

# 基于热通道模型的电能表外置断路器温升研究

梁捷

(广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西南宁 530023)

**摘要:**为评估电能表外置断路器各部位热点的温升情况,研究了外置断路器处于稳态载荷时由内部热源向外的传热过程;然后基于热电比拟理论建立了断路器稳态热通道温升计算模型,给出了传热过程各环节的传导、对流和辐射热流量以及热阻的计算公式;最后通过建模仿真比较了不同负荷电流下所提方法与有限元模型对断路器内部导体热点温升的计算结果,验证了所提模型的有效性。

**关键词:**电能表用外置断路器;温升;热通道模型;热电比拟理论

中图分类号:TM561 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2018)06-0052-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.06.012

## Research on Temperature Rise of External Circuit - breaker for Electricity Meter Based on Heat Channel Model

Liang Jie

(Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530023, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of temperature rise monitoring for hot spot of external circuit - breaker for electricity meter, firstly, the heat transfer process of external circuit - breaker from the inside to the outside under steady - state load is analyzed. And then the steady - state thermal channel temperature calculation model for circuit breaker is established based on thermoelectricity analogy theory. The aspects of heat transfer conduction, convection and the radiation heat flux are given as well as thermal resistance formula. Finally, under different load current, the calculation results of the proposed method and the finite element model are compared through modeling and simulation for the the hot spot temperature rise of internal conductor of circuit breaker, which verifies the validity of the proposed model.

**Key words:** external circuit - breaker for electricity meter; temperature rise; heat channel model; thermoelectric analogy theory

## 0 引言

随着南方电网费控电能表和远程售电系统的建设应用,电能表用外置断路器(external circuit - breaker for electricity meter,以下简称EM断路器)成为实现远程拉合闸功能的重要设备<sup>[1]</sup>。研究影响其负载能力的脱扣器触头热点温升计算方法,可为EM断路器的负载能力和动态增容评估、避免过热失效提供技术基础<sup>[2]</sup>。EM断路器常见热点测温法包括直接法和间接算法。直接法测量时需要先将EM断路器封闭式绝缘外壳破坏,露出其中的脱扣器触头,再通过传感器探头接触式测温<sup>[3]</sup>,该方法测量准确但破坏设备绝缘后设备无法再使用。间接算法是通过电流、表面温升等易于测量的量间接

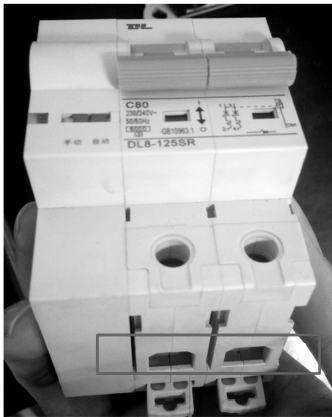
推算EM断路器的内部热点温升<sup>[4]</sup>。间接算法不需破坏绝缘,故在设备状态评估方面具有较强实用性。

常见断路器的温升间接算法包括有限元法<sup>[5]</sup>和热通道法<sup>[6]</sup>。有限元法需建立设备及其运行环境的准确模型,模拟EM断路器的工况,该法准确度较高,但设备结构复杂时建模工作量大且计算速度较慢,适用于产品设计和理论分析阶段。等效热通道模型法将设备自身与周围环境的热传递过程等效为一个分布参数热通道模型,易于实现。

下面在分析EM断路器传热过程的基础上,建立在不同负荷电流下的基于等效热通道的稳态热点计算模型,并通过案例与有限元法进行比对,验证所提方法的有效性。

# 1 传热流程的理论分析

EM 断路器通常与电能表安装在同一表箱内, 可通过电能表发出的开关控制信号控制其分、合闸, 相对于传统微型空气开关, 它不仅有简单的过流保护功能, 还增加了欠费分闸、分合闸状态反馈等费控辅助功能。它的主要结构包括外壳、操作机构、动静触头、脱扣器等, 某型号单相电能表用外置断路器如图 1 所示。



