

# 低压三相电动机多功能保护装置的设计与应用

刘洪星<sup>1</sup>, 翟亚芳<sup>2</sup>, 吴战伟<sup>1</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 安阳工学院电子信息与电气工程学院, 河南 安阳 455000)

**摘要:** 介绍了一种低压三相电动机多功能保护装置的研制过程。重点叙述了保护装置的总体结构和工作原理, 给出了电流/电压输入电路、开关量输入电路、开关量输出电路、通信接口电路的设计方案。并分析了启动超时保护、堵转保护、电流不平衡保护和过热保护的工作原理, 给出了保护装置的硬件配置图和典型应用电路图。该保护装置集保护、测量、控制、通信为一体, 具有功能完善、高性价比、高可靠性的特点, 可以对低压三相电动机所产生的各种故障进行全面的保护, 提高电动机的使用率, 延长电动机的使用寿命。

**关键词:** 低压三相电动机; 保护装置; 堵转保护; 过热保护; 应用电路

## Design and application of multifunctional protection device for the low-voltage three-phase motor

LIU Hong-xing<sup>1</sup>, ZHAI Ya-fang<sup>2</sup>, WU Zhan-wei<sup>1</sup>

(1. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. School of Electronic Information & Electrical Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China)

**Abstract:** The development of multifunctional protection device for the low-voltage three-phase motor is introduced. The overall structure and the operating principle are discussed and the schematic diagrams of current/voltage input circuit, switch signal input, switch signal output, and communication interface are given. This paper analyzes the operating principle of start-up out-time protection, locked rotor protection, unbalanced current protection and overheating protection, and also introduces the hardware configuration and the typical application circuit. The protection device combines with protection, measurement, control and communication, which has the features of perfect function, cost-effective and high reliability. It can provide full protection for the various faults of the low-voltage three-phase motor, and improve the utilization and extend the service life of the motor.

**Key words:** low-voltage three-phase motor; protection device; locked rotor protection; overheating protection; application circuit

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0100-07

## 0 引言

在现代工业中, 电动机作为一种拖动机械, 在冶金、化工、纺织、石油、电力等行业得到了广泛的应用, 随着生产自动化水平的提高, 特别是各种自动控制、顺序控制设备的应用, 对电动机的运行要求越来越高, 为了保证电动机能够安全可靠地工作, 需要对电动机进行有效的保护。目前, 智能化、数字化、网络化是电动机保护装置的发展方向, 市场上电动机保护装置的种类较多, 但大多数产品都将所有功能集中在保护装置主体内, 使用时缺少灵活性<sup>[1-2]</sup>。为了提高电动机保护装置使用的灵活性, 提出了一种低压三相电动机保护装置的设计方法。该设计方法采用模块化的设计思想, 将整个装置分为多个独立的模块, 使用时可以根据实际需要选择合适的模块进行组态, 便于工业现场使用和维护。

## 1 保护装置的总体设计

本保护装置采用模块化设计思想, 主要由测量模块、微处理器模块、开关量输入/输出模块、模拟量输出模块、显示和按键模块、通信模块和电源模块构成, 其总体结构框图如图1所示<sup>[3]</sup>。

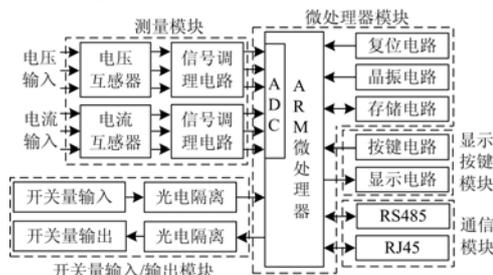


图1 保护装置的总体结构框图

Fig. 1 Configuration of the protection device

测量模块主要由电流互感器 (CT)、电压互感器 (PT) 和信号调理电路构成, 电压互感器和电流互感器用于将低压电动机输入电压和电流信号转换成弱电信号, 并起强电和弱电隔离作用, 弱电信号由信号调理电路完成电压适配和电压平移, 最后送至微处理器进行数据采集; 开关量输入模块用于采集电动机控制电路外部的开光量输入信号, 开关量输出模块用于给控制电路外部提供开关量输出信号, 以驱动报警或跳闸电路; 模拟量输出模块为外部电路提供 4~20 mA 的电流输出; 显示和按键模块用于人机交互, 完成参数显示和设置输入功能; 通信模块用于与上位机进行数据通信; 电源模块为整个装置提供合适的工作电压; 微处理器模块是整个保护装置的核心, 用于完成数据采集、数据计算、保护判断、数据通信、参数设置和故障记录等功能。

