

万能式断路器短时耐受电流的有限元分析

纽春萍,董得龙,孙 昊,宁嘉琦,杨 飞,吴 翊,荣命哲

(西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要: 以某型号万能式断路器的主触头系统为研究对象,采用导电桥模型模拟触头间的微观接触,建立电动稳定性和热稳定性的计算模型,对触头电动斥力以及触头温升进行了定量分析。在此基础上,校核断路器短时耐受电流能力。在电动稳定性计算中,考虑涡流的影响,采用三维电磁瞬态分析,对触头电动斥力进行了定量的分析。在热稳定性计算中,利用改进的导电桥模型获得了瞬态温度场的仿真结果。根据已建立的模型分别考虑了移动转轴孔的位置和增大触头终压力 2 种方案对短时耐受能力的影响,并给出了具体的优化方案。

关键词: 断路器; 短时耐受电流; 电动稳定性; 热稳定性; 有限元法

中图分类号: TM 561

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.015

0 引言

低压断路器作为配电系统中的重要电器元件之一,其作用是防止配电网和工业设备因过载和短路等故障而损坏^[1-2]。万能式断路器作为低压电器中的典型产品,一般位于低压配电网络保护特性配合的较高端,是配电系统中的重要设备。

根据 IEC60947 和 GB14048 规定,万能式断路器属于 B 类低压断路器,是一种有选择性保护的低压断路器^[3]。为了获得选择性保护,B 类断路器具有三段保护特性,即过载、短路短延时和短路瞬时;与 A 类相比多了短路短延时的特征区间,表征这个特征的一个重要参数是短时耐受电流 I_{cw} 。

万能式断路器短时耐受能力主要依赖于动静触头间良好的接触状态。国外学者围绕电接触的微观现象进行了大量研究^[4-5],但这些研究往往关注孤立触头系统,并未针对断路器的短时耐受能力开展工作。国内学者也一直尝试利用数值模拟的方法来研究电接触过程^[6-8],针对开关电器的电动稳定性和热稳定性进行了相关的研究;文献^[3]采用稳态电磁分析方法研究了影响万能式断路器电动斥力的因素,但未考虑交流短路电流下涡流效应的影响;文献^[8]通过有限元法计算隔离开关在闭合状态下的接触深度和接触半径,并利用二维有限元分析对隔离开关进行了热电耦合分析,该方法适用于点-面接触问题,对于万能式断路器的触点形状(面-面接触)却不适用。

本文以某型号单断点万能式断路器为研究对象,建立电动稳定性和热稳定性的计算模型,采用导

电桥模型模拟触头间的微观接触,利用 ANSYS 三维瞬态电磁场分析及温度场分析,对短路电流情况下触头电动斥力以及触头温升进行定量分析,在此基础上对断路器的短时耐受电流进行校核,为产品的设计提供方法和依据。

1 短时耐受电流计算方法

1.1 研究对象

本文研究对象为单断点万能式断路器,其设计额定短时耐受电流为 125 kA。由于样机模型的触头及灭弧系统具有对称性,可选取模型的一半进行分析,如图 1 所示。考虑到短时耐受电流校核包含电动稳定性和热稳定性 2 个方面,分别建立相应的分析模型。

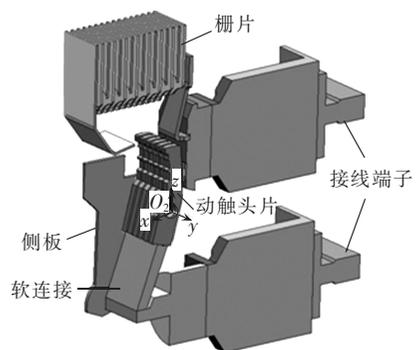


图 1 触头灭弧系统 1/2 对称模型

Fig.1 1/2 symmetry model of contact arc extinguishing system

短时耐受电流能力主要考察断路器处在闭合状态下动静触头的接触状况。因此,动静触头闭合状态模型的确定是保证仿真分析正确性的前提。框架断路器合闸时,动触头先绕其转轴 O_1 (图 1 未标示)拍向静触头;动、静触头接触后,动触头片再绕其转轴 O_2 反向转动,在触头弹簧的作用下走完触头超程,直至稳定接触。可通过三维造型软件 UG 实现动、静触头闭合状态的确定;亦可通过 ADAMS 进行断路器的机构运动分析^[9],导出处于闭合状态的断路器模型。

