

# 离网型永磁风力发电机级联整流装置研究\*

姜科 赵晨栋 单长帅 耿强

(天津工业大学电气工程与自动化学院 天津 300387)

**摘要:** 随着社会的发展,用电设备不断增加,在一些偏远地区,原有的离网型风力发电系统亟需扩容。提出了一种新型的离网型永磁风力发电机级联整流装置,该装置采用共直流母线技术,可实现2台发电机同时并网运行,增加了系统容量。此外,该装置还可实现多机运行下的最大风能捕获,同时可使功率开关器件占空比运行于合理范围内,改善系统性能。仿真结果证明了该装置及控制策略的正确性和有效性。

**关键词:** 永磁发电机; 风力发电; 离网型; 级联整流

**中图分类号:** TP2    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 470.4057

## Novel cascade rectifier device of off-grid type wind power generation

Jiang Ke Zhao Chendong Shan Changshuai Geng Qiang

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** With the development of society and increasing of electrical equipment, the original off-grid type wind power generation systems need expansion in some remote areas. In this paper, a novel cascade rectifier device for off-grid type wind power generation is proposed. Using Common DC bus technology, this device can achieve the parallel operation of two generators at the same time, which increases the system capacity. Furthermore, this device can also achieve the maximal wind energy capture of multi-machine operation while allowing the duty cycle of power switch device operate in the reasonable range, improving the performance of the system. The simulation results prove the correctness and effectiveness of the device and the control strategies.

**Keywords:** permanent magnet generator; wind power generation; off-grid type; cascade rectifier

### 1 引言

风能作为太阳能的一种转化形式,是一种清洁的可再生能源,它具有资源丰富、利用方便、分布广泛等优点,在新能源中占有重要的地位。风力发电系统是将风能转换为电能的装置,主要分为2种类型:一种是接入电力系统运行的并网型系统;另一种是独立运行的离网型系统。我国地域辽阔,地形复杂,边远的牧区、农村、海岛和边防哨所等处存在用户分散、用电量相对较小等特点。离网型风电系统具有架设方便、成本低廉、形式灵活等优点,可以较好地满足上述地区的用电需求,因而得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。

为节省成本,离网型永磁风力发电机变流器多采用不控整流+Boost斩波电路的拓扑结构,该拓扑结构控制算法简单,并可在一定风速范围内实现最大风能捕获<sup>[4]</sup>。离网型风电系统因其简便易用的优点引起了各国学者的重视,文献<sup>[5-10]</sup>分别从发电机设计、内部场计算、最大风能

捕获算法、能量管理和非正常工况下控制策略等角度对离网型风电系统进行了深入研究,得出了一系列有意义的结果。

随着经济的发展,居民用电设备越来越多,用电量也逐年增加。原有的离网型风电系统容量难以满足居民的用电需求,如抛弃原系统而使用新型较大容量的风电系统,会造成较大的浪费;简单串/并联又会限制发电机的运行范围,因此离网型风电系统增容问题亟待解决。针对这一问题,提出了一种新型的离网型风电系统级联整流装置,设计了2套不控整流+Boost斩波电路,并采用共直流母线技术,实现2台发电机同时并网运行。仿真结果表明,该装置可以有效增加系统容量,并扩展发电机调速范围;通过协调控制不同发电机转矩,使系统运行于最佳风能利用点,实现多机运行下的最大风能跟踪;同时可使功率开关器件占空比运行于合理范围内,减小高次谐波,改善系统性能。

收稿日期:2014-09

\* 基金项目:国家自然科学基金(51307121)、国家级大学创新创业训练计划(201210058015)、天津市高校科技发展基金计划(20130415)项目

## 2 数学模型

新型离网型永磁风力发电系统分为3个部分,分别为永磁发电机、级联整流装置和逆变器,系统框图如图1所示。其中,级联整流装置由2个不控整流单元和2个Boost斩波电路单元构成,2套单元之间用二极管 $D_3$ 、 $D_4$ 和IGBT $S_3$ 连接。

