

永磁耦合调速电机实现火电厂给煤机低电压穿越^{*}

王煜伟¹, 张强², 丁永三¹, 邢云², 孙京京³

(1. 国家能源集团谏壁发电厂, 江苏镇江 212000;

2. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏镇江 212013;

3. 国家电网上海金山供电公司, 上海 200540)

摘要: 电网电压短暂跌落往往会触发火电厂给煤机的变频器保护动作, 从而影响正常的电力生产。提出了一种采用永磁耦合调速电机构建给煤机的电动系统, 依靠电机性能解决低电压穿越问题的方法。分析了永磁耦合调速电机实现低电压穿越性能的工作原理, 设计了双闭环控制系统。建立 5.5 kW 给煤机电动系统试验平台进行试验, 试验结果表明: 永磁耦合调速电机及其控制系统的快速性和准确性优良, 在电网发生短暂电压跌落时, 能够维持给煤机正常工作, 具有低电压穿越能力。

关键词: 永磁耦合调速电机; 给煤机; 低电压穿越; 电机控制

中图分类号: TM 621.7 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0088-05

doi: 10.12177/emca.2020.049

LVRT for Coal Feeder of Thermal Power Plant Realized by Permanent Magnet Coupling Speed Regulating Motor^{*}

WANG Yuwei¹, ZHANG Qiang², DING Yongsan¹, XING Yun², SUN Jingjing³

(1. CHN Energy Jianbi Power Plant, Zhenjiang 212000, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. State Grid Shanghai Jinshan Power Supply Company, Shanghai 200540, China)

Abstract: Power grid voltage sag often causes protection action of the coal feeder frequency converter in the thermal power plant, which affects the normal power production. A novel means of using the permanent magnet coupling speed regulating motor in coal feeder is proposed to realize low voltage ride-through (LVRT) by the motor's properties. The LVRT operating principle of the permanent magnet coupling speed regulating motor is analyzed. The double-closed-loop control system is designed. A 5.5 kW electrical drive system experimental platform of the coal feeder is built. The experimental results show that the proposed motor and its control system have good rapidity and accuracy, and when voltage sag occurs in the power grid, the coal feeder can work normally and have LVRT ability.

Key words: permanent magnet coupling speed regulating motor; coal feeder; low voltage ride-through (LVRT); motor control

0 引言

目前发电厂火电机组给煤机基本采用变频驱

动方式运行, 而变频器对供电电压的波动极为敏感, 存在类似于风电机组低电压穿越(LVRT)的问题^[1-2], 当电网发生短暂电压跌落时, 变频器往

收稿日期: 2020-02-29; 收到修改稿日期: 2020-04-29

^{*} 基金项目: 国家能源集团科技项目(JSKJ-2019-02)

作者简介: 王煜伟(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为火电厂运行优化及节能管理、科技研发。

张强(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为功率变换技术。

丁永三(1966—), 男, 工程师, 研究方向为火电厂检修技改、科技研发。

往会触发保护而停机,影响火电机组正常工作^[3]。

为了解决火电厂给煤机变频器 LVRT 问题,文献[4]采用静止同步补偿器(STATCOM)补偿电源电压短暂跌落时变频器进线电压;文献[5]采用动态电压恢复器(DVR)进行补偿;文献[6-7]采用“不控整流桥+直流蓄电池”的结构,当电网电压短暂跌落时,通过蓄电池放电来对变频器的直流母线电压进行补偿;文献[8-9]采用“不控整流桥+升压电路”的结构,通过控制升压电路的输出来稳定变频器的直流母线电压。以上方案均通过增设外部设备,补偿变频器交流侧或直流侧电压的短暂跌落,来满足 LVRT 技术规范的要求,不仅增加了控制系统的复杂性,而且增加了投资和成本。

永磁传动及其控制技术凭借超高的稳定性和可靠性,在调速节能、重载软起、恒转矩控制等工况应用广泛^[10-11]。本文提出一种采用永磁耦合调速电机构建给煤机电动系统的方法,设计了双闭环控制系统,从电机本体及其控制两方面满足了火电机组给煤机的调速要求,也实现了给煤机 LVRT 功能。