收稿日期:2013-04-14;修回日期:2013-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51007072);中国博士后基金资助项目(20110490168,2012M512002);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51007072), China Postdoctoral Foundation (2011-0490168,2012M512002) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities

1.2 电动稳定性计算

电器中的载流导体会受到电动力的作用。由于电动力与电流瞬时值的平方成正比关系,短路电流产生的电动力效应将非常严重。通过电磁分析,对动触头在承载额定短时耐受电流时所受到的电动斥力进行计算,作为评判万能式断路器电动稳定性的重要判据。

作用在闭合状态触头上的电动斥力包括导电回路中因流过异向电流而产生的洛仑兹力,以及触点间由于电流收缩作用产生的 Holm 力^[10]。万能式断路器的动触头普遍采用并联触指结构,动触头片模型如图 2 所示。

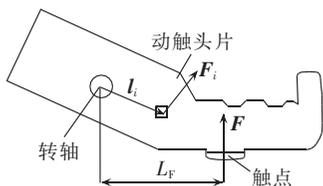


图 2 动触头片模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of movable contact

本文采用圆柱导电桥模型模拟动静触头间的电流收缩现象,其材料属性与触头材料相同,其高度 h 一般在几 μm 到几十 μm 之间,本文取 $50\ \mu\text{m}$,其横截面半径 r 由 Holm 公式^[11]计算得到,见式(1)。

$$r = \sqrt{\frac{F}{\pi \xi H}} \quad (1)$$

其中, F 为触头终压力; H 为材料布氏硬度; ξ 为触头表面接触系数,其值一般为 0.3~0.6。

结合短路电流方程^[12],流过万能式断路器的 A 相短路电流可用式(2)表示:

$$i = \sqrt{2} I [\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-R_1 t/L}] \quad (2)$$

其中, I 为短路电流周期分量有效值; ψ 为短路瞬间电压相角; φ 为功率因数角; R_1 为线路等效电阻; L 为线路等效电感。

当 $\psi - \varphi = -\pi/2$ 时,短路电流峰值最大。由功率因数角的概念易知 $\varphi = \arctan(\omega L/R)$,根据 GB14048.1 规定,当 I 大于 50 kA 时线路的功率因数取 0.2,可得 $R/L = 20.4\pi$ 。式(3)示出了应用于三维电磁瞬态计算中的电流方程。

$$i = \sqrt{2} I [-\cos(100\pi t) + e^{-20.4\pi t}] \quad (3)$$

基于有限元分析获得动导电杆中各单元的电流密度和磁感应强度,然后计算每片动触头片围绕其转轴的斥力矩,再归算到触点中心的电动斥力如式(4)^[13]所示。

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \int L_F \times (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dv = \sum L_i \times (\mathbf{J}_i \times \mathbf{B}_i) V_i \\ \mathbf{F} = \mathbf{M} / L_F \end{cases} \quad (4)$$

其中, \mathbf{M} 为斥力矩; \mathbf{F} 为归算后的电动斥力; L_F 为电

动斥力归算力臂; \mathbf{J}_i 、 \mathbf{B}_i 、 L_i 和 V_i 分别为第 i 单元的电流密度、磁感应强度、位置矢量和体积。

1.3 热稳定性计算

触头间的接触电阻远大于导电回路其他部分的电阻,当短路电流通过时,由于接触电阻的存在,触头系统热损耗功率很大,易发生熔焊。本文从额定短时耐受电流条件下触头温升计算出发,建立万能式断路器的热稳定性校核模型。

1.3.1 热计算模型

开关电器产生的热损耗通过传导、对流和辐射 3 种形式散失到周围介质中^[14]。由于断路器的内部结构较为紧凑,导电回路均被绝缘材料包围,内部空气对流缓慢,同时考虑到短时耐受电流持续时间很短(1 s),本文在进行热分析时只考虑导体的热传导作用,忽略对流和辐射的影响。

