DOI:10.3969/j.issn.1001 -4551.2015.03.024

# 一种新型离网型永磁风力发电机级联整流装置研究*

单长帅,耿 强*,赵晨栋,姜 科
(天津工业大学 电气工程与自动化学院,天津 300387)

**摘要**:针对偏远地区原有的离网型风力发电系统亟需扩容的问题,提出了一种新型的共直流母线级联整流装置,通过该装置可实现两台发电机同时发电运行。对该新型级联整流装置的拓扑结构、发电机电流换相过程、占空比计算方法等内容进行了研究,建立了发电机转速与不控整流电路输出平均电压之间的关系,对两发电机串、并联运行状态进行了详细分析归纳,提出基于滞环原理的状态切换方法,并在 Matlab 仿真平台上对系统进行了仿真验证。研究结果表明,该装置可以根据不同的发电机转速,改变两台发电机间的工作方式,扩展发电机调速范围,有效增加系统容量;同时可使功率开关器件占空比运行于合理范围内,避免窄脉冲的出现,减小高次谐波,改善系统性能。

**关键词**:永磁发电机;风力发电;离网型;级联整流
**中图分类号**:TM614;TP2 **文献标志码**:A **文章编号**:1001 -4551(2015)03 -0414 -05

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

SHAN Chang-shuai, GENG Qiang, ZHAO Chen-dong, JIANG Ke
(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract**: Aiming at the problem that the original off-grid type wind power generation systems in some remote areas were in urgent need of expansion, a novel common DC bus cascade rectifier device was proposed, and the simultaneous parallel operation of two generators can be achieved based on the device. The topological structure of the novel cascade rectifier device, the commutation process of the generator's current, and the computing method of duty cycle were studied. The relationship between the speed of generator and the output average voltage of uncontrolled rectifying circuit was established. The operating states in series or in parallel of the two generators were analyzed and concluded in detail. Meanwhile, the switching method of state based on the hysteresis loop principle was proposed. In addition, the system was verified by simulation using Matlab. The results indicate that the device can change the working modes of the two generators according to the different speed of the generators, expand the speed adjustable range of generators and increase the capacity of system effectively, at the same time, the device allows that the duty cycle of power switching device operates in the reasonable range, avoids the occurrence of narrow pulse, decreases the high-order harmonics and improves the system performance.

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

## 0 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,主要分为两种类型,一种是

**收稿日期**:2014 -10 -15
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(51307121);国家级大学生创新创业训练计划资助项目(201210058015);天津市高等学校科技发展基金计划资助项目(20130415)
**作者简介**:单长帅(1991 -),女,山东菏泽人,主要从事多电机系统控制方面的研究. E-mail:shancs91tjpu@163.com
**通信联系人**:耿 强,男,博士,讲师. E-mail:gengqiang@tju.edu.cn

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[1-2]。

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[3]。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[4-10]分别从发电机设计、内部场计算、风电实验平台模拟、最大风能捕获算法、PWM 调制策略、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,本研究提出一种新型的离网型风电系统级联整流装置,设计两套不控整流 + Boost 斩波电路,并采用共直流母线技术,实现两台发电机同时并网运行。

# 1　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,级联整流装置由两个不控整流单元和两个 Boost 斩波电路单元构成,两套单元之间用二极管 $D_3$、$D_4$ 和 IGBT $S_3$ 连接。

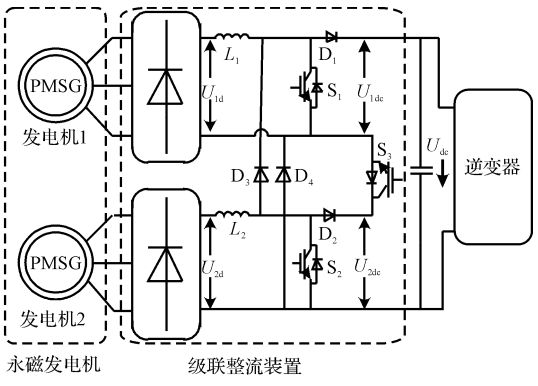



图 1　新型离网型永磁风力发电系统框图

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,两个 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,两个 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。

