

# 并联运行电动机短路故障仿真及保护对策

刘志成,尹项根,张 哲,邵德军

(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:** 2 台并联运行的异步电动机,当一台电动机发生三相或两相短路故障被电流速断保护装置切除时,会引起另外一台正常运行的电动机电流增大,超过其额定电流 4 倍以上,导致正常运行电动机的速断保护误动作而跳闸。基于 Matlab 建立 2 台异步电动机并联运行时短路故障的仿真模型,研究分析了产生上述情况的机理、不同类型故障的影响程度及故障信号特征,并提出了带方向元件的电流速断保护的新方案,该方案既防止了正常运行电动机电流速断保护的误动作,又不影响故障电动机电流速断保护的正确动作。动模试验证明了该方法的正确性。

**关键词:** 异步电动机; 短路故障仿真; 并联运行; 方向保护

**中图分类号:** TM 307+.1; TM 772

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)04-0042-05

近年来,不少研究人员对电动机故障分析及其保护做了大量的研究工作,并取得了丰硕的成果,特别是具有优良性价比的微机电机保护的普遍应用,在逐步改善电动机保护限制的同时,也使得有条件为电动机提供更全面周到的保护<sup>[1]</sup>。文献[2-6]对电动机故障分析所做的工作对于正确认识故障特点和改进保护都是很重要的。需要指出,这类仿真研究的特点主要是针对单台电动机运行,而现实使用场合中,有很多电动机是并联供电运行的(以下简称并联电动机)。并联电动机的故障过程与单台运行电动机有明显不同,现场已发生 2 台并联电动机当 1 台发生故障被其保护切除时,同时出现正常运行电机的电流速断保护误动作引起跳闸,扩大了事故。有必要研究并联电动机短路故障仿真、故障信号特征以及保护对策。

## 1 异步电动机模型

### 1.1 异步电动机模型的等值电路

直接采用 Matlab/Simulink 的 Powersys 包中提供的异步电动机模型。

其假设条件如下:

- 忽略空间谐波,设三相绕组对称(空间上互差 120°电角度),所产生的磁动势沿气隙圆周按正弦规律分布;
- 忽略磁路饱和,每个绕组的自感和互感都是恒定的;
- 忽略铁芯损耗;
- 不考虑频率和温度变化对绕组电阻的影响。

在上述假设条件下异步电动机在  $d$ 、 $q$  坐标系下的等效电路如图 1 和图 2 所示。

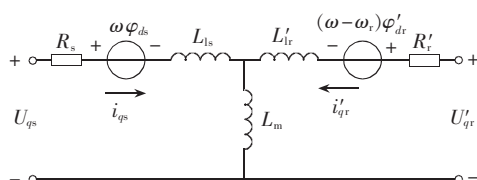


图 1  $q$  轴等效电路

Fig.1 The equivalent circuit of  $q$  axis

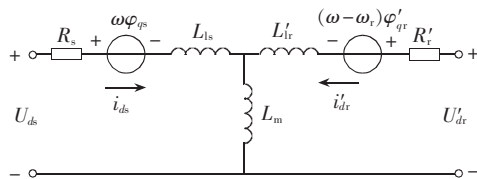


图 2  $d$  轴等效电路

Fig.2 The equivalent circuit of  $d$  axis

### 1.2 电压方程

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds} \quad (1)$$

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + \omega \varphi_{qs}$$

$$U'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (2)$$

$$U'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}$$

式中  $U_{qs}$ 、 $i_{qs}$  为  $q$  轴定子电压、电流;  $U_{ds}$ 、 $i_{ds}$  为  $d$  轴定子电压、电流;  $U'_{qr}$ 、 $i'_{qr}$  为  $q$  轴转子电压、电流;  $U'_{dr}$ 、 $i'_{dr}$  为  $d$  轴转子电压、电流;  $R_s$ 、 $R'_r$  为定、转子电阻;  $\varphi_{qs}$ 、 $\varphi_{ds}$  为定子  $q$  轴和  $d$  轴磁链;  $\varphi'_{qr}$ 、 $\varphi'_{dr}$  为转子  $q$  轴和  $d$  轴磁链;  $\omega$  为系统角频率;  $\omega_r$  为电动机角频率。

