

基于 FPGA 的矿井电网电流保护系统研究

张晓明¹, 公茂法¹, 郝忠梅², 庄伟³, 刘小聪¹, 柴龙庆¹, 杨焱麟¹

(1. 山东科技大学信息与电气工程学院, 山东 青岛 266510; 2. 山东农业大学机械与电子工程学院, 山东 泰安 271018; 3. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对煤矿井下低压电网常见电流故障的保护问题, 采用对称分量法建立对称性短路故障和非对称性短路故障的数学模型。依据该模型, 在分析各种电流故障电气特征基础上, 分别提出了用于识别异步电机启动电流与三相短路电流的相敏保护方案、用于非对称性故障识别的负序保护方案和用于过载故障识别的过载保护方案, 进行了基于 FPGA 的矿井电网电流保护系统软硬件设计。通过 Multisim 10 和 Quartus II 软件仿真验证了保护系统的合理性与可靠性。

关键词: FPGA; 电流保护; 相敏保护; 负序保护; 鉴相器; 矿井电网

Study on current protection system of mining power network based on FPGA

ZHANG Xiao-ming¹, GONG Mao-fa¹, XI Zhong-mei², ZHUANG Wei³, LIU Xiao-cong¹, CHAI Long-qing¹, YANG Yan-lin¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China;

2. College of Machinery and Electron Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;

3. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to solve the problem of current protection in low-voltage mining power network, this paper establishes the mathematical model of the symmetrical and unsymmetrical faults using symmetrical component method. Based on the analysis of different current fault's features, this paper proposes respectively the scheme of phase-sensitive protection which is used to discriminate the starting current of induction motors and the three-phase short-circuit current and the scheme of negative sequence protection and overload current fault protection. In addition, this paper designs the hardware and software of the current protection system of mining power network based on FPGA. The rationality and reliability of the protection system are verified by Multisim 10 and Quartus II simulation.

Key words: FPGA; current protection; phase-sensitive protection; negative sequence protection; phase discriminator; mining power system

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0200-06

0 引言

在煤矿井下低压供电系统中, 最薄弱的环节是电缆和电动机^[1]。电缆由于机械破坏可能发生两相或三相短路及断相; 电动机可能会由于输出功率超出额定值而使绕组绝缘性能下降直至损坏, 这些都是电网的过电流故障。矿井电流故障主要包括对称性短路(三相短路)、非对称性短路(两相短路、断相、单相接地)以及过载故障。其中, 单相接地故障又称漏电故障, 约占井下所有故障的65%以上, 应对其加装单独的漏电保护装置, 本文不作讨论。

基金项目: 山东科技大学研究生科研创新基金(YCA100354)

在矿井电网电流保护方法的研究方面, 文献[2]提出的一种基于功率因数检测的矿井低压电网相敏保护方法、文献[3-4]提出的基于功率因数检测的相敏对称短路保护和基于负序电流检测的不对称故障保护以及自适应过负荷保护方法具有较宽的保护范围和较高的灵敏度, 文献[5]提出的一种基于电流采样值的相敏过电流保护方法, 能够根据故障电流的相位进行相位整定, 具有一定的灵活性和适用性, 但上述方法均采用单片机做硬件结构, 结构、算法相对复杂, 保护装置的集成度、稳定性、灵活性均有待进一步提高。

本文在分析各种电流故障特征的基础上, 设计了一套基于 FPGA 的矿井电网电流保护方案, 采用

FPGA 做高速平台, 并对传统算法进行了必要改进, 大大简化了保护装置的硬件结构, 进一步提高了保护装置的可靠性、灵敏性、速动性, 最后通过仿真、实测验证了设计的合理性。

1 井下电网常见电流故障分析

当电力系统发生故障时, 均可用所谓对称分量法将故障点电流分解为正序、负序、零序三个分量, 根据故障性质作出等效序网后很容易求得故障电流^[6]。选择 A 相作为基准相, 存在如式 (1) 关系:

$$\begin{aligned} \dot{i}_A &= \dot{i}_{A(1)} + \dot{i}_{A(2)} + \dot{i}_{A(0)} \\ \dot{i}_B &= \alpha^2 \dot{i}_{A(1)} + \alpha \dot{i}_{A(2)} + \dot{i}_{A(0)} \\ \dot{i}_C &= \alpha \dot{i}_{A(1)} + \alpha^2 \dot{i}_{A(2)} + \dot{i}_{A(0)} \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) 中: \dot{i}_A 、 \dot{i}_B 、 \dot{i}_C 分别为 A、B、C 三相的故障电流; $\dot{i}_{A(1)}$ 、 $\dot{i}_{A(2)}$ 、 $\dot{i}_{A(0)}$ 分别为 A 相电流的正序、负序、零序分量; 运算符 $\alpha = e^{j120^\circ}$, $\alpha^2 = e^{j240^\circ}$ 。

