

文章编号: 1004- 0609(2000) 02- 0297- 04

一种绕线式异步电动机起动最优控制系统^①

张满生¹, 罗 安²

(1. 株洲工学院 电气工程系, 株洲 412000; 2. 中南工业大学 信息工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 提出了由转速控制、时间控制及电流控制三原则综合而实现绕线式异步电动机起动过程的最优控制。实践运行表明, 与原来单纯用时间继电器控制起动相比, 新的控制方案能明显减小起动过程的发热(减小约 30%), 除显著节能外更重要的是能延长电机的使用寿命。

关键词: 绕线式异步电动机; 最优控制; 电机铜耗; 调相机

中图分类号: TP273⁺. 1

文献标识码: A

由电机学原理知道, 在绕线式异步电动机转子电路中串入不同外电阻时可获得不同的临界转差率 s_m , 使机械特性之斜率发生变化, 对应于恒转矩负载可以获得不同的转速, 而且串入电阻可以使电机起动转矩增大^[1,2]。因此, 常采用串电阻实现起动和调速控制。在串电阻起动控制系统中, 控制系统的任务就是确定在何时按何规律切除起动电阻。目前, 应用最普遍的是用时间继电器控制电阻的逐段切除, 即当电动机串全部电阻起动后, 每隔一定时间就切除一段电阻, 以确保在整个起动过程中系统都有一定的加速转矩。然而, 仅用时间控制的系统难以保证起动过程的最优化。这是因为当负载变化较大时, 如负载加重, 在预先整定的时间内电机就达不到相应的预期速度, 电阻切换时就不可避免地会出现较大的切换冲击电流^[3], 起动过程将因此发生电机过热等问题, 影响电机的使用寿命。由于异步电动机数学模型的复杂性(高阶、强耦合、时变、非线性)^[4,5], 虽然通常在其稳定运行点附近可对其进行局部近似线性化处理, 但起动控制覆盖转差率几乎包含了从 0 到 1 的全范围, 所以欲对其进行严格意义上的优化控制并不容易^[6~8]。因此, 寻求一种简单易行的最优起动控制方法具有十分重要的工程意义。

本文结合对某变电站调相机之驱动电机——绕线式异步电动机的起动控制改造课题, 在经过理论分析和实验研究的基础上, 提出了一种绕线式异步电动机最优起动控制的新控制思想和方法。

原系统之绕线式电动机串五段起动电阻由时间继电器控制起动, 改造后的系统由计算机控制起

动。新方案采用转速、时间及起动电流三原则的混合控制, 实现了起动过程的最优化。在控制算法方面, 既考虑了传统的工程计算方法, 又应用了最优控制思想, 确保起动过程的发热量最小。改造后的系统, 经实践运行证明效果良好。

1 起动控制策略分析

电机在正常使用情况下, 其发热主要由铜耗功率和铁耗功率决定, 而机械损耗及杂散损耗只占发热中的极小份额。

电机的铜耗包括定、转子两部分, 可按式计算:

$$P_{Cu} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 \quad (1)$$

式中 P_{Cu} —铜耗功率; I_1 , I_2 分别为电机带负载时定、转子的电流; r_1 , r_2 分别为定、转子每相电阻。

在绕线异步电动机工作时, 通常定子接入额定电压, 电源频率保持在 50 Hz 不变, 电机铁芯的磁化基本上是一定值。理论分析表明, 异步电机的磁损耗(即铁耗)为不变损耗, 因此, 我们可以设法控制的只有铜损耗一项。

下面从使电动机在起动过程中的总铜耗最小的角度出发, 推导起动过程的最优控制规律。绕线式异步电动机与被驱动的同步电机同轴联接, 因此系统总的转动惯量为

$$J = J_d + J_T \quad (2)$$

式中 J_d —绕线异步电动机的转动惯量; J_T —同步电动机的转动惯量。

① 收稿日期: 1999- 04- 01; 修订日期: 1999- 11- 19

作者简介: 张满生(1963-), 男, 硕士, 讲师

系统的运动方程式

$$M - M_0 = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3)$$

式中 M —异步电动机的电磁转矩, M_0 —系统的阻转矩。由于将调相机(即同步电动机)的转动惯量折算到绕线异步电动机机上,即用于提供加速的转矩已考虑在转动惯量 J 中,而且调相机在起动阶段均为空载且不投入电网,在运动系统润滑良好的前提下, M_0 可忽略不计。

