

DOI: 10.7667/PSPC161057

# 一种变压器风冷控制系统多机保护定值整定方案

刘志远<sup>1</sup>, 于晓军<sup>1</sup>, 梁守硕<sup>2</sup>, 张道农<sup>3</sup>, 邹洪森<sup>1</sup>, 陈莉<sup>1</sup>

(1. 国网宁夏公司检修公司, 宁夏 银川 750001; 2. 上海泽鑫电力科技股份有限公司, 上海 201206;  
3. 华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

**摘要:** 首先介绍了变压器风冷控制系统的一、二次系统配置, 然后针对风冷控制系统中多组风机并联运行的情况, 提出了一种根据并联风机的总电流实现多机保护的定值整定方案。该方案在单机保护配置及其定值整定原则的基础上, 根据 N-1 故障原则计算出各项保护功能的定值, 详细分析了所提出定值的灵敏度, 并设计了一系列测试用例对方案进行了测试。分析和测试结果表明, 所提出的方案兼顾了可靠性和灵敏性, 能够满足多台电动机并列运行时对各项保护功能的需求, 在变压器风冷控制系统的电动机保护中具有实用价值。

**关键词:** 风冷控制系统; 电动机保护; 定值整定; 变压器; 多机

## A setting calculation scheme for multi-motors relay in transformer air cooling control system

LIU Zhiyuan<sup>1</sup>, YU Xiaojun<sup>1</sup>, LIANG Shoushuo<sup>2</sup>, ZHANG Daonong<sup>3</sup>, ZOU Hongsen<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>

(1. Maintenance Company of State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China;  
2. Shanghai Zexin Electric Power Technology Co., Ltd., Shanghai 201206, China;  
3. North China Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** The primary and secondary system configuration of a transformer air cooling control system is firstly introduced, and then aiming at the circumstance of multiple fan motors running in parallel in an air cooling control system, a new setting calculation scheme is proposed for multiple motors protection by using the total current of multiple motors. According to N-1 fault principle, setting values of each protection function are calculated in the new scheme based on the protection function configuration and its setting principle of a single motor relay. The sensitivity of all calculated setting values is analyzed in detail and the test is carried out by using a series of testing cases. The analysis and test result indicates that the new scheme has both high reliability and high sensitivity which can meet the demands of various protection functions for multiple motors in parallel operation, and also has certain practical value for motor protection in a transformer air cooling control system.

**Key words:** air cooling control system; motor protection; setting value calculation; transformer; multiple motors

## 0 引言

继电保护的定值整定计算是继电保护工作中的一个重要环节, 进行整定计算的目的是根据保护装置在现场一次设备的实际配置和运行要求, 通过分析计算出保护装置的各项定值并输入到保护装置内部, 使保护装置本身及保护装置之间相互配合正确协调地工作, 满足继电保护“四性”(即可靠性、选择性、快速性、灵敏性)的需求<sup>[1]</sup>。在运行过程中随着电力系统运行方式的变化和一次设备配置的不同, 继电保护装置的定值整定方案也需要作相应调整, 对其中部分定值或全部定值重新进行整定计算以满足新的运行需求, 文献[2-3]着重讨论了电力系

统后备保护的定值整定过程中所需考虑的因素, 但未涉及多个设备并列运行的保护定值整定方法。因此, 如何针对特定电力系统一次设备主接线图和特定的继电保护装置获取一个最佳的定值整定方案, 用于满足继电保护四性的需求及其相互之间的妥协折中, 这是定值整定计算需要解决的问题。

本文针对变压器风冷控制系统中多台风机并列运行时仅获取总电流用于保护时的特殊情况, 在单机保护配置和定值整定原则的基础上<sup>[4-7]</sup>, 提出了一套多机保护定值整定方案, 并对各项保护定值进行了灵敏度分析, 分析和测试结果均表明, 本文所提出的多机保护定值整定方案能满足多台电动机并列运行时对各项保护功能的灵敏度需求, 为多机保护

