

doi: 10.7690/bgzdh.2015.07.016

## 基于温度补偿控制的水电阻软启动器的建模与仿真

杨其宇<sup>1</sup>, 张霞<sup>2</sup>, 王钦若<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学自动化学院, 广州 510006; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:** 针对大功率电动机在直接启动过程中启动电流过从而对电网产生较大的冲击的问题, 设计一种基于温度补偿控制的水电阻调速器的大功率转子绕线异步电机软启动及调速系统。介绍水电阻器的结构以及原理, 采用 ARPS 经验公式分析温度变化对电解质溶液的电阻率影响, 建立基于水电阻调速的异步电动机调速系统动力学数学模型, 提出了温度补偿的控制方法, 通过 Matlab/Simulink 仿真验证模型及算法的有效性。仿真结果表明: 采用温度补偿的水电阻器调速系统启动电流较小, 启动转矩平滑, 调节速度快。

**关键词:** 软启动器; 水电阻调速; 温度补偿; Simulink 建模; 交流调速系统

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Modeling and Simulation of Water Resistor Soft Starting and Speed Control System with Temperature Compensation

Yang Qiyu<sup>1</sup>, Zhang Xia<sup>2</sup>, Wang Qinruo<sup>1</sup>

(1. College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Large starting current is produced when high power rotor winding induction motor start directly, it causes large impact and interference on the grid, based on temperature compensation, a high power of wound rotor asynchronous motor soft-starter and speed control system of water resistor is designed. The structure and the principle of the water resistance are introduced. Use ARPS experience formula to analyze influence of temperature change on resistivity of electrolyte solution, dynamic mathematical model of asynchronous motor speed-controlling system based on water resistance speed regulation is established, and temperature compensation method is proposed. Adopt Matlab/Simulink simulation to validate effectiveness of model and algorithm. The simulation result shows that, based on temperature compensation, water resistor speed controller system has low start current, smooth start rotor and fast regulation speed.

**Keywords:** soft-start; water resistor speed control; temperature compensation; Simulink model; AC speed controller system

### 0 引言

大功率电动机在军工、石油开采、水泥制造、矿物开采等领域应用非常广泛, 其直接启动过程中, 启动电流可达额定电流的 4~8 倍, 对电网造成很大的冲击。采用软启动可以有效降低启动电流<sup>[1]</sup>。

目前, 软启动方式有 Y- $\Delta$  降压启动方式、自耦变压器启动方式等, 将启动电压降低到一固定电压下启动, 然后直接切换至额定电压, 属于有级启动。如果启动电压设置不当, 启动电流和二次冲击都将较大<sup>[2]</sup>。

定子串可变电抗器软启动方式, 是在传统电抗器中增加二次线圈, 其二次线圈与晶闸管串联, 通过晶闸管的相移改变可二次线圈的电流, 进而改变电抗变换器一次线圈的电流, 从而改变电动机的定

子启动电流<sup>[3]</sup>。但此装置二次侧谐波较大, 且电抗器要工作在线性区间, 铁心容量较大。

定子串饱和电抗器软启动方式是通过改变电抗器的铁芯饱和度, 从而平滑连续地调节可控电抗器的阻抗<sup>[3]</sup>, 进而调节定子启动电流, 可以实现电抗器阻抗的无级连续调节, 启动性能良好。但磁路饱和和后漏磁较大, 磁芯发热较大<sup>[4]</sup>。

晶闸管式软启动装置是通过改变相控角  $\alpha$  来改变加在定子上的有效电压值, 属于移相调压软启动技术<sup>[1]</sup>。但是此方式下, 谐波较大(与晶闸管的导通角和负载的功率因数角有关)。大量的谐波对电网和电机都会造成一定的损害<sup>[5]</sup>。

定子串水阻器软启动方式, 是在三相异步电动机定子侧串入液态电阻, 降低电动机定子电压的启

收稿日期: 2015-03-16; 修回日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61271380); 广东省自然科学基金(S2012010009870); 广东省人才引进专项基金(2050205)

