

## 基于 PWM 交交变频器的分频风电系统研究

苏 匀<sup>1</sup>, 李少华<sup>2</sup>, 王秀丽<sup>2</sup>, 张 望<sup>1</sup>, 郭宏光<sup>1</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 传统相控式交交变频器由于采用电网换相方式, 电源侧功率因数较低, 在实际应用中需要加装各种无功补偿装置。应用 IGBT 全控型器件和 PWM 技术并利用 Matlab 的 Simulink 环境搭建了一种新型的交交变频器——PWM 交交变频器, 该变频器使工频电源侧电压与电流的位移因数提高到接近 1, 因而大大提高了电源侧的功率因数。同时将该变频器应用于柔性分频输电系统中, 并模拟了一回 200 km/110 kV 输电线路。仿真表明其输送容量大于 90 MW, 相对于工频交流输电系统容量大大提高; 变频器的位移因数提高到 1, 网侧的功率因数得到了大大改善, 达到了 0.9 以上。因此 PWM 交交变频器大大改善了系统性能, 尤其是工频侧的功率因数。

**关键词:** PWM 交交变频器; 分频风电系统; 功率因数; IGBT; Simulink

### Research on fractional frequency wind power system based on PWM cycloconverter

SU Yun<sup>1</sup>, LI Shaohua<sup>2</sup>, WANG Xiuli<sup>2</sup>, ZHANG Wang<sup>1</sup>, GUO Hongguang<sup>1</sup>

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Conventional phase-controlled cycloconverter, due to using line commutation method, its power factor is rather low in grid side, various reactive power compensation devices should be used in practice application. This paper designs a Pulse Width Modulation (PWM) cycloconverter using full-controlled device Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT). A simulation model built by using the Matlab/Simulink software is supplied, the power factor is greatly improved by displacement factor, which is almost 1. The results of the simulations show that Fractional Frequency Wind Power System (FFWPS) based on PWM cycloconverter can remarkably increase transmission capacity, for a 200 km/110 kV transmission line can transfer as much as 90 MW electric power. Therefore, FFWPS system greatly increases transmission capacity that demonstrates its great potential of application. Performance of FFWPS is improved especially the power system's power factor, which is above 0.9.

**Key words:** PWM cycloconverter; FFWPS; power factor; IGBT; Simulink

中图分类号: TM72      文献标识码: A      文章编号: 1674-3415(2015)13-0086-06

## 0 引言

大功率交交变频调速及矢量控制技术是上世纪 70~80 年代发展起来的新技术, 正逐步取代传统的大功率直流调速, 如今理论研究及技术开发已十分成熟。由于普通晶闸管功率大, 价格便宜, 换相工作可靠, 在大功率交交变频调速传动中得到了无可替代的应用。这类变频器也称为相控式交交变频器, 现在也简称为周波变流器<sup>[1-3]</sup>, 其特点是:

(1) 利用电源的交流电压, 通过自然换相断晶闸管。

(2) 可把电网频率的交流电直接转换成可调频

率的交流电, 低频输出波形接近正弦波。但其输出频率上限不高于电网频率的 1/3~1/2。

(3) 没有中间直流环节, 传输效率高。

(4) 可方便实现四象限运行, 即功率的双向传输方便灵活。

由于相控式交交变频器具有高效率和高可靠性的特点, 所以在大功率交流传动中得到了广泛应用。传统的相控式交交变频器采用晶闸管搭建, 利用电源电压进行电网换相, 其电压和电流间存在相位差, 所以在实际的应用中存在一些问题, 其中最为显著的问题就是电源侧的功率因数较低, 需要大量的无功功率补偿, 所以通常在电源侧都需要加装各种无

功补偿装置来提高功率因数<sup>[4-6]</sup>。

随着电力电子技术的发展,全控型器件 IGBT 和 PWM 控制在变流技术中得到了广泛应用<sup>[7-9]</sup>。PWM 控制技术作为变流的核心技术之一,可以同时实现变频、变压和抑制谐波等多项功能,它通过对一系列脉冲的宽度进行调制来等效地获得任意所需的波形,因此 PWM 控制在交流传动等能量变换系统中得到了广泛应用<sup>[10-13]</sup>。