### 1.3 磁链方程

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}, \quad \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (3)$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}, \quad \varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (4)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m, \quad L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (5)$$

式中  $L_{ls}$ 、 $L'_{lr}$  为定子、转子漏感;  $L_m$  为磁化电感。

1.4 转矩方程和机械方程

$$T_e=1.5p(\varphi_{ds}i_{qs}-\varphi_{qs}i_{ds}) \tag{6}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt}=\frac{1}{2H}(T_e-F\omega_m-T_m) \tag{7}$$

$$\frac{d\theta_m}{dt}=\omega_m \tag{8}$$

式中  $T_e$  为电磁转矩; $p$  为极对数; $\omega_m$  为转子角频率; $T_m$  为机械转矩; $H$  为惯性常数; $F$  为粘性摩擦系数; $\theta_m$  为转子角度位置。

1.5  $abc \rightarrow dq$  变换与  $dq \rightarrow abc$  变换

$$\begin{bmatrix} U_{qs} \\ U_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\theta & \cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta \\ 2\sin\theta & \sin\theta - \sqrt{3}\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{abs} \\ U_{bcs} \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} U'_{qr} \\ U'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\beta & \cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta \\ 2\sin\beta & \sin\beta - \sqrt{3}\cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_{abr} \\ U'_{bcr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$A=(-\cos\theta+\sqrt{3}\sin\theta)/2$$

$$B=(-\sqrt{3}\cos\theta-\sin\theta)/2$$

$$C=(-\cos\beta+\sqrt{3}\sin\beta)/2$$

$$D=(-\sqrt{3}\cos\beta-\sin\beta)/2$$

$$i_{cs}=-i_{as}-i_{bs}, \quad i'_{cr}=-i'_{ar}-i'_{br} \tag{11}$$

式中  $\theta$  为参考系相位; $\beta=\theta-\theta_r$  为参考系与转子之间的相位差。

2 仿真实例

仿真系统如图 3 所示。2 台相同的三相两极异步电动机,其定子绕组 Y 形连接,主要参数为: $P_N=2\,250\times 746\text{ W}$ , $f=50\text{ Hz}$ , $U_N=2\,400\text{ V}$ , $R_s=0.029\text{ }\Omega$ , $L_{ls}=0.000\,599\,5\text{ H}$ , $R'_r=0.022\text{ }\Omega$ , $L'_{lr}=0.000\,599\,5\text{ H}$ , $L_m=0.034\,6\text{ H}$ 。

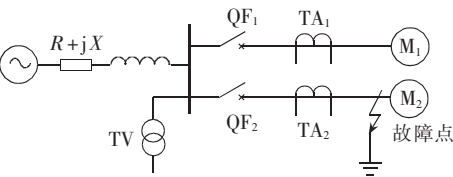


图 3 仿真系统示意图

Fig.3 The simulation system

在并联运行的 2 台电动机中,假定  $M_2$  为故障电机。短路点设置在  $M_2$  机端,考虑三相和各种两相短路,并且故障均发生在电动机稳态运行之后。故障电动机电流由电流互感器  $TA_2$  测得,正常运行电动机电流由  $TA_1$  测得,而电压取自母线电压互感器  $TV$ 。

现通过仿真,研究故障过程中正常运行电动机  $M_1$  的电流、电压以及它们之间相位差的变化。为了便于后面直接利用电流、电压之间相位差,参照功率方向继电器  $90^\circ$  接线原则,下面讨论的电流

相位是指以采用  $90^\circ$  接线线电压为基准相位。参照微机保护的做法,仿真获得的瞬时采样值均经差分滤波和傅氏算法处理,获得各量的基频相量及其幅值与相位。假定 2 台电动机均装有瞬时电流速断保护。

下面对 2 台电动机满载时的故障进行仿真。

假定,仿真中故障在  $0.1\text{ s}$  发生, $0.2\text{ s}$  由电流速断保护切除。需要说明的是, $0.2\text{ s}$  以后由于故障电动机已经被其保护切除,所以仿真得到的波形中故障电动机在  $0.2\text{ s}$  后的变化曲线已经没有任何意义。按严格考察的要求,取金属性短路,但为便于说明故障后电流与电压相位关系,仿真时引进了一个极小的短路过渡电阻( $0.001\text{ }\Omega$ )。

