

带电压反馈智能接触器的热分析模型

季良¹, 陈德桂¹, 刘颖异², 纽春萍¹, 李兴文¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 100083, 北京)

摘要: 针对智能与普通交流接触器热分析问题的异同点,建立了同时考虑主回路和磁系统发热的智能接触器热分析模型. 该模型根据智能接触器的线圈控制回路在脉宽调制下交替导通-关断的特点,利用磁路法建立了线圈控制回路导通与关断时磁系统的特性微分方程组,并通过求解该微分方程组建立其磁系统的热源模型. 同时,结合两种接触器的共同特点将普通交流接触器的热分析方法扩展到了智能接触器. 利用该热分析模型对一采用优化线圈及铁芯参数的智能接触器在稳态工作下的温升进行了热分析,并进行了实验验证. 分析结果表明,与普通交流接触器相比,智能交流接触器在更小的线圈及铁芯参数下,仍可有效降低磁系统的发热温升,且稳态工作下的温升满足国家标准要求.

关键词: 热分析;瞬态磁路;智能接触器;温度场

中图分类号: TM561 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)08-0090-06

Thermal Analysis of Contactors with Voltage Feedback System

Ji Liang¹, CHEN Degui¹, LIU Yingyi², NIU Chunping¹, LI Xingwen¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the similarities and differences of thermal analysis issues between the intelligent and general AC contactors, a thermal analysis model considering influences of both main conductor loop and electromagnetic system is constructed for the intelligent contactor. According to the alternating turn-on and turn-off characteristics of the coil circuit controlled by the pulse-width modulation, the model constructs a set of differential equations with magnetic circuit method to describe characteristics of the electromagnetic system and its thermal source model by subsequently solution to these equations. Linking with the features common of the two kinds of contactors, the extension of the thermal analysis method of general contactor to intelligent contactor is demonstrated as well. With the proposed thermal analysis model, the steady-state temperature rise of an actual intelligent contactor by an optimized coil and core parameter is evaluated and compared with the measurement. The analysis results show that the temperature rise of the miniaturized electromagnetic system of the intelligent AC contactor can be decreased effectively compared with the general AC contactor to meet the requirements of national standards.

Keywords: thermal analysis; transient magnetic circuit; intelligent contactor; temperature field

接触器的智能化对于提高其工作性能、实现小型化具有显著的作用. 但是,随着小型化带来的产品体积缩小,以及相应的散热面积减小,接触器内部元器件的发热使单位体积的发热量增加. 如何使智能

接触器产品在小型化的设计下满足热性能的要求,是接触器智能化发展的一个关键问题. 由于影响接触器发热和散热过程的因素很多,一般通过实验的方法来进行热分析,这使得产品的设计费用提高,周

期加长.如果能采用数值方法对其进行准确的热分析,就可以大大提高效率、减少费用.因此,对智能接触器进行热计算分析具有重要的实际应用价值.

自上世纪 90 年代以来,国内外相继出现一些数值方法来分析接触器的发热问题^[1-6].由于这些方法均是根据普通交流接触器的特点提出的,因此其适用对象仅局限为普通交流接触器.到目前为止,还没有见到专门针对智能接触器整体热分析的文献.由于智能接触器在控制方式上与普通交流接触器存在不同,导致两者的线圈电流不同,涡流及磁滞损耗也随之不同.本文建立了智能接触器的热分析模型,利用此模型对一采用优化线圈及铁芯尺寸的智能接触器在长期工作制下的温升进行了热分析,并进行了实验验证.

1 分析对象

本文的分析对象为一带反馈调压系统的智能接触器,其额定电流等于 160 A.在国标规定的 85%~110%额定电压范围内,通过反馈调压系统,使吸合过程中的吸力特性稍稍高于反力特性.当动铁芯闭合后,线圈供电电压降低使线圈电流降低,从而达到节能的目的.

如图 1 所示,交流输入经整流后,通过脉宽调制器(PWM)给接触器线圈供电,控制模块接收线圈回路的电压反馈信号对 PWM 调制器进行控制.不同的外施电压对应不同的 PWM 调制占空比,从而保证线圈供电电压的有效值不变. PWM 调制通过绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)的导通和关断来实现.当外施电压等于 220 V、PWM 调制频率等于 5 kHz、占空比为一固定值时,测得的线圈电压波形见图 2.

