文章编号: 1671- 251X(2011)02- 0039- 05　　DOI: CNKI: 32- 1627/TP. 20110124. 1035. 004

改善异步电动机启动性能的探讨及参数计算

惠 卫民

(陕西理工学院电工电子实验中心, 陕西 汉中　723003)

摘要: 分析了改善绕线式异步电动机启动性能的理论, 提出了一种改善异步电动机启动性能的控制方案, 即将斩波器与转子整流回路中的启动电阻并联, 通过连续改变斩波器的占空因数, 使电动机启动电阻在整个启动过程中随着转速的升高维持一恒值, 从而保证了电动机转矩大时启动电流不大, 缩短了启动时间, 加快了启动过程, 启动性能得以改善; 探讨了该控制方案的实现方法, 给出了启动电阻参数的计算原则和算例。该计算原则和算例证明了该方案的可行性。

关键词: 异步电动机; 启动性能; 启动电阻; 参数计算

中图分类号: **TD614**　　文献标识码: **A**　　网络出版时间: **2011- 01- 24 10: 35**

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20110124.1035.004.html

Discussion on Improvement of Start Performance of Asynchronous Motor and Calculation of Its Parameter

HUI Wei-min

(Electrical and Electronic Experimental Center of Shanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China)

Abstract: The paper analyzed the theory of improving start performance of coiling asynchronous motor and proposed a control scheme of improving start performance of asynchronous motor, namely parallelling chopper and start resistor of rotor rectifier circuit, and continuously changing duty cycle of the chopper to make start resistor of motor maintain a constant value with increase of rotate speed of motor in starting process, so as to ensure little start current when motor torque is large, shorten start time, speed up start process, and achieve purpose of improving start performance. It discussed implementation method of the control scheme and gave calculation formula and an example of start resistor parameter. The calculation principle and example demonstrated feasibility of the control scheme.

Key words: asynchronous motor, startup performance, startup resistor, calculation of parameter

0　引言

众所周知, 电动机的启动性能是电力拖动系统的一个重要指标。然而, 不论是由鼠笼式异步电动机还是由绕线式异步电动机组成的电力拖动系统, 均存在着启动电流过大(可达到电动机额定电流的 4~ 7 倍), 但启动转矩并不大, 启动性能差的缺点。为改善异步电动机的启动性能, 不少电气工程技术工作者做了不少的研究, 取得了一定的成果。本文在对绕线式异步电动机启动性能改善进行理论分析的基础上, 提出将斩波器与转子整流回路中的启动电阻并联, 通过连续改变斩波器的占空因数, 使电动机在整个启动过程中随着电动机转速的升高, 维持启动电阻为一恒值, 从而使电动机转矩大而启动电流不大, 缩短了启动时间, 加快了启动过程, 启动性能得以改善。本文对于采用绕线式异步电动机作为原动机的电力拖动系统启动性能的改善有一定参考价值。

1　改善异步电动机启动性能的理论分析

欲改善异步电动机的启动性能, 就需要对改善

收稿日期: 2010- 10- 28

作者简介: 惠卫民(1971-), 男, 陕西华县人, 实验师, 硕士, 2008 年毕业于西安科技大学, 现主要从事本科电工电子类专业实验指导工作, 研究方向为电力拖动及计算机控制。E-mail: huiweimin647119@sina.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

异步电动机启动性能的理论作一分析，然后以理论分析为基础，得出控制方案以及实现控制的方法。

根据参考文献[1]，三相异步电动机的电磁转矩与转差率的关系为

$$M = \frac{m_1}{\Omega_0} \cdot \frac{U_1^2 \frac{r'_2}{S}}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{S}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (1)$$

当绕线式异步电动机转子外串电阻启动时，则式(1)可变为

$$M = \frac{m_1}{\Omega_0} \cdot \frac{U_1^2 \frac{r'_2 + R'_Q}{S}}{\left(r_1 + \frac{r'_2 + R'_Q}{S}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (2)$$

式中：m_1 为异步电动机的相数；Ω_0 为异步电动机的同步角速度，$\Omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}$(弧度)；$U_1$ 为异步电动机的额定电压；r_1 和 r'_2 分别为定子每相绕组电阻和转子每相绕组电阻折算到定子侧的数值；x_1 和 x'_2 分别为定子每相漏抗和转子每相漏抗折算到定子侧的数值；S 为异步电动机的转差率；R'_Q 为启动电阻折算到定子侧的数值。

