

冷绝缘 HTS 电缆失超过程的热电耦合研究

赵志杰, 孙荣, 马骏, 王晓峰, 贺星昶

(国网重庆市电力公司江北供电分公司, 重庆 401179)

Study on Electro-Thermal Coupling Model of HTS Cables during Quench Process

Zhao Zhijie, Sun Rong, Ma Tao, Wang Xiaofeng, He Xingjiong

(State Grid Chong Qing Electric Power Company, Jiangbei Branch, Chong Qing 401179 China)

摘要: 与常规电缆相比, 高温超导 (High Temperature Superconducting, HTS) 电缆具有输送容量大, 损耗低等显著的优势。因此, 近些年来它在电力系统中得到了更多的应用。但当超导电缆遭受过电流故障时, 超导材料可能会出现失超现象。此时超导材料电阻迅速增大, 温升明显。当温度超过超导材料的临界温度时, 超导带材会受到损坏, 并且系统的稳定性会受到影响。为了保证超导电缆系统的安全运行, 过电流保护须在一定时间内动作切除故障电缆。研究中根据超导电缆热电耦合计算原理, 通过 COMSOL 有限元仿真软件, 对超导电缆的暂态温升进行仿真计算, 得到了超导电缆失超过程中的电流分布情况和各层温升大小。讨论了温升沿超导电缆径向的变化规律。根据温升结果提出了适用于超导电缆的保护动作时间, 用以保护超导电缆系统的安全运行。

关键词: 高温超导电缆; 热电耦合; 温升特性; 失超保护

ABSTRACT: In recent years, high-temperature superconducting (HTS) cables expand widely used in power system owing to a variety of remarkable merits, such as much higher transmission capacity and lower losses compared to the traditional power cables. However, HTS cables may be subjected to the over-current when some major faults happened. The HTS materials will quench when the carrying fault current exceeds the certain permitted value. The temperature of HTS tapes will increase rapidly because of the increasing resistance. As a result, HTS tapes may suffer from damage when temperature exceeds the critical temperature and the stability of power system may be affected. To protect the operation safety of HTS cable system, the over-current protection should cut off the faulty HTS cable in a certain time. In this paper, according to the applicable electro-thermal coupled principle, the transient temperature of HTS cable is simulated by COMSOL Multiphysics. The current distribution and temperature rise of each layer is investigated when HTS cable subjected to the fault current. Meanwhile, the temperature rise along radial direction is discussed. Through the temperature rise and Joule heat of the superconducting layer, the protection action time is proposed for the safe operation in the HTS cable system.

KEY WORD: HTS cable; Electro-thermal coupled; Characteristics of temperature; Quench protection

1 引言

现阶段常规电网由架空线路和常规电力电缆组成, 一般使用铜等传统导电材料, 传输容量已经不能满足负荷的巨大需求, 电力网中的线路损耗难以降低, 并且传统的输电方式占地面积较大, 在人口密集的区域中影响人居环境, 是现阶段急需解决的问题。而高温超导电缆的出现, 为上述问题提出了解决的方法。与常规电力电缆相比, 高温超导电缆具有低损耗、传输容量大、提高系统可靠性、环境友好、节约资源等优势^[1]。

在超导电缆实际运行中, 可能受到短路故障、失超故障等各种考验。由于超导电缆的载流体为超导材料, 在超导电缆发生短路故障后, 超

导层的温度会升高^[2], 超导电缆会发生失超现象。超导电缆传输容量较大, 并且超导电缆系统价格昂贵, 超导电缆发生故障后, 温升过高会影响整个超导电缆系统的安全性和稳定性。因此, 需要对高温超导电缆发生故障之后的温升进行准确的计算, 提出适用于超导电缆失超保护方案, 以保证高温超导电缆安全稳定地运行。本文以 110kV 电压等级的冷绝缘超导电缆作为研究对象, 建立了超导电缆热电耦合计算模型, 利用热电耦合原理以及相关参数设置, 最终得到超导电缆遭受短路故障后的电流分布情况、各层温升大小和产生的焦耳热。并且根据研究结果, 提出了适用于超导电缆的失超保护方案。