的定值整定提供了可借鉴的方法，从而为变压器风冷控制系统多机共用保护的配置方案奠定了理论依据，大大简化了一次系统接线。

### 1 变压器风冷控制系统简介

#### 1.1 变压器风冷控制一次系统

变压器风冷控制系统的一次设备一般包含一个电源子系统和多组风冷电机系统，典型的一次主接线图如图 1。

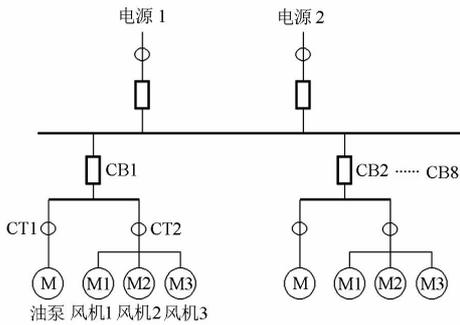


图 1 变压器风冷控制一次接线图

Fig. 1 Primary connection diagram of transformer air cooling control system

由图 1 可见，变压器风冷控制一次系统由一个单母线系统构成，由两回进线作为系统电源使用，通常是一主一备，而风冷系统由 8 个电机子系统构成，每个电机子系统一般包含一个油泵和若干(通常是 3~4 个)风机。油泵电流通过穿心式电流互感器 CT1 输出，而若干个风机则并联后通过穿心式电流互感器 CT2 输出，整个电机子系统由一个断路器 CB1 控制其运行或退出。

#### 1.2 变压器风冷控制二次系统

根据变压器风冷控制一次系统图构建的二次保护控制系统架构如下：

- (1) 用于进线电源控制的进线备自投模块；
- (2) 用于 8 组电机保护控制的 8 个马达保护模块；
- (3) 用于根据主变油温确定 8 组电机冷却系统投退的控制模块。

其中(2)是用于马达保护的模块，包括使用 CT1 对油泵的保护和使用 CT2 对多个风机的保护，和单一的电机保护不同，该模块含有对多台电机并列运行的保护功能，因此其定值整定方案是一个亟待解决的问题。

### 2 低压异步电机保护配置及定值整定原则

#### 2.1 低压异步电机保护配置

变压器风冷控制系统中使用的电机均为 380 V 的异步电机，由于仅接入三相电流，因此保护功能

完全由电流元件构成，主要配有下列保护功能<sup>[4-7]</sup>。

(1) 启动超时保护：电动机启动后，经过整定的启动时间，其电流值仍大于整定的额定电流值，则表明电动机启动时间过长，本次启动未成功，电动机有严重发热的风险，应切除断路器停止电机继续运行。

(2) 电流速断保护：主要用来反映电机内部严重的短路故障，根据启动过程前后电机运行特性的不同，又分为启动速断保护和运行速断保护。速断保护动作后，应快速跳开电动机的电源开关。速断保护用作电动机引出线及定子绕组相间短路的主保护之一。

(3) 堵转保护：用于电机正常运行过程中转子因机械故障受阻被卡住导致电流增大的保护，当电流大于堵转保护电流定值时，经整定延时跳闸，堵转保护在电机启动过程中闭锁。

(4) 定时限过流保护：用作堵转保护的后备保护，在电机启动过程中闭锁。

(5) 反时限过流保护：主要是针对电机运行过程中由于各种原因引起的过负荷而设的保护，采用反时限特性控制保护跳闸延时，在电机启动过程中闭锁。反时限过流保护是一种热过载保护模型，可以与不同的电动机进行匹配，满足不同应用场合的保护要求，但该模型只考虑发热，而未考虑散热条件的变化以及电动机的热积累<sup>[8]</sup>。

(6) 负序过流保护：用于反映电动机断相、逆相、定子绕组或引出线不对称相间短路、定子绕组匝间短路、电源电压严重不平衡等情况。

(7) 不平衡保护：用于防止由于系统中存在的不平衡电压或其他原因导致的不平衡电流引起电机发热而设的保护，根据不平衡度定值的大小，其出口可设为跳闸或告警。

#### 2.2 低压异步电机定值整定原则

在阐述异步电机定值整定原则之前，首先需要了解电动机启动过程中的电流变化规律。典型的电动机启动电流曲线如图 2 所示。

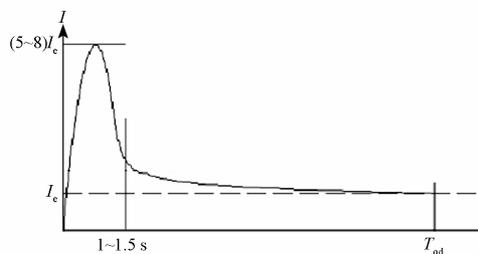


图 2 电动机启动过程中电流变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of current variation during motor starting process