## 1.1　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。

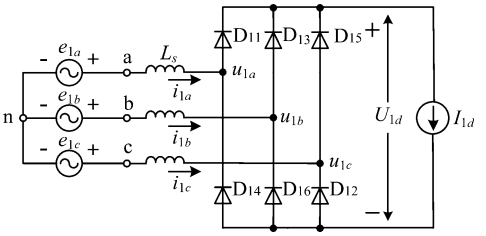


图 2　发电机与不控整流电路等效电路图

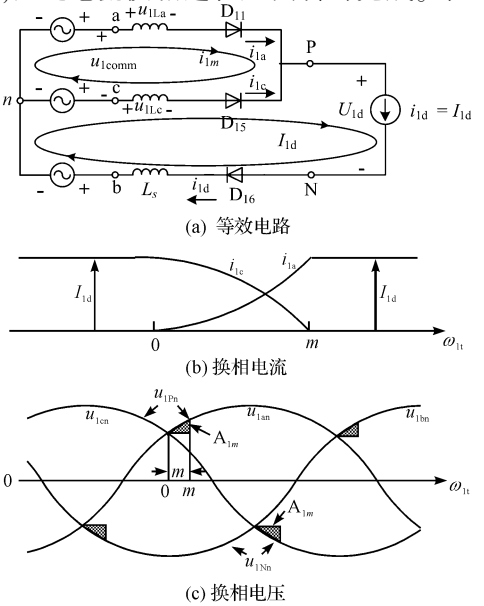
$u_{1a}$,$u_{1b}$,$u_{1c}$—发电机端电压;$e_{1a}$,$e_{1b}$,$e_{1c}$—发电机相反电动势;$i_{1a}$,$i_{1b}$,$i_{1c}$—发电机定子相电流;$L_s$—发电机定子电感;$U_{1d}$—发电机整流电压平均值;$I_{1d}$—发电机整流电流平均值

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[11]:

$$E_{1s}=\frac{1}{\sqrt{2}}p_1\omega_1\Psi_{1f}=K_{1e}\omega_1 \tag{1}$$

式中:$p_1$—发电机极对数,$\omega_1$—发电机转速,$\Psi_{1f}$—转子磁链,$K_{1e}$—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



(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

衡电路中各次换相情况均相同,此处本研究以电流从 $c$ 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。

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

$$\begin{aligned} i_{1m} &= i_{1a} \\ i_{1c} &= I_{1d}-i_{1m} \end{aligned} \tag{2}$$

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:

$$u_{1La}=L_s\frac{\mathrm{d}i_{1a}}{\mathrm{d}t}=L_s\frac{\mathrm{d}i_{1m}}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

设 $I_{1d}$ 在换流过程中保持不变,则 $c$ 相定子电感电压为:

$$u_{1Lc}=L_s\frac{\mathrm{d}i_{1c}}{\mathrm{d}t}=-L_s\frac{\mathrm{d}i_{1m}}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

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

$$u_{1comm}=u_{1an}-u_{1cn}=u_{1La}-u_{1Lc}=2L_s\frac{\mathrm{d}i_{1m}}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

进一步整理上式可得:

$$L_s\frac{\mathrm{d}i_{1m}}{\mathrm{d}t}=\frac{u_{1an}-u_{1cn}}{2} \tag{6}$$

在 0 ~ $m$ 换相时间段内对上式两边积分可得:

$$\omega_1 L_s\int_0^{I_d}\mathrm{d}i_{1m}=\int_0^m\frac{u_{1an}-u_{1cn}}{2}\mathrm{d}(\omega_1 t) \tag{7}$$

永磁发电机定子线反电动势可以表示为:

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

将式(8)代入式(7),并计算可得:

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

进一步整理可得:

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

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:

$$u_{1Pn}=u_{1an}-u_{1La}=\frac{u_{1an}+u_{1cn}}{2} \tag{11}$$

式中:$u_{1La}$—$L_s$ 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:

$$A_{1m}=\omega_1 L_s I_{1d} \tag{12}$$

跌落的面积 $A_{1m}$ 每 60°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:

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

因此,每次换相期间的整流电压平均值为:

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

式中:$U_{1d0}$—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:

$$I_{1s}=\frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{1d} \tag{15}$$

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:

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

将式(1)代入式(16)可得:

$$U_{1d}=\frac{3\sqrt{6}}{\pi}K_{1e}\omega_1-2V_{diode}-\frac{3}{\sqrt{6}}\omega_1 L_s I_{1s} \tag{17}$$

同理,另一台发电机与不控整流电路也具有类似的数学模型。

### 1.2 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:

$$\begin{aligned} U_{1dc} &= \frac{1}{1-d_1}U_{1d} \\ U_{2dc} &= \frac{1}{1-d_2}U_{2d} \end{aligned} \tag{18}$$