2 热电耦合计算模型

2.1 超导电缆结构

我国的第一条超导电缆长度为 33.5m，三相分相、35kV/2kA 的室温绝缘超导电缆的研制，并且成功在云南普吉变电站挂网运行^[3,4]。现阶段，重庆电网还没有超导电缆挂网运行的记录。本文的研究对象为三相分相冷绝缘超导电缆，额定电流为 3kA，其单相结构示意图如图 1 所示。

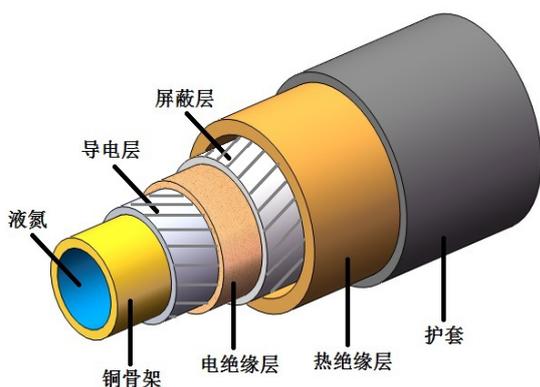


图 1 超导电缆结构示意图

Fig.1 Configuration of a typical HTS cable

在图 1 中，超导电缆的结构由内到外为：液氮内通道、铜骨架、超导导电层、PPLP 电绝缘层、超导屏蔽层、热绝缘层与护套。其中，热绝缘层可以使整个超导电缆工作在极低温环境下，保证超导电缆正常运行。

研究中选取的带材是第二代高温超导带材，其带材结构示意图如图 2 所示。这种带材的基带一般是金属镍，其质地柔软，有利于超导层更好地延展在支撑物上（一般选铜骨架）；缓冲层是氧化物所构成，它阻止基带与超导层之间发生扩散，更好地保护超导层的完整性，缓冲层对超导带材温升影响很小，因此在仿真中忽略该层结构以减少计算时间；超导层选取钇系的稀土元素所构成的高温超导材料，此类超导带材的临界转变温度为 90-93K，在本文中选取临界温度值为 92K；带材的最外层是保护层，该层起到机械保护超导层的作用，并且保护层良好的导热性能可以帮助降低超导层的温升，本文选取保护层材料为银。

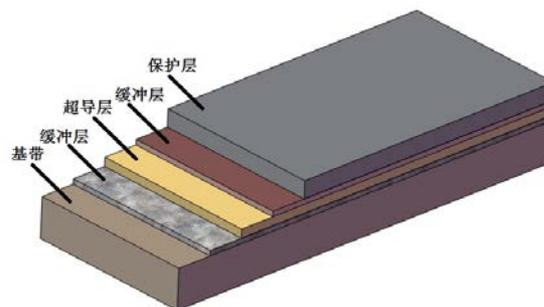


图 2 第二代高温超导带材结构示意图

Fig.2 Configuration of the second generation high temperature superconducting tape

本文中的冷绝缘超导电缆的结构参数如表 1 所示：

表 1 冷绝缘高温超导电缆结构参数
Tab 1 Specifications of HTS cable

电缆结构参数	参数值
液氮通道半径/mm	9.0
铜骨架外半径/mm	12.0
导电层外半径/mm	14
导电层层数	4
电绝缘外半径/mm	28
屏蔽层外半径/mm	29
屏蔽层层数	2
铜屏蔽层外半径/mm	31.4

超导带材的热电耦合仿真，一方面需要对电磁场模块进行仿真计算，建立描述电磁场问题的基本方程，选择合适的待求场量，解决超导带材非线性大的问题，并且具有良好的计算稳定性；另一方面需要对热场进行仿真计算，准确地设置热力学参数，最关键的是将电磁模块与传热模块耦合起来，达到热电耦合的目的。

2.2 热电耦合原理

对超导电缆进行热电耦合研究，需要在有限元计算软件 COMSOL 中分别对电模块和热模块进行研究，准确设置参数。由于超导带材的厚度很薄，划分网格时，容易出现网格的畸变，增加有限元计算的难度，容易出现收敛速度慢甚至不收敛的情况，尤其对于三维问题的计算时间较长，对于计算机的性能要求较高，因此在本文中建立了高温超导电缆的二维模型来对其进行热电耦合计算研究；同时，由于超导电缆遭受故障

