电磁调速水泵机组起动过程的数值模拟

于永海 徐 辉
(河海大学水利水电工程学院)

摘 要 根据电磁调速电动机驱动的水泵机组起动过程中的力矩平衡方程,得到水泵转速的变化率与水泵转速和励磁电流的函数关系式,据此进行数值模拟。当给定一个起动过程中水泵转速随起动时间的变化规律,就可得出对应的该水泵机组起动过程中电磁调速电动机励磁电流控制的规律,并在一个实际的计算机监督控制系统中进行了验证,其转速的变化基本符合数值模拟时设定的转速变化规律。研究方法对其它异步电动机拖动的调速设备的控制软件开发提供了有益的参考,具有一定的实用价值。

关键词 数值模拟 电磁调速 电动机 水泵

1 引言

在泵站工程中,可以通过调节水泵机组转速来适应运行工况的变化。调速控制是泵站节能和优化运行的有效途径[1,2]。对于由电磁调速电动机驱动的水泵机组,可以组成以‘模拟调节器+监督计算机’为结构的计算机监督系统(SCC)[3],实现机组的实时调速及优化运行。

水泵机组起动过程中要求加速平滑,减小对水泵的冲击 在满足起动转矩要求的前提下,尽可能减小起动电流。由电磁调速电动机驱动的水泵机组的起动特性良好与否是由调速电动机励磁电流的控制规律决定的。因此有必要探讨励磁电流的控制规律,为计算机监督系统中控制软件的开发提供依据。然而,单纯依靠现场调试,经验至关重要,若缺乏经验,极易造成事故,且调试过程历时较长。本文欲通过数值模拟,来确定水泵机组起动过程中励磁电流的控制规律,这样,不仅可以大大减小现场调试的盲目性,避免事故的发生,而且能够在比较短的时间内结合现场调试,较精确地确定控制软件中的控制参数。

2 电磁调速起动过程的数值模拟

2.1 水泵机组起动过程中力矩平衡方程式

水泵机组传动系统由电磁调速电动机(由鼠笼式异步电动机与电磁离合器组成,其中电磁离合器由电枢和磁极组成)、传动设备和水泵组成,如图1所示。

传动系统运动方程:

$$M_{inc} = J\beta \tag{1}$$

$$M_{inc} = M_{机} - (M_{机摩} + M_{机损}) - M'_{泵负} \tag{2}$$

$$J = \frac{(GD^2)_{总}}{4g} \tag{3}$$

$$\beta = \frac{d\omega_M}{dt} = \frac{\pi}{30}\frac{dn_M}{dt} \tag{4}$$

式中,M_{inc} 为电机从动轴上的加速力矩(N·m);$M_{机}$、$M_{机摩}$ 和 $M_{机损}$ 分别为电磁离合器的转矩、摩擦力矩和损耗力矩(N·m);$M'_{泵负}$ 为折算到电机从动轴上的水泵负载转矩(N·m);J 为电机从动轴的转动惯量(kg·m²);$(GD^2)_{总}$ 为电机从动轴上的总飞轮惯量(N·m²);g 为重力加速度(m/s²);β、ω_M 和 n_M 分别为电机从动轴的角加速度(rad/s²)、角速度(rad/s)和转速(r/min)。

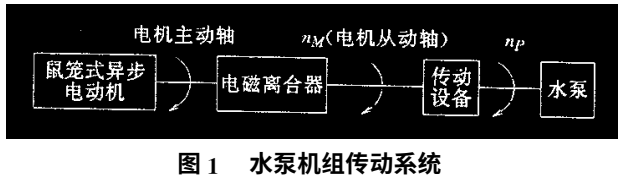


图1 水泵机组传动系统

(1)$(GD^2)_{总}$

根据动能守恒定理,有

$$(GD^2)_{总} = (GD^2)_{机} + (GD^2)_{泵}/i^2 \tag{5}$$

式中,$(GD^2)_{机}$、$(GD^2)_{泵}$ 分别为电机离合器磁极和水泵转子的飞轮惯量(N·m²);i 为传动设备的传动比。

(2)$M_{机}$

$$M_{机} = \sqrt{(n_1 - n_M) I_m^4/k} \tag{6}$$

于永海 男,博士生,河海大学水利水电工程学院(江苏省南京市,210098)。

万方数据

式中,n_1 为电枢(与鼠笼式异步电动机同轴联结,此轴即为电机主动轴)转速(r/min);k 为与电磁离合器结构类型有关的系数;I_m 为励磁电流(A)。

(3) $M_{机摩}$

$$M_{机摩} = \mu_{机} G_{机} R_{机} S^2 \tag{7}$$

$$S = \frac{n_{P0} - n_P}{n_{P0}} = \frac{n_{M0} - n_M}{n_{M0}} \tag{8}$$

式中,$\mu_{机}$ 为电机从动轴承摩擦系数;$G_{机}$ 为磁极转子重量(N);$R_{机}$ 为磁极转子转动半径(m);S 为转差率;n_P 为水泵轴转速(r/min);n_{P0} 和 n_{M0} 分别为水泵机组起动过程结束时的水泵转速和电机从动轴转速(r/min)。