万能式断路器的热源主要来自导电回路产生的焦耳热损耗 Q :

$$Q = K_f I^2 R t$$

其中, K_f 为考虑交变电流的集肤效应和邻近效应对电阻影响的附加损耗系数。若短路电流有效值 $I = 125\ \text{kA}$,断路器单相导电回路的电阻 $R < 25\ \mu\Omega$,通电时间 $t = 1\ \text{s}$,不考虑附加损耗的影响,则焦耳热量损耗 $Q < 390.6\ \text{kJ}$ 。如果所有焦耳热均被导电回路吸收,且已知单相导电回路含铜量约为 10 kg(铜的比热容为 $386\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$),可大致求得导电回路的平均温升 ΔT 为 101 K。根据实验方法并结合流体相似理论^[15]得出的断路器对流换热系数 c_h 一般为 $10\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 左右,导电回路的表面积 A 约为 $0.16\ \text{m}^2$,根据牛顿冷却公式可知单位时间内的传热量 Φ 为:

$$\Phi = qA = c_h \Delta T A = 10 \times 101 \times 0.16 = 161.6\ (\text{W}) \quad (5)$$

由上述计算结果可知,导电回路向外界散热几乎可以忽略不计;将短时耐受电流试验过程假定为绝热问题,对结果影响不大。

万能式断路器内部三维热传导微分方程、初始条件和边界条件为^[16-17]:

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \\ T|_{t=0} = T_0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_w - T_f) \end{cases} \quad (6)$$

其中, ρ 为材料密度; c 为材料的比热容; T 为断路器的温度; λ 为材料的导热系数; q_v 为单位体积内热源的生成热; t 为计算时间; T_0 为 $t = 0$ 时刻物体的温度; α 为对流换热表面传热系数(绝热过程该值为 0); T_w 为发热体的表面温度, T_f 为环境温度。

在热稳定性的计算中,动、静触点间除了有电流流过外,还伴有强烈的传热过程。热力学中也存在“热接触”的问题。考虑到动、静触点间接触面的温

度相当高,微小气隙中的热辐射作用明显增长,会使总的导热效果加强^[18]。为了更准确地描述热传导过程的接触问题,本文对电磁计算中的导电桥模型进行了改进:在动、静触点间导电桥模型周围增加了一个传导热量的薄层,用以模拟触点间的传热过程,相应材料属性按照触点材料选取,如图 3 所示。

1.3.2 计算方法

交流短路电流下,受邻近效应的影响,各并联触指的触点间电流分布不均,其焦耳热损耗不同,因而温升不同,故触点材料的电阻率变化也不一致。如此循环,这是一个复杂的电磁-热耦合问题。鉴于接触电阻引起的焦耳热由短路电流的有效值决定,本文选用谐波电磁场分析方法并结合瞬态温度场分析,以确定焦耳热损耗及温度场的分布情况,计算流程如图 4 所示。为考核断路器在额定短时耐受电流条件下的热承载能力,本文计算 1 s 内触头温升的变化情况。考虑到热分析的非线性,为保证计算精度及仿真效率,瞬态耦合场分析的载荷步长适当取小些,并在温度场分析中选取多个子步长进行求解。

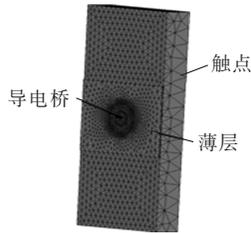


图 3 热分析中的接触模型
Fig.3 Contact model of thermal analysis

次编号为 1—6。图 5 和图 6 分别为不同动触头片所受电动斥力及其峰值。

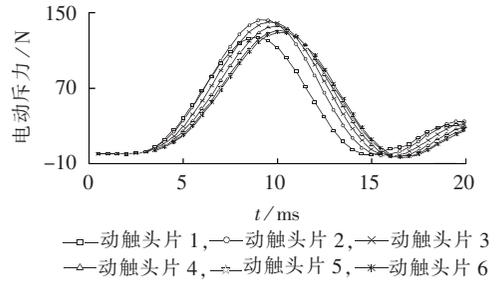


图 5 电动斥力随时间变化曲线

Fig.5 Variation of electric repulsion force along with time

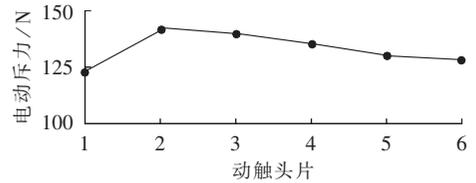


图 6 电动斥力的峰值

Fig.6 Peak value of electric repulsion force

从上述计算结果可知:交流短路电流流过触头时,不同动触头片所受电动斥力的数值和相位不同;各动触头片所受电动斥力峰值大小不同。

为了防止触头系统在短路电流作用下,由于电动斥力使触头斥开,可提高触头弹簧压力使之大于电动斥力并留有一定的裕量,来保证电动稳定性。然而,一味地增加触头弹簧压力会给操作机构带来负担,有一定的限制。提高电动稳定性的方法,将在下文进行分析。