1.1 对称性短路故障

对称性短路故障即三相短路。三相短路具有对称性, 因此分析一相即可代表其他三相。取 A 相分析, 列出 A 相微分方程如式 (2):

$$Ri + L \frac{di}{dt} = E_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

解这个方程, 得 A 相短路电流的计算公式:

$$\begin{aligned} i &= i_p + i_{ap} = I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \\ &[I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{pm} \sin(\alpha - \varphi)] \exp(-t/T_a) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: i_p 是短路电流周期分量; i_{ap} 是短路电流非周期分量。

电力系统发生三相短路时, 经过大约 0.2 s 的暂态过程后进入稳态过程。此时, 短路电流为周期分量 i_p 。由于三相短路后依然具有对称性, 因此短路电流只含有正序分量, 不存在负序、零序分量, 故三相短路电流为:

$$I_r^{(3)} = I_{r(1)} = -\frac{E_{(1)}}{Z_{(1)}} \quad (4)$$

式中: $E_{(1)}$ 为正序网络等值电势; $Z_{(1)}$ 为正序网络故障处的等值阻抗, 下同。

1.2 非对称性短路故障

1.2.1 断相故障

以单相 (A 相) 断开为例进行分析。故障处的边界条件用对称分量表示:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{F(1)} + \dot{i}_{F(2)} + \dot{i}_{F(0)} &= 0 \\ \Delta \dot{V}_{F(1)} &= \Delta \dot{V}_{F(2)} = \Delta \dot{V}_{F(0)} \end{aligned} \quad (5)$$

解复合序网, 求得故障处的各序电流大小为: 正序电流:

$$I_{F(1)} = -\frac{E_{(1)}}{Z_{(1)} + Z_{(2)} // Z_{(0)}} \quad (6)$$

负序电流:

$$I_{F(2)} = -\frac{Z_{(0)}}{Z_{(2)} + Z_{(0)}} I_{F(1)} = -\frac{E_{(1)}}{Z_{(1)} + Z_{(2)} + \frac{Z_{(1)}Z_{(2)}}{Z_{(0)}}} \quad (7)$$

零序电流:

$$I_{F(0)} = -\frac{Z_{(2)}}{Z_{(2)} + Z_{(0)}} I_{F(1)} \quad (8)$$

1.2.2 两相短路故障

以 B、C 两相发生短路为例分析。故障处边界条件用对称分量表示:

$$\dot{i}_{FA(0)} = 0, \quad \dot{i}_{FA(1)} + \dot{i}_{FA(2)} = 0, \quad \dot{V}_{FA(1)} = \dot{V}_{FA(2)} \quad (9)$$

解复合序网, 求得故障处各序电流大小为:

正序电流:

$$I_{r(1)} = -\frac{E_{(1)}}{Z_{(1)} + Z_{(2)}} \quad (10)$$

负序电流:

$$I_{r(2)} = -I_{r(1)} = \frac{E_{(1)}}{Z_{(1)} + Z_{(2)}} \quad (11)$$

1.3 过载故障

电动机在过载状态下运行时, 会产生过载电流, 导致绕组温度升高, 长期运行在此状态, 绕组绝缘会逐渐老化, 直至击穿, 造成电机烧毁, 甚至引起矿井火灾或瓦斯、煤尘的燃烧及爆炸。过载后电网的电流相位仍然对称, 只是幅值超过额定值, 在没超过允许温升的情形下电网可以继续运行。

2 基于 FPGA 的电流保护系统硬件设计

保护系统硬件包括相敏保护、负序保护和过载保护三个部分。其中, 相敏保护用于对称性故障的识别与切除, 负序保护用于非对称性故障的识别与切除, 过载保护则用于过载故障的识别与切除^[7]。