由图 2 可见, 电动机在启动后的 1~1.5 s 内, 电流会迅速升高到额定电流的 5~8 倍, 随后经过电动机启动时间定值  $T_{qd}$  后, 电流逐渐恢复到额定电流  $I_e$  的水平。

电动机保护的的特殊性在于要区分启动过程中和启动过程后两个阶段, 投入不同保护和相关定值。

(1) 启动过长保护

相关定值是电机启动时间, 一般按实测最大电机启动时间的 1.2 倍设定, 通常可取 10 s; 另外在已知电动机额定有功功率  $P_e$  的情况下, 也可根据  $T_{max} = 2\sqrt{P_e} + 4$  来估算最大启动时间<sup>[6]</sup>。

(2) 电流速断保护(速断电流定值有高定值  $I_{sdH}$  和低定值  $I_{sdL}$ )

速断电流高定值  $I_{sdH}$  在电动机启动过程中使用, 按躲过最大启动电流整定为

$$I_{sdH} = K_{rel} \cdot K_{st1} \cdot I_e$$

速断电流低定值  $I_{sdL}$  在电动机启动后使用, 按躲过区外出口短路时电动机最大反馈电流整定为

$$I_{sdL} = K_{rel} \cdot K_{st2} \cdot I_e$$

其中:  $K_{rel}$  为可靠系数, 取 1.2~1.5;  $K_{st1}$  为电动机启动电流倍数, 取 6~8;  $K_{st2}$  为区外出口短路时电动机反馈电流倍数, 取 3~6;  $I_e$  为电机额定电流。

速断延时的整定: 当保护出口动作于断路器时, 动作延时取 0 s; 当保护出口动作于 F-C 时, 动作时间取 0.2~0.3 s, 额定电流较大时取 0.4 s, 此时  $K_{rel}$  可取 1.1。

另外, 电流速断保护的定值整定还应考虑到区外不对称短路时负序电压的影响<sup>[8]</sup>。

(3) 堵转保护

在电动机启动后投入, 其电流定值  $I_{dz}$  一般设为电动机铭牌上堵转电流的 0.5 倍, 若无此参数, 可设为  $I_{dz} = 4 \sim 6 I_e$ ; 延时定值可设为  $T_{dz} = 1.0 \sim 2.0$  s。

(4) 定时限过流保护

作为堵转保护的后备保护, 其电流定值可设为  $I_{gl} = 2 \sim 4 I_e$ , 延时定值可设为  $T_{gl} = 2.0 \sim 15$  s。

(5) 反时限过流保护

在电动机启动后投入, 其电流定值整定为  $I_{fsx} = (K_k/K_f) I_e$ 。

其中:  $K_k$  为可靠系数, 取 1.05~1.2;  $K_f$  为返回系数, 取 0.95, 实际运行中可取  $I_{fsx} = 1.1 I_e$ 。反时限时间常数定值可设为  $T_{fsx} = 0.5 \sim 10$  s, 反时限延时计算公式为<sup>[9]</sup>

$$T = \frac{\left( \frac{I_{\varphi max}}{I_{fsx}} \right)^\alpha - 1}{K} \times T_{fsx}$$

其中,  $I_{\varphi max}$  为最大相电流, 根据所选定的反时限特

性曲线不同,  $\alpha$ ,  $K$  的取值如下所述。

一般反时限特性:  $\alpha = 0.02, K = 0.14$ ;

非常反时限特性:  $\alpha = 1, K = 13.5$ ;

极端反时限特性:  $\alpha = 2, K = 80$ 。

(6) 负序过流保护

其过流定值  $I_{2set}$  可根据负序过流保护的应用目的不同而有所区别<sup>[4-5, 10]</sup>: 当负序过流保护用作缺相保护时, 取  $I_{2set} = 0.3 \sim 0.6 I_e$ ; 当负序过流保护用作不对称短路的后备保护或反相序保护时, 可取  $I_{2set} = 0.8 \sim 1.0 I_e$ 。其延时定值可设为  $T_2 = 1.0 \sim 5.0$  s。

