

7-24-2022

Simulation study on affecting factors of the fuse working performance under 8/20 μ s lightning current

Guoqing WANG

Guangzhou Power Supply Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China

Jun XIONG

Guangzhou Power Supply Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China

Xianan JIAO

Guangzhou Power Supply Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China

Boyong LIN

Guangzhou Power Supply Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China

Chun LIU

State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

WANG, Guoqing; XIONG, Jun; JIAO, Xianan; LIN, Boyong; LIU, Chun; and ZHANG, Yan (2022) "Simulation study on affecting factors of the fuse working performance under 8/20 μ s lightning current," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 37: Iss. 3, Article 18.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.018

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol37/iss3/18>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

Simulation study on affecting factors of the fuse working performance under 8/20 μ s lightning current

Authors

Guoqing WANG, Jun XIONG, Xianan JIAO, Boyong LIN, Chun LIU, and Yan ZHANG

8/20 μs 雷电流作用下熔断器工作性能 影响因素仿真研究

王国庆¹, 熊俊¹, 焦夏男¹, 林博勇¹, 刘春², 张琰²

(1. 中国南方电网广州供电局有限公司, 广东 广州 510620; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要:通过对熔断器熔体在 8/20 μs 雷电流作用下温升过程数学模型的推导及分析, 认为熔体材料热传导系数、常温电阻率、环境温度及熔体异常断裂均有可能影响熔体温升过程, 进而影响熔断器工作性能。在对某熔断器熔体结构进行合理简化, 并针对实际情况提出相关假设的基础上, 利用 Ansys 有限元软件建立熔体热电耦合有限元模型, 对正常熔体及受上述 4 种因素影响熔体在不同雷电流幅值作用下温升情况进行了仿真, 得到了不同情况下熔断器的雷电流幅值—弧前时间特性曲线。由仿真结果可知, 这 4 种影响因素均会影响雷电流作用下熔体温升速度, 进而影响熔体温升过程, 从而改变熔断器在雷电流幅值作用下的弧前时间, 可能造成熔断器发生熔断, 导致熔断器工作性能下降。最后通过对仿真结果的分析比较, 提出 4 种保障熔断器安全正常运行的措施。

关 键 词:8/20 μs 雷电流; 熔断器; 温升; 工作性能; 措施

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.018 中图分类号:TM563 文章编号:1673-9140(2022)03-0149-08

Simulation study on affecting factors of the fuse working performance under 8/20 μs lightning current

WANG Guoqing¹, XIONG Jun¹, JIAO Xianan¹, LIN Boyong¹, LIU Chun², ZHANG Yan²

(1. Guangzhou Power Supply Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Through derivation and analysis on mathematical model of the temperature rise process of fuse melt under 8/20 μs lightning current, it is considered that the thermal conductivity of melt material, the normal temperature resistivity, the ambient temperature and the abnormal fracture of melt may affect the temperature rise process of fuse melt and then affect its working performance. On the basis of reasonably simplifying the melt structure of a fuse and putting forward relevant assumptions according to the actual situation, the melt thermoelectric coupling finite element model is established by using ANSYS, and the temperature rise of normal melt and melt affected by the above four factors under different lightning current amplitudes is simulated. The characteristic curves of lightning current amplitude-pre arc time of fuse are obtained. It is shown that these four factors will affect the melt temperature rise speed

收稿日期:2020-10-12; 修回日期:2020-12-30

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(GZHKJXM20180142)

通信作者:刘春(1971-),男,博士,副教授,主要从事智能电器、电器在线检测与监测技术研究;E-mail:tslc@hust.edu.cn

under the action of lightning current, and then affect the melt temperature rise process and the fuse pre arc time, which may cause the fuse to melt and reduce the working performance. Finally, through the comparison of simulation results, four measures to ensure the safe and normal operation of fuse are put forward.