(4) $M_{机损}$

一般认为电磁离合器转矩无损失。

(5) $M'_{泵负}$

根据功率守恒原理,有

$$\eta_{in} = \frac{P_{泵负}}{P_{机负}} \tag{9}$$

$$P_{泵负} = \frac{\pi}{30} \cdot n_P \cdot M_{泵负} \tag{10}$$

$$P_{机负} = \frac{\pi}{30} \cdot n_M \cdot M'_{泵负} \tag{11}$$

$$i = \frac{n_M}{n_P} \tag{12}$$

由式(9) ~ (12) 得到:

$$M'_{泵负} = \frac{M_{泵负}}{\eta_{in} i} \tag{13}$$

式(9) ~ (13) 中,η_{in} 为传动设备传动效率;$P_{泵负}$ 为水泵轴功率(W);$P_{机负}$ 为电机输出功率(W);$M_{泵负}$ 为水泵轴负载力矩(N·m)。

式(13) 中,水泵轴负载力矩 $M_{泵负}$ 由水泵水力矩 M_W 和水泵摩擦力矩 $M_{泵摩}$ 组成,即,

$$M_{泵负} = M_W + M_{泵摩} \tag{14}$$

$$M_W = 9\,545.2 \times \frac{n_P}{n_{Pe}} \cdot \frac{P_{泵e}}{n_{Pe}} \tag{15}$$

$$M_{泵摩} = \mu_{泵} G_{泵} R_{泵} S^2 \tag{16}$$

式中,$P_{泵e}$ 和 n_{Pe} 分别为水泵额定轴功率(kW) 和额定转速(r/min);$\mu_{泵}$、$G_{泵}$ 和 $R_{泵}$ 分别为水泵轴承摩擦系数、水泵转子重量(N) 和水泵转子转动半径(m);转差率 S 的定义见式(8)。

从水泵机组起动过程中力矩平衡方程式(1) 及式(2) ~ (16),可知水泵机组起动过程中的水泵转速随时间的变化率 dn_P/dt 是水泵转速 n_P 和调速电机励磁电流 I_m 的函数 $f(n_P, I_m)$。对于型号确定的水泵机组,该函数是确定的。即,

$$\frac{dn_P}{dt} = f(n_P, I_m) \tag{17}$$

2.2　励磁电流控制规律的确定

根据水泵机组起动过程的要求,可以设定起动历时、起动过程水泵终止转速和水泵转速在起动历时内随时间的变化规律,从而可得起动历时内任一时刻的水泵转速 n_P 和水泵转速变化率 dn_P/dt,由式(17) 可求出该时刻的电磁调速电动机的励磁电流大小 I_m,从而得到在起动历时内励磁电流的控制规律。

3　实例

3.1　泵站基本资料

某轴流泵站是一座单机组小型泵站,泵站主要机电设备有:32ZLB-125 型半调节立式轴流泵,JZT_y91-4L 型电磁调速电动机和三角皮带传动设备。电机额定功率 55 kW,三角皮带传动比为 2.76。该泵站由计算机监督系统实现实时调速优化运行。

3.2　数值模拟

根据该泵站水泵机组的基本资料,式(17) 中函数 $f(n_P, I_m)$ 的具体表达式如下:

$$f(n_P, I_m) = 0.776 I_m^2 \sqrt{1\,480 - 2.76 n_P} - 1.95 \times 10^{-4} \times (350 - n_P)^2 - 1.853 \times 10^{-4} \times n_P^2 - 4.59 \tag{18}$$

设水泵机组起动过程历时 10 s,水泵终止转速为 350 r/min,且水泵转速 n_P 随时间的变化规律为线性关系,见图 2。由图 2 可得到 10 s 钟内任一时刻的水泵转速 n_P 和水泵转速变化率 dn_P/dt,由式(17) 和式(18) 求得对应时刻的励磁电流 I_m,从而得到励磁电流控制规律,如图 3 所示。

