

一种能量自回馈的交流电机测试系统

沈 杰, 郑 灼, 叶云岳*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为解决“交流电机研发、生产中需要对交流电机的各项性能进行测试”的问题,将电机的变频控制和能量回馈等多项电机控制技术应用到交流电机测试系统中,提出了一种新型交流电机测试系统—能量自回馈的交流电机测试系统。先从理论上分析了该系统的设计原理与合理性,又通过仿真分析和实验测试验证了系统的可行性与稳定性。最后,还提出了能量自回馈测试系统的研究发展方向。研究表明,该系统结构简单、控制方便,消除了直接回馈电网带来的一系列弊端。

关键词:电机测试;能量回馈;变频控制

中图分类号:TH87;TM346

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)07-0881-06

AC motor testing system based on energy self-feedback

SHEN Jie, ZHENG Zhuo, YE Yun-yue

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problem of performances testing in AC motor design and manufacture, several motor control methods such as the frequency control and energy feedback were investigated. A new testing system called energy self-feedback AC motor testing system was proposed. The design principle and rationality of the system were analyzed, the feasible and stable were proved by simulations and experiments. At last, the development direction of the new system was pointed as well. The research results show that, the system has advantages in simple structure, easy control and little effect to grid when feeding back.

Key words: motor testing; energy feedback; frequency control

0 引 言

交流电机测试是交流电机研发、生产过程中十分重要的一个环节,其主要是对交流电机在不同频率、不同负载情况的工作性能进行测试^[1-3]。随着变频器的广泛应用和变频控制技术不断发展,交流电机的变频控制已经较容易实现^[4-5]。从而,变频控制技术也被应用到交流电机的测试中。交流电机测试中很重要的一项技术是负载模拟,一般采用电力测功机或磁粉刹车等来实现^[6-7]。为了节约能耗,电力测功机的应用相对较多。现在,交流电机测试系统一般采用电力测功机(直流电机或交流电机)与被测电机同轴相联^[8-9]。被测电机通过变频器进行控制,负载大小通过调节电力

测功机来获得。

为了减小系统能耗,电力测功机需要进行能量回馈。目前,电力测功机的能量回馈,通过逆变器向电网回馈^[10]。然而,这种回馈方法系统结构复杂,控制困难,直接回馈对电网污染较大。本研究探讨一种新的能量回馈方式,将电力测功机直接向被测电机回馈能量。从整个系统来讲,构成了能量的自回馈形式。该系统结构简单,控制方便,对电网几乎没有影响。

1 测试系统设计

测试系统由变频器、被测电机、电力测功机(采用并励直流电机)、能量回馈电路、保护电路等几个部分组成。

收稿日期:2010-12-06

作者简介:沈 杰(1987-),男,浙江上虞人,主要从事电机变频控制等方面研究。E-mail: shenjie1@zju.edu.cn

通信联系人:叶云岳,男,教授。E-mail: yeyunyue@yahoo.com.cn

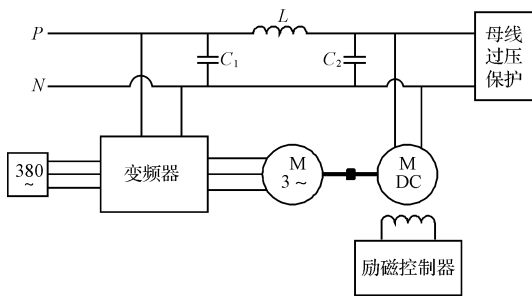


图 1 测试系统基本组成

测试系统基本组成如图 1 所示,系统采用并励直流电机作为电力测功机,与被测电机(三相感应电机)同轴相联。直流电机的电枢绕组输出端直接与变频器的直流母线相联。为了减小瞬时电流对系统的冲击,直流电机与变频器之间加了平波电抗器。同时,在直流电机侧与变频器侧各有电容进行稳压。

1.1 测试系统负载模拟

测试系统的模拟负载为直流电机作发电机运行工况下提供的电磁转矩(制动),由于同轴相联,其大小即为被测电机的负载转矩。为了分析直流电机电磁转矩的变化情况,下面从稳态和瞬态两方面进行分析。