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

当两个 Boost 斩波电路处于串联状态时,直流侧电容电压为:

$$U_{dc}=U_{1dc}+U_{2dc} \tag{19}$$

反之,当两个 Boost 斩波电路处于并联状态时,直流侧电容电压为:

$$U_{dc}=U_{1dc}=U_{2dc} \tag{20}$$

## 2 控制框图

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 ~ 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,两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,两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,两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。

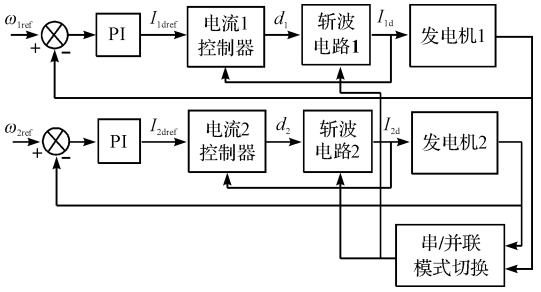


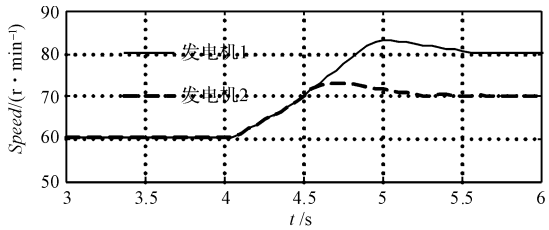

图 4　控制器框图

## 3　仿真验证

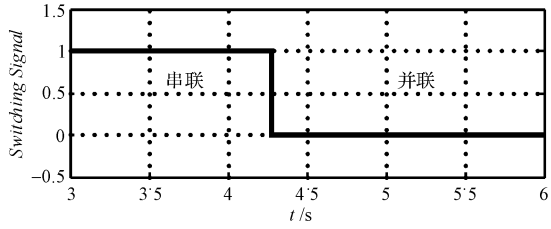
为验证提出算法的正确性,笔者在 Matlab 平台下搭建了两台风力发电机仿真模型,仿真模型参数如下:发电机额定功率 150 kW,转速范围 40 r/min ~ 80 r/min,风轮半径 9 m,直流侧电压 1 000 V,占空比限幅为 0.2 ~ 0.8。

由式(17 ~ 20)可计算出串/并联临界切换转速约为 60 r/min。为了避免在临界切换转速附近频繁通断 $S_3$,本研究采用了滞环方法,即在转速上升阶段,在 65 r/min处由串联方式切换至并联方式;在转速下降阶段,在 55 r/min 处由并联方式切换至串联方式。

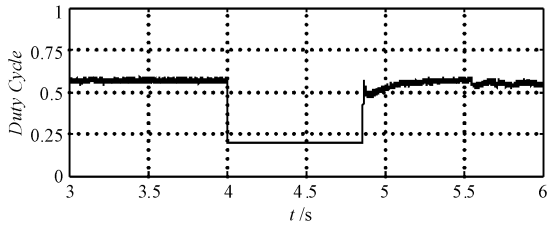
系统在升速过程中由串联转换成并联过程仿真波形如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,两台发电机在4 s 时转速升高,最后分别稳定在 80 r/min 和 70 r/min,调速过程快,稳态误差较小。由图 5(b)可以看出在发电机转速达到 65 r/min 时,系统工作方式由串联切换至并联方式,$S_3$ 关断。由图 5(c)、5(d)可以看出,发电机在稳态运行时平均占空比相差不大,并没有随着转速的大幅上升而大幅降低,在调整前后都保持在 0.5 附近,避免了极限占空比的出现。切换过程较平稳,由于发电机 1 稳态转速高,因此占空比略低于发电机 2。



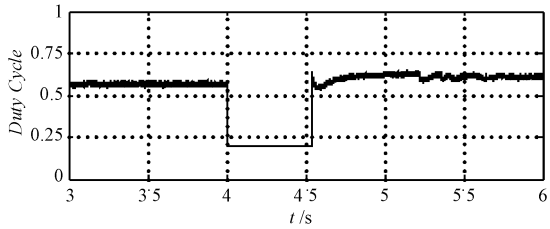

(a) 发电机转速




(b) 串/并联开关信号




(c) 发电机1平均占空比




(d) 发电机2平均占空比

图 5　发电机升速过程仿真波形

系统在降速过程中由并联转换成串联过程仿真波形如图 6 所示。由图 6(a)可以看出,两台发电机在12 s 时转速降低,最后分别稳定在 40 r/min 和 50 r/min,调速过程快,稳态误差较小。由图 6(b)可以看出在发电机转速达到 55 r/min 时,系统工作方式由并联切换至串联方式,$S_3$ 导通。由图 6(c)、6(d)可以看出,在 12.9 s时平均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 0.5 ~ 0.75 之间。整个切换过程平稳迅速,占空比保持在合理范围内,避免了窄脉冲出现,保证了系统稳定运行。