分频风电系统是分频输电理论在风电系统中的应用<sup>[14-15]</sup>,其核心思想是用低频发电和输电(如 50/3 Hz),以此来提高风能的利用效率和输电线路的输送功率,然后用倍频变压器把低频电力还原为 50 Hz 的工频电力向工频系统供电。众所周知,限制线路输送容量的因素有三个,即导线的发热极限、线路的稳定极限和电压降落。对交流远距离输电而言,限制因素主要表现在输送功率极限和电压降落上。采用分频输电,当频率降为 50/3 Hz 时,理论上可以提高约三倍的线路输送容量。

相控式交交变频器自身的特点决定了它非常适合在分频输电系统中充当倍频变压器的角色,但是它同样存在工频电源侧功率因数不高的问题,这是由相控式交交变频器采用电网换相的本质决定的。本文应用 PWM 技术和全控型器件 IGBT 搭建一种新型的 PWM 交交变频器来改善传统交交变频器的运行性能,尤其是电网侧的功率因数。并把该交交变频器应用到分频风电系统中,大大提高了工频网侧的功率因数。

## 1 倍频变压器—交交变频器

### 1.1 倍频变压器的工作原理

分频风电系统的关键设备是倍频变压器,倍频变压器可以采用铁磁型的或电力电子型的。铁磁型倍频变压器结构简单,运行可靠,但目前设计和制造高效大功率的铁磁型三倍频变压器还有一定困难。文献[14]提出了利用在大功率交流调速领域已成熟应用的相控式交交变频器构成电力电子型倍频器的思想,提出了柔性分频输电的概念,它利用传统的相控式交交变频器作为连接分频电力系统和工频电力系统的关键变频装置。相控式交交变频器应用于分频输电系统中时,需要利用其有源逆变的机理实现功率的逆向传送,这是与常规交流传动中使用的相控式交交变频器的本质不同之处。

图 1 即为单相相控式交交变频器电路的基本原理图,它实际上是由正组(P 组)和负组(N 组)两组反并联的晶闸管三相桥式变流电路构成,和直流电动机可逆调速系统用的四象限变流系统完全相同,两

者的工作原理也非常相似。在相控式交交变频电路中,让两组变流电路按一定频率交替工作,就可以给负载 Z 输出该频率的交流电。即通过改变两组变流电路的切换频率,就可以改变交流输出电压的频率;改变变流电路工作时的触发延迟角,就可以改变交流输出电压的幅值。

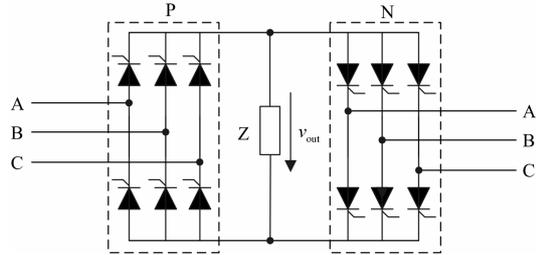


图 1 单相相控式交交变频器原理图

Fig. 1 Main circuit structure of the single-phase phase-controlled cycloconverter

根据晶闸管三相桥式全控整流电路的工作原理,假设在一个周期内触发角  $\alpha$  固定不变,则输出电压波形为矩形波。如果让触发角  $\alpha$  如图 2 所示变化,在半个周期内让正组或反组变流电路的触发角按正弦规律从  $90^\circ$  逐渐减小到  $0^\circ$ ,然后再逐渐增大到  $90^\circ$ ,那么这半个周期电路在每个控制间隔内的平均输出电压就按正弦规律从零逐渐增至最大,再逐渐减小到零,如图 2 中虚线所示。在另外半个周期内,对另一组变流电路进行同样的控制,就可以得到接近正弦波的输出电压(即分频电压输出)。