带电压反馈智能接触器采用直流起动、直流吸

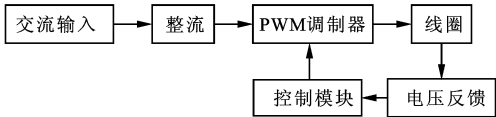


图 1 智能接触器控制原理

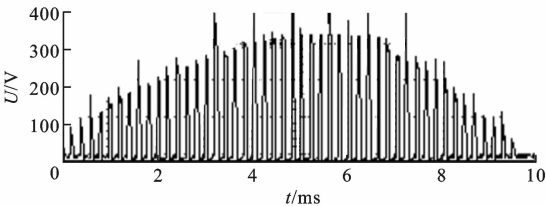


图 2 智能接触器线圈电压

持的工作方式,使得在接触器吸合过程中作用在铁芯上的电磁力比普通交流接触器更大,铁芯的吸合速度更快.另一方面,当接触器吸合后,调压系统使吸合位置的线圈电压减小并保持低电压,线圈功耗很低,同时采用的直流运行方式可大大降低分磁环损耗和铁损,因此节能效果十分明显.图 3 显示智能接触器吸合和保持过程的线圈电压有效值 U_z 和 U_b ,其中 U_e 为额定电压, U_x 为吸上电压.基于上述原因,智能接触器可以采用比普通交流接触器更小的磁系统以实现小型化.

图 4 为对一普通交流接触器采用智能控制前、后的铁芯尺寸对比.由表 1 可知,采用智能控制后的

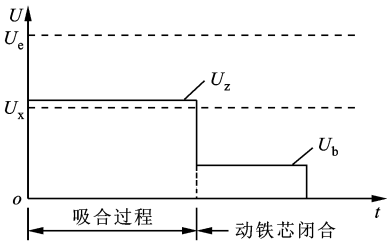
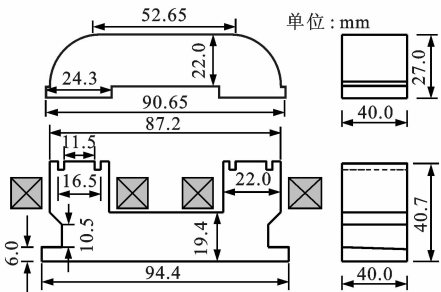
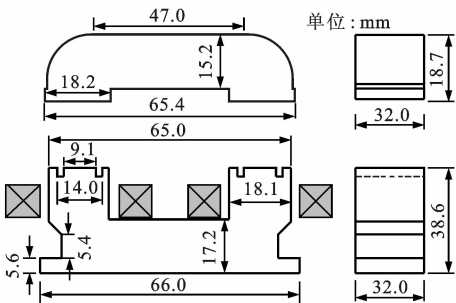


图 3 智能接触器的线圈供电电压



(a)采用智能控制前



(b)采用智能控制后

图 4 采用智能控制前、后的铁芯尺寸

表 1 采用智能控制前、后的用铜量与用铁量对比

状态	用铁量/mm ³	用铜量/mm ³
采用智能控制前	193 931.2	145.82
采用智能控制后	92 456.0	75.5

样机可节省铁 52.3%，节省铜 48.2%。可见，智能控制对于接触器产品的体积缩小作用显著。

需要指出的是，上述修改后的磁系统尺寸是在未验证温升的情况下得到的。一般来说，智能接触器磁系统的修改应遵循以下准则：①线圈的填充系数应满足其在样机中的正确安装；②为确保样机在热态下限吸上电压 150 V 时能可靠吸合，该电压下的最佳占空比一般不超过 60%~80%；③样机的温升不得超过国家标准。

准则①和②可通过计算智能接触器的动态吸合过程来判断是否满足，具体计算方法可参见文献[7]。要预知该智能接触器的温升特性，就必须建立其温度场的计算模型。图 5 为在修改后的磁系统尺寸下智能接触器的热分析模型，由于结构的对称性，图中只给出其 1/4 模型。

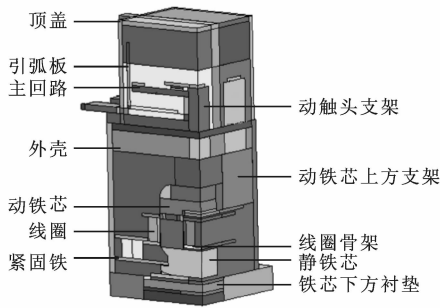


图 5 智能接触器的热分析模型

2 智能与普通交流接触器热分析的异同点

接触器长期闭合工作时，主回路和磁系统同时发热。主回路发热包括回路导体的损耗、动静触头接触电阻的损耗以及外接导线和接线端的损耗。磁系统发热包括线圈损耗、分磁环损耗以及铁损。

