

# 高炉风机主电机工作励磁、失磁保护的研究

张耀松

(首钢动力厂,北京 100010)

**【摘要】**针对首钢动力厂1#高炉鼓风机同步电动机在运行中因为励磁装置故障引起同步电动机失磁的原因进行了分析,并应用PLC技术设计一套简易失磁保护装置,提出恢复继电保护柜失磁保护功能,以满足电机正常运行的要求。

**【关键词】**电动机; 励磁; 失磁保护

**【中图分类号】**TM341

**【文献标识码】**B

**【文章编号】**1006-6764(2005)05-0005-04

## Research on Excitation and Non-magnetic Protectors During Operation of Main Motor of Blast Furnace Blower

ZHANG Yao-song

(Power Plant, Capital Iron & Steel Co., Beijing 100010)

**【Abstract】** The non-magnetic causes of the synchronous motor due to faults of an excitation device during operation of the synchronous motor of the blower for No.1 blast furnace of the Power Plant of Capital Iron & Steel Co. are analyzed. The PLC technology was used to design a set of simple non-magnetic protector. The device can protect the relay protection box when the box is non-magnetic and meet the needs of the motor operation.

**【Key words】** motor; excitation; non-magnetic protection

### 1 首钢电动鼓风机技术概况

首钢动力厂1#电动高炉鼓风机是首钢炼铁厂高炉鼓风专用风机,是保证炼铁厂高炉安全稳定生产的关键设备。其主体设备是:中国陕西鼓风机厂引进瑞士苏尔寿技术生产的AV100-17全静叶可调式轴流压缩机和德国西门子公司生产的IDM3854-80E01-E同步电动机。

1#风机同步电机采用恒流启动方式,实现了大型同步电动机启动时对电网不构成冲击。为了实现这种无冲击的启动,该风机采用恒流变频启动方式,用此方法启动时,转子通入励磁电流,定子由变频装置提供变频电源,变频电源的频率由低逐渐升高到50 Hz,电压逐渐升高到电机额定电压,电机的转速随频率同步地升高到额定值3000 r/min。变频启动装置是首钢引进西门子公司技术,与西门子合作制造。它由变频变压器、整流可控硅、逆变可控硅、可控硅光触发控制器、主回路及数字逻辑控制调整柜、启动励磁控制、并网装置等组成。启动装置属于交-直-交电流型变频器,实现功率转换,此变频器应用计算机控制技术,由一台西门子的SIMADYN.D可

编程控制。运行励磁系统采用的是另一套西门子SIMADYN.D可编程控制。主回路由励磁调整装置(SIMOREG.K)、过流保护及若干接口实现启动励磁、工作励磁功能。

1#风机同步电机的恒流起动装置采用静止型交-直-交变频设备。用这套装置实现软起动,用机侧的PT、CT检测主电机电流、电压,送到西门子SIMADYN.D控制器内进行运算,以保持逆变器输出频率与电动机的转速相对应。

电机启动前,确认机组的辅助设备准备工作完毕后,开启盘车,转速到30 r/min,投入励磁装置和变频系统。起动从1%转速开始,由于这时转速频率很低,同步电动机所建立的反电势还很小,达不到可控硅元件关断所需要的逆电压,因此,在低速阶段,由断续换流控制装置控制逆变器可控硅的关断,采用断续换流法加速。

当转速达到10%额定转速时,电机定子绕组产生的三相感应电势使逆变器工作在有源逆变状态,此时利用电机本身产生的反电势实现逆变器可控硅元件的关断进行自然换流,电机继续加速。

电机转速达到额定转速的 97% 时,通过整步控制使得同步机与电网侧的频率、电压相位及电压幅值相同后,并网装置发出指令,主断路器投入,电机并入电网运行,变频启动装置退出,励磁装置进行自动调整。

1# 风机控制显示系统由仪表系统、可编程控制器、工控机、执行系统组成。仪表系统采用常规仪表显示各种运行参数,可编程(PLC)采用西门子的115U系列,工控机采用研华奔腾Ⅲ,115U完成数据采集,控制指令输出并与工控机通讯,工控机则完成机组状态参数的显示、报警并通过人机交互输入操作指令。一套西门子全数字系统对电机进行保护,包括过电流保护、欠电压保护、差动保护、逆功率保护、负序保护、定子绕组接地保护、转子绕组接地保护、失磁保护等模块(失磁保护模块未投入)。

