

Characteristics and Principles of Large Motor Soft Starting

Jiping Zuo¹, Xiaolong She¹, Chongbo Li², Guoyun Ning²

¹Shaanxi Longmen Iron & Steel Co., Ltd., Hancheng Shaanxi

²Dayu Electrical Technology Co., Ltd., Xiaogan Hubei

Email: sxl6690@163.com

Received: Aug. 11th, 2015; accepted: Aug. 28th, 2015; published: Sep. 1st, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In the industrial field, more and more high-voltage AC motor has been applied in high-power heavy equipment. But large AC motor will produce a large number of serious problems when starting directly. There will be a sudden sharp decline in the grid, which causes that other electrical equipment in the power system can't operate normally. This paper analyzes the principles and performance of step-down soft start and variable frequency soft start, and shows that variable frequency soft start is the best way to solve the large motor soft starting, with small starting current, big starting torque and starting no impact on the smooth.

Keywords

Large Motor, Characteristics of Starting, Variable Frequency Soft Start, Step-Down Soft Start

浅析大型电机起动特性与起动原理

左继平¹, 余小龙¹, 李崇波², 宁国云²

¹陕西龙门钢铁有限责任公司, 陕西 韩城

²大禹电气科技股份有限公司, 湖北 孝感

Email: sxl6690@163.com

收稿日期: 2015年8月11日; 录用日期: 2015年8月28日; 发布日期: 2015年9月1日

摘要

在工业领域,大功率重载设备大部分都采用大型高压交流电动机进行拖动。但是大型电动机在直接启动时会产生大量重问题,启动冲击电流大,会导致电网电压急剧下降,影响同电网内其他设备正常运行。本文分析了降压软启动和变频软启动的原理和特点,并指出变频软启动是当前解决大功率电机软启动的最佳途径;启动电流小,启动转矩大,启动平滑无冲击。

关键词

大型电机,启动特性,变频软启动,降压软启动

1. 引言

我国工业化的快速发展促进了电动机制造与应用向高压大功率方向发展,主要应用领域集中在冶金、石化、水泥、化工行业。在冶金行业,高炉鼓风机的拖动电机功率可以达到 19,000 kW~60,000 kW,在石化行业,拖动气体压缩机的电机功率大多在 1000 kW~30,000 kW 之间[1]。

高压大功率电机直接启动电流很大,在配备电力变压器时要求充分的储备容量,给电网带来了极大的电能浪费。过大的启动电流还会对电网造成冲击,影响同一电网上其他设备的正常运行,可能使欠压保护动作,造成跳闸事故。因此大部分高压大功率电机都配套了软启动装置,以限制启动电流,降低对电网的冲击[2]。

高压大功率电动机的软启动装置可分为降压软启动和变频软启动两大类[3]。本文从异步电机运行原理的角度,对异步电机两种软启动方式进行分析。

2. 异步电动机稳态数学模型

从工作原理上,异步电机和变压器相似,均满足电磁感应定律,他们的等效电路如图 1 所示。

异步电机的定转子电路与变压器一二次绕组差别在于,转子电路的频率 f_2 ,转子电路自成回路,对外输出电压为零。

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_{1\sigma} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s} (R_2 + jX_{2s}) = \dot{I}_{2s} Z_{2s} \quad (2)$$

\dot{U}_1 为电源电压; R_1 和 $X_{1\sigma}$ 为定子电阻和定子漏抗; R_2 和 $X_{2\sigma}$ 为转子电阻和转子漏抗; Z_{2s} 为转子绕组在转差率 s 时的漏阻抗;

通常为了方便计算与分析,进行相应的频率折算和绕组折算,得到异步电机的 Γ 型等效电路,如图 2 所示。

由等效电路可以推导出转子电流和转矩的表达式[4]:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} \quad (3)$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{3n_p U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2 \right]} \quad (4)$$

异步电机带额定负载达到稳定时，转差率 $s = 1\% \sim 9\%$ ，而在起动时 $s = 1$ ，由式(3)可以看到，起动电流明显要大于稳态运行电流。

3. 异步电动机的起动特性

当异步电机直接投入电网时，起动 $t=0$ 时刻， $n=0$ ， $s=1$ ，根据简化等效电路推导出的转子电流和电磁转矩表达式可知：

$$I_{2st} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} = \frac{U_1}{Z_k} \quad (5)$$

$$T_{st} = \frac{3n_p U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2]} \quad (6)$$