## 2 保护装置的硬件设计

### 2.1 电流/电压输入电路

电流和电压检测电路由信号采样电路和信号调理电路两部分组成, 如图 2 所示。保护装置测量模块的电流测量范围为 0.2~1 000 A, 额定输入电压为 AC660 V 或 AC380 V。当电动机输入电流小于等于 100 A 时, 测量模块使用内部电流互感器模块; 当输入电流大于 100 A 时, 需要使用外置电流互感器。保护装置的输入电流信号采样使用 100 A/7.07 V 的电流互感器, 将输入电流变为幅值为-10~10 V 的交流信号<sup>[4]</sup>, 然后利用 3.16 k $\Omega$ 、3.16 k $\Omega$  和 1 k $\Omega$  构成的分压电路进行分压, 将幅值为-10~10 V 的交流信号变为-1.4~1.4 V 的交流信号, 经过由 750  $\Omega$  电阻和 100 nF 电容构成的滤波电路后, 利用相对于系统地 1.5 V 的参考电压 ACOM 进行升压, 使输出信号 IO 变为 0.1~2.9 V 的直流信号, 并送入微处理器的内部 ADC 输入端。保护装置的输入电压信号在采样时先经过一个 330 k $\Omega$  电阻, 将电压信号变换为-2~2 mA 的电流信号, 然后使用 2 mA/2 mA 电流互感器进行采样, 采样后的信号经过信号调理电路后, 送给微控制器的内部 ADC 输入端。

电动机输入电流和输入电压经信号采集和调理电路后, 变成能被微控制器内部 ADC 识别的模拟信号, 微控制器调用采样程序对输入的信号进行采样处理, 然后进行频率、电流有效值、电压有效值等的计算<sup>[5-7]</sup>, 保护装置将采集到的结果通过液晶显示器显示, 并与各种保护设置的整定值进行比较, 如果满足某种保护的動作条件, 则保护装置按照设置的保护动作状态进行动作。

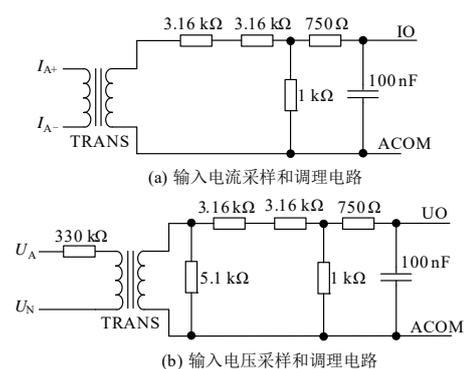


图 2 信号采样和调理电路

Fig. 2 Signal sample and modulate circuit

### 2.2 开关量输入/输出电路

保护装置设有 11 路开关量输入, 用于外接启动、停车、复位等控制按钮, 或是作为工艺连锁使用。同时, 保护装置设有 5 路继电器开关量输出, 用于控制接触器、中间继电器以满足多种启动方式, 并具有保护跳闸信号或报警信号输出功能。

开关量输入/输出电路如图 3 所示<sup>[1]</sup>。在开关量输入电路中, 当有开入输入信号时, 开入电源+24 V 通过 DI 流入回路, 通过 3.9 k $\Omega$ 、680  $\Omega$  和 3.9 k $\Omega$  组成的限流电路后, 驱动光电耦合器 TLP185GB 导通, KR 处输出低电平, 通知微处理器有外部开关量输入。在开关量输出电路中, 当 DO 输出低电平时, 光电耦合器 TLP185GB 导通, 在直流电源的作用下, 三极管导通, 从而驱动输出继电器导通, 输出继电器开关动作。