由于异步电动机的定子电阻 r_1 和转子电阻 r'_2 一般很小，可以忽略，于是式(2)可简化为式(3)：

$$M = \frac{m_1}{\Omega_0} \cdot \frac{U_1^2 \frac{R'_Q}{S}}{\left(\frac{R'_Q}{S}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (3)$$

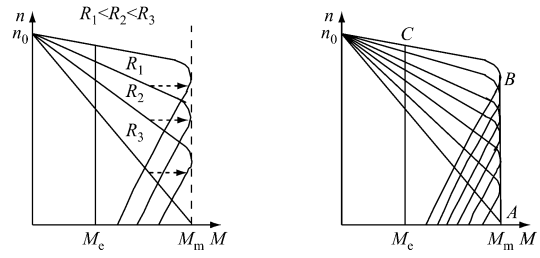
考虑到 $\frac{R'_Q}{S} >> x_1 + x'_2$，于是有

$$M = U_1^2 \frac{m_1}{\Omega_0} \cdot \frac{1}{\frac{R'_Q}{S}} \quad (4)$$

由(4)式可知，当异步电动机串电阻 R_Q 启动时($S = 1$)，随着电动机转速的升高，S 减小，导致电动机的电磁转矩减小，这就势必影响电动机达到额定转速的速度。如果能够保证在电动机的整个启动过程中 $\frac{R'_Q}{S}$ 基本为恒值，那么就可以保证异步电动机以恒定的 M 值启动。

三相异步电动机串电阻分级启动和保证 $\frac{R'_Q}{S}$ 为恒值启动的过程分别如图 1(a)和图 1(b)所示。

图 1(a)为串电阻从 R_3 减小到 R_2，再减小到 R_1，最后将电阻短接的启动过程；图 1(b)则是使 $\frac{R'_Q}{S}$ 为恒定值，最后将电阻短接的启动过程。显然是沿着外串电阻由 R_Q 变化到 0 时一系列特性线的切点、恒最大转矩 M_m 启动。这样由于启动转矩能



(a) 串电阻分级启动　　(b) $\frac{R'_Q}{S}$ 为恒值启动

图 1　三相异步电动机的启动过程

一直保持最大值，可使启动过程加快，从而使启动性能得到改善，图 1(b)即为改善后的启动性能。

2　改善异步电动机启动性能的控制方案

欲获得如图 1(b)所示的三相异步电动机的启动性能，只要能够设法使 R_Q 随着转差率 S 的减小，由 R'_Q 连续变化到 0，就可使异步电动机的启动性能沿着 A、B、C 变化，取得良好的启动性能。

参阅参考文献[2]，将并联型斩波器与启动电阻 R_Q 并联，通过改变斩波开关的占空比即可达到目的。根据上述设计思想可设计出改善异步电动机启动性能的主电路原理图，如图 2 所示。

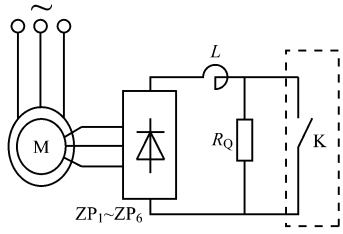


图 2　改善异步电动机启动性能的主电路原理

M 为要改善其启动性能的异步电动机；ZP_1～ZP_6 为异步电动机的转子整流桥，其作用是将转子感应电势整流成直流电势；L 为滤波电感，用以平稳直流回路中电流的脉动；R_Q 为外串的启动电阻；虚线框内的 K 为斩波器等效开关，该斩波开关可由半控器件晶闸管等元件构成，也可由全控型半导体器件 GTR 或 GTO 构成[4-5]。如果由晶闸管组成，如图 3 所示。该电路的工作原理参见参考文献[2]，在此不再赘述。

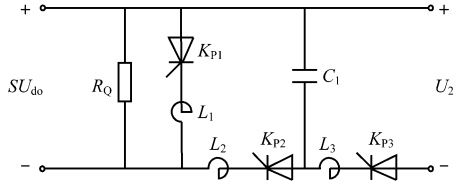


图 3　由晶闸管组成的并联型斩波电路

设斩波开关 K 的接通时间为 T_{on}，关断时间为 T_{off}，则斩波开关的占空因数 $K_z = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T}$，$T$

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为斩波周期。很明显, K_z 不同, 则转子直流回路所串电阻 R_Q 的等效值 $R_{WS}=(1-K_z)R_Q$ 也不同。

