, 电场强度最大的位置会不断发射初始有效电子, 放电产生的带电粒子会形成表面电荷聚集在绝缘子表面, 进一步畸变沿面电场, 电子崩过程更有可能发展成流注^[5]。改善后绝缘子凹侧外筒与内筒三结合点的法向电场最大值幅值分别降低了 93.8% 和 77.3%, 同时低于改善前发生闪络时最大值的法向电场。除了两侧三结合点外, 改善前后切向、法向电场强度变化趋势一致, 说明绝缘子结构的改善对在绝缘子表面沿面闪络发展过程一致, 所以对电场的改善及绝缘子沿面距离的增加会提高沿面闪络电压。改善前绝缘子沿面法向电场方向从内筒三结合点到绝缘子倾角结束位置指向绝缘子外侧, 从绝缘子倾角结束位置到外筒三结合点处的位置指向绝缘子内。改善后的绝缘子沿面法向电场方向基本与改善前保持一致, 只有在内外筒三结合点附近, 电场强度幅值降低到零并且电场方向发生改变。除了三结合点外, 在绝缘子凹侧倾角起始位置处, 沿面切向电场强度达到最大值, 法向电场强度达到局部的最小值。在闪络发展过程中, 切向电场和法向电场的平均值是沿面闪络的主要影响因素。因为根据气体放电的流注理论, 切向电场的积分是电子崩转化为流注发展的临界条件, 而法向分量则会与表面电荷相互作用共同促进放电通道的发展。对比改善前后 1 MV 负脉冲电压下绝缘子沿面电场, 沿面切向电场强度降低约 10.3%, 沿面法向电场强度降低约 30%。

表 1 不同状态下支撑绝缘子凹侧电场强度

Table 1 Electric field strength along the concave side of supporting insulators under different states

(kV·cm⁻¹)

| insulator status | E | E_T | E_N | E | E_T | E_N | E_A | E_{TA} | E_{NA} |
|---------------------------|------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|-------------------|----------|----------|
| | outer triple junction points | | | inner triple junction points | | | insulator surface | | |
| | -830 kV, before improvement | 272 | -97 | -268 | 53 | -49 | 17 | 54 | 42.1 |
| -1 MV, before improvement | 326 | -117 | -323 | 64 | -60 | 22 | 64 | 50.2 | 31.5 |
| -1 MV, after improvement | 60 | -59 | 20 | 1 | 0 | -5 | 54 | 45.0 | 22.0 |

改善后 1 MV 微秒脉冲电压下支撑绝缘子凹侧平均矢量电场强度为 54 kV/cm, 最大电场位于沿面倾角处大约为 68 kV/cm, 根据式(1)计算可得电场不均匀系数 f 为 1.2 (小于 2), 绝缘子凹面是稍不均匀电场, 电场强度有了极大的改善。在微秒脉冲电压下的 SF₆ 压缩气体中, 绝缘材料沿面电场强度满足

$$E/p < 25 \quad (2)$$

式中: E 为开关绝缘子沿面电场最大值, 单位 kV/cm; p 为 SF₆ 气压, 单位为 0.1 MPa。沿面闪络的发生概率小于

0.003。改善后 1 MV 微秒脉冲电压下,最大电场位于沿面倾角处,约为 68 kV/cm,气压为 0.5 MPa,根据公式计算为 13.6,小于 25,所以满足设计条件。该支撑绝缘子在 0.5 MPa 的 SF₆ 气体,预计可以在 1 MV 电压下保证绝缘强度,待实验进一步验证。

4 结 论

在 0.5 MPa SF₆ 气体下, Tesla 变压器实验平台次级电压为负极性微秒脉冲电压时,支撑绝缘子沿面闪络特性如下: (1)直径 465 mm,高度 105 mm 的有机玻璃绝缘子初次闪络电压幅值为 827.52 kV,绝缘恢复电压幅值为 760.8 kV; (2)改善后的支撑绝缘子相比较改善前的结构在 1 MV 负极性微秒脉冲电压下,最大矢量电场强度即外筒三结合点的矢量电场强度下降约 81.5%,凹侧外筒与内筒三结合点的法向电场最大值幅值分别降低了 93.8% 和 77.3%,除了三结合点外,切向电场强度平均值降低约 10.3%,法向电场强度平均值降低约 30%; (3)改善前后绝缘子沿面电场不均匀系数从 5.03 下降到 1.20,从极不均匀电场改善为稍不均匀电场,沿面距离增长 11.8%,改善后电场分布满足沿面闪络概率小于 0.003 的经验公式,所以改善后支撑绝缘子预计可以耐受 1 MV 脉冲电压,待实验进一步验证。

参考文献:

