

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191036

基于分布式光纤测温技术的超导电缆 局部失超检测和保护方法

黄金朋¹, 张哲¹, 汪伟², 胡子珩², 任丽¹, 章彬²

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001)

摘要: 现有失超保护方法大多只能检测出整体失超故障, 而不能有效反映局部失超故障。为此, 根据超导电缆发生局部失超后, 导体层沿线温度波形出现波峰特征, 提出了一种基于分布式光纤测温技术的超导电缆局部失超检测和保护方法。该方法利用光纤测温系统测量超导电缆导体层沿线温度, 使用高斯滤波进行测温数据的消噪处理, 通过多分辨形态学梯度(MMG)辨识沿线温度波形中波峰的上下边沿, 进而计算确定局部失超发热区域。最后根据发热区域的大小和温升情况, 进行告警和跳闸。仿真结果表明, 所提出的方法具有良好的抗噪性能, 可准确检测和判断失超发热区域和失超故障严重程度, 有效保证超导电缆运行安全。

关键词: 超导电缆; 局部失超保护; 分布式光纤测温; 发热区域; 多分辨形态学梯度

A local quench detection and protection method for a superconducting cable based on distributed optical fiber temperature measurement technology

HUANG Jinpeng¹, ZHANG Zhe¹, WANG Wei², HU Zihang², REN Li¹, ZHANG Bin²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: Most existing quench protection methods can only detect the overall quench fault, and cannot effectively reflect the local quench fault. Therefore, given the peak characteristics of the temperature waveform along the conductor layer after the local quench of the superconducting cable, a local quench detection and protection method for a superconducting cable based on distributed optical fiber temperature measurement technology is proposed. The method uses a fiber optic system to measure the temperature along the conductor layer of the superconducting cable, a Gaussian filter to filter out the noise in temperature data, and identifies the upper and lower edges of the wave peaks in the temperature waveform by a multi-resolution Morphological Gradient (MMG). Then the local quench heat-generating zones are calculated and determined. Finally, alarm and tripping are carried out according to the size and temperature rise of the quench heat-generating zones. Simulation results show that the proposed method has good anti-noise performance, can accurately detect and judge the quench heat-generating zones and quench fault severity, and effectively ensure the operational safety of the superconducting cable.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677080) and Science and Technology Project of Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd. (No. 090000KK52170171).

Key words: superconducting cable; local quench protection; distributed optical fiber temperature measurement; heat-generating zone; multi-resolution Morphological Gradient

0 引言

与常规电缆相比, 高温超导电缆具有线损低、

传输容量大、走廊占地小、环境友好等诸多优点, 为电网提供了一种高效、紧凑、可靠、绿色的电能传输方式, 是解决常规输电线路损耗高、传输容量小和城市电网扩容难等问题的有效途径^[1-5]。近年来随着超导带材、制冷和制备技术的发展, 高温超导电缆已逐步进入工程化应用阶段^[6-7]。高温超导电缆

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677080); 深圳供电局有限公司科技项目资助(090000KK52170171)

在实际运行过程中面临的一个主要问题是,一旦超导电缆失超,其电阻值将大幅增加,若不能及时检出,可能由于过热导致电缆和制冷系统损坏。超导电缆失超包括整体失超和局部失超两种基本形式。整体失超主要由短路电流引起,一般可根据电缆端口的电流、电压等电气量信息进行快速检测^[8-9]。而因超导带材不均匀或部分损伤等引发的局部失超,由于发展速度较慢,端口特征不明显,检测难度大,已成为危及超导电缆运行安全的主要原因之一^[10]。

迄今,国内外学者针对超导电缆失超机理和失超故障检测方法开展了多方面的研究。文献^[11]针对超导电缆失超后电阻的热效应会使导体温度升高的问题,提出了一种通过测量超导电缆端口温度变化的失超检测方法。文献^[12-13]利用超导体失超后冷却介质受热膨胀流速变慢,或使低温通道内壁所受压力上升的特点,分别提出了基于流速和压力变化的失超故障检测方法。上述方法主要是利用超导电缆端口特性进行检测,若失超区域较窄,产生的焦耳热较少,将会导致温度、压力和流速的变化不明显,从而难以检测出局部失超。超声波检测法利用直流超导磁体的声传递函数的变化检测磁体的局部升温或微裂纹,进行早期预警^[14],但该方法对电流的变化很敏感,故主要用于直流超导磁体,并不适用于长距离的交流超导电缆。电压检测法则是利用超导体失超后电阻增大而使导体两端的电压降升高这一特征判断是否发生失超故障^[15]。当用于局部失超检测时,需在电缆沿线安装电压传感器,工程实现难度大。同时,由于局部失超引起的电压降较小,测量精度难以保证,且易受电磁噪声干扰影响,可靠性较低。

针对上述问题,本文根据超导电缆发生局部失超后导体层沿线温度的波形变化特征,提出了一种基于分布式光纤测温技术的超导电缆局部失超故障检测和保护方法,并通过数字仿真,验证了所提方法的有效性。

1 分布式光纤测温系统的基本结构和特点

分布式光纤测温系统以光纤为传感器件,不受电磁干扰影响,无须考虑绝缘问题,而且可以实现较长空间范围内的连续测温,并利用光时域反射技术定位测量点^[16-17]。超导电缆分布式光纤测温系统的基本结构如图1所示。

