

自适应型均压真空灭弧室电热场设计与优化

董智¹, 吴豫¹, 钱海涛², 潘震², 李文博²

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000; 2. 中国电建集团河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450000)

摘要: 随着“中国制造 2025”中的“创新驱动、绿色发展”的提出, 高压电力开关逐步向智能化、环保化方向演进。真空断路器相对 SF₆ 断路器, 绝缘介质和灭弧介质对环境友好, 是断路器未来发展的方向。多个真空断口串联避免了单断口真空断路器的饱和效应, 将真空断路器推向更高的电压等级, 多断口断路器核心技术难题是均压配置, 传统均压措施并联的均压电容需要空间大, 不能满足电力系统小型化、智能化建设需要。针对上述问题, 提出了一种自适应型均压真空灭弧室结构, 对新结构进行电热场仿真计算, 为未来样机研制提供理论依据。

关键词: 自适应型均压真空灭弧室; 真空断路器; 电场仿真; 热场仿真

Design and optimization of electric field of self-adaptive voltage equalizing vacuum interrupter

DONG Zhi¹, WU Yu¹, QIAN Haitao², PAN Zhen², LI Wenbo²

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 2. China Power Construction Group Henan Electric Power Survey and Design Institute, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: With the proposal of “innovation driven and green development” in made in China 2025, high-voltage power switches are gradually moving towards intelligence and environmental protection. Compared with SF₆ circuit breaker, the insulation medium and arc extinguishing medium of vacuum circuit breaker are environmentally friendly, which is the future development direction of circuit breaker. The series connection of multiple vacuum breaks avoids the saturation effect of the single break vacuum circuit breaker and pushes the vacuum circuit breaker to a higher voltage level. The core technical problem of the multi break circuit breaker is the voltage sharing configuration. The voltage sharing capacitor in parallel with the traditional voltage sharing measures needs a large space, which can not meet the needs of the miniaturization and intelligent construction of the power system. In view of the above problems, an adaptive voltage sharing vacuum interrupter structure is proposed in this paper, The electric field simulation calculation of the new structure provides a theoretical basis for the future prototype development.

Key words: adaptive voltage equalizing vacuum interrupter; vacuum circuit breaker; electric field simulation; thermal field simulation

0 引言

目前广泛应用于电力装备的 SF₆ 气体具有极强的温室效应, 2060 年中国“碳中和”目标及《京都议定书》等都提出限制其使用^[1-2]。近年

来, 真空断路器以其优秀的绝缘灭弧能力、低碳环保、方便维护以及寿命长久等优点在中压配电领域得到广泛应用^[3-4]。真空断路器作为电力系统稳定运行和故障保护的重要装置, 真空介质的

饱和特性使单断口无法向较高电压等级发展,而多断口串联的关键技术问题为断口均压配置^[5-6]。

多断口真空短路最为常用的均压措施为在断口间并联均压电容元件,均压电容大小在 $500 \sim 3900 \text{ pF}$ 之间为宜^[7-8]。磁场调控也是较为常见的均压措施,双断口断路器通过在高低压侧施加不同类型磁场减弱弧后电流的影响,从而平衡断口间的电压分布^[9-10]。这些传统均压措施需要在真空灭弧室外侧增加电气元件,增大绝缘需求空间,而这又会导致真空断路器体积增大,不能满足电力系统对于设备小型化、智能化建设需要。现如今,紧凑型均压设计有屏蔽罩均压方式、自均压方式^[11]。屏蔽罩均压方式构建的均压电容值较小,不能满足断路器对消除断口间分布杂散电容的均压需求^[12]。自均压方式将均压电容与真空灭弧室整体集成,而这又将在真空灭弧室外侧增加电气零件,同时增加真空灭弧室均压成本^[13-14]。不同类型灭弧室串联的均压方式在一定程度上可对双断口真空断路器电压分布进行调控,但无法应用于多断口串联方式^[15]。