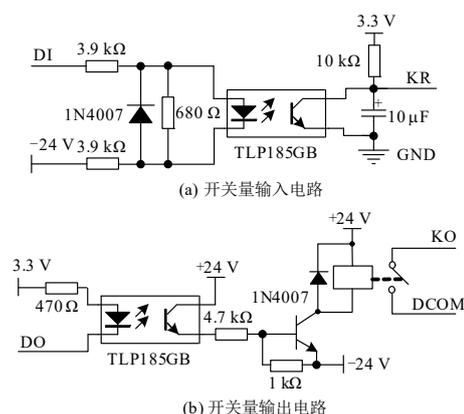


图 3 开关量输入/输出电路

Fig. 3 Switch signal input/output circuit

### 2.3 通信接口电路

保护装置设有 2 路 RS485 通信接口, 组网经济、方便, 可直接与微机监控或监控管理系统联网通信, 实现电动机的集中管理和分散控制。RS485 通信接口电路如图 4 所示, 图中 SN65LBC184D 是一种差



### 3.2 堵转保护

电动机在运行过程中, 由于负荷过大, 或者自身机械原因, 会造成电动机轴被卡住(俗称“抱闸”), 此时根据电动机过载能力不同, 允许其短时间运行, 但如果不能及时排除故障, 会引起电动机绕组过热、绝缘降低而烧毁电动机。电动机堵转保护需要设置的参数有动作整定值、延时时间和动作状态, 动作整定值的设置范围为  $2.0I_e \sim 8.0I_e$ , 可按电动机铭牌堵转电流的 0.5 倍整定; 延时时间的设置范围为  $0.1 \sim 99.99$  s, 步长为 0.01 s, 可按电动机允许的堵转时间整定, 一般为 0.9 倍的允许堵转时间; 动作状态可以设定为告警或跳闸。当电动机的相电流出现几倍于额定电流的严重过负荷情况时, 可按照堵转保护的整定值和延时时间, 快速跳闸以停止电动机运行。

### 3.3 电流不平衡保护

当电动机三相电流不对称程度较大时, 会出现较大的负序电流, 而负序电流将在电动机转子中产生频率为两倍工频的电流, 使电动机转子发热量大大增加, 不利于电动机的安全运行, 为此, 需要对电动机进行电流不平衡保护。当电动机三相电流中的任意一相电流与三相电流平均值之差超过电流不平衡度允许值时, 经设定的延时时间后, 保护跳闸, 停止电动机运行。

电流不平衡度的计算方法如式(1)、式(2)。

$$I_{um} = \left| \frac{I_{max} - I_{mean}}{I_{mean}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$I_{um} = \left| \frac{I_{min} - I_{mean}}{I_{mean}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式(1)和式(2)中:  $I_{um}$  为三相电流的不平衡度;  $I_{max}$  和  $I_{min}$  分别为实测三相电流中的最大值和最小值;  $I_{mean}$  为实测三相电流的平均值。当  $I_{mean}$  小于电动机的额定电流时, 式(1)和式(2)的分母可取电动机的满负荷工作电流值。在实际计算时, 取式(1)和式(2)中的较大者进行保护判断。为了避免三相电流很小时, 由于模拟量的计算误差而导致保护动作, 该保护只在有流时投入使用。

### 3.4 过热保护

过热保护是电动机常用的一种保护功能, 主要用以避免电动机长期工作在额定电流以上, 产生的过热使电动机温升超过允许的数值, 使绝缘迅速老化甚至引起故障的现象发生。为了能够有效地防止电动机过热, 考虑定子绕组和转子绕组的平均发热

情况, 保护装置内部使用软件来模拟电动机的发热过程, 考虑到电动机的过热积累过程和散热过程, 引入了等效发热电流  $I_{eq}$ , 通过对正序电流和负序电流乘以不通的系数以模拟正序电流和负序电流不同的发热效应,  $I_{eq}$  的表达式为

$$I_{eq} = \sqrt{K_1 \times I_1^2 + K_2 \times I_2^2} \quad (3)$$

式(3)中:  $I_1$  为正序电流分量;  $I_2$  为负序电流分量;  $K_1$  为正序电流发热系数;  $K_2$  为负序电流发热系数。 $K_1$  在电动机在启动过程中取值 0.5, 在电动机启动结束后取值 1.0;  $K_2$  取值为 3~10, 一般取值为 6。