外壳金属部分

图 1 某电能表用外置断路器

## 1.1 传热流程分析

EM 断路器产生的热量主要源于其内部脱扣器和触头等导体的通电热效应, 并通过热的 3 种传递方式由自身传导到周围空气中。其传热过程如图 2 所示。当 EM 断路器有负荷电流流过时, 由焦耳定律可知, EM 断路器的火线(L) 和零线(N) 回路的电能功耗转化为热能。热能经导体、内部气隙与外壳间的热对流以及导体与外壳间的热辐射, 被传到外壳金属部分的内壁上。外壳内壁的累积热量通过热传导传递至外壳表面, 最后经由外壳与周围空气间的热辐射和热对流, 把热量传到周围的空气中。当负载电流、空气温度等条件不发生变化, 热量的产生和耗散相等时, 温度场达到平衡。

## 1.2 热电比拟理论

热量传递可描述为能量由高温体传递至低温体的过程。与电学的欧姆定理相似, 由傅里叶导热定律, 传导的热量可用温度的比例关系定量描述为<sup>[7]</sup>

$$Q = A \frac{\lambda}{\delta} \Delta T = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为传递的热量,  $W$ ;  $\lambda$  为热导系数,  $W/m^2$ ;  $\delta$

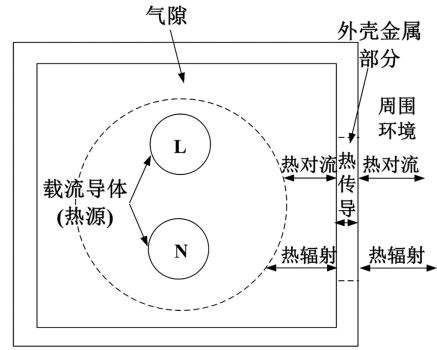


图 2 EM 断路器热量传递流程

为载流导体的厚度,  $m$ ;  $R_T$  为热阻系数,  $m^2 \cdot K/W$ ;  $\Delta T$  为热传递双方的温差,  $K$ 。热通道中热量传递与电路中电流回路类似, 热量传递时的等值热通道模型遵守类似于电路中的基尔霍夫定律。计算时首先由热电比拟理论按各传热环节的热传递方式, 求取热传导、热辐射、热对应对应的热导系数等参数, 建立基于热通道的热点温度计算模型, 再将热源热量代入该模型求解出断路器内部热点温度。

# 2 计算方法

## 2.1 稳态热通道模型

由图 2 的热量传递流程, 根据热电比拟理论可建立 EM 断路器稳态热通道模型如图 3 所示。

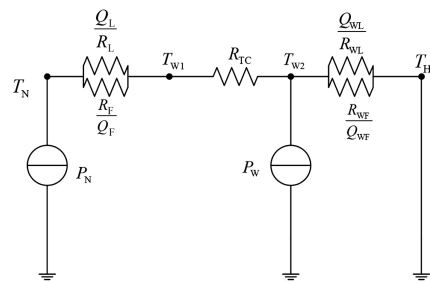


图 3 EM 断路器稳态热通道模型

图 3 中:  $P_N$  为 EM 断路器内部导体的稳态载流功耗;  $P_w$  为外壳功耗;  $T_N$  为内部导体的热点温度;  $T_{w1}$  和  $T_{w2}$  分别为 EM 断路器外壳内外金属壁温度;  $T_H$  为周围的环境温度;  $Q_L$  和  $Q_F$  分别为内部导体与外壳间气隙的对流和辐射传递热量;  $R_L$  和  $R_F$  分别为对应的对流热阻和辐射热阻, 由于这段较小的距离内两者同时存在, 故以并联关系表示;  $R_{TC}$  为热量从外壳内表面传到外表面的传导热阻;  $R_{WL}$  和  $R_{WF}$  分别为外壳与周围空气间的对流热阻和辐射热阻;  $Q_{WL}$  和  $Q_{WF}$  分别为外壳与周围空气间的对流和辐射传递热