针对上述缺陷,本文提出了一种自适应型均压真空灭弧室,不仅能够满足多个断口串联断路器的均压控制,还实现了更优的均压配置,显著提升了灭弧室的使用寿命和断路器的整机开断性能。

1 自适应型真空灭弧室结构及工作原理

商用真空灭弧室结构如图1a所示,自适应型灭弧室在商用真空灭弧室的基础上,将真空灭弧室的陶瓷外壳换为相对介电常数较高的陶瓷材料。该材料在密封真空灭弧室作为真空灭弧室断口间均压电容。并联均压电容的真空灭弧室结构如图1b所示,其占用空间较大。

此真空灭弧室结构的自适应型体现为均压电容的容值,可由选取不同相对介电常数的外壳铸造材料确定,均压电容的外壳厚度根据原商用真空灭弧室陶瓷外壳厚度确定。均压电容代替原真空灭弧室陶瓷外壳,使真空断路器的均压单元完全不占用真空灭弧室外侧空间。并联均压电容和

自适应型灭弧室构成的多断口真空断路器简化等效电路如图2所示。

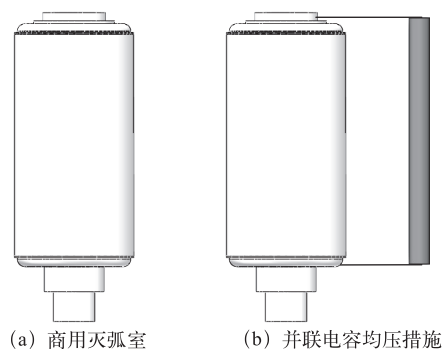


图1 并联均压电容模型

Fig. 1 Model diagram of parallel balancing capacitors

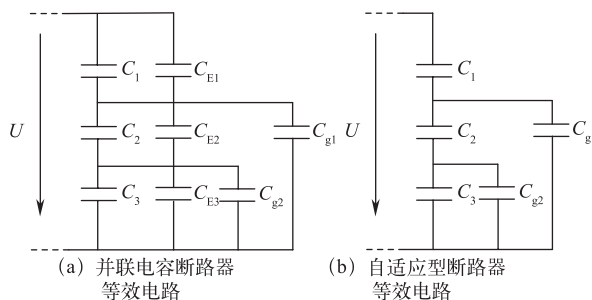


图2 断路器等值电路

Fig. 2 Circuit breaker equivalent circuit

2 自适应型灭弧室电热场仿真计算与优化

对自适应型灭弧室进行电热场优化计算,通过改变自适应均压电容的厚度,确定自适应型灭弧室最优配置策略。自适应型灭弧室模型如图3所示,模型中省略了波纹管及其相关零件。

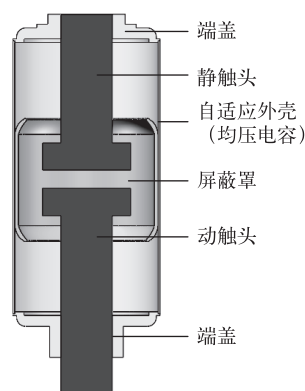


图3 自适应型灭弧室模型图

Fig. 3 Model diagram of adaptive arc interrupter

2.1 灭弧室最大场强优化

仿真模型参照宝光TD24-12/630-20D绘制，运用COMSOL静电场仿真模块，灭弧室静触头端施加12 kV额定电压，设置动触头及动触头所对空气域远端接地，在初始模型自适应均压电容厚度为1 mm时，得到自适应型灭弧室与商用灭弧室电场仿真对比，如图4所示。