2.2 热稳定性计算结果

触头回路加载短路电流周期分量有效值为 125 kA 正弦电流,在 $t=1$ s 时刻,计算终止,触头温升的分布情况(1/2 对称模型)如图 7 所示。

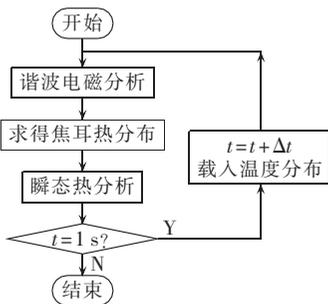


图 4 热稳定性计算流程图

Fig.4 Flowchart of thermal stability calculation

万能式断路器承受 1 s 短路电流的热作用,触点温度会升至很高,甚至达到材料的熔点 960°C 。在如此大的温度变化范围内,材料物理性能参数的变化较大,对触头温升的影响将不能忽视。本文考虑触头材料及铜排的电阻率、比热容、热导率和密度参数随温度的变化,具体参见文献^[19-20]。

2 计算结果

2.1 电动稳定性计算结果

在短路电流有效值 $I=125$ kA 的条件下,选取时间步长为 0.5 ms,计算 20 ms 内各动触头片所受电动斥力。该万能式断路器共有 12 片动触头片,现对其 1/2 模型中的 6 片动触头片及触点从外侧向内侧依

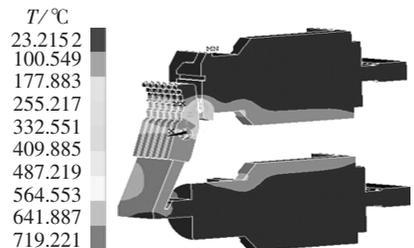


图 7 导电回路温度分布图 ($t=1$ s)

Fig.7 Temperature distribution of conductive loop ($t=1$ s)

由图 7 可见, $t=1$ s 时刻,温度最高点出现在最外侧触头的导电桥中心,温度为 1173.5°C (室温 20°C),超出了触点材料的熔点,表明此种情况下触头极易发生静熔焊。导电桥周围动、静触头部分的温度梯度非常大,随着离触头系统距离增加,断路器接线端子处的温度略高于室温。

在交流短路电流下,受邻近效应的影响,流过各个并联触头的电流并不相同,相应的焦耳热损耗也不同,这使得各并联触头的温升也不一致。表 1 给出了 $I=125\text{ kA}$ 时各个并联触头的触点在 $t=1\text{ s}$ 时刻的最高温度。

表 1 各并联触头的最高温度 ($t=1\text{ s}$)

Tab.2 Maximum temperature of parallel contacts ($t=1\text{ s}$)

触头	最高温度/°C	触头	最高温度/°C
1	1173.5	4	1108.2
2	1165.5	5	1082.4
3	1136.4	6	1071.0

从表 1 可见,最外侧触点温升最高,从外到内的触点温升逐渐降低。影响触头温升的因素主要是流过各并联触头间的电流及其接触电阻:一方面,受邻近效应的影响,总体而言,外侧触头的电流热效应 I^2t 要比内侧大;另一方面,虽然有些触头间的电动斥力较大,但根据工程上接触电阻的经验公式 $R_j \propto |F|^{-m}$ (m 与接触面变形的情况有关,一般在 $0.5\sim 1$ 之间)^[12],各触头间的接触电阻相差量的影响因素所占比重不大。这 2 个方面的综合影响使得触点温升从外侧到内侧逐渐降低,但相差不大。

图 8 示出了最外侧触头 1 温度最高点的温升随时间变化的曲线,用以了解触点温度随时间变化的过程。由图 8 可见,触头温升的变化可大致分为 2 个阶段:在 $0\sim 0.1\text{ s}$ 时段,触头温升上升很快;在 $0.1\sim 1.0\text{ s}$ 时段,随着热平衡过程的建立,触头温升上升减缓。

