

双馈电动机功率因数控制的研究

杜庆楠 李亚民

(河南理工大学 电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 分析双馈电动机的等效电路和电压电流平衡方程,理论推导双馈电动机的功率表达式,得出双馈电动机功率因数主要受定子电压和转子电流两方面的限制。采用双变量控制原理,实现交-交变频器自然无环流工作,并搭建以STM32F103ZE为控制芯片的六脉波双变量交-交变频双馈调速系统。通过实验研究在转子电压不变的情况下,定子电压对双馈电动机功率因数的影响,分析得出增大定子电压的幅值,定子电流先减小后增大,定子侧功率因数先增大后减小,且定子电流最小点为功率因数最高点的结果。可以通过控制定子电压实现对双馈电机功率因数控制的结论。

关键词: 双馈电动机; 功率因数; 交交变频; 双变量; 六脉波

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8099

Study on power factor control of doubly-fed motor

Du Qingnan Li Yamin

(School of electrical engineering and automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Analysis of double fed motor equivalent circuit and current and voltage balance equation, deduce the Power formula of double fed motor, The double fed motor power factor from two aspects of stator voltage and rotor current limit. The double variable control principle is adopted to realize the natural circulation free circulation of the AC/AC converter, based on STM32F103ZE for six-wave bi-variants AC-AC frequency conversion speed regulation system. The impact of stator voltage on stator power factor of double-fed motor was studied experimentally. Analysis shows that the amplitude of stator voltage increases, the stator current first decreases and then increases, the stator side power factor first increases and then decreases, and the stator current is the result of the highest point of the power factor, and conclusions was derived that power factor of the motor can be adjusted by controlling stator voltage.

Keywords: doubly-fed motor; power factor; AC-AC converter; bi-variable; six pulse

1 引言

在工业生产中,绕线式异步电动机是主要的耗能设备,现代绕线异步电机主要采用双馈调速方式。双馈调速系统是转子侧接变频器,变频器根据双变量控制原理实现自然无环流工作,定子侧接工频电源进行调速的一种变频控制系统,包含电机自身和交流励磁控制系统。与其他异步电动机调速系统比,双馈调速属于转差功率回馈型调速方式,可将转差功率回收利用,具有调速性能好、效率高、功率因数可调节等优点,这些优点在工业发展中很重要,有利于电动机运行特性的研究。依据双变量控制原理搭建STM32F103ZE为控制芯片的六脉波交交变频双馈调速系统实验平台,实验研究双馈电动机的功率因数控制方法^[1-2],研究定子电压、转子侧电流和定子侧功率因数的关系。

2 双变量交交变频器工作原理

交交变频器通过控制晶闸管的触发脉冲角 α 来实现其功能。通常采用的余弦交截法对触发脉冲角 α 进行求取以实现晶闸管的控制,不考虑负载等对换流点的影响。余弦交截法是指求取基准波与同步余弦波的交点为触发脉冲点来控制晶闸管导通实现自然无环流换相工作的方法。双变量控制理论是指在单变量控制触发脉冲角 α 理论上,对触发脉冲宽度 β 进行控制,通过加入触发脉冲持续时间来实现交交变频器自然无环流控制^[3]。

双变量控制理论利用余弦交截法,当晶闸管正组触发,电流为正,取基准电压波和同步余弦波的下降沿焦点为触发脉冲点,由于其要导通时的晶闸管触发电压比前一个导通晶闸管的电压大,使得前一个导通晶闸管承受反向电压而自然关断,实现自然无环流换相工作。当电流过零点处

时,控制电流在一组反并联的晶闸管中实现自然换流。当电流为负时,控制晶闸管反组触发,其触发脉冲角的求取方法是基准波与同步余弦波上升沿交点,其要导通的晶闸管触发电压要比先前导通后的晶闸管电压小,使先前导通的晶闸管承受反向电压而关断,实现自然无环流换相^[4]。