作者简介: 杨其宇(1977—), 男, 广东人, 在读博士, 讲师, 从事大功率调速及装备、智能控制以及电生理设备研究。

动方式。但水阻器电解质溶液的导电率会随着环境温度的变化发生明显的变化，甚至水的蒸发也会影响电解质溶液的导电率，所以液态软启动装置的稳定性较差。完成一次启动后，电解质溶液温度较高，必须等电解液的温度降低到安全范围内才可以再次启动，所以使用受到一定限制<sup>[2]</sup>。

定子变频软启动方式具有启动电流小、启动转矩大、调速曲线平滑等优点。但是由于电力半导体器件的容量限制，以及价格昂贵，高压定子变频器在大功率调速时应用受到限制<sup>[6-7]</sup>。

针对上述问题，笔者在大功率调速系统中，将水电阻器接到转子绕线异步电动机转子回路，分析温度变化对电机启动、调速的影响，建立调速模型，为工程应用及设计提供一定的参考依据。

### 1 水电阻调速器的结构和原理

水电阻器结构主要包括水箱、静极板、动极板、升降装置、热交换器和冷却塔以及电气元件(如接触器、继电器、限位开关等)等主要部件。水箱中装载电解质(NaHCO<sub>3</sub>)溶液。水电阻器的动/静平行极板浸在电解质溶液中，通过传动机构调节两组平行极板的重合面积，从而调节动/静平行极板的等效电阻。水电阻调速器结构如图 1 所示。

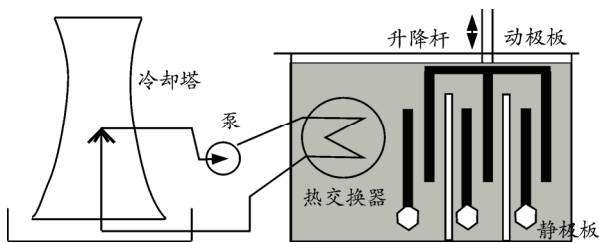


图 1 水电阻器结构

显然，极板间的电阻  $R$  与电解质的电阻率  $\rho$  及导电面积相关，为

$$R = \rho \frac{c}{wl} \quad (1)$$

式中： $\rho$  为电解质溶液的电阻率； $w$  为动、静极板的板宽； $c$  为动、静极板的间距； $l$  为动、静极板的相对深度。

由 ARPS 近似公式<sup>[8]</sup>，有

$$\rho_T = \rho_0 \frac{(T_0 + 21.54)}{T + 21.54} = u_T(T)\rho_0 \quad (2)$$

式中： $u_T(T) = (T_0 + 21.54) / (T + 21.54)$ ； $\rho_0$  是电解质溶

液在温度  $T_0$  时的电阻率； $T_0$  为起始温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\rho_T$  是温度  $T$  时的电阻率，见图 2 所示。显然，从图可观察，溶液电阻率随温度变化在  $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$  范围内变化比较剧烈， $u_T(T)$  由 1 降到 0.35。

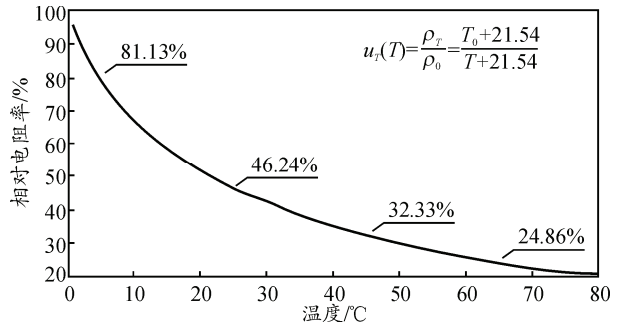


图 2 相对电阻率随温度变化曲线

结合式 (1)、式 (2) 可得

$$R_T = \frac{k\rho_T}{l} = \frac{k\rho_0}{l} \frac{(T_0 + 21.54)}{(T + 21.54)} \quad (3)$$