智能与普通交流接触器热分析问题的不同之处主要在于磁系统发热的计算上。普通交流接触器为保证接触器可靠吸合，其吸力特性远高于反力特性，吸合后线圈励磁电流偏大，且电流脉动很大，因而线圈损耗、分磁环损耗以及铁损都很大。智能接触器的线圈励磁受到电子线路的控制：一方面，接触器吸合后线圈电流与普通交流接触器存在很大不同，因而线圈损耗不同；另一方面，决定分磁环和铁损的线圈电流脉动情况也大不相同，因而分磁环损耗和铁损也不同。

在主回路发热以及表面散热系数等问题的处理

上，智能与普通交流接触器并无大异。因此，可将普通交流接触器的处理方法直接扩展到智能接触器上，相关内容可参见文献[6]，本文不再赘述。

3 分析方法

3.1 基本假设和方程

接触器产生的热损通过传导、对流和辐射散失到周围介质中去。根据 Barcikowski 得出的结论：接触器内部的对流和辐射散热对其温度场的影响很小，因此可以仅考虑传导散热^[1]；对接触器外壳和连接导线则需要同时考虑对流和辐射散热，并通过表面散热系数来对其进行简化处理。本文中假设：①接触器处于无限大空间；②环境温度不变，为实验时测得的室温；③由于结构的对称性，认为对称面是绝热面，其边界条件为

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \tag{1}$$

其中 T 为物体的温度(K)；④材料各向同性；⑤外表面的对流散热为自然对流散热，其边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_0 - T_f) \tag{2}$$

其中 λ 为材料热导率($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)， α 为表面散热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)， T_0 为发热体温度(K)， T_f 为环境温度(K)。

根据传热学理论，在直角坐标系下，交流接触器稳态工作时，内部的三维热传导方程为

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -q \tag{3}$$

式中： q 为单位体积内热源的生成热(W/m^3)。式(3)与各种边界条件一起就构成了智能接触器稳态温度场的定解问题。因此，在确定热源、导热系数和表面散热系数后，即可对智能接触器的稳态温度场进行分析。

3.2 磁系统发热的计算

智能接触器闭合工作时，受磁极表面粗糙度的影响，在动、静铁芯之间会有一个非常小的气隙，工程上通常认为该气隙值在 0.05~0.008 mm。因此，若采用有限元法进行计算，则剖分单元数目太多，计算比较困难。本文采用等效磁路法计算接触器闭合后的线圈电流，并取气隙值为 0.05 mm。文中研究的智能接触器采用如图 6 所示的 U 形铁芯，其等效磁路由图 7 表示。

由于结构上的对称性，接触器铁芯左右两侧的磁路参数相同。图 7 的简化磁路如图 8 所示，图中， ϕ_{10} 和 R 分别为 ϕ_{100} 、 ϕ_{101} 及 R_{h1} 、 R_{h2} 的串联等效值，

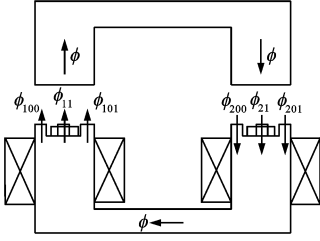
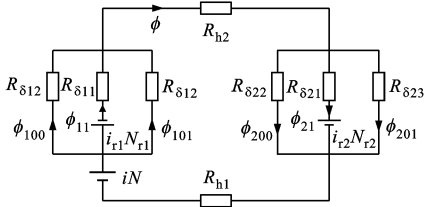


图 6 接触器铁芯结构



iN 、 $i_{r1}N_{r1}$ 和 $i_{r2}N_{r2}$ 分别为线圈及安装在左、右侧静铁芯上的分磁环产生的磁势； ϕ 为通过铁芯的总磁通； ϕ_{11} 和 ϕ_{21} 为通过左、右侧分磁环包围极面的磁通； ϕ_{100} 和 ϕ_{101} 为通过左侧分磁环外极面的磁通； ϕ_{200} 和 ϕ_{201} 为通过右侧分磁环外极面的磁通； R_{h1} 、 R_{h2} 为静铁芯和动铁芯的磁阻； $R_{\delta11}$ 、 $R_{\delta21}$ 为左、右侧分磁环包围部分的气隙磁阻； $R_{\delta12}$ 、 $R_{\delta13}$ 为左侧分磁环不包围部分的气隙磁阻； $R_{\delta22}$ 、 $R_{\delta23}$ 为右侧分磁环不包围部分的气隙磁阻