一般鼠笼异步电机短路阻抗 $Z_k^* = 0.14 \sim 0.25$ ，故起动电流倍数约为 $K_I = \frac{1}{Z_k^*} = 4 \sim 7$ 倍[4]。从异步电机工作原理上也可以这么理解，当电机起动时，电机转子初始转速为 0，电机转子相对于定子旋转磁场的切割速度最大，因此转子绕组中产生的感应电动势 e_2 最大，由于电机转子绕组是短接的，因此在转子绕组中产生很大的电流，根据变压器效应，在定子绕组中也会产生很大的电流与转子电流相平衡。由式(6)可以看出，电磁转矩与电压的平方成正比关系，可见当电压下降时，电磁转矩成电压平方比下降。

4. 常见软起动方式分析

高压大功率电机软起动可分为降压软起动和变频软起动两大类，降压软起动包括水电阻软起动，固态软起动，磁控电抗器软起动，开关变压器软起动等。降压软起动的本质是在起动过程中直接或间接的方式改变电机定子端电压。当高压电机直接带负载起动，电机将按照自身固有的机械特性曲线起动。在

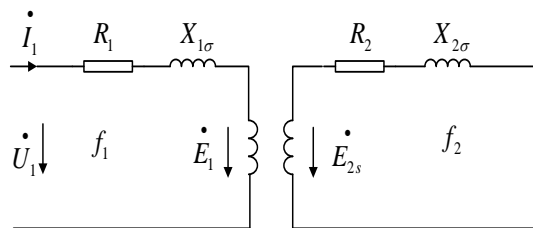


Figure 1. The steady-state model of motor
图 1. 异步电机稳态模型

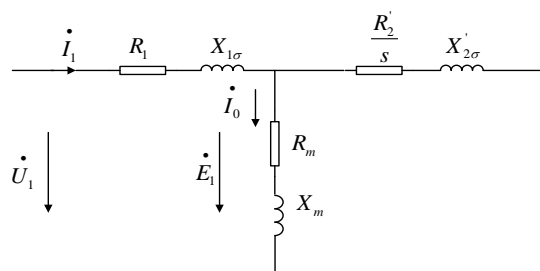


Figure 2. The Γ equivalent circuit of motor
图 2. 异步电机 Γ 型等效电路

起动过程中，逐渐升高定子端电压至额定电压。

当转差率 $s = 0$ 时，旋转磁场相对转子静止，转矩 $T_{em} = 0$ 。根据转矩 T_{em} 表达式，当转差率 s 由零开始增大时，在初始阶段， $\frac{R'_2}{s}$ 要远大于 R_1 ， $X_{1\sigma}$ ， $X_{2\sigma}$ ，随着 s 增大，转矩 T_{em} 近似成正比增大。当 s 较大时， $\frac{R'_2}{s}$ 相对变小，并且由于 $(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})$ 要远大于 $(R_1 + R'_2)$ ， s 继续增大， T_{em} 增大变缓慢，并且达到一个最大值。随 s 增大， T_{em} 反而减小，一直到 $s = 1$ 、 $n = 0$ ，电磁转矩下降至起动转矩 T_{st} 。

根据电机转矩表达式，可以得到固有机械特性和调压机械特性曲线图，如图 3 和图 4 所示。

从调压特性图可以看到， $U_1 > U_2 > U_3$ ，对应的起动转矩 $T_{st1} > T_{st2} > T_{st3}$ ，在降压式软起动过程中，逐步升高电机端电压，实际运行的机械特性按虚线箭头方向移动，最终回到额定运行状态。从电机转矩的表达式也不难看到，异步电机起动转矩正比于定子电压的平方，起动电流正比于定子电压，降低供电电压起动，可以降低起动电流，但是也会使起动转矩大幅下降。采用降压式软起动，可以使电机起动电流值降至额定电流 3 倍以下，但是起动转矩下降速度更快。固态软起动装置为了解决起动转矩偏小问题，往往采用双斜坡起动、转矩控制起动、转矩加突跳控制起动等方式，这些方法能提供的起动转矩增量有限，起动时间也偏长，也存在由于自身拓扑决定的谐波电压过高问题，损伤电机污染电网[2]。

