

基于恒定电流策略的电动机软启动系统研究

常雨芳¹,高翔¹,黄文聪^{1,2},袁佑新²,吴锋¹,陈润¹

(1. 湖北工业大学 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068; 2. 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:针对高压大功率电动机启动电流过大问题,提出了一种基于电力电子电抗器的软启动限流与补偿一体化方法,为了保证启动过程中有足够大的启动转矩,并能将启动电流限制在设定的范围,采用恒定电流策略对软启动控制系统进行了设计。在仿真阶段,针对电动机铭牌数据与仿真参数不一致问题,提出了一种实用的电动机参数离线计算方法,该方法可以方便、准确地获得电动机的仿真参数。最后,仿真和试验结果验证了该软启动系统良好的启动性能。

关键词:高压大功率电动机;软启动;电力电子电抗器;参数计算;恒流策略

中图分类号:TM343 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19398

Research on the Soft Starting System Based on Constant Current Strategy

CHANG Yufang¹, GAO Xiang¹, HUANG Wencong^{1,2}, YUAN Youxin², WU Feng¹, CHEN Run¹

(1. Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China; 2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: There is too large starting current when high-voltage large motors started up direct-on line, it will cause many damages. In order to solve these problems, a soft starting method which adopted power electronic reactor in its main circuit was designed. In order to ensure a sufficient starting torque and limit the starting current to a set range in the starting process, the constant current strategy was designed. In the system simulation stage, a practical motor parameter offline identification method was proposed for the inconsistency between the motor nameplate data and the simulation parameters. The simulation parameters of the motor could be obtained conveniently and accurately in this method. Finally, simulation and experiment results verify that the soft starter system has excellent starting performance.

Key words: high voltage and high power motor; soft starting; power electronic reactor; parameter calculation; constant current strategy

电动机软启动技术是指通过采用降压、调压、变频等技术来减小电动机启动过程中的启动电流,减小电动机启动对电网的影响,保护电动机本体,并使电动机拖动负载等,保障整个系统安全、稳定、高效运行。随着现代工业的快速发展、生产规模的日益扩大,高压大功率电动机的使用越来越广泛,这就使得高压大功率电动机的软启动技术成为了解决工业生产高度规模化带来一系列问题的必然选择,发展软启动技术对提高社会生产能力具有重大的意义^[1]。

降压软启动采用降低电动机定子端电压来减小电动机的启动电流,由于启动转矩会随着电

动机定子端电压减小而降低,所以降压软启动常用于轻载启动,如风机、水泵等。常用的降压方式有:自耦降压软启动、星形—三角形换接启动、串联电阻、串联电抗降压启动等^[2]。降压软启动启动方式简单、成本低、容易实现,但是存在容易产生二次冲击电流、容易受环境温度变化的影响、不能反复启动等缺点,因此主要适用于小功率电动机的软启动或者对启动要求不高的场合。

变频软启动采用电力电子技术控制变频装置的输出电压和频率,当输出电压频率从小到大并逐步调节到功率频率,电动机的端电压也相应由小逐渐调节到额定电压,电动机软启动过程完

基金项目:湖北省自然科学基金(2016CFB512, 014CFB581);绿色工业引领计划(CPYF2017003)

作者简介:常雨芳(1980-),女,博士,副教授,Email:changyf@hubt.edu.cn

成^[3-4]。变频启动方式是启动性能最好的一种方式,但由于其技术复杂、维护成本较高、价格较贵,目前还处在研究阶段。

调压软启动是指通过连续改变加载在电动机两端电压,使电动机两端的端电压从小逐渐增大到电动机的额定电压,启动过程完成。常用的调压软启动主要有:串联晶闸管调压软启动、开关变压器式电动机软启动等^[5-7]。这2种启动方式不存在启动电流的二次冲击,启动电流小、启动过程平滑,启动性能良好。

降压软启动与调压软启动方法在启动过程中降低了电动机的启动电压,启动转矩也随之减小。为了在减小电动机启动电流的同时获得尽可能大的启动转矩,本文提出了一种基于电力电子电抗器的软启动限流与补偿一体化方法,设计了该软启动与补偿一体化装置的拓扑结构,并分析了其工作原理,给出了补偿装置电容量的计算方法。在系统仿真阶段,针对电动机铭牌数据与仿真参数不一致的问题,提出了一种实用的电动机参数离线计算方法,使得系统仿真能够顺利开展。最后,通过仿真及试验验证了基于电力电子电抗器的软启动限流与补偿一体化装置能有效地减小电动机启动过程中的启动电流,软启动过程中电网电压降小,启动转矩脉动小,启动对电网的影响小。