过热保护的方程为

$$t_d = \frac{\tau_1}{\left( \frac{I_{eq}}{I_e} \right)^2 - 1.05^2} \quad (4)$$

式(4)中:  $t_d$  为保护动作的时间;  $\tau_1$  为电动机发热时间常数;  $I_{eq}$  为等效发热电流;  $I_e$  为电动机额定工作电流。当电动机因过热保护跳闸后, 不能立即再次重新启动, 需等散热结束后方可再次启动。保护装置采用衰减指数来模拟电动机的散热过程, 散热时间  $t_s$  为

$$t_s = 3\tau_1 \times \ln \tau_1 \quad (5)$$

## 4 保护装置的接线方式

保护装置可以在保护模式、直接启动模式、双向启动模式、星-三角启动模式等多种模式下运行, 通过人机交互界面或上位机配置软件可以直接在不同工作模式下切换, 更符合现场使用需求。

### 4.1 保护模式接线方式

保护装置工作于保护模式的接线方式如图 7 所示。在此工作模式下, 按启动按钮 SB1, 接触器 KM 的吸引线圈处于通电状态, 接触器 KM 的主触头和自锁触头闭合, 电动机启动。停车时按停车按钮 SB2, 接触器 KM 的吸引线圈断电, 接触器 KM 的主触头和自锁触头断开, 电动机停车。

电动机正常启动后, 保护装置就对电动机的运行状态进行监测, 当电动机出现故障状态后, 如果故障发生时保护装置工作于保护跳闸模式, 则保护装置不控制接触器, 而是直接跳开对应的断路器 QF, 即跳闸输出继电器常开触点闭合, 断路器 QF 线圈得电, 断路器 QF 的常闭触点断开, 电动机停车。如果发生跳闸, 断路器 QF 断开回路, 按复位按钮 SB3 可以复位故障。