1.1.1 电磁转矩稳态分析

直流电机电磁转矩公式:

$$T_{em} = C_T \Phi I_a \quad (1)$$

式中: C_T —转矩常数, Φ —气隙磁通, I_a —电枢电流。

从式(1)中可见, C_T 为常量,那么电磁转矩 T_{em} 的大小与气隙磁通 Φ 和电枢电流 I_a 的乘积成正比。如果在运行过程中,当系统进入稳态后,气隙磁通的大小基本一样,那么,电磁转矩 T_{em} 的大小仅和电枢电流 I_a 的乘积成正比。

直流电机电势公式:

$$E = C_e \Phi n \quad (2)$$

式中: C_e —电势常数, Φ —气隙磁通, n —电机转速。

从式(2)可见, C_e 为常量,电势 E 的大小与气隙磁通 Φ 和电机转速 n 的乘积成正比。从图 1 可见,在稳态下,直流电机电势大小等于变频器直流母线电压,该电压值是恒定值。同时,直流电机与被测电机同轴相联,其转速大小相等。当被测电机在变频器控制下作恒转速运行时,直流电机的气隙磁通 Φ 也基本恒定。

因此,模拟负载的大小可以通过调节直流电机的电枢电流实现,且两者基本为正比关系。

1.1.2 电磁转矩瞬态分析

由电磁转矩稳态分析,直流电机的电枢电流表征了模拟负载的大小,然而从图 1 可见,直流电机的电枢

电流不能直接调节,而是被动适应的。幸运的是,尽管直流电机的励磁大小在稳态时是不变的,但仍可以通过在加载或减载的过程中调节直流电机励磁大小以改变电枢电流的大小。

以加载过程为例。当模拟负载需要加大时,可以加大励磁电流的大小。由式(2)可见,在转速保持不变(加载瞬间转速不变)的情况下,励磁磁通增大后,电动势随之增大。从而由图 1 可见,直流电机的电枢电流也将随之变大。随着电枢电流的增大,模拟负载也随之加大。如果这种增大过程一直持续,最终将超过给定值,所以励磁必须减小,最终回复到稳态阶段。

综合上述分析,模拟负载的调节通过调节直流电机的瞬时励磁大小以间接调节电枢电流大小来实现,瞬态过程的变化与励磁调节器采用的控制方法有关。

1.2 励磁控制器

从电磁转矩的稳态和瞬态分析可见,直流电机的励磁在稳态时保持恒定不变,但表征负载大小的直流电机的电枢电流需要通过瞬态下励磁大小的改变来实现其大小的调节。因此,励磁控制器的控制目标为直流电机的电枢电流,控制变量为直流电机的励磁电流(励磁电压)大小。

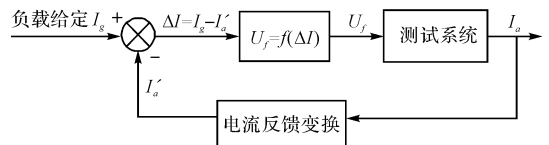


图 2 励磁控制器控制框图

I_g —负载给定; I_a —直流电机电枢电流; I_a' — I_a 线性变换后与 I_g 进行比较的反馈量; ΔI —误差值; U_f —控制励磁电压

励磁控制器的控制框图如图 2 所示。

励磁控制器的控制算法可以采用经典的 PI 控制算法。如果采用数字 PI 控制则需要对电枢电流进行采样和 A/D 变换;如果用模拟电路直接构建控制电路,相对复杂。因此,本研究采用 BangBang 控制算法作为励磁控制器的控制算法。该算法可采用模拟电路实现,且电路相对简单。

1.3 母线过压保护

当被测电机需要制动时,被测电机将工作在第 2 象限,作发电机运行。此时,系统的大部分机械能转移到直流母线的稳压电容上。如果电容的容量不是很大,这将引起母线电压升高,对整个系统的安全运行造成极大的危险。因此,测试系统必须加入母线过压保护电路,确保系统安全可靠的运行。