电流时,由于故障电流持续时间很短,因此可忽略超导电缆沿轴向的温度变化^[5]。

由于超导材料的 E - J 关系呈现着很明显的非线性特征,本文使用了 COMSOL 中的 PDE 模块来对超导电缆的电磁场进行研究,在 PDE 模块中可以自由地设置公式以及偏微分方程,准确地描述超导材料的非线性特征。

超导材料作为超导电缆的载流体,可以利用以下两个 Maxwell 方程进行电磁场分析:

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

式中,

- H —— 磁场强度/ $A \cdot m^{-1}$;
- J —— 传导电流密度/ $A \cdot m^{-2}$;
- E —— 电场强度/ $V \cdot m^{-1}$;
- B —— 磁感应强度/T。

同时,考虑电磁场方程中的本构关系有:

$$E = \rho \cdot J \quad (3)$$

式中,

- ρ —— 媒质的电阻率/ $\Omega \cdot m$ 。

通过化简公式(1)、(2)、(3),可以得到以下方程:

$$\mu_0 \mu_r \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \times (\rho \nabla \times H) = 0 \quad (4)$$

式中,

- μ_0 —— 真空磁导率,取 $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$;
- μ_r —— 相对磁导率。

有限元软件计算中选择的场量不同,其求解方程,边界条件设置以及初始条件都会有很大的差异。利用 PDE 模块计算电磁场时,通常采用的状态变量为待求场量,比如磁场强度 H 和电场强度 E 。本文采用了以磁场强度 H 作为计算中的待求状态变量,此方法称为 H -方法。

在热电耦合仿真计算中,建立了 2D 模型,所施加的电流方向为轴向方向,即 z 方向,利用安培环路定理能够计算得到电流密度:

$$J_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (5)$$

可以从上式看出, H -方程中,磁场强度有两个方向的变量,分别是 H_x 和 H_y ,而电流密度与电场强度仅有一个方向的变量,即 J_z 和 E_z 。

通过在 COMSOL 的传热学模块中设置热源,即焦耳热功率 Q ,将电模块和热模块耦合起来,达到热电耦合计算的目的:

$$Q = E_z \cdot J_z \quad (6)$$

最终可以得到超导带材的热平衡方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q(T) \quad (7)$$

式中,

- C_p —— 比热容/ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$;
- k —— 热传导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$;
- $Q(T)$ —— 产生的焦耳热/ $W \cdot m^{-3}$,等于超导带材的电流密度 J 和电场强度 E 的乘积,电磁场通过焦耳热 $Q(T)$ 耦合在一起。

表 2 和表 3 分是仿真计算中的材料传热学参数与超导带材参数^[6]。

表 2 材料传热学参数
Tab 2 Thermal parameters

HTS 电缆 物理参数	参数值					
	LN ₂	Cu	Ni	YBCO	Ag	PPLP
密度 /kg·m ⁻³	810	8700	8900	6372	10500	930
热导率 /W·(m·K) ⁻¹	0.16	600	6.4	8.6	520	0.38
比热容 /J·(kg·K) ⁻¹	2000	192	163	185	160	430
粘度/Pa·s	2.27x10 ⁻⁴	—	—	—	—	—

表 3 超导带材参数
Tab 3 Parameters of the superconducting tape

超导带材参数	参数值
临界电流密度/ $A \cdot m^{-2}$	1.6×10^7
临界场强/ $V \cdot m^{-1}$	1×10^4
超导体的临界温度/K	92
E - J 定律的指数	18
J_c 公式的指数	1.2

超导电缆内部由于有冷却液氮的存在,会带走一部分热量,在研究中需要考虑冷却过程。对于超导电缆来说,液氮在液氮泵的作用下,沿着轴向不断的循环冷却,液氮的轴向温度会发生变化,这会影响到超导电缆的温升,因此需要对轴向不同位置出的液氮温度分布情况进行讨论。

超导电缆中液氮流动方向如图3所示,左侧是液氮入口,右侧是液氮出口, V 为液氮流速。

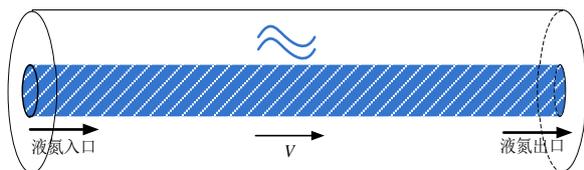


图3 超导电缆液氮流动示意图
Fig. 3 Schematic diagram of liquid nitrogen flow in superconducting cable