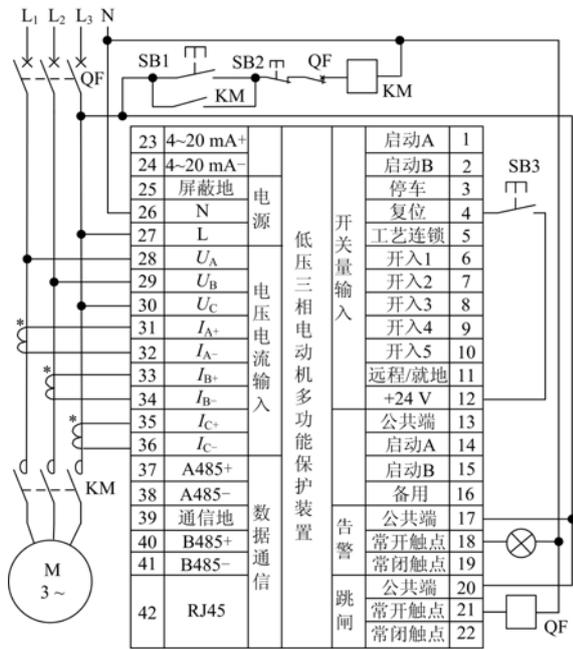


图 7 保护模式接线示意图

Fig. 7 Wiring scheme of protection model

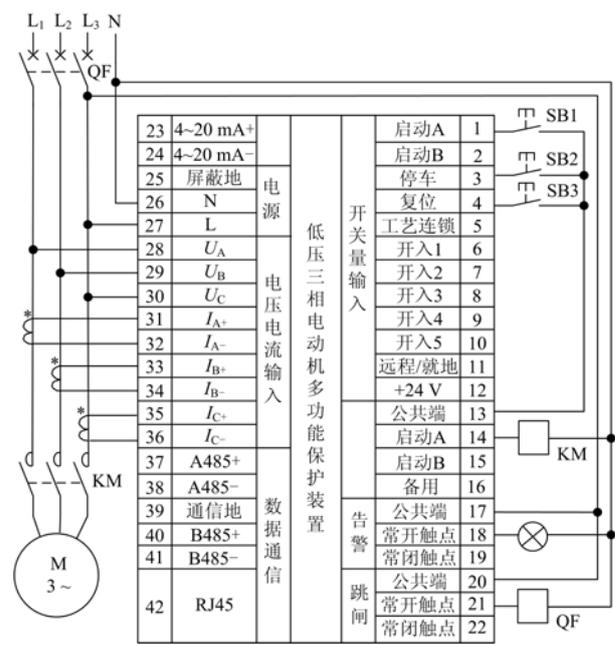


图 8 启动模式接线示意图

Fig. 8 Wiring scheme of start-up model

#### 4.2 启动模式接线方式

保护装置可以实现多种启动方式，包括直接启动、双向启动和星-三角启动，而且对电动机启动和停车的操作方式可以是本地操作，也可以是远程操作。当远程/就地端子有开关量输入时为远程操作模式，禁止本地操作；无开关量输入时为就地操作模式，禁止远程操作。

直接启动的接线方式如图 8 所示。在此工作模式下，保护装置在上电时进入启动就绪状态，显示模块显示“直接启动模式”。当按启动按钮 SB1 时，保护装置收到启动命令，内部启动 A 继电器常开触点闭合，接触器 KM 的吸引线圈得电，接触器 KM 的主触头闭合，电动机启动。当按停车按钮 SB2 或有保护动作发生时，内部启动 A 继电器常开触点断开，接触器 KM 的吸引线圈失电，接触器 KM 的主触头断开，电动机停车。停车过程结束后，电动机进入启动就绪状态。

在图 8 所示的工作模式下，当故障发生时，为了确保切出故障而又不至于损坏接触器，保护装置可以根据故障电流的大小，依据设置的分断电流，自动判断是断开模式。当实际电流小于整定的分断电流值时，保护装置选择断开启动 A 继电器；当实际电流大于整定的分断电流值时，保护装置自动选择出口跳闸继电器。

### 5 测试数据及应用

按照国家标准 GB/T7261-2008 继电保护和安全自动装置基本试验方法，在开普实验室对保护装置进行了各项保护功能测试，摘录部分测试结果如表 1 所示。测试结果表明，该保护装置的各项保护功能均达到了设计指标，符合相关技术要求。

表1 保护装置的测试结果

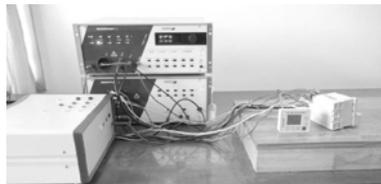
Table 1 Test results of the protection device

测试项目	测试内容	整定值	测量值	误差
定时限过负荷保护	电流动作值	5 A	5.01 A	0.20%
	延时时间	1 s	1 012.3 ms	1.23%
堵转保护	电流动作值	25 A	25.12 A	0.48%
	延时时间	1 s	1 013.2 ms	1.32%
电流不平衡保护	电流动作值	50 A	51.12 A	2.24%
	延时时间	1 s	1 012.3 ms	1.23%
接地保护	电流动作值	5 A	4.99 A	0.20%
	延时时间	1 s	1 011.8 ms	1.18%
欠电流保护	电流动作值	2.5 A	2.49 A	0.40%
	延时时间	1 s	1 015.4 ms	1.54%
欠电压保护	电压动作值	50 V	49.95 V	0.10%
	延时时间	1 s	1 016.6 ms	1.66%
过电压保护	电压动作值	110 V	109.46 V	0.49%
	延时时间	1 s	1 012.8 ms	1.28%

保护装置的电磁兼容性能均达到“量度继电器和保护装置”标准(GB/T 14598 系列, 对应 IEC 60255 系列)规定的电磁兼容通用要求, 电快速瞬变脉冲群抗扰度检验和浪涌抗扰度检验的测试图如图 9 所示。



(a) 电快速瞬变脉冲群抗扰度测试图



(b) 浪涌抗扰度测试图

图 9 电磁兼容性检验测试图

Fig. 9 Test charts of electromagnetic compatibility test

电快速瞬变脉冲群抗扰度检验的严酷等级为A级, 在施加90%的动作值时装置不误动, 在施加110%的动作值时装置不拒动。浪涌抗扰度检验严酷等级为III级, 在施加90%的动作值时装置不误动。