#### 1# 风机主要数据:

风机:陕西鼓风机厂引进瑞士苏尔寿(Sulzer)公司技术制造的AV100-17型全静叶可调式轴流鼓风机,转速为3 000 r/min,铭牌风量7 560 m<sup>3</sup>/min,实际7 200 m<sup>3</sup>/min,出口风压5 kg/cm<sup>2</sup>。

主电机:西门子公司生产的IDM3854-8DE01-Z型同步电机,转速为3 000 r/min,额定电压10.5

kV,功率36.14 MW。额定电流2 379 A,励磁电流649 A,频率50 Hz。

励磁机:西门子公司生产的1JG2417-1DW02型励磁机,输入电压188 V,输入电流228 A,输出电压184 V,输出电流649 A。

#### 2 1# 风机同步电机的励磁

根据供电方式的不同,励磁分为有刷励磁和无刷励磁,1# 风机同步电机采用无刷励磁方式。

无刷励磁是70年代后出现的,即在同步电机轴上安装一台励磁机。励磁机实际上是一台交流发电机,在与同步电动机主轴同轴旋转的过程中发出三相交流电。励磁机输出电流经过转子上镶嵌的整流器(旋转二极管即不可控整流桥)整流后变成直流电,通过与轴绝缘的轴心母线将直流电送入同步电动机的转子绕组,做为同步电动机的励磁电流,这样就无需集电环和电刷,故称之为无刷励磁。

励磁机定子外接励磁控制柜,励磁控制柜的作用是将380 V三相交流电源变为可调电源并供给励磁机作为其发电励磁电源,从而调节励磁机输出电流,进而控制同步电动机转子励磁电流的大小。

#### 2.1 1# 机同步电机励磁系统的组成

图1为1# 机同步电机励磁系统组成框图。

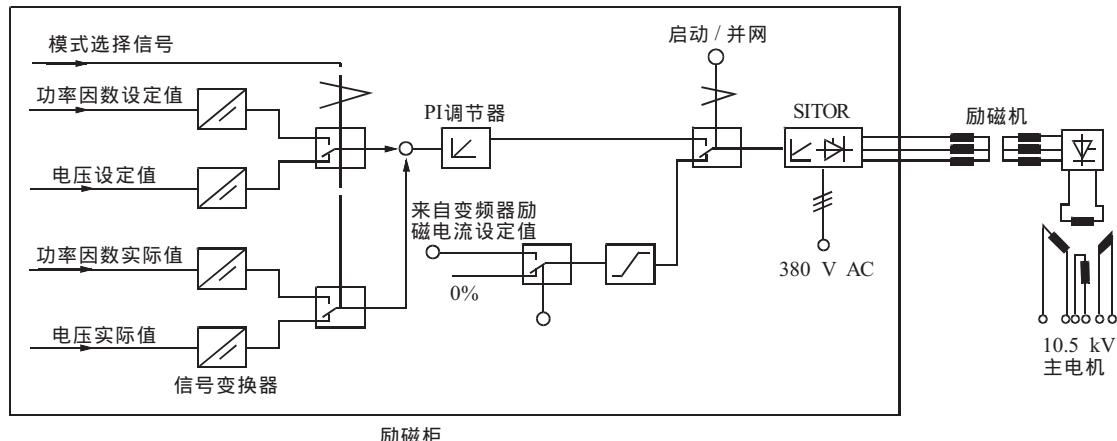


图1 励磁系统示意图

1# 机同步电机励磁控制系统主要由控制模式选择(自动电压控制模式、自动功率因数控制模式)、PI调节器、SITOR(双向硅)、启动/并网切换、限幅控制等组成。

#### 2.2 运行中的 $\cos\varphi$ 调节

根据同步电动机的运行原理,同步电动机在电网电压U、频率f、负载电流I<sub>a</sub>保持不变的情况下,通过调节励磁电流I<sub>b</sub>,可以改变 $\cos\varphi$ 。同步电机的优点是可以通过调节 $\cos\varphi$ ,对电网进行有效的无功补偿。因1# 机电容量较大,在电网中起着举足轻重