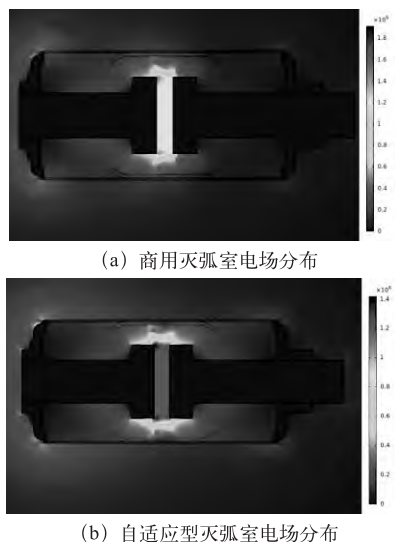


图4 商用与自适应型灭弧室电场对比

Fig. 4 Comparison of electric field between commercial and adaptive arc chute

由图4可知，自适应型灭弧室电场分布相比于商用灭弧室，电场强度最大值区域位于触头边缘处，两触头间存在电场畸变点，且最大场强为1 912 kV/m，自适应动触头与静触头之间电场分布较为均匀，电场强度高于1 000 kV/m的区域均在两触头平面之间，最大电场强度为1 418 kV/m。自适应型灭弧室较商用灭弧室最大电场强度降低494 kV/m，改善了灭弧室内部电场分布。对均压电容厚度自1 mm开始，间隔步长为2~9 mm时进行静电场仿真计算。电场分析时计算灭弧室最大电场和自适应均压电容外侧表面电场强度。改变自适应外壳厚度时，灭弧室电场整体分布规律没有发生变化，比较最大电场强度及自适应外壳表面电场分布，可对自适应外壳进行电场优化设计。自适应外壳厚度在1~9 mm变化时，灭弧室最大场强变化规律如图5所示。

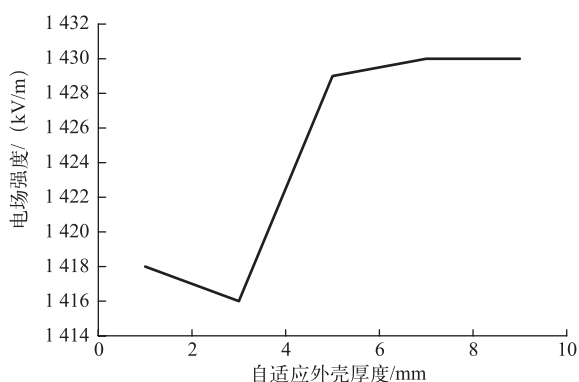


图5 灭弧室最大场强随外壳厚度变化规律

Fig. 5 Variation of the maximum field strength of the arc extinguishing chamber with the thickness of the shell

由图5可知，自适应型灭弧室最大电场强度随自适应外壳厚度的增加呈现先减小后增大的趋势，在外壳厚度为3 mm时，其内部最大电场强度最小，最大场强为1 416 kV/m。

2.2 灭弧室自适应外壳沿面电场优化

经上述仿真计算，通过对比自适应型灭弧室最大电场，确定了自适应外壳选择范围，对自适应灭弧室内部电场进行了优化设计。本节对自适应型灭弧室外侧，即自适应外壳表面进行优化，以优化自适应型灭弧室外侧电场分布。自适应外壳厚度为1 mm时，自适应型灭弧室与商用灭弧室外壳表面电场沿静触头高压端至动触头接地端分布对比如图6所示。

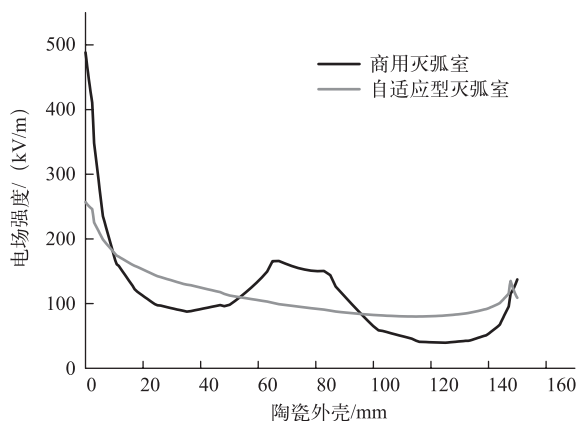


图6 商用与自适应灭弧室外壳表面电场分布

Fig. 6 Surface electric field distribution of commercial and adaptive arc chute housing