系统的工作原理为:在同步脉冲的触发下,激光器发射脉冲光,经波分复用器WDM中的耦合器进入传感光纤,脉冲光在光纤中传输时与介质分子发生碰撞而产生散射,后向散射光返回WDM后由

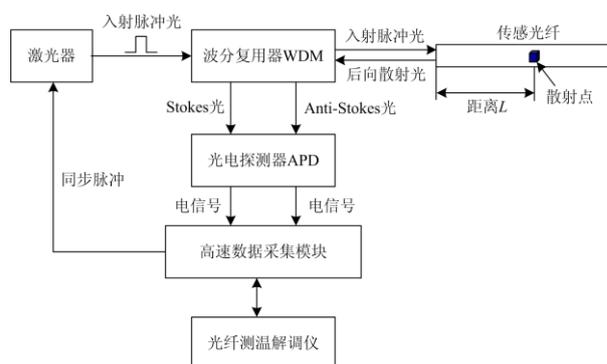


图1 分布式光纤测温系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of distributed optical fiber temperature measurement system

分光器滤出 Stokes 光和 Anti-Stokes 光,再输入到双通道光电探测器 ADP 中进行光电转换和电压放大。高速数据采集模块对放大后的电信号进行采集并传输给光纤测温解调仪,光纤测温解调仪根据后向拉曼散射光中 Anti-Stokes 光与 Stokes 光的强度比值来解调温度,并根据入射脉冲光射入光纤到后向散射光射出光纤的时间间隔计算散射点(测量点)距光纤首端的距离,从而实现光纤沿线各测量点的温度测量和定位。

普通测温光纤在液氮低温下,温度灵敏度会大大降低,不利于准确测温,而外加耐低温涂敷材料可提高光纤的温度灵敏度和稳定性。在超导电缆中,可采用表面涂敷聚酰亚胺材料的测温光纤进行温度测量。

目前分布式光纤低温测量技术已达到实用化阶段。德国 AP Sensing 公司生产的光纤测温设备 N4385B,稳定测温范围为 $-200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,测温精度可达 $\pm 0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;日本 YOKOGAWA 公司 DTSX200 产品的低温测温精度优于 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[18]。以上测温设备均可满足超导电缆沿线温度测量的工程应用要求。测温光纤的布置方式需综合考虑超导电缆结构和绕制工艺等方面的影响。对于三相同轴电缆而言,理想的光纤布置方式为:将光纤放置于超导带材之间的缝隙里,如图2所示,并在缝隙内填充粘接剂(如聚酰亚胺树脂),一方面可固定光纤,同时也可增强光纤机械强度。由于光纤尺寸小于超导带材厚度,上述光纤布置方式对电缆的电场和绝缘影响较小。

2 局部失超故障检测方法和保护原理

2.1 局部失超温度变化特征分析

超导电缆正常运行时不可避免存在交流损耗,因此从电缆首端(液氮入口)到电缆末端,导体层和

液氮的沿线温度会平滑缓慢上升，其典型变化曲线如图3所示，图中 l 为距电缆首端(液氮入口)的距离， T_l 和 T_{LN2} 分别表示导体层和液氮的沿线温度。

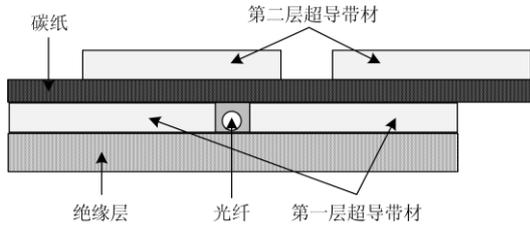


图2 理想的光纤布置方式

Fig. 2 Ideal layout of optical fiber

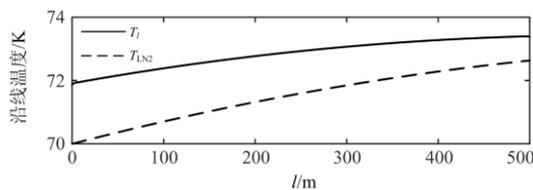


图3 正常运行时的导体层和液氮的沿线温度变化曲线

Fig. 3 Temperature variation curve along conductor layer and liquid nitrogen during normal operation

超导电缆的各导体层之间存在强烈的电磁耦合，导致电流难以均匀地分布在各导体层上^[19-21]，如果超导带材的临界电流分布不均匀，或者受到机械损伤而使临界电流退化，那么随着电流增大，如负荷电流上升，临界电流较小的带材部分(导体层)可能逐步失超，并积累大量的焦耳热，使其内能增加而温度较快上升，形成局部失超发热区域，而非发热区域部分产热较少，温度变化缓慢。与此同时，导体层发热也会引起冷却介质液氮的温度发生变化，而逐步升高。利用多物理场仿真软件 COMSOL 搭建三相同轴超导电缆的传热模型，设置局部失超区域并进行仿真，导体层和液氮的沿线温度仿真结果如图4所示。

