

基于改进的直接转矩控制的风力机模拟系统

刘钰山¹, 葛宝明¹, 毕大强², 王文亮¹

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 传统的异步电机直接转矩控制系统模拟风力机特性存在低速转矩脉动大、电流畸变等缺点, 严重影响其在直驱永磁同步风力发电模拟系统中的应用。采用离散空间矢量调制技术, 以改善风机模拟系统的低速性能。设计了基于改进的直接转矩控制的风力机模拟系统的结构, 并与直驱式永磁同步发电机组成风力发电并网模拟系统, 实现了最大功率点跟踪 (MPPT) 控制。在 Matlab/Simulink 仿真环境下建立仿真模型, 为实验室建立实物系统奠定了基础。

关键词: 风力机模拟; 直接转矩控制; 离散空间矢量调制; 直驱永磁同步风力发电系统

Improved direct torque control based wind turbine simulation system

LIU Yu-shan¹, GE Bao-ming¹, BI Da-qiang², WANG Wen-liang¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: There are big torque ripple and serious current distortion in wind turbine simulation by traditional direct torque control at low speed, which seriously affects its application in direct-drive permanent magnet synchronous wind power simulation system. In order to improve the low speed performance of wind turbine simulation system, the discrete space vector modulation technology is used. The structure of the improved direct torque control based wind turbine simulation system is also designed. The modified system forms a wind power grid simulation system with a permanent magnet synchronous generator and realizes the MPPT control. The simulation model is established in the Matlab/Simulink simulation environment. It lays a good foundation of physical system for the laboratory.

Key words: wind turbine simulation; direct torque control; discrete space vector modulation; direct-drive permanent magnet wind power generation system

中图分类号: TM921 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0140-05

0 引言

由于风力发电现场环境恶劣、实验空间狭窄、自然条件不确定等, 导致风力发电技术的前期实验研究难于在现场进行。为此, 实验室常用风力机模拟系统代替实际风力机实验, 即根据当前风速和风力机转速计算出风力机转矩, 然后按照此转矩指令控制原动机的实际输出转矩, 使模拟系统的机械特性与风力机特性一致。

目前, 在风力机模拟系统中, 直接转矩控制 (DTC) 的异步电机很受青睐。直接转矩控制摒弃了矢量控制中的解耦思想, 算法上不存在旋转坐标变换, 控制结构简单, 转矩响应迅速且无超调, 是

一种具有高静、动态性能的交流调速控制方式, 文献[1]就是运用 DTC 设计的风力机模拟器。然而, 传统 DTC 在低速下存在转矩脉动大、电流畸变严重等不足, 影响了对风机特性模拟的准确性^[1-2], 特别是对于转速较低的永磁直驱型变速恒频风力发电机组, 这种不足将凸显出来。文献[3]用离散空间矢量调制 (DSVM) 技术改善了传统 DTC 低速转矩脉动大的问题。本文采用离散空间矢量调制技术, 提高风力机模拟系统的低速性能, 使其适用于直驱型永磁同步风力发电系统。

论文基于离散空间电压矢量调制直接转矩控制算法, 应用异步电机建立了风力机模拟系统, 再将其与直驱型永磁同步风力发电机对接, 组成完整的风力发电模拟系统进行了仿真研究, 仿真结果验证了论文所提方案的可行性与有效性。

基金项目: 电力系统国家重点实验室资助项目

1 DSVM 直接转矩控制

传统直接转矩控制的思想为：系统将定子电压和电流经过 3/2 变换输入到磁链和转矩观测器，估算当前磁链和转矩，根据磁链和转矩比较器的输出以及定子磁链信号所在扇区，选择最佳开关状态，得到期望的 PWM 控制信号，从而控制定子电压、电流和转速变化。