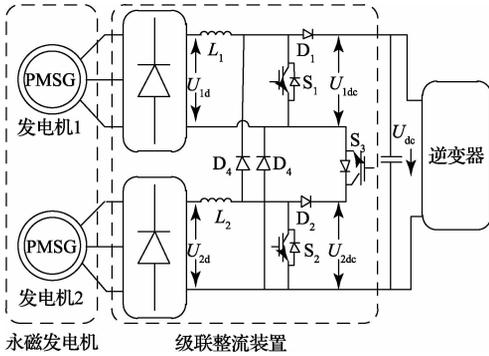


图1 新型离网型永磁风力发电系统

该拓扑结构可以通过改变 $S_3$ 的通断状态,从而改变电路的运行状态。当风速较低时,发电机转速较慢,端电压较低, $S_3$ 处于导通状态,2个Boost斩波电路单元串联连接,以满足逆变器对直流侧电压 $u_{dc}$ 的要求;当风速较高时,发电机转速较快,端电压较高, $S_3$ 处于关断状态,2个Boost斩波电路单元通过 $D_3$ 、 $D_4$ 并联连接,保证直流侧电容电压的稳定,从而扩大了整体系统的调速范围。

### 2.1 发电机与不控整流电路

以第1台发电机为例,忽略发电机定子电阻,将发电机与不控整流电路作为一个整体,可得等效电路如图2所示。

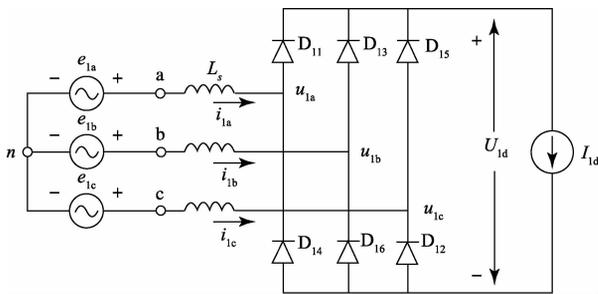


图2 发电机与不控整流电路等效电路

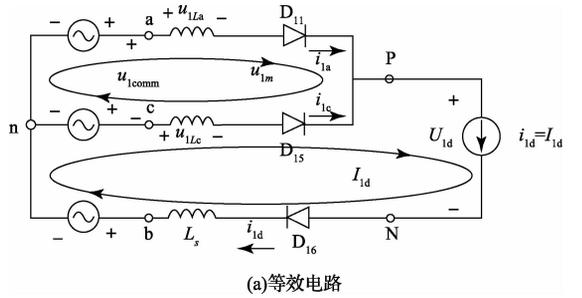
图中, $u_{1a}$ 、 $u_{1b}$ 、 $u_{1c}$ 为发电机端电压; $e_{1a}$ 、 $e_{1b}$ 、 $e_{1c}$ 为发电机相反电动势, $i_{1a}$ 、 $i_{1b}$ 、 $i_{1c}$ 为发电机定子相电流; $L_s$ 为发电机定子电感; $U_{1d}$ 为发电机整流电压平均值; $I_{1d}$ 为发电机整流电流平均值。

根据永磁发电机运行原理可知,发电机相反电势有效值可表示为<sup>[11]</sup>:

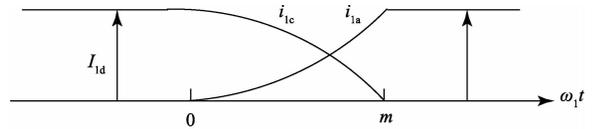
$$E_{1s} = \frac{1}{\sqrt{2}} p_1 \omega_1 \Psi_{1f} = K_{1v} \omega_1 \quad (1)$$

式中: $p_1$ 为发电机极对数, $\omega_1$ 为发电机转速, $\Psi_{1f}$ 为转子磁链, $K_{1v}$ 为反电势系数。

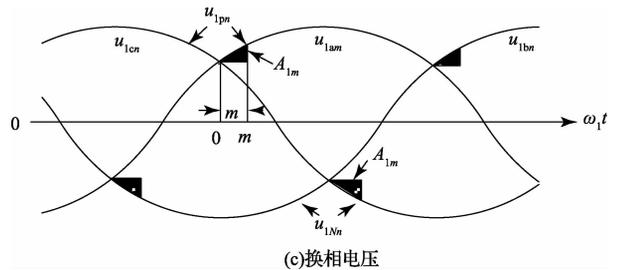
在不控整流电路工作过程中,由于发电机定子存在电感,因此电流换相过程无法瞬时完成。在三相平衡电路中各次换相情况均相同,此处以电流从c相换至a相为例研究电路的换相过程。在此过程中,从 $t=0$ 或 $\omega_1 t=0$ 时刻开始(起始时间任选),电流从 $D_{15}$ 换至 $D_{11}$ ,在此之前,电流 $i_{1d}$ 流过 $D_{15}$ 和 $D_{16}$ ,换相过程相关的等效电路及电流变化情况如图3所示。