由图6可知，自适应型灭弧室相较于商用灭

弧室陶瓷外壳表面电场分布较为均匀。商用灭弧室电场强度为488 kV/m, 自适应型灭弧室电场强度为257 kV/m, 自适应型灭弧室外壳最大值较商用灭弧室降低231 kV/m, 降低为商用灭弧室的52.66%。自适应型灭弧室有效减小了外壳表面的最大电场。自适应外壳厚度在1~9 mm变化时, 自适应外壳表面最大电场强度变化规律如图7所示。

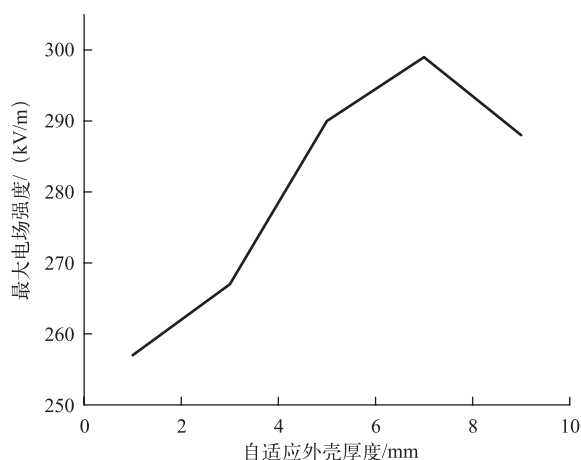


图7 外壳最大场强随外壳厚度变化规律

Fig. 7 Variation of the maximum field strength of the casing with the thickness of the casing

由图7可知, 随着自适应型外壳厚度的增加, 自适应外壳表面最大电场强度在1~7 mm之间变化时, 电场强度逐渐增大; 在7~9 mm之间变化时, 电场强度逐渐减小。1 mm时电场强度最小为257 kV/m。

2.3 自适应型灭弧室热场优化

热场使用薄层电阻法模拟接触电阻, 使用COMSOL电热场耦合模块, 根据国标施加1.1倍额定电流, 分别得到商用灭弧室和自适应型灭弧室温度场分布结果, 因两者仅外壳相对介电常数不同, 故温度场分布结果完全相同, 如图8所示。

对均压电容厚度自1 mm开始, 间隔步长为2~9 mm时进行热场仿真计算。计算灭弧室最高温度, 比较不同自适应电容厚度对自适应型灭弧室的影响规律。最高温度随外壳厚度变化规律如图9所示。



图8 温度场分布图

Fig. 8 Temperature field distribution

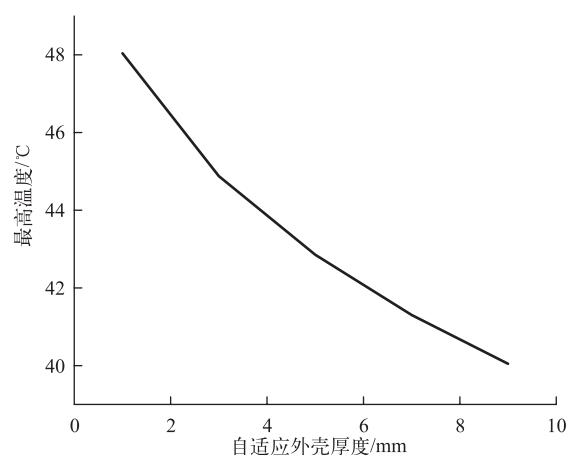


图9 最高温度随外壳厚度变化规律

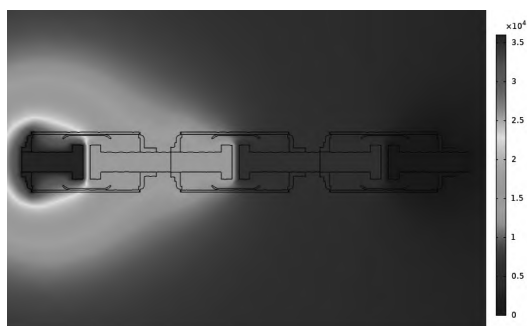
Fig. 9 Variation of maximum temperature with shell thickness