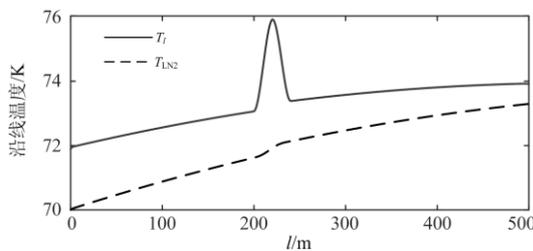


图4 局部失超时导体层和液氮的沿线温度分布曲线

Fig. 4 Temperature distribution curve along conductor layer and liquid nitrogen when local quench occurs

图4表明，超导电缆发生局部失超故障后，导体层沿线温度分布曲线在局部失超发热区域处形成

明显的波峰特征，而液氮温度变化滞后于导体层。产生这一现象的主要原因在于，三相同轴超导电缆的导体层与液氮之间敷设了较厚的绝缘层，而绝缘层的导热性能相对较差，局部失超后，会导致导体层失超区域的温度明显上升，且温升幅度和上升梯度远高于液氮。因此，相较于液氮温度，利用导体层沿线温度波形中的波峰特征可有效检测失超故障，且有助于提高检测速度和可靠性。另一方面，失超故障越严重，其失超发热区域的发热量越大，温度越高，波峰宽度越宽，故可根据失超发热区域的温度和宽度，确定局部失超故障的严重程度，进而实施有效保护。

2.2 局部失超发热区域检测方法

前述分析表明，超导电缆发生局部失超故障时，可根据导体层沿线温度波形中的波峰特征和宽度来确定失超故障位置和严重程度，而提取上述波形特征的关键是准确辨识波峰的上升和下降边沿。

数学形态学作为一种信号波形处理方法，在分析波形边沿特征上具有其独特优势。膨胀与腐蚀是形态学最基本的2种形态变换，在此基础上定义了形态开、闭运算及形态学梯度等概念^[22-24]。形态学梯度可通过调整结构元素的宽度来提取信号波形中相对陡峭的边沿信息，而忽略相对平缓的边沿信息，因此可利用形态学梯度提取沿线温度波形中的波峰特征和宽度，同时避免平缓上升的波形变化的影响，从而准确检测出局部失超发热区域。

在实际工程应用中，由于分布式光纤测温系统收集和处理的背向拉曼散射光的传感信息，而背向拉曼散射光强度只有入射光强度的 $1/10^8$ ，在光纤中传输时，由于介质的不均匀和背向散射效应会产生光路噪声，此外，在光电转换和放大的过程中会引入电路噪声，包括热噪声和散粒噪声等。上述噪声可近似视为高斯白噪声^[25]。这些噪声分量的存在将会直接影响波峰特征辨识精度。因此，在利用数学形态学梯度提取波峰的上升和下降边沿特征时，首先需对原始测温数据进行预处理，以保证局部失超发热区域检测的正确性和可靠性。

2.2.1 原始测温数据预处理方法

超导电缆沿线温度呈连续变化，某一点的温度会通过热传递影响相邻点的温度，且距离越近，这种关联影响越强。因此，当原始沿线温度信号中存在噪声时，可利用相邻点测温数据，并根据其距离远近，采用加权平均法进行消噪处理。高斯滤波是一种根据高斯函数选取滤波窗口内各数据点权值的线性加权平均滤波方法，具有较好的平滑效果，能够有效抑制高斯白噪声，同时不改变波峰的边沿特

征^[26]。因此, 本文采用高斯滤波对原始测温数据进行消噪预处理, 以提高波峰边沿辨识的准确度。高斯滤波的具体算法为

$$\begin{cases} g(k) = \exp\left(-4 \ln 2 \frac{k^2}{H^2}\right) \\ f(k) = g(k) / \sum_{j=-m}^m g(j) \\ T_s(n) = \sum_{k=-m}^m f(k) T_l(n+k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为高斯函数的半峰全宽; $W = 2m + 1$ 为数据窗宽度; T_l 为原始沿线温度信号; T_s 为高斯滤波后的沿线温度信号。当数据窗宽度 W 一定时, 可通过半峰全宽 H 调节各数据点的权重来改变平滑效果。

在实际应用中, 滤波参数 H 和 W 可根据测温误差和测点数量综合确定, 以保证良好的滤波效果。假设噪声幅值为超导电缆正常运行时最大温升的 10%, 测点数量为 7 个/m, 则 H 和 W 可分别取为 15 和 21。图 5 给出了原始导体层沿线温度 T_l 和高斯滤波后的沿线温度 T_s 的波形。

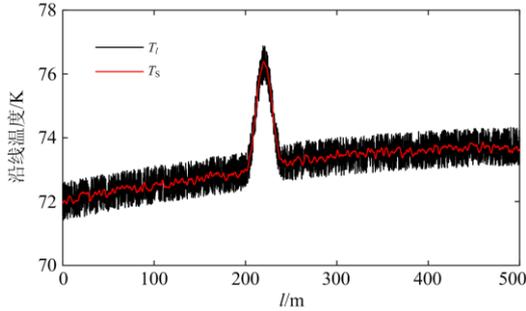


图 5 原始导体层沿线温度 T_l 和滤波后的沿线温度 T_s

Fig. 5 Original temperature T_l and the filtered temperature T_s along conductor layer