1.1 磁链观测模型

异步电机直接转矩控制的关键在于定子磁链的观测及转矩的估算，其准确性对系统的性能影响很大。传统的 u-i 模型结构简单，但只有在高速时，才能很好地体现出其精度高的优点；i-n 模型虽然不受定子电阻 R_s 变化的影响，但易受电机参数 L_s 、 L_r 、 L_m 、 R_r 等变化的影响，并且 ω_r 的测量误差对模型的结果影响很大。本文运用全速范围内都实用的 u-n 模型^[4]观测定子磁链，它综合了 u-i 模型及 i-n 模型的优点，很好地解决了模型切换问题，其建立过程如式 (1) ~ (4) 所示^[5]。

$$\psi_s = \int (u_s - R_s i_s) dt \quad (1)$$

$$\psi_s = a\psi_r + b i_s \quad (2)$$

$$i_s = e\psi_s - f\psi_r \quad (3)$$

$$p\psi_r = c\psi_s - d\psi_r - \omega_r \psi_r \quad (4)$$

式中： p 为微分算子； $a = L_m / L_r$ ； $b = (L_s L_r - L_m^2) / L_r$ ； $c = L_m R_r / (L_s L_r - L_m^2)$ ； $d = L_s R_r / (L_s L_r - L_m^2)$ ； $e = L_r / (L_s L_r - L_m^2)$ ； $f = L_m / (L_s L_r - L_m^2)$ ； ψ_s 、 u_s 、 R_s 、 i_s 分别为定子的磁链、电压、电阻、电流； ψ_r 、 R_r 、 ω_r 分别为转子的磁链、电阻、转速； L_s 、 L_r 、 L_m 分别为定子电感、转子电感及定转子互感。

1.2 离散空间电压矢量调制

传统 DTC 算法使用电压型逆变器的 8 种开关状态，产生相应的 8 个空间电压矢量，每个控制周期只输出一个工作电压矢量。DSVM 算法则将一个控制周期分为 m 个时间段，每个时间段都可输出一个电压矢量，从而合成许多新的电压矢量。 m 值越大，合成电压矢量的数目越多，转矩脉动越小，开关表也越复杂。综合考虑，选 $m=3$ ，即可使转矩波动明显减小，且不需要太复杂的开关表^[6]。

为了充分利用所有的合成电压矢量，运用 DSVM-DTC 时，将 1 个扇区划分为正负 2 个子扇区，如图 1 所示。若定子磁链处于扇区 3 内，传统 DTC 只有 5 个电压矢量供选择，以确定相应的开关状态，而采用三时间段 DSVM 算法时，则可以用到 19 个

电压矢量。

综合的开关表由两层磁链滞环比较器和五层转矩滞环比较器确定。转矩滞环比较器如图 2 所示，其中：-1、0、+1 级对应稳态运行范围，选择使转矩变化小的电压矢量；-2，+2 对应转矩变化较大的动态过程，选择使转矩变化大的电压矢量。在高速时，零电压矢量产生的转矩减小量比低速时明显得多，所以将转速细分为低速 ($v < 15\%$ 额定转速)、中速 ($15\% < v < 50\%$ 额定转速) 和高速 ($v > 50\%$ 额定转速)，不同的速度范围选择不同的电压矢量，从而得到第 1 扇区的开关表如表 1 所示，其他扇区可类似分析。

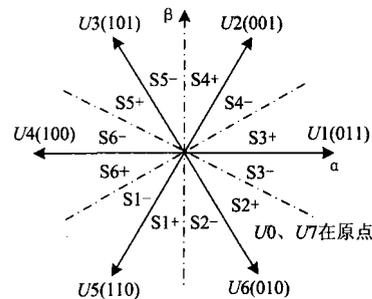


图 1 基本空间电压矢量

Fig.1 Fundamental space voltage vectors

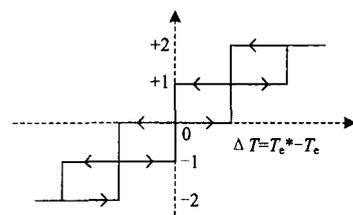


图 2 转矩滞环调节器

Fig.2 Regulator of torque

表 1 第 1 扇区 DSVM-DTC 开关表

Tab.1 Switch table of DSVM-DTC in the first sector

ψ_Q	T_Q					
	+2	+1	0	-1	-2	
低速	+1	333	3zz	zzz	1zz	111
	-1	444	4zz	zzz	6zz	666
中速	+1	333	zzz	1zz	11z	111
	-1	444	zzz	6zz	66z	666
高速 3+	+1	333	1zz	11z	111	111
	-1	444	6zz	61z	661	666
高速 3-	+1	333	1zz	16z	116	111
	-1	444	6zz	66z	666	666

