

无速度传感器的转子变频调速装置

江友华, 曹以龙, 唐 忠

(上海电力学院 计算机学院, 上海 200090)

摘要: 提出了一种新的无速度传感器测速方法, 该方法是通过转子变频调速装置主电路拓扑的电流流向进行分析, 然后根据斩波器开通和闭合时刻的等效电路进行分析和建模, 得到斩波电抗器两端电压与转差率之间的关系, 从而间接得到电机的实际速度。该方法不受环境、机械振动等因素影响, 测量快速、准确, 可作为速度环的速度反馈信号。最后通过实验进行了验证, 表明该无速度传感器的测速方法是可行、有效的。

关键词: 无速度传感器; 转子变频; 斩波; 拓扑; 等效电路

中图分类号: TM 921.51

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)03-0064-04

0 引言

对于风机、水泵等调速范围不大、系统动态性能要求不高的场合, 性价比较高的调速技术应该是斩波串级调速^[1-6]。由于速度检测作为斩波串级调速的双闭环控制尤其重要^[7-9], 本文提出一种新型无速度传感器的斩波串级调速测速方法, 其原理是通过测量斩波电感两端的电压来计算出电机实际速度, 这种方法不受环境、机械振动及斩波的影响, 具有快速、准确的特点。

1 工程实际中测速方案及面临的问题

目前, 工业现场使用的斩波串级调速方法有3种。

1.1 转子整流电压的间接测速法

根据串调原理可知, 绕线电机线电压同其开路电压之间的关系可用下式表达:

$$u_{ac} = s \times U_{10} \quad (1)$$

其中, s 为转差率; U_{10} 为绕线电机开路电压; u_{ac} 为绕线电机转子线电压。

又根据三相整流原理可知, 其直流侧电压同交流侧电压之间存在以下关系:

$$U_{rdc} = 1.35 u_{ac} \quad (2)$$

其中, U_{rdc} 为绕线电机转子整流电压。

由式(1)(2)可得:

$$U_{rdc} = 1.35 s U_{10} \quad (3)$$

因此得到转子整流电压, 就可以得到转差率 s , 从而得到转速。但斩波串级调速由于斩波使得转子整流电压已经不是一个平滑稳定的值, 而是脉动的, 其波形如图1所示。

由图1可知, 要准确得到转子整流电压的值, 需要加很大电容进行滤波, 才能使其比较平稳, 但其引来的一个问题是, 延时非常大, 不能满足双闭环调节

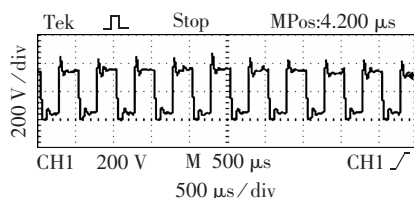


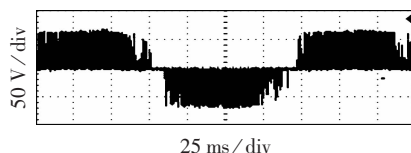
图1 斩波串级调速的转子整流电压

Fig.1 Rectified voltage of rotor in chopper cascade speed control system

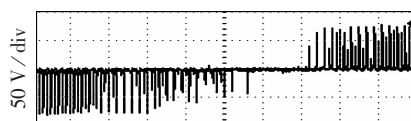
的快速性, 只能用于速度显示。

1.2 转子电压、电流过零点脉冲测速法

绕线电机速度比较高时, 转子电压比较小, 电流比较大, 测速时以转子电流过零点脉冲来计算电机速度; 绕线电机速度比较低时, 转子电压比较大, 电流比较小, 测速时以转子电压过零点脉冲来计算电机速度, 因此在这两者之间进行速度测量切换时, 不能平缓过渡, 会产生很大的速度波动及电流冲击, 经常造成电机过流跳闸; 此外, 受到斩波的影响, 转子侧电压是脉冲列正弦波形, 如图2(a)(b)所示, 因此在1个周期中会产生多个过零点脉冲, 如图2(c)所示; 由于受到二极管整流换相重叠影响, 转子电流过零点死区比较大, 如图3(a)所示, 这样在过零点处就会得到多个过零点脉冲, 如图3(b)所示。因此, 通过转子电压、电流过零点来进行测速脉冲在工业中没有得到应用。