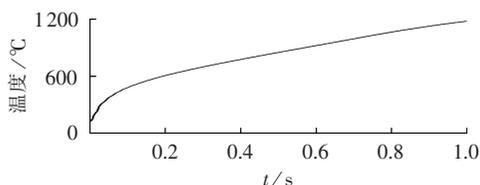


图 8 1 号触头温度最高点的温升曲线

Fig.8 Temperature rise at peak point of contact No.1

3 2 种提高短时耐受性能方法的仿真分析

为提高万能式断路器的短时耐受性能,可从以下方面考虑:增加动触头并联支路数;移动动触头转轴孔位置;增大触头终压力;选取合适的触头材料等。本文主要分析移动动触头转轴孔位置和增大触头弹簧压力 2 种方法对降低触头电动斥力和温升的作用。

3.1 转轴孔位置的影响

图 9 为动触头片转轴孔位置示意图,原模型动触头片转轴孔在位置①,现沿着图中虚线将转轴孔分别向位置②、③移动。由理论分析可知,当转轴孔向触头方向移动时,能够提高触头电动斥力中的补偿力,各动触头片所受电动斥力会减小;反之,各动触头片所受电动斥力将增大。

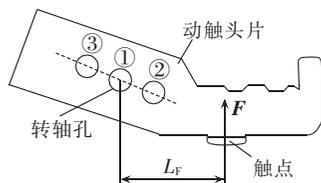


图 9 转轴孔位置示意图

Fig.9 Schematic diagram of shaft hole position

考虑转轴孔位置改变会影响触头弹簧的安装位置及压缩量的大小,其尺寸不能做较大的改动。利用已建立的动静触头闭合模型计算了转轴孔由位置①移动 2 mm 至位置②时的触头电动斥力,图 10 给出了转轴孔位于位置①、②时的最大触头电动斥力。

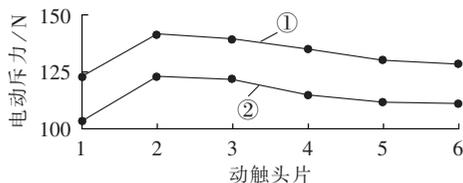


图 10 转轴孔在位置①、②时触头最大电动斥力的比较

Fig.10 Comparison of maximum contact electric repulsion force between shaft hole position ① and ②

从图 10 可见,动触头片转轴孔位置的变化将大幅改变其所受电动斥力的大小;当转轴孔向触头方向移动 2 mm 时,单片动触头(触头 2)所受最大电动斥力从 142 N 减小到 123 N 。

对触头温升进行仿真计算,得出 $t=1\text{ s}$ 时各触点最高温度分布如图 11 所示。由图 11 可见,通过改变动触头转轴孔的位置,电动斥力减小,触点间的接触压力增大,从而降低了温升。

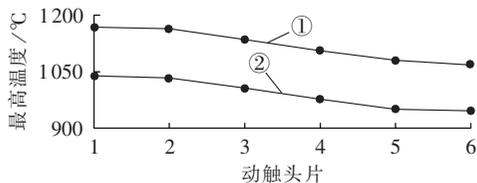


图 11 转轴孔在位置①、②时各触点最高温度分布

Fig.11 Maximum temperature distribution of different contacts when shaft hole at position ① and ②

3.2 增大触头弹簧压力

在断路器的设计中,触头弹簧压力是一个关键的设计参数,压力太大会增加操作力,对机构造成很大的负担;压力太小又会引起接触电阻的增大,导致触头系统发热问题严重。利用已建立的模型计算了每片动触头的触头终压力增大 15 N 后断路器的热稳定性,各触点的最高温度分布如图 12 所示。

从图 12 中可以看出,随着触头终压力的增大,断路器动、静触点间的接触电阻减小,导致触头温升降低,但降低的幅度有限。

总之,增大触头弹簧压力和将转轴孔位置向触点

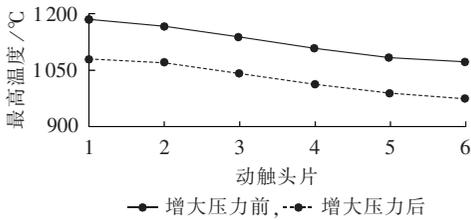


图 12 各触点最高温度分布

Fig.12 Maximum temperature distribution of different contacts

侧移动,均是为了增大动、静触头间的净压力,同时降低触头温升。在具体的产品设计过程中,可结合 2 种方案提高断路器短时耐受电流性能。

4 结语

本文以单断点万能式断路器为研究对象,应用 ANSYS 有限元软件分析其短时耐受电流性能,提出了万能式断路器闭合状态的建模思想,给出了瞬态电磁分析计算触头电动斥力的原理及方法,应用谐波磁场分析方法结合瞬态温度场分析求解触头温升分布。在此基础上,对提高电动稳定性和热稳定的方案进行仿真分析,给出了具体的性能优化方案。