2 风力机模拟系统

本文的风力机模拟系统采用异步电机作原动

机,其机械特性曲线与风力机的特性曲线存在交点,如图3所示。在给定转矩(或转速)的条件下,控制异步电机转速(或转矩)的大小,使其运行于二者机械特性曲线的交点处,即可符合风力机的运行状态,但要保证最大转矩值小于异步电机所能输出的最大转矩值,以使系统稳定运行。

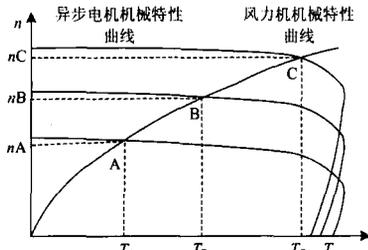


图3 风力机与异步电机特性曲线

Fig.3 Characteristic curves of wind turbine and induction motor

2.1 风力机模型

风轮输出转矩的建模方法主要有:基于叶素理论^[7]的建模和基于气动设备子模型^[8]的建模。如果用桨叶的基本理论建模,将不可避免要解决风轮几何学问题、复杂冗长的计算等问题。因此,本文按照空气动力学理论^[9]建立风轮的气动设备子模型。

风轮输出的机械功率为

$$P = C_p \cdot E = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v^3 C_p \quad (5)$$

式中: ρ 为空气密度,单位 kg/m^3 ; R 为叶片半径,单位 m ; v 为空气速度,单位 m/s ; C_p 为风能利用系数。

由此得风轮输出的转矩为

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{\pi \rho C_p R^3 v^2}{2 \lambda} = \frac{1}{2} C_T(\lambda) \pi \rho R^3 v^2 \quad (6)$$

式中: $\lambda = \omega R / v$, 为叶尖速比; $C_T(\lambda) = C_p / \lambda$, 为风力机的转矩系数,可用式(7)所示的6次多项式拟合^[10]。

$$C_T(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i \lambda^i \quad (7)$$

式中, a_0, a_1, \dots, a_6 为多项式系数。

风轮输出的转矩经风轮转子、低速轴、齿轮箱、高速轴和发电机转子传递到发电机,对这一传动系统可建立刚性轴模型和柔性轴模型,两种建模方式对本文的研究重点无影响,但由于柔性传动系统得到的模型过于复杂,因此,本文建立刚性轴模型,从风轮气动转矩到发电机反应转矩之间的传递函数^[11]见式(8)。

$$H(s) = \frac{T_g(s)}{T_r(s)} = \frac{u \cdot D_g}{(J_r + uJ_g)\tau \cdot s^2 + (J_r + uJ_g) \cdot s + u^2 D_g} \quad (8)$$

式中: J_r 、 T_r 分别为风轮转子的转动惯量、气动转矩; J_g 、 T_g 分别为发电机转子的转动惯量、电磁转矩; ω_g 为发电机转动角速度; u 为齿轮箱传动比; $H(s)$ 为系统的传递函数; s 为复变量。

2.2 风力机模拟系统的结构

要使异步电机电磁转矩与风力机输出转矩相同可理解为使异步电机拖动一个与风机转矩相同的负载。因此,本文建立的模拟系统把风机的输出转矩加到电机负载端。据 $P=T\omega$, 二者转速也应保持一致。由于风力发电过程中,风力机接收到的风是从风轮低速轴,经齿轮箱升速,传递到发电机高速轴的,因此,异步电机反馈的转速需经齿轮箱传动比换算后,再送入风力机模型计算转矩。传动比为1时,便可用于模拟直驱型风力发电机组。根据以上分析,风力机模拟系统的结构如图4所示。

