

滑差补偿控制在电动变桨系统中的应用

孙 云

(大唐山东清洁能源有限公司, 山东 青岛 266061)

摘要: 在风力发电机组紧急收桨过程中,当桨叶负载较大时传统的V/F控制模式会导致桨叶驱动器驱动电机的速度降低,从而会引起紧急收桨速度降低,不能达到紧急收桨速度要求。针对上述问题,在对比分析紧急收桨速度与电压频率关系基础上,提出了在风力发电电动变桨系统中应用滑差补偿控制方案,大大改善了在大负载时的桨叶紧急收桨速度,并且基于电变桨系统全功能实验平台进行了实验,给出了相关实验结果。实验结果表明,在风力发电机组电动变桨系统中应用滑差补偿控制,能够有效改善大负载时桨叶的紧急收桨速度。

关键词: 风力发电系统; 电动变桨; 滑差补偿

中图分类号: TM614; TH39 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1457-04

Slip compensation for electrical pitch system of wind turbine

SUN Yun

(Datang Shandong Clean Energy Development Co., Ltd., Qingdao 266061, China)

Abstract: Aiming at lower emergency stop speed of the pitch system with heavy load because of the traditional V/F control method when the blades of wind turbine system are moving to feathering position, a method of the slip compensation for electrical pitch system was introduced to attain higher emergency stop speed. After the analysis of the relationship between pitch system emergency stop speed and voltage frequency, the experiments were carried out on the electric pitch control platform and the experimental results were given. The results indicate that the slip compensation for electrical pitch system can effectively increase emergency stop speed in the pitch system for wind turbine.

Key words: wind power generation system; electrical pitch system; slip compensation

0 引言

在风力发电系统中,风力发电机组正常运行时,变桨系统通过调节桨叶角度大小来改变风力发电机组吸收功率的大小,使风力发电机组运行在最大功率点附近。电动变桨系统主要由后备电源、变桨电机驱动器、PLC系统、变桨交流感应电机等组成。当电网电压正常时驱动器输入功率由电网提供,当电网电压掉电时,驱动器的输入功率由后备电源提供。在风电机组发生故障时,电动变桨系统将风电机组的3片桨叶顺桨到安全位置,以保证风电机组的安全。特别是当风场电网出现故障掉电时,电动变桨系统执行风电机组控制系统发送的紧急收桨命令,此时收桨所需能量由电动变桨系统的后备电源提供,驱动器直流母线电压为后备电源的电压。而后备电源电压一般比电网

正常时驱动器的直流母线电压低,较低的母线电压通常会导致驱动器输出电压减小,从而引起驱动器的输出力矩减小,在紧急收桨过程中,当桨叶负载较大时,系统无法满足紧急收桨速度要求。

针对上述问题,本研究提出一种在风电机组出现故障时的处理方案,为了保证紧急收桨时变桨系统的收桨速度,在驱动器传统的V/F控制模式中,加入滑差补偿控制,以期来提高桨叶负载较大情况下的紧急收桨速度。

1 无滑差补偿的V/F模式在电变桨系统中存在的问题

在交流电变桨系统中,电机编码器一般采用绝对值编码器,变桨系统通过绝对值编码器反馈值,获得桨叶的角度和速度信息。在风电机组运行过程中,当

电机编码器出现故障时,为了保证风电机组安全,变桨系统将执行快速的紧急收桨,将风电机组桨叶位置收回到安全位置。此时驱动器不能获得电机编码器反馈的位置和速度信息,因此驱动器不能继续运行在速度闭环控制模式,需要从速度闭环模式切换到V/F速度开环模式。变桨系统在V/F速度开环模式下驱动变桨电机执行紧急收桨。

在风力发电实际工作情况中风速大小不断变化,风电机组主轴在转动过程中,各个叶片在不同角度都会产生不同的重力负载以及大齿轮和小齿圈之间的摩擦因素等工况,因此在变桨系统的变桨过程中,负载力矩可能会不断变化,特别是在紧急收桨过程中,负载力矩会变化很大,可能出现2倍左右的负载力矩的情况。