2.1 相敏保护硬件设计

井下异步电机启动时电流非常大, 可达额定电流的 4~7 倍, 其大小与在供电线路末端发生短路的电流十分接近^[8], 给短路保护的整定带来了困难。

研究发现, 异步电机启动时功率因数很低, 大概在 0.4 左右^[9], 而井下供电线路末端发生短路时的功率因数很高, 接近于 1。因此, 通过检测电流信号大小和系统功率因数, 就可以有效地区分启动电流与短路电流, 这就是相敏保护的基本原理。

图 1 为基于 FPGA 的相敏保护硬件框图。三相短路为对称短路, 取一相检测就可以代表其他两相。相敏保护电路是由幅值检测和功率因数检测两部分组成的。

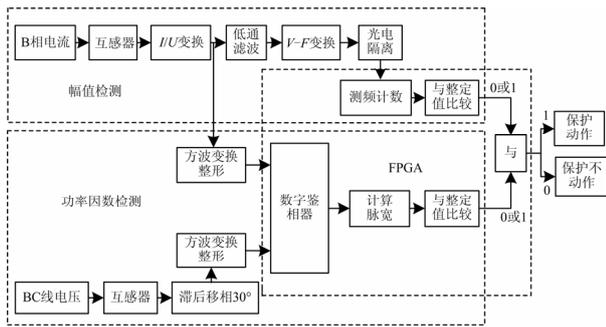


图 1 相敏保护硬件框图

Fig.1 Hardware block diagram of phase-sensitive protection

在幅值检测部分，取自 B 相的电流经过 IIU 变换、低通滤波、V-F 变换、光电耦合后，由 FPGA 进行实时测频，计算脉冲个数并与整定值比较，高于整定值说明电流值超限，发生了三相短路或电机启动，FPGA 输出高，反之则输出低。

在功率因数检测部分，BC 线电压经过滞后 30° 移相后得到 B 相电压，经整形电路变成同相位的方波信号，B 相电流经 IIU 变换、方波变换整形后变

成同相位的方波信号，二者进入数字鉴相器比相，经 FPGA 计算脉宽等处理后与整定值比较，大于整定值输出高，反之输出低。

这样，再把幅值信号与功率因数信号的逻辑值相与，同时为高，则瞬时跳闸，否则不动作。这样，既保证了电机启动时保护不误动，又杜绝了短路时拒动的发生，提高了保护灵敏性和可靠性。

从上述分析中可看出，相敏保护的关键是 FPGA 中数字鉴相器的设计。图 2 给出了数字鉴相器的电路原理图。输入信号 PA 取反后与输出信号 EPD 取反生成的反馈信号相与非，得 PA1；输入信号 PB 取反后与输出信号 EPD 生成的反馈信号相与非，得 PB1。PA1 和 PB1 控制 D 触发器 1 的输出电平，进而控制 PA2 和 PB2 的高低电平。

PA2 在 PA 信号的上升沿变为低电平，使 D 触发器 2 的输出 EPD 为高电平；PB2 在 PB 信号的上升沿变为低电平，使 D 触发器 2 的输出 EPD 为低电平，即由 EPD 输出 PA 和 PB 之间的相位差。