式中  $k = c/w$ 。

### 2 水电阻调速系统的稳态模型

水电阻器串级调速系统工作时，假设忽略时间及空间谐波、铁损和磁饱和，系统稳态等效电路为图 3。

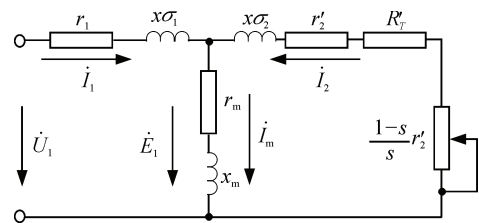


图 3 水电阻器串级调速系统等效电路

式中： $\dot{U}_1$  为定子相电压； $\dot{E}_1$  为定子感应电动势； $\dot{I}_1$  为定子电流； $\dot{I}_2$  为转子折算到定子侧电流； $\dot{I}_m$  为励磁电流； $r_1$  为定子电阻； $r_2'$  为转子折算到定子侧电阻； $r_m$  为励磁电阻； $x_{\sigma 1}$  为定子漏电抗； $x_{\sigma 2}'$  为转子折算到定子侧漏抗； $s = 1 - \omega / \omega_1$  为异步电机的转差率； $\omega$  为电动机的角速度； $\omega_1$  为电源角频率。

$$R_T' = \frac{R_T}{s} \quad (4)$$

由图 3 可得转子电流幅值为

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + C \frac{R_2' + R_T'}{s})^2 + (x_{\sigma 1} + Cx_{\sigma 2}')^2}} \quad (5)$$

式中  $C = 1 + \frac{R_1 + jx_{\sigma 1}}{R_m + jx_{m1}} \approx 1 + \frac{x_{\sigma 1}}{x_m}$ 。

当  $x_m \gg x_{\sigma 1}$ ,  $C=1$ , 所以式 (5) 为

$$I_1 \approx I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2' + R_T'}{s})^2 + (x_{\sigma 1} + (x_{\sigma 2}')^2)} \quad (6)$$

电动机的电磁功率为  $P_M = \frac{3I_2'^2 R_2'}{s}$ , 同步角速度

$\omega_m = \frac{\omega_1}{n_p}$ ,  $n_p$  为异步电机极对数。结合式 (3)、式 (4)、

式 (6), 电磁转矩有

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3n_p I_2'^2 R_{\Sigma}}{\omega_1 s} = \frac{3n_p U_1^2 R_{\Sigma} / s}{\omega_1 [(R_1 + R_{\Sigma} / s)^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2]} \quad (7)$$

式中  $R_{\Sigma} = R_2' + R_T'$ 。

式中对  $s$  求导, 令  $\frac{dT_e}{ds} = 0$ , 有

$$s_m = \frac{R_{\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2}} \quad (8)$$

式 (8) 是最大转矩  $T_{em}$  对应的转差率 (称为临界转差率)。可以看出, 临界转差率与  $R_{\Sigma}$  成正比关系。

将 (3) 代入 (8), 可得

$$s_m = \frac{R_1 + \frac{k\rho_0 (T_0 + 21.54)}{l (T + 21.54)}}{\sqrt{R_1^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2}} = \frac{R_1 + \frac{K_w}{(T + 21.54)l}}{\sqrt{R_1^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2}} \quad (9)$$

式中  $K_w = c\rho_0(T_0 + 21.54)/w$ 。

式 (9) 指明: 在水电阻器电解质溶液温度  $T$  一定的情况下, 通过传动机构改变动、静极板的相对深度  $l$ , 即可以改变  $s_m$ , 机械特性见图 4。