的作用,它的负载性质可以调为超前,这样,它可以帮助电网中的感性负载进行有效补偿,大大提高电网的质量。也可通过 $\cos\varphi$ 的调整,增加电机的有功功率,减少无功功率,提高设备的利用率,实现节能的目的。

电机运行中,定子回路由电网供电,因此电压和频率是恒定的,不发生变化,电机转速也是恒定的。根据负载的变化,定子回路电流发生变化时,为保证系统功率因数不变,因此在调节过程中励磁电流随之变化。

1#风机电机励磁系统有两种工作模式：电压模式和 $\cos\varphi$ 模式，1#风机采用 $\cos\varphi$ 模式，是通过图1所示控制模式选择来实现的。

选择 $\cos\varphi$ 模式后，设定 $\cos\varphi$ 值。 $\cos\varphi$ 设定值与反馈值( $\cos\varphi$ 实际测量值)比较后，送入PI调节器。PI调节器根据 $\cos\varphi$ 设定值与反馈值的信号差值大小经过PI运算后输出调节信号到SITOR，调整SITOR的触发脉冲，从而调节SITOR的输出电压和电流。SITOR的输出与励磁机的定子线圈连接，调整SITOR的输出，实际就是调整励磁机定子励磁电流，从而调整励磁机的输出电流，最终调整主电机的转子励磁电流，使同步电机的 $\cos\varphi$ 趋近于设定值，最终达到设定值。

$\cos\varphi$ 实际测量值是通过电机定子CT、PT经功率因数变送器测量所得，能够随时反映风机负载的变化。 $\cos\varphi$ 实际测量值一旦发生变化，励磁柜就会自动加以调整，使功率因数稳定在设定值上。这就是1#风机电机 $\cos\varphi$ 的调节过程。

### 3 失磁保护

#### 3.1 失磁的现象、原因及危害

电机失磁是指同步机在运行中过程中的励磁电流异常下降超过静态稳定极限所允许的程度或励磁电流完全消失的故障。前者称为部分失磁故障，后者则称为完全失磁。

引起失磁的原因有励磁机故障、励磁控制自动调节系统故障、励磁绕组短路、断线或转子绕组故障。

失磁对同步电动机有很大危害。同步电机的励磁是双边供给的，定子方面由交流激磁，而在转子方面则由直流激磁。双方励磁的联合作用，产生气隙合成磁场。

同步电动机失去励磁后，电机变成异步失步运行，电机励磁电流将由定子提供，从电网吸取滞后的电流。电机失磁前后，由于风机运行工况不变，平均有功功率不变，失磁前向系统送出无功功率，而失磁后从系统吸收无功功率。由于无功功率的性质变化将导致母线电压下降，电机容量越大，失磁后对电网的影响就越大。失磁后，将引起电机失步、异步运行。由于转子闭合回路串接二极管，转子电流是一个脉动电流，造成脉动冲击转矩，在定子绕组中将感应出脉动电流，并产生危害电机的机械力矩。

在同步电动机失磁后，转子线圈内感应交变的电流，由于二极管的存在，电流只能单方向导通，因此转子线圈内半波有电流而另一半波几乎没有电

流，于是同步电动机受交变的异步电磁力矩的冲击而发生振动，转差率越大，振动也越强烈。

#### 3.2 失磁保护的作用及保护方式

失磁保护用来保护同步电机不受由于励磁故障引起的失步运行和转子局部过热的危害，而且还防止大电机在失磁时对电网系统的稳定性所造成的危害。

1#风机失磁保护采用数字芯片组成的全数字保护模块，系统由采样变送器、数字运算比较器、输出输入模块等组成。采用具有偏移特性的阻抗原理构成，电动机失磁故障发生时，装置检测无功功率方向的变化，并配合励磁电流、励磁电压下降及系统电压的降低，进行综合分析判断，以保证保护动作的选择性，作用于跳闸。

