

# 新型微机式电流方向继电器研究

冯建勤, 路康

(郑州轻工业学院电气信息学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 提出了一种新型微机式方向继电器即电流方向继电器, 分析了它的基本工作原理、硬件构成及基本的实现方法, 还分析了具体实现过程中可能遇到的问题及其对策。这种方向继电器只需要检测电流值和电压的相位信息就可以实现短路故障方向的正确判别。由于它不需要检测电压信号的值, 所以具有结构简单、实现容易、成本较低、动作较快、工作可靠等优点。此外, 该型方向继电器的动作范围和灵敏角的设置非常简单、方便、灵活, 而且其电压死区问题得到了很好的解决。

关键词: 方向继电器; 相位比较继电器; 方向电流保护; 微机保护

中图分类号: TM588 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)09-0058-04

## 0 引言

在复杂电网的继电保护中, 方向继电器起着重要的作用。它不仅有利于继电保护装置间的配合, 保证动作的选择性, 而且有利于提高继电保护的灵敏度, 从而提高保护装置的性能。因此, 方向继电器的应用和研究受到了广泛的重视<sup>[1-6]</sup>。

目前波阻抗方向继电器尚处于研究阶段, 而且由于其实现复杂, 应用范围会受到限制<sup>[3]</sup>。功率方向继电器历史最悠久、应用最广泛、技术最成熟, 各种功率方向继电器广泛应用于中低压电网的方向电流保护中。但微机型功率方向继电器直接使用电压采样值和电流采样值进行相位比较, 进而实现故障方向的判别<sup>[6]</sup>, 这无疑会增加硬件资源和软件资源的开销, 并导致保护装置的成本增加, 可靠性降低, 动作速度减慢。

本文提出的微机型电流方向继电器只需检测电流值并进行处理, 而不需要采集电压值, 就可以判别故障方向。因此, 采用电流方向继电器构成的方向电流保护具有实现简单、价格较低、可靠性较高、动作速度较快等优点。

## 1 电流方向继电器的原理

假设输入方向继电器的电压为  $u(t)$ , 电流为  $i(t)$ , 二者都是周期为  $T$  的正弦信号, 电流滞后电压的相角为  $\theta$ , 二者的波形如图 1 所示。其中, 曲线 1 为  $\theta \rightarrow 0$  时的电流波形, 曲线 2 为  $\theta \rightarrow 180$  时的电流波形, 曲线 3 为  $0^\circ < \theta < 180$  时的电流波形。由图可见: 当  $0^\circ < \theta < 180$  时, 必有  $i(t = \frac{T}{2}) > 0$ ; 当  $i(t =$

$\frac{T}{2}) > 0$ , 必有  $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 。因此, 根据电流在半周波时刻的值是否大于零, 就可以判断出电流滞后电压的相角  $\theta$  是否处于  $(0^\circ; 180^\circ)$  的范围内。

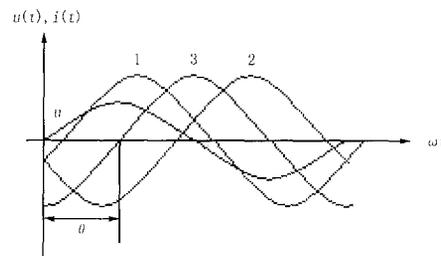


图 1 电压与电流的波形图

Fig 1 Waveform curves of voltage and current

这一结论具有普遍意义: 根据某一特定时刻 (以电压上升过零点为基准) 的电流值是否大于零, 可以判断出相角是否处于某个特定的范围内。可以证明: 当且仅当式 (1) 成立时, 式 (2) 才成立; 反之亦然。

$$i(t = \frac{nT}{N}) > 0 \tag{1}$$

式中:  $N$  为每个工频周期内的采样点数, 与采样频率有关;  $n$  表示以电压上升过零点为基准的特定采样时刻,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$ 。

$$-180^\circ + \frac{n}{N} \times 360^\circ < \theta < \frac{n}{N} \times 360^\circ \tag{2}$$