所设计的低压三相电动机多功能保护装置在电厂运行中得到了应用。电厂的生产特点是连续生产, 这要求电动机的运行要符合生产装置的要求, 由于连续长时间运行, 电动机的连接线必会发生松动, 保护装置的电流不平衡保护功能在电动机的绕组未烧坏之前将电动机实施保护。在电厂运行应用中, 保护装置没发生过拒动和误动故障, 运行状态良好, 对各种故障类型均进行了准确的报警, 有效的防止了电机意外烧毁的发生, 取得很好的经济效益。

## 6 结论

本文所设计的低压三相电动机多功能保护装置可与接触器、电动机起动器等电器元件构成电动机保护控制单元, 对低压电动机所产生的各种故障进行全面的保护, 提高低压电动机的使用率, 延长使用寿命。该保护装置具有现场控制、远程控制、参数测量、数据通信、液晶显示、信号报警等功能, 可以根据实际需要进行灵活配置, 与同类装置相比, 具有多功能、高性价比、接线灵活、使用方便等优

点, 可广泛应用于煤矿、石化、冶炼、建筑等行业的电动机保护控制领域。

## 参考文献

- [1] 赵波, 胡景泰, 黄文涛. ARD3T 智能电动机保护器主体和测量模块设计原理[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 136-140.  
ZHAO Bo, HU Jing-tai, HUANG Wen-tao. The design principle of ARD3T motor protector and measurement modules[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 136-140.
- [2] 唐颖, 李玉林. 基于 ARM 技术的新型低压电动机保护控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 119-122.  
TANG Ying, LI Yu-lin. Design of new low-voltage motor protection controller based on ARM technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 119-122.
- [3] 李冬冬, 崔龙龙, 林顺福, 等. 家庭智能用电系统研究及智能控制器开发[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 123-129.  
LI Dong-dong, CUI Long-long, LIN Shun-fu, et al. Study of smart power utilization system and development of smart controller for homes[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 123-129.
- [4] 翟亚芳, 张天鹏, 夏路甲, 等. 基于 CAN 总线的智能低压断路器控制器设计[J]. 郑州大学学报: 理学版, 2013, 45(1): 105-109.  
ZHAI Ya-fang, ZHANG Tian-peng, XIA Lu-jia, et al. Design of intelligent controller for low-voltage circuit-breaker based on CAN bus[J]. Journal of Zhengzhou University: Natural Science Edition, 2013, 45(1): 105-109.
- [5] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-257.  
ZHANG Peng, LI Hong-bin. A novel algorithm for harmonic analysis based on discrete wavelet transforms[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2012, 27(3): 252-257.
- [6] 邢浩江, 张东来. 电力系统相位误差分布式周期补偿办法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 210-216.  
XING Hao-jiang, ZHANG Dong-lai. Research on distributed cycle compensation algorithm for phase error of power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 210-216.
- [7] 刘亚栋, 杨洪耕, 马超, 等. 一种频率信号的自适应测量方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 263-269.  
LIU Ya-dong, YANG Hong-geng, MA Chao, et al. An adaptive measuring method for frequency signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 263-269.
- [8] 刘东超, 王开宇, 胡绍刚, 等. 基于数字化变电站的集中式保护[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 117-121.  
LIU Dong-chao, WANG Kai-yu, HU Shao-gang, et al. Integrated protection based on intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 117-121.
- [9] 翟亚芳, 吴战伟, 秦长海. 风电场箱式升压变压器低压侧微机保护装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 136-140.  
ZHAI Ya-fang, WU Zhan-wei, QIN Chang-hai. Development of microcomputer protection device for the low-side of box-type step-up transformer in wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 136-140.
- [10] 李鹏, 李莉, 李玉海. 电力主设备继电保护存在的问题及对策[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 141-144.  
LI Peng, LI Li, LI Yu-hai. Problems of protections for main equipment and countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 141-144.

---

收稿日期: 2014-03-13; 修回日期: 2014-05-20

作者简介:

刘洪星(1979-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: hongxingl@xjgc.com

翟亚芳(1979-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电力系统自动化、微控制器技术及应用;

吴战伟(1982-), 男, 工程硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制。