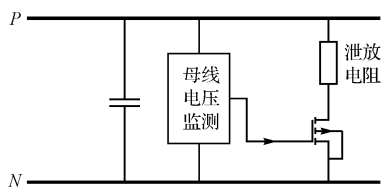


图 3 母线过压保护电路

母线过压保护电路采用斩波器构成能量的泄放回路,能在较短的时间内将系统的机械能释放掉。其基本结构如图 3 所示。当母线电压过高时,监测电路输出控制信号,驱动功率开关管导通,能量迅速得到释放。

1.4 系统能量流分析

该交流电机测试系统在系统进入稳态后,能够实现能量的自回馈,仅需从电网侧吸收很少的能量来补充系统的损耗。具体能量流如图 4 所示。

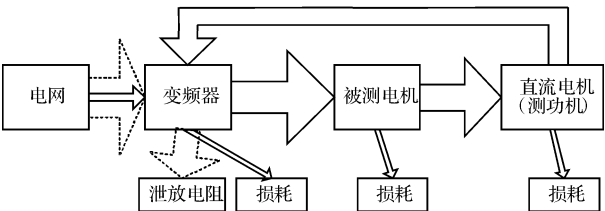


图 4 系统能量流示意图

图 4 中,箭头的大小表示传递能量的大小。其中,

实线箭头所示的是测试系统稳态运行时的能量流动,“电网”与“变频器”之间的虚线箭头是系统刚开始运行或系统加载过程中该两个部分之间的能量流动,“变频器”与“泄放电阻”之间的虚线箭头是系统制动或减载过程中该两个部分之间的能量流动。

从图中可见,当系统稳定运行时,大部分能量在系统内部流动,只有 3 部分的损耗需要从电网补充得到。这与不采用能量回馈的测试系统相比,大大节约了能源消耗;与向电网进行能量回馈的测试系统相比,能源消耗基本相当,但该系统结构简单,且对电网没有冲击和污染。

2 仿真与试验

2.1 仿真分析

为了验证上述交流电机测试系统的运行情况来研究,本研究在 Simulink 下建立了如图 5 所示的仿真模型进行仿真分析。仿真模型中使用变频器对被测电机进行恒速控制,转速控制给定为 1 500 r/min。模拟负载给定为直流电机的电枢电流大小,仿真中使用阶跃给定,1 s 之前给定为 0.5 A,之后给定为 1 A。控制策略采用 BangBang 控制,在仿真模型中采用一个滞环比较器,以此来控制励磁电流。被测电机的负载转矩等于直流电机的电磁转矩,忽略附加转矩的影响。