图 2 中电动机的启动过程以及对控制电路的要求: 电动机刚开始启动时, $S=S_{max}=1$, 异步电动机以外串电阻 R_Q 进行启动, 随着电动机转速的升高, 转差率 S 减小, 外串电阻 R_Q 的等效电阻 $R_Q(1-K_z)$ 减小。当 S 减小到等于异步电动机的固有临界转差率 S_m 时, $R_{WS}=(1-K_z)R_Q=0$, 相当于把转子整流桥直流侧短接, 这样电动机就运行到固有特性线上。此后, 随着电动机转速的增加, S 进一步减小, 直到异步电动机的电磁转矩和负载转矩两者相等时, 电动机就稳速运行到图 1(b) 中的 C 点, 完成启动过程。

根据图 2, 可画出异步电动机启动过程中转子侧直流等效电路如图 4 所示[1]。其中 U_{do} 为静止时转子的整流电压; x_k 为折算到转子侧的电动机的漏抗值; r'_1 为折算到转子侧定子绕组的每相电阻值; r_f 为转子直流回路中滤波器的电阻值; r_2 为转子绕组每相的电阻值。

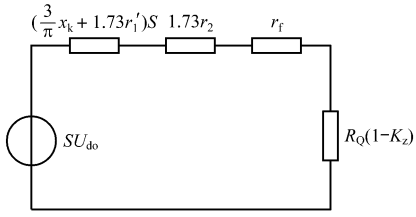


图 4　异步电动机启动时转子侧直流等效电路

由图 4 可得, 直流等效回路中的电流:

$$I_d=\frac{SU_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k+1.73r'_1\right)S+1.73r_2+r_f+R_Q(1-K_z)} \tag{5}$$

在启动过程中, $S=S'_m$ (S'_m 为异步电动机对应外串电阻 $R_Q(1-K_z)$ 时机械特性的临界转差率)。当 $S<S_m$ (异步电动机固有机械特性的临界转差率) 后, S 变化很慢; 随着 S、启动电流 I_d 减小, 电磁转矩 M 也减小, 直到 $M=M_{FL}$ (异步电动机所带的额定负载转矩) 时, 则电动机就稳定运行到额定运行点, 完成启动过程。

可见, 要改善异步电动机的启动性能, 对斩波器占空比的控制要求: 开始启动时, $S=S_{max}=1$, 要求 $K_z=0$, 对应的控制电压 U_{gd} 最小, $U_{gd}=U_{gdmin}=0$; 当达到电动机的固有临界转差率 $S=S_m$ 时, 要求 $K_z=1$, 对应的给定电压 $U_{gd}=U_{gdmax}$。

这就要求控制电压随着电动机转速的升高而增大, 即要求斩波开关的占空因数 K_z 随电动机转速的升高而增大。

以上是理想情况, 对并联斩波器系统而言, 为防止并联斩波器电路的工作电压 U_2 和转子整流电压 SU_{do} 两电源顺极性串接造成短路, 斩波开关的占空因数 K_z 既不能取 0, 也不能取 1, 只能是从某一值 K_{zmin} 变化到某一值 K_{zmax}。

根据上述设计思想可知, 采用斩波调速系统的触发电路 (参见参考文献[3]) 产生控制脉冲, 对斩波开关进行控制, 使其 K_z 在 [0.1, 0.9] 范围内连续变化。只要在此变化过程中保证 $\frac{R_Q}{S}$ 为恒值, 就可使异步电动机的启动性能得到改善。

3　启动参数的计算

由上述讨论可见, 启动电阻 R_Q 是获得良好启动性能的关键性元件, 合理选择它的参数, 乃是实现绕线式异步电动机启动性能改善的前提, 为此, 就如何计算它的参数在此作以说明。

(1) 启动电阻 R_Q

因刚启动时 $S=S_{max}=1$, $M=M_m$ (异步电动机最大转矩), 此时计算转子直流回路中的电流 I_d, 当 $K_z=K_{zmin}$ 时, 有

$$I_{dmin}=\frac{S_{max}U_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k+1.73r'_1\right)S_{max}+1.73r_2+r_f+(1-K_{zmin})R_Q} \tag{6}$$

当 $K_z=K_{zmax}$ 时, 有

$$I_{dmax}=\frac{S_mU_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k+1.73r'_1\right)S_m+1.73r_2+r_f+(1-K_{zmax})R_Q} \tag{7}$$

异步电动机转子斩波调速时, 其电磁转矩为

$$M=\frac{P_M}{\Omega_0}=\frac{1}{\Omega_0}\left[U_{d0}-\left(\frac{3x_k}{\pi}-1.73r'_1\right)I_d\right]I_d \tag{8}$$