变桨系统驱动器电气示意图如图1所示。在变桨系统主电正常情况下,若发生紧急收桨情况,驱动器母线电压能保持在较高水平,驱动器在传统V/F模式下驱动变桨电机执行紧急收桨,完全可以满足系统设定的紧急收桨速度要求。而在电网出现故障时,特别是在电网掉电的情况下,由备份电源为驱动器直流母线提供能量。而备份电源提供的母线电压一般较低,和电网正常时的母线电压相比,约下降15%左右。这时研究者如果采用传统的V/F模式控制,在较低的直流母线电压下,将出现较大的桨叶负载力矩,则电机驱动器很难获得满足系统设计要求的紧急收桨速度。

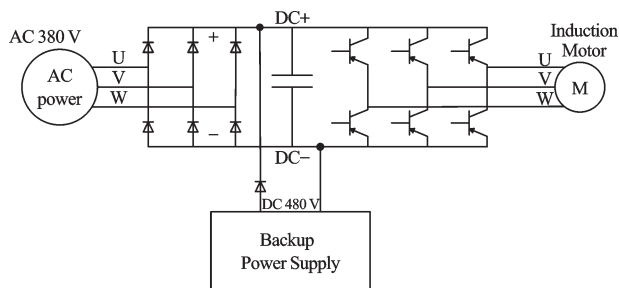


图1 变桨系统驱动器电气示意图

2 滑差补偿概念及控制策略

在驱动器为V/F控制模式时,在负载力矩变化的情况下,为了保持电机速度不变,滑差补偿作为开环的速度调节器,在负载力矩增加时驱动器输出频率增加,负载力矩减少时驱动器输出频率减小。或者说在相同负载的情况下,滑差补偿大的情况下,驱动器输出电压的频率会变大。驱动器输出频率的提高,可以实现直接提高电机的转速,进而满足系统紧急收桨速度要求。

滑差频率补偿示意图如图2所示。

在电网掉电时,系统无法提高驱动器的母线电压,从而也无法提高驱动器的输出电压幅值,因此只能提高驱动器的输出电压频率,则:

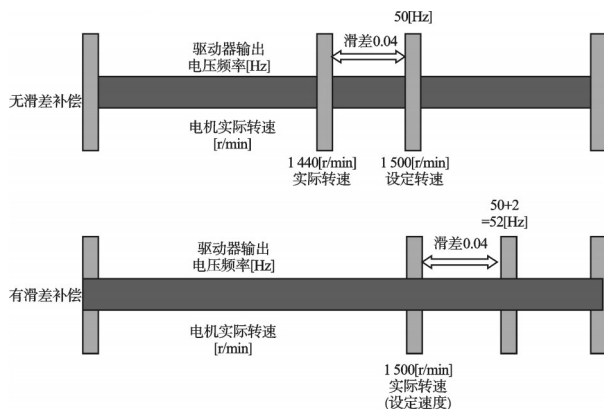


图2 滑差频率补偿示意图

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 W_1 k_m \Phi_m \quad (1)$$

由公式(1)得知,在保持机端电压幅值 U_1 不变时,频率越高,磁通 Φ_m 越低,是一种降低磁通升速的方法^[1]。

由式(1)知,异步感应电机的电磁转矩为^[2]:

$$T = \frac{m_1 p f_1 \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2}{2\pi} \frac{1}{\left(\frac{r_2'}{s} \right) + \frac{s(x_2')^2}{r_2}} \quad (2)$$

式中: m_1 —电机相数; p —电机极对数; f_1 —电机供电电压频率; s —转差率; r_2', x_2' —转子折算等效电阻及电抗。

保持 U_n 不变升高频率时,电动机电磁转矩为^[3]:

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} \quad (2)$$

由于 f_1 较高, r_1 比 x_1, x_2' 及 r_2'/s 都小很多,最大转矩 T_m 及 s_m 分别为:

$$T_m = \frac{1}{2} \frac{m_1 p U_1^2}{2\pi f_1 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]} \approx \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} \frac{m_1 p U_1^2}{2\pi f_1 (x_1 + x_2')} \propto \frac{1}{f_1^2}$$