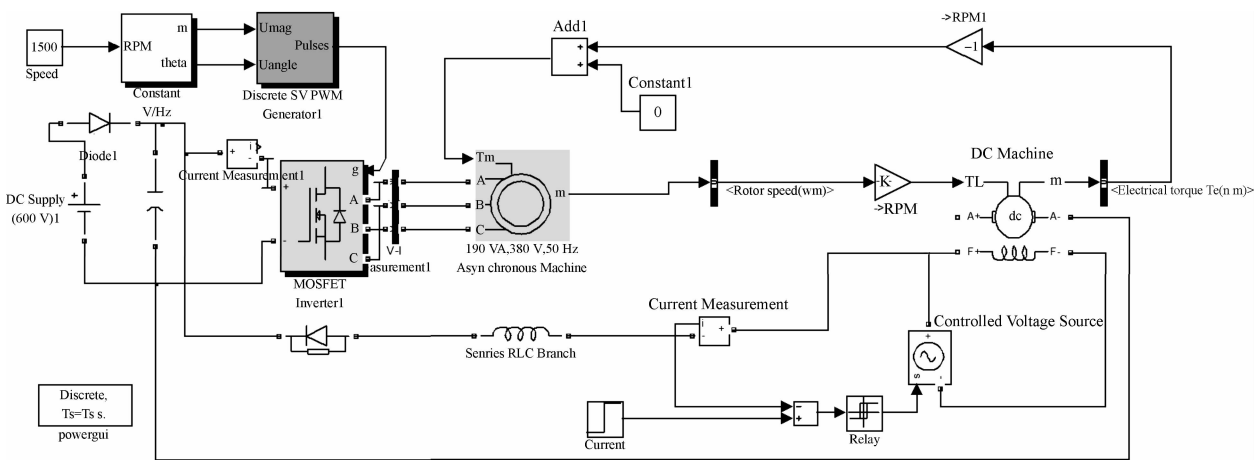


图 5 Simulink 仿真模型

Simulink 仿真结果如图 6 所示。

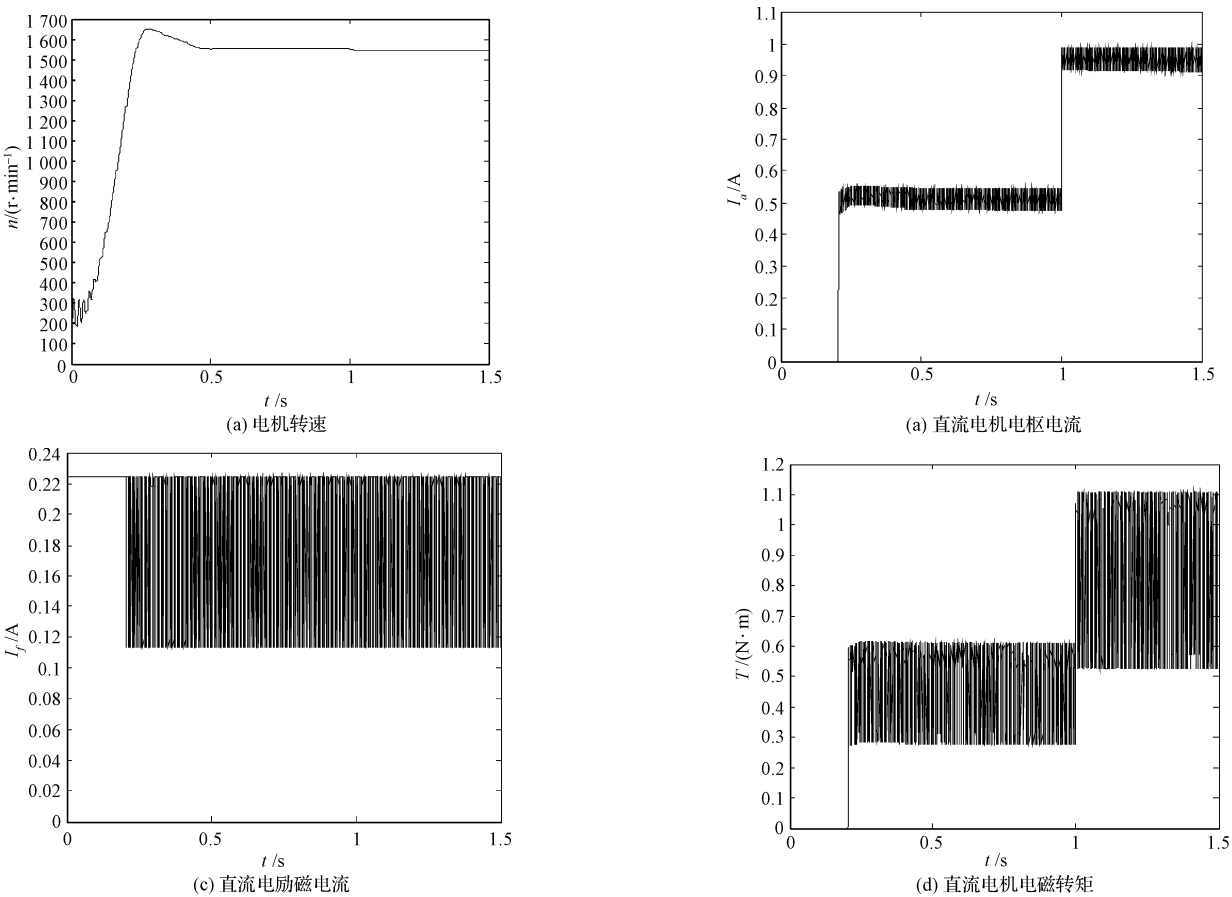


图 6 Simulink 仿真结果

电机转速曲线反映了被测电机从起动开始的转速变化情况。从曲线可见,被测电机进入稳态运行后能够保持转速恒定不变。在 1 s 时,当负载给定增大时,转速跌落较小,并能快速恢复。直流电机电枢电流曲线反映了作为模拟负载的直流电机的电枢电流在整个运行过程中的变化情况。从曲线可见,电枢电流在起动阶段能量尚未开始回馈,电流值为 0;能量开始回馈后,电流值给定值附近一个较小的范围内波动,符合设计要求,达到了控制目的。直流电机励磁电流曲线反映了作为模拟负载的直流电机的励磁电流大小,该物理量表征了直流电机内气隙磁通的大小。从曲线可见,在起动阶段电枢电流为 0,励磁电流控制器(Bang-Bang 控制器)饱和输出,励磁电流保持最大值;能量开始回馈后,励磁电流控制器斩波输出,励磁电流在一定范围内波动。直流电机电磁转矩曲线反映了作为模拟负载的直流电机的电磁转矩的变化情况,该值表征了模拟负载大小的变化情况。从前文分析可知,电磁转矩与电枢电流和气隙磁通(不计饱和时可由励磁电流表征)的乘积成正比,因此结果所示模拟负载的大小变化符合设计要求,达到了控制目的。