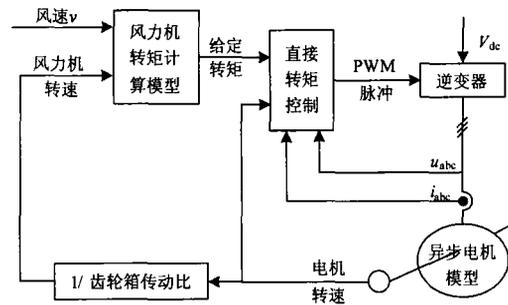


图4 风力机模拟系统的结构

Fig.4 Structure of wind turbine simulation system

2.3 基于模拟风机的直驱永磁同步风力发电系统的结构

将所建立的风力机模拟系统与永磁同步发电机(PMSG)、双PWM变换器、控制器等连接,进而组成基于风机模拟系统的直驱永磁同步风力发电模拟系统,如图5所示。DSVM直接转矩控制下的异步电机按照风力机特性运行,与发电机同轴连接,带动发电机发出幅值和频率变化的交流电,首先经过电机侧的三相PWM逆变器整流成直流,再经网侧的PWM逆变器变换为三相幅值和频率恒定的交流电传递到电网。

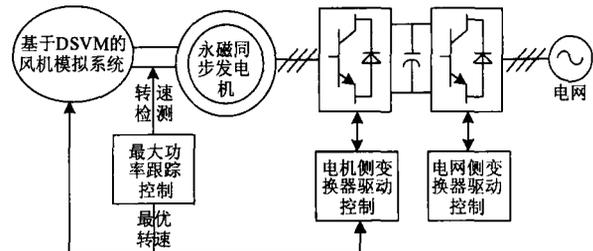


图5 直驱永磁同步风力发电模拟系统的结构

Fig.5 Structure of direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system

风力发电系统中, 当风力机的桨距角保持不变时, 风能利用系数 C_p 仅由叶尖速比 λ 决定。风力机运行于最佳叶尖速比 λ_{opt} 时, 可得到最大风能利用系数 C_{pmax} , 此时风力机转换效率最高^[12]。因此, 可通过最大功率跟踪控制获得最优风轮转速, 也即风机模拟系统的异步电机与并网发电系统的永磁同步发电机的最优转速, 从而使整个系统工作在最大风能利用状态。

3 仿真研究

3.1 风机模拟系统的仿真

基于 DSVM 的风力机模拟系统的 Simulink 仿真结构如图 6 所示。风力机参数为: 空气密度 $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$, 叶片半径 $R=4 \text{ m}$; 异步电机参数为: 额定功率 15 kW , 额定电压 400 V , 额定频率 50 Hz , 额定转速 1460 r/min , 定子电阻 0.2147Ω , 定子电感 0.991 mH , 转子电阻 0.2205Ω , 转子电感 0.991 mH , 定转子互感 64.19 mH , 转动惯量 $0.102 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 极对数 2。

为检验系统的低速性能, 特将给定转速设为 200 r/min , 给定转矩设置为 90 Nm , 图 7 为 DSVM-DTC 算法与传统 DTC 算法的异步电机转矩脉动对比, 图 8 为定子电流波形对比。可见, DSVM-DTC 算法的转矩脉动大为减小, 电流畸变也有了很好的改善, 大大提高了风机模拟系统的低速稳定性。