在忽略异步电动机定转子漏阻抗的条件下, 可近似认为 M 与 I_d 成正比。

只要式(6) = 式(7), 即

$$\frac{S_{max}U_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k+1.73r'_1\right)S_{max}+1.73r_2+r_f+(1-K_{zmin})R_Q}=\frac{S_mU_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k+1.73r'_1\right)S_m+1.73r_2+r_f+(1-K_{zmax})R_Q} \tag{9}$$

就可保证 2 种情况下电磁转矩相等, 由式(9) 可得启

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

动电阻 R_Q:

$$R_Q = \frac{(S_{max} - S_m)(1.73r_2 + r_f)}{S_m(1 - K_{zmin}) - (1 - K_{zmax})} \quad (10)$$

式(10)是根据系统参数和控制器占空因数变化范围确定启动电阻 R_Q 值的表示式, 不便于工程实际应用。

取 $S_{max} = 1$, 则式(8)可简化为

$$R_Q = \frac{(1 - S_m)(1.73r_2 + r_f)}{S_m(1 - K_{zmin}) - (1 - K_{zmax})} \quad (11)$$

(2) 最大启动电流 I_{Qm}

由图 4 可知, 当 $K_z = K_{zmin}$、$S_{max} = 1$ 时, 有

$$I_{Qm} = \frac{U_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k + 1.73r'_1\right) + 1.73r_2 + r_f + (1 - K_{zmin})R_Q} \quad (12)$$

当 $S = S_m$(固有临界转差率)时, 有

$$I_{Qm} = \frac{S_m U_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k + 1.73r'_1\right)S_m + 1.73r_2 + r_f + (1 - K_{zmax})R_Q} \quad (13)$$

(3) 启动电流 I_Q

当 $K_{zmin} < K_z < K_{zmax}$ 时, 对应某一值 K_z, 其启动电流:

$$I_Q = \frac{S'_m U_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k + 1.73r'_1\right)S'_m + 1.73r_2 + r_f + (1 - K_z)R_Q} \quad (14)$$

只要使 $I_Q = I_{Qm}$ 就可使电动机以最大 M_m 启动。

(4) 启动电阻额定功率

根据 $I_{Qm}^2 R$ 计算, 取 50% 余量即可。

4 算例

现以 JR- 4S 异步电动机为例对启动参数进行计算。根据参考文献[2], 异步电动机的有关参数: 额定转速 $n_e = 1\ 400$ r/min, $U_{1e} = 380$ V, $I_{1e} = 6.9$ A, $E_{2e} = 195$ V, $I_{2e} = 9.5$ A, $\lambda_M = 2$, $r'_1 = 0.59\ \Omega$, $r_2 = 0.79\ \Omega$, $M_e = 20.5$ N·m, $I_{ed} = 12.5$ A, 转子直流回路中滤波电抗器的电阻 $r_f = 0.25\ \Omega$。

(1) 启动电阻

根据式(11)进行计算。考虑到该电动机的额定转速 $n_e = 1\ 400$ r/min, 所以该电动机的额定转差率 $S_e = \frac{n_0 - n_e}{n_0} = 0.066\ 6$, 该电动机的固有临界转差率 $S_m = S_e(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) = 0.248$。

把 $K_{zmin} = 0.1$、$K_{zmax} = 0.9$ 及已知条件代入式(11)可得 $R_Q = 9.87\ \Omega$, 取系列值 $R_Q = 10\ \Omega$。只要按计算结果取启动电阻值, 当占空因数从 0.1 变化到 0.9 时就可使电动机维持最大转矩启动。

(2) 启动电流

对于 $K_z = K_{zmin} = 0.1$、$S_{max} \approx 1$ 时, 有

$$I_{Qm}|_A = \frac{U_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k + 1.73r'_1\right) + 1.73r_2 + r_f + (1 - K_{zmin})R_Q} = 18.6$$

当 $K_z = K_{zmax} = 0.9$、$S = S_m$ 时, 有

$$I_{Qm}|_A = \frac{S_m U_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k + 1.73r'_1\right)S_m + 1.73r_2 + r_f + (1 - K_{zmax})R_Q} = 18.7$$

(3) 校核当 K_z 在 K_{zmax} 到 K_{zmin} 之间连续变化时, 根据对应

$$n'_e = n_0 - \frac{1.73r_2 + r_f + (1 - K_z)R_Q}{C_e|_{I_{ed}}} I_{ed} \quad (15)$$

$$C_e|_{I_{ed}} = \frac{U_{do} - \left(\frac{3}{\pi}x_k + 1.73r'_1\right)I_{ed}}{n_0} \quad (16)$$

$$n'_m = n_0 - \frac{1.73r_2 + r_f + (1 - K_z)R_Q}{C_e|_{I_{Qm}}} I_{Qm} \quad (17)$$

$$C_e|_{I_{Qm}} = \frac{U_{do} - \left(\frac{3}{\pi}x_k + 1.73r'_1\right)I_{Qm}}{n_0} \quad (18)$$