由于超导电缆中液氮的冷却作用,会将沿超导电缆轴向的交流损耗带走,因此,在沿超导电缆长度方向上,各处的液氮温度会不同,随着交流损耗的增加,液氮温度也将呈上升的趋势。在计算液氮沿轴向温升时,有以下的假设:

1) 超导电缆产生的交流损耗以及恒温器漏热全部被液氮带走。

2) 在超导电缆各种工况下,液氮的流量恒定。

根据以上的假设以及热力学基本公式可以计算距离液氮入口 x 处的液氮温升。

$$C_p \cdot m \cdot (T_x - T_0) = x \cdot p_{cable} \quad (8)$$

式中,

C_p ——液氮的比热容/ $J(kg \cdot K)^{-1}$;

m ——液氮的质量流率/ $kg \cdot s^{-1}$;

T_x ——距离电缆入口 x 出液氮温度/ T ;

T_0 ——电缆入口处液氮温度/ T ;

x ——距离液氮入口处的长度/ m ;

p_{cable} ——电缆单位长度上的交流损耗与恒温器漏热之和/ $W \cdot m^{-1}$ 。

根据式可以计算出超导电缆出口处的液氮温升大小,本文中的高温超导电缆长度为1000m,超导电缆交流损耗取 $2.4W/m$,恒温器漏热取工程经验值取 $3.0W/m$,液氮的质量流率

为 $0.9kg/s$ 。通过计算得到当液氮入口处的液氮温度为 $72K$ 时,通过计算得到出口处的液氮温度为 $75K$ 。

液氮温度沿超导电缆轴向是逐渐上升的,因此,高温超导电缆的最大温度位于液氮出口处,对此处的温度进行研究可得到超导电缆的热点。

3 计算结果与分析

3.1 电流分布

当工频故障电流幅值 $20kA$ 时,超导电缆遭受过电流故障后的电流分布情况如图4所示。

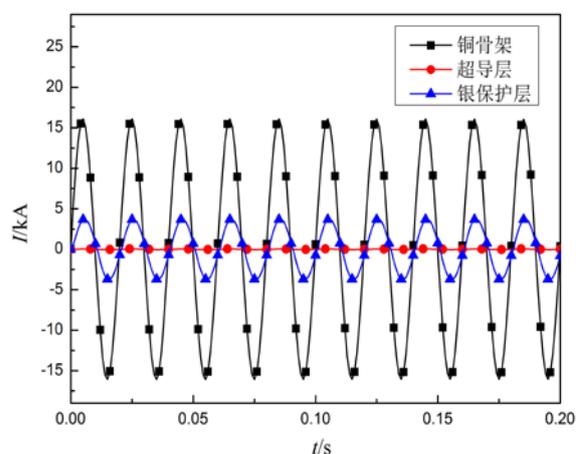


图4 遭受过电流故障后电流分布
Fig. 4 Current distribution of conductive layer under the fault current

图4中,为故障电流分布结果:铜骨架处的电流幅值为 $15.69kA$,占总故障电流的 78.45% ;银保护层的电流幅值为 $4.11kA$,占总故障电流的 20.55% ;而YBCO层的电阻会变得很大,导致该层电流很小。在故障电流下,超导电缆的铜骨架、YBCO层以及银保护层是并联关系,此时电流主要由铜骨架分流,它会不断地产生焦耳热,成为了超导电缆的主要热源,并且超导带材的银保护层也会起到分流的作用,由于银的热导率较大,有利于热量的耗散。