## 4　结束语

本研究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,可实现两台发电机同时并网

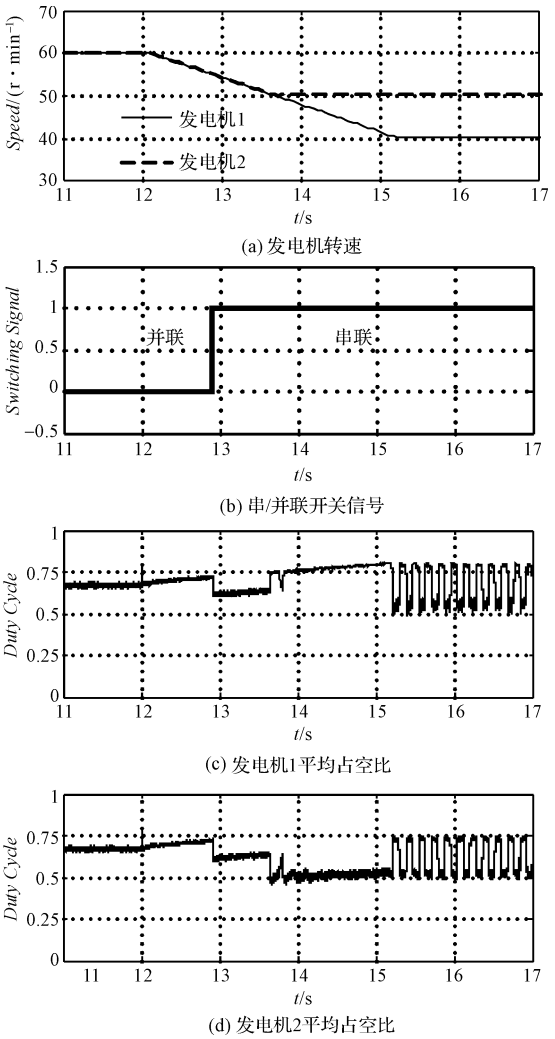



图 6 发电机降速过程仿真波形

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,改变两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。

研究结果表明,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(References):

[1] LI H. Overview of different wind generator systems and their comparisons [J]. **IET Renewable Power Generation**, 2008,2(2):123-128.

[2] BHENDE C N. Stand-alone Wind Energy Supply System [C]// Proceedings of the International Conference on Power System. West Bengal:[s. n.],2009:1-6.

[3] 崔 畅,赵 强. PSMG 风力发电系统 MPPT 优化控制策略研究[J]. 国外电子测量技术,2013,32(5):60-63.

[4] 姚 阳,方攸同,董 凡,等. 飞轮储能系统中高速电机转子的分析设计[J]. 机电工程,2014,31(10):1306-1310.

[5] 李伟力,仝世伟,程 鹏. 离网型永磁同步发电机电磁场和温度场数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(30):107-113.

[6] 任丽娜,杨娟霞,刘吉斯,等. 基于 PLC 和直流电机的风力发电模拟平台试验研究[J]. 机电工程,2014,31(6):769-774.

[7] 刘 恒,潘再平. SRG 风力发电系统最大风能追踪控制研究[J]. 机电工程,2014,31(9):1196-1200.

[8] 彭 程,潘再平. 风力发电系统中 PWM 整流器脉宽调制方法的研究[J]. 机电工程,2013,30(8):993-996.

[9] 陈家伟,陈 杰,龚春英. 离网风力发电系统功率控制与能量管理策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(S1):7-14.

[10] 郭旭东,申群太,韩 华. 一种离网型风力发电系统的不平衡控制策略[J]. 仪器仪表学报,2013,34(8):1886-1893.

[11] KNIGHT A M. Simple wind energy controller for an expanded operating range[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**,2005,20(2):459-466.

[**编辑**:张 豪]

**本文引用格式**:

单长帅,耿 强,赵晨栋,等. 一种新型离网型永磁风力发电机级联整流装置研究[J]. 机电工程,2015,32(3):414 - 418.

SHAN Chang-shuai, GENG Qiang, ZHAO Chen-dong, et al. Novel cascade rectifier device of off-grid type wind power generation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(3):414 - 418.