Key words: 8/20 μs lightning current; current-limiting fuse; temperature rise; working performance

熔断器串联在电路中作为过载电流或短路电流保护元件,具有结构简单、动作安全可靠、分断电路快、价格低廉、具有限流能力等优点^[1-2],因此,人们对熔断器开展了深入研究。文献[3-9]通过熔断器弧前过程数学模型,建立了熔断器熔体有限元仿真模型。由于短路电流下熔断器动作时间较快,因此假设熔体熔断过程为绝热过程,熔体达到熔化温度(熔点)时间定义为熔断器弧前时间,通过仿真得到短路电流作用下的熔断器弧前时间—电流特性曲线;文献[10]通过有限元计算软件建立熔断器三维仿真模型,计算得到其温度变化情况和弧前时间—电流曲线,该曲线与厂家提供的弧前时间—电流特性曲线很吻合,证明了仿真模型的正确性,并将该模型应用于 ATP-EMTP 过电压仿真电路中,计算得到了熔断器的开断电压;文献[11-12]提出了一种计算熔体温度随电流变化的数学模型,引入了热交换系数的概念,并利用 Ansys 软件对熔体温度随电流的变化情况进行了仿真,仿真结果表明该模型能够精确地反应熔体与周围介质的热交换情况,使得熔体在低倍数额定电流条件下的熔断时间与实际情况熔断时间误差小于 6%;文献[13]利用 Ansys 软件,对熔断器熔体进行建模,分析了短路电流时间上升率对熔断器弧前过程的影响,并设计了一个脉冲电流放电实验电路,得到不同电流上升率的脉冲电流作用下熔体的弧前时间,对仿真结果进行了验证。目前针对熔断器的研究大多集中于熔断器弧前温升过程,且多为工频短路电流或过载电流作用下对熔体进行弧前时间电流特性仿真,对雷电流作用下熔体的温升过程的研究少有报道。但在实际运行中,雷击将导致雷电流沿输电线路侵入电力系统,从而流经熔断器。若熔体材料本身参数变化或环境温度变化对熔体在雷电流作用下的温升有较大影响,则会影响熔断器在雷电流作用下的工作性能,从而影响电力系统的安全稳定运行。因此有必要对雷电流作用下熔断器工作性能的影响因素进行研究。

本文首先通过对熔体在 8/20 μs 雷电流作用下温升过程数学模型的推导与分析,得到影响熔体温升过程的影响因素。其次在合理简化与假设的基础上,利用 Ansys 软件建立熔体热电耦合模型,对正常工作熔体与受影响因素影响熔体在不同雷电流幅值作用下的温升情况进行仿真,得到不同条件下熔体弧前时间—电流曲线。通过大量仿真得出不同影响因素对熔体温升过程影响的一般规律。最后通过对仿真结果的分析,提出保障熔断器安全正常运行的相关措施。

1 熔体温升过程数学模型分析与计算

熔断器在工作过程中的温升过程是电流场与温度场相互耦合的过程^[14-15],因此熔体温升过程与电流场作用时间存在密切关系。由于雷电流作用时间短,电流幅值高,因此可以认为熔体温升过程为绝热过程,通流期间产生的热量只在熔体之间传导^[8]。

熔体电阻的计算公式为

$$R = \frac{\rho(T)}{S_0} l \quad (1)$$

式中 l 为熔体长度; S_0 为电流流经熔体截面积; $\rho(T)$ 为熔体金属电阻率,与温度 T 有关,即

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + a(T - T_0)] \quad (2)$$

式中 T_0 为环境温度; ρ_0 为温度 T_0 下金属电阻率; a 为电阻温度系数,可以取固定值^[8,15]; T 为熔体温度。时间 dt 内熔体吸收热量的计算公式为

$$dQ = cm dT \quad (3)$$

式中 c 为熔体金属比热容; m 为熔体的质量; dT 为在时间 dt 内熔体的温升。

时间 dt 内通过电流产生热量 dQ_1 与熔体之间交换热量 dQ_2 的计算公式为

$$dQ_1 = I^2 R dt \quad (4)$$

$$dQ_2 = \frac{\alpha(T - T') S_1 dt}{l} \quad (5)$$

式(4)、(5)中 I 为熔体通过电流的有效值; α 为熔

体之间的热传导系数,是一个常数^[10];S₁ 为熔体之间交换热量的接触面积;T'为相邻单元的温度。

熔体吸收热量的计算公式为

$$dQ = dQ_1 - dQ_2$$

(6)

联立式(1)~(6),可以得到熔体温升 dT 与时间 dt 的微分关系式为

$$cm dT = \frac{I^2 l \rho_0 [1 + a(T - T_0)] dt}{S} - \frac{\alpha S_1 (T - T') dt}{l}$$

(7)