1 电机结构及 LVRT 性能工作原理

永磁耦合调速电机系统简图如图 1 所示。主要由通用型三相异步电机和永磁耦合调速器组成。永磁耦合调速器中的永磁转子与三相异步电机的转子通过机械轴相连,永磁耦合调速器的绕组转子轴与负载相连。三相异步电机只提供原动力,不调速,而通过控制器调节永磁耦合调速器的绕组转子中电流,实现平滑调节转速,其工作原理与绕线转子异步电机串级调速相似。

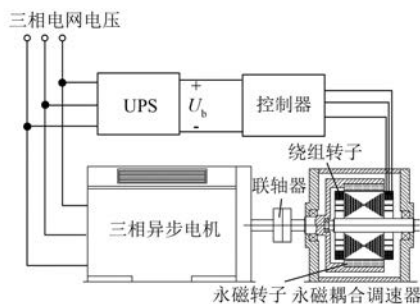


图 1 永磁耦合调速电机系统简图

三相异步电机输出转矩为

$$T = \frac{P}{\Omega} = \frac{\sqrt{3}UI\cos\varphi \cdot \eta}{\Omega} \quad (1)$$

式中: T 为电机输出转矩; P 为电机输出功率; Ω 为角速度; U 为电网线电压; I 为定子电流; $\cos\varphi$ 为功率因数; η 为电机效率。

从式(1)可知,当电网电压 U 短暂跌落时,为了维持其输出转矩 T 与角速度 Ω 近似不变,三相异步电机定子侧电流 I 变大,其转子侧感应出较大感应电流。但是,由于电网电压跌落时间较短且三相异步电机的定子侧无功功率变换器件,三相异步电机自身结构可以承受,不会被烧毁。

永磁耦合调速器的绕组转子相反电动势满足:

$$E_{\varphi_1} = 4.44fN\Phi_1K_{w1} \quad (2)$$

式中: f 为电动势频率; N 为每相串联匝数; Φ_1 为每极平均磁通量; K_{w1} 为绕组因数。

当电网电压跌落时,因为异步电机鼠笼转子转速基本不变,所以永磁转子转速基本不变,则 f 和 Φ_1 不变,而 N 和 K_{w1} 仅与绕组设计有关,也不变,则根据式(2)可以看出绕组转子的反电动势基本不变,绕组转子相感应电流满足:

$$I_{\varphi_1} = \frac{sE_{\varphi_0}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad (3)$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (4)$$

式中: R_2 、 X_2 分别为绕组的电阻、感抗; s 为转差率; n_1 为永磁转子转速; n_2 为绕组转子转速。

已知 n_1 不变,则 s 不变,且 E_{φ_0} 不变, R_2 和 X_2 仅与绕组设计有关,因此绕组转子的感应电流基本不变,由麦克斯韦方程组可知绕组转子所产生感应磁场场强不变,而永磁体所产生旋转磁场场强也不变,则永磁磁场与绕组转子感应磁场间作用力大小基本不变,即产生的转矩大小基本不变。

可见,永磁耦合调速器的输出转矩只与永磁转子和绕组转子之间的转差以及磁场强度有关,与电网电压无关。由于小容量 UPS 的稳压功能,当发生电网电压跌落时,永磁耦合调速器的控制器电源电压 U_b 将不变,控制器正常工作,调节绕组转子中电流不受影响。

综上所述,本文采用的永磁耦合调速电机可

以从电机本体及其控制上既满足给煤机的调速要求,又可以实现给煤机 LVRT 功能。

2 调速工作原理

永磁耦合调速电机从结构上类似于绕线转子异步电动机,本文应用串级调速原理,通过控制器调节绕组转子中电流大小,可以平滑调节转速。

在小功率负载应用场合,通过串级调速装置将转子侧传递来的转差功率回馈给电网的节能效果有限。为了节约成本和简化电路,文中采用不控整流+升压电路+电阻的调速方案,如图 2 所示。