2.1 三相短路

正常运行电动机和故障电动机在故障前后电流幅值、电流与电压相位随时间的变化曲线分别如图 4、图 5 所示。

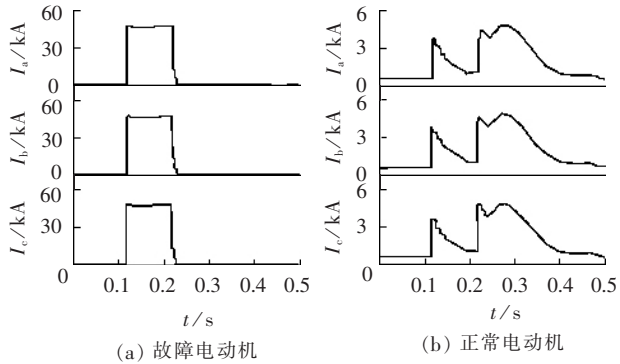


图 4 三相短路时电流幅值

Fig.4 The current amplitudes at three-phase short-circuit fault

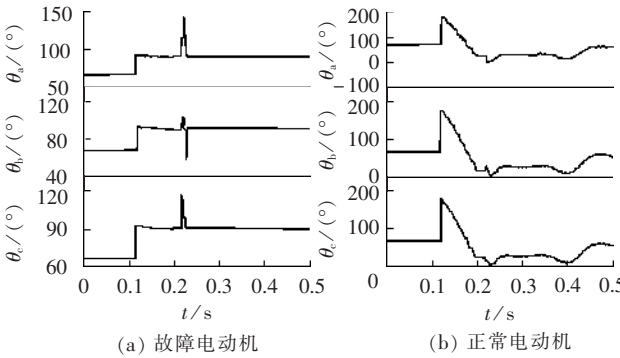


图 5 三相短路时电流相位

Fig.5 The current phases at three-phase short-circuit fault

三相短路时故障电动机流过很大的电流,足以使电流速断保护动作,故障切除后电动机电流很快降为零,母线电压恢复正常。还可以看到,由于电动机储能也会向故障点提供短路电流,故障发生后正常运行电动机的电流也非常大,超过了额定电流的 4 倍以上。为了提高保护灵敏度,电流速断保护的运行定值通常不会大于额定电流值的 4 倍,因此可导致正常运行电动机的电流速断保护误动作,造成误跳闸。

这时虽然故障电动机和正常运行电动机的电流

都很大,但是它们的电流相位(以母线相关相的电压相量为基准)完全不同。以 a 相电流为例,按  $90^\circ$  接线原则考察 a 相电流与 b、c 相电压之间的相位差。故障发生前,该相位差对应于负荷角的余角约为  $70^\circ$ ,即电动机的负荷角为  $20^\circ$ 。取电动机负荷角余角的最灵敏角为  $30^\circ$ ,从故障时刻到故障切除之间,故障电动机的该相位都在  $-60^\circ \sim 120^\circ$ ,即为正方向;而正常运行电动机的该相位却并非如此,结合电流幅值图和电流相位图,在电流很大的时候相位不在  $-60^\circ \sim 120^\circ$  范围内,即正常运行电动机电流相位发生了反向。这可解释为在短路故障发生后,因母线电压降低使得另外正常电动机变成了一台发电机,向短路点提供短路功率,电流由原来从母线流向线路,变为从线路流向母线。当然,该电流会逐步衰减,持续时间不会很长。在故障电动机被其保护切除后,短路点被隔离,正常运行电动机重新由电源供电,该相位又变回到正常运行状态。

在故障电动机被其保护切除后,正常运行电动机电流相位回复到正方向,但是此时的电流会突然增加到很大,甚至大于故障发生后正常运行电动机上的最大电流,虽然持续时间不长,但很可能导致正常运行电动机电流速断保护动作,造成误跳闸。这可以解释为在故障发生到故障切除的这段时间里正常运行电动机转速会下降,所以等到故障切除恢复电源供电后正常运行电动机有一个启动过程。

加大短路过渡电阻也可以得到同样的结果。需要指出,当短路过渡电阻过大或电动机内部轻微故障,以至于使正常运行电动机电流变得较小时,将不足以引起正常运行电动机的电流速断保护误动作,因此通常主要关心严重的短路故障。