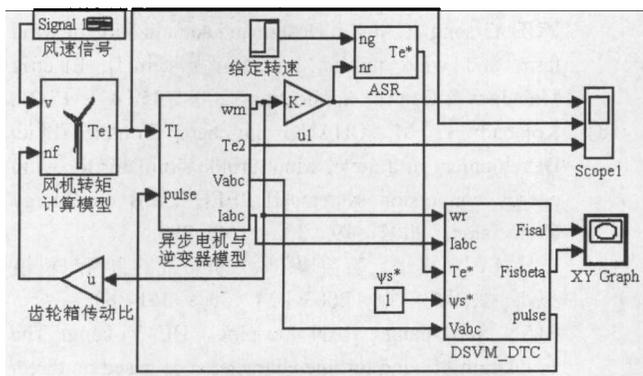


图 6 异步电机模拟风力机系统的仿真结构

Fig.6 Simulation structure of induction motor simulating wind turbine

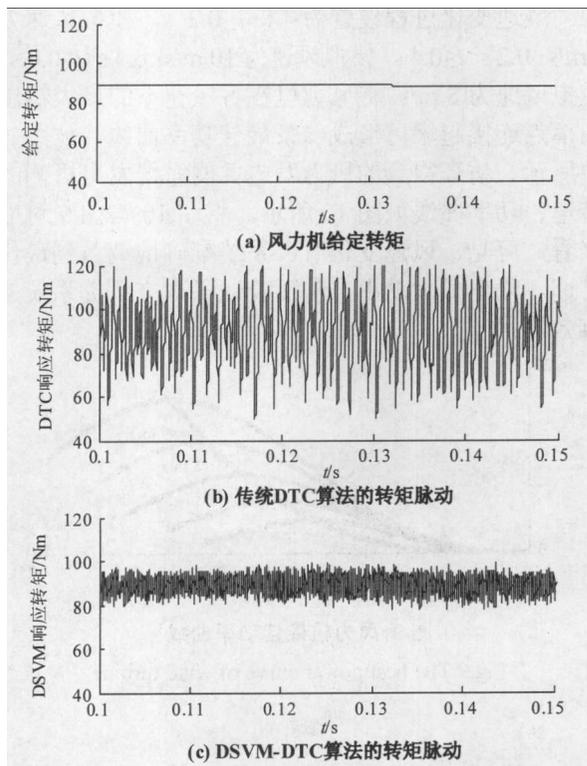


图 7 低速下异步电机转矩脉动比较

Fig.7 Comparison of induction motor torque ripple at low speed

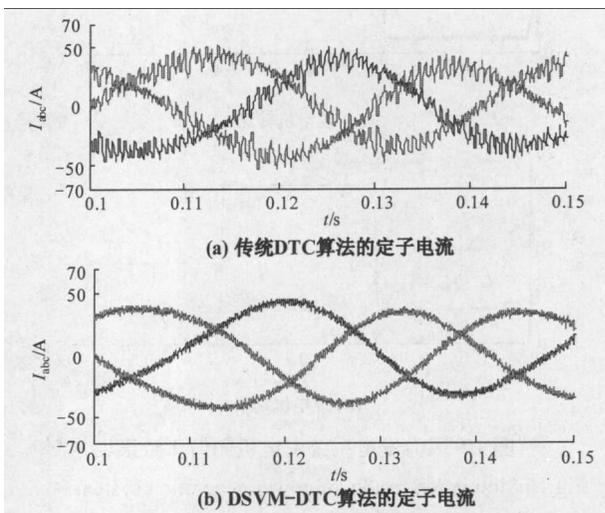


图 8 低速下异步电机定子电流畸变比较

Fig.8 Comparison of induction motor stator current distortion at low speed

3.2 基于模拟风机的直驱永磁同步风力发电系统的仿真

按照图 5 所示的原理图, 搭建相应的仿真模型, 用风机模拟系统代替风轮机, 驱动直驱永磁同步风力发电机, 进行并网发电。仿真的永磁同步发电机参数为: 定子电阻 0.01Ω , 定子电感 1.5 mH , 永磁体磁通 0.1821 Wb , 转动惯量 $0.08 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 极对数

12. 风速变化过程设置为: $0 < t \leq 0.2$ s, 模拟风速为 6 m/s; $0.2 < t \leq 0.4$ s, 模拟风速为 10 m/s; $0.4 < t \leq 0.6$ s, 模拟风速为 8 m/s。将风力机在各风速下的最大输出功率点连接起来可形成一条最佳功率曲线, 如图 9 中所示。仿真得到的风力发电并网系统发电机侧的转速、功率曲线如图 10 所示。将图 10 与图 9 对应来看, 可见, 风速变化时, 系统准确地调节到最优转速, 输出最大功率, 从而验证了本文所提系统的有效性。