3.2 暂态温升结果

图5高温超导电缆在遭受幅值为 $20kA$ 的故障电流时,各层温升情况。

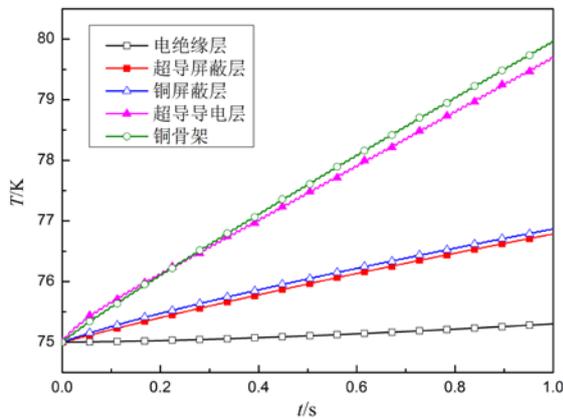


图5 20kA故障电流下各层温升
Fig. 5 Temperature of each layer under 20 kA fault current

图5曲线分别代表了PPLP电绝缘层, 超导屏蔽层, 铜屏蔽层, 超导电层以及铜骨架在故障电流下的温升情况。各层在1s内温升分别为0.260K, 1.146K, 1.207K, 4.501K, 4.545K。故障电流持续的时间短, 并且PPLP的热导率很小, 因此电绝缘层温升很小, 超导屏蔽层和铜屏蔽层温升小于导电层温升, 这是由于屏蔽层外部是流动液氮进行冷却对流的缘故。而银保护层与铜骨架作为主要的热源, 使得超导电层和铜骨架温升较大。两层的温升幅度较为接近, 这是由于铜骨架有着良好的导热性质, 热量能在较短时间内完成传导, 因此两层温升的差异较小。

研究计算了在不同幅值的故障电流下, 超导电层温升情况。如图6所示。

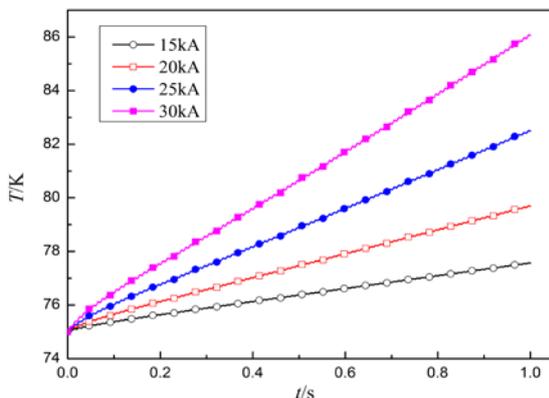


图6 不同故障电流下超导电层温升
Fig. 6 Temperature of YBCO layer under different fault current

在图6中, 选取了幅值为15kA, 20kA, 25

kA, 30kA的故障电流, 持续时间为1s。可以看到, 超导电层的温升随时间呈近似线性上升趋势, 随着故障电流的增大, 温升速率越快。在 $t=1s$ 时, 超导电层温升分别是2.387K, 4.512K, 7.485K, 10.849K, 得到相应故障电流下温升的近似速率, 如表4所示。

表4 不同故障电流下的温升速率
Tab 4 Rate of temperature rising under different currents

故障电流 I_{fault}/kA	温升上升速率 $V_{in}/K \cdot s^{-1}$
15	2.39
20	4.51
25	7.49
30	10.85

根据在不同故障电流下的近似温升速率, 可以得到超导层温度上升到临界温度92K的时间。经计算, 四种不同故障电流下, 超导层上升到92K的时间分别为7.11s, 3.77s, 2.27s, 1.57s。由于超导层温度的热点出现在超导电缆的液氮出口处, 因此选取该处的温度进行温度监测, 超导电缆在失超后会产生热量, 焦耳热超过阈值后, 会使得失超沿着电缆轴向进行传播, 此时继电保护需要及时动作, 切除故障超导电缆。

研究得到了超导电缆在20kA故障电流下径向方向上的温度分布, 如图7所示。

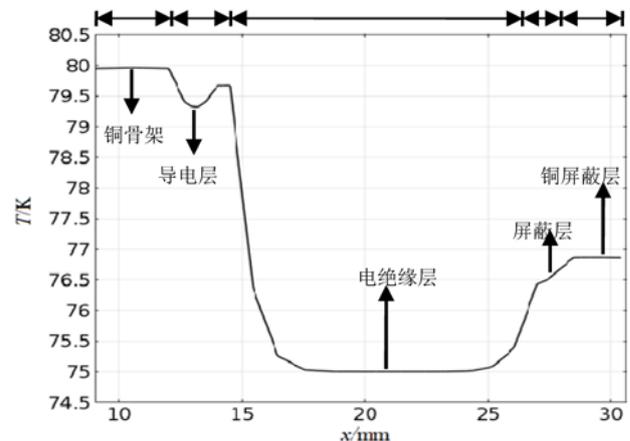


图7 $t=1s$ 时超导电缆径向方向上的温度分布
Fig. 7 Temperature distribution along radial direction of HTS cable when $t=1.0s$