3 双馈电动机的数学模型

画出在转子侧加 \dot{U}_r/s 附加电动势的双馈异步电动机电路如图1所示。

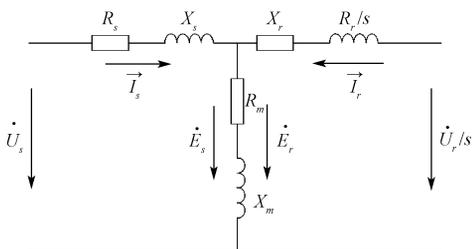


图1 附加 \dot{U}_r/s 的异步电机等效电路

式中: \dot{U}_r/s 转子侧附加电压, \dot{E}_r 为转子感应电动势, R_r 为转子电阻, X_r 为转子漏电抗, s 为转差率, X_m 是励磁电抗。

双馈电机稳定运行时,列出如下电压电流平衡方程组^[5-6]:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = I_s(R_s + jX_s) - \dot{E}_s \\ \frac{\dot{U}_r}{s} = I_r \frac{R_r}{s} + jX_r I_r - \dot{E}_r \\ -\dot{E}_s = -s\dot{E}_r = \dot{E}_1 + \dot{E}_0 \\ \dot{E}_1 = jX_m I_s \\ \dot{E}_0 = jX_m I_r \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)解得双馈异步电动机的功率式(2)如下。

$$\begin{aligned} P_s + Q_s &= 3 \dot{U}_s I_s^* = 3 \dot{U}_s \left(\frac{\dot{U}_s - \dot{E}_0}{jX_s} \right)^* = \\ 3 \dot{U}_s \frac{(\dot{U}_s - \dot{E}_0)^*}{(jX_s)^*} &= 3 \dot{U}_s \frac{\dot{U}_s^* - \dot{E}_0^*}{-jX_s} = 3j \frac{|\dot{U}_s|^2 - \dot{U}_s \dot{E}_0^*}{X_s} = \\ \frac{3j}{X_s} [|\dot{U}_s|^2 - |\dot{U}_s| (|\dot{E}_0| \cos\alpha - j|\dot{E}_0| \sin\alpha)^*] &= \\ \frac{3j}{X_s} [|\dot{U}_s|^2 - |\dot{U}_s| (|\dot{E}_0| \cos\alpha + j|\dot{E}_0| \sin\alpha)] &= \\ \frac{3j}{X_s} (|\dot{U}_s|^2 - |\dot{U}_s| |\dot{E}_0| \cos\alpha - j|\dot{U}_s| |\dot{E}_0| \sin\alpha) &= \\ \frac{3|\dot{U}_s| |\dot{E}_0| \sin\alpha + j \left(\frac{3}{X_s} |\dot{U}_s|^2 - \frac{3}{X_s} |\dot{U}_s| |\dot{E}_0| \cos\alpha \right)}{X_s} \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可得,双馈电动机的有功功率和无功功率的表达式为式(3)和(4)如下:

$$P_s = \frac{3|\dot{U}_s| |\dot{E}_0| \sin\alpha}{X_s} \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{3}{X_s} |\dot{U}_s|^2 - \frac{3}{X_s} |\dot{U}_s| |\dot{E}_0| \cos\alpha \quad (4)$$

从式(3)和(4)可以看出双馈异步电动机的功率因数主要受定子电压和转子感应电动势两个方面的影响。转子感

应电动势或定子电压的改变,都可以使定子侧功率因数发生变化。异步电动机转子侧感应电动势受转子侧电流的控制,在转子侧附加电动势不变的情况下,转子侧电流不变。保持转子侧附加电动势大小不变的前提下,单独考虑定子电压影响功率因数情况,或在定子电压不变的情况下,转子电压对电动机功率因数的影响^[7-9]。本文据此实验分析在转子电压不变的情况下,定子电压对双馈异步电动机定子侧功率因数的影响。