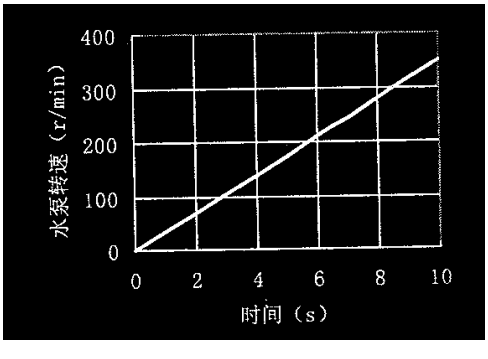


图 2　水泵转速变化规律

在满足水泵机组起动要求的前提下,也可以设定与图 2 不同的水泵转速变化规律,可得到不同于图 3 的励磁电流控制规律。

万方数据

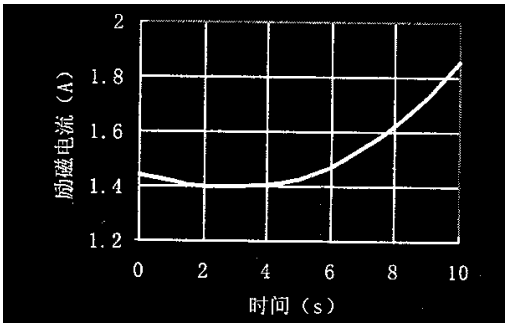


图 3 励磁电流控制规律

3.3 电脑监督系统水泵机组起动过程控制软件

该轴流泵站的计算机监督系统采用‘监督计算机＋模拟调节器’结构。模拟调节器为电磁调速电动机的控制器。系统控制原理见图 4。

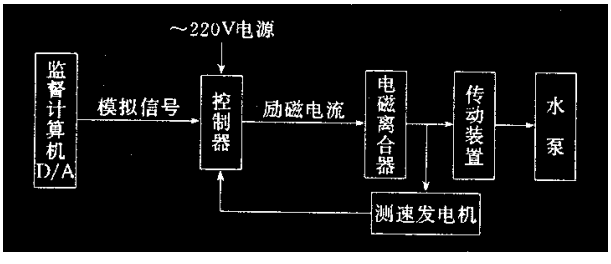


图 4 计算机监督系统控制原理

监督计算机输出控制数字量经 D/A 转换为模拟信号(1～5 V)作为控制器的自动信号，经控制器内的可控整流电路、脉冲移相触发电路等控制供给电磁离合器中励磁绕组的励磁电流，从而带动水泵负载运行。控制器采用单闭环控制系统，速度负反馈信号由测速发电机提供。

开发起动过程控制软件时，如何确定输出控制数字量的给定规律是一个关键问题。在已知励磁电流控制规律的前提下，根据控制器的自动信号与励磁电流的确定关系，可以得到计算机输出控制数字量经 D/A 转换后的输出模拟信号的给定规律，从而可以得到计算机输出控制数字量的给定规律。由此可见，通过数值模拟确定的励磁电流控制规律为计算机输出数字量的给定规律提供了可靠的依据，它是开发软件的基础。

根据数字量给定规律，编制了水泵机组起动过程控制软件，经现场调试和实际运行，水泵转速变化过程基本符合数值模拟时设定的转速变化规律，从而满足了机组起动要求，起动过程平稳。

但需指出的是，机组首次起动和机组运行中断不久又需再次起动，这两种情况数字量给定规律稍有不同。因为后一种情况下，水泵摩擦力矩大为减小，故其数字量给定值要比前一种情况小一些，具体值可通过采用较小的水泵摩擦系数进行数值模拟确定。该泵站控制系统的起动过程控制软件考虑了这两种情况，实际运行的结果表明区别对待这两种情况是必要的，它可以减小对水泵的冲击。图 3 的结果适用于机组首次起动的情况。

4 结论

通过数值模拟，确定电磁调速电动机驱动的水泵机组起动过程中的调速电机励磁电流控制规律，从而可确定监督计算机输出数字量的给定规律，为控制软件的开发提供了可靠的依据，具有实际意义。

本文所采用的研究方法同样适用于采用其它调速设备如变频调速器的水泵机组以及其它电气拖动系统的调速控制问题。数值模拟是较可靠准确地确定控制软件中重要控制参数的一条有效途径。

参 考 文 献

1 丘传忻．泵站节能技术．北京：水利电力出版社，1985：10～50
2 中国电工学会编著．风机水泵交流调速节能技术．北京：机械工业出版社，1990：15～35
3 潘新民．微型计算机控制技术．北京：人民邮电出版社，1985：8～10

NUMERICAL SIMULATION ON THE STARTING PROCESS OF PUMP DRIVEN BY EDDY-CURRENT COUPLING DRIVE

Yu Yonghai, *Xu Hui*
(College of Water conservancy and hydroelectric engineering, Hohai University, Nanjing, 210098)

Abstract: In this paper, by numerical simulation, studied is the determination of eddy－current for the purpose of exciting magnetism of eddy－current coupling drive in the starting process of pump. The results can be applied reliably in the software of the systems controlled by computer. Based on the study, the characteristic of the starting of pump is optimized and promoted.

Key words: Numerical simulation, Eddy-current coupling drive, Pump

万方数据