量。由此可见,若要求得EM断路器内导体的热点温升,须先求出载流导体的功耗和各个热传递环节的热阻等建模参数。

### 2.2 EM断路器导体功耗

由热力学第一定律,EM断路器的载流导体功耗可在导体建立能量守恒方程计算,方法可参考文献[8]。

### 2.3 导体与外壳间换热

EM断路器的内部金属触点等导体与外壳间热量传递的主要形式为内部气隙层的对流和辐射热量传递。

#### 1) 对流热量传递

EM断路器内部载流导体发出的热量通过内部气隙向外壳通过对流方式传导的热量<sup>[9]</sup>

$$Q_L = \alpha A_0 (T_N - T_f) \quad (2)$$

式中: $Q_L$ 为热对流的传热量; $\alpha$ 为对流换热系数; $A_0$ 为对流散热面积; $T_N$ 为热源温度; $T_f$ 为内部气隙温度,近似等于外壳内表面温度。则对流热传递的热阻 $R_L$ 可通过所传递的对流热量和内部导体与外壳金属部分内表面之间的温差表示:

$$R_L = \frac{T_N - T_f}{Q_L} \quad (3)$$

#### 2) 辐射换热量

对电能表用外置断路器,内部热源对外壳的热辐射主要与内部载流导体的位置、导体和外壳的尺寸有关,则热辐射传递的热量为

$$Q_F = 5.7\varepsilon \left[ \left( \frac{T_N}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_f}{1000} \right)^4 \right] \quad (4)$$

式中: $Q_F$ 为热辐射的传热量; $\varepsilon$ 为辐射系数。则内部导体与外壳间的辐射热阻 $R_F$ 为

$$R_F = \frac{T_N - T_f}{Q_F} \quad (5)$$

### 2.4 外壳传导热量

EM断路器外壳导体大多为规则立方体,多选导热性良好的铝为材料,为便于计算,假设整个立方

体壁面的稳态热流量为恒定值,由傅里叶热传导基本方程可知,在单位长度上的热流密度为

$$q_c = -\lambda_l \frac{dT}{dX} \quad (6)$$

式中: $q_c$ 为单位长度上的热流密度; $\lambda_l$ 为外壳金属材质的导热系数; $dT/dX$ 为单位长度上的温度微变量。则通过外壳导体的热流量 $Q_c$ 为

$$Q_c = Vq_c \quad (7)$$

式中, $V$ 为外壳金属部分的体积。则外壳热传导的热阻 $R_{TC}$ 为

$$R_{TC} = \frac{T_{W1} - T_{W2}}{Q_c} \quad (8)$$

### 2.5 外壳与空气间换热

EM断路器的外壳直接与周围环境的空气接触,其金属部分具有较好的传热性能,类似内部热源通过气隙与外壳内壁的热交换过程,外壳收到从内部传来的热量后主要通过对流和辐射的方式将热量传导至周围空气中,计算方法可参考第2.3节。

## 3 算例仿真和分析

### 3.1 计算过程

对前面节所述的3个热传递过程,根据热电比拟理论和历史热点测量数据通过Matlab建模逐过程计算内部导体温升及外壳内外温升。以外壳外表面热点温度为例,其计算流程见图4。

### 3.2 算例分析

为测试所提温升计算方法的准确性,以某级数为2P的单相EM断路器为模型,分别建立所提热通道和有限元<sup>[5]</sup>(finite element mode, FEM)数值计算模型,断路器内部导体直径、厚度分别为56 mm、10 mm;外壳宽度、厚度分别为89 mm、45 mm;额定电流是80 A;环境起始温度是28℃,周期空气流速恒为平行于外壳1.8 m/s;外壳金属部分的电阻率为

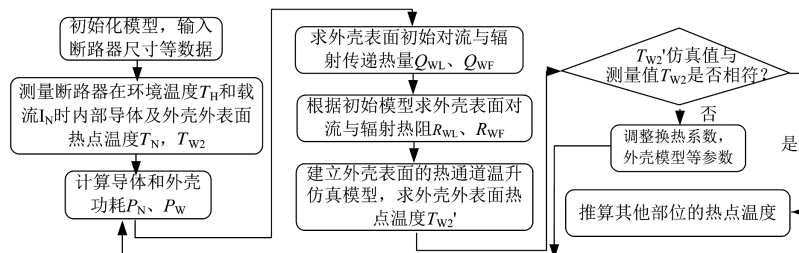


图4 EM断路器外壳外表面温升计算过程

$2.9 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ , 内部导体电阻率为  $2.6 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ , 脱扣器触头电阻取  $30 \mu\Omega$ ; 考虑到单相电子式费控电能表的有效电流测量范围为  $5 \sim 80 A$ , 对 EM 断路器电流回路逐点施加  $5 A$ 、 $15 A$ 、 $35 A$ 、 $55 A$ 、 $75 A$ 、 $80 A$  电流, 计算在不同负载电流时 EM 断路器内部触点导体与外壳金属部分的热点温度。FEM 与所提热通道模型计算结果如图 5。