$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \propto \frac{r_2'}{(x_1 + x_2')} = \frac{r_2'}{2\pi f_1 (L_1 + L_2')} \propto \frac{1}{f_1} \quad (5)$$

因此频率越高时, T_m 越小, s_m 也越小,最大转矩对应的速度降落为^[4]:

$$\Delta n_m = s_m n_1 \approx \frac{r_2'}{2\pi f_1 (L_1 + L_2')} \times \frac{60 f_1}{p} = \text{常量} \quad (6)$$

本研究根据电磁转矩方程式可以画出升高驱动器输出频率的机械特性,如图3所示^[5]。

由以上公式可以推得,在直流母线电压不变时,通过滑差补偿可以提高驱动器的输出频率,即可以提高在相同转矩下的最大转速^[6-8]。

传统V/F模式下加入滑差补偿控制框图如图4所示。

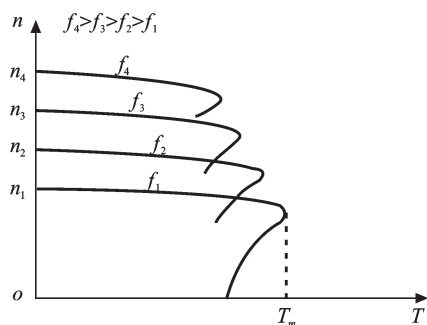
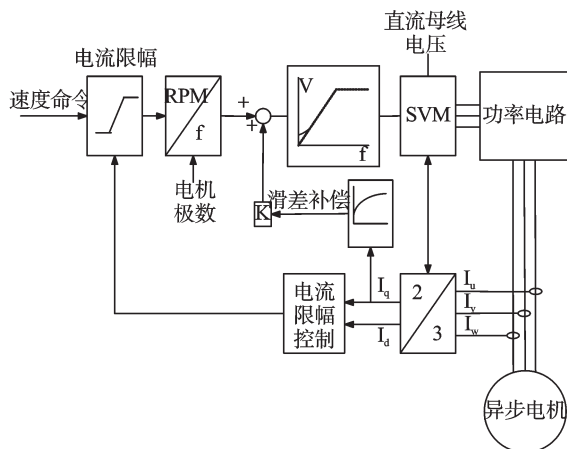
图3 机端电压 U_N 不变,滑差补偿调速机械特性

图4 传统V/F模式下加入滑差补偿控制框图

由图4可知,在传统的V/F控制策略中,控制系统采集电机三相电流后,进行3/2变换,得到 d 轴和 q 轴电流。在V/F原有的控制策略上叠加 q 轴电流分量以提高输出电压频率,这就是滑差补偿的控制原理^[9]。