图 7 等效磁路

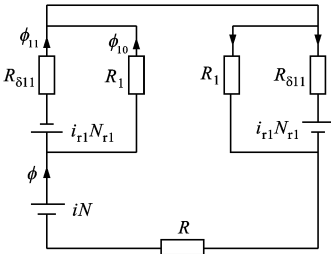


图 8 简化磁路

R_1 为 $R_{\delta12}$ 、 $R_{\delta13}$ 的并联等效值。

对于分磁环,其电路方程为

$$i_{r1}R_{r1} = N_{r1} \frac{d\phi_{11}}{dt} \quad (4)$$

式中： R_{r1} 为分磁环电阻； N_{r1} 为分磁环匝数， $N_{r1} = 1$ ； i_{r1} 为分磁环电流。

对于接触器线圈,其电路方程随可控硅的导通与关断而变化,可控硅导通时

$$|U_m \sin(\omega t + \varphi)| = iR + Nd\phi/dt \quad (5)$$

可控硅关断时

$$iR + Nd\phi/dt = 0 \quad (6)$$

式中： U_m 为激磁电压幅值； N 为线圈匝数。

结合磁路方程,得到可控硅导通与关断时,智能接触器的特性为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\phi_{11}}{dt} &= R_{r1} (R_1 \phi_{10} - R_{\delta11} \phi_{11}) \\ \frac{d\phi_{10}}{dt} &= \frac{|U_m \sin(\omega t + \varphi)|}{N} - \frac{R[R_h \phi_{11} + (R_h + 2R_1) \phi_{10}]}{N^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\phi_{11}}{dt} &= R_{r1} (R_1 \phi_{10} - R_{\delta11} \phi_{11}) \\ \frac{d\phi_{10}}{dt} &= \frac{R[R_h \phi_{11} + (R_h + 2R_1) \phi_{10}]}{N^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

采用龙格-库塔法求解式(7)、式(8),即可得到智能接触器闭合后的特性。计算时首先根据时间值判断可控硅所处的状态,再根据状态选择求解相应的微分方程组,两方程组相互转换时保持转换时刻的磁通 ϕ_{11} 与 ϕ_{10} 不变。

从图 9 可看到,计算得到的电流波峰为 0.247 A,波谷为 0.23 A,实验得到的电流波峰为 0.26 A,波谷为 0.22 A,计算误差不超过 6%,经控制后的线圈电流呈频率为 100 Hz 的微弱脉动。

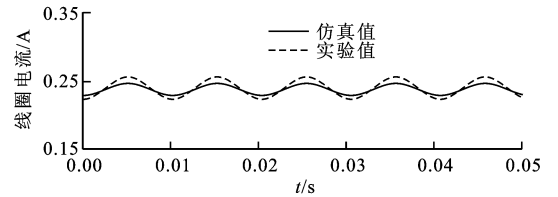


图 9 线圈电流波形

根据线圈电流,得到线圈损耗功率为

$$P_{cu} = \frac{\int_0^T i^2 R^2 dt}{T} \quad (9)$$

式中： T 为电流脉动周期。

采用与线圈损耗同样的计算方法,在求得分磁环电流后,其损耗功率同样可通过式(9)求得。经计算,线圈损耗功率为 1.85 W,分磁环损耗功率为 0.002 8 W,分磁环损耗远小于线圈损耗。由此可见,由于智能接触器闭合后线圈电流脉动很小,因而分磁环损耗很小。同理,线圈电流的脉动情况亦决定了铁损的大小,可推测铁损值也不大,因而本文在计算中忽略分磁环损耗及铁损对温升的影响。

4 计算结果及实验

4.1 计算结果

利用上面介绍的方法,应用三维有限元软件 ANSYS 对一额定电流等于 160 A 的智能接触器进行温度场计算. 当主回路通 160 A 电流、线圈两端施加 220 V 额定电压时,得到接触器整体温度分布的计算结果如图 10 所示. 由图可知,智能接触器的最大温升位置出现在主回路导电桥上,且主回路区域温度高于电磁铁区域的温度,这一点与普通交流接触器恰恰相反^[6].