对式(7)进行积分则可以得到熔体温升的关系式,即

$$T = \frac{1}{l^2 I^2 \rho_0 a - \alpha S_0 S_1} \left\{ e^{\frac{l^2 I^2 \rho_0 a - \alpha S_0 S_1}{cm l} t} [l^2 I^2 \rho_0 + \alpha S_0 S_1 (T' - T_0)] - [l^2 I^2 \rho_0 (a T_0 - 1) - \alpha T' S_0 S_1] \right\}$$

(8)

在雷电流作用时间内,熔体长度、电阻温度系数、金属材料比热容及质量可视为固定值。而且在雷电流作用过程中,由于作用时间短,熔体传热能力有限,可认为熔体流经电流截面面积及熔体之间交换热量面积在温升过程中保持不变。同时 T'可用式(8)进行计算,即 T 的影响因素同样也是 T' 的影响因素。因此由式(8)可知,熔体材料热传导系数、常温电阻率、环境温度及电流值均有可能对熔体温升产生影响,使得在相同时间内熔体温升异于正常工作状态下熔体温升,从而影响熔断器工作性能。

2 Ansys 仿真模型的建立

2.1 熔体仿真模型

本文研究对象为 XRNT-12 kV/125 A 型熔断器,熔体由 7 根银带组成,单根长度为 585 mm,宽度为 2.5 mm,厚度为 0.3 mm,狭颈间距为 13 mm,共 40 个狭颈。由于多根并联的熔体长度、大小基本相同,且单根熔体材料各向同性,则认为流过每根熔体的电流值相同,因此取单根小段建立熔体仿真模型。模型取 2 个狭颈,共长 41.6 mm,如图 1 所示。针对该仿真模型,采用扫掠法进行网格划分,并对狭颈处进行局部加密,如图 2 所示。划分后可得 43 911 个节点,7 596 个单元,平均网格质量为 0.912。



图 1 熔体仿真模型

Figure 1 Melt simulation model



(a) 整体网格划分



(b) 狭颈网格划分

图 2 熔体仿真模型网格划分

Figure 2 Meshing of melt simulation model

2.2 雷电流

选择 8/20 μs 雷电流作为流经熔断器熔体的载荷,其表达式为

$$I = I_m (e^{-125\,000t} - e^{-50\,000t})$$

(9)

式中 I_m 为雷电流幅值。

2.3 材料属性及边界条件

由于熔断器熔体采用高纯度银,其正常工作下,熔体材料设置为纯银的热物理参数,其中电阻率随温度增加呈线性增长,如表 1 所示。

表 1 纯银熔体正常工作状态下热物理参数

Table 1 Thermal physical parameters of pure silver melt under normal working condition

参数	单位	数值
密度	g/cm ³	10.4
热传导系数	W/(m·K)	429
比热容	J/(kg·K)	232
电阻率	Ω·m	1.586×10 ⁻⁸ (1+0.003 93T)
熔点	K	1 234.93
沸点	K	2 485.15

正常工作状态下边界条件设置为初始温度为常温 295.13 K(22 ℃)的均匀温度场。根据绝热假设,不考虑对流、辐射等散热边界条件,仅考虑熔体内部的热传导。在仿真模型的一个端面设置零电位面,另一端面加载雷电流载荷后,即可开始计算。

3 仿真计算分析

3.1 熔体正常工作状态下仿真结果

仿真时间设置为 100 μs,步长为 0.01 μs。当幅

值为 20 kA 的 8/20 μs 雷电流流经熔断器时,由于 7 根熔体并联,所以加载到单根熔体的电流是幅值为 20 kA/7 的 8/20 μs 雷电流,仿真时间为 100 μs 时熔体温度分布如图 3 所示。

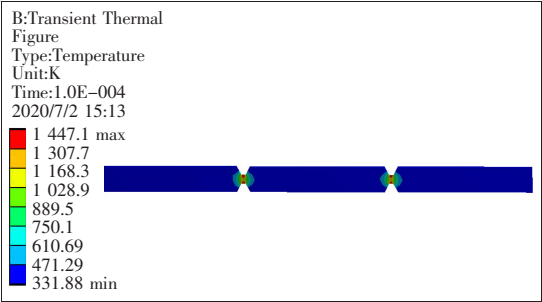


图 3 雷电流幅值为 20 kA 时熔体在 $t=100\ \mu\text{s}$ 时温度分布

Figure 3 Temperature distribution diagram of melt at $t=100\ \mu\text{s}$ when lightning current amplitude is 20 kA