由图 5 可看出, 经高斯滤波后, 有效地滤除了原始波形中的大部分噪声, 且能够较好地保持沿线温度波形中的波峰特征。

2.2.2 基于多分辨形态学梯度的波形特征辨识方法

利用数学形态学方法提取超导电缆导体层沿线温度波形特征主要包括波峰辨识和波峰宽度计算两方面。

1) 波峰辨识方法

出现波峰的基本特点是波形中存在邻近的上升沿和下降沿, 可利用多分辨形态学梯度进行辨识。设 $T_s(x)$ 为经高斯滤波后的超导电缆导体层沿线温度信号, $g(x)$ 为所选取的数学形态学结构元素, 则结构元素 g 对沿线温度信号 T_s 的膨胀和腐蚀分别定义为

$$(T_s \oplus g)(x) = \max_{\substack{(x-y) \in D_T, y \in D_g}} \{T_s(x-y) + g(y)\} \quad (2)$$

$$(T_s \ominus g)(x) = \min_{\substack{(x+y) \in D_T, y \in D_g}} \{T_s(x+y) - g(y)\} \quad (3)$$

式中, D_T 和 D_g 分别是 T_s 和 g 的定义域集合。

为提取温度信号 T_s 中的边沿信息, 定义形态学梯度(Morphological Gradient, MG)为

$$G(x) = (T_s \oplus g)(x) - (T_s \ominus g)(x) \quad (4)$$

在形态学梯度的基础上, 为了能够同时辨识沿线温度信号中的上升沿和下降沿, 利用 MG 和原点位置相反的扁平结构元素, 可构造多分辨形态学梯度(MMG)。

$$M_T = \left[(T_s \oplus g^+) - (T_s \ominus g^+) \right] + \left[(T_s \ominus g^-) - (T_s \oplus g^-) \right] \quad (5)$$

式中: 扁平结构元素 g^+ 的原点在最右侧, g^- 的原点在最左侧, g^+ 和 g^- 分别用来提取波形中的上、下边沿; M_T 为沿线温度 T_s 的 MMG 变换结果。

定义扁平结构元素 g 的宽度为结构元素向量的元素个数与分布式光纤测温的测点间距的乘积。为了从温度信号 T_s 中较好地提取出波峰的边沿信息, 结构元素的宽度应当与波峰边沿的宽度具有可比性。当波峰边沿的宽度一定, 而分布式光纤测温的测点间距变小时, 若要达到相同的波峰边沿辨识效果, 应保持结构元素宽度不变, 即应增加结构元素向量的元素个数。因此在实际应用中, 应综合考虑分布式光纤测温的测点间距和沿线温度信号中波峰边沿的宽度等因素, 选取合适的结构元素向量元素个数。假设分布式光纤测温的测点数量为 7 个/m, 结构元素向量的元素个数典型值可取 20, 即

$$g^+ = \left\{ \underset{20}{\underline{0}}, \underline{0}, \underline{1}, \underline{2}, \underline{3}, \underline{4}, \underline{5}, \underline{6}, \underline{7} \right\}, \quad g^- = \left\{ \underline{7}, \underline{6}, \underline{5}, \underline{4}, \underline{3}, \underline{2}, \underline{1}, \underline{0} \right\} \quad (6)$$

式中, 下划线标记点 $\underline{0}$ 为结构元素的原点位置。

图 6 给出了经高斯滤波后的导体层沿线温度及其 MMG 变换结果 M_T 的波形。

图 6 表明, 高斯滤波后的沿线温度波形中波峰的上升沿和下降沿经 MMG 变换后分别得到一个波峰和一个波谷, 两者相邻; 而非波峰部分经变换后呈水平纹波波形, 其值也较小。因此, 可根据 M_T 的大小以及 M_T 波形中是否存在相邻的波峰和波谷来确定沿线温度波形中是否存在波峰, 具体判断方法如下:

- a) 合理选取阈值 T_h , 消除 M_T 中噪声纹波影响。
- b) 连续 N 点以上的 M_T 值均大于 T_h 时, 判断为波峰; 连续 N 点以上的 M_T 值均小于 $-T_h$ 时, 判断为波谷; N 的典型值可取 3~5。

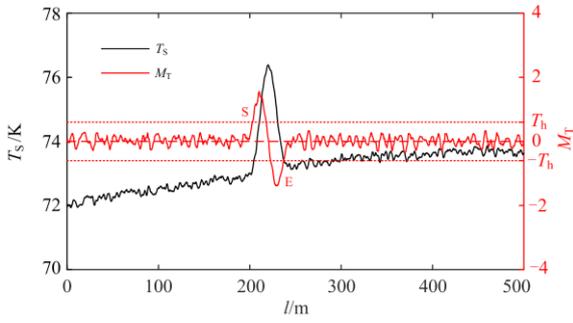


图 6 滤波后的沿线温度及其 MMG 变换结果

Fig. 6 Filtered temperature along the conductor layer and its MMG transformation result

c) 若 M_T 中同时存在波峰和波谷, 则沿线温度波形中存在波峰。

2) 波宽计算方法

局部失超发热区域宽度可由沿线温度波形中波峰的起点和终点确定。由于多分辨形态梯度 M_T 蕴含波峰的边沿特征, 故可由 M_T 计算值定位波峰的起点和终点。根据式(5), M_T 中波峰的起点比沿线温度波形中对应波峰的起点提前一个结构元素宽度出现, 而 M_T 中相邻波谷的终点比沿线温度波形中对应波峰的终点推迟一个结构元素宽度出现。因此, 一旦确定 M_T 波峰起点和波谷终点的位置坐标, 即可根据上述关联关系, 计算失超发热区域宽度。