电流方向继电器的实现原理正是上述相位比较原理。电流方向继电器以式 (1) 作为动作的条件或判据, 其动作范围由式 (2) 确定, 而灵敏角则由式 (3) 确定。

$$\alpha_{sen} = -90^\circ + \frac{n}{N} \times 360^\circ \tag{3}$$

例如:以  $i(t = \frac{T}{2}) > 0$  作为方向继电器的动作条件时,其动作范围为  $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ ;灵敏角为  $\alpha_{sen} = 90^\circ$ ;以  $i(t = \frac{T}{4}) > 0$  作为动作条件时,动作范围为  $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ ;灵敏角为  $\alpha_{sen} = 0^\circ$ ;以  $i(t = \frac{3}{4}T) > 0$  作为动作条件时,动作范围为  $90^\circ < \alpha < 270^\circ$ ;灵敏角为  $\alpha_{sen} = 180^\circ$ ;以  $i(t = 0) > 0$  作为动作条件时,动作范围为  $180^\circ < \alpha < 360^\circ$ ,即  $-180^\circ < \alpha < 0^\circ$ ;灵敏角为  $\alpha_{sen} = 270^\circ$ ;即  $\alpha_{sen} = -90^\circ$ 。

由此可见,利用不同时刻的电流采样值作为方向继电器的动作条件,可以任意设置它的动作范围及灵敏角。例如:当  $N = 24, n = 2$  时,继电器的灵敏角为  $\alpha_{sen} = -60^\circ$ ;当  $N = 24, n = 3$  时,继电器的灵敏角为  $\alpha_{sen} = -45^\circ$ ;当  $N = 24, n = 4$  时,继电器的灵敏角为  $\alpha_{sen} = -30^\circ$ 。可见,电流方向继电器不仅实现了功率方向继电器内角  $\alpha = 45^\circ$  和  $\alpha = 30^\circ$  时的灵敏角,而且有更多的选择。

综上所述,只利用电流的采样值而不考虑电压的采样值,不仅可以实现电流方向的判别,而且可以方便地设置动作区及灵敏角。不过,虽然这种方法不需要电压量的采样值,但需要检测电压量的相位信息,并以其相位信息定位电流量的采样时刻。

## 2 电流方向继电器的实现

### 2.1 硬件构成

微型电流方向继电器的硬件构成示意图如图 2 所示。过零比较电路与极性及电平变换电路构成电压相位检测电路,用以检测电压量的相位信息。过零比较电路的输出为方波信号,方波的周期与被测电压量的周期相同,其上升沿对应于被测电压信号从负到正时的过零点,而下降沿则对应于电压信号从正到负时的过零点。极性与电平变换电路对方波信号的极性和电平进行适当地变换,以适应微机中断请求信号的要求。当电压信号每次从负到正过零时,电压相位检测电路都会向微机系统提出中断请求。采样保持与模数转换电路则用于对电流信号进行实时的数据采集,其工作原理见文献 [6]。

### 2.2 实现方法

以图 2 所示的硬件电路为基础,适当利用微机系统的软件、硬件资源,可以方便地实现电流方向继电器的功能。具体的方法是:

1) 在中断服务程序中,计算出相邻两次中断间

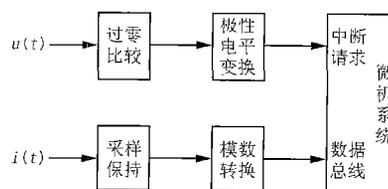


图 2 微型电流方向继电器的硬件构成示意图

Fig 2 Hardware structure of microprocessor-based current directional relay

的时间间隔,作为电压信号的周期 ( $T$ ),并据此调整采样周期 ( $T_s$ ),实现采样频率的自动跟踪;启动第一次采样过程并得到第一个采样值,记为  $x(0)$ ;置定时器的定时时间为  $T_s$  并启动定时器。

2) 定时时间到,启动第二次采样过程并得到第二个采样值,记为  $x(1)$ ;重置定时器的定时时间为  $T_s$  并启动定时器。

3) 重复步骤 2),依次得到  $x(2), x(3), \dots, x(n), \dots, x(N-1)$ 。

因为每个电压周期都要重复以上过程,所以总有

$$i(t = \frac{nT}{N}) = i(t = nT_s) = x(n), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (4)$$

根据式 (1)、式 (4),电流方向继电器的动作条件可表示为

$$x(n) > 0, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (5)$$

这里,  $n$  表示电流采样值在采样序列中的位置。而相应的动作范围和灵敏角仍分别由式 (2) 和式 (3) 决定。

### 2.3 灵敏角的整定

由式 (3) 可知,电流方向继电器的灵敏角由  $N$  和  $n$  决定。例如,当采样频率为 1 200 Hz 时,  $N = 24$ ,  $n$  值每变化 1,灵敏角就改变  $15^\circ$ ;当采样频率为 1 000 Hz 时,  $N = 20$ ,  $n$  值每变化 1,灵敏角就改变  $18^\circ$ 。可见,采样频率越高,灵敏角的调整就越精细。