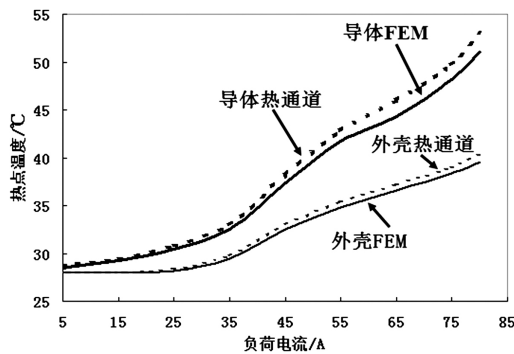


图5 不同负载电流时热点温度计算结果

由图5可见, EM 断路器内部触点导体与外壳金属部分的热点温度随负载电流的增大而增大, 由于导体为热源, 其热点温度均高于外壳。负荷电流小于  $10 A$  时, 外壳与触头的温升变化不明显, 随负荷电流增大, 触头与外壳热点的温升逐渐增高, 且增幅逐渐加大。在负荷电流为  $80 A$  时, FEM 模型求得的导体热点温升是  $23.0^\circ C$ , 外壳温升是  $11.6^\circ C$ , 计算时间为  $20.5 s$ ; 所提热通道法求得的导体热点温升是  $25.0^\circ C$ , 外壳热点温升是  $12.3^\circ C$ , 计算时间为  $17.1 s$ , 最大温升均满足技术规范要求<sup>[10]</sup>。所提方法与 FEM 法相比的误差较小, 不超过  $8.6\%$ , 计算速度比 FEM 法稍快。

## 4 结 语

在分析电能表用外置断路器通以恒定电流时由内向外的热传导过程的基础上, 基于热电比拟理论建立了 EM 断路器的热通道热点温升计算模型。通过建模仿真比较了在不同的负荷电流下, 所提热通道法和有限元法对内部导体和外壳热点温升计算的结果可知, 由于所提模型在计算模型参数时对传热

学公式做了近似处理, 故求得的温升误差相比于有限元法略大, 但最大误差不超过  $8.6\%$ , 且计算速度稍快。如何提高其计算准确度, 使计算结果满足断路器状态监测和负载能力评估的应用需求, 值得进一步研究。

## 参考文献

- [1] 张培, 姜家寅. 电能表外置断路器的应用[J]. 农村电工, 2017(3): 51-51.
- [2] 李兴文, 王云峰, 原帅, 等. 微型断路器短路开断过程中电极烧蚀特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1080-1087.
- [3] 王静, 胡景泰, 胡应龙, 等. 断路器接线端子温度监测技术[J]. 电器与能效管理技术, 2013(15): 11-14.
- [4] 宗兆科, 史华宁. 高海拔环境对万能式断路器温升影响的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(11): 19-22.
- [5] 纽春萍, 董得龙, 孙昊, 等. 万能式断路器短时耐受电流的有限元分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 85-90.
- [6] 孙凯祺, 刘浩, 傅晨钊, 等. 220 kV 瓷柱式断路器修正热路模型研究[J]. 华东电力, 2013, 41(6): 1215-1219.
- [7] 刘梦佳, 孙逢瑞, 刘莉, 等. 基于稳态 Fourier 定律的过热蒸汽吞吐焖井时间计算方法[J]. 石油化工应用, 2016, 35(11): 25-28.
- [8] 戴水东, 鞠文哲, 夏克文, 等. 采用 PSO 算法对低压断路器的低能耗优化设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 100-106.
- [9] 朱琳, 王励, 石伟. 机车车轮对流传热系数计算[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(1): 21-24.
- [10] 电能表外置断路器技术规范: Q/GDW 11421-2015 [S] 2016.

作者简介:

梁捷(1987), 工学硕士、工程师, 主要从事电能计量管理方面的工作。

(收稿日期: 2018-06-26)