由图 6 可知, 若以阈值 T_h 、 $-T_h$ 与 M_T 波形的交点(S 点和 E 点)作为其波峰起点和波谷终点存在一定偏差。为进一步提高计算精度, 并兼顾抗噪要求, M_T 波峰起点和波谷终点对应的阈值采用下述方法确定: 从 S 点向前拓展一个数据窗, 取数据窗内的 M_T 平均值为波峰起点的阈值; 由 E 点向后拓展一个数据窗, 取数据窗内的 M_T 平均值为波谷终点的阈值。将 M_T 值与上述阈值比较, 可得到 M_T 波峰起点和波谷终点的位置坐标 l_p 和 l_v 。计及结构元素宽度的影响, 进而可计算沿线温度波峰的宽度(即失超发热区域宽度) d , 如式(7)。

$$d = (l_v - d_g) - (l_p + d_g) \quad (7)$$

式中, d_g 为结构元素的宽度。

2.3 局部失超故障保护方案

超导电缆传输功率大, 如果突然切除, 可能造成大量负荷供电中断, 或导致大量负荷转供电, 引起其他支路潮流越域, 影响电网运行安全。因此, 当超导电缆因带材不均匀或部分损伤而局部失超, 形成失超发热区域时, 可根据局部发热的严重程度分别采用告警或跳闸等不同保护策略:

1) 告警: 如果局部发热程度较轻, 为避免超导

电缆突然切除对电网运行安全造成不利影响, 失超保护可发出告警信号, 并给出局部失超发热区域的相关信息, 以便运维人员采取减负荷或转供电等控制措施, 降低电缆运行风险。

2) 跳闸: 若局部发热严重, 则保护动作后发出跳闸命令, 及时切除超导电缆, 以避免造成进一步损坏, 或引发其他严重后果。

超导电缆局部发热严重程度可由失超发热区域温度以及发热区占电缆总长的百分比来综合表征。当由 2.2 节局部失超发热区域检测方法计算出失超发热区域的宽度和温度后, 可采用以下判据进行告警或跳闸, 其中, 式(8)为告警判据, 式(9)为跳闸判据。

$$(\sum d_i / L > r_1) U(T_{i.av} > T_L) \quad (8)$$

$$(\sum d_i / L > r_2) U(T_{i.max} > T_H) \quad (9)$$

式中: d_i 、 $T_{i.av}$ 和 $T_{i.max}$ 为第 i 个失超发热区域的宽度、平均温度和最高温度; L 为超导电缆长度; r_1 和 r_2 为失超区域宽度占比门限值; T_L 为低温阈值; T_H 为高温阈值。

综上, 超导电缆局部失超检测和保护方案的流程框图如图 7 所示。

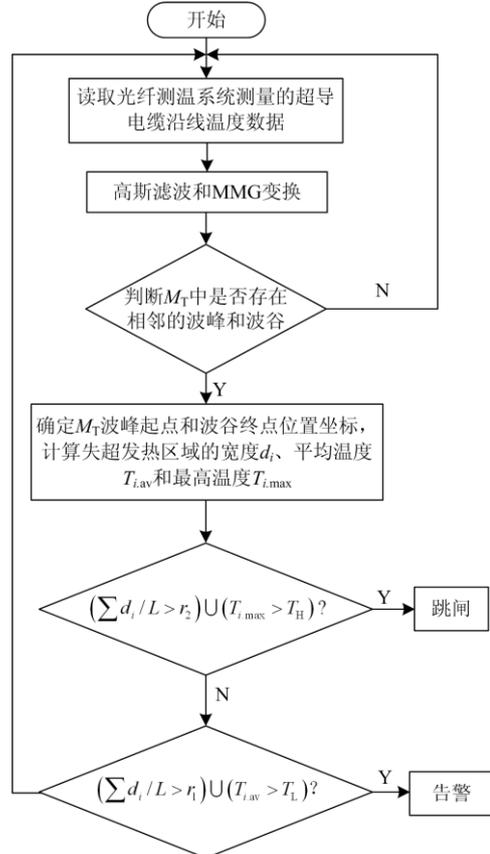


图 7 超导电缆局部失超检测和保护方案的流程框图

Fig. 7 Flow chart of local quench detection and protection scheme for superconducting cable

低温度阈值 T_L 按照躲过超导带材长期允许运行温度整定:

$$T_L = K_1 T_1 \quad (10)$$

式中, K_1 为可靠系数, 可取为 1.05~1.2。

为防止超导带材的超导电性发生改变, 高温阈值 T_H 可按不超过超导带材最高允许温度考虑:

$$T_H = T_2 / K_2 \quad (11)$$

式中, K_2 为可靠系数, 可取为 1.1~1.3。

3 仿真研究

3.1 仿真模型

为了验证所提保护方法的有效性, 以三相同轴超导电缆为例, 利用多物理场仿真软件 COMSOL 搭建其传热模型。超导电缆系统的制冷方式为单端制冷(液氮进出口在同一端), 液氮入口温度为 70 K, 最大允许温升为 6 K, 液氮流量为 0.3 kg/s, 电缆各部件的主要几何参数表 1 所示, 材料的热容和导热系数如表 2 所示。