由于采样频率是在设计阶段选定的,所以在考虑灵敏角的整定时,可以认为  $N$  是常数。因此,灵敏角的整定仅与  $n$  有关。只要改变  $n$  的值,也就是使用电流采样序列中不同位置的电流采样值作为继电器的动作判据,就能改变它的灵敏角。为了便于使用,可以由用户输入要求的灵敏角,而由整定程序自动计算出  $n$  的值。由式 (3) 可得灵敏角的整定公式为

$$n = (\alpha_{sen} + 90) \times \frac{N}{360} \quad (6)$$

## 2.4 动作死区的消除

从原理上看,当保护安装处出口发生金属性短路时,加到电流方向继电器上的电压接近于零,电压相位检测电路将检测不到其相位信息,继电器将无法正确判断故障方向,即电流方向继电器存在电压死区,必须采取适当的措施加以消除。事实上,按前述方法实现的电流方向继电器很容易消除电压死区。具体措施是:当得到第  $N$  个采样值  $x(N-1)$  后,继续以原来的采样周期  $T_s$  重置定时器的定时时间并启动定时器,而且把后面得到的采样值依次作为  $x(0), x(1), \dots, x(n), \dots, x(N-1)$ 。只要定时器如此周而复始地继续工作,电流方向继电器就能正确地判断故障方向,电压死区因此得以消除。微机系统的定时器定时极其精确,在故障发生后的几秒钟内,完全能够准确地记忆故障前的电压相位信息。

## 3 问题与对策

上述分析是建立在正弦波形电流基础之上的,但在电力系统发生短路故障时,短路暂态过程中的故障电流除基波分量电流外,还有非周期分量电流和各次谐波电流。非周期分量电流及谐波电流的存在,会对电流方向继电器造成不利影响,必须采取措施加以解决。另外,还需考虑正常运行时电压、电流信号中的谐波对继电器的影响。要解决这些问题,最简单的方法是进行数字滤波。

### 3.1 非周期分量电流的影响与对策

短路暂态过程中的非周期分量电流,会使短路电流的波形偏向时间轴的一侧,从而影响电流方向继电器的正确动作。因此,必须采取适当措施,以抑制非周期分量电流。而抑制非周期分量电流的最简单而有效的方法是采用减法滤波器(差分滤波器)<sup>[6]</sup>,其算法为

$$y(n) = x(n) - x(n-1) \quad (7)$$

式中:  $x(n)$  为电流采样值序列,差分滤波器的输入;  $y(n)$  为滤波后的电流采样值序列,差分滤波器的输出。

差分滤波器可以很好地抑制非周期分量电流。但需要指出的是,它对基波电流的幅值和相位也会产生影响:幅值发生  $2\sin\frac{1}{N}$  倍的变化,相位超前原

有基波电流  $\frac{1}{2} - \frac{1}{N}$ 。由于电流方向继电器是基于相位比较原理而实现方向判别的,所以滤波器引起的基波电流的相位变化仍会影响电流方向继电器的

正确动作。为此,可采用移相算法对  $y(n)$  进行移相,并使移相器的输出  $z(n)$  与  $x(n)$  中的基波电流同相位(详见后叙)。

### 3.2 谐波电流的影响与对策

无论是正常运行时的电流,还是短路时的故障电流,通常都会含有多种谐波电流。谐波电流的存在会造成电流波形的畸变,进而影响电流方向继电器动作的正确性。因此,应采取措施消除其影响。对微机式保护继电器而言,采用数字滤波的方法消除各次谐波,无疑是最简便的方法。

数字滤波器有多种算法,如:减法滤波、加法滤波、积分滤波、全零点滤波等。如果一种滤波器的幅频特性不满足要求,可以将多个滤波器串联起来构成级联滤波器,以得到理想的幅频特性,从而消除各种谐波电流的影响<sup>[6]</sup>。各种数字滤波器的算法参见文献[6]。

这里再次指出:数字滤波器通常会对基波电流的幅值和相位产生影响,而基波电流相位的变化会影响电流方向继电器的正确动作。因此,必须采用移相算法对数字滤波器的输出进行移相,并使移相器的输出  $z(n)$  与  $x(n)$  中的基波电流同相位。