1 启动补偿一体化拓扑结构

基于电力电子电抗器的软启动限流与补偿一体化装置的拓扑结构如图1所示。

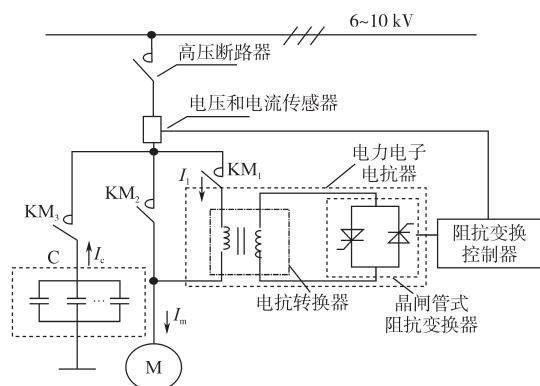


图1 软启动限流与补偿一体化装置拓扑结构图

Fig.1 Topology diagram of the integrated device with soft start current limiting and compensation

当电动机启动时,串联电力电子电抗器一次绕组启动,此时电抗器一次绕组的阻抗最大,电动机端电压最小。阻抗变换控制器采用恒定电流策略,将采集到的电动机启动电流与设定的启

动电流做比较,给触发电路不同的触发信号,触发电路调节触发脉冲作用于晶闸管式阻抗变换器,控制电力电子电抗器二次侧的电流,使得一次侧绕组的阻抗由最大值逐渐调整为最小,电动机的端电压由小平滑增大到额定电压,软启动完成。为了减小电动机从电网吸取的无功功率,降低电网压降,减小启动对电网的影响,启动过程中,由电容器组C提供电动机启动过程所需要的无功功率。此外,限流与补偿一体化软启动装置在满足负载启动对电动机启动转矩的要求下,通过调整恒流控制策略的参数,可以将启动电流限制在额定电流的2倍以内,成功解决了启动电流与启动转矩两难全的问题,并且由于电力电子器件在电抗器的二次绕组侧,不存在高次谐波对电网造成危害。

启动过程中,电容器组C的无功功率补偿量 Q 可以采用实测法进行计算:

$$Q = P_1 (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (1)$$

式中: P_1 为电动机的额定功率,kW; φ_1 为无功功率补偿前电动机的功率因数角; φ_2 为无功功率补偿后电动机的功率因数角。

此外,为了提高无功功率的动态补偿效果,电容器组C可以采用不等容分组方式,通过不同容量的电容器构成多种组合,减小无功补偿级差,让无功补偿更精准。

2 恒流电流策略设计

在电动机启动过程中,通过增加闭环电流检测环节,不仅可以实现过电流保护,而且可以实现启动电流的闭环控制。恒流控制策略的系统结构图如图2所示。

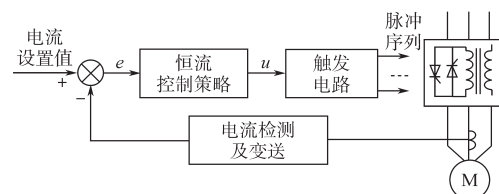


图2 恒流控制策略的系统结构图

Fig.2 System structure diagram of constant current control strategy

图2所示的恒流控制系统是一种闭环控制系统,受负载和电网变化的影响较小,启动的稳定性得到大幅提高。启动电流限制可以被设置为从额定电流 I_N 到任意倍的额定电流 kI_N 。通常直接启动的启动电流为5~8倍的额定电流,所以 k 的取值应该小于这个范围。恒流控制的目的就

是让启动电流控制在 kI_N 附近。恒流控制通过调节误差的比例与误差积分环节的系数,设置启动电流的上限,在电网容量有限的条件下,可以实现电动机以最小的启动电流快速启动,特别适合于恒转矩负载。

3 系统仿真

基于电力电子电抗器的调压与补偿一体化装置不仅适合于启动中小功率的电动机,还可以用于高压大功率电动机的软启动。这里选择 10 kV/19 000 kW 的高压大功率电动机作为启动的对象,电动机空载启动。

搭建好仿真模型后,需要对电动机的参数进行设置,可以发现电动机的仿真参数与铭牌参数不一致,这给系统仿真带来了难题,为了解决这个问题,提出了一种简便的电动机参数计算方法。该方法可以较准确地计算出定子电阻、转子电阻、定子电感、转子电感及互感等参数。