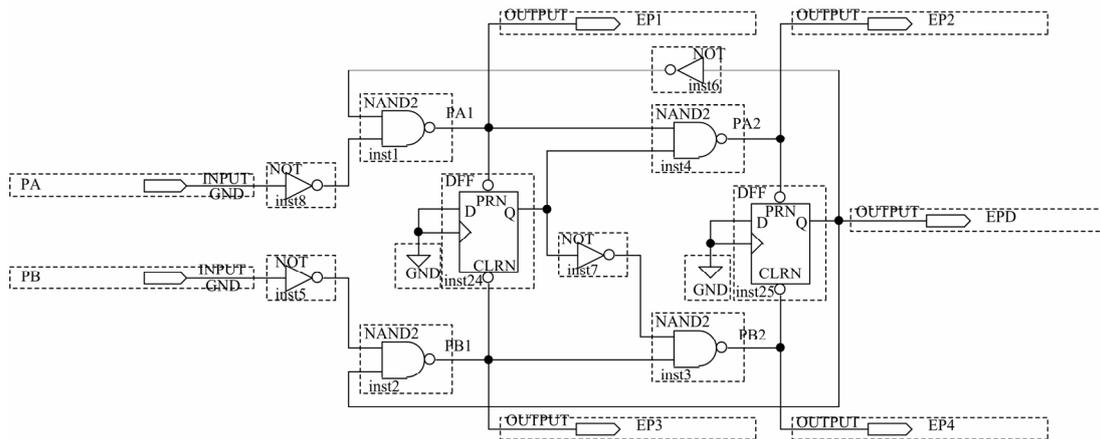


图 2 鉴相器的电路原理图

Fig.2 Schematic diagram of phase discriminator

经鉴相器输出的脉冲宽度代表功率因数角的大小。文中设计了一种测量相位差 $\Delta\varphi$ 的便捷算法：

$$\Delta\varphi = 360\Delta T / T \quad (12)$$

其中： ΔT 为相位差时间； T 为待测信号周期。

对应 FPGA 测量脉宽的表达式为：

$$\Delta\varphi = 360N\tau / T = 360N \frac{1/f_b}{1/f_d} = N \cdot (360f_d / f_b) \quad (13)$$

其中： τ 为基准计数脉冲的周期； f_b 为其频率； N 为计数值； f_d 为待测信号的频率。

观察式 (13)，若令 $360f_d / f_b = 1$ ，则计数值 N 就

是待测功率因数角的大小。为提高测量精度，可采用 $f_b = 3600f_d$ ，这样 $N/10$ 即为功率因数角的大小。

鉴相器、相位测量仿真结果在第 4 部分给出。

2.2 负序保护硬件设计

由 1.2 分析知，当电力系统发生非对称电流故障时，线路中会产生负序电流。又比较式 (7) 和式 (11) 易知，发生两相短路时产生的负序电流值大于单相断线时的负序电流值。因此通过实时检测系统中负序电流的有无可判断是否发生了非对称故障，而检测负序电流的大小可区分两相短路和断相故障。

图 3 给出了基于 FPGA 的负序保护硬件框图。

A、B、C 三相电流经电流变换器, 变成电压信号后输入负序过滤器中, 滤出负序电压信号, 经 V-F 变换后, FPGA 测频计数, 并与整定值进行比较, 判定非对称故障类型并做出相应处理。

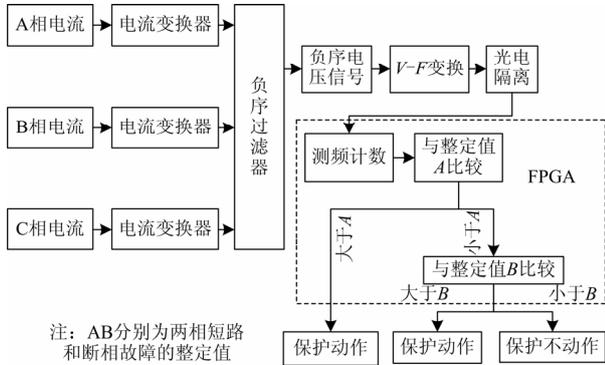


图 3 负序保护硬件框图

Fig.3 Hardware block diagram of negative sequence protection

从上面分析知, 负序保护的关键是设计可靠的负序过滤器^[10-11]。文中设计了一种多运放负序过滤器如图 4 所示。运放 A₁ 及电阻 R₁-R₃、电容 C₁ 组成了电压增益为 $\alpha^2 = e^{j240^\circ}$ 的放大器, 作用是保持 B 相输出电压幅值不变, 使其相位超前输入电压 240°, 即电压变成 $\alpha^2 \dot{V}_B$; 同理, 运放 A₂ 及周围的电阻、电容组成电压增益为 $\alpha = e^{j120^\circ}$ 的放大器, 作用是保持 C 相输出电压幅值不变, 使其相位超前输入电压 120°, 即电压变成 $\alpha \dot{V}_C$ 。A₃ 及周围元件组成反相求和运算电路, 设计其输出电压与输入电压关系为:

$$\dot{V}_{O3} = -\frac{1}{3}(\dot{V}_A + \alpha^2 \dot{V}_B + \alpha \dot{V}_C) \quad (14)$$