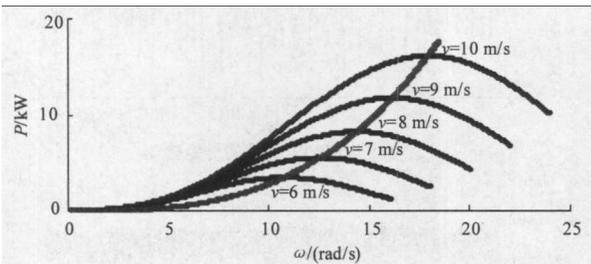


图 9 风力机最佳功率曲线

Fig.9 The best power curve of wind turbine

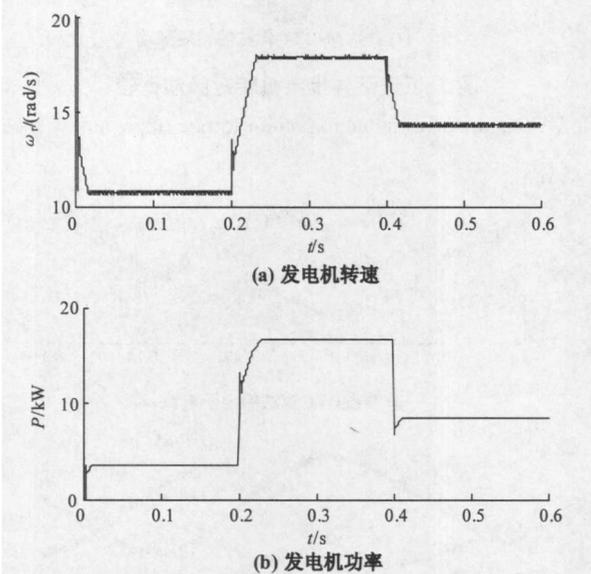


图 10 风力发电系统发电机侧仿真结果

Fig.10 Simulation results of power generation system on generator side

4 结论

采用 DSVM-DTC 算法, 改进了传统直接转矩控制低速转矩脉动大、电流波形畸变严重等缺点, 建立了基于此算法的风力机模拟系统, 并将其与直驱永磁同步发电机并网系统对接, 组成风力发电模拟系统, 进行了仿真研究。仿真结果表明, 改进的 DTC 算法有效地提高了风力机模拟系统的低速稳定性, 与永磁同步发电机组成的风力发电模拟系

统在最大功率跟踪控制下, 能准确地调节到最优转速, 使系统以最大风能捕获模式运行, 为实验室研究风力发电提供了一个很好的方案。

参考文献

- [1] 陈彬, 宋平岗, 何鑫. 基于直接转矩控制的风力机模拟器研究[J]. 防爆电机, 2007, 42 (4): 18-21.
CHEN Bin, SONG Ping-gang, HE Xin. Study of wind turbine simulation based on direct torque control[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2007, 42 (4): 18-21.
- [2] 王健, 王昆, 陈全世. 风力发电模拟器的控制策略研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (10): 2384-2387.
WANG Jian, WANG Kun, CHEN Quan-shi. Control strategy research of wind generation simulator[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19 (10): 2384-2387.
- [3] Domenico Casadei, Givoanni Serra, Angelo Tani. Implementation of a direct torque control algorithm for induction motors based on discrete space vector modulation[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15 (4): 769-777.
- [4] 李夙. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 27-32.
LI Su. Direct torque control of induction motor[M]. Beijing: China Machine Press, 1994: 27-32.
- [5] 崔风波. 直接转矩控制技术在交流调速系统中的应用[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
CUI Feng-bo. Direct torque control technology in the AC drive system[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.
- [6] 张艳丽, 王英, 徐传芳. 基于离散空间矢量调制的直接转矩控制系统的仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2006, 33 (6): 18-22.
ZHANG Yan-li, WANG Ying, XU Chuan-fang. Study on simulation of DTC based on DSVM[J]. Electric Machines & Control Application, 2006, 33 (6): 18-22.
- [7] 岳一松, 蔡旭. 风场与风力机模拟系统的设计与实现[J]. 电机与控制应用, 2008, 35 (4): 17-21.
YUE Yi-song, CAI Xu. Design and actualization of wind farm and wind turbine imitation system[J]. Electric Machines & Control Application, 2008, 35 (4): 17-21.
- [8] Kojabadi H M, CHANG liu-chen, Boutot Tobie. Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19 (3): 392-398.
- [9] 卞松江, 潘再平, 贺益康. 风力机特性的直流电机模拟[J]. 太阳能学报, 2003, 24 (3): 361-363.
BIAN Song-jiang, PAN Zai-ping, HE Yi-kang. The simulation of wind turbine characteristics based on direct current machine[J]. Solar Energy Journal, 2003, 24 (3): 361-363.