## 2.2 两相短路

CA 两相短路仿真结果分别如图 6、7 所示。

故障后,正常运行电动机 CA 相电流很快就增大到额定电流的 4 倍以上, B 相电流也会以较 CA 相慢的速率增大到额定值的 4 倍以上,因此可导致正常运行电动机的电流速断保护误动作,造成误跳闸。故障后,正常运行电动机 CA 相电流相位与故

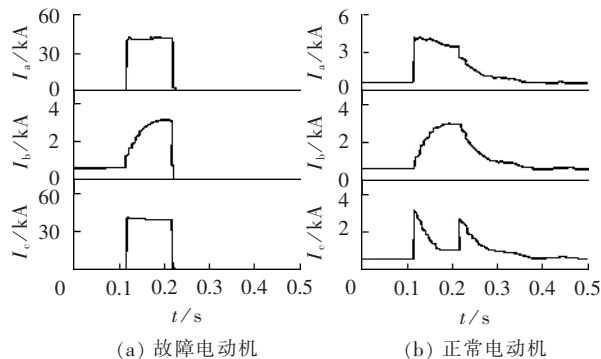


图 6 CA 两相短路时的电流幅值图

Fig.6 The current amplitudes at short-circuit between phase C and A

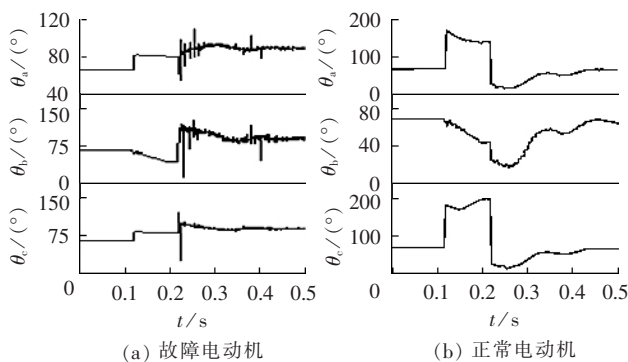


图 7 CA 两相短路时的电流相位图

Fig.7 The current phases at short-circuit between phase C and A

障电动机 CA 相电流相位相反,而它们的 B 相电流相位都在  $-60^\circ \sim 120^\circ$  范围内,没有发生反向。如同三相短路,故障电动机被其保护切除后正常运行电动机电流速断保护可能再次发生误动作。

加大短路过渡电阻也可以得到同样的结果,限于篇幅不一列举。AB 两相短路和 BC 两相短路时可以得到相同的结果。

以上讨论了并联运行电动机满载时发生故障的情况,通过对并联运行电动机半载和空载时故障的研究,可以得到相同的结论。

## 3 保护对策

### 3.1 微机电动机综合保护配置方案

近年来,随着人们对电动机继电保护的重视及微机保护的普及,国内发表了很多关于电动机保护原理和装置研究的文章,如文献[7-15]所做的研究。总体而言,目前中小型电动机微机保护的典型配置如下:

- 电流速断保护,作为电动机的主保护;
- 堵转保护,作为电流速断保护的后备保护;
- 过负荷保护和负序过电流保护;
- 反时限过热保护和负序反时限过流保护;
- 零序过电流保护;
- 启动时间过长保护和频繁启动保护;
- 低电压和过电压保护。

### 3.2 电流速断保护分析

通过前面的仿真可见,作为电动机主保护的电流速断保护在并联电动机场合很有可能造成电动机保护误动作。

三相短路故障发生后正常运行电动机电流很大而且此时各相电流方向均为反向;在故障切除后,正常运行电动机电流又会再次变得很大,此时的各相电流方向均为正向。两相短路故障发生后正常运行电动机对应的故障相电流很大而且方向为反向,对应的非故障相电流也很大但方向为正向;故障切除后,正常运行电动机电流依然很大,此时各相电流方向均为正向。故障电动机在故障发生到故障切除的过程中电流非常大,而且各相电流方向均为正向。

在电流速断中加入方向元件,当方向元件投入时,如果判断到三相电流中至少有一相电流为反向,此时就闭锁电流速断保护,并置方向闭锁标志,只有判断到三相电流都为正方向时才开放电流速断保护。电动机保护启动后,判断到各相电流的方向均为正方向时,再判断之前电动机有无电流速断保护方向闭锁标志,如果有,将电流速断保护的定值切换到电动机启动时的定值,如果没有,电流速断保护的定值采用电动机运行时的定值。