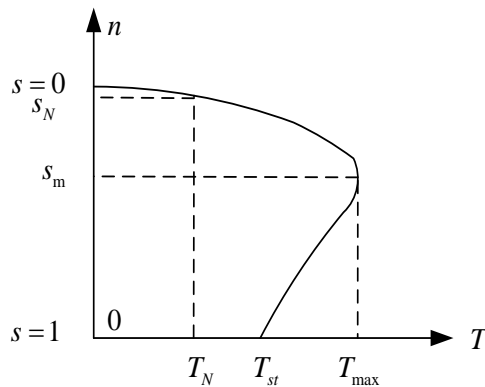


Figure 3. The inherent mechanical properties of motor

图 3. 异步电机固有机械特性

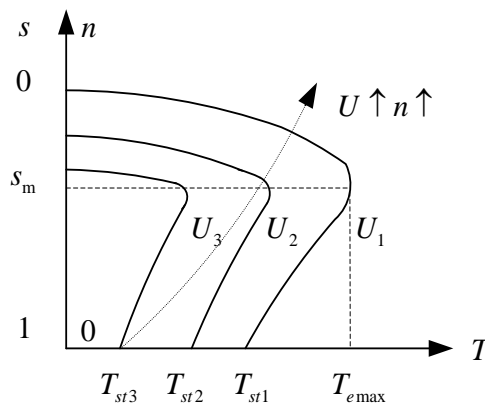


Figure 4. The step-down mechanical properties of motor

图 4. 异步电机直接起动调压机械特性

变频软启动的主要特点在于其技术性能的绝对优势, 启动电流可控制在额定的 100% 以内, 对电网的最小短路容量没有要求, 只要电网能够保障电动机正常运行, 那么启动就不存在问题。启动转矩可以做到与电流成正比例线性控制, 不像降压型软启动, 转矩与电压的平方成比例下降。

从电磁转矩的表达式可以看到, 在同样的定子端电压 U_1 条件下, 如果定子电压频率 $f_1 < f_2$, 启动转矩 $T_{st1} > T_{st2}$ 。异步电机满足以下关系式:

$$U_1 \approx E_1 = 4.4 \times f_1 \times N_s \times K_{N_s} \times \Phi_m \quad (7)$$

U_1 为定子端电压; E_1 为定子气隙感应电动势; f_1 为定子电压频率; N_s 为定子绕组匝数; K_{N_s} 为定子基波绕组系数; Φ_m 为气隙磁通量。

变频软启动一般采用恒压频比方式 ($U_1/f_1 = \text{const}$) 进行控制, 保证气隙磁通 Φ_m 为近似恒定, 在低压段, 由于定子电阻压降不可忽略, 多采取定子电压补偿方式, 抵消定子电阻压降来保证气隙磁通 Φ_m 为恒定值。图 5 是恒压频比控制模式下变频软起电机机械特性, 虚线部分是低压段补偿定子压降后的机械特性。随着定子端电压的升高, 定子电压频率也随之升高, $f_1 > f_2 > f_3$ 。在低频段, 对定子电压进行补偿, 改善低频特性。逐步升高电机端电压, 实际运行的机械特性按虚线箭头方向移动, 电机保持在高磁通大转矩的状态运行。对比降压型软启动的机械特性曲线, 可以看到, 变频软起在同样保证了启动电流较小的条件下, 电磁转矩明显要大于降压软起。

5. 应用实例

陕西龙门钢铁有限责任公司高炉鼓风机项目, 电机额定功率 27,000 kW, 额定电压 10 kV, 额定电流 1762 A, 额定转速 1500 r/min, 转动惯量 9250 Kg·m²。电机负载是陕鼓动力股份有限公司生产的 AV71-16 轴流压缩机, 采用某公司生产的 GBRQ-MV10M5 型高压变频软启动装置进行启动。该型号高压变频软启动装置额定电压 10 kV, 额定容量 10,500 kVA, 额定电流 606 A。该轴流压缩机的启动转矩曲线如图 6 所示, 根据负载启动转矩及转动惯量, 可计算出所需要启动功率为 6916 KW。