4 实验研究

搭建基于芯片 STM32F103ZE 的六脉波双变量交-交变频双馈调速系统实验平台^[11-13]。实验用定转子额定电压为 380 V 和 110 V,定转子额定电流为 6.3 A 和 17 A,额定功率为 2.8 kW,电感大小为 0.23 H 和电阻大小为 1.43 的 JR51 绕组电机。负载用 0.85 kW 额定功率和 230 V 额定电压的直流发电机。用 Dso2902_512 双通道数字示波器进行实验的数据存储和频谱分析。采用降压软启动工作方式,当双馈异步电动机稳定启动后,实验分析双馈电动机的功率因数受定子电压的影响。保持转子电压的幅值,调节定子侧电压的幅值,采集定子侧电流与电压和关系图,分析波形中定子电压与定子电流的角度和定子电流幅值变化。由于篇幅的限制,本文只对电机转子侧接 6 分频和 9 分频变频电压时进行分析。

图2为转子侧接 44 V 变频电源,定子接 138 V 电压时测得的定子电压和定子电流关系图。由图形分析它们之间的角度,可以看出定子电流超前于定子电压 67°左右。

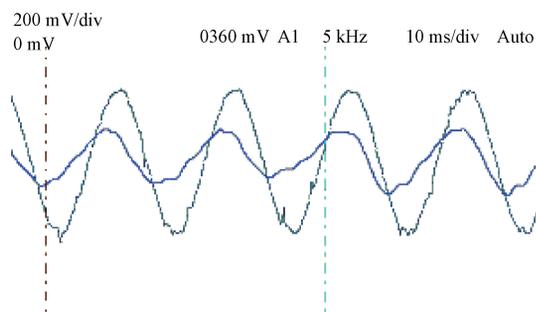


图2 定子电压为 138 V 时定子电压电流关系

图3是定子电压幅值增大到 169 V 时测得的定子电压和定子电流的关系图。分析关系图,可以看出,定子电压与定子电流的功率因数角为 0°左右。并结合图2和图3,分析可知,不仅功率因数角变化了,定子电流的大小也改变了。

图4是定子侧电压为 215 V 时的定子侧电压电流的关系图。由关系图可知定子侧功率因数角为 28°左右。结合关系图2和图3分析知,定子功率因数角由超前变成了滞后。

综合以上给出的实验图形和分析得出的结论,可以看

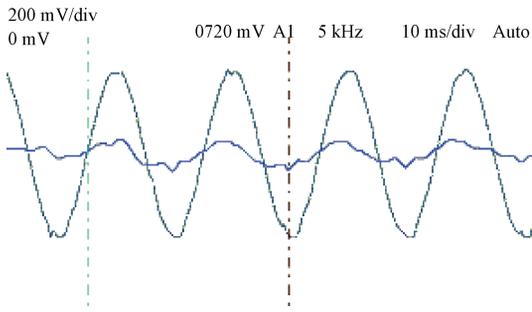


图 3 定子电压为 169V 时定子电压电流关系

出,在转子侧接 44 V 变频电源不变的前提下,通过改变定子电压幅值分别为 138 V;169 V 和 215 V 逐一增大过程中,定子侧电流大小改变了和定子侧功率因数角也发生了变化。定子测功率因数角由超前变成了滞后。由此依据进一步实验验证定子电压控制定子功率因数的结论的正确性。

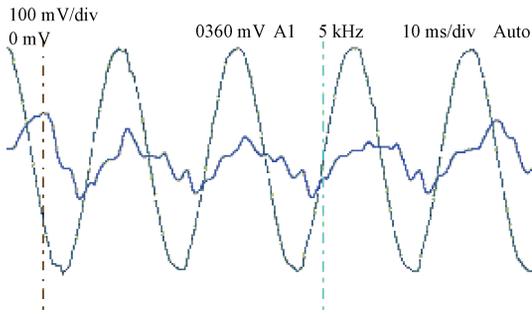


图 4 定子电压为 215 V 时定子电压电流关系

根据以上方法,在转子侧接 6 分频 44V 变频电源,并在双馈电动机稳定运行的情况下,进一步实验研究双馈电动机功率因数控制方法。采集随定子侧电压 U_{sA} 的幅值变化的 13 个工作点,记录定子电压 U_{sA} 和定子电流 I_s 如表 1 所示。根据表 1 定子电压与定子电流的值利用 MATLAB 软件拟合出关系曲线如图 5 所示。