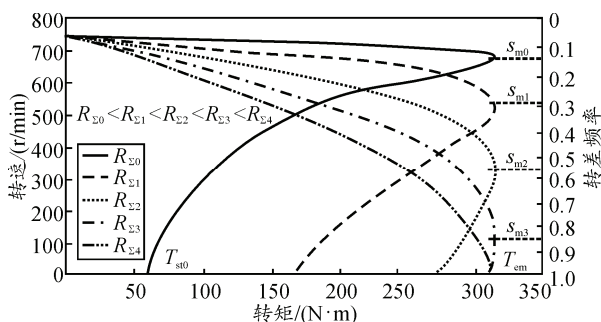


图 4 改变转子电阻时异步电动机机械特性

在电动机启动过程中, 可调整  $s_m$  使得电动机启动转矩获得最大值  $T_{st}$ 。

将式 (8) 代入式 (7) 得

$$T_{em} = \frac{3n_p U_1^2}{2\omega_1 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2})} \quad (10)$$

当电动机启动时, 有  $s=1$ , 令启动电磁转矩为  $T_{st}$ , 有

$$T_{st} = \frac{3n_p U_1^2 R_{\Sigma}}{\omega_1 [(R_1 + R_{\Sigma})^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2]} \quad (11)$$

记  $R_{\Sigma} = R_{\Sigma st}$  时,  $T_{em} = T_{st}$ , 则由式 (10)、式 (11) 可得

$$\frac{1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X^2}} = \frac{2R_{\Sigma}}{(R_1 + R_{\Sigma})^2 + X^2} \quad (12)$$

式中  $X = x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}'$ , 解式 (12), 可得

$$R_{\Sigma st} = \sqrt{R_1^2 + X^2} \quad (13)$$

或者改写为

$$R_T' = \sqrt{R_1^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2} - R_2' \quad (14)$$

式 (14) 表明: 控制转子所需的附加的电阻的大小, 就能控制电动机启动时转矩。

### 1.3 水电阻调速系统的近似动态模型

当水电阻比较大, 也就是  $R_{\Sigma}$  较大时, 由式 (7) 可得

$$T_e \approx \frac{3n_p}{\omega_1 R_{\Sigma}} U_1^2 s \quad (15)$$

式 (15) 在稳定点  $A$  时  $R_{\Sigma}$  的值为  $R_{\Sigma}'$ , 线性化得

$$T_e \approx \frac{3n_p U_1^2}{\omega_1} \cdot \frac{\Delta s R_{\Sigma} - s \Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}'^2 + R_{\Sigma}' \Delta R_{\Sigma}} \quad (16)$$

考虑式 (16) 中的  $R_{\Sigma}' \gg \Delta R_{\Sigma}$ , 式 (16) 化简为

$$\Delta T_e \approx \frac{3n_p U_1^2}{\omega_1} \cdot \frac{\Delta s R_{\Sigma} - s \Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}'^2} \quad (17)$$

电动机的实际角速度为  $\omega$ , 从转差率定义  $s = 1 - \omega / \omega_1$ , 得  $\Delta s = -\Delta \omega / \omega_1$ , 代入式 (17) 得

$$\Delta T_e \approx \frac{3n_p U_1^2}{\omega_1} \cdot \frac{-\frac{\Delta \omega}{\omega_1} R_{\Sigma} - (1 - \frac{\omega}{\omega_1}) \Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}'^2} = \frac{3n_p U_1^2}{\omega_1^2} \cdot \frac{(\omega - \omega_1) \Delta R_{\Sigma}' - \Delta \omega R_{\Sigma}'}{R_{\Sigma}'^2} \quad (18)$$

电力拖动运动方程式为

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt} \quad (19)$$

式 (19) 线性化得

$$\Delta T_e - \Delta T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (20)$$