因此,运动方程式可写为

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} M \quad (4)$$

前面已指出,电机发热有两个主要原因,一是电机铁耗,二是电机铜耗。由于铁耗是不变损耗,要想减小电机在起动阶段的发热及能耗,只能从减少铜耗入手。

对于铜损耗,可按下式分析计算^[2]:

$$W_{Cu} = \int_0^t P_{Cu} dt = \int_0^t (3I_1^2 r_1 + 3I_2'^2 r_2') dt \quad (5)$$

对于大、中型电机,空载电流相对较小,故

$$I_1 = I_0 + I_2' \approx I_2' \quad (6)$$

式(5)和(6)中, W_{Cu} —在一定时间内电机铜耗转换的热量, J; I_0 —电动机空载定子电流, A; I_1 和 I_2' —分别为电动机带负载时定子电流和转子电流折算值; r_1 和 r_2' —定子每相电阻和转子每相折算电阻。

将式(6)代入(5)有

$$W_{Cu} = 3 \int_0^t (I_2'^2 r_1 + I_2'^2 r_2') dt = 3 \int_0^t I_2'^2 r_2' (1 + \frac{r_1}{r_2'}) dt \quad (7)$$

由于电磁功率

$$P_s = M \Omega_0 = 3I_2'^2 \frac{r_2'}{s}$$

故

$$3I_2'^2 r_2' = M \Omega_0 s$$

代入式(7)可得

$$W_{Cu} = \int_0^t \Omega_0 (1 + \frac{r_1}{r_2'}) s M dt \quad (8)$$

因为 $\Omega = \Omega_0(1 - s)$ 且由式(4)知

$$M dt = J d\Omega = -J \Omega_0 ds$$

故

$$W_{Cu} = \int_{s_q}^{s_x} -J \Omega_0^2 (1 + \frac{r_1}{r_2'}) s ds = \frac{1}{2} J \Omega_0^2 (1 + \frac{r_1}{r_2'}) (s_q^2 - s_x^2) \quad (9)$$

以上各式中, r_1 —定子相电阻, r_2' —转子电阻折算

值, s_q —起动开始时的转差率, s_x —起动结束时的转差率, s —转差率, Ω_0 —一定子旋转磁场的机械角速度, Ω —转子的机械角速度(注意与电角速度 ω 的区别)。

在绕线式异步电动机串五段电阻起动的过程中,总的起动铜耗等于每段起动过程的铜耗之和,即

$$\sum_{i=1}^6 W_{Cu} = \frac{1}{2} J \Omega_0^2 \sum_{i=1}^6 (1 + \frac{r_1}{r_{2i}'})(s_{qi}^2 - s_{xi}^2) \quad (10)$$

式中 r_{2i}' 是第 i 段起动特性曲线上对应的转子总电阻折算值(但 $r_{26}' = r_2'$),再注意到在切换电阻瞬间,转速不可能突变,亦即转差率不会突变。因此有

$$s_{x1} = s_{q2}, s_{x2} = s_{q3}, s_{x3} = s_{q4}, s_{x4} = s_{q5},$$

$$s_{x5} = s_{q6}, s_{q1} = 1, s_{x6} = s_e \approx 0.017$$

于是式(14)以 s_{xi} 为序重新排列如下:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 = \frac{1}{2} J \Omega_0^2 & \left[(1 + \frac{r_1}{r_{21}'})(s_{x1}^2 - \frac{1}{r_{22}'} - \frac{1}{r_{21}'} r_1 + s_{x2}^2 (\frac{1}{r_{23}'} - \frac{1}{r_{22}'} r_1 + s_{x3}^2 (\frac{1}{r_{24}'} - \frac{1}{r_{23}'} r_1 + \right. \\ & s_{x4}^2 (\frac{1}{r_{25}'} - \frac{1}{r_{24}'} r_1 + s_{x5}^2 (\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_{25}'} r_1 - 0.017(1 + \frac{r_1}{r_{21}'})) \end{aligned} \quad (11)$$