由于采用 BangBang 控制方法以及直流电机的励

磁线圈电感较小,励磁电流在能量回馈阶段没有达到理论分析中的所述的恒定值,在一定程度上影响了模拟负载(直流电机电磁转矩)大小的稳定性。如果采用 PI 控制方法或者选用励磁电感较大的直流电机,控制效果将可以得到改善。

2.2 实验测试

实验简化模型框图如图 7 所示,为了进一步验证测试系统的运行情况,根据图 7 所示框图构建了简化实验装置。

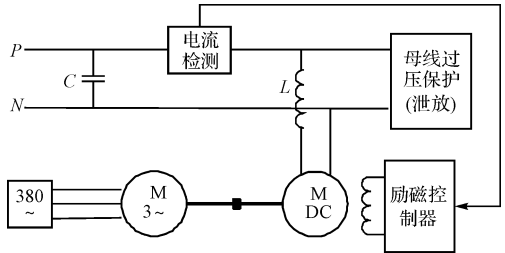


图 7 实验简化模型框图

该实验的目的是为了验证测试系统在稳态下,能否保证模拟负载的稳定,亦即能否保证直流电机的电枢电流恒定。因此,限于实验条件有限,本研究对测试系统进行了如图 7 所示的简化。

被测感应电机直接接入电网,在负载较轻(拐点之前)且被测电机的机械特性较硬的情况下,可近似认为被测电机的转速在不同负载下保持恒定。由于没有变频器,直流电机的能量不能直接向被测电机回馈,为了保持直流母线电压恒定,本研究将直流电机侧输出的能量通过泄放回路释放。