由图 3 可以看出,熔体狭颈处的最高温度达到 1 447.1 $^{\circ}\text{C}$,并已经熔化。而远离熔体狭颈的端面处温度为 331.88 $^{\circ}\text{C}$,熔体各部分温差较大,这是由于狭颈处电流密度最大,所以温度变化最快,并向温度低的地方散热,因此选择狭颈达到熔点温度时间作为熔体达到熔点温度时间。由于雷电流作用时间短,电流幅值高,熔体相变过程对弧前时间基本无影响^[10],可近似认为熔体在通过雷电流后达到熔点温度所用的时间就是弧前时间。

当雷电流幅值分别为 18.0、18.5、20.0、30.0、50.0、100.0 kA 时,熔体正常工作状态下弧前时间如表 2 所示。

表 2 正常工作状态下熔断器雷电流幅值—弧前时间

Table 2 Amplitude of melt lightning current and pre-arc time under normal working state	
雷电流幅值/kA	弧前时间/ μs
18.0	仿真时间内未达到熔点温度
18.5	94.43
20.0	78.39
30.0	32.13
50.0	10.69
100.0	2.53

3.2 热传导系数影响

当熔断器熔体含有杂质时,熔体的热传导系数

会发生变化,低于目前纯银熔体的热传导系数。杂质含量越高,会使得熔体的热传导系数下降得越多。含银量 60.0%~99.9% 的热传导系数范围为 330~411 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,故设置仿真用熔体热传导系数为 330、350、380、411 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,不同热传导系数下熔断器弧前时间如表 3 所示。

表 3 不同热传导系数下熔断器雷电流幅值—弧前时间

Table 3 Amplitude of melt lightning current and pre-arc time of melt under different thermal conductivity						
热传导系数/ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	不同雷电流幅值(kA)下的弧前时间/ μs					
	18.0	18.5	20.0	30.0	50.0	100.0
411	仿真时间 内未达到 熔点温度	93.95	77.90	31.04	10.68	2.41
380	98.91	92.62	76.93	30.89	10.67	2.41
350	97.27	91.37	75.68	30.68	10.64	2.49
330	96.13	90.10	75.57	30.60	10.62	2.48

将表 3 中的熔断器雷电流幅值—弧前时间与表 2 中的正常工作状态下熔断器雷电流幅值—弧前时间进行对比,如图 4 所示。

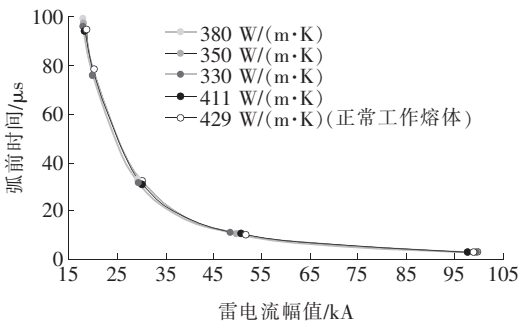


图 4 不同热传导系数下熔断器雷电流幅值—弧前时间对比

Figure 4 Comparison graph of melt lightning current amplitude-pre-arc time under different thermal conductivity coefficients

由图 4 可知,雷电流幅值一定时,当熔体热传导系数越小,熔体弧前时间越短;熔体弧前时间一定时,熔体的热传导系数越小,引起熔体起弧的雷电流幅值越小。因此,熔体热传导系数减小有可能改变雷电流作用下熔体的温升速度,使得相同时间内熔体温升增多,进而改变熔断器在雷电流作用下的弧前时间,造成低于熔断器熔断电流的雷电流使熔断器发生熔断,或雷电流流经熔断器时未达到规定的熔断时间发生熔断,从而影响熔断器的工作性能。

但由于与正常工作熔断器弧前时间相比,受熔体热传导系数影响的熔断器弧前时间变化最大值为 4.33 μs,占仿真时间的 4.33%,所以熔体热传导系数的变化对熔体在雷电流作用下的温升影响较小,因此雷电流流经受熔体热传导系数变化影响的熔断器时的熔断电流与熔断时间均与该电流流经正常工作状态熔断器熔断电流与熔断时间相差较小。故当熔断器熔体含有杂质导致熔体的热传导系数发生变化时,对熔断器在雷电流作用下的工作性能影响较小。