自适应型灭弧室最高温度随着外壳厚度的增大而增大, 变化率逐渐减小。综上所述, 结合电热场仿真结果和未来样机制作难度, 确定自适应型灭弧室自适应外壳厚度为3 mm。

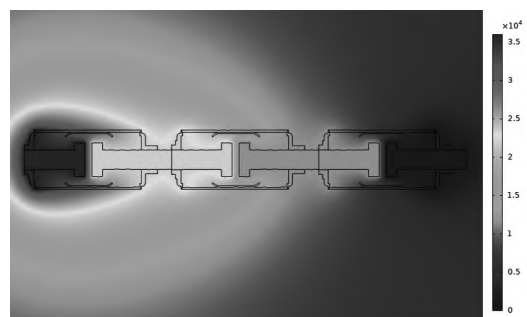
3 多断口断路器电场仿真分析

将三个上述自适应型灭弧室串联构成的多断口真空断路器左侧施加36 kV电压励磁, 右侧设置接地。电动势分布如图10所示, 电场分布如图11所示, 各断口承担电压分布如图12所示。

商用真空灭弧室串联后, 电场强度最大值为2 773 kV/m; 自适应型灭弧室串联后, 电场强度最大值为1 482 kV/m, 最大场强降低了1 291 kV/m, 各断口间电场分布较为均匀。商用灭弧室串联后, 从高压侧至接地侧断口承担电压分别为21.701 kV、8.152 kV和6.147 kV, 各断口电压分布极其不均匀, 高压侧承担了60.28%的额定电压。自适应型灭弧室串联后, 从高压侧至接地