定子绕组电阻 r_1 为

$$r_1 = \frac{0.95U_{1N}s_N}{\sqrt{3}I_{1N}} \quad (2)$$

式中: U_{1N} 为定子额定线电压; I_{1N} 为定子额定线电流; s_N 为电动机额定转差率。

转子绕组电阻 r_2 可为

$$r_2 = \frac{s_N U_{2N}}{\sqrt{3}I_{2N}} \quad (3)$$

式中: U_{2N} 为转子额定线电压; I_{2N} 为转子额定线电流。

定子总电抗 x 为

$$x = \sqrt{\left(\frac{U_1^2 p}{210k_m T_N} - r_1^2 - r_2^2\right)} \quad (4)$$

式中: U_1 为定子相电压; p 为极对数; T_N 为电动机额定转矩; k_m 为电动机过载能力。

定子电抗 x_1 与转子电抗折算值 x_2' 近似相等:

$$x_1 \approx x_2' \approx 0.5x \quad (5)$$

所以定子电感 $L_{1\sigma}$ 和转子电感折算值 $L_{2\sigma}'$ 为

$$L_{1\sigma} \approx L_{2\sigma}' = \frac{x}{4\pi f} \quad (6)$$

励磁等效电抗 x_m 为

$$x_m = \frac{0.95U_{1N}}{\sqrt{3}I_{10}} \quad (7)$$

式中: I_{10} 为定子空载电流。

定子空载电流可以通过下式来进行计算:

$$I_{10} = I_{1N}(\sin \varphi_{1N} - \cos \varphi_{1N} \tan \varphi_{2N}) \quad (8)$$

其中

$$\tan \varphi_{2N} = \frac{x_1 + x_2'}{r_1 + \frac{r_2'}{s_N}}$$

$$r_2' = r_2 K^2 \quad K = \frac{0.95U_{1N}}{U_{2N}}$$

式中: r_2' 为每相转子绕组电阻折算值; K 为绕线电动机定子、转子绕组之间的变比。

互感(励磁等效电感) L_m 为

$$L_m = \frac{x_m}{2\pi f} \quad (9)$$

经过计算,10 kV/19 000 kW 电动机的参数设置为:额定电流 $I_{1N}=1\,250\text{ A}$,额定转速 $n_N=1\,485\text{ r/min}$,极对数 $p=2$,定子电阻 $r_1=0.124\ \Omega$,转子电阻 $r_2=0.123\ \Omega$,定子电感 $L_{1\sigma}=1.8\times 10^{-3}\text{ H}$,转子电感折算值 $L_{2\sigma}'=1.8\times 10^{-3}\text{ H}$,互感 $L_m=0.112\text{ H}$,转动惯量 $J=703.87\text{ kg}\cdot\text{m}^2$