(7) 不平衡保护

不平衡度定值可取  $BP = 30\% \sim 80\%$ , 当整定为  $BP = 70\%$  时, 其延时定值可设为  $T_{bp} = 2.0$  s。

### 3 多机保护定值整定方案构思及实现

前面提出的定值整定原则仅适用于单机系统, 如变压器风冷控制系统中的油泵保护, 而对于并列运行的多台风机, 本文提出的定值整定方案如图 3 所示。

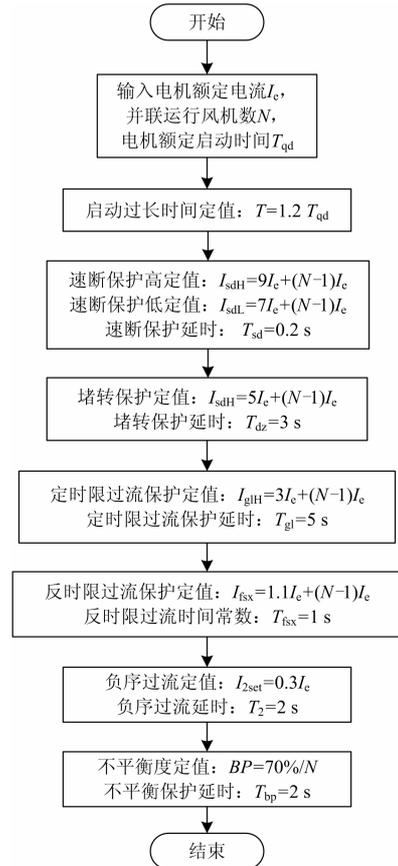


图 3 多机保护定值整定方案流程图

Fig. 3 Flow chart of setting calculation scheme for multiple motors protection

该定值整定方案的前提是多台并列运行的风机

是同一型号和同一特性的，具有相同的额定电流和启动时间定值，假定并列运行的风机数目是  $N$ ，每台电机的额定电流是  $I_e$ ，额定启动时间是  $T_{qd}$ 。所提出的定值整定方案是基于  $N-1$  故障原则(即最小故障原则)： $N$  台风机中仅有一台在启动或运行过程中发生故障，而其他  $N-1$  台风机保持正常运行。需要注意的是：由于多台并列运行电机总的负序电流为各台电机负序电流的线性叠加，所以多机负序过流定值与单机一样；而多机不平衡度定值随并列运行的电机数成比例减小。

#### 4 多机保护定值整定方案的灵敏度分析

##### 4.1 保护定值灵敏度概述

保护定值的灵敏度系数定义为：故障时接入保护装置的故障量与相应的保护定值之比，是考核继电保护灵敏性的重要指标。灵敏度系数越高，越能反应要求动作的故障，但也越容易误动，使保护失去选择性。保护定值最小灵敏度是根据系统最小运行方式下保护范围内最轻微的故障量除以相应的保护定值计算所得，一般要求至少大于 1.1~1.2。以下对多机保护定值与单机保护定值的灵敏度逐一比较。

假定在 3 台电机并列运行的情况下，对某一项过流保护功能，单机过流定值为电流  $I_{zd}$ ，最小运行方式下的最轻微故障电流为  $I_{dmin}$ ，此时单机保护的定值灵敏度为： $K_1=I_{dmin}/I_{zd}$ ，而多机保护的定值灵敏度为： $K_2=[(I_{dmin}+(N-1)I_e)/(I_{dz}+(N-1)I_e)$ 。

##### 4.2 多机保护定值灵敏度分析

###### (1) 速断定值灵敏度分析

单机速断定值的灵敏度系数： $K_1=I_{dmin1}/I_{sd1}$ 。其中： $I_{dmin1}$  为最小运行方式下电动机出线端两相短路时流过保护的相电流； $I_{sd1}$  为速断保护定值(高定值或低定值)。

多机速断定值的灵敏度系数： $K_2=I_{dmin2}/I_{sd2}$ 。其中， $I_{dmin2}=I_{dmin1}+(N-1)I_e$ ； $I_{sd2}=I_{sd1}+(N-1)I_e$ 。