3.3 常温电阻率影响

熔体通流能力设计缺陷将导致其常温下电阻率过大。设置仿真中熔体常温电阻率:1.7×10⁻⁸、1.8×10⁻⁸、1.9×10⁻⁸、2×10⁻⁸ Ω·m。不同电阻率下熔断器弧前时间如表 4 所示。

表 4 不同常温电阻率下熔断器雷电流幅值—弧前时间

Table 4 Amplitude of melt lightning current and pre-arc time under different resistivity

常温下电阻率/ (10 ⁻⁸ Ω·m)	不同雷电流幅值(kA)下的弧前时间/μs					
	18.0	18.5	20.0	30.0	50.0	100.0
1.7	92.95	86.97	73.14	29.84	9.46	2.50
1.8	86.72	81.20	67.41	27.16	9.40	2.21
1.9	81.24	76.08	64.26	26.63	8.45	1.47
2.0	76.40	71.57	59.60	24.27	8.40	1.46

将表 4 中的熔断器雷电流幅值—弧前时间与表 2 中的正常工作状态下熔断器雷电流幅值—弧前时间进行对比,如图 5 所示。

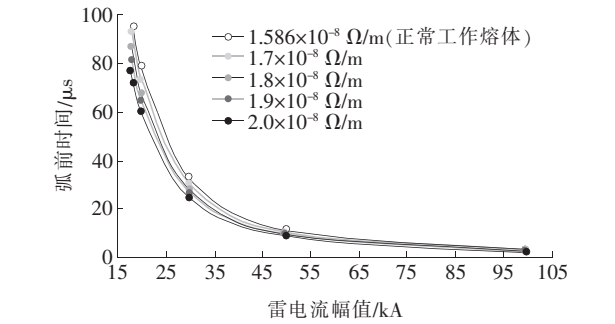


图 5 不同电阻率下熔断器雷电流幅值—弧前时间对比

Figure 5 Comparison graph of melt lightning current amplitude-pre-arc time under different resistivity

由图 5 可知,雷电流幅值一定时,当熔体常温电阻率越小,熔体弧前时间越短;熔体弧前时间一定时,熔体的常温电阻率越小,引起熔体起弧的雷电流

幅值越小。故熔体常温电阻率改变,会改变熔体在雷电流作用下的温升速度;熔体常温电阻率越小,温升速度越快,导致相同时间内熔体温升增多,进而改变熔断器在雷电流作用下的弧前时间,造成低于熔断器熔断电流的雷电流使熔断器发生熔断,或雷电流流经熔断器时未达到规定的熔断时间发生熔断。但由于与正常工作熔断器弧前时间相比,受熔体常温电阻率影响熔断器弧前时间变化最大值为 22.82 μs,占仿真时间的 22.82%。所以,熔体常温电阻率的变化对熔体在雷电流作用下的温升影响较大。因此,雷电流流经受常温电阻率影响的熔断器时的熔断电流与熔断时间均与该电流流经正常工作状态熔断器熔断电流与熔断时间相差较大。故熔体通流能力设计缺陷将导致其常温下电阻率过大,对熔断器在雷电流作用下的工作性能产生较大影响。

3.4 熔体异常断裂的影响

该型号熔断器有 7 根熔体,电流将均分到每根熔体。若其中 1 根或 2 根熔体异常断裂,则其余熔体需承载更大的电流。设置仿真中熔体存在 1~2 根断裂情况,不同熔体断裂数下熔断器弧前时间如表 5 所示。

表 5 不同熔体断裂数下熔断器雷电流幅值—弧前时间

Table 5 Melt lightning current amplitude-pre-arc time under different melt fracture numbers

熔体断裂 根数	不同雷电流幅值(kA)下的弧前时间/μs					
	18.0	18.5	20.0	30.0	50.0	100.0
1	79.47	74.43	61.93	25.14	8.43	1.82
2	51.84	48.69	40.85	17.14	5.46	1.23

将表 5 中的熔断器雷电流幅值—弧前时间与表 2 中的正常工作状态下熔断器雷电流幅值—弧前时间进行对比,如图 6 所示。

由图 6 可知,雷电流幅值一定时,当熔体异常断裂根数越多,熔体弧前时间越短;熔体弧前时间一定时,熔体异常断裂根数越多时,引起熔体起弧的雷电流幅值越小。故熔体发生异常断裂有可能改变熔体在雷电流作用下的温升速度,熔体异常断裂根数越多,温升速度越快,导致相同时间内熔体温升增多,进而改变熔断器在雷电流作用下的弧前时间,造成低于熔断器熔断电流的雷电流使熔断器发生熔断,或雷电流流经熔断器时未达到规定的熔断时间发生熔断。但由于与正常工作熔断器弧前时间相比,受

