同步电动机失步及其保护的研究

祖 伟 姚 翔 合肥工业大学电气系（230009）

摘要 本文分析了同步电动机失步时的行为特征和国内外几种失步保护的优缺点，在此基础上提出了以检测同步电动机功率因数角及静稳边界曲线为基础的失步保护方案。

关键词 同步电动机 失步 继电保护

引言

同步电动机越来越广泛地应用于各种工业生产。同步电动机在正常运行过程中，不可避免地会受到各种各样的扰动。如：供电电源的短暂中断，母线电压的大幅度突降，电机负载的大幅度突增等等。当这些“扰动”的幅度或量值大到一定程度，超出电机的稳定极限，就会引起电动机失步，电动机失步后如果长时间运行将是十分危险的，因为失步时，电机定子电流过载，定子边缘线匝急骤升温，电压明显下降，轴的机械转距过大等。为消除同步电动机失步后长时间异步运行带来的危害，应研制出能够准确判定同步电动机失步与否并能迅速动作的失步装置。

1 同步电动机失步的物理特征

同步电动机失步绝大多数发生于自激式同步电动机，当然它激式同步电动机也会失步。

同步电动机失步后异步运行时其有功功率可写作下式：

$$P=P_{py}+P_{by}+P_t \tag{1}$$

式中：P_{py}—平均异步功率

P_{by}—交变异步功率

P_t—同步功率

由于 P 中有交变的 P_{by} 及 P_t，所以同步电动机在异步运行时吸进的电磁功率 P 随时间波动，因而电动机的转速 n、转差 S、定子电流 I，定子电压 U，无功 Q 以及转子电流 I_L、转子电压 U_L 都随时间波动。习惯上把同步电动机失步分为带励失步，失励失步和断电失步。

1.1 带励失步 带励失步是指电动机失步时强制性的直流励磁虽然降低但未严重降低更未消失到零，仍保留相当大的数值，因此其实质就是低励磁失步，或称为欠励磁失步，电动机带励失步的原因一般由于：

(1) 电动机相邻的出线端短路引起母线电压大幅度降低，或者近处大型电动机或电动机机群起动、自起动使母线电压大幅度降低，则接于该母线上的自激式同步电动机的励磁会降低，而转子有惯性，接于转子轴上的机械负载不能立即降低，有滞后效应，使电动机的电磁功率 P 不能立即降低，因而造成电动机失去静态稳定而失步。

(2) 同步电动机所带的机械负载突然大幅度增加（如轧钢机咬“冷钢”、气体压缩机憋气等），使电动机的电磁功率 P 大幅度增加，而自励式或它励式电动机的励磁却未及时增加，这也相当于欠励，如果欠励的程度使励磁达不到此大功率所要求的维持同步运行的最低励磁值，则电动机也会失去静态稳定而失步。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(3) 电动机在起动过程中，若励磁系统过早投入也会造成带励失步。自激式及它激式同步电动机都可能发生这类带励失步。

在带励失步后的异步运行中，电动机的电磁功率 P 中包含有平均异步功率 P_{py}、以 $2f_s$变化的交变异步功率 P_{py}及以 f_s 变化的同步功率 P_t。在重负载情况下，励磁没有降低或降低很少就可能造成失步，故有振幅很大的 P_t，所以电磁功率 P 的波动特别剧烈，从而造成电动机的转速、转差、定子电流、无功功率、励磁电压、励磁电流的波动也很剧烈。消耗无功功率也是同步电动机失步的特点，功率因数角 φ 由于励磁电流的影响波动显著。

1.2 失励失步 所谓失励失步就是因为全失磁或深度很大部分失磁而失步，这是由于电动机的励磁系统故障而造成的静稳定破坏。这种情况下电动机的电磁功率 P 中的同步功率 P_t 很小甚至为零，只有平均异步功率 P_{Py}及以 $2f_s$变化的交变异步功率 P_{by}，因此电动机的电磁功率以 $2f_s$波动，定子电流 I 也以 $2f_s$的频率变化。

失励失步时，由于同步功率 P_t 为零，所以定子电流 I 的波动较带励失步时小，电流的高峰值约为额定电流的 1.2～1.6 倍，低谷值约为额定电流的 0.8～1.2 倍，电机无异常声音，转差 S 也较带励失步时小，电机丢转不明显，出力降低也不明显，往往不能被值班人员及时发现，而一旦发现时大多数是已异步运行相当长时间，电机可能已被损伤。