参考文献:

- [1] 曾庆军,金升福,黄巧亮,等. 关于万能式断路器智能控制器[J]. 电力自动化设备,2004,24(2):79-83.
ZENG Qingjun, JIN Fusheng, HUANG Qiaoliang, et al. On intelligent controller of conventional circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2): 79-83.
- [2] 陈海昆,李晨辉,全学辉,等. 提高 DW15 万能式断路器运行可靠性的研究[J]. 低压电器,2009(17):55-57,66.
CHEN Haikun, LI Chenhui, QUAN Xuehui, et al. Research on improving operational reliability of DW15 ACB[J]. Low Voltage Apparatus, 2009(17): 55-57, 66.
- [3] 刘颖异,陈德桂,李兴文,等. 用三维有限元方法分析与研究影响框架断路器电动斥力的因素[J]. 中国电机工程学报,2005,25(16):63-67.
LIU Yingyi, CHEN Degui, LI Xingwen, et al. Research on factors affecting electro-dynamic repulsion force in air circuit breaker with the method of 3-D finite element[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 63-67.
- [4] BOYER L. Contact resistance calculations: generalizations of Greenwood's formula including interface films[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24(1): 50-58.
- [5] MONNIER A, FROIDUROT B, JARRIGE C, et al. A mechanical, electrical, thermal coupled-field simulation of a sphere-plane electrical contact[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2007, 30(4): 787-795.
- [6] LEIDNER M, SCHMIDT H, MYERS M, et al. A new simulation approach to characterizing the mechanical and electrical qualities of a connector contact[J]. European Physical Journal Applied Physics, 2010, 49(2): 22909-22919.
- [7] 谭志龙,郭俊梅,陈松,等. 电接触现象数值模拟的研究现状及发展趋势[J]. 电工材料,2010(1):3-8.

- TAN Zhilong, GUO Junmei, CHEN Song, et al. Review of the numerical simulation of the electric contact phenomena[J]. Electric Engineering Materials, 2010(1): 3-8.
- [8] 梁慧敏,李博,由佳欣,等. 基于有限元法的隔离开关热稳定性仿真分析[J]. 低压电器,2011(1):9-12.
LIANG Huimin, LI Bo, YOU Jiaxin, et al. Thermal stability simulation analysis of disconnect switch based on finite element method[J]. Low Voltage Apparatus, 2011(1): 9-12.
- [9] 杨武,荣命哲,王小华,等. 考虑电力效应的高压断路器动力学特性仿真分析[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):103-107.
YANG Wu, RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, et al. Dynamic simulation of high-voltage circuit breaker concerning electrodynamic force[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 103-107.
- [10] 纽春萍,陈德桂,张敬菽,等. 电动斥力作用下低压断路器分断特性的研究[J]. 电工技术学报,2005,20(7):34-38.
NIU Chunping, CHEN Degui, ZHANG Jingshu, et al. Research on the breaking characteristics of low-voltage circuit breaker with the effect of electrodynamic repulsion force[J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2005, 20(7): 34-38.
- [11] PAULKE J, WEICHERT H, STEINHAUSER P. Simulation of contact spots[C]//Proceedings of 21th international conference on Electrical Contacts. Zurich, Switzerland: [s.n.], 2002: 388-393.
- [12] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京:机械工业出版社,1989:44-54.
- [13] 陈德桂,李兴文. 低压断路器的虚拟样机技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009:254-255.
- [14] 纽春萍,陈德桂,刘颖异,等. 计及主回路和电磁系统发热的交流接触器数值热分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(15):53-58.
NIU Chunping, CHEN Degui, LIU Yingyi, et al. Thermal simulation of AC contactor considering the heat generated by main circuit and electromagnet system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15): 53-58.
- [15] 李伟力,付敏,周封,等. 基于流体相似理论和三维有限元法计算大中型异步电动机的定子三维温度场[J]. 中国电机工程学报,2000,20(5):14-17.
LI Weili, FU Min, ZHOU Feng, et al. Calculation of 3D stator temperature field of large and medium scale synchronous motor on the basis of fluid similarity and 3D FEM[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 14-17.
- [16] 纽春萍,陈德桂,刘颖异,等. 交流接触器温度场仿真及影响因素的分析[J]. 电工技术学报,2007,22(5):71-77.
NIU Chunping, CHEN Degui, LIU Yingyi, et al. Temperature field simulation of AC contactor and analysis of its influence factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 71-77.
- [17] 杨永明,程鹏,陈俊,等. 考虑空气流场影响的电缆散热研究及其影响因素与经济性分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):50-54.
YANG Yongming, CHENG Peng, CHEN Jun, et al. Cable heat dissipation considering air flow field, its influencing factors and economical efficiency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 50-54.
- [18] 赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2002:73-74.
- [19] 谭志龙,陈松,管伟明,等. AgNi10 触头材料闭合接触阶段的热-电-力耦合分析及实验研究[J]. 稀有金属材料与工程,2012,41(2):276-280.
TAN Zhilong, CHEN Song, GUAN Weiming, et al. Thermal-electric-