(a)等效电路



(b)换相电流



(c)换相电压

图3 电流从c相换至a相过程

在换相过程中,定子a相和c相之间电压差为 $u_{1comm} = u_{1am} - u_{1cm}$ ,由于 $D_{15}$ 和 $D_{11}$ 同时导通而形成的短回路环流 $i_{1m}$ ,由电路原理可得:

$$\begin{cases} i_{1m} = i_{1a} \\ i_{1c} = I_{1d} - i_{1m} \end{cases} \quad (2)$$

当 $\omega_1 t = m$ 时换相过程结束,电流 $i_{1m}$ 从0增大到 $I_{1d}$ ,如图3(b)所示,a相定子电感电压为:

$$u_{1La} = L_s \frac{di_{1a}}{dt} = L_s \frac{di_{1m}}{dt} \quad (3)$$

设 $I_{1d}$ 在换流过程中保持不变,则c相定子电感电压为:

$$u_{1Lc} = L_s \frac{di_{1c}}{dt} = -L_s \frac{di_{1m}}{dt} \quad (4)$$

对图3(a)所示等效电路上面的环路应用KVL定律,并由式(3)和式(4)可得:

$$u_{1comm} = u_{1am} - u_{1cm} = u_{1La} - u_{1Lc} = 2L_s \frac{di_{1m}}{dt} \quad (5)$$

进一步整理式(5)可得:

$$L_s \frac{di_{1m}}{dt} = \frac{u_{1an} - u_{1cn}}{2} \quad (6)$$

在  $0 \sim m$  换相时间段内对上式两边积分可得:

$$\omega_1 L_s \int_0^{t_d} di_{1m} = \int_0^m \frac{u_{1an} - u_{1cn}}{2} d(\omega_1 t) \quad (7)$$

永磁发电机定子线反电动势可以表示为:

$$u_{1an} - u_{1cn} = \sqrt{6}E_{1s} \sin \omega_1 t \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),并计算可得:

$$\omega_1 L_s I_{1d} = \frac{\sqrt{6}E_{1s}(1 - \cos m)}{2} \quad (9)$$

进一步整理可得:

$$\cos m = 1 - \frac{2\omega_1 L_s I_{1d}}{\sqrt{6}E_{1s}} \quad (10)$$

由图 3(c) 可以看出,在电流换相的起始时刻有  $u_{1pn} = u_{1an}$ 。在换相过程中,即  $0 < \omega_1 t < m$  时间段内,由图 3(c) 和式(6)可得:

$$u_{1pn} = u_{1an} - u_{1La} = \frac{u_{1an} + u_{1cn}}{2} \quad (11)$$

式中:  $u_{1La}$  即为  $L_s$  两端电压为换相期间电压  $u_{1pn}$  的跌落部分,如图 3(c) 所示。跌落部分电压的积分结果为面积  $A_{1m}$ ,由式(7)可得:

$$A_{1m} = \omega_1 L_s I_{1d} \quad (12)$$

跌落的面积  $A_{1m}$  每  $60^\circ$  出现一次,因此发电机整流电压平均值将减小,换相电压跌落为:

$$\Delta u_{1d} = \frac{\omega_1 L_s I_{1d}}{\pi/3} = \frac{3}{\pi} \omega_1 L_s I_{1d} \quad (13)$$

因此,每次换相期间的整流电压平均值为:

$$U_{1d} = U_{1d0} - \Delta u_{1d} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{1s} - \frac{3}{\pi} \omega_1 L_s I_{1d} \quad (14)$$

式中:  $U_{1d0}$  是理想的整流电压平均值。

式(14)中的整流电流平均值  $I_{1d}$  与发电机相电流有效值  $I_{1s}$  的关系为:

$$I_{1s} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{1d} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)中,并考虑二极管压降,则发电机整流电压平均值与发电机相反电势有效值、相电流有效值之间的关系可表示为:

$$U_{1d} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{1s} - 2V_{diode} - \frac{3}{\sqrt{6}} \omega_1 L_s I_{1s} \quad (16)$$

将式(1)代入式(16)可得:

$$U_{1d} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} K_1 \omega_1 - 2V_{diode} - \frac{3}{\sqrt{6}} \omega_1 L_s I_{1s} \quad (17)$$