(下转第 198 页 continued on page 198)

常的情况下, 和 FOX-41A 装置连调时, 经常报数据帧丢失。在对 MUX 装置进行检查后没有发现异常; 用误码仪对 MUX 长期测试也显示正常; 将此 MUX 和电流差动装置连接长期测试后, 也没有误码、丢帧等异常。对比 FOX-41A 和电流差动的 HDLC 格式后发现, FOX-41A 的帧间空闲状态很长, 远远高于电流差动的帧间空闲状态。将 FOX-41A 的空闲状态设置成传输帧头标志后, 长时间测试, 没有丢帧出现。

5 建议

为使得 HDLC 传输更加稳定、可靠, 我们建议在 HDLC 应用中应该同时包括以下几方面:

- 1) 采用 5 连 1 插 0 功能;
- 2) 采用 7 连 0 插 1 功能;
- 3) 帧空闲电平采用传输帧头标志(01111110)。

参考文献

[1] Reed K D. 广域网[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
Reed K D. Wide area networks[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

[2] Simon Haykin. 通信系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
Simon Haykin. Communication systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

[3] 金华锋. 复用通道误码和延时对线路纵差保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (21): 63-66.
JIN Hua-feng. Effect of bit error and transmission delay of multiplex channel on line current differential relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (21): 63-66.

[4] 吴伯修, 祝宗泰. 信息论与编码[M]. 南京: 东南大学出版社, 1991.
WU Bo-xiu, ZHU Zong-tai. Informatics & coding[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1991.

[5] 王爱玲, 蔡敏. RCS-900 系列保护装置的同步通信时钟[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (24): 53-56.
WANG Ai-ling, CAI Min. Clock setting for synchronous communication of RCS-900 series protection equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (24): 53-56.

[6] 张建臣. 继电保护装置专用 SDH 传输通道设计建议[J]. 电力系统通信, 2007, 28 (176): 12-18.
ZHANG Jian-chen. Suggestion on design of SDH transmission channel used by relay protection equipment[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2007, 28 (176): 12-18.

[7] 王芊, 金华锋, 等. 用于差动保护的 E1 速率通信接口[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (7): 55-57.
WANG Qian, JIN Hua-feng, et al. Research of E1 interface used in current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (7): 55-57.

收稿日期: 2009-09-25; 修回日期: 2009-10-20

作者简介:
王芊 (1967-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护的工作; E-mail: qianwang@nari-relays.com
刘革新 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统继电保护的工作;
吴通华 (1977-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统继电保护的工作。

(上接第 144 页 continued from page 144)

[10] 马洪飞, 张薇, 李伟伟, 等. 基于直流电机的风力机模拟技术研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28 (11): 1278-1283.
MA Hong-fei, ZHANG Wei, LI Wei-wei, et al. Research on wind turbine emulation based on DC Motor[J]. Solar Energy Journal, 2007, 28 (11): 1278-1283.

[11] 王淑琴. 基于虚拟样机技术的风力机传动系统设计与仿真[J]. 制造技术自动化学术会议, 2005, 12 (5): 39-41.
WANG Shu-qin. Design and simulation of wind turbine drive system based on dummy specimen technology[J]. Technique of Manufacture Automation Academic Conference, 2005, 12 (5): 39-41.

[12] 贾要勤, 曹秉刚, 杨仲庆. 风力机模拟平台的 MPPT 快速响应控制方法[J]. 太阳能学报, 2004, 25 (3): 364-370.
JIA Yao-qin, CAO Bing-gang, YANG Zhong-qing. A fast response MPPT control method for wind turbine simulator platform[J]. Solar Energy Journal, 2004, 25 (3): 364-370.

收稿日期: 2009-10-19; 修回日期: 2010-01-04

作者简介:
刘钰山 (1986-), 女, 博士研究生, 研究方向为风力发电控制技术; E-mail: 09117342@bjtu.edu.cn
葛宝明 (1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制;
毕大强 (1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用。