(a) 转子电压波形



(b) 转子电压波形(放大)

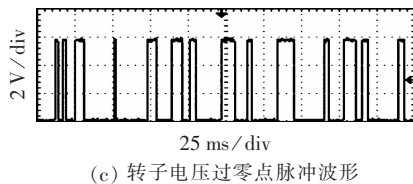
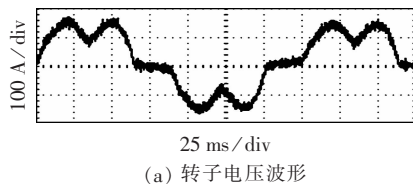
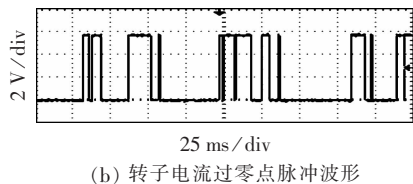


图 2 转子电压及过零点脉冲波形

Fig.2 Waveforms of rotor voltage and zero-crossing pulses



(a) 转子电压波形



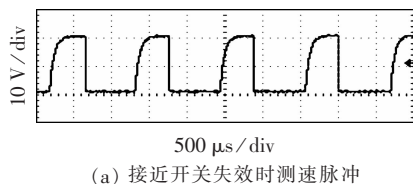
(b) 转子电流过零点脉冲波形

图 3 转子电流及过零点脉冲波形

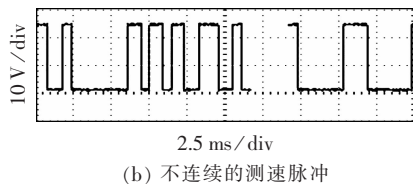
Fig.3 Waveforms of rotor current and zero-crossing pulses

1.3 码盘测速法

目前,工程实际中基本上都采用码盘测速方法。即在电机拷贝轮上安装一个码盘,旁边有接近开关,通过测量电机旋转一周所需时间来计算速度。但这种测速方法的缺点是随着电机运行的振动及工业灰尘的污染等多种因素,往往会造成测速接近开关不能正常工作,从而使得脉冲丢失或者脉冲电压不正常现象,如图 4 所示,致使斩波串调装置不能进行调速,影响企业的生产和节能。此时通常是检修工人在电机全速运转的情况下,通过工具对测速接近开关进行调节,不仅调节效果不佳,而且比较危险。



(a) 接近开关失效时测速脉冲



(b) 不连续的测速脉冲

图 4 不正常的测速脉冲

Fig.4 Abnormal tachometer pulses

2 无速度传感器测速原理

2.1 拓扑介绍

斩波串调主电路如图 5 所示,图中主要由整流器、斩波电路及晶闸管逆变电路构成。从图 5 中还可

以看出,内馈电机定子绕组直接接 3~10 kV 高压电网,转子电压 $U_r = sU_{i0}$ (U_{i0} 为转子开路电压),通常情况下 $U_{i0} < 1000$ V,而风机、水泵等要求调速范围在 30%~40% 左右 ($s = 0.3 \sim 0.4$),所以 $U_r < 400$ V,这样与之相联的 PWM 逆变器也为低压变频器。能量流如图 5 箭头所示方向,即转子整流,经过斩波电路斩波,最后通过 PWM 逆变器馈送到反馈调节绕组,进入内馈电机^[1-2]。

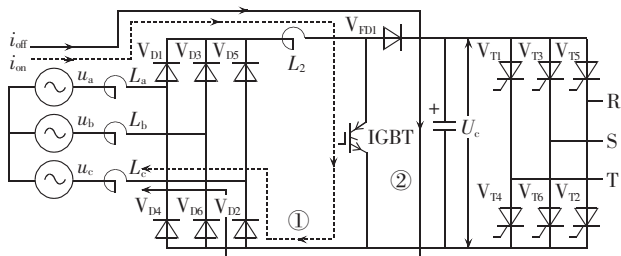
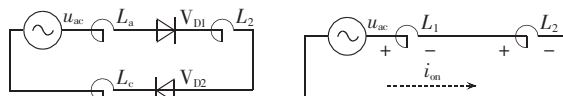


图 5 斩波串调主电路拓扑

Fig.5 Main circuit topology of chopper cascade speed control system

2.2 算法分析

当 IGBT 开通时,其电流流向如图 5 虚线所示,电流用 i_{on} 表示,此时电流等效电路如图 6 所示。



(a) 电流通路等效电路 (b) 电流通路等效电路 (忽略二极管)