1.3 断电失步“断电失步”的名称不恰当，从准确意义上讲，应叫做“短时断电又恢复供电，在恢复供电时所造成的电动机失步”参考文献[1]。

从继电保护的角度而言，带励失步及失励失步时要求保护装置在失步刚开始就应动作，这就是同步电动机失步保护应完成的功能。而上述的第三种“断电失步”，它对电动机的重大危害是由于短时断电又重新恢复供电时的非同期合闸冲击电流及冲击转矩所造成，因而当电动机断电后要求继电保护装置在重新供电之前就动作，作用于电动机灭磁或跳开电动机的高压开关，从而在电源恢复供电时不会出现带励失步。因此这种继电保护实质上是纯粹的“电动机断电保护”，保护的判据原理只需能快速明确判别“断电”就可以了，无需判别失步。

2 同步电动机失步保护

同步电动机失步保护的功能是保护电动机的带励失步及失励失步，要求电动机失步后保护装置动作，作用于发信号、降低电动机负载及灭磁以求恢复同步，或者作用于跳开电动机的断路器。当前常见的电动机失步保护主要有：

2.1 根据电动机失步时在其励磁绕组中出现交流感应电流分量，并加转子低电流闭锁或加延时构成的失步保护。它的主要优点是保护装置本身的电路简单，其主要缺点有：

(1) 保护出口需经 1 秒或 1 秒以上延时来躲开同步电动机振荡，电动机失步时保护出口慢。

(2) 延时 1 秒只能躲开同步振荡中具有衰减持性的自由振荡，躲不开同步振荡中的强制振荡。强制振荡产生的原因是由于电动机的负载力矩不均匀。例如电动机拖动活塞式水泵、空气压缩机等。显然强制振荡的持续时间长，在拖动不均匀负载时，强制振荡一直存在。在强制振荡中，电动机的 ω、δ_f 随时间波动，有较小的转差。δ_f 角虽波动但不会超过电动机的静稳极限，即电动机不会失步。由于在强制振荡中有转差 S，励磁电流中就会感应交流电流，如果延时 1 秒躲不开这种振荡，则保护就会误出口。因此，这种保护只能用于具有稳定负载或基本稳定负载的电动机。

(3) 需要在电动机转子回路中装设专门用于此种保护的电流互感器。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（4）此种保护不能用于无刷励磁的同步电动机。

（5）电力系统振荡时，如果延时时间小于系统振荡时间，则保护可能会误动。

2.2　以检测电动机的功率因数角φ为原理构成的失步保护。同步电动机正常运行时一般工作于过激工作状态，功率因数角φ为负。当同步电动机无论以何种原因带励失步或失励失步时，必定为欠激，φ角为正。失步时，φ角一般大于30°（具体整定方法见参考文献[2]）。这种保护的优点是：

（1）可用于各种励磁类型的同步电动机。

（2）可用于拖动各种负载的同步电动机。当负载不均匀时，电机的各种电参数随时间振荡，由于保护的起动功率因数角φ_{qd}较大，通常φ不会波动到保护的动作区，即使短时间波动到保护的动作区但很快又离开，保护出口延时可以躲开这种强制性同步振荡，保护不会误动作。

（3）系统振荡及短路故障时，保护不会误动作。

（4）保护装置本身的电路简单，保护所需信号容易接取。

这类失步保护的缺点是保护的起动功率因数角φ_{qd}的计算不太精确，保护的动作区太大，有时会造成电动机欠激运行但未失步而保护误动。当同步电动机轻载甚至空载运行时，φ角很大甚至φ等于90°，电动机仍不会失步，但这种失步保护误动。为了克服这种误动，可以增设定子低电流闭锁元件。

鉴于以上失步保护的优缺点，我们利用同步电动机功率因数角及其静稳边界曲线加低电流闭锁构成了电动机的失步保护装置。保护原理框图如图1所示。图1中阻抗继电器1ZKJ在R－X平面上的动作特性曲线为圆，圆内为动作区。此动作特性圆是匹配（模拟）同步电动机的静稳边界曲线。圆动作特性的优点是整定计算简单方便，其缺点是在电动机轻载失步时圆动作特性匹配同步电动机静稳边界曲线的效果差。当然可以采用苹果圆来匹配同步电动机的静稳边界曲线，其动作特性的优点是在同步电动机轻载失步时，其匹配同步电动机静稳边界曲线的效果好，但其整定计算过于复杂。在我们研制的失步保护装置中采用的是圆特性曲线。阻抗继电器2ZKJ在R－X平面上的动作特性为顶点位于座标原点的折线，折线以上为动作区。折线与R轴的夹角整定为φ_{qd}，φ_{qd}的整定算法见参考文献[2]。1ZKJ与2ZKJ组成“与”门，则“与”门输出的动作特性就是扇形，扇形所包围的区域就是动作区，如图2所示。