### 3.3 数字移相

如上所述,电流采样值序列  $x(n)$  经级联数字滤波器滤波后,即可消除电流信号中的非周期分量电流及各次谐波电流。级联数字滤波器的输出  $y(n)$  为正弦波电流,但其相位发生了变化,不再与  $x(n)$  中的基波电流同相位,这将影响电流方向继电器动作的正确性。因此,应采用移相算法对  $y(n)$  进行数字移相,并使移相器的输出  $z(n)$  与  $x(n)$  中的基波电流同相位。为此,可采用短数据窗移相算法<sup>[6]</sup>。该算法可进行任意角度的移相,而且既可以超前移相,又可以滞后移相。

设要求移相的角度为  $\theta$ ,可根据式(8)、式(9)预先离线算出系数  $a$  和  $b$  为

$$a = \frac{\sin(\theta + \frac{2}{N})}{\sin\frac{2}{N}} \quad (8)$$

$$b = \frac{\sin\theta}{\sin\frac{2}{N}} \quad (9)$$

则超前移相角  $\theta$  角度的算法为

$$z(n) = ay(n) - by(n-1) \quad (10)$$

式中:  $y(n)$  为级联数字滤波器的输出,数字移相器的输入;  $z(n)$  为数字移相器的输出,为正弦波形,且

与被测电流的基波分量同相位。而滞后移相角度的算法为

$$z(n) = ay(n) - by(n+1) \quad (11)$$

由于  $z(n)$  为正弦波形,且与被测电流  $x(n)$  的基波分量同相位,所以根据式(5)可得采用了数字滤波与数字移相的电流方向继电器的动作条件为

$$z(n) > 0 \quad (12)$$

这里,  $n$  的值仍由式(6)确定,而相应的动作范围和灵敏角仍分别由式(2)和式(3)决定。

### 3.4 谐波电压的影响与对策

电流方向继电器利用电压信号的过零点来表征其相位信息。只要电压信号中的谐波分量不改变其过零点,谐波电压就不会对电流方向继电器造成不良影响;反之,如果谐波分量改变了电压信号的过零点,谐波电压就会影响电流方向继电器动作的正确性。

通常情况下,电力系统中主要包含5次谐波和7次谐波,且含量较低,虽然谐波电压会在一定程度上造成电压波形的畸变(如:电压波形的顶部变得较为平坦,严重时会出现驼谷),但还不至于改变电压信号的过零点,因而不会对电流方向继电器造成不良影响。因此,一般情况下可不考虑谐波电压的影响。

对于谐波电压较严重的场合,如果谐波分量改变了电压信号的过零点,则必须采取适当措施,以消除其影响。具体措施是,在电压相位检测电路中加入硬件滤波器,并且应保证滤波器不产生电压信号的相位移。

## 4 结语

电流方向继电器只需要利用电流的采样值和电压信号的相位信息就可以实现故障方向的正确判别,这与功率方向继电器有很大不同。由于它不需要检测电压信号的值,因而具有结构简单、实现容易、成本较低、动作较快、工作可靠等优点。另外,电流方向继电器的动作范围和灵敏角的设置非常简单、方便、灵活,而且其电压死区问题也得到了完善的解决。

受篇幅所限,本文仅分析了电流方向继电器的基本工作原理、基本实现原理及具体实现中可能遇到的基本问题及对策。但要使该继电器能够实用,还有许多问题要讨论,如:在三相系统中的实现问

题,不同故障时继电器的动作特性等,后文将予以论述。

### 参考文献:

- [1] 姚晴林,姚武,张学深. 微机型功率方向继电器内角整定计算研究[J]. 继电器, 2000, 28(4): 9-12  
YAO Qing-lin, YAO Wu, ZHANG Xue-shen. Study on Interior Angle Setting Calculation of Microprocessor-based Directional Power Relay[J]. Relay, 2000, 28(4): 9-12
- [2] 袁荣湘,陈德树,张哲. 超高速方向继电器新算法的研究——原理分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 20-24  
YUAN Rong-xiang, CHEN De-shu, ZHANG Zhe. A New Algorithm of Ultra-high-speed Directional Relay——Part One: Principle and Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 20-24
- [3] 董新洲,葛耀中,贺家李. 波阻抗方向继电器的基本原理[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 15-18  
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, HE Jia-li. Basic Principle of Surge Impedance Relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 15-18
- [4] 袁荣湘,陈德树,文明皓,等. 方向继电器在T接线路中的性能分析[J]. 继电器, 1999, 27(5): 9-12  
YUAN Rong-xiang, CHEN De-shu, WEN Ming-hao, et al. Simulation and Analysis of the Performance of Directional Relays on Teed Line[J]. Relay, 1999, 27(5): 9-12
- [5] 李升源,梁礼明. 构成功率方向继电器的一种新方案[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 43-46  
LI Sheng-yuan, LIANG Li-ming. A New Project to Design Power Directional Relay[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 43-46
- [6] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.  
XU Zheng-ya. Digital Protection for Power Transformer and Medium-low Voltage Electric Power Net[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.