3 实验验证

变桨实验平台由电动变桨系统、负载模拟系统和控制系统组成,其示意图如图5所示。其中,电动变桨系统

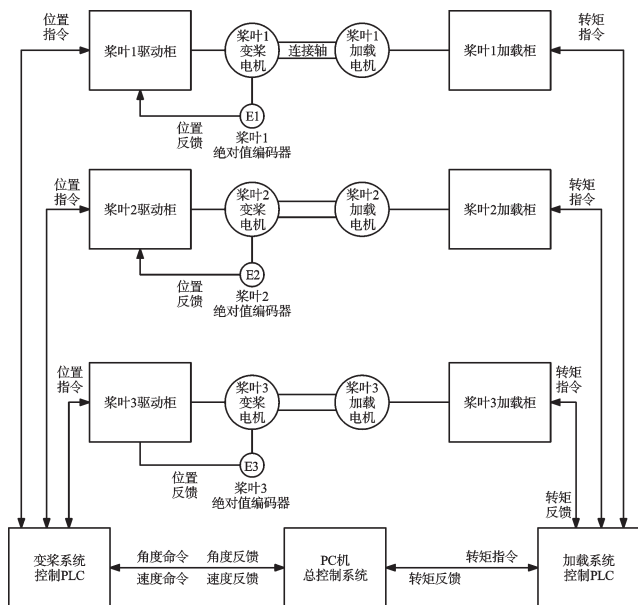


图5 电动变桨实验平台示意图

由3个变桨电机、3个驱动柜和1个中控柜组成,负责调节桨叶速度和角度,在故障情况下执行紧急收桨,将桨叶收回到安全位置;负载模拟系统由3个加载电机和加载控制柜组成,模拟风机实际桨叶负载;控制系统由PLC和数据采集系统组成,负责向电动变桨系统发送角度和速度指令,向负载模拟系统发送负载转矩指令,采集变桨系统和负载模拟系统状态信息,如转速、角度、负载力矩等。

试验条件为:变桨电机最大负载转矩为34 Nm,变桨系统执行V/F模式紧急收桨,紧急收桨目标速度为2 000 r/min。本研究通过示波器和监控界面来观察并对比滑差补偿加入前后驱动器输出电压频率以及变桨电机实际转速的变化。

没有滑差补偿时,驱动输出电压波形如图6所示。

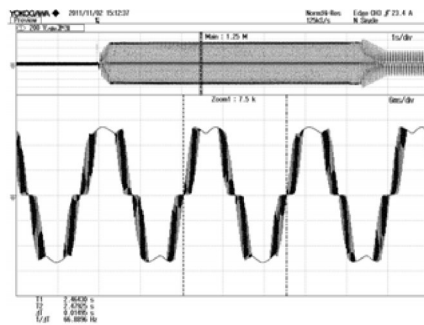


图6 没有滑差补偿时,驱动输出电压波形

由图6可见,驱动器输出电压频率为66.8 Hz,此时PLC数据采集系统获得变桨电机实际转速为1 860 r/min。

滑差补偿系数为100%时,驱动器输出电压波形如图7所示。

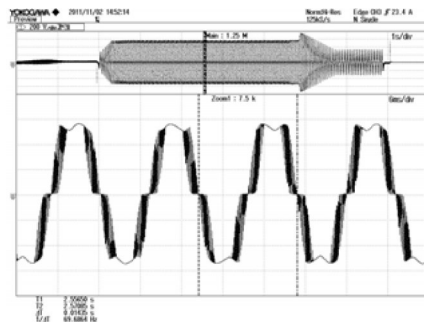


图7 滑差补偿系数为100%时,驱动输出电压波形

由图7可见,驱动器输出电压频率为69.7 Hz,此时PLC数据采集系统获得变桨电机实际转速为1 940 r/min。

滑差补偿系数为150%时,驱动器输出电压波形如图8所示。

由图8可见,驱动器输出电压频率为71.2 Hz,此时PLC数据采集系统获得变桨电机实际转速为1 988 r/min。

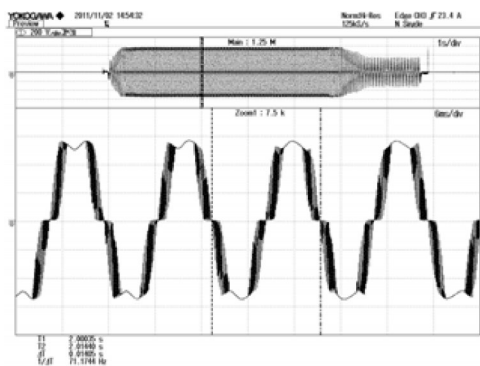


图8 滑差补偿系数为150%时,驱动器输出电压波形

从以上实验结果可以得出,在电动变桨系统驱动器的传统V/F控制中加入滑差补偿控制后,在相同负载的情况下,可以提高驱动器输出电压频率从而提高紧急情况下变桨电机的转速,保证紧急收桨速度。

4 结束语

在风电场出现电网掉电、电机编码器出现故障以及在桨叶负载变大时,风力发电机组不能达到紧急收桨的速度要求,本研究在电动变桨系统变桨电机驱动器的传统V/F控制模式中加入滑差补偿控制,适当提高输出电压的频率,以此来提高交流异步电机的输出速度,从而在相对较低的机端电压和较大的桨叶负载力矩下,也可以保证电变桨系统按照主控系统设定的紧急收桨速度执行紧急收桨。

