



异步发电机在首钢曹妃甸空分装置上的应用

徐玲, 李祥荣

(林德工程(杭州)有限公司 设计部, 310007)

摘要:论述了异步发电机的结构、发电原理和激励方式,着重分析了膨胀机-异步发电机组在空分装置中的应用,并网保护及详细的解决方案。

关键词:空分装置;膨胀机-异步发电机组;发电原理;激励方式;并网;逆功率保护;超速保护

1. 引言

首钢集团联合唐山钢铁集团成立了首钢京唐钢铁联合有限责任公司(简称首钢),此联合公司将于2008年奥运会之前把首钢集团部分地从北京搬迁到河北省唐山市曹妃甸工业园区,争取京唐钢铁公司一期工程于2008年奥运会之前产钢。同时还给北京一个无污染、环保的2008年奥运会环境。我们林德工程(杭州)有限公司为首钢顺利产钢提供2套氧产量为 $75000 \pm 20000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 的变负荷空分装置。我们林德工程德国慕尼黑总部从多种工艺流程中择取了最经济、能耗低、投资少、可靠性高、控制系统先进,操作方便的空分流程。项目名定为首钢曹妃甸空分项目。在每套空分装置冷箱设备中,配置了3台CRYOSTAR公司制造的涡轮膨胀机-异步发电机组。涡轮膨胀机在膨胀高压氮气时发出动力做功,驱动异步发电机发电回收能量。发电机起到了制动作用,防止膨胀机飞车;发电机采用的是鼠笼式三相异步电机。

2. 异步发电机的结构和发电原理

2.1 异步发电机的结构

从结构上来说,三相鼠笼式异步发电机的基本结构与三相鼠笼式异步电动机相同。它们的区别就是,前者把机械能转化为电能,后者把电能转化为机械能。

鼠笼式异步发电机由两部分组成:定子和转子。定子中有三组绕组,绕在硅钢片的芯子上。转子被定子环抱着,它的主体是导条和短路环,为了增强磁场,还有一个嵌于转子内的由硅钢片叠成的铁心。

2.2 异步发电机的发电原理

我们知道,当定子绕组中通以三相交变电流时,便在定子绕组中形成一个旋转的磁场,旋转的磁场切割转子,将会在转子的导条中感应出电动势,感应电动势产生电流。该电流受到磁场的作用产生转动力矩,驱使转子转动,这就是异步电动机的工作原理。如果我们让某种原动机带动转子转动,并且让转子转速大于磁场的转速,那么就会在定子绕组中感应出电动势,若定子绕组外接电路,同样,感应电动势产生感应电流,这样异步机就向外电路输送电能了。这就是异步发电机的工作原理。具体发电原理是这样的:

2.2.1 只要异步机的转子铁芯中存在剩磁,则定子绕组必然包裹着一定数量的磁力线,也就一定会有一定数量的磁通存在。当转子被膨胀机(或其它原动机)拖动以后,剩磁的磁场也会旋转起来,切割定子绕组,便在定子绕组内产生感应电动势 E ,这个感应电动势的相位必然滞后磁通 90° ,并且使定子绕组中产生了电场,就建立了电压 U ,电压 U 的作用与感应电动势的作用相

反,它的相位必然与 E 的相位相反,相差 180° ,如图 1 所示。如果定子绕组处于开路状态,则电压 U 将不会产生电流。若外电路接通,定子绕组中的电荷在电压 U 的作用下形成电流 I 。该电流与电压之间的相位关系由电路的性质来决定。假如闭合回路的总阻抗是纯感性的,则电流 I 的相位应比电压滞后 90° ,则与 ϕ 的相位相同。如图 1 所示。

2.2.2 电流 I 不仅要流从外电路中流过,同时也必定要流过定子绕组本身,从而在绕组中产生一个新的磁通 ϕ_1 。根据电流磁效应的特点, ϕ_1 总是正比于 I ,从而两者的相位必然相同。这样, ϕ_1 与 ϕ 也就具有相同的相位,于是 ϕ_1 与 ϕ 叠加,相互加强,则使总磁场加强。新的磁通 ϕ_1 也会像 ϕ 一样,感应出电动势 E_1 , 电压 U_1 , 电流 I_1 和磁通 ϕ_2 ; 磁通 ϕ_2 又如 ϕ_1 一样,这样一旦有足够强的磁场,也就可以产生足够高的电动势,输出足够高的电压,满足用户电网需求。