- [1] 石磊,朱郁丰,卢彦雷,等. 紧凑Tesla变压器型纳秒脉冲源[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 125001. (Shi Lei, Zhu Yufeng, Lu Yanlei, et al. Compact GW nanosecond pulse generator based on Tesla transformer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 125001)
- [2] 朱庭旺,任晓明,王洪权. 基于Tesla变压器的绝缘子沿面闪络试验[J]. 电力与能源, 2020, 41(1): 44-47. (Zhu Tingwang, Ren Xiaoming, Wang Hongquan. Surface flashover test of insulator based on Tesla transformer[J]. *Power & Energy*, 2020, 41(1): 44-47)
- [3] Zhang Bo, Zhong Jianying, Han Guohui, et al. Modification of HVDC GIS/GIL basin insulators based on electrical and mechanical collaborative design[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2020: 1-5.
- [4] 刘琳,李晓昂,张乔根,等. 沿面电场对GIS绝缘子闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2906-2913. (Liu Lin, Li Xiaoang, Zhang Qiaogen, et al. Effect of electric field along the surface on the flashover voltage of GIS insulators[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(8): 2906-2913)
- [5] 刘琳,李晓昂,张锐,等. 影响GIS支柱绝缘子闪络电压的沿面电场特征参数[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2740-2747. (Liu Lin, Li Xiaoang, Zhang Rui, et al. Characteristic parameters of electric field along the surface affecting the flashover voltage of GIS pillar insulators[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(9): 2740-2747)
- [6] 徐年飞,焦琳,陈炯,等. CF₃I-CO₂混合气体在稍不均匀和极不均匀场中的雷电冲击特性[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 158-164,172. (Xu Nianfei, Jiao Lin, Chen Jiong, et al. Lightning impulse characteristics of CF₃I-CO₂ gas mixtures in quasi-homogeneous and extremely non-uniform electric field[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(10): 158-164,172)
- [7] 全永刚,赵玉柱. 稍不均匀电场中SF₆气体的工程击穿场强[J]. 华通技术, 2005, 24(4): 34-37. (Tong Yonggang, Zhao Yuzhu. Engineering breakthrough field intensity of SF₆ gas in a slightly uneven electrical field[J]. *Huatong Technology*, 2005, 24(4): 34-37)
- [8] 孙楚昱,张国伟,王海洋,等. 纳秒脉冲下SF₆中的沿面闪络特性[J]. 绝缘材料, 2017, 50(4): 51-55. (Sun Chuyu, Zhang Guowei, Wang Haiyang, et al. Surface flashover characteristics in SF₆ gas under nanosecond pulses voltage[J]. *Insulating Materials*, 2017, 50(4): 51-55)
- [9] 朱隽,夏连胜,陈思富,等. 亚微秒脉冲下高梯度绝缘子的沿面闪络特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1449-1452. (Zhu Jun, Xia Liansheng, Chen Sifu, et al. Vacuum surface flashover studies of high gradient insulator under sub-microsecond pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1449-1452)
- [10] 张乔根,顾温国,邱毓昌. 陡波作用下SF₆气体的绝缘特性[J]. 高电压技术, 1996, 22(1): 6-8. (Zhang Qiaogen, Gu Wenguo, Qiu Yuchang. Insulating characteristics of SF₆ under the steep-fronted impulses[J]. *High Voltage Engineering*, 1996, 22(1): 6-8)
- [11] 孙楚昱,王海洋,谢霖,等. SF₆中氧化铝环氧复合材料的纳秒脉冲闪络特性[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 055002. (Sun Chuyu, Wang Haiyang, Xie Linshen, et al. Flashover characteristics of epoxy/Al₂O₃ composite under nanosecond rising pulses in SF₆ gas[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 055002)
- [12] 陈旭良,李俊娜,崔光曦,等. 纳秒脉冲下高压SF₆中同轴绝缘子沿面闪络影响因素实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35: 035003. (Chen Xuliang, Li Junna, Cui Guangxi, et al. Experimental research on influencing factors of surface flashover of coaxial insulators in high-pressure SF₆ under nanosecond pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 035003)
- [13] 贾志杰,张乔根,张斌,等. 直流下SF₆中绝缘子的闪络特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1903-1907. (Jia Zhijie, Zhang Qiaogen, Zhang Bin, et al. Flashover characteristic along the insulator under DC voltage in SF₆ gas[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(8): 1903-1907)
- [14] 林莘,李鑫涛,徐建源,等. 均匀电场下SF₆气体击穿电压的数值计算及光谱实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 301-309. (Lin Xin, Li Xintao, Xu Jianyuan, et al. Research on numerical computation of SF₆ breakdown voltages and spectral experiment in uniform electric fields[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1): 301-309)
- [15] 刘亚芳,邱毓昌. 利用优异值预测SF₆装置的绝缘强度[J]. 高压电器, 1990(1): 3-8. (Liu Yafang, Qiu Yuchang. The prediction of the dielectric strength of gas insulated apparatus with figure-of-merit[J]. *High Voltage Apparatus*, 1990(1): 3-8)