图 11~图 13 分别给出智能接触器主回路、铁芯和线圈部分的温度分布. 主回路中相的温度略高于边相的温度,这主要是由于中相左右两侧都存在边相,而边相本身又是热源,不像边相有一侧是外壳,散热相对比较容易. 动铁芯温度略高于静铁芯,这是由于主回路的部分热量是自上向下传递给铁芯的.

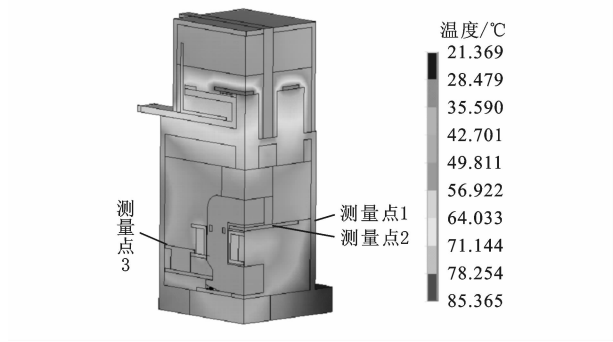


图 10 智能接触器整体温度分布

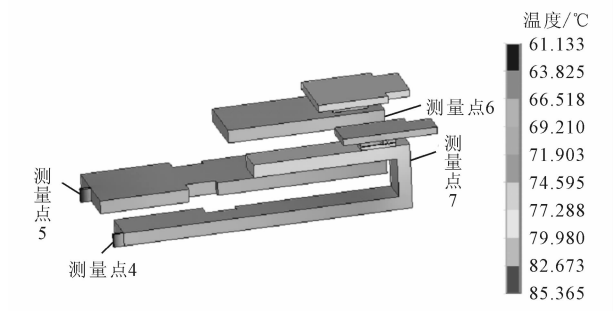


图 11 主回路温度分布

4.2 实验验证

为了验证热分析模型的正确性,根据国家标准规定,给智能接触器的主回路和线圈同时通电,用长为 2 m、截面积为 70 mm² 的导线将主回路三相串联,通过交流调压器给主回路通 160 A 电流,并在线圈两端加 220 V 额定电压,达到稳定温升后,用电阻

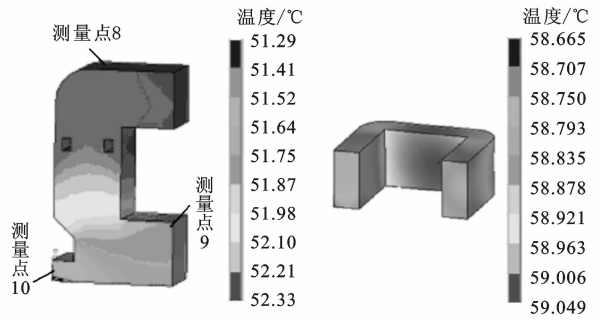


图 12 铁芯温度分布

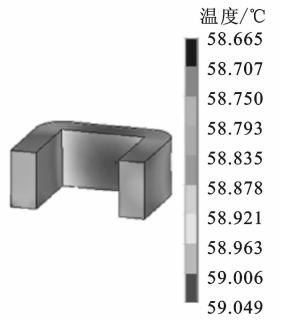


图 13 线圈温度分布

法测量线圈的平均温升,用热电偶测量接触器各部位上选定点的温度. 实验时的环境温度为 19.5 °C.

表 2 给出实验和计算结果的对比情况,可看到实验数据与计算结果基本吻合. 较大误差基本存在于主回路部分,其温升计算结果略小于实验结果. 这主要是由于动、静触头之间的接触电阻和接线端接触电阻是主回路的主要热源,而在计算接触电阻时作了一些假设,且认为接触表面完全洁净,只有收缩电阻,因此接触电阻计算值要小于实测值. 同时,模型的一些简化以及材料导热系数的选择也会产生误差. 另一方面,铁芯部分的温升计算值较实验值略低,这主要是由于智能接触器虽为直流控制,但其线圈电流仍呈现微弱脉动,因而会残存一些磁滞和涡流损耗,而计算时忽略了其影响.