从上面可以看出,若电路是纯容性的,则电流 I 的相位将超前电压 90° ,这样 ϕ_1 的相位将与 ϕ 相反,磁场则相互减弱,不可能相互加强,结果电机将不会发电。因此只要电路呈感性,异步机就能发电。

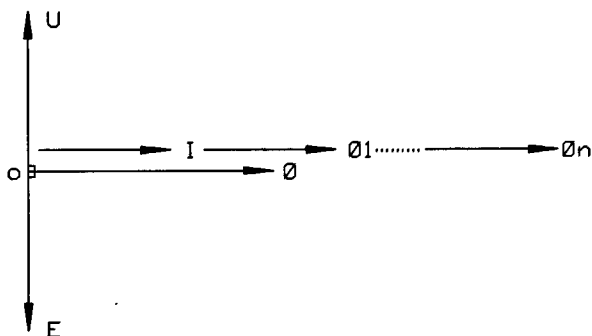


图 1 异步电机发电原理

3 异步发电机的工作原理——两种激励发电方式

3.1 电容自激发电(由单台异步发电机构成的小发电站采用此类发电方式)

根据上面第 2 条的论述,异步电机的转子被膨胀机(或其它原动机)拖动后,如果定子绕组是处于“开路”状态,激磁电流将无法产生,也就发不成电。因此,必须通过一定的电气元件把定子回路接通。我们可以采用电阻,电感或电容把定子回路接通。由于电容能产生更强的激磁电流,获得更强的磁场,使输出更高的电压,满足用电器的要求。因此往往在定子绕组的端子上并接适当的电容器,利用电容供给异步发电机的激磁电流,从而建立起电压,并产生旋转磁场,如图 2 所示。

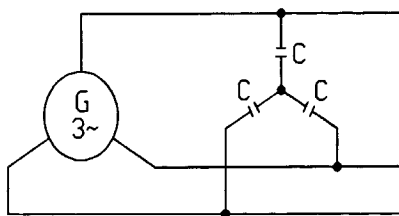


图 2 电容自激发电原理

我们从上面介绍的异步发电机发电原理可以看出只有电机中存在剩磁才能发电,只要异步发电机的转子有剩磁存在,根据电机的参数选择合适的电容器,就能发电了。

电容自激发电存在一定的缺点,频率不稳定,容易发生过激磁、过电压故障,而且电路发生短路时会引起发电机的电压崩溃,进一步引起失磁,发生失磁后要对电机进行充磁。

3.2 电网电源激励发电(空分装置中膨胀机-制动发电机属于此类发电方式)

把异步发电机定子的三相绕组接在电网电源上,根据交流绕组感应磁动势的原理,当异步发电机的三相定子绕组中有电流流过,就会产生旋转的磁动势,磁动势的作用就会产生一种以同步转速 n_0 转动的旋转磁场,其同步转速 $n_0 = \frac{60f}{p} (r/min)$;对于已经制成的电机,磁极对数已经确定,则转速只与频率 $f = 50\text{Hz}$ 有关,由于我国电网条件规定电网额定频率,可见异步发电机的同步转速也是确定的。

定子绕组因切割旋转磁场产生的感应电动势 E_1 ,且滞后主磁通 90° ,根据交流绕组感应磁动势的原理,,可以推导出一相绕组感应电动势的复数表达式为

$$E_1 = -j4.44f_1 N_1 k_{w1} + m,$$

式中 ϕ_m ——气隙旋转磁场的每极磁通幅值

N_1 ——定子绕组每相串联总匝数

k_{w1} ——定子绕组的绕组系数

f_1 ——定子电流的频率

设定子绕组接三相对称电压 U_1 ,忽略定子绕组内阻压降,根据基尔霍夫第二定律,定子每相电路的电压平衡方程式为:

$$U_1 \approx E_1 \quad U_1 = E_1 = j4.44f_1 N_1 K_{w1} + m$$

显然,对于结构一定的异步电机, k_{w1} 和 N_1 均为常数,磁通 ϕ_m 与电源电压 U_1 的大小成正比,与电源的频率 f 成反比,若外加电源的频率和电压一致,则气隙磁通 ϕ_m 的幅值也基本不变。

