钢铁企业10 kV异步电动机电流保护配置应用研究

张 强，年 明

（中冶京诚工程技术有限公司电控所，北京 100176）

摘要：10 kV 异步电动机是钢铁企业极为重要的设备，应用于企业的各个生产流程中。基于钢铁企业的配电系统自身的特点，常规的电动机保护配置方案往往不能满足实际运行的需要。介绍了电动机回路产生大电流的两种情况：电动机向电网短路点反馈短路电流和电动机在电压暂降时的自起动电流。通过一起实例，得出对电动机及其相邻回路电流保护的配置及定值计算方案，提高了相关回路继电保护的准确性与可靠性。

关键词：异步电动机；短路电流；自起动电流；电流保护；整定计算

Research on current protection configuration of 10 kV asynchronous motor in iron and steel plant

ZHANG Qiang, NIAN Ming

（Electrical & Control Division, MCC Capital Engineering & Research Co.,Ltd., Beijing 100076, China）

Abstract: The 10 kV asynchronous motors are very important equipment in iron and steel plant, which are applied to all production processes of the enterprise. Based on the characteristics of distribution system in iron and steel plant, the conventional protection configuration of motor scheme may not meet the actual needs. This paper introduces two cases of large current in motor circuit: feed short-circuit current back to the grid and self-starting current by voltage sag. Through an example, this article obtains the configuration and setting calculation of current protection for motor and its adjacent circuits, improves the accuracy and reliability of relay protection.

Key words: asynchronous motor；short-circuit current；self-starting current；current protection；setting calculation

0 引言

近些年来，我国的粗钢产量一直位居世界第一。作为高耗电行业，钢铁企业设备装机容量大，70%以上是大型高压电动机，且大部分电动机常规设计为不停机运行[1]。钢铁企业中的高压电动机额定电压多为10 kV，额定功率从几百千瓦到几万千瓦不等，应用于企业的各个生产流程中。这些电动机一旦停机，将直接影响到企业的正常生产[2]。

继电保护设备是保障电网安全运行的第一道防线，其主要功能是快速、精确以及可靠地切除故障元件，将故障的影响限制在最小范围内，有效防止故障扩大，进而保证整个电网的安全稳定[3]。异步电动机的故障形式多种多样，主要包括绕组相间短路、单相接地、过负荷（过载）以及堵转故障等[4]。针对这些故障，目前的微机保

护装置已经可以提供较为全面的保护，包括电流速断保护、定时限过电流保护、差动保护、单相接地保护、负序过电流保护和低电压保护等[5]。

在GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》和DL/T 1502—2016《厂用电继电保护整定计算导则》等标准规范中，对电动机各种保护的设置原则和定值计算方式均有相应的描述。但是钢铁企业的配电系统有其自身的特点，常规的保护配置方案往往不能满足实际运行的需要。本文即是根据钢铁企业的电网特征，分析10 kV异步电动机电流保护的最优配置方案，并研究了电动机及其相邻回路的电流保护的定值计算原则。