(a) 商用灭弧室串联构成断路器电动势分布



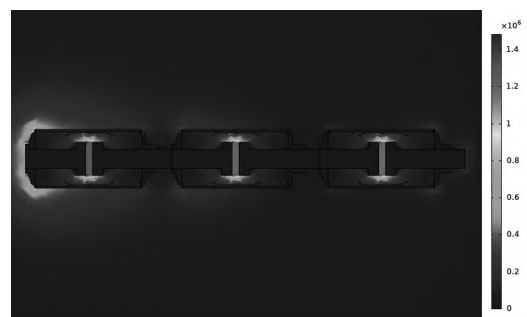
(b) 自适应型灭弧室串联构成断路器电动势分布

图 10 电动势分布图

Fig. 10 Potential distribution diagram



(a) 商用灭弧室串联构成断路器电场分布



(b) 自适应型灭弧室串联构成断路器电场分布

图 11 电场分布图

Fig. 11 Electric field distribution diagram

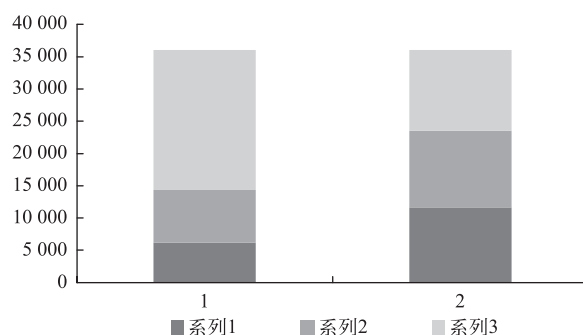


图 12 各断口电压分布

Fig. 12 Voltage distribution of each fracture

侧断口承担电压分别为12.531 kV、11.834 kV和11.635 kV，各断口承受的电压较为均匀，分压比为34.8%：32.9%：32.3%，自适应型灭弧室可以实现断口间的自适应均压效果。这是因为商用灭弧室各断口间电场分布呈梯度变化，距离高压侧越近，承担电压越高；距离低压侧越近，承担电压越低。这种分布会导致距离高压侧的断口长期承担较高的电压分布，显著增加该断口绝缘裂化速度，进而影响整机性能。而自适应型灭弧室更好地实现了断口间的自适应均压效果，使得各个断口间的电压分布更加均匀，显著降低了距离高压侧最近的断口所承担的电压分布，使整机开断性能更加安全稳定。

4 结束语

面向国家电网智能化、小型化的建设需求，本文设计了一种自适应型均压真空灭弧室结构，实现了更优的均压配置，显著提升了灭弧室的使用寿命和整体性能。

1) 自适应型体现为均压电容代替原灭弧室的陶瓷外壳，根据串联后应用背景，选取不同相对介电常数的陶瓷材料，满足断口间均压需求；同时针对不同型号的真空灭弧室，可选用不同厚度的自均压外壳使均压电容与灭弧室集成。

2) 针对宝光TD24-12/630-20D型真空灭弧室，自适应外壳选择3 mm，自适应型灭弧室外壳较商用灭弧室最大电场强度降低494 kV/m，改善了灭弧室内电场分布，自适应型灭弧室外壳最大值较商用灭弧室降低231 kV/m，降低为商用

灭弧室的52.66%。

3) 自适应型灭弧室串联后, 最大场强降低了1 291 kV/m, 各断口承受的电压较为均匀, 分压比为34.8%: 32.9%: 32.3%, 自适应型灭弧室可以实现断口间的自适应均压效果。

参考文献

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 于庆友. “碳中和”背景下数据中心的运维与管理[J]. 电气应用, 2021, 40(9): 4-6.
- [3] 黄翀阳, 刘晓明, 曹云东, 等. 双断口直流真空断路器非同期开断电弧特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3480-3490.
- [4] 舒胜文, 阮江军, 黄道春, 等. 双断口真空断路器开断特性的试验与仿真研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2381-2388.
- [5] 程显, 杜帅, 葛国伟, 等. 环保型罐式多断口真空断路器均压配置研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3154-3162.
- [6] 钟希均, 刘波, 万德春. 126 kV三断口真空断路器容性选相关合仿真研究[J]. 电气应用, 2017, 36(9): 58-64.
- [7] 刘彬, 刘国伟, 许元震, 等. 超多断口500 kV快速隔离开关均压设计及试验[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2459-2464.
- [8] 张震锋, 阮艳丽, 惠伟. 基于工程应用的断路器动态气流场计算及其试验验证[J]. 电气应用, 2018, 37(9): 33-37.
- [9] 葛国伟. 多断口真空断路器串联电弧的协同及调控特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [10] 葛国伟, 程显, 谢伟, 等. 串联真空开关磁场调控对动态电压分布影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 7089-7097, 7143.
- [11] GIERE S, KARNER H C, KNOBLOCH H. Dielectric strength of double and single-break vacuum interrupters: experiments with real HV demonstration bottles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2001, 8(1): 43-47.
- [12] GAUDART G. New grading capacitor principle for high voltage circuit breaker[C]. CIGRE, Paris, France, 2010: 1-7.
- [13] 程显, 李鑫, 葛国伟, 等. 串联用一体化自均压真空灭弧室绝缘配置与优化[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 820-828.
- [14] 葛国伟, 程显, 李鑫, 等. 串联专用自均压真空灭弧室探讨[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1618-1625.
- [15] 廖敏夫, 卢刚, 葛国伟, 等. 不同灭弧室串联的双断口真空断路器分压特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 112-118.

作者简介

董智(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 电网规划和电力系统分析。

(收稿日期: 2022-12-15)