图 6 当 IGBT 开通时,电流流向及等效电路示意图

Fig.6 Current direction and equivalent circuit when IGBT is on

由图 6 电路拓扑可得^[10-16]:

$$u_{ac} = L_1 \frac{di_{on}}{dt} + L_2 \frac{di_{on}}{dt} = (L_1 + L_2) \frac{di_{on}}{dt} \quad (4)$$

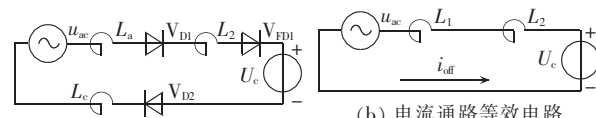
$$\frac{di_{on}}{dt} = \frac{u_{ac}}{L_1 + L_2}$$

其中, L_1 为内馈电机等效漏感; L_2 为斩波电抗器电感; i_{on} 为 IGBT 开通时电流。

由式(4)可得:

$$U_{L_{2m}} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} \times u_{ac} \quad (5)$$

当 IGBT 关断时,其电流流向如图 5 实线所示,电流用 i_{off} 表示,此时电流等效电路如图 7 所示。



(a) 电流通路等效电路

(b) 电流通路等效电路 (忽略二极管)

图 7 当 IGBT 关断时,电流流向及等效电路示意图

Fig.7 Current direction and equivalent circuit when IGBT is off

由图 7 电路拓扑可得:

$$u_{ac} + L_1 \frac{di_{off}}{dt} + L_2 \frac{di_{off}}{dt} = u_{ac} + (L_1 + L_2) \frac{di_{off}}{dt} = U_c$$

$$(L_1 + L_2) \frac{di_{off}}{dt} = U_c - u_{ac} \quad (6)$$

$$\frac{di_{off}}{dt} = \frac{U_c - u_{ac}}{L_1 + L_2}$$

其中, U_c 为储能电容两端母线电压。

由式(6)可得:

$$U_{L2off} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \times (U_c - u_{ac}) \quad (7)$$

由式(5)可得:

$$\frac{L_2}{L_1 + L_2} = \frac{U_{L2on}}{u_{ac}} \quad (8)$$

由式(7)(8)可得:

$$U_{L2off} = \frac{U_{L2on}}{u_{ac}} \times (U_c - u_{ac}) \quad (9)$$

$$U_{L2off} = \frac{U_{L2on}}{u_{ac}} \times U_c - U_{L2on} \quad (9)$$

根据式(5)(9)可得:

$$U_{L2on} + U_{L2off} = \frac{U_{L2on}}{u_{ac}} \times U_c \quad (10)$$

由此可得:

$$u_{ac} = \frac{U_{L2on}}{U_{L2on} + U_{L2off}} \times U_c \quad (11)$$

由式(1)(2)(11)可知:

$$s = \frac{U_{L2on}}{U_{L2on} + U_{L2off}} \times \frac{U_{on}}{1.35 U_{on0}} \quad (12)$$

又因为 $s = (n_0 - n) / n_0$, 则:

$$n = n_0(1 - s) \quad (13)$$

由此可知, 根据式(12)(13)可以计算出实际速度。

3 实验

根据无速度传感器测速原理, 在工厂进行了实验。实验电机参数如下: 电机型号-YRKK560-6, 额定功率/电压/功率因数 1000 kW/10 kV/0.89, 额定电流 72.5 A, 转子开路电压 1332 V, 额定转子电流 461.1 A, 额定转速 990 r/min。

图 8(a) 是斩波电抗器两端电压波形, 由图可知, 其和斩波特性有关; 图 8(b) 是斩波电流波形, 由图可知, 当斩波器开通时, 斩波电流线性上升, 斩波电抗器储能, 当斩波器关断时, 斩波电流线性下降, 斩波电抗器释放能量; 图 8(c) 是斩波器两端电压波形, 由图可知, 当斩波器开通时, IGBT 管压降小, 当斩波器关断时, IGBT 两端电压值等于后端母线储能电容之间的电压; 图 8(d) 是母线储能电容之间的电压波形, 从波形可以看出, 储能电容电压比较稳定, 有少许波动, 这是因为后端晶闸管有源逆变瞬时电压有波动形成的; 图 8(e) 是转子整流电压波形, 从波形可以看出, 其整流电压不是普通整流电压, 而是受到斩波的影响; 图 8(f) 是转速阶跃时, 实际转速变化曲线, 从该曲线可以看出, 本文采用的无速度测速方法能够很好地测量出电机转速。