熔体异常断裂影响熔断器弧前时间变化最大值为 $45.74\ \mu\text{s}$, 占仿真时间的 45.74% , 所以熔体异常断裂对熔体在雷电流作用下的温升影响较大, 因此雷电流流经熔体异常断裂熔断器时的熔断电流与熔断时间均与该电流流经正常工作状态熔断器熔断电流与熔断时间相差较大。故熔体异常断裂对熔断器在雷电流作用下的工作性能将产生较大影响。

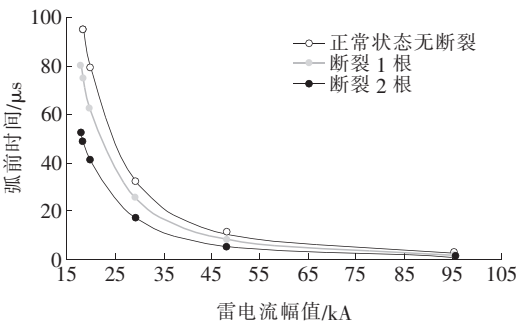


图 6 不同熔体断裂数下熔断器雷电流
幅值—弧前时间对比

Figure 6 Comparison of melt lightning current
amplitude-pre-arc time under different melt
fracture numbers

3.5 环境温度影响

若熔断器工作在恶劣天气下, 或因其他不明原因导致的熔断器环境温度过高或过低均会导致熔体所处环境温度过高或过低。设置仿真熔体环境温度: $253.13\ \text{K}(-20\ ^\circ\text{C})$ 、 $273.13\ \text{K}(0\ ^\circ\text{C})$ 、 $313.13\ \text{K}(40\ ^\circ\text{C})$ 、 $333.13\ \text{K}(60\ ^\circ\text{C})$, 不同熔体环境温度下熔断器弧前时间如表 6 所示。

表 6 不同环境温度下熔断器雷电流幅值—弧前时间

Table 6 Melt lightning current amplitude-pre-arc time
at different melt ambient temperatures

熔体环境 温度/K	不同雷电流幅值(kA)下的弧前时间/ μs					
	18.0	18.5	20.0	30.0	50.0	100.0
253.13	仿真时间 内未达到 熔点温度	99.53	82.41	32.57	11.16	2.65
273.13	仿真时间 内未达到 熔点温度	97.07	80.39	31.84	10.92	2.59
313.13		98.54	93.18	76.42	30.41	10.46
333.13		96.76	91.76	74.81	29.71	9.48

将表 6 中的熔断器雷电流幅值—弧前时间与表 2 中的正常工作状态下熔断器雷电流幅值—弧前时间进行对比, 如图 7 所示。

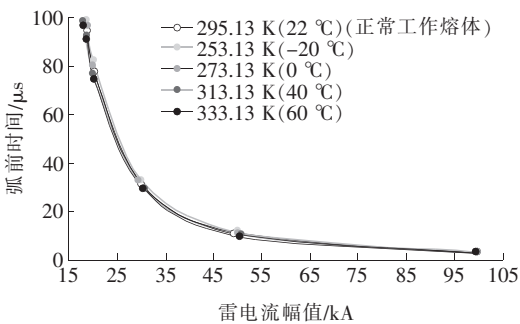


图 7 不同熔体环境温度下熔断器雷电
流幅值—弧前时间对比

Figure 7 Comparison of melt lightning current
amplitude-pre-arc time at different melt
ambient temperatures

由图 7 可知, 当雷电流幅值一定时, 熔体环境温度越高, 熔体弧前时间越短; 当熔体弧前时间一定时, 熔体环境温度越高时, 引起熔体起弧的雷电流幅值越小。因此, 熔体环境温度增加有可能改变雷电流作用下熔体的温升速度, 使得相同时间内熔体温升增多, 进而改变熔断器在雷电流作用下的弧前时间, 造成低于熔断器熔断电流的雷电流使熔断器发生熔断, 或雷电流流经熔断器时未达到规定的熔断时间发生熔断, 从而影响熔断器的工作性能。但由于与正常工作熔断器弧前时间相比, 受熔体环境温度影响熔断器弧前时间变化最大值为 $3.58\ \mu\text{s}$, 占仿真时间的 3.58% , 所以熔体环境温度对熔体在雷电流作用下的温升影响较小。故熔体所处环境温度过高或过低对熔断器在雷电流作用下的工作性能影响较小。