1 典型的10 kV异步电动机电流保护配置

图1是一个典型的10 kV异步电动机保护配置方案。TA1为电动机线路的电流互感器。微机保护装置可以为电动机提供电流速断保护、定时限过电流保护等。

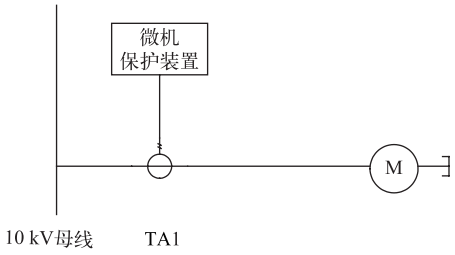

图 1 典型 10 kV 异步电动机保护配置

Fig. 1 Typical 10 kV motor protection configuration

1.1 电流速断保护

目前国内的10 kV电动机保护装置速断保护大多采用“高低定值”的方式，即在电动机起动时按高定值动作，起动结束后按低定值动作[6]。具体整定计算方法为

$$I_{op} = K_K K_{st} I_e \tag{1}$$

式中，K_K为可靠系数；K_{st}为电动机起动电流倍数，应按实测数据，如无实测值可取K_{st}=6；I_e为电动机额定电流。

对于高定值，可靠系数可取K_K=1.5～1.6；对于低定值，可靠系数可取K_K=1.2～1.3。

电流速断保护整定值的灵敏度系数K_{sen}可按式（2）计算

$$K_{sen} = I^{(2)}_{Dmin} / I_{op} \tag{2}$$

式中，$I^{(2)}_{Dmin}$为电动机入口处的最小两相短路电流，要求K_{sen}>2。

1.2 定时限过电流保护

定时限过电流保护可为电动机堵转时提供保护。动作值可表示为

$$I_{op} = K_K I_e \tag{3}$$

式中，K_K=1.3～2.0为可靠系数，定时限过电流保护动作时限可取1.1倍电动机起动时间，动作于跳闸。

1.3 差动保护

对于2 000 kW以上的电动机，当速断保护灵敏度不满足要求时，可设置差动保护。电动机的差动保护主要有两种形式：纵联差动保护和磁平衡差动保护。

图2是一个设置差动保护的10 kV电动机保护配置方案。其中，TA2为电动机出口侧电流互感器，TA3为电动机中性点侧电流互感器。纵联差动保护的差流采用TA1和TA3电流的矢量和，而磁平衡差动保护通过电流流入和流出TA2形成差流。

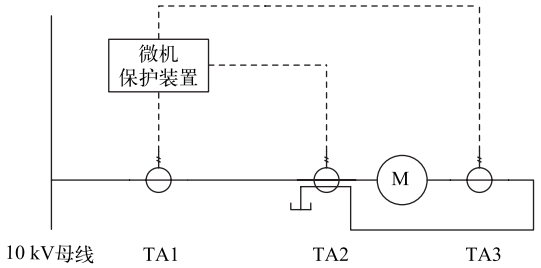

图 2 设置差动保护的 10 kV 电动机保护配置方案

Fig. 2 Differential protection configuration of 10 kV motor

纵联差动保护可以保护电动机及其供电电缆，但需要两组电流互感器，接线较为复杂，且对单相接地故障灵敏度不够。而磁平衡保护虽然保护范围仅为电动机本身，可是只需要一组电流互感器，接线简单，其差动保护对于保护区内、区外故障都具有很高的可靠性[7]。

2　电动机电流保护配置存在的两个问题

企业中电动机在实际运行过程中，往往还面临两个问题：对电网内短路点反馈短路电流以及电压暂降时的自起动电流。在这两种情况下，电动机相关回路的电流都远大于电动机的额定电流。某些大容量电动机或特定场合下运行的电动机在计算定值时，如果不考虑这两个因素，可能会导致保护误动作或越级动作。

2.1　电动机对电网内短路点的反馈短路

随着对异步电动机模型研究的深入，电动机电磁暂态过程对于电网中短路点的反馈电流越来越受到人们的重视[8]。文献[9]在分析了异步电动机模型后，得出电动机反馈短路电流特性：①电动机定子绕组端点三相短路时的等效电路与电动机起动时的等效电路相同；②当电动机与短路点的电气距离较近时，电动机处于发电机状态，向短路点反馈短路电流；③电动机反馈短路电流衰减速度随容量增大而减慢。

以某钢厂一台6 300 kW异步电动机为例，利用ETAP软件进行仿真，图3为其出口母线发生三相短路时，电动机的反馈电流图。

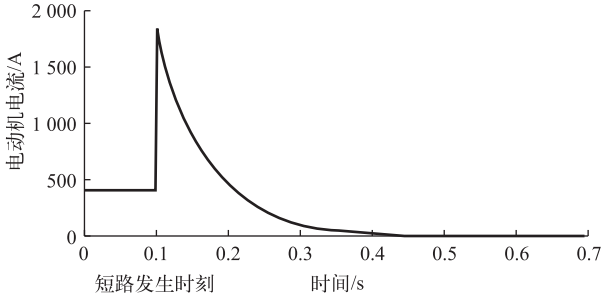

图 3　6 300 kW 电动机反馈短路电流仿真图

Fig. 3 Feedback short-circuit current simulation diagram of 6 300 kW motor

图3中电动机的额定电流为412 A，在0.1 s时电动机出口母线发生三相短路故障，可以看到电动机在极短的时间内向外反馈短路电流，其值远大于额定电流约为1 883 A。电动机反馈的短路电流值大约5个周波后小于其额定电流，10～15个周波后衰减到接近零。整个电动机反馈短路电流的波形与电动机的起动电流波形十分相似。