当启动电流最大值设置为 $3I_N$,启动电流和启动转矩的仿真结果如图3和图4所示。

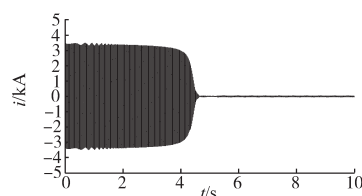


图3 当 $I=3I_N$ 时启动电流随时间变化曲线

Fig.3 Curve of starting current versus time for $I=3I_N$

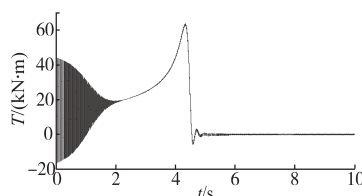


图4 当 $I=3I_N$ 时启动转矩随时间变化曲线

Fig.4 Curve of starting torque versus time for $I=3I_N$

由图3可见,当启动电流最大值设置为3倍的额定电流时,在电动机启动过程中,启动电流恒定在3倍额定电流附近约3 700 A。

由图4可见,启动过程中,电动机可以获得足够的启动转矩,快速完成启动,启动过程中存在启动转矩的脉动。

当启动电流的最大值设置为 $2I_N$,启动电流和启动转矩的仿真结果如图5和图6所示。

由图5和图6可见,当启动电流的最大值设置为2倍的额定电流时,启动过程中,启动电流最大值为2 500 A,启动转矩的脉动减小。

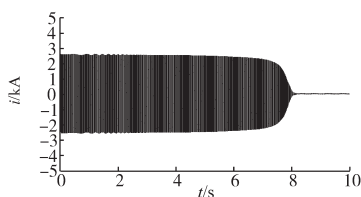


图5 当 $I=2I_N$ 时启动电流随时间变化曲线

Fig.5 Curve of starting current versus time for $I=2I_N$

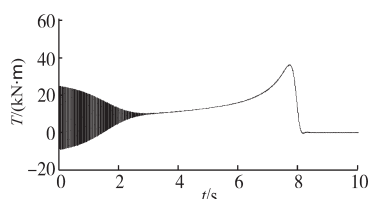


图6 当 $I=2I_N$ 时启动转矩随时间变化曲线

Fig.6 Curve of Starting torque versus time for $I=2I_N$

仿真过程中,电动机空载启动。在工程实际中,为了满足电动机的各种带载启动要求,可以根据电动机带载启动所需要的最小转矩计算出电动机的启动电压,从而知道电力电子电抗器的初始分压值,当电力电子电抗器承受的电压由初始分压值逐步调节至零时,电动机的端电压逐步上升至电网电压,启动过程完成,电动机全压运行。

4 系统试验

基于电力电子电抗器的调压补偿一体化装置已经成功地研制出来,并应用于某钢厂 10 kV/19 000 kW 的高压大功率电机的软启动中。系统装置主要由 7 部分组成:控制器与接口电路;触发电路;电压传感器与霍尔电流传感器;电力电子电抗器(10 kV/21 000 kW);3 对反并联晶闸管;给控制器、接口电路提供工作的电源;接触器及其常开开关。

在 2 倍额定电流设定情况下,启动电流的曲线如图 7 所示。

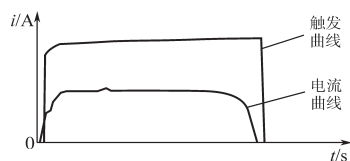


图7 19 000 kW 高压电动机软启动时的电流波形

Fig.7 Current waveforms of 19 000 kW high voltage motor during soft start

由图 7 可见,启动过程中启动电流约为 2 倍额定电流。我们分别记录了投入电容器组和不投入电容器组的试验,记录数据如表 1 所示。

表 1 试验结果

Tab.1 Experiment results

项目	i_1 /A	i_m /A	电网压降/%	启动时间/s
不投入电容启动	2 230	2 420	11.8	46
补偿电容启动	2 100	2 370	4.7	53

表 1 中, i_1 为电网侧启动电流, i_m 为电动机侧启动电流。采用限流与补偿一体化装置,电网电压由 10 kV 减小为 9.53 kV,电网压降由不投入电容器时的 11.8% 下降至 4.7%,电网压降明显减小,解决了直接启动对电网其他设备正常运行的影响。此外,由于投入了电容器组,从电网侧吸收的电流 i_1 明显小于电动机侧的启动电流 i_m ,电动机启动对电网的影响减小,效果显著。

5 结论

本文提出了一种基于电力电子电抗器的限流与补偿一体化软启动方法,设计并研发了该一体化装置,该一体化装置采用恒定电流控制策略,将启动过程中的启动电流限制在 2 倍的额定电流,满足恒转矩负载的启动转矩要求的同时,实现电动机快速启动,补偿装置的投入使用可以进一步减小电动机启动对于电网的影响,使同电网的其它设备能够正常工作。目前,基于电力电子电抗器的调压与补偿一体化装置已经成功应用于风机、水泵、窑、磨等设备中,具有启动电流小、对电网影响小等优点,具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 王雪帆,朱罡. 大型电动机软启动技术分类方法及发展综述[J]. 电气应用,2012,31(16):68-73.
- [2] 甘世红,褚建新,顾伟,等. 高压异步电动机软启动方法综述[J]. 电气传动,2005,35(10):3-6,39.
- [3] 童军,刘斌,乔江,等. 一种有效的异步电动机软启动方法及应用[J]. 微特电机,2016,44(8):55-58.
- [4] 马文明,宫文展. 基于离散变频的异步电动机软启动器设计[J]. 中国造纸,2016,35(12):49-54.
- [5] 乔理峰,顾伟,褚建新. 基于开关变压器的中压电动机软启动器的研究[J]. 电气传动,2007,37(4):9-11.
- [6] 刘利,王栋,王民,等. 异步电动机软启动器控制方式及仿真研究[J]. 电机与控制应用,2014,41(5):50-54.
- [7] Deraz S A, Azazi H Z. Current Limiting Soft Starter for Three Phase Induction Motor Drive System Using PWM AC Chopper [J]. IET Power Electronics, 2017, 10(11): 1298-1306.

收稿日期:2018-08-12

修改稿日期:2018-11-02