欲使起动过程中的铜耗最小,即 $\sum_{i=1}^6 W_{Cu} =$

$\min \{ \sum_{i=1}^6 W_{Cu} \}$, 上式中括号内的各项之和应取最小,由于 $r_1, r_{21}', r_{22}', r_{23}', r_{24}', r_{25}', r_2'$ 均为已知,且有 $r_{21}' > r_{22}' > r_{23}' > r_{24}' > r_{25}' > r_2'$ (因为它们分别是串五段电阻、串四段电阻、串三段电阻、二段电阻、一段电阻及没串电阻),故各个 s_{xi}^2 项的系数 $(\frac{1}{r_{2(i+1)'}} - \frac{1}{r_{2i}'})$ 均大于零。因此,欲使 $\sum_{i=1}^6 W_{Cu}$ 取最小值,当且仅当各个 s_{xi} 都分别取其最小值时才成立,而 s_{xi} 取最小值,意味着应该在每段机械特性曲线速度最高点处(即趋于稳定后)切换电阻。

2 讨论

上述结论是从确保系统在起动阶段总铜耗为最小这一角度出发推导得出的,可以看出使用该结论的优点是不受系统参数精确度的影响。例如,调相机及绕线式异步电动机的转动惯量、电动机的定子和转子电阻、定转子漏抗等参数,这些参数往往用

工程算法近似计算, 精度不是很高。所幸前述结论的成立与这类参数及其精度无关。在控制软件编写时是这样使用上述结论的: 每次测定(采样)绕线异步电动机的转速, 并与上次采样的转速值比较, 当转速的变化率很小时(小于某一设定值)即认为转速基本不再变化时, 立即切换一段起动电阻, 让电动机在新的机械特性上加速起动。

由电机学及其拖动基础知道, 当忽略电机起动过程的电磁惯性而只考虑机械惯性时(事实上电磁惯性与机械惯性相比, 小得可以忽略不计), 拖动系统是一阶系统, 电机转速按指数规律增长。而一阶系统的稳定时间在工程上可取为惯性时间常数的 3~4 倍, 取 $t_s = 4\tau$, 如图 1 所示, 即绕线式异步电动机在每段机械特性曲线上的加速起动时间应取为电动机在该机械特性上对应的机电时间常数的 4 倍。

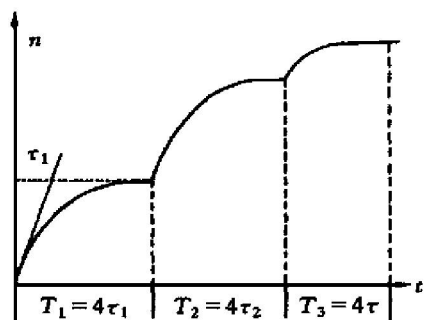


图 1 起动过程速度时间曲线

Fig. 1 Curve n vs t in start process

关于起动电阻的切换应按下列控制算法进行:

1) 采用速度(转速)控制原则

检测出转子的转速, 当在某级起动特性曲线上速度不再明显增加时, 就切换该段电阻;

2) 采用时间控制原则

各级起动电阻所历经的起动时间应是其对应机械惯性时间常数的 4 倍, 即 $t_{si} = 4\tau_i$;

3) 检测电机定子电流

当定子电流降低至某整定电流及以下时, 切换一段电阻, 以使其在新的特性上加速。至于整定电流究竟取多大, 应视具体负荷大小而定。

其中控制算法 3) 是基于如下事实而确定的: 绕线异步电动机拖动工作机械空载起动时, 其负载性质是恒转矩性的, 而串电阻起动(或调速)也是属于恒转矩性的, 因此当异步机拖动工作机械(空载)在各条串电阻人工特性上的速度稳定时, 电动机电流是同一值。而且, 在不同的特性曲线上, 随着电机转速的逐渐上升, 电流是呈指数规律下降的。随