表 1 超导电缆各部件的几何参数
Table 1 Geometric parameters of various components of superconducting cable

名称	单位/mm
内骨架内/外径	39.6/54
平滑层与绝缘层厚度	2.4
A 相导体层厚度	0.7
绝缘层厚度	3.4
B 导体层相厚度	0.7
绝缘层厚度	3.4
C 导体层相厚度	0.7
绝缘层厚度	2.2
铜屏蔽层厚度	0.3
保护层厚度	2
外骨架外径	150

表 2 超导电缆材料的热容和导热系数

Table 2 Thermal capacity and thermal conductivity of superconducting cable materials

名称	热容/J/(kg K)	导热系数/W/(m K)
绝缘材料	430	$0.04625 + 4.55785 \times 10^{-6} \times \exp(T / 11.03992)$
超导带材	385	400
液氮	$1727.27 + 4.142816 \times T$	$0.2753504 - 0.00178267 \times T$
骨架	475	44.5

注: T 为材料的实时温度。

3.2 仿真验证

为了全面评估所提局部失超检测和保护方法

的动作性能, 分别针对无局部失超、轻微局部失超和严重局部失超等情况进行了仿真分析。在仿真分析中, 测点数量设置为 7 个/m, 噪声幅值按超导电缆正常运行时最大温升的 10% 选取, 阈值 $T_h=0.6$, 失超区域占比门限值 r_1 和 r_2 分别选取为 3% 和 8%, 低温度阈值 $T_L=76 \times 1.05=79.8$ K, 高温阈值 $T_H=150/1.2=125$ K。受篇幅所限, 以下仅给出部分仿真结果。

3.2.1 无局部失超

仿真结果表明, 当超导电缆无局部失超故障时, 虽然不同负荷水平下其导体层沿线温度不同, 但不会出现波峰特征。图 8 给出的是电缆带额定负载(电流 2.5 kA, 电缆等效电阻 $8.4 \times 10^{-5} \Omega$) 时的导体层沿线温度和 MMG 变换结果 M_T , 图 9 为对应的有限元模型求解结果效果图。由图 8(b) 可知, 当超导电缆无局部失超故障时, 导体层沿线温度波形不存在波峰特征, 其 MMG 变换结果 M_T 不会大于阈值, 保护可靠不误动。

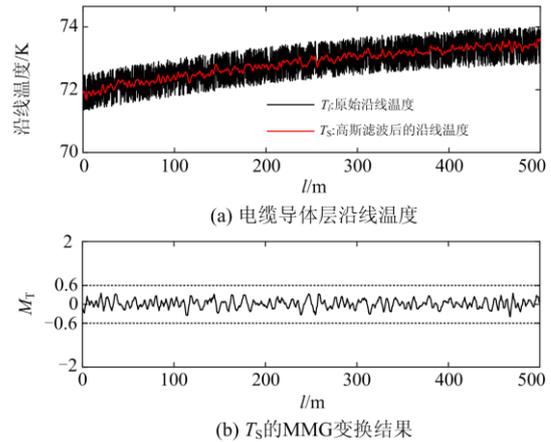


图 8 额定负载且无局部失超时的仿真结果

Fig. 8 Simulation results in case of rated load and no local quench

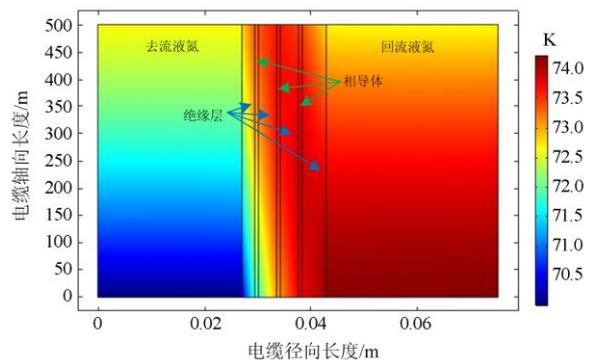


图 9 有限元模型求解结果效果图

Fig. 9 Effect diagram of finite element model solution result

3.2.2 轻微局部失超

图 10 给出的是超导电缆某处发生轻微失超故障时沿线温度变化曲线和 MMG 变换结果 M_T 。由图 10(a)不难看出,文中给出的高斯滤波算法不仅具有良好的消噪性能,同时也较好地保持了原始波形中的波峰边沿特征,从而有利于提高波形特征提取的准确性。图 10(b)为沿线温度 T_S 、MMG 变换结果 M_T 以及 T_S 波形中波峰的起点、终点和峰值点坐标计算结果。由此不难看出,MMG 变换结果 M_T 在失超点将超过阈值,可准确判断发生局部失超故障。同时,通过所确定的波峰起点和终点位置坐标,可计算出失超发热区域宽度占电缆长度的比例为: $(220.35-201.90)/500=3.69\%>3\%$,满足告警判据,保护可靠发出告警信号。