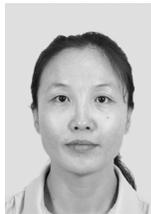
structure coupling finite element analysis and experiment study of AgNi10 contact material under the closed contact stage[J].

Rare Metal Materials and Engineering,2012,41(2):276-280.

[20] 王子建,何俊佳,尹小根. 高压限流型熔断器热电耦合瞬态温度场的计算[J]. 高压电器,2006,42(6):438-441.

WANG Zijian,HE Junjia,YIN Xiaogen. Calculation on thermal-electricity coupled transient temperature field of high voltage current limiting fuse[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(6):438-441.

作者简介:



纽春萍

纽春萍(1975-),女,山西闻喜人,副教授,博士后,研究方向为现代电器设计方法及新型开关电器的设计与优化(E-mail:niuyue@mail.xjtu.edu.cn);

董得龙(1988-),男,天津人,硕士研究生,研究方向为电器有限元仿真分析。

FEM-based calculation of short-time withstand current for air circuit breaker

NIU Chunping,DONG Delong,SUN Hao,NING Jiaqi,YANG Fei,WU Yi,RONG Mingzhe

(School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract: The main contact system of an ACB(Air Circuit Breaker) is modeled for calculating its electro-dynamic stability and thermal stability,which applies the contact bridge model to describe the microcosmic contacting between movable and fixed contacts,the electric repulsion force and temperature rise of contacts are quantitatively analyzed and its short-time withstand current is evaluated. In electro-dynamic stability calculation,3D transient electromagnetic analysis is used to quantitatively calculate the effect of eddy current on the electric repulsion force. In thermal stability calculation,the improved contact bridge model is applied to obtain the simulative results of transient thermal field. Two schemes,i.e. shifting shaft hole position and increasing contact ending pressure,are introduced and their effect on short-time withstand current is researched based on the established model. An optimal scheme is given.

Key words: electric circuit breakers; short-time withstand current; electro-dynamic stability; thermal stability; FEM

(上接第 84 页 continued from page 84)

Optimal allocation of voltage-sag monitors considering disturbance-source locating

CHEN Lipin¹,XIAO Xianyong²,ZHANG Wenhai¹

(1. School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China;

2. Smart Grid Key Lab of Sichuan Province,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

Abstract: Based on the observable area principle of monitoring points and the locating method of voltage-sag disturbance-sources,a disturbance-source observability matrix is built and an optimal allocation model of monitor stations is established,which takes the least monitoring points as its objective and the observability of grid voltage sag and corresponding disturbance source as its constraint. The 0-1 integer linear programming method is adopted to solve the model. Simulative results of IEEE 30-bus test system show that,the proposed method is correct and effective,which,with less monitoring points,avoids the difficulty of voltage threshold selection and obtains more accurate characteristics of voltage sags.

Key words: voltage sag; disturbance-source locating; monitoring; observability matrix; 0-1 integer linear programming; models