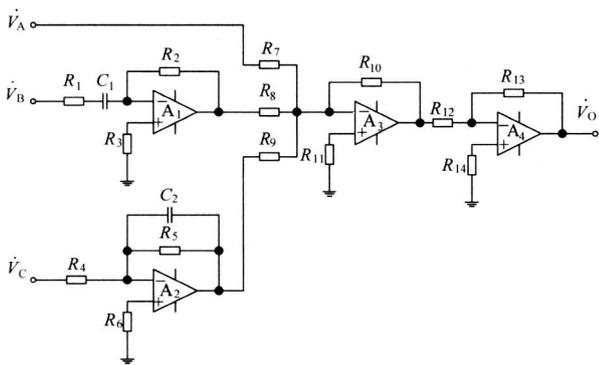


图 4 负序过滤器电路结构

Fig.4 Circuit organization of negative sequence filter

经过 A₄ 及其周围元件组成的反比例运算电路后, 最终得到的输出电压为:

$$\dot{V}_O = \frac{1}{3}(\dot{V}_A + \alpha^2 \dot{V}_B + \alpha \dot{V}_C) \quad (15)$$

由式 (1) 有:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{A(1)} \\ \dot{I}_{A(2)} \\ \dot{I}_{A(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} \quad (16)$$

由式(16)很容易得知 \dot{I}_0 即为 A 相的负序分量。

2.3 过载保护硬件设计

图 5 给出了采用幅值检测法的过载保护硬件框图。合理设计电路参数, 可使 V-F 变换前的直流电压信号大小正比于输入电流信号的幅值, 从而可靠反映过载电流幅值的大小。根据表 1 来整定不同过载倍数下的跳闸时间。

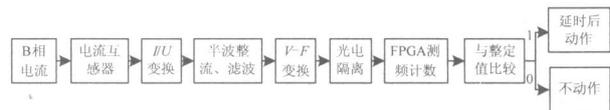


图 5 过载保护硬件框图

Fig.5 Hardware block diagram of overload current fault protection

表 1 过载保护动作时间表

Tab.1 Actuation time of overload current fault protection

过载倍数 $\beta (I/I_N)$	保护动作时间 / s	起始状态
1.05	7 200 不动作	冷态
1.5	90~180	热态
2.0	45~90	热态
4.0	15~45	热态
6.0	8~14	冷态

3 基于 FPGA 的电流保护系统软件设计

3.1 主程序流程图 (图 6)

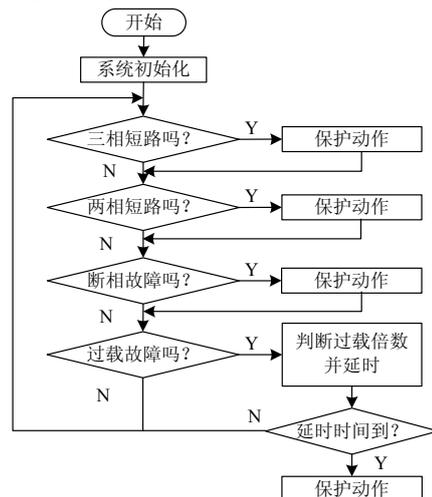


图 6 主程序流程图

Fig.6 Main program flow chart

3.2 相位检测程序

采用 VHDL 语言^[12], 给出部分相位检测程序:

```

CLK1<= TCLK;
  CLK2<= NOT TCLK;
  CLR1<= LEN OR CLR;
L1: PROCESS (CLK1,CLR1)
  BEGIN
    IF CLR1='1' THEN
      CLR1<='0';
    ELSIF CLK1'EVENT
      AND CLK1='1' THEN
      Q1<='1';
    END IF;
  END PROCESS L1;
L2: PROCESS (CLK2, CLR1)
  BEGIN
    IF CLR1='1' THEN
      Q2<='0';
    ELSIF CLK2'EVENT
      AND CLK2='1' THEN
      IF Q1='1' THEN
        Q2<='1';
      END IF;
    END PROCESS L2;
    SS <= Q1 & Q2;
    EN<='1' WHEN SS="10"
    ELSE '0'; --TCLK=1
    时,允许标准计数器计数
    LEN<='1' WHEN
    SS="11" ELSE
    '0';--LEN 的上升沿表明
    脉宽计数结束
    EEND<=LEN;
  