式 (18)、式 (20) 说明了水电阻器调速规律, 由此可得转子绕线异步电动机水电阻调速系统的线性化近似动态结构如图 5 所示。

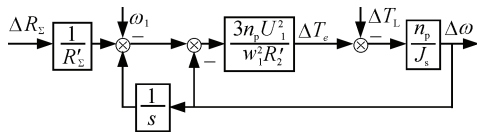


图 5 改变转子电阻时异步电动机动态结构图

### 3 水电阻调速系统的温度补偿控制

水电阻动极板采用双闭环位置伺服系统驱动, 仅调节极板的相对深度  $l$ 。假设忽略螺杆死区, 合并小惯性环节, 校正为典型的 I 型系统, 位置环闭环传递函数  $\Phi_p(s) = K_p / (T_\Sigma s^2 + s + K_p)$ , 式中  $T_\Sigma$  为伺服系统的时间常数,  $K_p$  为伺服系统的放大常数。采用高阶系统降阶近似处理方法, 忽略高次项,  $\Phi_p(s)$  可降阶近似为惯性环节<sup>[1,9-10]</sup>:

$$\Phi_p(s) \approx \frac{K_p}{s + K_p} = \frac{1}{T_w s + 1} \quad (21)$$

其中  $T_w = 1/K_p$  为水电阻驱动机构的机械时间常数, 降阶的近似条件为位置开环的截止频率  $\omega_{cn} \leq 1/(3\sqrt{K_p/T_\Sigma})$ 。

由式 (1)、式 (21), 并考虑温度变化对水电阻器电解质溶液的电阻率的影响, 可以根据式 (3) 进行温度补偿, 结合图 5, 构建速度闭环系统, 见图 6。

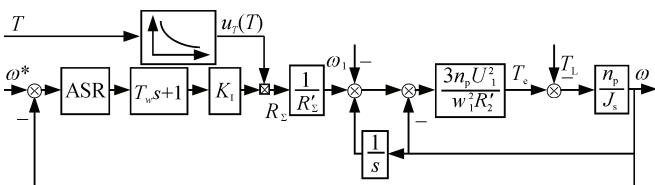


图 6 带温度补偿的水电阻异步电动机调速系统结构图

图中:  $\omega^*$  为系统的角频率给定值; ASR 是系统的速度调节器, 采用 PID 策略;  $K_1 = c\rho_0/w$  为常数。

### 4 水电阻串级调速系统的仿真

某系统参数如下, 电机额定功率为  $P_N = 4.7 \text{ kW}$ , 额定电压  $U_N = 380 \text{ V}$ , 定子电阻  $R_s = 0.68 \Omega$ , 转子电阻  $R_r = 0.82 \Omega$ , 定子、转子漏感  $L_s = L_r = 0.0042 \text{ H}$ , 定子转子互感  $L_M = 0.1486 \text{ H}$ 。以受控可变电阻器作为水电阻(见图 7), 建立仿真模型, Simulink 仿真结果如下。