在异步发电机转子被拖到尽可能接近同步转速时接入电网,根据上面的分析,此时定子绕组的电势和频率会自动的建立起来。异步发电机定子绕组的电势和频率取决于电网电源的电压和频率。

只要膨胀机继续拖动电机转子,使转子转速 n 高于旋转磁场的同步转速 n_0 ,即转差率 $S = \frac{n_0 - n}{n_0} < 0$,这样电网所提供的磁力矩的方向就与转速方向相反,而机械力矩的方向与转速方向一致。磁力矩作负功,机械力矩作正功,于是电机就作为异步发电机运行了。

由于异步发电机从电网电源吸收无功功率,也就是吸收激磁电流,由于没有电容器的影响,而且电网电源具有十分稳定的频率,所以异步发电机所发的电也具有稳定的频率,与电网电源的频率始终相同,因而异步发电机向电网输出的电流频率与它的转差率无关。这种发电方式,异步电机中存不存在剩磁都没关系,也不必担心电压崩溃。只需要注意,在异步发电机在并网之前必须校正发电机的旋转方向与作为电动机运行时的旋转方向一致,则发电机产生的相序就必然与电网一致。在接入电网时无需整步,操作方便。

这种发电的缺点是就是需要很大的励磁电流,约为额定电流的 20% 左右,而且是感性无功电流,使电网上的功率因数大大降低。

4 异步发电机在空分装置中的应用

综合考虑电网条件,技术可靠性和经济效益,在首钢曹妃甸空分项目中,我们采用并网电源发电的方式配置了三台由 SIEMENS 公司制造的鼠笼式异步发电机,功率分别为 $2 \times 1520\text{kW}$ 和 $1 \times 530\text{kW}$, 2 极电机,同步转速都为 3000r/min ,额定转速 3015r/min ;电压为 10kV , 3AC , 50Hz ;电流为 $2 \times 102\text{A}$ 和 $1 \times 36\text{A}$,起动电流是额定电流的 5 倍,功率因数都为 0.89,效率都为 96.3%,星形连接。见图 3 所示。

4.1 利用同步电动机进行无功补偿

从并网发电的角度讲,接不接无功功率补偿装置都没关系,但是为了节能并保证电网的功率因数满足用户 0.95 以上要求,需要对电网进行无功补偿。主空压机采用 36500kW 的同步电动机来驱动,功率因数从 0.92 超前到 1 之间可调。根据同步电动机的工作原理,我们可知,只要调节同步电动机的励磁电流就可以改变同步电动机输出无功功率的大小。励磁柜能根据电网的实际负荷情况,自动调节功率因数到设定值。这样就不需要单独配台无功补偿装置,既节省了成本,又优化了电网的质量,节省了能源。

4.2 异步发电机的并网保护分析

4.2.1 逆功率保护

逆功率保护的必要性和原理:当膨胀机因某种原因进气量过小,致使膨胀机转速降到同步转速以下,使异步发电机作为电动机运行,而此时电机并未能从电网系统解列,从而从电网吸收有功功率,而不是向电网发出有功功率。这种情况,对异步发电机并无危害,但是由于异步发电机驱动膨胀机,会对膨胀机带来不可修复的机械损坏。所以不允许膨胀机-发电机机组在这种工况长期运行,因此必须对膨胀机-发电机机组进行逆功率保护。

曹妃甸空分项目中,我们的方案是采用德国赛格公司生产的 XP2-R 逆功率保护继电器来防止逆功率进一步的发生。电压信号取自母线侧的电压互感器 TV,电流信号取自发电机出线侧电流互感器 TA,原理如图 4 所示,

当负向功率值达到逆功率保护整定值 $PR >$ 时,按照预定时间发信号给空分装置控制中心 DCS,让 DCS 关闭膨胀机的紧急切断阀,同时发出跳闸命令断开发电机出线断路器(即: - Q1),保护逻辑如图 5 所示。逆功率保护继电器以 t_1 短时限延时 0.5s 动作于信号以躲过系统振荡;最理想状态是异步发电机在 3000r/min 的同步转速下接入电网,考虑到转速信号的滞后和工作人员的操作快慢,一般会提前一点转速投入发电机,此种情况下异步发电机肯可能工作于电动机状态,也就是处于逆功率状态,则要求逆功率保护应躲过发电机并网时刻,因此以 t_2 长时限延时躲过发电机并网投励时刻, t_2 从 10s 到 120s 可调,根据现场操作运行情况最终选择一个合适的延时时间。