2.2　电动机在电压暂降时的自起动电流

电压暂降有时又称“晃电”，是指供电电压的有效电压值突然降至额定电压的90%～10%，然后又恢复正常，这一过程持续10 ms～60 s[10]。电压暂降是电网正常运行难以避免的事件，普遍认为是由包括系统内的短路故障、雷击和大型变压器空载励磁等引起的[11]。电压暂降存在多种类型，不同的电压暂降波形会造成不同后果[12]。当电动机的机端母线发生短时的电压暂降时，电动机回路的电流将经历一个复杂的过程[13]。图4仍然以6 300 kW电动机为例，对其进行电压暂降的仿真。

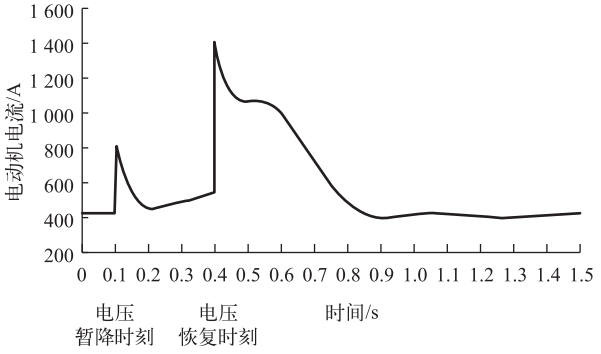

图 4　6 300 kW 电动机电压暂降时电流仿真图

Fig. 4 Current simulation diagram by voltage sag of 6 300 kW motor

在0.1 s时刻，6 300 kW电动机母线电压突然降至40%的额定电压；0.4 s时刻，电压恢复至额定电压。从图4中可以看出，电动机电流先增大，随后减小，在电压恢复时刻又迅速增大，最大值约为1 400 A。分析其原因，应该是电压暂降时，电动机机端电压下降，为保证电动机出力导致电流增大。随后由于电压一直未恢复，电动机电流开始下降，直至电压恢复为额定电压。如果电压恢复的时间小于电动机低电压动作的时限，则此时电动机开始自起动，电流迅速增大。通过上述例子可知，电动机在电压暂降时，其电流与电压降低的幅度和恢复的时间均有关系，电压降低的幅度越大，恢复时间越长，电动机的状态越接近自起动状态，此时电动机回路的电流值必然远大于电动机的额定电流。

3 电动机及其相邻回路的电流保护配置

异步电动机在上述两种情况下，会在回路中产生一个较大的电流。在钢铁企业某些配电室中，存在大电动机和较小短路容量的情况，在这种情况下，电动机及其相邻回路的电流保护往往不能按照常规进行配置。以上述某钢厂6 300 kW电动机为例，图5为该电动机的配电回路。

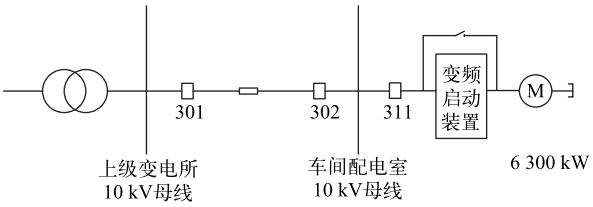

图 5 6 300 kW 电动机配电回路图

Fig. 5 Power distribution circuit diagram of 6 300 kW motor

此6 300 kW异步电动机接于某车间配电室10 kV母线311回路，采用变频起动装置（起动完成后由旁路开关切换至工频运行）。该车间配电室的进线为302回路，电源引自上级变电所10 kV母线301回路。上级变电所10 kV母线最小短路容量为112 MV·A，即最小三相短路电流约为6.47 kA。车间配电室10 kV母线最小三相短路电流约为5.63 kA。

3.1 电动机回路定值整定

尽管电动机采用变频起动方式，起动电流不超过额定电流，但是起动完成之后，起动装置退出，电动机通过旁路开关直接接到车间10 kV母线。因此，一旦电网内存在短路点或电压暂降，电动机回路将会产生较大的反馈电流或自起动电流。根据式（1）～式（3）可计算出电动机回路的速断和过电流定值。

速断高定值及灵敏度系数表达式为

$$I_{\mathrm{op.h}} = K_{\mathrm{K}} K_{\mathrm{st}} I_{\mathrm{e}} = 1.6 \times 6 \times 412\ \mathrm{A} = 3\,955\ \mathrm{A} \tag{4}$$

$$K_{\mathrm{sen.h}} = I^{(2)}_{\mathrm{Dmin}} / I_{\mathrm{op.h}} = 0.87 \times 5\,630\ \mathrm{A} / 3\,955\ \mathrm{A} = 1.24 < 2 \tag{5}$$