表 2 智能接触器各处温度的计算与实验值

选定点	实验温度 /°C	计算温度 /°C	极限允许温度 /°C	计算值误差 /%
1	30.2	30.4	不伤害相邻部件	0.7
2	53.1	53.2	不伤害相邻部件	0.1
3	46.9	48.0	不伤害相邻部件	2.3
4	69.8	63.5	84.5	9.0
5	65.2	61.1	84.5	6.3
6	75.9	73.3	84.5	3.4
7	79.2	75.1	84.5	5.2
8	53.7	52.3	不伤害相邻部件	2.6
9	53.0	51.9	不伤害相邻部件	2.1
10	53.0	51.6	不伤害相邻部件	2.6
线圈	61.4	58.9	104.5	4.1

由表 2 可知,重新设计后智能接触器稳态温升可以满足要求. 因此,图 4 中对磁系统的优化设计符合接触器的稳态运行工况要求.

5 结 论

(1)针对智能接触器磁系统的独特控制方式,利用磁路法建立其磁系统的热源模型。

(2)结合与普通交流接触器的共同特点,建立了同时考虑主回路和磁系统发热的智能接触器热分析模型,并通过实验验证。

(3)不同于普通交流接触器,智能接触器的磁系统受电子线路控制,可有效降低磁系统的发热温升,其在长期工作制下的温升小于主回路的温升。

(4)磁系统重新设计后的智能接触器温升符合接触器的稳态运行工况要求。

参考文献:

- [1] BARCIKOWSKI F, LINDMAYER M. Simulation of the heat balance in low-voltage switchgear [C]// Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Contacts. Stockholm, Sweden: [s. n.], 2000: 323-329.
- [2] PAULKE J, STEINHAEUSER P, WEICHERT H. Thermal simulation of switchgear [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002,25(3):6-11.
- [3] FREI P U, WEICHERT H O. Advanced thermal simulation of a circuit breaker [C]// Proceedings of the 22nd International Conference on Electrical Contacts. Seattle, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004:101-110.
- [4] PAULKE J, STEINHAEUSER P, WEICHERT H. Simulation of contact spots [C]// Proceedings of the 21st International Conference on Electrical Contacts. Zurich, Switzerland: [s. n.], 2002:388-393.
- [5] 黄琳敏,陈德桂,张敬菽. 计及物理参数随温度变化时螺管电磁铁温度场和瞬态热路的仿真分析 [J]. 电工技术学报, 2003,18(5):27-31.
HUANG Linmin, CHEN Degui, ZHANG Jingshu. Analysis of thermal field and transient thermal circuit of solenoid magnet by considering physical parameters as functions of temperatures [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003,18(5):27-31.
- [6] 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.

- [7] 刘颖异,陈德桂,纽春萍,等. 带电压反馈的智能接触器动态特性及触头弹跳的仿真与研究 [J]. 电机工程学报, 2007,27(30):20-25.
LIU Yingyi, CHEN Degui, NIU Chunping, et al. Analysis and simulation of dynamic behavior and contact bounce for an intelligent contactor with feedback mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(30):20-25.

[本刊相关文献链接]

互感耦合开关磁阻电机的等效磁路模型与有限元分析. 西安交通大学学报, 2010,44(4):71-75.

用非线性电阻模拟变压器损耗进行铁磁谐振过电压研究. 西安交通大学学报, 2009,43(10):109-113.

变压器油的热分解动力学研究及其寿命预测. 西安交通大学学报, 2009,43(8):112-115.

交变励磁三维遥测定位方法研究. 西安交通大学学报, 2009,43(6):717-721.

基于分层遗传算法的电力变压器优化设计. 西安交通大学学报, 2009,43(6):113-117.

水分对变压器绝缘纸性能影响的分子动力学模拟. 西安交通大学学报, 2009,43(4):111-115.

甲基修饰二氧化硅气凝胶的红外光谱和热分析研究. 西安交通大学学报, 2009,43(1):114-118.

热应力对金属棒料内部损伤的机理研究. 西安交通大学学报, 2009,43(1):99-102.

电力变压器局部放电特高频信号外部传播特性研究. 西安交通大学学报, 2008,42(6):718-722.

直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析. 西安交通大学学报, 2008,42(4):481-486.

变压器漏电感参数在线辨识方法研究. 西安交通大学学报, 2008,42(2):199-203.

基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法. 西安交通大学学报, 2007,41(10):1214-1218.

动磁直线电机驱动压缩机的建模与仿真. 西安交通大学学报, 2007,41(7):820-824.

支持向量机在电力变压器故障诊断中的应用. 西安交通大学学报, 2007,41(6):722-726.

(编辑 杜秀杰)