表 1 6 分频转子电压为 44 V 时的实验数据

U_{sA}/V	I_{sA}/A	I_{sB}/A	I_{sC}/A	I_{rA}/A
54.3	2.5	2.5	2.5	9.8
62	2.3	2.3	2.3	9.8
72.5	2.1	2	2.1	9.6
87.5	1.9	1.8	1.9	9.2
102	1.5	1.5	1.6	9.3
115.5	1.6	1.3	1.5	9.2
132.3	1.4	1.2	1.3	8.8
146.4	1.2	1.1	1.2	8.7
163	0.9	0.8	0.9	8.6
181.4	0.9	0.8	0.8	8.5
191.5	0.8	0.8	0.8	8.4
207.4	0.9	0.9	0.8	8.3
216.2	1.2	1.2	1.2	8.1

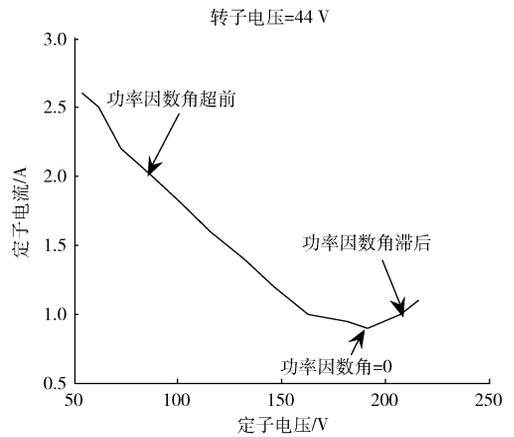


图 5 6 分频时定子电压与电流的关系

分析图 5 并结合先前实验图形和已经分析出来的结论,从中可以看出定子电流和定子电压的变化关系基本呈 V 型曲线形状,这和同步电动机的 V 型曲线很相似。随着定子电压的增大,定子电流呈先减小后增大的趋势,定子侧功率因数角也成超前、0、滞后 3 种状态。V 型曲线的谷底是定子电流最小点,定子侧功率因数角基本为 0,也是定子侧功率因数最大处。

为分析实验规律的一般性,实验方法与以上相同,对变频器接 9 分频电压进行进一步实验分析,实验数据如表 2 所示。实验表明,可以看到随着定子电压的增大,定子电流仍呈 V 型曲线变化先减小后增大,功率因数也得到控制。

表 2 9 分频转子电压为 33 V 时的实验数据

U_{sA}/V	I_{sA}/A	I_{sB}/A	I_{sC}/A	I_{rA}/A
68.5	1.2	1.2	1.2	4.8
87	1	1	1	4.75
107	0.8	0.8	0.8	4.7
155	1	1	1	4.6
170.7	1.1	1.1	1.1	4.6
180	1.2	1.2	1.1	4.6
197	1.4	1.4	1.39	4.6
206	1.7	1.7	1.6	4.6

5 结 论

双变量交-交变频双馈调速系统中对功率因数控制的实验研究,验证了通过控制定子电压幅值控制定子的功率因数的正确性。根据实验数据得出双馈电动机在转子电压不变的前提下,增大定子电压的幅值,定子侧功率因数呈现先增大到 1 后减小的趋势,定子电流幅值呈先减小后增大趋势。定子电流随着定子电压的变化呈 V 字型曲线,与同步电动机的 V 型曲线相似,曲线的意义相似。双馈电动机的功率因数的可调节性,对电能高效利用、节约电能、改善