```

4 仿真分析

4.1 Multisim 10 下负序过滤器的仿真

图 7(a)为电网三相对称运行状态仿真,输入 A、B、C 为三相正序电压 (50 Hz, 幅值为 1.414 V), 电网对称运行负序电流为 0, 与仿真结果一致; 图 7(b)为 A 相对地短路仿真, $\dot{V}_A = 0$, $\dot{V}_B = e^{-j120^\circ} V$, $\dot{V}_C = e^{j120^\circ} V$, 由式(16)可知, 输出负序电压理论值应为 $1/3e^{j180^\circ} V$,

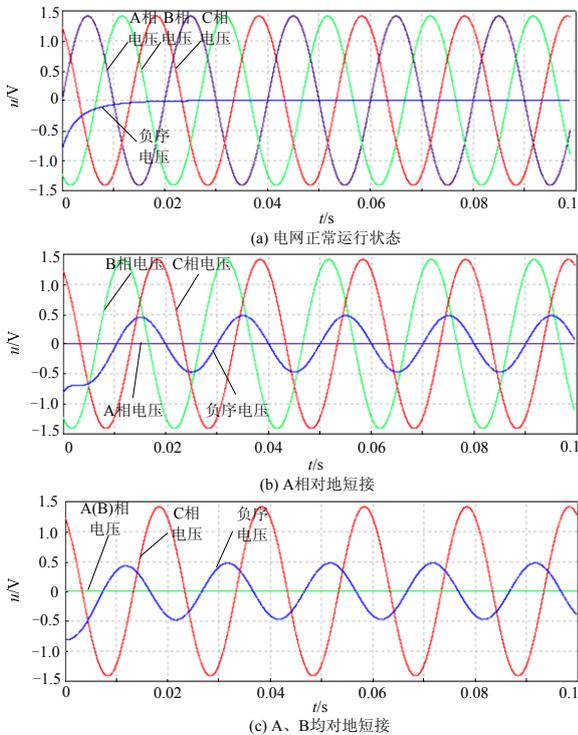


图 7 Multisim 10 下负序过滤器的仿真

Fig.7 Simulation of negative sequence filter using Multisim 10

对照图 7 (b), 仿真结果与理论值一致; 图 7 (c) 为 A、B 两相对地短路仿真, $\dot{V}_A = \dot{V}_B = 0$, $\dot{V}_C = e^{j120^\circ} V$, 由式 (16) 知, 输出负序电压理论值应为 $1/3e^{-j120^\circ} V$, 对照图 7 (c), 仿真结果与理论值一致, 表明负序过滤器设计合理。

4.2 Quartus II 下的 FPGA 仿真

用 Quartus II 进行了波形仿真, 结果如图 8、9 所示。

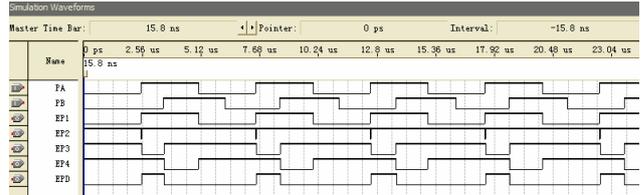


图 8 鉴相器比相时序图

Fig.8 Sequence diagram of the phase discriminator

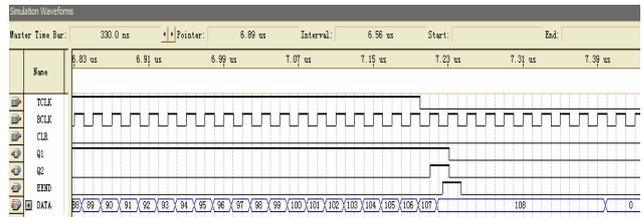


图 9 相位测量时序图

Fig.9 Sequence diagram of phase measurement

图 8 对图 2 所示的鉴相器电路进行仿真。测量结果 EPD 的脉宽即为输入信号 PA 与 PB 上升沿的时间差, 即它们之间的相位差。

图 9 对相位测量程序进行仿真。预设待测信号 TCLK 周期为: 7.2 μs , 占空比为 30%, 基准计数脉冲 BCLK 的周期为: 20 ns, 则对应计数结果应为 $(7\ 200 \times 30\%) / 20 = 108$, 与仿真结果中的 DATA 值相同, 表明程序正确。