速断低定值及灵敏度系数表达式为

$$I_{\mathrm{op.l}} = K_{\mathrm{K}} K_{\mathrm{st}} I_{\mathrm{e}} = 1.3 \times 6 \times 412\ \mathrm{A} = 3\,213\ \mathrm{A} \tag{6}$$

$$K_{\mathrm{sen.l}} = I^{(2)}_{\mathrm{Dmin}} / I_{\mathrm{op.h}} = 0.87 \times 5\,630\ \mathrm{A} / 3\,213\ \mathrm{A} = 1.54 < 2 \tag{7}$$

定时限过电流保护定值表达式为

$$I_{\mathrm{op}} = K_{\mathrm{K}} I_{\mathrm{e}} = 1.3 \times 412\ \mathrm{A} = 536\ \mathrm{A} \tag{8}$$

通过式（4）～式（8）的计算可知，无论是高定值还是低定值的速断保护都无法满足电动机入口处最小短路电流的灵敏度要求，而减小定值满足灵敏度又可能造成误动作，因此电动机回路应选用差动保护作为主保护。按照纵联差动保护进行整定，差动保护起动值可取0.4I_{e}，差动速断值取6I_{e}，比率制动斜率取0.5。后备保护可选用定时限过电流保护，定值可取式（8）的计算结果，动作时限仍然要躲过电动机直接起动时的起动时间，设为25 s。

3.2 线路回路定值整定

线路回路可设两段电流保护（带时限速断保护和过电流保护），两段保护的定值和动作时限均需与电动机保护相配合。

对于302回路，其带时限速断保护应躲过相邻10 kV回路的电流速断最大值，且线路末端故障时，灵敏度系数应不小于1.5[14]。由于配电室只有一台6 300 kW电动机，因此电流速断最大值可取电动机的速断高定值。具体计算为

$$I_{\mathrm{opI}} = K_{\mathrm{K}} I_{\mathrm{op.h}} = 1.1 \times 3\,955\ \mathrm{A} = 4\,350\ \mathrm{A} \tag{9}$$

$$K_{\mathrm{senI}} = I^{(2)}_{\mathrm{Dmin}} / I_{\mathrm{opI}} = 0.87 \times 5\,630\ \mathrm{A} / 4\,350\ \mathrm{A} = 1.13 < 1.5 \tag{10}$$

式（10）显示速断保护灵敏度不满足要求，因此按灵敏度1.5反推定值。

$$I_{\mathrm{opI}} = I^{(2)}_{\mathrm{Dmin}} / K_{\mathrm{senI}} = 0.87 \times 5\,630\ \mathrm{A} / 1.5 = 3\,265\ \mathrm{A} \tag{11}$$

此电流值约为电动机额定电流的7.9倍，可能会小于电动机对电网中短路点的反馈电流，为避免在这种情况下误动作，可以对速断保护增加方向，方向设定为指向母线，动作时间设为0.3 s。

由于车间负荷只有一台电动机，则302回路的过电流保护仅与电动机回路的过电流保护做配合即可。

$$I_{\mathrm{opII}} = K_{\mathrm{K}} I_{\mathrm{op}} = 1.1 \times 536\ \mathrm{A} = 590\ \mathrm{A} \tag{12}$$

动作时限设为25.5 s。

对于301回路，其两段电流保护的定值均需要与302回路配合。由于302回路的速断保护灵敏度已经到允许的最小值，所以301回路的速断保护定值无法再增大，只能与302回路保持一致。动作时限可增加一个 Δt，设为0.6 s。

301回路的过电流保护由于受上级主变压器保护时限的限制，最长动作时间只能是1.1 s，如果大于此时间，可能会引起主变压器低后备保护误动作。过电流保护定值可设定为1.1倍 I_{opII}，即为649 A。此电流值约为电动机额定电流的1.6倍，对于电动机反馈短路电流和自起动电流均有可能误动作。为避免这种情况，可对过电流保护增设复合电压闭锁功能，低电压闭锁值设为60 V，负序电压闭锁值设为4 V。