由基于电变桨系统全功能实验平台的实验结果

可知,在风力发电机组电动变桨系统中应用滑差补偿控制,能够有效地改善大负载时桨叶的紧急收桨速度。

参考文献(References):

- [1] 李发海,王 岩. 电机与拖动基础[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2002.
- [2] ECHAVARRIA R, HORTA S, OLIVER M. A Three Phase Motor Drive using IGBT's and Constant V/F Speed Control with Slip Regulation[C]//CIEP 95. San Luis Potosi, MEXICO: [s.n.], 1995: 16-19.
- [3] SARHAN H, ISSA R, ALIA M, et al. Slip Compensation in efficiency-optimized three-phase induction motor drive systems[J]. *Intelligent Control and Automation*, 2011(2): 95-99.
- [4] 马立华. 变频器的转差频率补偿控制[J]. 上海轻工业高等专科学校学报, 1996, 17(4): 41-45.
- [5] 罗彦丰. 交流变频调速的滑差频率矢量变频控制系统[J]. 河北电力技术, 1992(4): 27-32.
- [6] 任永强,余天明. 变速箱试验台加载工作时转矩扰动补偿研究[J]. 机电工程技术, 2011, 40(1): 69-71.
- [7] 孟彦京,许德玉,高承雍. 转矩补偿和滑差补偿的区别与应用[J]. 电气传动, 2002(4): 17-19.
- [8] SARHAN H, ISSA R. Modeling, simulation and test of inverter-induction motor drive system with improved performance[J]. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, 2005, 33(5): 1873-1890.
- [9] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 1992.

[编辑:李 辉]

(上接第1452页)

统开始工作,开关电磁阀通过控制车体倾斜油缸,从而最终使车体恢复到水平位置,基本满足开沟铺管机的控制要求。

(2) 本研究开发了1KPZ-250型开沟铺管机的GPS自动导航控制系统,该系统能够准确控制开沟铺管机按照规划路径行驶,偏航误差控制在 ± 10 cm以内,机器稳定行驶时的最大偏航距离为9.9 cm,有效地证明了GPS差分定位导航精度能够满足开沟铺管机的作业要求。

(3) 另外,本研究还开发研制了激光高程控制系统,试验结果表明,开沟铺管的高程误差在 ± 20 mm以内,能够满足控制系统的要求,证明了激光高程控制系统的可行性。

参考文献(References):

- [1] 北京丹路生物工程有限公司. “丹路”生物肥在盐碱地上的改良效果[C]. 第十届全国土壤微生物学术讨论会暨第三届全国微生物肥料生产技术研究会, 2006.

- [2] 王化祥. 1KP-250型开沟铺管机[J]. 粮油加工与食品机械, 1982(9): 30-34.
- [3] 李广波,李学森,迟道才. 国内外暗管排水的发展现状与动态[J]. 农业与技术, 2003, 23(3): 65-70.
- [4] 江创华,阎 堃. 自动调平系统在履带式全液压挖沟机中的应用[J]. 工程机械, 2005, 36(10): 29-31.
- [5] 万声淦,沙金焯,董 峰,等. 宁夏银北灌区暗管排水关键技术的引进[J]. 水利水电技术, 2002, 33(7): 57-59.
- [6] 李恩辉. 暗管改碱技术要点及应用前景分析[J]. 中国科技信息, 2011(10): 142.
- [7] 王丽丽. 大型开沟铺管机自动控制系统关键技术研究[D]. 北京:中国农业机械和科学研究院, 2012.
- [8] 李中华,张雨浓,陈卓怡,等. PIC技术宝典[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2008.
- [9] 朱延钊. AD7705/AD7706的原理与应用[J]. 国外电子元器件, 2002(6): 59-61.
- [10] 仇国庆. AD7705/AD7706在仪器仪表中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2001(6): 43-45.

[编辑:张 翔]