在图7中, 9mm-12mm对应的是铜骨架的温

度，由于铜的热导率较大，因此其温差很小；12mm-13.8mm 对应的是超导带材的缓冲层温度，

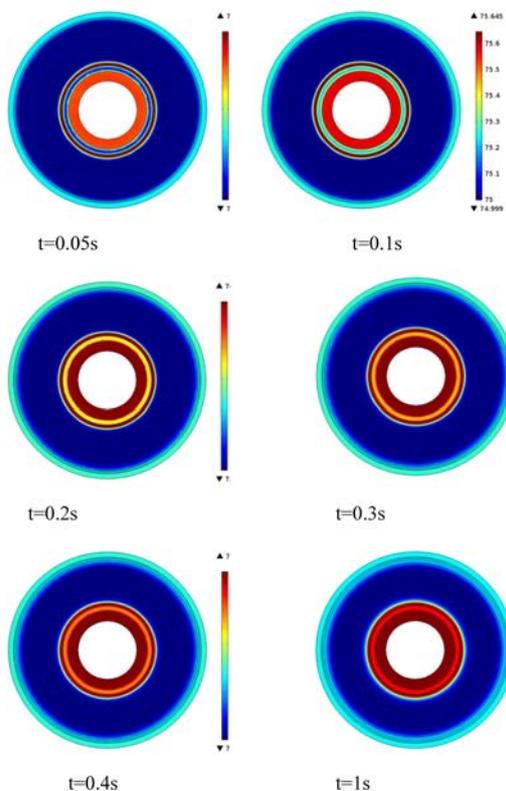


图8 超导电缆径向温度随时间变化示意图

Fig. 8 Thermal field of HTS cable

缓冲层分流很小并且热导率低，因此温升呈下降趋势；13.8mm-14mm 为 YBCO 层温度，超导电缆发生故障后，YBCO 层受到银保护层温升的影响，温度上升；14mm-14.5mm 对应银保护层温度，银的热导率良好，温度平衡；14.5mm-28mm 为 PPLP 电绝缘层温度，由于其热导率很小，导致电绝缘层两侧的温度梯度较为明显；28mm-29mm 和 29mm-30.4mm 分别是超导屏蔽层与铜屏蔽层的温度，由于超导屏蔽层和铜屏蔽层外部液氮的对流冷却作用，使得屏蔽层温度小于导电层温度。

研究了不同时间下，超导电缆径向温度场分布示意图，如图 8 所示。

在图 8 中，可以看出铜骨架作为超导电缆的主要热源，温升最大；而超导导电层的温升随着时间逐渐上升，这是因为 YBCO 层和银保护层不断产生焦耳热；电绝缘层的热导率很小，并且

其厚度比超导层厚很多，造成了电绝缘层的温升很小，仅仅在与超导带材接触的区域温度会有所上升；最外层为超导屏蔽层与铜屏蔽层温度场分布，由于液氮的对流冷却作用带走一部分热量，使得温度低于超导导电层和铜骨架的温度值。因此，在遭受过电流故障后，超导导电层的温度要比超导屏蔽层高，需要对导电层的温度进行实时监控，保证在安全范围内，有效地实现超导电缆的失超保护。

3.3 失超保护方案

上节中得到了超导电缆在不同故障电流下的温升特性。最小失超能(MQE)作为超导带材的一个重要的参数。本文中，超导带材的最小失超能为 5.8J。超导电缆产生的焦耳热超过最小失超能后，失超现象沿着电缆轴向进行传播，造成失超区域的不断扩大。由此可以作为失超保护的一个重要依据，在超导带材产生的焦耳热达到最小失超能之前，保护动作切除故障。超导电缆产生的焦耳热如图 9 所示。

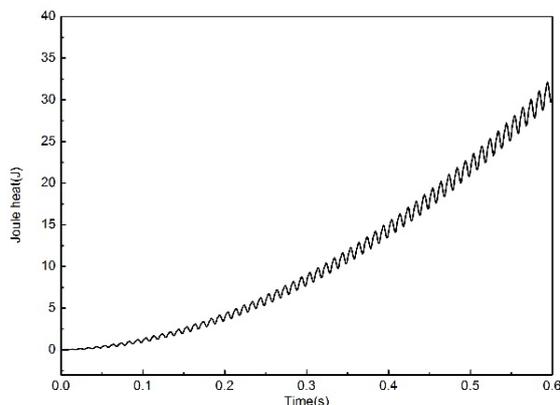


图9 20kA 故障电流下超导层产生的焦耳热
Fig. 9 The joule heat generated by the YBCO tape under the 20 kA fault current