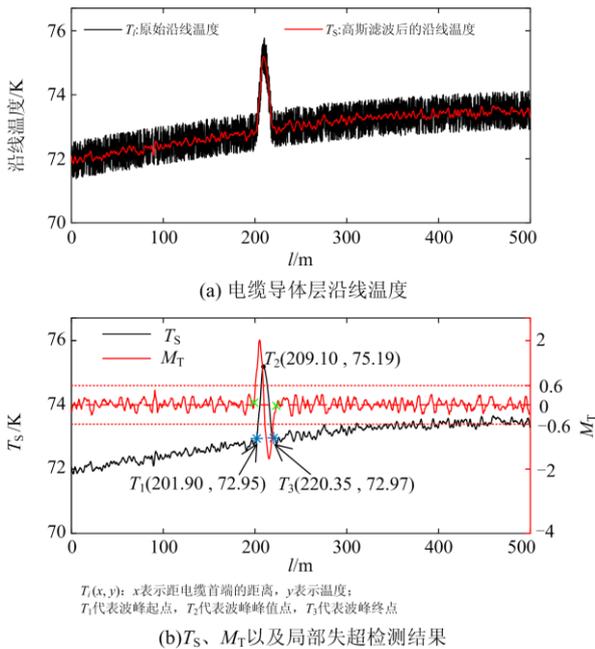


图 10 轻微局部失超时的仿真结果

Fig. 10 Simulation results in case of slight local quench

3.2.3 严重局部失超

假设超导电缆两处同时发生失超故障,其导体层沿线温度变化曲线和 MMG 变换结果 M_T 如图 11 所示。由图 11(b)可知,在两处失超区域,多分辨形态学梯度值 M_T 均超过阈值,可准确识别失超故障。同时,通过波峰起点和终点位置坐标,可计算出失超发热区域总宽度占电缆长度的比例为: $[(160.80-120.15)+(329.70-301.65)]/500=13.74\%$,满足跳闸判据,保护将发出跳闸命令,切除超导电缆。

上述仿真结果表明,在背景噪声较强的情况下,无论是发生局部轻微失超故障,还是发生多处严重失超故障,所提保护方法均可正确检测出每个

局部失超发热区域的位置和宽度,并可靠动作。

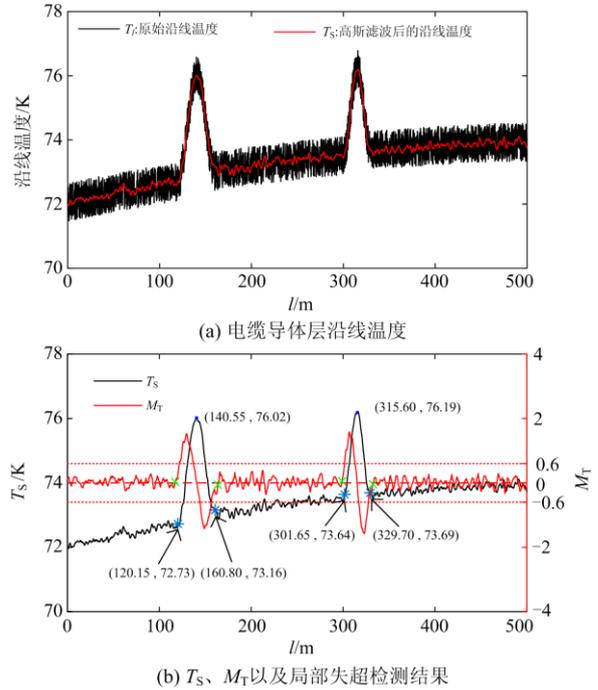


图 11 严重局部失超时的仿真结果

Fig. 11 Simulation results in case of serious local quench

4 结论

局部失超故障往往是造成超导电缆损坏的主要原因,但现有失超保护方法大多只能检测整体失超,而不能有效反映局部失超故障。本文根据超导电缆发生局部失超后导体层沿线温度的波形变化特征,提出了一种基于分布式光纤测温技术的超导电缆局部失超故障检测和保护方法,并通过数字仿真,验证了其有效性,主要结论如下:

- 1) 超导电缆正常运行时,其导体层沿线温度波形不存在波峰,但发生局部失超后,其导体层沿线温度波形在失超发热区域处形成一个波峰,可利用上述温度波形变化特征识别局部失超故障。
- 2) 高斯滤波可有效滤除原始导体层沿线温度波形中的大部分噪声,而且能够较好地保持原始波形的特征。MMG 技术能够正确辨识沿线温度波形中波峰的上下边沿,从而准确检测出局部失超发热区域的位置和宽度。
- 3) 仿真研究表明,本文所提出的失超检测和保护方法在无局部失超故障时可靠不动作,且不受负荷变化的影响;在发生局部失超故障时能正确检测出每个失超发热区域的位置和宽度,并根据故障严重程度进行告警或跳闸,可有效保证超导电缆运行安全。