由于  $I_{dmin1}>I_{sd1}>I_e$  且  $N>1$ ，所以  $K_2<K_1$ ，而且当  $N$  越大时， $K_2$  越小，也就是按照本文提出的多机保护定值整定方案，过流速断的灵敏度系数比单机运行时小。以下举例分析该灵敏度系数能否满足实际需求。

假定  $I_{sd1}=9I_e$ ， $K_1=1.2$ ， $N=3$ ，则  $K_2=(1.2 \times 9I_e + 2I_e)/(9I_e + 2I_e)=1.164>1.1$ 。

可见，由于速断保护的定值为  $I_e$  的 6~10 倍，且并联运行的风机数为 3~4 台，多机速断定值的灵敏度系数与单机速断定值的灵敏度系数接近，仍能满足电动机速断保护的灵敏度需求。

###### (2) 堵转定值灵敏度分析

堵转保护的灵敏度校验方式与速断保护相同，但由于其定值比速断保护小，所以其灵敏度比单机运行的情况下降低得更多一些，假定单机堵转定值  $I_{dz}=5I_e$ ， $K_1=1.2$ ， $N=3$ ，则多机堵转定值灵敏度系数为

$$K_2=(1.2 \times 5I_e + 2I_e)/(5I_e + 2I_e)=1.14>1.1$$

可见，多机堵转定值的灵敏度满足需求。

###### (3) 定时限过流定值灵敏度分析

假定单机过流定值  $I_{gl}=3I_e$ ， $K_1=1.2$ ， $N=3$ ，则多机过流定值灵敏度系数为

$$K_2=(1.2 \times 3I_e + 2I_e)/(3I_e + 2I_e)=1.14>1.12>1.1$$

可见，多机定时限过流定值的灵敏度满足需求。

###### (4) 反时限过流定值灵敏度分析

假定单机过流定值  $I_{gl}=1.1I_e$ ， $K_1=1.2$ ， $N=3$ ，则多机过流定值灵敏度系数为

$$K_2=(1.2 \times 1.1I_e + 2I_e)/(1.1I_e + 2I_e)=1.07<1.1$$

可见，多机反时限过流定值的灵敏度不满足需求，但在保证电流测量精度的情况下，仍可按此定值构成多机系统的反时限过流保护，这里计算的毕竟是最小灵敏度。

###### (5) 负序过流定值灵敏度分析

假定有一台风机缺相运行，则所有风机总的负序电流仍和缺相风机的负序电流相等，所以多机负序过流定值的灵敏度和单机负序过流定值的灵敏度相等。

###### (6) 不平衡度定值灵敏度分析

假定单机的不平衡度为  $BP1=(I_{max}-I_{av})/I_{av}$ ，并假定  $I_{av}=I_e$ ，在其他  $N-1$  台电机正常运行的情况下，多机的不平衡度为

$$BP2=\{I_{max}+(N-1)I_e-[I_{av}+(N-1)I_e]\}/[I_{av}+(N-1)I_e]=(I_{max}-I_{av})/NI_e=BP1/N$$

可见多机不平衡定值只需要按单机不平衡度的  $1/N$  进行整定即可满足灵敏度需求。

#### 5 多机保护定值整定方案的仿真试验

设置并列运行风机数为 3，单台风机额定电流为 1 A，按照本文提出的多机定值整定方案设置好所有保护定值后，构建了如下的测试用例对各项保护功能进行了测试：

(1) 启动速断定值设置为  $I_{sdH}=9 \times 1 + 2 = 11$  A，用继电保护测试仪施加三相电流超过 11 A，启动速断保护动作；

(2) 堵转定值设置为  $I_{dz}=5 \times 1 + 2 = 7$  A，用继电保护测试仪施加三相电流大于 7 A 小于等于 11 A，堵转保护动作；

(3) 定时限保护定值设置为  $I_{gl}=3 + 2 = 5$  A，用继电保护测试仪施加三相电流大于 5 A 小于等于 7 A，

定时限保护动作;

(4) 反时限保护定值设置为  $I_{fsk}=1.1+2=3.1$  A, 用继电保护测试仪施加三相电流大于 3.1 A 小于等于 5 A, 反时限保护动作;