分别计算出对应于 K_z 时的 S'_m。

当 $K_z = 0.5$ 时, $S'_m = 0.62$, 可计算得

$$I_Q|_A = \frac{S'_m U_{do}}{\left(\frac{3}{\pi}x_k + 1.73r'_1\right)S'_m + 1.73r_2 + r_f + (1 - K_z)R_Q} = 18.6$$

所以可实现恒转矩启动。

(4) 启动电阻的额定功率

$P_R|_W = (1.5 \sim 2)I_{Qm}^2 R = 5\ 189 \sim 6\ 919$, 取 6 000 W即可。

5 结语

根据本文的控制方案, 在由 JR- 4S 构成的转子斩波调速系统中进行了实验, $R_Q = 10\ \Omega$, 当斩波器的占空因数从 0.1 变化到 0.9 时, 电动机的转速快速上升, 但转子整流电流保持在 18.5 A 左右, 基本上实现了恒最大转矩启动, 启动过程快。实测启动电流与理论计算启动电流基本吻合, 表明本文的理论分析是正确的, 改善电动机启动性能的方案是

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

文章编号: 1671- 251X(2011)02- 0043- 06　　DOI: CNKI: 32- 1627/TP.20110124.1037.005

风电机组电动变桨距控制系统的优化研究

张英,　吉小康,　魏晓华

(河北工业大学电气与自动化学院, 天津　300130)

摘要: 由于风速的随机性、不稳定性及气动效应的影响,使得风力发电机组变桨距控制系统具有非线性、参数时变性、强耦合等特点,难于实现高精度控制,导致风电机组输出电能质量较差。为了改善系统在恒功率输出运行区域内的动态性能,分析了风电机组变桨距控制系统的现状,建立了整个风电机组模型,提出了优化的变桨距控制策略,并设计了基于模糊控制的变桨距控制器。仿真结果表明,独立变桨距控制技术的控制效果比统一变桨距好,实现了风力机各叶片的优化独立变桨距控制,优化了风力发电系统在超过额定风速时的恒功率控制,具有抗干扰能力强、控制精度高的特点。

关键词: 风力发电机组; 优化控制; 模糊控制; 电动变桨距控制; 统一变桨距控制; 独立变桨距控制

中图分类号: **TP273.5**　　文献标识码: **A**　　网络出版时间: **2011- 01- 24 10:37**

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20110124.1037.005.html

Research of Optimization of Control System of Electric Pitch of Wind Turbines

ZHANG Ying,　JI Xiao-kang,　WEI Xiao-hua

(School of Electrical Engineering and Automation of Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Due to the influence of randomness, unstability and aerodynamic effect of wind speed, variable pitch control system of wind turbine generators has characteristics of nonlinear, parameter variability and strong coupling, so it is difficult to realize high-precision control for wind power generation system and the output power quality is poor. In order to improve dynamic performace in operation area of constant power output of the system, the paper analyzed exsisting situation of control system of electric

收稿日期: 2010- 10- 29

作者简介: 张英(1951-), 男, 河北张家口人, 正高级工程师, 1976年毕业于河北工学院电机系电气自动化专业, 获得天津市"十五"立功奖章, 现主要从事电站计算机巡检、监控和励磁等方面的工作, 已发表文章多篇。E-mail: sbczhang@hebut.edu.cn

可行的。本文所述的改善电动机启动性能的方案以及参数计算原则可在某些在重载启动的生产机械(如提升机、吊车等)中使用。

需要指出的是,本启动方案就其实质而言,仍然是绕线式异步电动机转子回路串电阻启动,但它与传统的在转子回路串电阻分级启动相比,将分级改变电阻变为连续改变,这样就可使电动机能够在最大转矩的情况下启动,加快了启动过程,缩短启动时间,同时可减少电动机启动时对电网造成的电压波动的影响。

参考文献:

[1] 顾绳谷. 电机及拖动基础(上下册)[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[2] 祁强, 张广溢. 异步电动机转子电阻斩波调速系统的特性分析与仿真研究[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(1): 45-47.

[3] 惠毅. 斩波调速系统数字触发器的设计[J]. 电气自动化, 1987(4): 7-10.

[4] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[5] 丁道宏. 电力电子技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net