电网功率因数有重要意义。

参考文献

- [1] 郑一维,李长俊,吴讯驰,等.基于STM32的电能质量检测技术研究[J].国外电子测量技术,2011,30(6):72-78.
- [2] 张团善,张娜,武玉婷.基于增强型STM32驱动双极步进电机的研究[J].电子测量技术,2010,33(10):16-18.
- [3] 陈鑫,杜庆楠,乔美英,等.改进的交交变频器脉冲触发控制策略研究[J].煤矿机电,2014,6(3):34-37.
- [4] 梁京,李高举等.转子侧双变量交交变频调速方法研究[J].煤矿机械,2013,34(4):66-68.
- [5] 高曼曼,潘天文,绕线电机启动状态到双馈过渡过程的研究[J].电气传动,2012,42(12):23-26.
- [6] 黄邵刚,赵鲁,吴庆江,等.双馈电机数学模型及运行性能比对分析[J].微电机,2010,,43(8):12-17.
- [7] 高曼曼,杜庆楠.双变量交交变频双馈电动机功率因数控制研究[J].工矿自动化,2014,40(9):70-74.
- [8] 黄守道,王耀南.无刷双馈电机有功和无功功率控制研究[J].中国电机工程学报,2005,25(4):87-92.
- [9] 邓先明,谭国俊,无刷双馈电机的功率研究[J].电气自动化,2008,30(1):16-20.
- [11] 刘少军,张思雨.基于DSP控制的永磁同步电机变频调速系统设计[J].国外电力电子测量技术,2016,35(1):84-88.
- [12] 赵凯辉,陈特放,张昌凡,等.永磁同步牵引电机无速度传感器转矩精确控制[J].电子测量与仪器学报,2015,29(1):39-47.
- [13] 祝洪宇,胡静涛,高雷,等.基于变频器供电侧电流Hilbert解调制方法的空载电机转子断条故障诊断[J].仪器仪表学报,2014,35(1):140-145.

作者简介

杜庆楠,教授,主要从事自动控制、电力电子技术与电气传动方面的研究。

E-mail:512587830@qq.com

李亚民,河南理工大学在读硕士,研究方向为电力电子技术及电气传动。

E-mail:512587830@qq.com

是德科技的最新汽车测试解决方案帮助工程师打造具有卓越安全性和性能的汽车电子元件和模块

是德科技将在 2016 年汽车测试展览会上展示 50 多种汽车测试解决方案

2016 年 10 月 25 日,是德科技公司(NYSE:KEYS)日前宣布将在 10 月 25 至 27 日的汽车测试展览会(www.testing-expo.com/usa)上展示 50 多种最新的设计和测试解决方案。此次展览会的地点位于密歇根州诺维市 Suburban Collection Showplace 会展中心,是德科技展位设在 2008 展台。这些解决方案跨越了无线、毫米波、高速数字、电力和能源等多个领域,使工程师能够打造具有出色安全性和优异性能的汽车电子元件和模块。

是德科技将展示 3 款最新的汽车测试解决方案。其中包括 1)E8707A 雷达目标仿真器解决方案,旨在为先进驾驶辅助系统的开发人员提供帮助;2)E6950A eCall 一致性测试解决方案,可同时用于功能和标准一致性 eCall 测试;和 3)U9403A 小型在线测试,通过与在线功能测试相结合,能够最大限度提高客户的测试范围。

是德科技还将演示下列汽车测试解决方案:

1)汽车网络总线测试解决方案,用于对新型 CXPI、

BroadR-Reach 汽车以太网、FlexRay、SPI、CAN、CAN-FD 和 LIN 协议进行最快触发和分析;

2)智能工作台,提供测试软件与台式测试仪器的定制组合,以经济高效地提高电子设计效率和创新;

3)汽车电力分析解决方案,用于优化 AC/DC 电源和汽车机电系统和 EV/HEV 的电子负载效率;

4)汽车功率器件测试解决方案,帮助电路设计人员最大限度提高汽车电子系统的效率、安全性和可靠性;

5)使用是德科技屡获殊荣的 TS-8989 车身和安全参考解决方案和新型通用 U9403A 小型测试解决方案对当前的先进 ECU 进行制造测试;

6)是德科技的便携测试工具包括 FieldFox 手持式微波分析仪、手持式 LCR 表、手持式示波器、TrueIR 热像仪等;

7)是德科技的服务和支持解决方案,提供认证校准以满足行业标准;