

[断路器]

420 kV/63 kA 自能式断路器近区故障开断性能提升研究

文/左 琪 李沅格 杨姣龙 骆常璐
河南平芝高压开关有限公司

针对电力系统短路电流水平不断升高的现象，开展420 kV/63 kA方案设计，建立420 kV/63 kA自能式灭弧室的电弧开断模型，针对近区故障导致断路器电弧难以熄灭的现象，进行420 kV/63 kA近区故障开断过程的仿真计算分析。针对不同形状膨胀室对灭弧室开断性能的影响进行了分析研究，为后续更高电压等级和电流水平的自能式灭弧室的设计奠定了基础。

随着电力系统短路电流水平不断提升，断路器作为电力系统开断短路电流的主要设备，对其开断性能提出了新的要求。对于420 kV电压等级的SF₆断路器，在满足开断性能的情况下，要提升其短路电流水平，需要攻克触头烧蚀、结构改进等难题。

自能式灭弧技术通过利用断路器开断时产生电弧自身的能量来加热膨胀室中的气体，提升膨胀室整体气压水平。由于气压水平不同，膨胀室与喷口尾部形成合适的压力差，在压力差的驱使下，喷口喉径处形成高速气流体，与电弧发生强烈的能量交换，在喷出喷口的同时带走大量能量，使电流过零时断口间温度较低，建立起有效绝缘，及时熄灭电弧。整个过程中，膨胀室气压主要通过电弧能量建立，在消耗断路器电弧能量的同时，有效降低操作机构所需操作功。在断路器中采用自能式灭弧技术，不仅是解决燃弧问题的有效手段，也是提升断路器整体开断性能的有效手段。

本文建立了电弧仿真计算模型，通过模拟灭弧室实际短路电流开断工况，得到不同燃弧时刻灭弧室的压力、温度和速度参数以及电流过零时刻熄弧环境，为

断路器开断性能评估提供了有效手段。通过对420 kV自能式灭弧室进行L90近区故障开断试验，对灭弧单元膨胀室体积、形状、喉部直径和长度进行设计改进，并对仿真结果进行对比分析和性能评估。

断路器开断过程仿真模型

电弧开断过程中，等离子体受到湍流、辐射、烧蚀、焦耳热和洛伦兹力等多因素影响，特性在数百纳秒内发生剧烈变化，且处于高温、高电压、强电磁干扰、超音速气流和超强机械冲击的环境中，因此开断过程极为复杂。

为了模拟断路器电弧开断过程，建立了电弧开断数学模型

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{V}) - \nabla \cdot (\Gamma_{\phi}\nabla\phi) = S_{\phi} \quad (1)$$

式中， ϕ 为要求解的变量； ρ 为电弧介质密度； $\vec{V}$ 为速度（可以分解为气体轴向速度分量 w 和径向速度分量 v ）。

在断路器开断型式试验中，L90近区故障试验是对断路器开断性能考核最苛刻的试验。因此，研发设计时，需要首先保证断路器开断性能满足L90

基金项目：面向国际市场的低成本420 kV GCB开发 (PGKJ2018-111)

试验条件。

为使电弧顺利熄灭，在电流过零时刻，灭弧室压气缸和喷口上游、喉部和下游区域气体需存在较大的梯度压力差，确保在电流过零时刻及之后的几十微秒内，动弧触头和静弧触头之间形成强烈的气流，从而保证断路器具备较强的灭弧能力。

在现有420 kV/50 kA灭弧单元原有结构的基础上，进行420 kV/63 kA灭弧单元优化结构设计。根据自能式灭弧技术电弧熄灭原理，重点对灭弧单元的喉部直径、喉部长度、膨胀室体积及膨胀室形状进行设计改进。63 kA灭弧单元方案的模型如图1所示，模型关键参数见表1。原结构压气室和膨胀室体积分别为4.5 L和1.6 L，优化方案结构压气室和膨胀室体积分别为5.4 L和1.4 L。在断路器开断仿真分析中重点关注压气室、膨胀室，以及喷口上游、喉部和下游的压力变化情况。

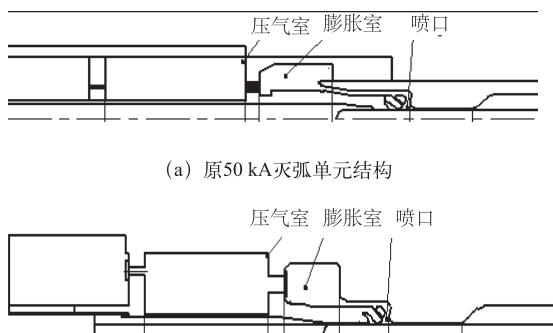


图1 420 kV自能式灭弧室仿真模型

表1 灭弧室仿真模型关键参数 (单位: L)