以图2来描述同步电动机失步保护的动作情况：设同步电动机正常运行时为过激工作状态，且带负载较重，$P=P_1$，电动机的相电流导前于相电压，功率因数角φ_1为负值，机端测量阻抗为Z_{J1}，位于图2的第4象限，当电动机失步时，Z_{J1}相量末端随时间变化的轨迹见图2中曲线1，φ_1角由负值变为零值再变为正值，这表示电动机从发送电感性无功变成吸取电感性无功，当Z_{J1}相量末端进入扇形动作区内时，表示图1中的“与”门有输出，经延时保护出口动作。同理，若正常运行时电机负载较轻，$P=P_2$，（$P_2<P_1$），机端测量阻抗为Z_{J2}，当同步电动机失步时，Z_{J2}相量末端随时间的变化轨迹见图2中曲线2，当Z_{J2}进入扇形动作区时，保护经延时出口动作。对于凸极同步电动机，当P小于凸极功率时，即使全部失磁电动机也不会失步。用阻抗继电器1ZKJ的动作圆来模拟凸极电动机的静稳边界曲线，在曲线顶部局部区域就模拟的不准确，在此区域保护的动作区大于同步电动机的失步区。因为当同步电动机的电磁功率小于其凸极功率时，即使电动机全失磁，φ角接近于90°，电动机也不会失步，但Z_J可能进入保护的扇形动作区，保护可能误动。为了防止这种误动，增加了如图1中所示的电流闭锁元件。电流继电器的起动电流I_{qd}按下式整定：

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

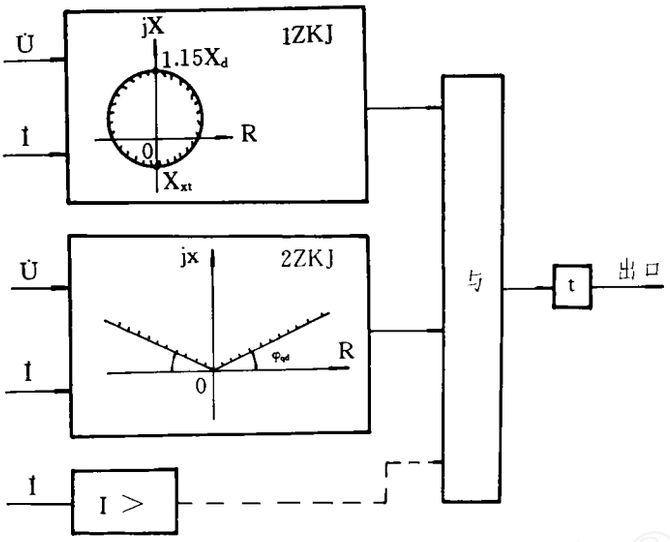

图 1　同步电动机失步保护原理框图

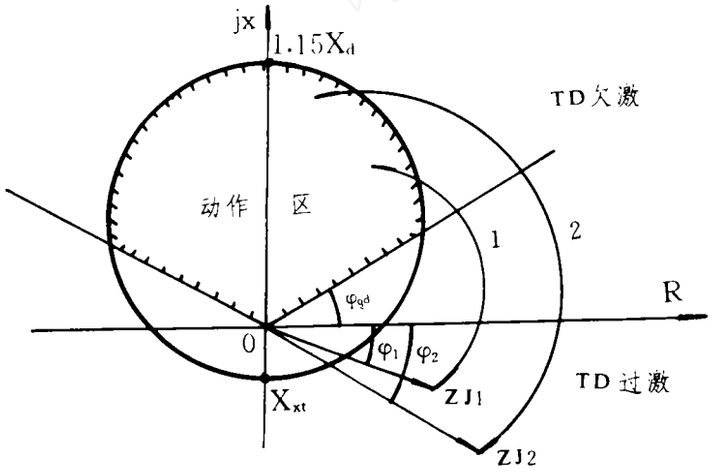

图 2　保护装置的扇形动作区

$$I_{qd}=\frac{P_{凸}}{\sqrt{3}U_{相}\cos\varphi_{正常}} \quad (2)$$

式中：

$$P_{凸}=\frac{U_{st}^2(x_d-x_q)}{2(x_d+x_{st})(x_q+x_{st})} \quad (3)$$

图 1 中电流继电器与 1ZKJ，2ZKJ 共同组成“与”门，这样可保证：当 $P<P_{凸}$ 时，即使在同步电动机全失磁，但不失步的情况下，由于电动机的电流小于 I_{qd}，电流继电器不动作，“与”门被闭锁，保护不动作。只有当 $P>P_{凸}$，电动机电流大于 I_{qd} 时，才解除电流闭锁，使电动机失步时保护动作

