

# 基于 SP 变频器的风力发电实验系统研制

孟彦京, 郭建强

(陕西科技大学, 电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:**随着变速恒频风力发电技术和电力电子技术的发展,同步发电机在风力发电系统中得到了应用。励磁同步发电机在风力发电中的特性研究具有重要的意义。此处按照变速恒频风力发电系统的主结构,采用励磁同步发电机作为风力发电机,利用现有的变频器搭建了励磁同步风力发电实验系统。实验结果证明,该实验装置的正确性,为励磁同步风力发电系统的深入研究提供了实验平台。

**关键词:**变频器; 变速恒频; 励磁同步

中图分类号: TN77

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2011)02-0001-03

## Development of Wind Power Experimental System Based on Emerson SP Inverter

MENG Yan-jing, GUO Jian-qiang

(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Along with the development of the variable-speed constant-frequency wind power technology and power electronic technology, the synchronous generator is widely used in wind power system. Studying the characteristic of excitation synchronous generator being in wind power system is of great importance. According to the main structure of variable-speed constant-frequency wind power system in which adopted the excitation synchronous generator as wind driven generator, an excitation synchronous wind power experimental system is put up, which uses of the contemporary existing inverter. The experimental results prove the correctness of this system which provides a platform for intensively studying the excitation synchronous wind power system.

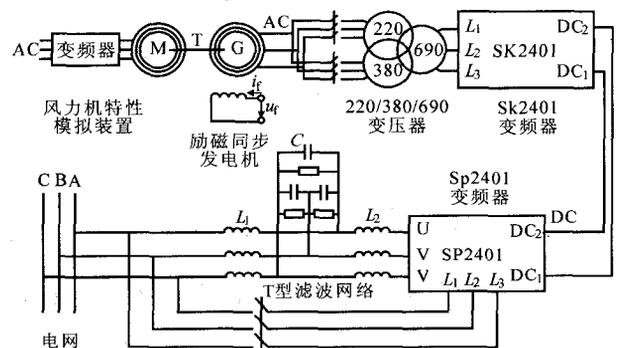
**Keywords:** inverter; variable-speed constant-frequency; excitation synchronous

## 1 引言

随着风力发电技术的深入发展,变速恒频风力发电系统已成为未来风力发电的主流方案。变速恒频风力发电系统采用绕线转子异步发电机或同步发电机及相应的电力电子技术,目的是使风力发电机组在所有的风速下均可获得最佳的功率输出。传统的并网型同步发电机的转速与电网频率之间是刚性耦合的,当同步发电机应用在风力发电中时,由于变化的风速频繁地冲击同步发电机,使其难以与电网同步运行。若两者之间转换频率,则耦合问题得以解决。随着电力电子技术的日趋成熟,此方案成为可能。依据变速恒频风力发电系统的主结构,采用励磁同步发电机,利用现有的变频器来搭建并网型全功率逆变励磁同步风力发电实验系统。实验表明,在变速恒频风力发电系统中,同步发电机的调速范围比异步发电机更宽,承受扰动的能力更强,响应速度更快<sup>[1-2]</sup>。

## 2 系统主结构

图 1 示出系统主结构。其工作原理是:风力机特性模拟装置驱动励磁同步发电机运行,根据风速的不同给同步发电机施加一定的励磁电流使同步发电机发电。同步发电机发出的三相交流电经变压器升压后提供给 SK2401 整流成直流,SK2401 与 SP2401 的直流环节相连接,SP2401 将此直流电回馈给电网。



充电回路  
图 1 系统主结构

定稿日期: 2010-09-03

作者简介:孟彦京(1956-),男,河北宁晋人,教授,研究方向为电力电子技术与电力传动等。

### 2.1 风力机特性模拟装置

系统采用通用变频器-交流异步电动机系统

来模拟风力机的工作特性。通用变频器采用具有直接转矩控制功能的高调速性能变频器。通过协调控制变频器的转速和转矩,使得交流异步电动机轴上的输出机械特性(转矩和转速特性)符合风力机轴上的机械特性,即实现风力机的恒  $C_p$  (风能利用系数)运行、恒转速运行和恒功率运行时的机械特性。

### 2.2 变频器再生模式的工作原理及控制策略

普通变频器的输入采用二极管整流,因此功率不能反馈至交流电源。普通变频器的逆变电路与 PWM 整流电路的结构一致,区别在于两者的输入与输出位置相反且 PWM 整流电路的输入端增加了滤波网络。PWM 整流电路的功率根据 IGBT 控制策略的不同是可以双向流动的。SP 系列变频器利用上述特点,在普通变频器的输出端添加上了滤波网络,将电源经滤波网络反向施加到变频器的输出端,同时在控制软件中添加相应的控制程序,就使一台普通的变频器具有了回馈能量的功能。SP 系列变频器既可作为交流调速电源使用,也可作为电压源型 PWM 整流电路使用,但二者不能同时存在。当 SP 系列变频器工作于回馈模式时,向系统提供可控的恒定直流电压,而其作为普通变频器的交流调速电源的功能随之消失。SP 变频器前端的不控二极管整流电路仅用于上电初始时对直流环节的充电。SP2401 变频器主电路结构如图 2 所示,带 T 型滤波器电压源型 PWM 整流电路如图 3 所示。