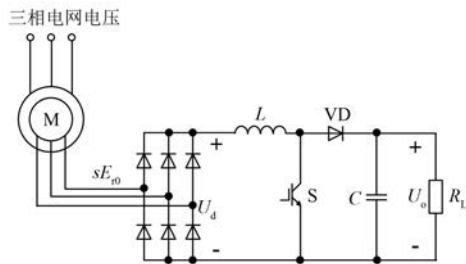


图 2 小功率永磁耦合调速电机串级调速原理图

永磁耦合调速电机的永磁耦合调速器产生的电动势 sE_{r0} 通过三相不控整流桥得到直流电压 U_d , 再通过升压电路传递给电阻 R_L 。通过改变开关管 S 的驱动信号占空比, 就能改变电感 L 的电流 i_L , 从而改变转子绕组电流大小, 达到平滑调速的目的。

为了便于分析问题, 所有器件理想化。 U_d 与 U_o 的关系式为

$$U_d = K_1 s E_{r0} = (1 - D) U_o \quad (5)$$

式中: K_1 为三相桥式电路电压整流系数; D 为开关管 S 的脉宽调制 (PWM) 驱动信号的占空比; s 为转差率。

式(5)可以改写成:

$$s = \frac{1}{K_1} \frac{U_o}{E_{r0}} (1 - D) \quad (6)$$

可见, 改变 D 能实现电机平滑调速。

3 控制系统设计

3.1 双闭环控制系统

为了提高永磁耦合调速电机的调速性能, 采用给煤率和速度双闭环控制。双闭环控制系统原

理图如图 3 所示。图 3 中, r^* 为给煤率给定值; r 为给煤率反馈值, 由载荷和速度计算得到; ARR 为给煤率调节器; ASR 为速度调节器。ARR 的运算结果可作为速度环的给定值 n^* 。最终通过改变开关管 S 的占空比 D 实现给煤率的稳定控制。

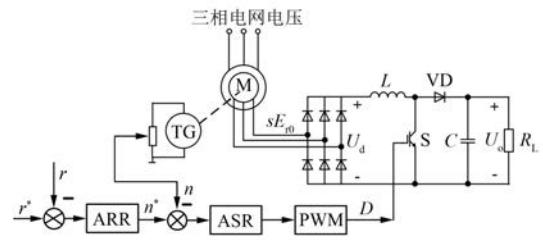


图 3 双闭环控制系统原理图

3.2 调速环节结构图

调速环节结构图如图 4 所示。为了提高快速性, 在 ASR 中采用 PD 调节器。一般用时间常数 T_{if} 的惯性环节表示控制系统中速度检测环节, 用时间常数 T_{PWM} 的惯性环节表示变换器的功率电路, K_{PWM} 为变换器的比例系数, K_{p1} 为 PD 调节器的比例系数, τ_1 为 PD 调节器的时间常数, C_E 为电动势系数, T_l 和 T_m 分别为电磁时间常数和电机时间常数, i_{dl} 为负载电流, 则调速环节的开环传递函数为

$$W_1(s) = \frac{(K_{p1} K_{PWM} / C_E) (\tau_1 s + 1)}{(T_{PWM} s + 1) (T_{if} s + 1) (T_m T_l s^2 + T_m s + 1)} \quad (7)$$

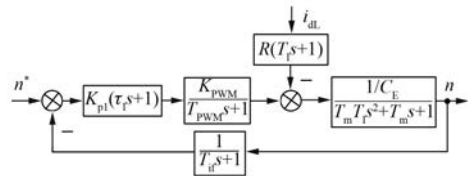


图 4 调速环节结构图

3.3 给煤率调节器 ARR 结构图

给煤率反馈值 $r = \text{载荷} m \times \text{速度} n$ 。给煤率调节器 ARR 结构图如图 5 所示。

在 ARR 中采用 PID 调节器, 其结构简单、鲁棒性和适应性较强。ARR 的传递函数为

$$W_2(s) = K_{p2} \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \tau_2 s \right) \quad (8)$$