同理,另 1 台发电机与不控整流电路也具有类似的数学模型。

## 2.2 级联式 Boost 斩波电路单元

由 Boost 斩波电路原理可得发电机整流电压平均值与斩波电路输出电压平均值间的关系为:

$$\begin{cases} U_{1dc} = \frac{1}{1-d_1} U_{1d} \\ U_{2dc} = \frac{1}{1-d_2} U_{2d} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $d_1, d_2$  分别为开关器件  $S_1$  和  $S_2$  的占空比。

当 2 个 Boost 斩波电路处于串联状态时,直流侧电容电压为:

$$U_{dc} = U_{1dc} + U_{2dc} \quad (19)$$

反之,当 2 个 Boost 斩波电路处于并联状态时,直流侧电容电压为:

$$U_{dc} = U_{1dc} = U_{2dc} \quad (20)$$

## 3 控制算法

在实际运行过程中,由逆变器和蓄电池的规格决定了  $U_{dc}$  保持为某一固定值不变,则由式(17)~式(20)可离线计算出不同发电机转速下的占空比。为了减少高次谐波、避免窄脉冲的出现,可以将占空比设定为一个范围,由该范围的上、下限即可确定串、并联模式切换时对应的发电机临界切换转速。

当发电机低速运行时,控制器采集风速信息,由最大风能捕获原理计算出发电机参考转速  $\omega_{1ref}$  和  $\omega_{2ref}$ ,并调节开关器件  $S_1$  和  $S_2$  的占空比,使发电机实际转速不断趋近参考转速。此时开关器件  $S_3$  处于导通状态,2 个斩波电路工作在串联方式,直流侧电压的数学关系如式(19)所示,  $S_1$  和  $S_2$  占空比较大。

随着发电机转速逐渐升高,  $S_1$  和  $S_2$  占空比不断减小,发电机转速升至某一阈值时,开关器件  $S_3$  断开,2 个斩波电路工作在并联方式,直流侧电压的数学关系如式(20)所示,  $S_1$  和  $S_2$  占空比重新回到较大的数值。

当发电机由高速向低速运行时,调节过程相反,2 个斩波电路由并联方式重新回到串联方式,以保证  $S_1$  和  $S_2$  占空比始终位于合适的数值,保持系统稳定运行。控制器原理框图如图 4 所示。

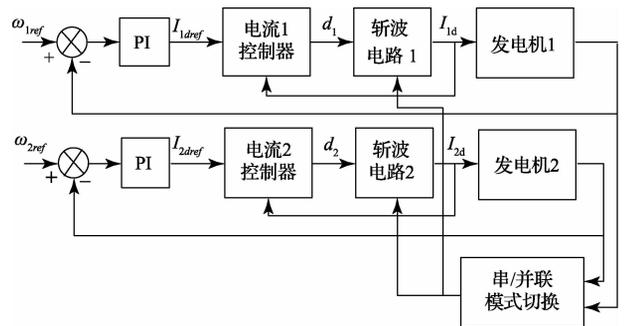


图 4 控制器原理

## 4 仿真实验

为验证提出算法的正确性,在 MATLAB 平台下搭建

了 2 台风力发电机仿真模型,仿真模型参数如下:发电机额定功率 150 kW,额定电压 690 V,额定转速 80 r/min,风轮半径 9 m,直流侧电压 1 500 V。

图 5 为发电机转速跟踪参考转速仿真波形。图中,初始风速为 10 m/s,在第 7 s 时变化为 5 m/s,相应的参考转速折算后从 67 r/min 变化到 33.5 r/min。仿真模型中假设 2 台发电机风轮承受的风速一致,因此发电机工作状态相同,图 5(b)为其中 1 台发电机转速变化情况,由图中可以看出,发电机转速迅速跟踪参考转速,稳态误差较小,动态性能较好。