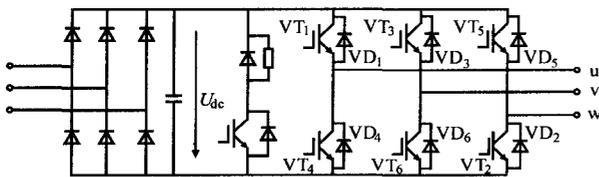


图 2 SP2401 变频器主电路结构

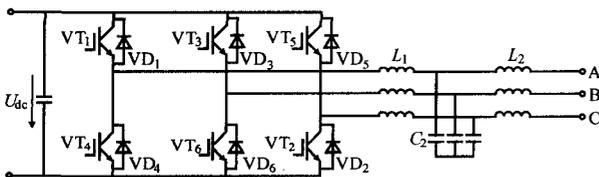


图 3 带 T 型滤波器电压源型 PWM 整流电路

SP 系列变频器中的 PWM 整流电路采用电压外环、电流内环的双环控制结构<sup>[3]</sup>,如图 4 所示。两者的作用分别为控制直流侧电压,与按电压外环输出的电流指令进行电流控制。电压控制器和电流控制器皆采用 PI 控制器,系数  $K_p, K_i$  的默认值适合于大多数应用场合,一般无需改变。此为 SP 系

列变频器再生模式运行时的控制策略。

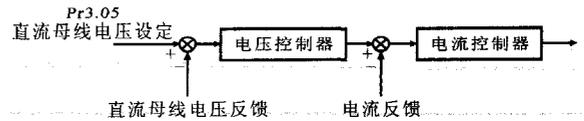


图 4 SP 系列 PWM 整流电流控制原理

### 2.3 励磁同步发电机的工作特性

当同步发电机与电网并联运行时,调节其励磁,便能控制其感性无功功率的输出,亦为容性无功功率的输入。当同步发电机单机运行时,若其负载阻抗一定,调节其励磁,便可改变端电压,从而控制其有功功率的输出<sup>[4]</sup>。在变速恒频风力发电系统中,机组转速在大范围内变化,同步发电机输出与电网之间通过整流和逆变两个环节进行柔性联接,因此在该系统中,同步发电机实际处于单机运行状态,调节其励磁即可控制其有功功率输出。整流与逆变间的直流环节中,电容器起到了缓冲无功功率的作用,根据并网的无功功率要求,可通过调节 PWM 整流电路的功率因数来实现。

## 3 控制策略

### 3.1 基本控制策略

风力机工作特性如图 5 所示,根据变速恒频风力发电机组的不同运行区域,基本控制策略为:当低于额定风速,且机组转速未达到极限时,风速为  $v_1 \sim v_2$ ,此时应控制机组工作在恒  $C_p$  区,机组跟踪最佳功率  $P_{opt}$  曲线运行(AB 段),以获得最大能量;当低于额定风速,但机组达到转速极限时,风速为  $v_2 \sim v_3$ ,应控制机组工作在恒转速区(BC 段),此时机组保持转速不变,功率随风速增加;当高于额定风速而低于切出风速时,风速为  $v_3 \sim v_{max}$ ,此时应控制机组工作在恒功率区(CD 段),机组跟踪  $P_{max}$  曲线运行,并保持输出功率稳定。

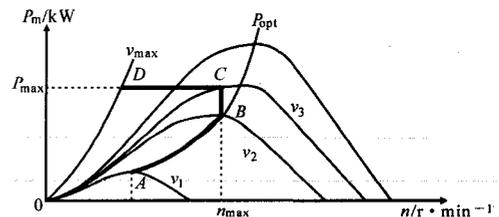


图 5 风力机工作特性

### 3.2 基本控制策略的实现方案

基本控制策略的实现方案有两种,一种方案是根据风力机的特性公式,计算出有限个点处的转速、转矩和输出功率,然后协调控制调速变频器和同步发电机励磁电流,使得系统的工作点符合

计算值,然后再描点做图,绘制出特性曲线。另一种方案采用可编程逻辑控制器件,将特性曲线预先装入存储器,然后系统根据输入自动运行。

### 3.3 低速策略

变速恒频风力发电机组的转速在大范围内变化,最高转速与最低转速可达 3 倍之多,因此需要对机组高低速的工作方案分别进行设计,否则就无法满足机组转速大变化范围的运行要求。目前可选方案有采用双速发电机、发电机输出交流升压、直流斩波升压等。此处采用发电机输出增加变压器交流升压方案。