着转速的稳定, 电流也将趋于稳定而不再变化。

必须指出, 上述转速控制原则、时间控制原则及电流控制原则, 在具体实施控制时, 应优先采用转速原则, 其次是电流原则。因为从起动过程铜耗最小得到的直接结论即为上述转速控制原则, 而时间控制原则及电流控制原则都是转速控制原则的推论, 而且在计算机电时间常数及起动电流过程中不可避免地要受到电机参数精度的影响。在绕线式异步电动机的实际负荷发生变化时(或变大或变小)或者电网电压变低使电动机力矩变小时, 在预先整定的时间内切换电阻就很难保证最优控制。因此, 要优先转速控制原则, 而将电流原则和时间原则作为转速控制原则的补充, 所以各级起动机械特性上对应的整定时间应比理论计算值稍大一些。

3 系统的硬件构成

为了实施上述控制思想和策略, 设计了如图 2 所示的控制器。电动机定子电流经由整流滤波后直接送入 A/D 转换, 转速由光电测速计转换后送入高速输入通道, 经 HSI0 计数测算出转速。 E^2 PROM 用于修改和贮存控制参数, 在键盘和显示器的配合下, 可输入以下参数: 各段电阻的延时值、电流整定值、电流测量电路的非线性校正参数等。

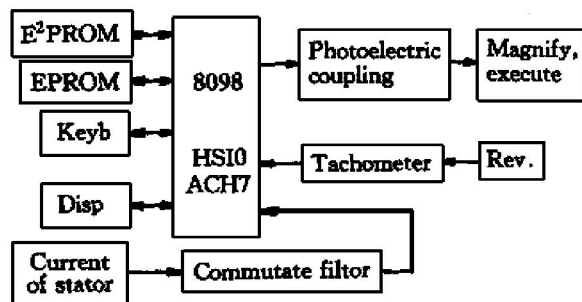


图 2 控制器原理框图

Fig. 2 Diagram of controller

4 结束语

本文提出的绕线式异步电动机最优起动控制思想——转速、电流、时间混合控制原则, 成功地应用于某变电站技改方案中。理论计算和实践运行均证明, 新方案在降低起动过程的发热方面效果良好(比原系统减小发热近 30%), 能提高电动机的使用寿命, 因而具有推广意义。

REFERENCES

- [1] GU She-gu(顾绳谷). Electromotor and Drive Theory (电机及拖动基础), 2nd edition [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1993.
- [2] CHEN Bo-shi(陈伯时). Automatic Control System About Electromotor Running(电机拖动自动控制系统) [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1993.
- [3] ZHANG Ma-sheng(张满生). An optimum start control system about a wound rotor asynchronous motor(绕线式异步电动机转子串电阻起动最优控制系统) [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1999.
- [4] GAO Jin-de(高景德), WANG Qiang-hang(王祥珩) and LI Fa-hai(李发海). The Analysis of Induction Machines System(交流电机及其系统的分析) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [5] Tan Hualin and Rugh W J. Pseudolinearization and non-linear optimal control [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 43(3): 386~ 391.
- [6] LI Zhong-hua and Krstic M. Optimal design of adaptive tracking controllers for non-linear systems [J]. Automation, 1997, 33(8): 1459~ 1473.
- [7] LSegall N and Wright J D. One-step optimal saturation correction [J]. Automatic, 1991, 27(1): 135~ 139.
- [8] LIU Mei(刘玫). 异步电动机串电阻起动新数学模型[J]. Electric drive(电气传动), 1995, (1): 12~ 15.

Optimum start control system of wound rotor asynchronous motor

ZHANG Ma-sheng¹, LUO An²

1. Department of Electrical Engineering, Zhuzhou College of Technology,
Zhuzhou 412000, P. R. China;

2. College of information, Central South University of Technology,
Changsha 410083, P. R. China

Abstract: An optimization starting control system was introduced. The control strategy and the framework of hardware, were introduced in detail. An integrated control theory composed of speed, time, and current were put forward. All about these new ideas and new measures have been proven to be correct and practicable.

Key words: asynchronous motor; optimum control; copper wastage; controller

(编辑 何学锋)