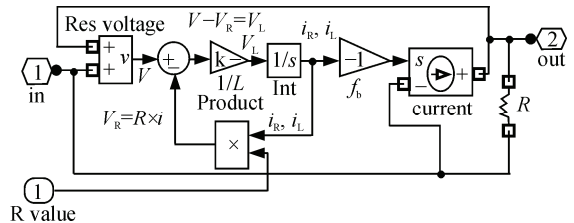


图 7 单相受控可变电阻器 Simulink 模型

图 8 是水电阻器为不同电阻值时, 定子的启动电流。从波形可以看出: 水电阻越大, 则启动电流越小。图 9 是不同水电阻值时电磁转矩曲线。

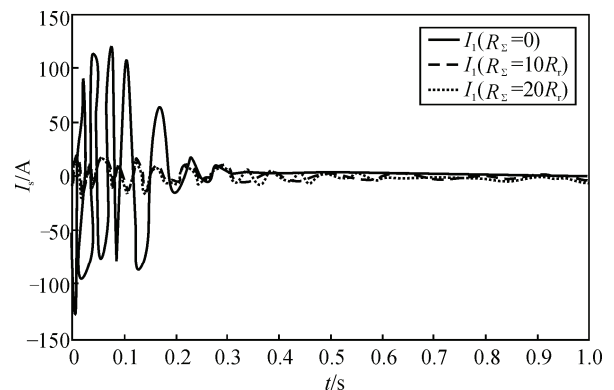


图 8 定子启动电流

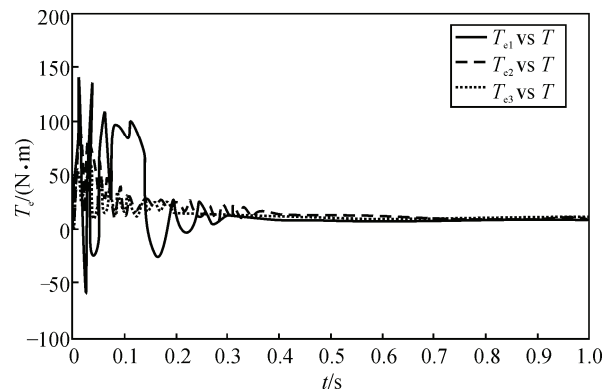


图 9 电磁转矩 ( $T_e$  when  $R_2 = 10R_r$ )

图 10 为温度补偿与非温度补偿的电磁转矩。温度补偿控制环节作用时, 电磁转矩的阶跃响应更加迅速, 脉动较小。

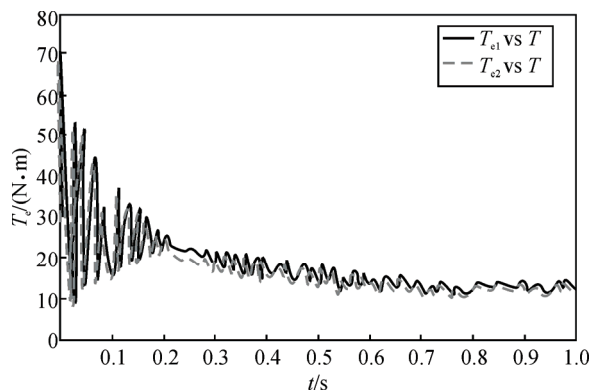


图10 电磁转矩 ( $T_{e1}$  when  $R_{\Sigma} = 10R_r$ )

## 5 结束语

笔者对转子绕线异步电动机转子串水电阻调速的原理进行了阐述，对水电阻器的结构做了一定的说明，由于水电阻器增加了温度控制环节，所以水阻调速器可以自由启动及调速。笔者分析了温度的对电解质溶液的电阻率的影响以及其对异步电动机启动及调速过程的影响，得到了转子绕线异步电动机转子串水电阻调速的稳态模型和动态模型。仿真结果表明：采用温度补偿的水电阻器调速系统启动电流较小，启动转矩平滑。

## 参考文献：

- [1] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 120-122.
- [2] 宁国云, 袁佑新, 黄声华, 等. 大型电动机软启动装置性能分析与比较[J]. 电气传动, 2011(8): 52-57.
- [3] 袁佑新, 肖义平. 可变电抗器的阻抗变换机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008(3): 133-135.
- [4] 刘利, 王栋, 白本督. 交流异步电动机固态软启动器控制方式综述[J]. 化工自动化及仪表, 2010(7): 1-4.
- [5] 任先文, 何强, 王义军. 异步电动机软启动器产生的谐波对启动特性的影响研究[J]. 东北电力学院学报, 2003(2): 15-20.
- [6] 周宇恒, 赖华. 变频调速技术在煤气厂高压排风机中的应用[J]. 兵工自动化, 2007, 26(12): 74-75.
- [7] Li Shue, Fu Chao. Design and Simulation of Three-phase AC Motor Soft start[C]. ISDEA 2013 Third International Conference on. 2013.
- [8] 韩立华, 刘松玉, 杜延军, 等. 温度对污染土电阻率影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1151-1155.
- [9] 袁海宵, 王慧贞. 基于无刷直流电动机伺服系统的位置环设计[J]. 电力电子技术, 2011(4): 52-54.
- [10] 滕福林, 胡育文, 刘洋, 等. 位置/电流两环结构位置伺服系统的跟随性能[J]. 电工技术学报, 2009(10): 40-46.