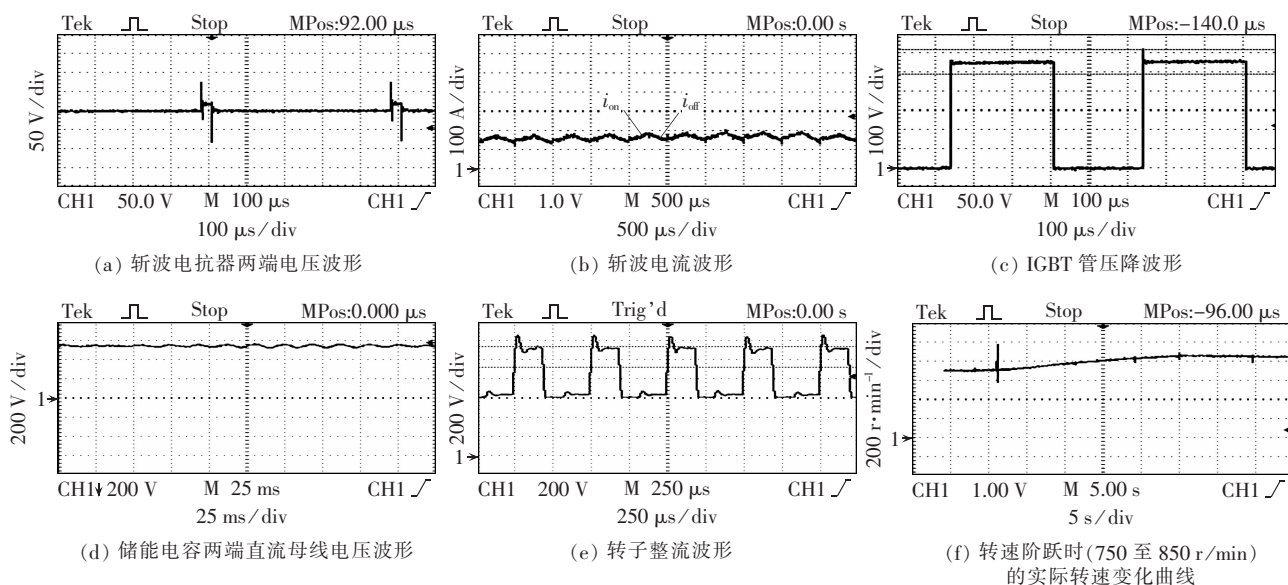


图8 实验波形

Fig.8 Experimental waveforms

4 结论

目前用于内馈电机测速方法有多种, 如转子电流、电压过零点间接测速, 但是由于斩波及二极管整流换相重叠角的影响, 其过零点脉冲往往产生误信号, 致使测速不准。因此目前工业现场使用最多的还是测速码盘, 但是这种方法容易受环境、振动等影

响, 从而经常出现测速脉冲断线故障。在此基础上, 本文提出了测量斩波电抗器两端电压波形来间接计算电机实际速度的方法, 它不受环境、振动等影响, 也不受斩波器的干扰, 能够及时准确地算出电机实际速度, 从而作为速度环的速度反馈信号。

参考文献:

[1] 马小亮, 王春杰. 一种新的中压电机调速法——转子变频调速

- [J]. 电力电子技术,2004,38(3):3-5.
- MA Xiaoliang, WANG Chunjie. A new medium voltage speed-variable drive for fans and pumps-rotor side variable frequency drive[J]. Power Electric Technology, 2004, 38(3): 3-5.
- [2] 马小亮,王春杰. 用中功率低压变频器调节大功率风机和泵用中压电机转速[J]. 电工技术杂志,2003,27(10):50-52.
- MA Xiaoliang, WANG Chunjie. A new high power medium voltage variable speed drive for fan or pump by using a medium power low voltage IGBT inverter[J]. Electrical Technology Magazine, 2003, 27(10): 50-52.
- [3] 王春杰. 大功率异步电机转子变频调速系统及其控制策略研究[D]. 天津:天津大学电气与自动化工程学院,2005.
- WANG Chunjie. Research on rotor-side variable frequency drive and its control strategy of high power induction motor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [4] 何守光,邓志发. 内反馈串级调速技术在电厂的应用[J]. 中国电力,2001,34(9):20-22.
- HE Shouguang, DENG Zhifa. Application of cascade speed control technology with internal feedback in power plant[J]. Electric Power, 2001, 34(9): 20-22.
- [5] 王清灵,顾军. 矿井提升机斩波串级调速系统的研究[J]. 工矿自动化,2008,31(6):19-22.
- WANG Qingling, GU Jun. Research of chopping cascade speed-regulation system of mine hoist[J]. Industry and Mine Automation, 2008, 31(6): 19-22.
- [6] 甄亚,王兵树,殷利杰. 斩波串级调速系统功率因数的分析[J]. 电机与控制应用,2009,36(2):25-29.
- ZHEN Ya, WANG Bingshu, YIN Lijie. Analysis of power factor for chopper cascade speed regulation system[J]. Electric Machines and Control Application, 2009, 36(2): 25-29.
- [7] RUBIRA S D, MCCULLOCH M D. Control method comparison of doubly fed wind generators connected to the grid by asymmetric transmission lines[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2000, 36(4): 986-991.
- [8] DATTA R, RANGANATHAN V T. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine—a comparison with alternative schemes[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17(3): 414-421.
- [9] 郭卫农,陈坚. 基于状态观测器的逆变器数字双环控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(9):64-68.
- GUO Weinong, CHEN Jian. Study on digital dual-loop control for inverters based on state-observe[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 64-68.
- [10] 姜萍,王兵树,林永君. 斩波串级调速系统的自抗扰控制[J]. 电机与控制应用,2009,36(6):17-20.
- JIANG Ping, WANG Bingshu, LIN Yongjun. Auto disturbance rejection control for chopper cascade speed control system[J]. Electric Machines and Control Application, 2009, 36(6): 17-20.
- [11] GUO L, HUNG J Y, NELMS R M. PID controller modifications to improve steady-state performance of digital controllers for buck and boost converters[C]//17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2002). Los Cabos, Mexico: IEEE, 2002: 381-388.
- [12] 江友华,宁宇,吴国祥. 基于状态空间平均模型的全数字双闭环斩波内馈串级调速系统[J]. 控制理论与应用,2007,24(1):109-112.
- JIANG Youhua, NING Yu, WU Guoxiang. Study on digital dual closed-loop chopper inner-feed cascade variable speed drive system based on state-space averaging model and its application[J]. Control Theory and Applications, 2007, 24(1): 109-112.
- [13] LEE P W, LEE Y S, CHENG O K W, et al. Steady-state analysis of an interleaved boost converter with coupled inductors[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 787-795.
- [14] 马小亮,王春杰. 一种新的斩波器峰值电流两点式控制[J]. 电工技术学报,2005,20(12):80-85.
- MA Xiaoliang, WANG Chunjie. A new peak current two-point control for chopper[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(12): 80-85.
- [15] MA Keyue. One-cycle control of switching converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1995, 10(6): 625-633.
- [16] HOSHI N, NAKAGAWA K. A compact type slip-power recovery system with sinusoidal rotor current for large pump/fan drives[J]. Proceedings PIEMC, 2000, 2(8): 774-779.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

江友华(1974-),男,江西南城人,副教授,博士,研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用(E-mail: jyhua0306@sina.com)。

Sensorless rotor variable-frequency device

JIANG Youhua, CAO Yilong, TANG Zhong

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: A sensorless speed detection technique is presented for the rotor variable-frequency device. The current flow direction of main circuit topology is studied and the equivalent circuit is analyzed and modeled according to the chopper switching on and off times, based on which the relationship between the chopper voltage and the rotation difference rate is obtained and the actual speed of motor is indirectly achieved by measuring the chopper voltage. The proposed detection method is fast, accurate and immune to environment and mechanical vibration, and the measurement can be used as the feedback signal of speed control loop. Experiment proves its feasibility and effectiveness.

This work is supported by the Key Scientific and Technological Project of Shanghai (08160510600) and the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (10YZ162).

Key words: sensorless technique; rotor variable frequency; chopper; topology; equivalent circuit