式中: K_{p2} 为 PID 调节器的比例系数; T_i 为 PID 调节器的积分常数; τ_2 为 PID 调节器的微分时间常数。

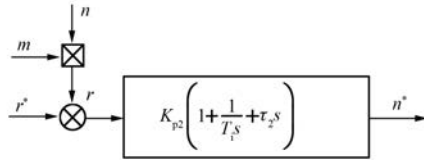


图5 给煤率调节器 ARR 结构图

4 试验验证及分析

采用永磁耦合调速电机样机和控制器样机搭建 5.5 kW 给煤机电动系统试验平台,如图 6 所示,分别验证给煤机在正常电网电压下的调速性能和电网电压短暂跌落时的 LVRT 性能。电网电压额定值为三相交流电压 380 V,电机额定功率 5.5 kW,额定转速 1 400 r/min。控制器的控制参数如表 1 所示。《发电厂、变电站辅机变频器高、低电压穿越技术规范》^[12]规定的 LVRT 具体技术指标要求如表 2 所示。

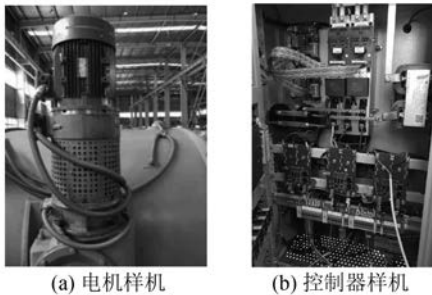


图6 试验用电机样机和控制器样机

表 1 控制器的控制参数

控制器参数	K_p	T_i	τ_d
给煤率调节器	0.5	100	0.6
速度调节器	低速 (<400 r/min)	0.03	—
	中速 (400~800 r/min)	0.06	—
	高速 (>800 r/min)	0.06	—

表 2 LVRT 技术指标要求

穿越区	技术指标	
	电压	低电压持续穿越时间 t/s
暂态穿越区	$\geq 20\%$ 额定电压	$t \leq 0.5$
动态穿越区	$\geq 60\%$ 额定电压	$0.5 < t \leq 5$
稳态穿越区	$\geq 90\%$ 额定电压	$t > 5$

图 7 所示为正常供电电压、额定负载时,在 400、800、1 200 r/min 给定速度下电机的输出速

度,可见所设计的电机控制系统具有良好的快速性和准确性。

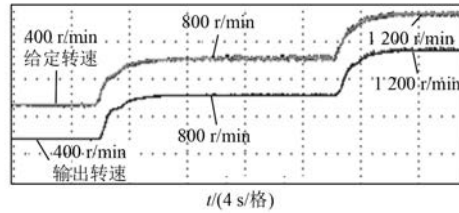


图7 正常供电电压时不同给定转速下电机输出速度

当供电电压跌落时,a 相电网电压和电机输出速度的试验波形如图 8 所示。

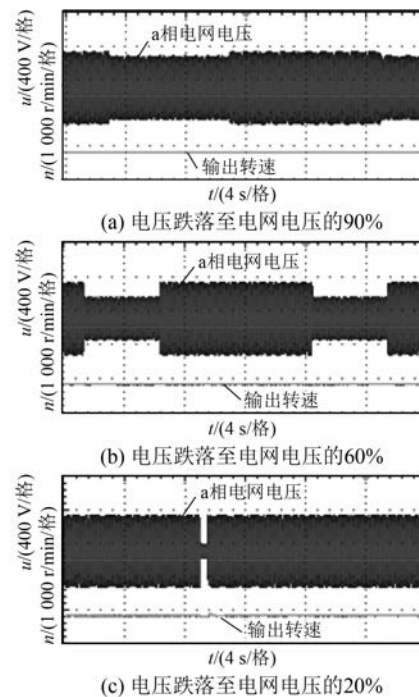


图8 电网电压跌落时的电机输出速度

图 8(a)、图 8(b) 和图 8(c) 分别为额定负载、800 r/min 输出速度情况下永磁耦合调速电机样机和控制器样机的供电电压跌落至电网电压额定值的 90% 持续 8 s、60% 持续 5 s 和 20% 持续 0.5 s 时的 a 相供电电压和电机输出速度波形图,可见,在电网电压跌落至额定值的 90% 持续 8 s 时,永磁耦合调速电机的输出速度保持不变;在电网电压跌落至额定值的 60% 持续 5 s 时,永磁耦合调速电机的输出速度基本保持不变;在电网电压跌落至额定值的 20% 持续 0.5 s 时,永磁耦合调速电机的输出速度约有 100 r/min 的低频波动,持