## 4 实验结果

以 FD-5000 型风力机为例,其参数:额定功率 5 kW,风叶直径 5.4 m,启动风速 3 m/s,额定风速 10 m/s,切出风速 25 m/s,安全风速 45 m/s,额定转速  $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。发电机为无刷 XN164-7.5 kW。变压器型号为 SG-7-0.38-0.69,输入 220 V/380 V 可选。

机组最大转速为  $1500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,对应风力机的额定转速  $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,因此转速比  $K=25/3$ ,同时可确定风力机的额定转速为  $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,风力机由恒  $C_p$  区进入恒转速区的风速可根据最佳叶尖速比确定为  $8.04 \text{ m/s}$ 。当风速介于  $8.04 \text{ m/s}$  与  $10 \text{ m/s}$  时,进入恒转速区,保持机组转速不变,功率随风速提高而增加。当风速大于  $10 \text{ m/s}$  时,进入恒功率区,机组转速随风速提高而减小,保持输出功率不变。根据已测取的同步发电机空载特性,选择  $n=1000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  为高低速的切换转速。低速与高速时,变压器变比分别采用  $220 \text{ V}/690 \text{ V}$ ,  $380 \text{ V}/690 \text{ V}$ 。SP2401 直流母线电压 Pr3.05 的设定原则:直流母线电压设定值所对应的交流电压至少应大于电源电压  $50 \text{ V}$ 。所预留空间是为了控制器的正常工作,因此选择 SP2401 直流母线电压约为  $580 \text{ V}$ 。

实验装置的特性曲线如图 6 所示。由特性曲线图可知,利用 SP2401 变频器,通过控制励磁电流,励磁同步发电机的工作特性完全满足风力机

的要求,实验装置实现了对变速恒频风力发电系统的模拟。

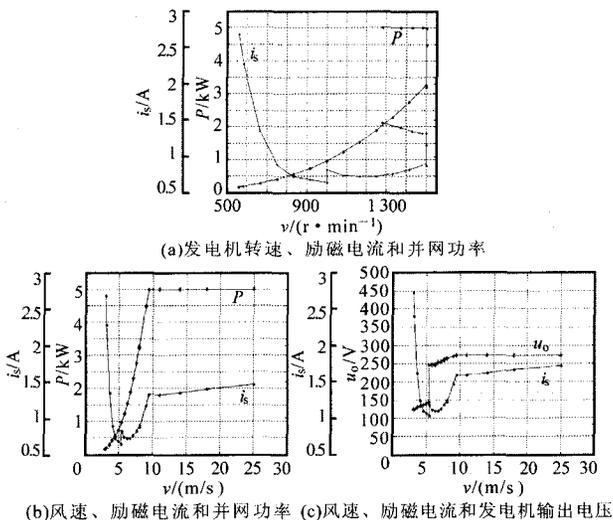


图 6 实验波形

## 5 结论

介绍了基于 SP2401 变频器的回馈工作模式搭建的并网型励磁同步风力发电实验装置。装置构造分析和控制策略说明该方案在原理上的可行性,实验结果证明了方案的正确性。实验结果表明该装置可以模拟风力机的运行特性,可用于研究励磁同步发电机在风力发电中的励磁特性,可用于研究全功率并网特性,为深入研究并网型励磁同步风力发电系统提供了实验平台。

## 参考文献

- [1] 叶杭治.风力发电机组的控制技术(第 2 版)[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 王兆安,黄俊.电力电子技术(第 4 版)[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [3] 张兴.PWM 整流器及其控制策略的研究[D].合肥:合肥工业大学出版社,2003.
- [4] 姚守猷,张世栋.自励恒压同步发电机的励磁系统[M].北京:机械工业出版社,1985.

## 2011年第 8 期“风力发电中的电力电子与系统技术”专辑

### 征文启事

为了更好地推进风力发电中“电力电子与系统”相关技术的研究与应用,本刊拟将 2011 年第 8 期辟为“风力发电中的电力电子与系统技术”专辑。欲投稿的作者请在 2011 年 05 月 30 日前将论文寄到本刊编辑部(Email:dldzjstg@163.com),并注明“风力发电中的电力电子与系统技术专辑”字样。所投论文将按本刊常规审稿程序请国内外同行专家评审,评审结果将于 2011 年 06 月 30 日前通知作者。本刊邀请合肥工业大学张兴教授和清华大学杨耕教授作为本专辑的特邀主编,对本领域的研究及专辑的论文进行分析和点评。

截稿日期:2011 年 05 月 30 日 录用通知发出日期:2011 年 06 月 30 日

论文刊登期号:2011 年第 8 期(2011 年 8 月 20 日出版)