收稿日期: 2004-08-26; 修回日期: 2004-09-13

作者简介:

冯建勤(1962-),男,讲师,硕士,从事电力系统自动化和微机测控技术的教学和科研工作;E-mail: feng\_jianqin@126.com

路康(1949-),男,副教授,从事传感器、检测仪表与检测技术的教学和科研工作。

(下转第65页 continued on page 65)

## 参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与运用 (第二版) [M]. 北京:中国电力出版社, 2002  
WANG Wei-jian Principle and Application of Main Electrical Equipment Protection, Second Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002
- [2] 黄滨, 蒋心怡, 沈兵. 舰船交流电力系统短路电流的改进算法及计算机软件编制 [J]. 海军工程大学学报, 1999, (1): 27-33.  
HUANG Bin, JIANG Xin-yi, SHEN Bing An Improvement Algorithm of Vessel Alternating Power System's Short Circuit Fault Current and Establishment of Calculating Software [J]. Journal of Naval University of Engineering, 1999, (1): 27-33.
- [3] 郝鹏, 刘维亭, 庄肖波. 舰船电力系统短路计算及仿真 [J]. 华东船舶工业学院学报 (自然科学版), 2003, (10): 11-15.  
HAO Peng, LU Wei-ting, ZHUANG Xiao-bo Calcula-

tion Research and Its Simulation of Short-circuit Current on Combat Marine Power System [J]. Journal of East China Shipbuilding Institute, Natural Science, 2003, (10): 11-15.

- [4] YANG Xiu-xia, ZHANG Xiao-feng, ZHANG Yi, et al The Study of Network Reconfiguration on the Shipboard Ring-configuration Power Supply System [A]. International Marine Electro-technology Conference. 2003.

收稿日期: 2004-08-24; 修回日期: 2004-09-28

## 作者简介:

王 征 (1978 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: wangzheng0921@126.com

沈 兵 (1961 - ), 男, 博士, 副教授, 主要从事舰船电力系统安全、稳定运行及计算机监控等方面的教学和科研工作;

庄劲武 (1967 - ), 男, 博士, 副教授, 主要从事舰船电力系统安全、稳定运行及计算机监控等方面的教学和科研工作。

### Study of a new complex tree-structure network protection in shipboard

WANG Zheng, SHEN Bing, ZHUANG Jin-wu, CHEN Bo

(Dept of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** This paper discusses the current principle and time principle of complex tree-structure network in domestic shipboard at present. Based on the study of current characteristics of complex tree-structure network, the paper employs the one protective switch and the lower switch's fault current characteristics to get the comprehensive logic judgement to protect the complex tree-structure network in shipboard. This paper also presents the method of using the feedback current's direction to solve maloperation by feedback current.

**Key words:** shipboard; tree-structure network; protection; way

(上接第 61 页 continued from page 61)

### Research on a new type of microprocessor-based directional current relay

FENG Jian-qin, LU Kang

(Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** A new type of microprocessor-based directional current relay is put forward. And its basic principle, hardware structure and basic realization method are analyzed respectively. Meanwhile, countermeasures to some problems that could be faced in concrete process of realization are also discussed. Furthermore, the current directional relay can correctly distinguish the direction in which short-circuit fault occurs only by means of measuring the magnitude of current and the phase of voltage. Because it can work properly without measuring the magnitude of voltage, it has many advantages such as simpler hardware structure, lower cost, easily being constructed, rapidly operating, reliably working and so on. Moreover, its operating range and sensitive operating angle can be adjusted easily, conveniently and freely. What is more, it successfully overcomes voltage dead zone.

**Key words:** directional relay; phase comparison relay; directional current protection; microprocessor-based protection