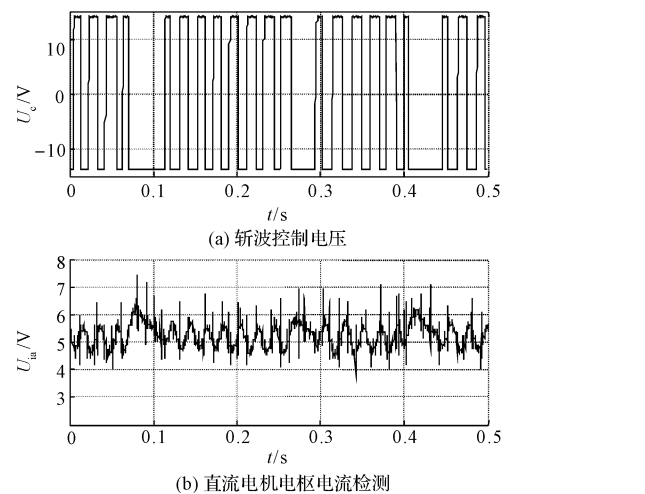


图8 第1组实验波形

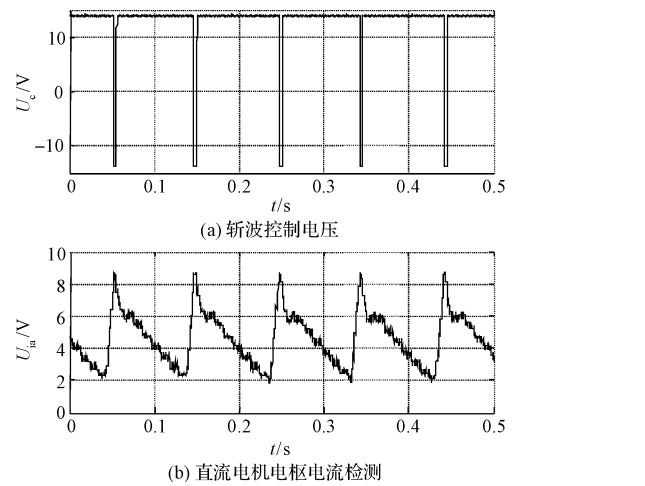


图10 第3组实验波形

以上4组测试的稳态波形如图8~11所示。其中上面的为直流电机励磁斩波控制电压波形,当控制电压为高电平($>10\text{ V}$)时励磁通电,反之励磁回路续流运行;下面的为直流电机电枢电流的检测电压波形,变换关系为 5 V 对应 0.5 A 比例变换。

实验中测得的电机转速如表1所示,被测电机空载转速为 $1\,490\text{ r/min}$ 。

表1 实验电机转速记录

实验序号	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	实验序号	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1	1 435	3	1 420
2	1 430	4	1 485

实验中共进行了4组不同稳态测试:①电枢电流给定 0.5 A (相当于检测值 5 V),母线电压限制 150 V ;②电枢电流给定 0.5 A (相当于检测值 5 V),母线电压限制 210 V ;③电枢电流给定 0.8 A (相当于检测值 8 V),母线电压限制 210 V ;④电枢电流给定 0 A (相当于检测值 0 V),母线电压限制 210 V 。

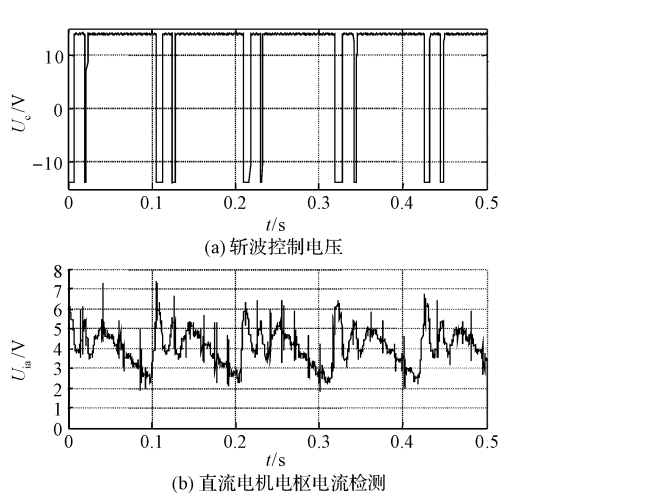


图9 第2组实验波形

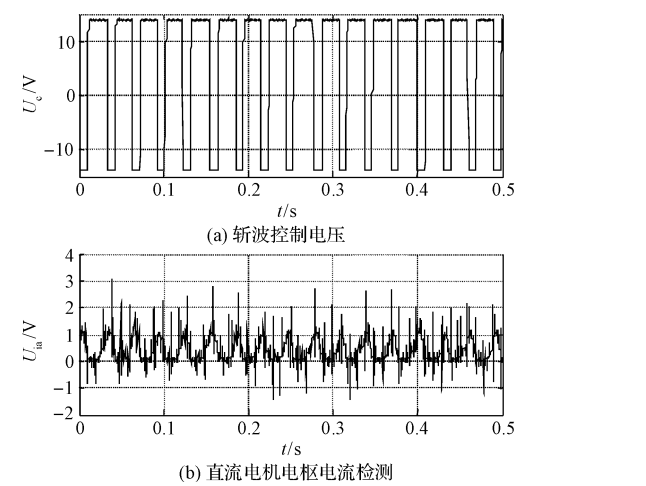


图11 第4组实验波形

从转速记录可见,电机转速随着负载增大而有所下降,但下降幅度不大。

从实验波形可见,测试系统基本能够运行在给定的电枢电流状态下。比较1、2两组可见,当母线限压提高后,电枢电流波动变大,这与泄放电阻放电太快有关;比较2、3两组可见,当电枢电流给定变大后,电枢电流的波动也变大,这与被测电机的转速波动有关。