3.3 带方向的电流速断保护新方案

综合以上分析,提出带方向元件的电流速断保护新方案,其逻辑框图如图 8 所示。该逻辑框图是考虑电动机已经启动并稳态运行之后发生故障的情况。其中,  $I_{runset}$  为电动机运行时的电流速断保护定值,  $I_{startset}$  为电动机启动时的电流速断保护定值。

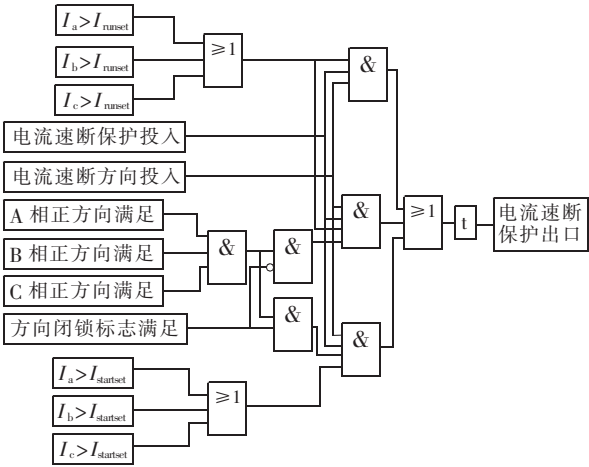


图 8 方向电流速断保护逻辑框图

Fig.8 The logic chart of instantaneous trip directional current protection

从逻辑框图中可以看到,在保护启动后下述 3 种情况只要有 1 种情况满足就会导致电流速断保护出口:

- a. 电流速断保护投入但电流速断方向不投入,判断到三相电流至少有一相电流大于运行电流速断保护定值;
- b. 电流速断保护和电流速断方向均投入,然后判断三相电流的方向均为正方向,如果此时判断到之前没有电流方向闭锁标志,再判断三相电流至少有一相电流大于运行电流速断保护定值;
- c. 电流速断保护和电流速断方向均投入,然后判断三相电流的方向均为正方向,如果此时判断到之前有电流方向闭锁标志,再判断三相电流至少有一相电流大于启动电流速断保护定值。

参照继电保护通常做法,电流相位以  $90^\circ$  接线的线电压为基准。以 a 相为例,当  $-90^\circ \leq \arg(I_a e^{j\alpha} / U_{bc}) < 90^\circ$ , 电流正方向满足;当  $90^\circ \leq \arg(I_a e^{j\alpha} / U_{bc}) < 270^\circ$ , 电流反方向满足。在电动机机端发生严重的三相短路时,需要采用记忆电压。 $\alpha$  为电动机负荷角余角的最灵敏角,通过前面的仿真,取  $\alpha = 30^\circ$ 。

4 结论

通过对 2 台并联运行电动机中的一台电动机发生三相和两相短路故障的仿真研究,分析了此时故障电动机和正常运行电动机电气量的特征,提出了带方向电流速断保护的新方案,该方案既防止了正常运行电动机电流速断保护的误动作,又不影响故障电动机电流速断保护的正确动作。通过动模试验证明了该方案的正确性。

参考文献:

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2002.

[2] 高爱云,蔡泽祥. 基于 EMTDC 的异步电动机故障仿真[J]. 电力自动化设备,2002,22(12):32-34.

GAO Ai-yun, CAI Ze-xiang. Fault simulation of asynchronous induction motor based on EMTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(12): 32-34.

[3] 杨利军,刘振兴. 基于绕组函数的鼠笼式异步电动机故障仿真[J]. 电力自动化设备,2005,25(11):22-25.

YANG Li-jun, LIU Zhen-xing. Fault simulation of squirrel cage induction motor based on winding function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 22-25.

[4] 魏臻珠,蒋建东,蔡泽祥. 基于等效电路参数的异步电动机内部故障仿真[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):50-53.

WEI Zhen-zhu, JIANG Jian-dong, CAI Ze-xiang. Asynchronous motor interior fault simulation based on equivalent circuit parameters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 50-53.

[5] 刘振兴,尹项根,张哲. 基于绕组函数的鼠笼式异步电动机电感参数解析计算[J]. 电力自动化设备,2004,24(6):26-29.