### 4 1#风机电机失磁的分析

1#风机在2002年安装时，同步电动机失磁保护未投入使用，当时向西门子公司提出投入失磁保护，但西门子调试人员解释有欠压保护及过流保护就可以实现失磁保护功能。

1#风机在运行中，于2004年3月20日3:40突然发生由于励磁柜控制插件故障，可控硅关断，输出电压、电流为零，造成电机完全失磁故障。在发生故障前，主机机端电压10.5 kV、定子电流1 500 A、功率因数0.85超前、功率23.5 MW；故障发生后电流在1 500 A至满量程刻度摆动(CT变比2 500/5)、功率在23.5 MW摆动、机端电压降至9 kV、转速降到2 850 r/min左右波动、主电机发出异音。3:42经过减负荷，主机定子电流降至1 200 A至满量程摆动，4:02手动停机。

当时1#同步机失磁后进入异步运行20 min，过电流欠电压保护没有动作，后手动停机。以上保护没有动作，分析如下：

1#同步机转子失磁后，同步电动机过渡到准异步电动状态。从空载励磁曲线分析(表1)，对应额定10.5 kV、额定转速3 000 r/min时，转子所需励磁电流为243.8 A。

表1 空载特性试验数据( $n=3 000$  r/min)

序号	定子电压/V	转子电流/A	序号	定子电压/V	转子电流/A
1	4119	83.8	5	9960	217.3
2	5421	108.2	6	10500	243.8
3	7170	145.2	7	11448	279.7
4	8331	171.5	8	12060	315.7

1#同步机准异步运行时，根据稳态短路实验(表2)对应转子243.8 A相应定子电流为：243.8/247.5×

1320=1300 A, 因此在异步运行情况下定子励磁电流为  $I_{\text{fn}}=1300$  A。无刷励磁机转子失磁后, 转子线圈与旋转整流二极管形成单方向回路, 如图 2。

表 2 三相稳态短路试验( $n=1000$  r/min)

序号	定子电流 /A	转 子	
		电压 /V	电流 /A
1	1320	43.8	247.5
2	1961	63	346.9
3	2396	82	448.3
4	2693	92.5	501.9

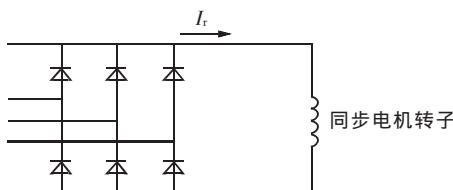


图 2 旋转整流二极管示意图

线圈中实际是一个脉动电流, 发生失磁故障时转速为 2 850 r/min, 因此转子交变电压频率为:  
 $f_r=S \times f_i = (3000-2850) \times 50/3000 = 2.5$  Hz

转子周期:  $T_r=1/f_r=1/2.5=0.4$  s

由于存在二极管, 同步电动机励磁磁线圈  $I_r$  只能单向流动, 其电流波形如图 3。

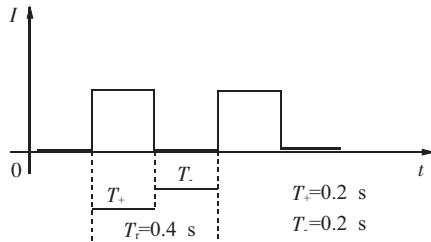


图 3 失磁后转子电流波形

由于  $T_-$  周期内转子感应电压与二极管所允许流经电流方向相反, 转子电流设定为零, 电动机转子失磁后, 在  $T_-$  周期内基本不输出功率, 在  $T_+$  周期内输出功率, 同步电动机只有一半的时间有输出功率。而实际上电机在异步运行时, 电机转速受转动惯量限制基本不变, 电动机平均输出功率未变, 因此  $T_+$  周期应输出失磁前两倍的功率。

转子失磁后, 电网向同步电动机提供所需要的励磁电流为  $I_{\text{fn}}=1300$  A, 另一方面要提供有功电流。正常运行时(失磁前)电机定子有功电流为:

$$I_{\text{lp}}=I_{\text{m}} \times \cos \varphi = 1500 \times 0.85 = 1275 \text{ A}$$