参考文献

- [1] 杨军, 张哲, 尹项根, 等. 高温超导电缆在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 63-68.
YANG Jun, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Application of high temperature superconducting cable in power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 63-68.
- [2] 李红雷, 林一, 黄兴德. 高温超导电缆在大都市电网的应用前景[J]. 电力与能源, 2017, 38(3): 255-257.
LI Honglei, LIN Yi, HUANG Xingde. Application of high temperature superconducting cable in the metropolitan power grid[J]. Power & Energy, 2017, 38(3): 255-257.
- [3] 肖立业, 林良真. 超导输电技术发展现状与趋势[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 1-9.
XIAO Liye, LIN Liangzhen. Status quo and trends of superconducting power transmission technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 1-9.
- [4] 李诚, 张哲, 尹项根, 等. 高温超导电缆自动重合闸方案研究[J]. 继电器, 2007, 35(7): 15-18.
LI Cheng, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of auto-reclosure strategy for high temperature superconducting cable[J]. Relay, 2007, 35(7): 15-18.
- [5] 刘洋, 王倩, 龚康, 等. 基于超导磁储能系统的微电网频率暂态稳定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 101-110.
LIU Yang, WANG Qian, GONG Kang, et al. Transient stability control strategy of microgrid frequency based on SMES[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 101-110.
- [6] 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, 29(4): 4-7.
YANG Jun, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. On-line operation situation of first high temperature superconducting cable system in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 4-7.
- [7] 梁晓宇, 李海涛, 翟蕾, 等. 高温超导带材制备工艺的发展现状[J]. 低温与超导, 2019, 47(8): 1-9.
LIANG Xiaoyu, LI Haitao, ZHAI Lei, et al. The present situation of the preparation process for high-temperature superconducting tapes[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(8): 1-9.
- [8] 蔡磊, 张哲, 张勇刚, 等. 高温超导电缆监测与保护系统下层机单元的研制[J]. 继电器, 2005, 33(11): 55-58, 62.
CAI Lei, ZHANG Zhe, ZHANG Yonggang, et al. Developing the under-unit of the HTS cable's monitoring and protection device[J]. Relay, 2005, 33(11): 55-58, 62.
- [9] 杨军, 张哲, 尹项根, 等. 高温超导电缆保护研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 17-21.
YANG Jun, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Protection for high temperature superconducting power cable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 17-21.
- [10] 董大磊. 高温超导电缆监测与保护系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
DONG Dalei. The research of monitoring and protection system for HTS cable[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [11] 蔡磊. 高温超导电缆监测与保护系统研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
CAI Lei. The research and development of HTS cable's monitoring and protection system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [12] SUGIMOTO M, ISCONTO T, KOIZUMI N, et al. An evaluation of the inlet flow reduction for a cable in conduit conductor by rapid heating[J]. Cryogenics, 1999, 39(11): 939-945.
- [13] LVOVSKY Y, REY C M. Quench detection and stagnant normal zones in a large cryostable SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997, 7(2): 857-860.
- [14] NINOMIYA A, SAKANIWA K, KADO H, et al. Quench detection of superconducting magnets using ultrasonic wave[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(2): 1520-1523.
- [15] SEEBER B. Hand book of applied superconductivity[M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1998: 527-555.
- [16] HAUSNER B, SUAREZ F, GLANDER K E, et al. Calibrating single-ended fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data[J]. Sensors, 2011, 11(11): 10859-10879.
- [17] 孙峥, 刘晓丽, 朱士嘉. 利用光纤拉曼散射温度传感系统的电力电缆温度在线监测[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2009(2): 33-37.
SUN Zheng, LIU Xiaoli, ZHU Shijia. On-line monitoring for power cable with raman scattering optical fiber temperature sensor[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2009(2): 33-37.
- [18] FUKUZAWA T. DTSX200 distributed temperature sensor for oil and gas production[J]. Yokogawa Technical Report English Edition, 2012, 55(2): 77-80.
- [19] 宝旭峥. 110 kV 冷绝缘高温超导电缆优化设计与均流特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

- BAO Xuzheng. Optimal design and current sharing characteristics of 110 kV cold dielectric high temperature superconducting cable[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [20] 施方圆. 大电流高温超导线缆的载流分布及优化设计[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- SHI Fangyuan. The current-carrying distribution and optimization design of HTS cables[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012.
- [21] MASUDA T, YUMURA H, OHYA M, et al. A new HTS cable project in Japan[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 1735-1739.
- [22] 李安娜, 吴熙, 蒋平, 等. 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 137-142.
- LI Anna, WU Xi, JIANG Ping, et al. Research on identifying low frequency oscillation modes based on morphological filtering theory and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 137-142.
- [23] ZHANG A Q, JI T Y, LI M S, et al. An identification method based on mathematical morphology for sympathetic inrush[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 12-21.
- [24] 薛士敏, 崔淼. 基于形态学梯度算法的微电网行波保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 31-39.
- XUE Shimin, CUI Miao. Current traveling wave based protection scheme for microgrids using morphological gradient algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 31-39.
- [25] 付勇. 基于分布式光纤的电缆温度监测系统信号处理的研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016.
- FU Yong. The cable temperature monitoring system based on distributed optical fiber signal processing research[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2016.
- [26] 周封, 任贵新. 基于颜色空间变量的输电线图像分类及特征提取[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 89-98.
- ZHOU Feng, REN Guixin. Image classification and feature extraction of transmission line based on color space variable[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 89-98.

收稿日期: 2019-08-27; 修回日期: 2019-09-27

作者简介:

黄金朋(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为超导电缆保护与监控技术; E-mail: 1498991035@qq.com

张哲(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护和超导电力新技术。E-mail: zz_mail2002@163.com

(编辑 葛艳娜)