LIU Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe. Analytical calculation of inductances in squirrel cage induction motor based on winding function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6): 26-29.

[6] 蒋建东,蔡泽祥. 用 Park 变换方法检测感应电动机转子故障[J]. 电力自动化设备,2004,24(5):55-57.

JIANG Jian-dong, CAI Ze-xiang. Detection of induction motor rotor cage fault based on Park transformation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 55-57.

[7] 瞿永昌,黄强,李永丽,等. 基于 DSP 和单片机双 CPU 结构的微机电动机保护[J]. 电力自动化设备,2003,23(5):46-48.

QU Yong-chang, HUANG Qiang, LI Yong-li, et al. Motor protection equipment based on dual-CPU of digital single processor and single microcomputer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 46-48.

[8] 李晓华,尹项根,陈德树. 中小型电动机综合保护[J]. 电力自动化设备,2000,20(5):41-43.

LI Xiao-hua, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu. Integrated protection of miniature and median electromotor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(5): 41-43.

[9] 陈永亨,汤连湘. 微型电动机保护装置[J]. 继电器,1998,26(6):27-31.

CHEN Yong-ting, TANG Lian-xiang. Motor protection equipment based on microcomputer[J]. Relay, 1998, 26(6): 27-31.

[10] 王林虎,王见乐,胡志坚,等. 基于 DSP 的电动机保护装置[J]. 电力自动化设备,2004,24(8):69-72.

WANG Lin-hu, WANG Jian-le, HU Zhi-jian, et al. Electro-motor protective device based on DSP[J]. Electric Power

Automation Equipment, 2004, 24(8): 69-72.

- [11] 宋从矩, 王钢, 唐宇, 等. 用  $I_1, I_2, I_0$  构成具有绝对选择性的电动机保护[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(2): 40-41.

SONG Cong - ju, WANG Gang, TANG Yu, et al. Motor protection with absolute selectivity based on  $I_1, I_2, I_0$  [J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(2): 40-41.

- [12] 周军, 董玉华, 万毅. 基于网络的电动机智能控制保护系统设计[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(12): 28-31.

ZHOU Jun, DONG Yu - hua, WAN Yi. Design of net based intelligent control and protection system for electromotor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(12): 28-31.

- [13] 于群, 曹娜, 黄丹辉, 等. 基于 CAN 总线的电动机控制保护系统[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 55-57.

YU Qun, CAO Na, HUANG Dan - hui, et al. Control and protection system for motor based on CAN bus [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6): 55-57.

- [14] PAOLETTI G J, ROSE A. Improving existing motor protection for medium voltage motors [J]. IEEE Trans on Industry Appli-

cations, 1989, 25(3): 456-464.

- [15] 佟为明, 李中伟, 倪文利. 基于 PIC16F876 单片机的智能低压电动机综合保护器的研究[J]. 继电器, 2005, 33(3): 43-47.

TONG Wei - ming, LI Zhong - wei, NI Wen - li. Study of an intelligent low voltage integrative motor protector based on PIC16F876 single chip [J]. Relay, 2005, 33(3): 43-47.

(责任编辑: 柏英武)

#### 作者简介:



刘志成

刘志成(1981-), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及变电站综合自动化(E-mail: liu\_zhch318@126.com);

尹项根(1954-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统继电保护、变电站综合自动化及安全稳定控制(E-mail: xgyin@mail.hust.edu.cn)。

## Short-circuit simulation and protection scheme of parallel running motors

LIU Zhi - cheng, YIN Xiang - gen, ZHANG Zhe, SHAO De - jun

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** When two - phase or three - phase short - circuit fault occurs in one of two parallel running asynchronous motors, it will be tripped by its instantaneous trip current protection, which results in the current increase of the normal motor, exceeding the rated current over four times, and the trip of normal motor by the misoperation of its instantaneous trip current protection. A short - circuit simulation model of two parallel running motors is established with Matlab, based on which the operation mechanism, influence degree and signal characteristics for different faults are studied, and a new scheme with directional element for instantaneous trip current protection is proposed. It guarantees the proper operation of the protection for faulty motor and prevents the misoperation of the protection for the normal motor. Tests verify its correctness.

**Key words:** asynchronous motor; short-circuit simulation; parallel running; directional protection