失磁运行时电机定子有功电流为:

$$I_{2p}=2 \times I_{\text{lp}}=2 \times 1274=2550 \text{ A}$$

失磁运行时电机定子电流为:

$$I_s=\sqrt{I_{2p}^2+I_{\text{fn}}^2}=\sqrt{2550^2+1300^2}=2862 \text{ A}$$

电机失磁后, 转入异步运行, 转子电流是交变的。在  $T_+$  周期内定子电流为 2 862 A, 在  $T_-$  周期内由于转子回路受二极管的反向作用, 相当于转子开路, 此时的感应电动机和空载变压器相同, 定子绕组相当于变压器一次绕组, 转子绕组相当于二次绕组, 转子中没有电流, 定子绕组中只有感性激磁电流, 此时定子电流为  $I_{\text{fn}}=1300$  A。由于受转子的影响定子电流发生摆动。

1# 同步电机由电力厂十一总降 110 kV/10.5 kV、50 MVA 专用变压器供电。当电机失磁转入异步运行后, 变压器由容性负载变为感性负载, 随着负载电流  $I_2$  的增大, 变压器副边电压逐渐降低, 即变压器具有下降的外特性, 其主电机功率因数降低, 造成了变压器二次电压下降。主电机端电压降低为 9 kV。

1# 同步电动机的过电流保护是定时限超电流保护, 其整定为:  $I=1.33I_n$ ,  $t=0.5$  s, 电流互感器变比为 2500/5=500, 电机额定电流 2 379 A, 过电流继电器的动作电流值为:

$$I=1.33 \times 2379/500=6.3 \text{ A}$$

主电机过电流保护整定为:

$$I=1.33 \times I_n=1.33 \times 2379=3164 \text{ A}, \text{延时 } 0.5 \text{ s 动作。}$$

欠电压保护整定为:  $U < 80\% U_n$ ,  $t=0.2$  s, 电压互感器变比是 10.5/0.1=105, 欠电压继电器的动作电压值为:

$$U=80\% \times 10.5/105=80 \text{ V}$$

电机欠电压保护整定为:

$$80\% \times U_n=80\% \times 10.5=8.4 \text{ kV}, \text{延时 } 0.2 \text{ s 动作。}$$

根据以上的分析可以看出当同步电动机励磁故障时, 电动机电流、电压值都没有达到设定保护值。所以在同步电机失磁故障时没有保护动作而停机。

由此可见, 由于高炉鼓风机所带负载不是额定、恒定负载, 电机负荷要随高炉工况变化而调整风压风量, 电机也不是额定电流下运行, 所以在轻负载运行时发生失磁, 电机电流达不到保护设定值。另外, 根据工业与民用电力装置的继电保护和自动装置设计规范, 中华人民共和国国家标准 GBJ62-83 第 605 条, 对同步电动机的失步故障、失磁故障应采用带时限动作的失步保护。需要电动机保护装置宜作用于再同步控制回路, 不能再同步或根据生产过程不需要再同步, 电动机保护装置应作用于跳闸。

综上所述, 大型同步电动机应设有失磁保护。为保证同步电动机能安全运行, 在 1# 同步机励磁装置输出加装了简单的失磁保护, (下转第 19 页)

控制性能优异，使得电动机适应各种频繁起制动和快速正反转工况的要求。

对电动机来说，无论机械结构或电磁系统都处于循环交变应力的作用下，这就加速了电动机的机械结构和电气绝缘强度疲劳和老化的进程。

## 2.5 低速运转时电动机的冷却

变频器调速时，基速以下恒转距调速特性，使电机在低速时的电流和磁通保持不变，其阻抗的分配就不尽理想。由于电源中含有高次谐波，所增加的损耗就会更加显著。如果采用轴上自带冷却方式，那么随着转速的降低，其冷却风量将与运行转速的变化而成三次方的减少。一个损耗增加，一个散热效果下降，必然造成电动机发热，温升增高或效率大幅度下降。