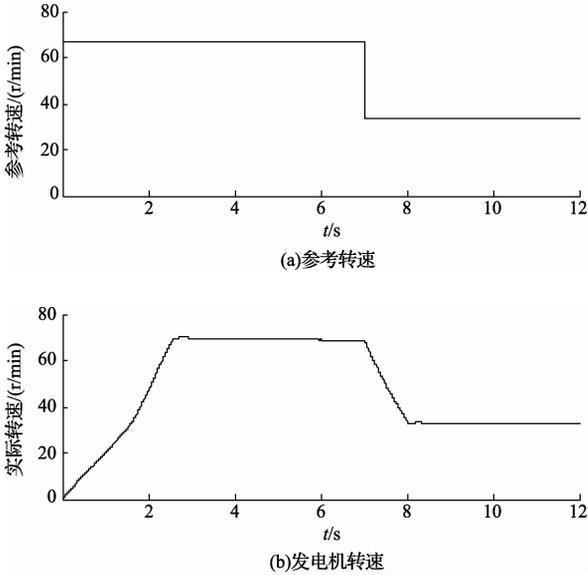
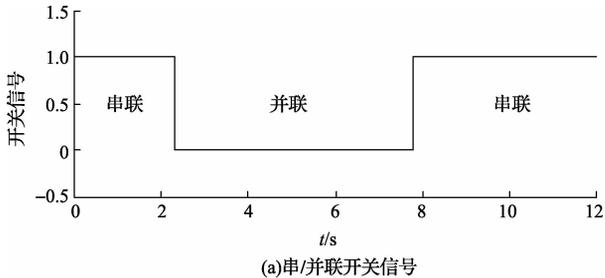


图 5 转速跟踪波形

图 6 为 1 台发电机运行状态。

结合仿真模型,由式(17)~式(20)可计算出串/并联临界切换转速约为 50 r/min。为了避免在临界切换转速附近频繁通断  $S_3$ ,该文采用了滞环方法,即在转速上升阶段,在 60 r/min 处由串联方式切换至并联方式;在转速下降阶段,在 40 r/min 处由并联方式切换至串联方式。由图 6(a)可以看出,在 2.3 s 和 7.8 s 附近,发电机达到临界切换转速,开关信号变化,工作方式相应改变。



(a)串/并联开关信号

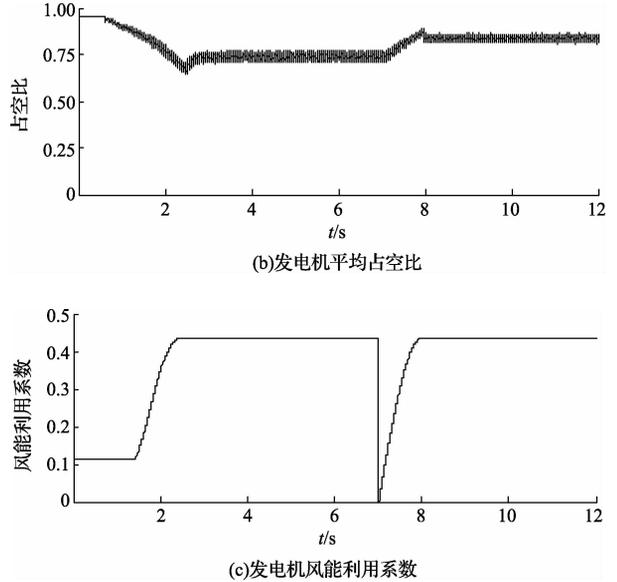


图 6 发电机运行状态

由图 6(b)可以看出,在 2.3 s 时,占空比应随发电机转速升高而进一步降低,但随着工作方式由串联切换成并联,占空比反而升高,最后稳定在 0.75 左右;反之,在 7.8 s 时,占空比应随发电机转速降低而进一步升高,但随着工作方式由并联切换成串联,占空比反而降低,最后稳定在 0.8 左右。整个切换过程平稳迅速,占空比保持在合理范围内,避免了窄脉冲的出现,保证了系统稳定运行。由图 6(c)可以看出,在起动和参考转速变化阶段风能利用系数有所波动,而在稳态运行和工作方式切换阶段,风能利用系数均能保持在最大值附近运行,保证了系统输出最大功率,系统整体具有较高的运行效率。

### 5 结 论

提出了一种新型离网型永磁风力发电机级联整流装置,该装置采用两套不控整流+Boost 斩波电路共直流母线拓扑结构,可实现 2 台发电机同时并网运行,增加了系统容量。此外,该装置还可以根据不同的发电机转速,改变 2 台发电机间的工作方式,使发电机占空比保持在合理的范围内,避免了窄脉冲的出现,同时使系统保持较高的运行效率。仿真结果表明,系统切换过程平稳,能够迅速跟踪参考转速,系统具有较好的动、静态性能。

### 参考文献

[1] 夏长亮. 永磁风力发电系统及其功率变换技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 1-13.

(下转第 23 页)