实际带负载风机启动输出电流电压波形如图 7 所示, 上方黄颜色波形为输出电压波形, 可见随着频率和电机转速的增加输出电压逐渐升高到额定电压, 下方红颜色为输出电流波形, 最大电流为 399 A, 输出功率为 6786 KW, 实际输出功率略小于计算所需的启动功率。

为了防止风机喘振, 设置了三个跳频点, 从图中可以看到, 调频时电流有轻微的波动, 整个启动过程平滑无冲击, 启动完成后旁路切换到工频电网, 过渡平稳, 变频软起效果非常理想。

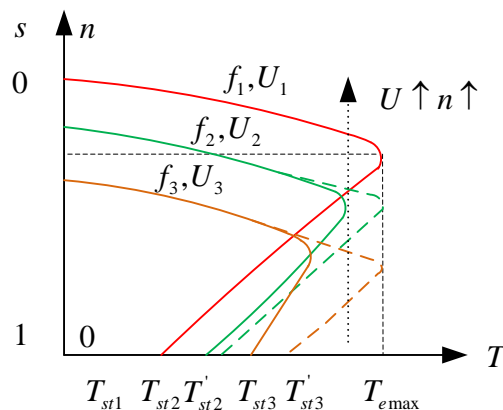


Figure 5. The V/F mechanical properties of motor
图 5. 异步电机压频比控制机械特性

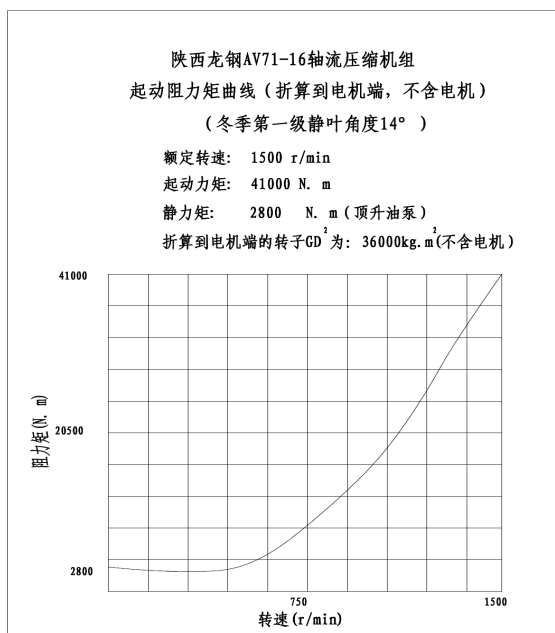


Figure 6. The starting torque curve of load

图 6. 负载起动转矩曲线

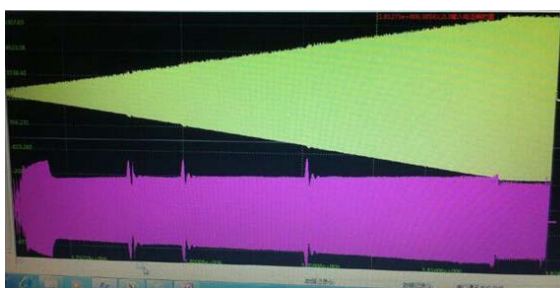


Figure 7. The starting current and voltage wave

图 7. 起动电流电压波形

6. 结束语

本文从电机运行原理角度上对比分析了大功率电机起动特性和起动原理。通过应用实例可以看到，变频软起性能优异，起动电流小，起动转矩大，是解决大型电机软起动的最佳途径。

参考文献 (References)

- [1] 王仪田, 孙鸿声, 郑秀萍, 王冬, 许靖 (2009) 国产 4000~5850 m³ 大型高炉鼓风机技术发展与进步. 2010 年全国炼铁生产学术会议暨炼铁学术年会文集(下), 北京, 2010 年 5 月 26-28 日。
- [2] 宁国云, 袁佑新, 黄声华, 朱罡, 郭涛 (2011) 大型电动机软启动装置性能分析与比较. *电气传动*, **8**, 52-57.
- [3] 肖向峰, 等 (2012) 2011~2012 年中国高压大功率软启动产业发展报告. 中国电器工业协会, 北京。
- [4] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前 (2010) 电机学. 第三版, 华中科技大学出版社, 武汉, 240-241.