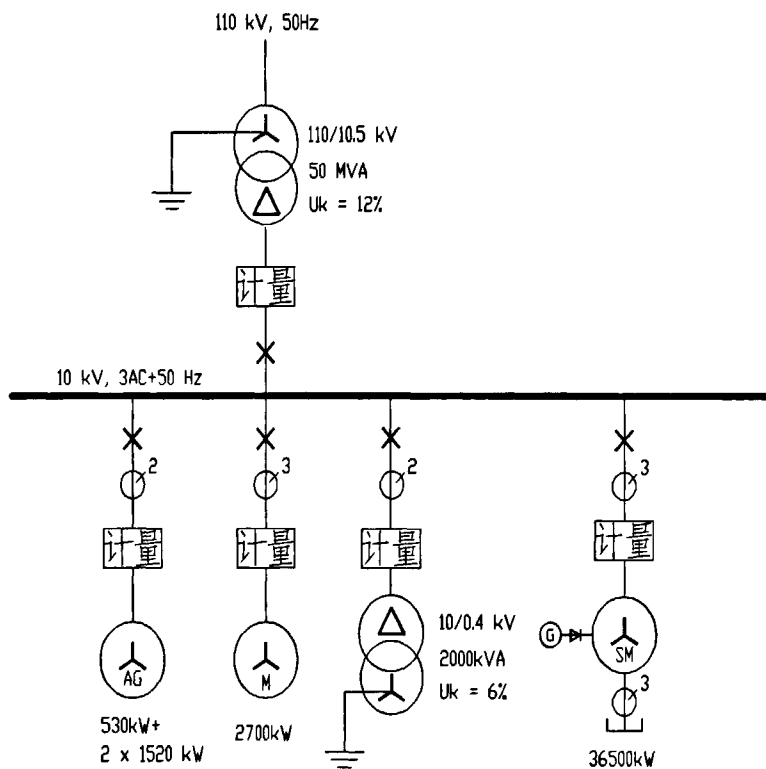


图3 异步发电机在空分装置中的应用

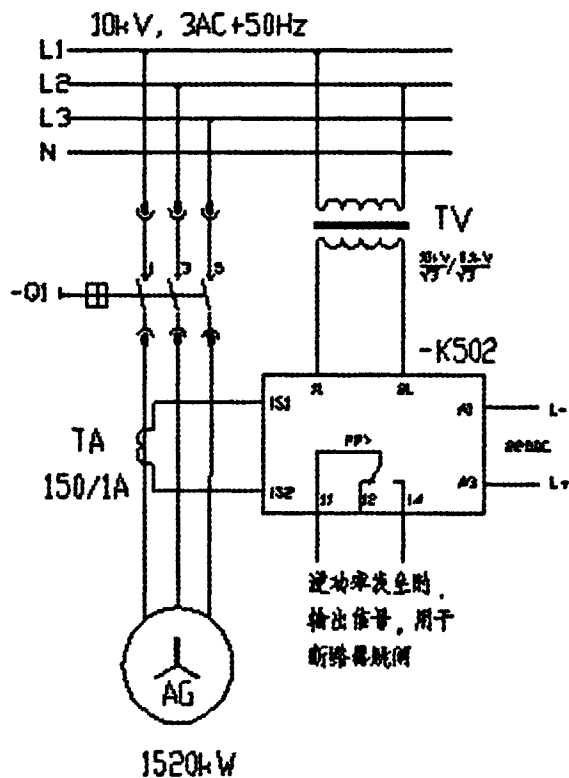


图4 异步发电机逆功率保护原理图

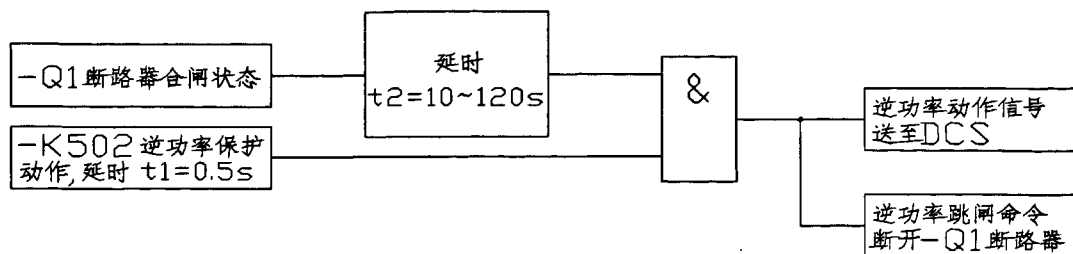


图5 异步发电机逆功率保护逻辑图

逆功率保护继电器整定值 $PR>$ 的设置:逆功率保护的動作功率一般为发电机额定功率的 2% ~ 5%。我们以 1520kW 的发电机为例,逆功率保护整定值 $PR>$ 的计算如下:

$$P_{GS} = \frac{S_G \cdot \cos\phi}{\sqrt{3} \cdot n_u \cdot n_i}$$

$$PR> = \frac{\frac{S_G \cdot \cos\phi}{\sqrt{3} \cdot n_u \cdot n_i}}{\frac{U_n \cdot I_n}{100 \times 1}} P_{RC} (\%) = \frac{1520 \times 96.5\% \times 0.89 \times 0.89}{\sqrt{3} \times 100 \times 150} \times 1000 \times 5(\%) = \frac{61}{100} \times 5(\%) \approx 3\%$$

式中: S_G ——异步发电机的视在功率, KVA

P_{GS} ——异步发电机每相功率折算到电流互感器二次侧的每相功率, kW

$PR>$ ——逆功率保护继电器的整定值, %

$\cos\phi$ ——异步发电机的额定功率因数

I_n ——逆功率保护继电器的额定输入电流, 1A

U_n ——逆功率保护继电器的额定输入电压, 100V

n_i ——电流互感器 TA 变比, 150/1A = 150

n_u ——电压互感器 TV 变比, 10000V/100V = 100

P_{RC} ——逆功率的動作系数, %

根据这个计算结果,我们只需在逆功率继电器 XP2 - R 面板上把 $PR>$ 旋钮打在 3% 这档,再设置延时 0.5s 就行了,操作非常简便。其它几台发电机设置类似,我不再一一赘述了。