5 结语

本文设计的基于 FPGA 的矿井电网电流保护系统实现了井下低压电网的对称性短路、非对称性短路及过载等电流故障的保护。保护系统以 FPGA 作为控制、运算单元, 不仅增强了系统的灵活性与稳定性, 而且提高了保护的速动性。该新型保护系统虽然针对矿井电网设计, 但其设计思想和原理具有一定的普遍性, 具有广阔的应用前景和实用价值。

参考文献

[1] 刘延绪. 煤矿井下供电的三大保护[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.
 [2] 宋建成, 谢恒堃, 王雁欣, 等. 基于功率因数检测的矿井低压电网相敏保护的研究[J]. 电网技术, 1999,

- 23 (2): 38-41.
SONG Jian-cheng, XIE Heng-kun, WANG Yan-xin, et al. Study on phase-sensitive short-circuit protection in underground LV distribution networks based on detecting power factor[J]. Power System Technology, 1999, 23 (2): 38-41.
- [3] 宋建成, 梁翼龙, 孟润泉. 煤矿井下低压电网电流故障保护系统的研究[J]. 电工电能新技术, 1994 (4): 44-48.
SONG Jian-cheng, LIANG Yi-long, MENG Run-quan. Study on the current fault protective system in underground LV cable networks[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1994 (4): 44-48.
- [4] 宋建成, 梁翼龙, 孟润泉. 矿用隔爆型真空馈电开关中的过电流保护[J]. 继电器, 1999, 27 (5): 24-28.
SONG Jian-cheng, LIANG Yi-long, MENG Run-quan. Over current protection in underground explosion proof vacuum feeder switchgear[J]. Relay, 1999, 27(5): 24-28.
- [5] 冯建勤, 宋寅卯. 基于电流采样值的相敏过电流保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18 (3): 77-80.
FENG Jian-qin, SONG Yin-mao. New type of phase-sensitive overcurrent protection based on sampled value of current[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2006, 18 (3): 77-80.
- [6] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 上册. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- [7] 贺家李, 宋从炬. 电力系统继电保护原理[M]. 三版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [8] 游国栋. 基于 PLC 控制的 3.3 kV 移动变电站测控系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.
YOU Guo-dong. Study on the measurement and control system of 3.3 kV movable transformer substation based on programmable logic controller[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2005.
- [9] Eliassen A N. High-inertia drive motors and their starting characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1980 (4): 1472-1482.
- [10] 孙波, 刘晓明, 徐小川, 等. 一种负序电流测量装置的设计[J]. 电测与仪表, 2006, 43 (3): 40-42.
SUN Bo, LIU Xiao-ming, XU Xiao-chuan, et al. The design of a negative sequence current measurement device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43 (3): 40-42.
- [11] 李建奇, 罗安, 汤赐, 等. 一种新型负序基波电流检测方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (15): 71-73.
LI Jian-qi, LUO An, TANG Ci, et al. A novel detecting method for negative sequence fundamental current and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (15): 71-73.
- [12] 潘松, 黄继业. EDA 技术与 VHDL[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

收稿日期: 2009-11-20; 修回日期: 2009-12-30

作者简介:

张晓明 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化、微机继电保护; E-mail: sdust88@126.com

公茂法 (1959-), 男, 教授, 工学硕士, 主要从事电力系统微机继电保护、测量技术与装置、电力电子技术与应用等方面的研究;

郝忠梅 (1971-), 女, 副教授, 博士研究生, 主要从事电力系统自动化、电气工程等方面的研究。

(上接第 134 页 continued from page 134)

- [6] Smola A J, Scholkopf B. A tutorial on support vector regression[R]. London(U.K): Royal Holloway College, 1998.
- [7] Gunn S R. Support vector machines for classification and regression[R]. Southampton: University of Southampton, 1998: 1-28.
- [8] 车权, 杨洪耕. 基于稳健回归的谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 39-44.
CHE Quan, YANG Hong-geng. Assessing harmonic emission level based on robust regression method[J].

Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (4): 39-44.

收稿日期: 2009-11-13; 修回日期: 2010-02-24

作者简介:

康捷 (1985-), 女, 硕士研究生, 从事电能质量分析研究; E-mail: kangjie111@yeah.net

解绍锋 (1976-), 男, 副教授, 从事牵引供电系统分析、电能质量分析研究;

刘晓菊 (1985-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统分析研究。