(5) 负序过流保护定值设置为  $I_{2set}=0.3$  A, 用继电保护测试仪施加 A 相电流 2 A, B、C 两相电流 3 A, 模拟单机 A 相断线故障时, 测得负序电流  $I_2=0.33$  A, 负序过流保护动作;

(6) 设置  $I_A=3.7$  A,  $I_B=3$  A,  $I_C=2.3$  A, 模拟单机不平衡度为 70% 的场景, 多机不平衡度设置为 23% 时, 不平衡保护动作。

## 6 结论

(1) 本文所提出的基于 N-1 原则的多机保护定值整定方案适用于多台电机并列运行时的保护功能需求, 并具有满足需求的定值灵敏度;

(2) 对于反时限过流及过负荷等定值倍数偏低的情况, 需要依靠高精度的采样以满足轻微过负荷的灵敏度需求, 确保相应保护可靠跳闸;

(3) 由于本文所提出的多级保护定值整定方案是基于其他 N-1 台电机在额定电流下运行的, 对于偏离额定电流运行的情况尚需进行进一步的灵敏度分析和定值整定方案的改进。

## 参考文献

- [1] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 张永浩, 龚仁敏, 王利强, 等. 220~750 kV 电网线路后备保护整定配合探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 136-142.  
ZHANG Yonghao, GONG Renmin, WANG Liqiang, et al. Discussion on the coordination of backup protection relay settings in the 220~750 kV network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 136-142.
- [3] 张健康, 粟小华, 夏芸. 750 kV 变压器保护配置及整定计算探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 89-94.  
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, XIA Yun. Discussion on protection configuration and setting calculation for 750 kV transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 89-94.
- [4] 吴春红, 石光, 郭耀珠. 浅谈数字式电动机保护的整定原则[J]. 河南电力, 2007(3): 9-10, 28.  
WU Chunhong, SHI Guang, GUO Yaozhu. A brief discussion on settings of digital protection for motor[J]. Henan Electric Power, 2007(3): 9-10, 28.
- [5] 邱爱兵. 浅谈微型电动机保护装置的保护功能和参

数整定[J]. 大众科技, 2007, 96(8): 138-140.

- QIU Aibing. A brief discussion on protection function and parameter setting of microcomputer based motor relay[J]. Public science Technology, 2007, 96(8): 138-140.
- [6] 董桂成. 低压电动机保护定值整定探讨[J]. 电气技术, 2015(6): 138-140, 144.  
DONG Guicheng. A discussion on setting of low voltage motor protection[J]. Electric Technology, 2015(6): 138-140, 144.
- [7] 华宏彬, 蒲鉴. 高压异步电动机微机保护的整定[J]. 中国科技纵横, 2015, 218(14): 158-159.  
HUA Hongbin, PU Jian. Setting calculation of high voltage asynchronous motor protection[J]. China Science & Technology Panorama, 2015, 218(14): 158-159.
- [8] 高博, 罗亚桥, 郑国强, 等. 不对称短路故障下非故障 6 kV 电动机速断保护动作行为分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 104-106, 134.  
GAO Bo, LUO Yaqiao, ZHENG Guoqiang, et al. Analysis of 6 kV no-fault motor instantaneous trip protection action on symmetrical short-circuit faults[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 104-106, 134.
- [9] 张天鹏, 瞿亚芳, 郝申军. 低压电动机热过载保护的研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 125-129.  
ZHANG Tianpeng, QU Yafang, HAO Shenjun. Research and design for low voltage motor thermal overload protection device[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 125-129.
- [10] 高春如, 张金水, 赵旭东, 等. 高压电动机负序过电流保护整定计算[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 93-97.  
GAO Chunru, ZHANG Jinshui, ZHAO Xudong, et al. Setting calculation of negative sequence overcurrent protection for high-voltage motor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 93-97.

收稿日期: 2016-05-12; 修回日期: 2016-07-22

作者简介:

刘志远(1970-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析运行与控制、电力系统继电保护; E-mail: ycdhlz@126.com

于晓军(1984-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析运行与控制, 现从事直流换流站控制保护维护管理工作; E-mail: yuxiaojun\_1314@163.com

梁守硕(1977-), 男, 本科, 研究方向为电力系统自动化、电力系统继电保护。E-mail: shoushuoL@shzixin.com

(编辑 葛艳娜)