续约 1 s, 其他时段电机的输出速度基本保持不变。试验结果显示所提出的永磁耦合调速电机构建的给煤机电动系统具有 LVRT 能力。

5 结 语

针对火电厂给煤机变频驱动以增设外部补偿设备实现 LVRT 功能的不足, 提出一种采用永磁耦合调速电机构建给煤机的电动系统的方法, 并设计双闭环调速控制系统。以 5.5 kW 给煤机电动系统为例搭建试验平台, 验证了该电机及其控制系统具有良好的快速性和准确性, 在电网电压短暂跌落时, 能维持给煤机正常工作, 具有 LVRT 能力, 为实现给煤机的 LVRT 功能提供了一种新的技术手段。

【参考文献】

- [1] 邬海涣, 孟思思, 赖锦木, 等. 火电辅机变频器低电压穿越直流电压补偿及其控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(3): 115.
- [2] 方泽钦, 杨俊华, 陈思哲, 等. Crowbar 保护电路参数选择对双馈风电系统低电压穿越的影响[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(8): 73.
- [3] 郑重, 李卫华, 耿华, 等. 火电厂辅机变频器低电压穿越技术综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 143.
- [4] 谭树龙, 杨耕, 耿华. 不平衡工况下链式 STATCOM 的运行极限分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 44.
- [5] RAUF A M, KHADKIKAR V. An enhanced voltage sag compensation scheme for dynamic voltage restorer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2683.
- [6] 庞胜汉, 江伟. 防低电压穿越装置在给煤变频器上的应用[J]. 电气技术, 2013, 14(3): 89.
- [7] 师迎新, 胡坤, 陈文波. 基于电网安全的火电厂辅机低电压穿越装置应用[J]. 河南电力, 2013(2): 12.
- [8] 刘耀中, 马永岗, 王国庆, 等. 火电厂辅机变频器低电压穿越电源的设计[J]. 电力电子技术, 2014, 48(11): 13.
- [9] 王晓宇, 张涛, 刘树, 等. 火电厂辅机变频器低电压穿越电源[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 152.
- [10] 李硕, 张源. 绕线式永磁耦合调速的性能及其在火电行业的应用[J]. 科技资讯, 2018(16): 39.
- [11] 郑晓明, 米增强, 畅达, 等. 表面式永磁同步电动机新型转矩控制[J]. 电测与仪表, 2017, 54(24): 68.
- [12] 国家能源局. DL/T 1648—2016: 发电厂及变电站辅机变频器高低电压穿越技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [9] ISLAM M S, ISLAM R, SEBASTIAN T. Noise and vibration characteristics of permanent-magnet synchronous motors using electromagnetic and structural analyses[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3214.
- [10] VEREZ G, BARAKAT G, AMARA Y, et al. Impact pole and solt combination on vibrations and noise of electromagnetic origins in permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 8101104.
- [11] JUNG J W, LEE S H, LEE G H, et al. Reduction design of vibration and noise in IPMSM type integrated starter and generator for HEV [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 2454.
- [12] 杨浩东, 陈阳生, 邓志奇. 永磁同步电机常用齿槽配合的电磁振动[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 24.
- [13] 黄厚佳, 李全峰, 徐余法. 基于波形重构法的永磁电机电磁振动噪声计算研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(5): 11.
- [14] 詹宇声, 祝后权, 周贵厚. 斜槽对永磁同步电机径向激振力波及振动的影响[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(5): 36.
- [15] 杜萌, 罗建, 马鸿泰, 等. 整数槽同步电机低振动噪声定子结构设计[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(9): 65.
- [16] 唐小春, 于冰, 徐时杰, 等. 新能源汽车用永磁辅助同步磁阻电机噪声及续航优化研究[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 91.