随着故障电流的增大，超导电缆的保护动作时间降低。对于电源中性点接地系统，当超导电缆发生单相短路故障时，由于接地点的电流较大，继电保护会立即动作，切除故障。而对于电源中性点不接地系统，当超导电缆系统发生单相短路故障时，允许继续运行一段时间，此时故障电流会影响超导电缆正常运行。

当故障电流超过超导电缆额定电流的 10 倍时,认为超导电缆处于大电流故障下,超导电缆的温度上升迅速,若温度过高会对超导电缆造成永久性的破坏,这对超导电缆危害很大。当电流检测量达到整定值时,此时需要立即切除故障电缆,保护无延时动作,该种保护方式称为无时限保护方式。

如果故障电流幅值相对较小,即电流幅值小于无时限保护的电流整定值时,可在超导层产生的热量达到最小失超能之前,保护动作切除故障电缆,这样可以避免频繁地切除超导电缆。该种保护方式为非电气量保护。

如果该故障电流在超导电缆导电层产生的热量达到最小失超能之前已被消除,冷却系统会将超导电缆产生的热量带走,超导电缆重新恢复运行,保护不会动作;如果故障电流在超导电缆导电层产生的热量达到最小失超能之前仍然存在,则保护动作。

综上所述,下表 5 为超导电缆在不同故障电流的失超保护动作时间。

表 5 不同故障电流下的失超保护动作时间
Tab 5 Protection action time under different fault currents

故障电流 $I_{\text{fault}}/\text{kA}$	保护动作时间 t/s
20	0.26
25	0.18
30	0.14
35	无延时

4 结论

(1)本文建立超导电缆的热电耦合计算模型,利用超导电缆电磁场计算的麦克斯韦方程以及用于温度场计算的热平衡方程,这两种场通过

焦耳热的设置耦合起来,在充分考虑液氮冷却作用下,准确地实现超导电缆遭受过电流故障后的电磁场与热场进行有限元计算。

(2)在超导电缆遭受过电流故障后,故障电流由铜骨架及超导带材的银保护层分流。

(3)铜骨架和银保护层不断产生焦耳热,超导导电层的温度随着时间逐渐上升;电绝缘层的热导率很小,并且厚度比超导带材厚很多,造成电绝缘层温升缓慢;由于液氮的对流冷却作用会带走部分屏蔽层产生的焦耳热,使得超导屏蔽层和铜屏蔽层的温度低于超导导电层的温度。

(4)根据超导层产生的焦耳热大小,最终提出了适用于超导电缆在不同故障电流下的失超保护动作方案。

参 考 文 献

- [1] 李超鲲, 杨鹏飞. 超导电缆行业现状分析及市场前景预测[J]. 电器工业, 2005(10): 6-10.
- [2] 郑晓东, 方进. 丘明等. 不同故障下高温超导电缆的失超分析[J]. 超导电缆, 2014(7): 44-48.
- [3] 张永, 文华, 席海霞等. 中国第一组超导电缆并网运行试验[J]. 低温物理学报, 2005(5): 1136-1140.
- [4] 杨军, 张哲, 尹项根等. 我国首套高温超导电缆并网运行情况[J]. 电网技术, 2005(4): 4-7.
- [5] J. Fang, H.F. Li, J.H. Zhu, Z.N. Zhou, Y.X. Li, Z. Shen, D.L. Dong, T. Yu, Z.M. Li and M. Qiu, "Numerical analysis of the stability of HTS power cable under fault current considering the gaps in the cable," *Physica C*, 319-323, 494(2013).
- [6] J. He, Y. J. Tang, B. Wei, J. D. Li, L. Ren, J. Shi, K. Wu, X. Y. Li, Y. Xu, S. Wang, "Thermal Analysis of HTS Power Cable Using 3-D FEM Model," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, June 2013.

作者简介:

赵志杰(1988年-),男,汉族,硕士研究生,工程师,主要研究方向为高电压与绝缘技术、继电保护