## 3 电动机定子绕组烧坏故障初步分析

### 3.1 电机制造工艺缺陷

700 kW 异步变频电动机额定电压 570 V、额定电流 801 A、正常工作频率 20~40 Hz、4 极、F 级绝缘，由于结构上的种种因素，定子绕组采用 F 级漆包圆铜线散嵌绝缘工艺，无溶剂整浸。由于电动机额定电流较大，导线并联根数多，铁芯较长，无论嵌线还是无溶剂整浸都有不少困难。定子铁芯采用外压装工艺，在制造加工过程中，工艺流程长，很容易造成碰伤或其他损伤。

### 3.2 散嵌工艺固有的缺陷

对于功率达 700 kW 及以上的低压电动机采用漆包圆铜线和散嵌工艺，客观上加工难度大，导体在槽内和端部的交叉排列，不仅提高了绕组匝间电压，并且运行过程中振动对交叉处绝缘的损坏使得匝间

绝缘难以满足冲击电压强度的要求。因而对多根并联导线、长铁芯变频电机圆线散嵌工艺要求很高。

### 3.3 频繁起制动运行工况

对轧钢用电动机，特别是高速线材轧钢工况，客观上要求电动机电气与机械时间常数小，即控制响应速度快，转动惯量 GD<sub>2</sub> 小。采用交流变频调速，大大缩短了电气时间常数。而电机因降低中心高，使转子直径减小、变得细长，转动惯量 GD<sub>2</sub> 相应就小得多，大大提高了高速线材生产工艺的效率。但随之带来的弊端是无论实际工况运行，还是系统调试过程，引起冲击过电压、谐波浪涌电压等情况将不可避免。这无疑将威胁电机定子绕组的匝间、相间绝缘和对地绝缘。如果电动机绝缘系统出现某一薄弱环节，短路故障随时都能发生。

## 4 结束语

(1) 交流变频调速系统因谐波分量的存在，将引起电动机发热。

(2) 由于变频调速控制系统技术上的完备和变频电动机本身 GD<sub>2</sub> 减小等种种原因，系统的响应速度加快了，随之而产生的冲击电压 dv/dt 也高了，对电动机的匝间和对地绝缘将带来巨大的威胁。

(3) 对大功率的采用漆包圆铜线和散嵌工艺的低压变频电动机，绝缘强度的提高已是刻不容缓。

(4) 类似 700 W 这类变频电动机，采用成型绕组可能会有所改善，至少匝间和对地故障的几率要少得多。当然定子绕组的槽形要有所变化，但磁性槽楔的应用将会大大改善矩形槽的性能。

收稿日期：2005-07-18

作者简介：张章潭(1965-)，男，2005 年毕业于四川大学电气工程及自动化专业，工程师，现从事电气专业技术工作。

(上接第 8 页)选用一套 S200 型 PLC 和电流电压变送器。电流电压变送器对励磁装置输出电源的 CT 进行电流检测，转换成标准的电压值输入 PLC，与正常运行励磁电流的设定值相比较，并设报警值及停机值，其中报警值取设定值的 30%；停机值取设定值的 15%、延时 10 s。即当励磁电流降至设定值的 30%，失磁保护报警；当励磁电流降至设定值 15% 时，在延时 10 s 后给主机开关发跳闸指令，以达到失磁保护的作用。

## 5 结语

由于高炉鼓风机在低负荷运行失磁时，电机电

流达不到保护动作设定值，依靠过电流保护和欠压保护是不行的。为了保证大型同步电动机安全运行，必须设置失磁保护。通过在励磁装置输出回路加装 PLC 组成的保护装置实现了简单保护功能。同时应该恢复主机保护柜中失磁保护模块的功能。

### 【参考文献】

- [1] 钱南今.电气工程[M].北京：冶金工业出版社，1988.
- [2] 冯辛南.电机学[M].北京：机械工业出版社，1979.
- [3] 佟纯厚.近代交流调速[M].北京：冶金工业出版社，2004.

收稿日期：2005-07-13

作者简介：张耀松(1954-)，男，1979 年毕业于首钢 721 大学电气工程专业，高级工程师，现从事电气专业技术管理工作。