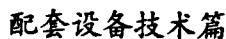
4.2.2 超速保护

超速保护的必要性和原理:当膨胀机因某种原因进气量变大,如果发电机运行点超出发电机的最大制动力矩,就会造成膨胀机超速直至发生飞车;如果发电机本身故障,制动力矩消失,也会发生飞车现象。飞车会对异步发电机及膨胀机造成严重损害。所以不允许膨胀机 - 发电机组超速运行,因此必须对膨胀机 - 发电机组进行超速保护。我们采用的是在膨胀机轴端安装了本特利速度检测仪。它不仅承担超速保护,而且在启动时,利用速度信号,对发电机发出合闸信号。一旦膨胀机速度超出报警点速度,速度检测仪延时 0.5s 发出报警信号给 DCS,让 DCS 操作工减少进气量。如果膨胀机速度继续增加并超出了跳闸点速度,速度检测仪延时 0.1s 躲过系统震荡,发出超速跳闸信号给 DCS,DCS 立即切断膨胀机进气,同时解列发电机。

4.2.3 其它保护功能

我们在发电机出线柜内配置了 SIEMENS - 7SJ63 综合保护装置,设置了低电压保护(27),不平衡保护(46),发电机热过载保护(49G),瞬动过电流保护(50),定时限过电流保护(51),方向接地保护(67N)及低电流保护(37)等。这些保护与异步电动机的保护设置相似,我不再一一

(下转 131 页)



参考文献

- [1]郭秀兰主编,工业噪声治理技术,中国环境科学出版社,1993年,10-12。
[2]陈绎勤.噪声与振动的控制.中国铁道出版社,1986年,127-129。
[3]吕玉恒主编.噪声与振动控制设备选用手册.机械工业出版社,1998年,242-252。

5 结语

参考文献

- [1]李润生,潘根编著.异步电机发电.北京:水利电力出版社出版,1982
- [2]刘景峰主编.电机与拖动基础.北京:中国电力出版社,2006
- [3]宋志明主编.继电保护原理与应用.北京:中国电力出版社,2007
- [4]Instruction for XP2-R power and reverse power relay, manufactured by SEG