方案	压气室体积/L	膨胀室体积/L
原结构	4.5	1.6
优化方案	5.4	1.4

建立63 kA L90工况的仿真电流曲线，电流值为56.7 kA，输入相同的行程曲线，行程为180 mm；分闸速度8 m/s（刚分点后10 ms），如图2、图3所示。

本文建立了63 kA灭弧单元优化结构的仿真模型，对L90开断试验的工况进行仿真计算，获得燃弧过程中灭弧室不同位置的压力变化特性曲线；对开断工况下灭弧室气流场特性进行分析，根据计算得到了电流过零时刻气流场状态量，并对两种结构条件下断路器的开断性能进行评估。

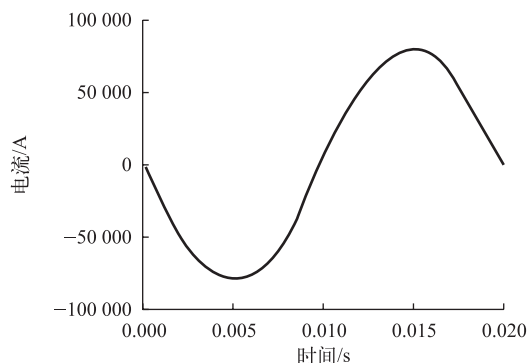


图2 仿真输入电流曲线

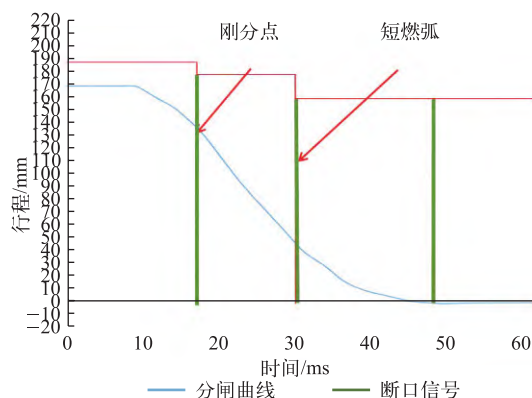


图3 仿真输入运动行程曲线

膨胀室的压力变化

断路器灭弧室设计时，为了使电弧熄灭，在电流过零时刻需要在灭弧室的压气室、喷口上游、喉部和下游之间建立较大的梯度压力差，以确保电流过零时刻及之后的几十微秒内，动弧触头和静弧触头之间区域形成强烈的气流，从而确保断路器具备较强的开断性能。膨胀室气体压力曲线如图4所示，压力值见表2。

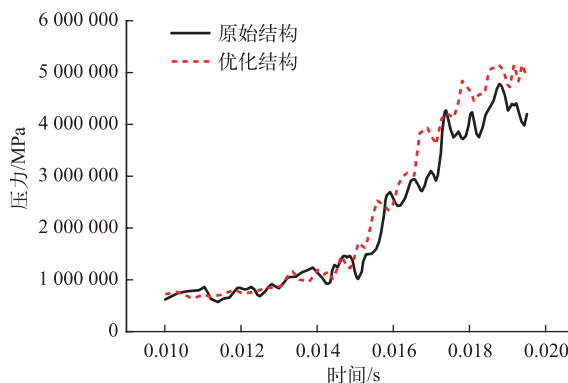


图4 膨胀室气体压力变化曲线

表2 膨胀室过零时刻的压力值

时刻/ms	原结构压力/ MPa	提升后压力/ MPa	提升 (%)
燃弧12	4.53	5.16	14

由表2可知，当仿真输入条件（行程曲线、电流曲线）相同时，在喷口喉径和喷口直线段长度相同的情况下，将膨胀室的体积缩小12.5%，膨胀室压力水平提升了14%，灭弧断口梯度压力差更大，气吹能力得到提高，有利于电弧的熄灭，提升了断路器的开断性能。

在断路器灭弧室设计时，相比于原结构，优化方案通过增大膨胀室的直径和缩短膨胀室的轴向长度来减小膨胀室体积，同时对膨胀室的内部形状进行了修改，优化膨胀室圆弧角，使其内部气体充分混合，降低膨胀室温度。