3.3 定值配合

根据上述整定过程，可以得出电动机相邻线路回路的电流保护配置及定值整定原则：

1）对于电动机回路，当其速断保护不能满足灵敏度要求时，应采用差动保护作为主保护。

2）对于电动机相邻线路回路，当其速断保护不能保证躲过电动机的反馈短路电流时，可以对速断保护增加方向，方向设定与电动机反馈电流相反。

3）对于电动机相邻线路回路，当其过电流保护不能保证躲过电动机反馈短路电流或自起动电流时，可以对过电流保护增设复合电压闭锁功能，通过低电压和负序电压闭锁，避免其误动作。

根据上述原则，各回路保护定值情况见下表。

表　各回路保护定值情况

Tab. Protection setting of each circuit

回路位置	保护类型	一次定值 /A	动作时限 /s
311 电动机回路	差动速断	$6I_e$	0
	差动保护启动值	$0.4I_e$	
	比率制动斜率	0.5	
	定时限过电流保护	536	25
302 10 kV 进线回路	带方向延时速断保护	3 254 电流方向为指向母线	0.3
	定时限过电流保护	590	25.5
301 10 kV 出线回路	带方向延时速断保护	3 254 电流方向为背离母线	0.6
	复合电压闭锁定时限过电流保护	649 低电压闭锁值 60 V 负序电压闭锁值 4 V	1.1

通过上表可以看出，电动机及其相邻回路的各个电流保护依次配合，既确保了对于回路本身故障的合理动作，又保证了在电动机向电网反馈短路电流或由于电压暂降而发生自起动时，保护装置不会误动作。

4　结束语

本文介绍了钢铁企业10 kV异步电动机电流保护配置的典型方案，并提出了电动机回路产生大电流的两种情况：电动机向电网短路点反馈短路电流和电动机在电压暂降时的自起动电流。经过仿真推断，这两种情况下，电动机回路产生的电流均远大于电动机的额定电流。通过某钢厂10 kV异步电动机的实例，得出对电动机及其相邻回路电流保护的配置及定值计算方案，可以有效地提高相关回路继电保护的准确性与可靠性。

参考文献

[1] 穆慧灵，刘松斌．风机和泵类负载高压变频节能潜力分析及估算[J]．冶金自动化，2014，38(6)：1-5．

[2] 施处良，朱红莉．变频节电技术在炼钢厂高压电动机上的应用[J]．电力需求侧管理，2015，17(3)：32-34．

[3] 叶远波，陈晓东，项忠华，等．继电保护在线状态检修的应用和探讨[J]．电力系统保护与控制，2017，45(22)，132-138．

[4] 陈金刚，王强，巩方彬．笼型三相异步电机主要故障简析[J]．电机与控制应用，2012，39(6)：65-68．

[5] 赵广伟．三相异步电动机继电保护原理及故障分

析[J]．防爆电机，2020，55(6)：52-56．

[6] 厂用电继电保护整定计算导则：DL/T 1502—2016[S]．北京：中国电力出版社，2016．

[7] 李斌，范瑞卿，贺家李．电动机磁平衡式差动保护的整定计算[J]．电力系统保护与控制，2010，38(13)：79-82．

[8] 李勇，于芮技，王英英，等．负荷对短路电流的影响研究[J]．电力系统保护与控制，2015，43(6):40-45．

[9] 刘楠，张彦涛，秦晓辉，等．感应电动机负荷对短路电流影响机理研究[J]．电网技术，2012，36(8)：187-192．

[10] 电能质量 电压暂降与短时中断：GB/T 30137—2013[S]．北京：中国标准出版社，2014．

[11] 汪颖，周杨，肖先勇，等．电压暂降问题研究现状及面临的挑战[J]．供用电，2018，35(2)：2-9．

[12] 江友华，谢振刚，曹以龙．考虑电压暂降波形多样性的暂降特征评估[J]．电力电容器与无功补偿，2022，43(2)：127-133．

[13] 孟庆伟，赵莹，高涵．利用铭牌参数的感应电动机低穿能力评估[J]．电机与控制学报，2020，24(11)：127-134．

[14] 3 kV～110 kV电网继电保护装置运行整定规程：DL/T 584-2017[S]．北京：中国电力出版社，2018．

作者简介

张强（1983—），男，硕士，高级工程师，从事钢铁企业供配电设计研究工作。

年明（1980—），女，硕士，高级工程师，从事钢铁企业供配电设计研究工作。

（收稿日期：2022-06-21）