4 熔断器安全正常运行的措施分析

对熔断器安全正常运行的措施进行分析, 具体如下。

1) 由表 2、3 可知, 当熔体的热传导系数为正常工作熔体导热系数 $429\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时, 幅值为 $18\ \text{kA}$ 的雷电流在仿真时间内不会使得熔体起弧; 当熔体的热传导系数低于 $411\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时, 幅值为 $18\ \text{kA}$ 的雷电流在仿真时间内使得熔体起弧。因此为保证熔断器的安全正常运行, 熔体的热传导系数应高于 $411\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 即在熔体材料选取过

程中应保证熔体银含量高于 99.9%。

2)由表 2、4 可知,当熔体常温电阻率为正常工作熔体常温电阻率 $1.586 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 时,幅值为 18 kA 的雷电流不会使得熔体起弧;当熔体电阻率大于 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 时,幅值为 18 kA 的雷电流在仿真时间内使熔体起弧。因此为保证熔断器的安全正常运行,需重点关注熔体通流能力的设计,保证熔体常温电阻率低于 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。

3)由表 2、5 可知,当熔体未发生异常断裂时,幅值为 18 kA 的雷电流流经熔体时,幅值为 18 kA 的雷电流不会使得熔体起弧;当熔体发生异常断裂后,幅值为 18 kA 的雷电流使得熔体起弧。因此为保证熔断器的安全正常运行,在熔断器制作过程中,需保证熔体缠绕在星形骨架后无扭曲损伤。

4)由表 2、6 可知,当熔体周围环境为正常工作温度 22 $^{\circ}\text{C}$ 时,幅值为 18 kA 的雷电流不会使得熔体起弧;当熔体周围环境温度高于 40 $^{\circ}\text{C}$ 时,幅值为 18 kA 的雷电流使熔体起弧。因此为保证熔断器的安全正常运行,需保证熔断器工作的环境温度低于 40 $^{\circ}\text{C}$ 。

5 结语

1)通过对熔断器熔体在 8/20 μs 雷电流作用下温升变化数学模型的推导及分析,认为熔断器熔体材料热传导系数、常温电阻率、环境温度变化及熔体异常断裂均有可能对雷电流作用下熔体的温升过程产生影响,使得在相同时间内熔体温升异于正常工作状态下熔体温升,从而影响熔断器工作性能。

2)由仿真结果可知,当雷电流幅值一定时,熔体热传导系数减小、常温电阻率增大、环境温度增加与熔体异常断裂都将加快雷电流作用下熔体的温升速度,使得相同时间内熔体温度升高增多,进而改变熔断器在雷电流幅值作用下的弧前时间。由于熔体热传导系数与环境温度的变化引起弧前时间变化较小,因此熔体热传导系数与环境温度变化对熔体在雷电流作用下的温升过程影响较小。熔体异常断裂与熔体电阻率的变化引起弧前时间变化较大,因此熔体异常断裂与环境温度变化对熔体在雷电流作用

下的温升过程影响较大。

3)当熔断器在雷电流作用下的弧前时间发生变化时,可能造成低于熔断器熔断电流的雷电流使熔断器发生熔断,或雷电流流经熔断器时未达到规定的熔断时间发生熔断。故熔体热传导系数减小、电阻率增大、环境温度增加与熔体异常断裂均可能对熔断器的工作性能产生影响。根据上述影响因素对熔体在雷电流作用下温升情况影响程度可知,熔体热传导系数与环境温度的变化对雷电流作用下熔断器的工作性能影响较小,而熔体电阻率变化与熔体异常断裂对雷电流作用下熔断器的工作性能影响较大。

4)为保证熔断器的安全正常运行,选取的熔体材料银含量应高于 99.9%。在设计过程中需重点关注熔体通流能力设计,熔体常温电阻率应低于 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$;在熔断器制作过程中,熔体缠绕在星形骨架后无扭曲损伤。另外,熔断器工作的环境温度应低于 40 $^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:

- [1] 费蕙萍. 高压熔断器原理及分类[J]. 江苏电器, 2004(1):37-38.
FEI Huixia. Principles and classifications for high-voltage fuses[J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2004(1):37-38.
- [2] 王叔悦,陈天翔,滕富莉,等. 基于形状记忆合金的新型 12 kV 跌落式熔断器设计[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 176-181.
WANG Shuyue, CHEN Tianxiang, TENG Fuli, et al. Design of a new 12 kV drop fuse based on shape memory alloy [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10):176-181.
- [3] 杜预,郭新,高超,等. 限流熔断器弧前时间—电流特性的仿真[J]. 低压电器, 2013(9):8-11.
DU Yu, GUO Xin, GAO Chao, et al. Simulation of pre-arc time-current characteristics of current-limiting fuses [J]. Low Voltage Apparatus, 2013(9):8-11.
- [4] 朱冠南,杨晓艺,高宇航,等. 小电流直流电弧的动态模拟及其稳态特性研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(1):42-48.
ZHU Guannan, YANG Xiaoyi, GAO Yuhang, et al. Study on dynamic simulation and steady-state characteristics of small current DC arcs[J]. Electrical Measure-

- ment & Instrumentation, 2020, 57(1):42-48.
- [5] 刘志远,王彤,孙超,等. 石英砂熔断器的弧前时间—电流特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(2):366-371.
LIU Zhiyuan, WANG Tong, SUN Chao, et al. Pre-arcing time and current characteristics of quartz sand fuse[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2):366-371.
- [6] 李冲,郭建炎,翁剑清,等. 基于有限元分析的高压喷射式熔断器弧前时间仿真计算[J]. 水电能源科学, 2018, 36(1):179-182.
LI Chong, GUO Jianyan, WONG Jianqing, et al. Simulation calculation of pre-arcing time of high voltage expulsion fuse based on finite element method[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(1):179-182.
- [7] 陈倩. 高压限流熔断器弧前时间电流特性的仿真研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2012.
- [8] 毛柳明,文远芳,周挺. 高压限流熔断器熔断过程及过电压研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(4):820-823.
MAO Liuming, WEN Yuanfang, ZHOU Ting. Breaking process and overvoltage of high voltage current-limiting fuse[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4):820-823.
- [9] 张翔,赵赢峰,孙健,等. 特高压直流换流阀温升试验方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8):237-242.
ZHANG Xiang, ZHAO Yingfeng, SUN Jian, et al. Temperature rise test method for UHVDC converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):237-242.
- [10] 韩海安,向鑫,王晖南,等. 电容式电压互感器温度特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(5):123-129.
HAN Hai'an, XIANG Xin, WANG Huinan, et al. Study on temperature characteristics of capacitive voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5):123-129.
- [11] 王海宝,王峥,周娴姊,等. 基于脉冲转换温度传感方法的电力设备温度监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24):180-187.
WANG Haibao, WANG Zheng, ZHOU Xianjie, et al. Temperature monitoring system for distribution network equipment using a pulse conversion temperature sensing method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24):180-187.
- [12] 王子文,张英敏,刘天琪等. 基于伴随网络的直流电网短路电流计算方法[J]. 中国电力, 2021, 54(10):2-10+27.
WANG Ziwen, ZHANG Yingmin, LIU Tianqi, et al. A short-circuit current calculation method based on adjoint network for DC grid[J]. Electric Power, 2021, 54(10):2-10+27.
- [13] 蒲路,段玮,孙骥,等. 基于有限元法的单芯电缆接头线芯温度计算[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(2):57-63.
PU Lu, DUAN Wei, SUN Ji, et al. Core temperature calculation of single-core cable joints based on FEM[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(2):57-63.
- [14] 刑菲,林吉靓. 基于 Ansys 的 CPU 散热片的散热及温度场分析[J]. 机械工程师, 2010(5):67-68.
XING Fei, LIN Jiliang. The thermal and temperature field analysis of CPU heatsink based on Ansys[J]. Mechanical Engineer, 2010(5):67-68.
- [15] 李嘉彬,杨建华,张涛,等. 电力电子设备谐波对配电网电压骤升的影响研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(5):35-41.
LI Jiabin, YANG Jianhua, ZHANG Tao, et al. Harmonic impact of power electronic devices upon voltage swell in distribution networks[J]. Smart Power, 2021, 49(5):35-41.