通过优化膨胀室结构和减小膨胀室体积，使膨胀室内部气体混合更加充分，优化方案喷口气体入口区域的低温区明显多于原结构入口处的低温区。

在电流过零前的几十微秒内，电弧极细且周边充斥着大量温度低于3 000 K的SF₆气体，通过湍流换热，电弧能量得到耗散，温度快速下降，有利于断路器开断性能的提升。

如图5所示，优化方案和原结构的温度变化曲线相似，说明开断过程具有一致性，但优化方案温度曲线明显低于原结构温度曲线，说明优化方案能有效降低电弧温度。原结构在断口中部存在超过10 000 K的高温区域，对断口间的介质恢复强度产生不良影响，导致开断性能下降，而优化方案中未见超过10 000 K的高温区域，说明优化方案开断性能更好。

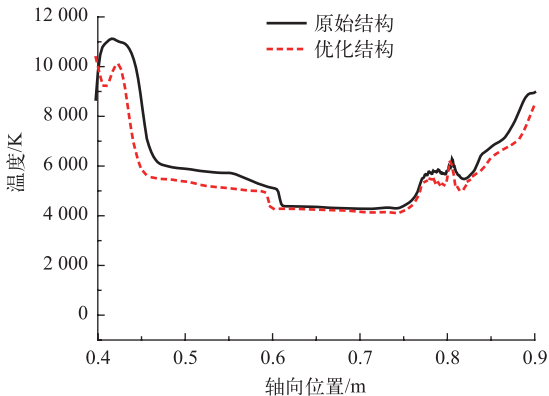


图5 电流过零时刻轴线上断口间电弧温度曲线

电流过零时刻灭弧室的电弧电阻变化

当电弧电流接近零点时，电弧输入能量急剧下降，触头之间的电弧电阻迅速上升。在弧后阶段，瞬态恢复电压加在触头上，触头间隙仍保持在导体状态，会产生少量电流。当输入能量超过耗散能量时将发生热击穿，电弧重燃，开断失败。

通过大量产品试验和对电流零区的测量研究，目前提出将电流过零前100 ns时的电弧电阻值作为断路器热开断性能的判断指标。当断路器开断时，电弧电流越大，则电弧的温度越高，电弧内部带电气体运动越强烈，导电性越强，电弧电阻越低，断路器开断越困难。反之，在开断电流过零前100 ns时的电弧电阻值越大，在电流过零时断口绝缘越容易恢复。

电流过零前100 ns时刻，灭弧单元膨胀室电阻值见表3，在长、中、短三种燃弧试验中，优化方案电弧电阻均大于原结构电弧电阻，说明优化方案在电流过零时刻绝缘更易恢复。

表3 电流过零时刻的灭弧单元膨胀室电阻值

电弧电阻R-100	原结构电弧电阻/ Ω	优化方案电弧电阻/ Ω
短燃弧12 ms	1 862	3 051
中燃弧16.3 ms	3 452	4 083
长燃弧20.8 ms	5 362	6 126

当燃弧时间不同时，对原结构和优化方案开断时的电弧电阻进行对比。如图6所示，随着燃弧时间接近电流过零点，电弧电阻值不断提升，在达到过零点前100 ns时刻，优化方案电弧电阻值均大于原结构电弧电阻值，说明优化结构比原结构的断路器更容易开断，避免了L90开断试验中热击穿情况的发生。

膨胀室喉部直线段长度的对比分析

在优化方案的基础上，开展喷口喉部长度对灭弧单元膨胀室压力和温度影响的研究，对喷口喉部长度为55 mm、65 mm、75 mm、85 mm和95 mm的五种结构进行仿真计算，重点关注灭弧单元膨胀室压力变化和温度变化，进一步提升灭弧单元的开断性能。