3 结束语

能量自回馈的交流电机测试系统,其结构简单、控制方便、成本较低,其最大的特点是实现了系统内部能量的自回馈,节约能耗,同时消除了能量回馈对电网的

影响。通过仿真与实验,验证了该测试系统的可行性与稳定性,在交流电机测试领域可以推广使用。

当然,本研究用直流电机作为系统的电力测功机,由于其存在的固有缺陷—电刷、换向器问题,该测试系统无法用于高速电机的测试。因此,本研究采用无刷直流电机或交流电机作为电力测功机,实现能量的自回馈是今后继续研究的方向。

参考文献 (References):

- [1] 李宗帅,董 春,刘 颜. 国内外电力测功机发展现状[J]. 电机与控制应用,2007,34(5):1-4.
- [2] 孙玉昆. 变频电机测试系统[J]. 变频器世界,2009(9):97-99.
- [3] FINLEY W R, HODOWANEC M M, HUSSAIN K S, et al. Proper selection of induction motor tests[C]// Pulp and Paper Industry Technical Conference. Charleston: [s. n.], 2003:9-20.
- [4] JORDAN H E, ZOWARKA R C, HOTZ T J, et al. In duc-

tion motor performance testing with an inverter power supply: part 1[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,2007,43(1):242-245.

- [5] JORDAN H E, ZOWARKA R C, HOTZ T J, et al. Induction motor performance testing with an inverter power supply: part 2[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,2007,43(1):275-278.
- [6] 叶双,郭耀华. 变频器在电机测试平台的应用[J]. 电机与控制应用,2007,34(7):54-56.
- [7] 杨家强,黄进. 一种基于 PWM 整流器和异步电机直接转矩控制的新型动态电力测功机[J]. 仪器仪表学报,2005,26(12):1123-1128.
- [8] 李茂森. 交流测功机在电机性能测试中的应用[J]. 电机与控制应用,2005,32(8):62-64.
- [9] 李茂森. 交流测功机在电机性能测试中的应用(续)[J]. 电机与控制应用,2005,33(9):48-50.
- [10] 刘述喜,李 山,蒋红云,等. 电力测功机能量回馈单元的设计[J]. 电机与控制应用,2009,36(11):61-65.

[编辑:李 辉]

(上接第 858 页)

4 结束语

通过对该无线网络模型仿真结果的分析可知,该无线网络仿真模型可以模拟无线网络控制系统中传感器、控制器及执行器之间的通信。在这个基础之上,记录节点 1 和节点 15 之间通信的发送和接收信息时间,就可以为研究无线网络控制系统网络延时和数据丢包率之间的数学模型做好准备。

参考文献 (References):

- [1] 彭丽萍,岳 东. 无线网络控制系统研究[J]. 控制工程,2006,13(5):481-484.
- [2] 郭小华. 基于无线传感器网络的无线网络控制系统研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2007.
- [3] COLANDAIRA J, SANLON W, IRWIN G. Understanding wireless networked control systems through simulation[J]. **IEEE Computing and Control Engineering**, 2006, 16(2):26-31.
- [4] LIU X H, GOLDSMIH A. Wireless Medium Access Control

in Networked Control Systems[C]//Proceedings of the 2004 American Control Conference. Boston: [s. n.], 2004:3605-3610.

- [5] KAWKA P, ALLEYNE G. Stability and Control of Wireless Networked Systems[C] //Proceedings of the 2005 American Control Conference. Portland:[s. n.], 2005:2953-2959.
- [6] 王 艳,张东彪,纪志成. 无线网络控制系统建模与鲁棒控制分析[J]. 系统工程与鲁棒控制分析,2009,31(9):2189-2194.
- [7] 彭丽萍,彭 晨,岳 东. 无线网络环境下控制系统的仿真研究[J]. 工业控制计算机,2007,20(1):43-45.
- [8] 郑相全等. 无线自组网技术使用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [9] 邱占芝,张庆灵,杨春雨. 网络控制系统分析与控制[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [10] 王 岩,孙增圻. 网络控制系统分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [11] 王 磊,吴怀壮,徐 军,等. 基于无线网络的电机控制器设计与仿真[J]. 测控技术,2009,28(2):55-57,61.

[编辑:李 辉]