同步电动机一般采用异步启动，通常在投入励磁的同时投入失步保护。要求失步保护在异步启动成功时（拉入同步）不动作，异步启动不成功时（不能拉入同步）动作。为达到此目的，传统的办法是采取长延时的失步保护出口，延时时间略大于从投入励磁开关开始到同步电动机被拉入同步为止之间的历时。故一般保护出口延时约为 2 秒左右，这样就能保证电动机在投入励磁后若在 2 秒内被拉入同步，保护不动作；若在 2 秒内不能拉入同步，说明异步启动失败，电动机已属于带励失步，失步保护动作。保护出口延时时间长将造成电动机正常运行时若发生失步，保护出口太慢。为了尽量缩短失步保护出口延时，而又能满足电动机异步启动的要求，可以采用在电动机异步启动时，投入励磁后并不立即投入失步保护，而是在投入励磁后延时（例 1.5 秒）再投入失步保护，这样失步保护出口的延时可以缩短。例如可以整定为 0.5 秒。

同步电动机在重负载下带励失步时，转差比较大，机端测量阻抗将周期性地出入静稳定边界圆，且每次进入静稳边界圆后在边界圆内停留的时间较短。如果保护延时大于机端测量阻抗在边界圆内暂停时间，则保护拒动或经许多次出入静稳边界圆后保护才动作。为克服此缺点，采用如图 3 所示的延时电路。当同步电动机失步后转差较小时，机端测量阻抗进入静

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

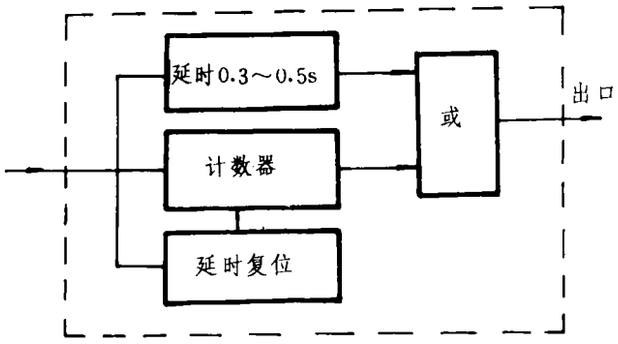

图 3　保护出口延时电路

稳边界圆长时间出不来，此时保护经延时出口动作；如果同步电动机失步后的转差较大，机端测量阻抗周期性地进出静稳边界圆，此时保护经计数器出口动作。计数器应能延时复位，即若在一定时间内计数器计不到设定值，能自动复位为零。

3　结论

本文提出的利用同步电动机功率因数角及其静稳边界曲线加低电流闭锁构成的失步保护装置是对仅利用功率因数角构成的失步保护装置的重要改进，它克服了功率因数角型失步保护的缺点，因为改进的保护装置的动作区为扇形，比功率因数角型失步保护装置的动作区更合理。低电流闭锁保证了同步电动机在欠激运行但不失步时保护不误动。原理方案经实验证明是可行的。

参考文献

1　祖伟、姚晴林．带有高压同步电动机群的母线断电保护．全国高校电力系统及其自动化专业第七届学术年会论文集．1991 年。

2　加姆 图尼晓夫 B．Φ按相位角检测同步机失步的装置．苏：工业动力．1985 年 NO．6

3　B．Φ西沃科贝连柯、A．B．列夫晓夫．CTП－12500－2 型涡流发动机失步运转的实验研究．苏：电站，1988 年 NO．5

4　蒋宗道．同步电动机失步保护及带载自动再整步．电世界，1993，12

会　议　报　导

国家标准电气制图、电气图用图形符号继电器、继电保护及自动化装置专业应用示例图册审查会议，于 1994 年 3 月 28 日至 4 月 2 日在四川省成都市召开。参加会议的有来自电力设计、机械设计、生产、制造共 21 个单位、35 名专家与代表。

会议由许昌继电器研究所主持．会议审查了“示例图册编制工作组”第一阶段完成的“控制、保护屏（柜、台、箱）示例图册”。与会代表对“图册”编制方法及内容进行了认真审查．一致认为“图册”编制形式符合国家标准．较以前更为简单．便于设计、生产和使用，有利于推广计算机绘图工作。与会代表建议“图册”定稿后，应广泛向各电力设计院、供电局等进行宣传贯彻，以便尽快推广、使用。

这次会议由于与会代表的共同努力，达到了予期目的，会议期间得到了成都继电器厂领导和有关同志的大力支持与帮助．为会议做了较妥善完好的会务工作，与会代表一致表示深切的谢意。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net