如图7所示，随着喷口喉部直线段长度的增大，膨胀室压力也增大，喷口喉部直线段长度为95 mm时，膨胀室内压力达峰值最大。喷口喉部直

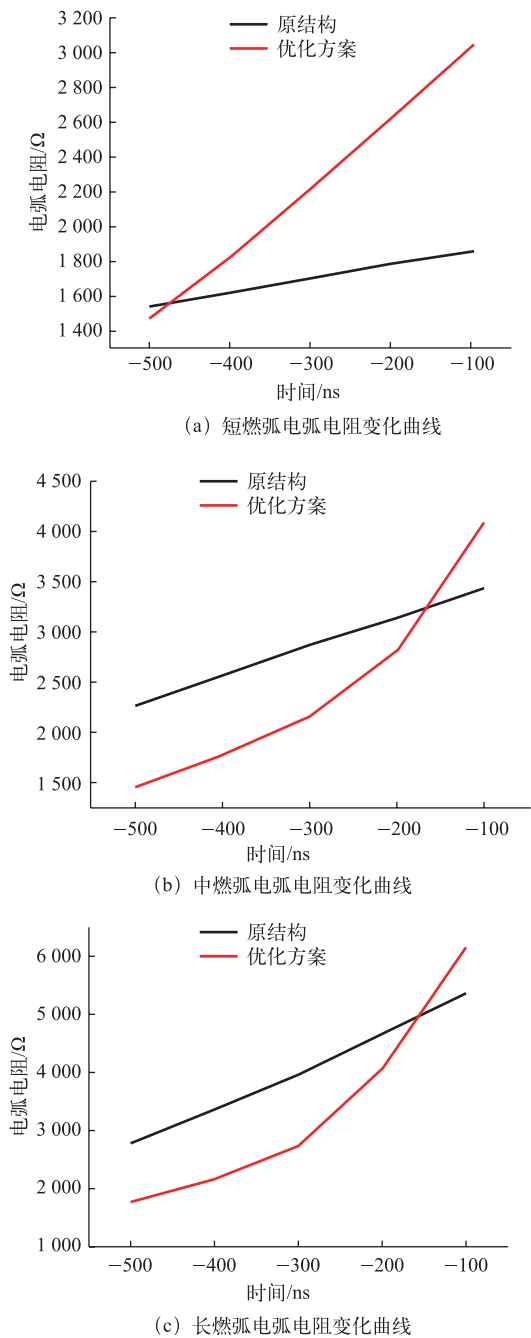


图6 电流过零时前电弧电阻变化曲线

线段长度越长, 喷口打开的时间越晚, 喷口喉部的烧蚀产气量越大, 膨胀室压力越大。

在电流过零前时刻, 对比了喷口直线段长度为85 mm和95 mm的两种方案的膨胀室温度变化。喷口喉部直线段长度85 mm方案的膨胀室整体温度明显高于95 mm方案膨胀室整体温度。在工况允许范围内, 喷口喉部直线段长度越长, 膨胀室整体温度越低, 电弧中心的温度越低, 开断性能越好。

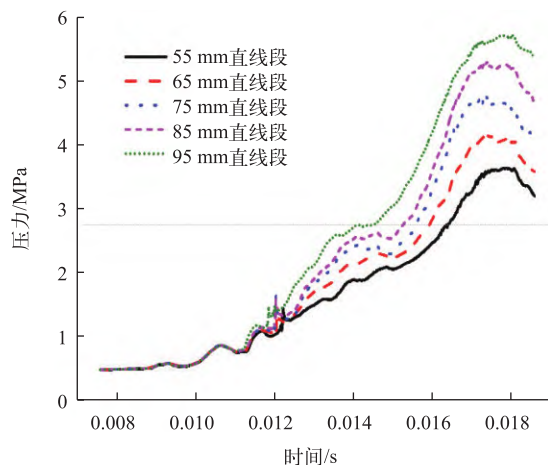


图7 不同喷口喉颈直线段长度下膨胀室压力

结束语

本文基于电弧开断数学模型建立了420 kV/50 kA原始结构和63 kA优化结构两种SF₆断路器开断过程仿真模型。针对420 kV断路器短路开断电流63 kA的L90开断工况, 在相同仿真输入条件下对电弧开断过程进行仿真, 获得压力、温度和电弧电阻等关键气流场参量, 通过参量对比分析提出了63 kA的结构优化方案。

针对63 kA优化方案, 开展了相同喉径不同直线长度电弧开断过程下的仿真计算, 得到膨胀室的压力及温度等关键气流场参量。

通过仿真分析得出, 在原有50 kA结构的基础上, 减小膨胀室体积, 修改膨胀室形状, 增加喷口喉径直线段长度, 在电流过零时刻, 膨胀室压气缸压力较高, 电弧半径较小, 电弧中心温度较低, 具备较强的开断性能。EA

(收稿日期: 2023-08-18)

参考文献

- [1] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 246-248.
- [2] 钟建英, 陈刚, 谭盛武. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2769-2782.
- [3] 王昱婷, 郑馨怡, 马斌. 110 kV断路器控制回路存在问题分析及改造[J]. 电气应用, 2021, 40(11): 50-55.