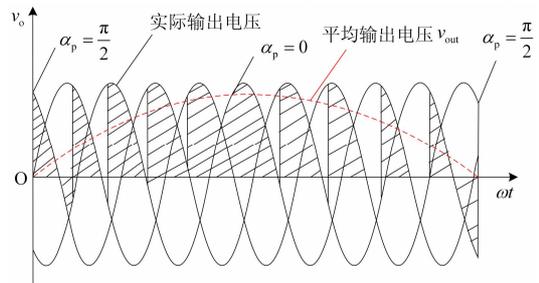


图 2 单相相控式交交变频器输出波形

Fig. 2 Output wave of the single-phase phase-controlled cycloconverter

实际分频风电系统中使用的是三相交交变频器,它由三个结构完全相同的单相变频器组成,彼此的输出电压依次相差  $120^\circ$ 。为了控制方便,在分频输电系统中,常采用输出 Y 联结方式,如图 3 所示,各相变频器的输入端经各自的三相换流变压器接入工频电力系统。这样,各相相控式交交变频器的输出可以单独控制,在用余弦交点法调制时,只需让电压调制信号彼此相差  $120^\circ$ ,变频器即可得到

彼此相差 120°的三相输出电压。

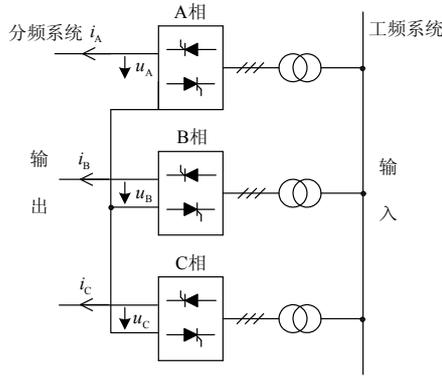


图 3 三相相控式交交变频器星形联结方式  
Fig. 3 Y connection of three-phase phase-controlled cycloconverter

### 1.2 PWM 交交变频器工作原理及控制策略

单相 PWM 交交变频器的电路拓扑与相控式交交变频器基本相似，所不同的是把晶闸管换成 IGBT，如图 1 所示。三相 PWM 交交变频器通过三个结构完全相同的单相变频器星形连接而成，彼此的输出电压依次相差 120°。

在 PWM 交交变频电路中，同样是通过改变两组变流电路交替工作的频率来实现输出交流量的频率，但是使用不同的调制方法。传统相控式交交变频使用最为广泛的调制方法是余弦交点法，而本文的 PWM 交交变频器则使用一种全新的调制方法，详细的调制方案如图 4 所示，其中  $v_0$ ,  $v_1$  为电源电压， $p_0$ ,  $p_1$  为相邻电源电压的交点， $v_{out}$  为参考输出电压。该控制方案的基本思路为：控制每一个波头的导通时间  $2\tau_k$ ，使导通区段平均输出电压等于参考输出电压  $v_{out}$ 。由于每个导通区关于对应波头的最大值对称，所以可使变频器的位移因数接近 1<sup>[16-18]</sup>。

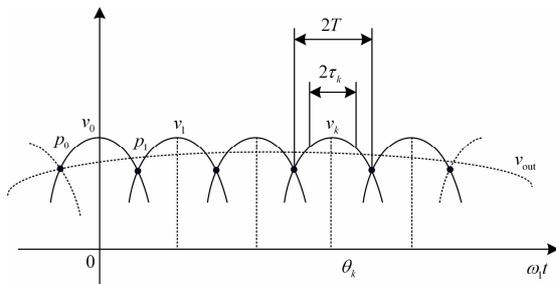


图 4 PWM 控制方法  
Fig. 4 Method of PWM control

设电源电压为

$$v_k = E \sin(\omega_1 t - \theta_k) \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中： $E$  为电源电压的峰值； $\omega_1$  为电源电压的角频率； $\theta_k$  为电源电压的初相角。由图 4 所示可得导通区的平均电压为

$$\overline{v_k} = \frac{E}{T} \sin \tau_k \quad (2)$$

其中， $T$  为相邻线电压两交点间的弧度间隔。参考输出电压(即变频器输出的分频电压参考值)可表示为

$$v_{out} = \alpha V_m \cos(\omega_2 t) = \alpha \frac{E}{T} \sin T \cos(\omega_2 t) \quad (3)$$

其中： $0 \leq \alpha \leq 1$ ； $V_m$  为  $\overline{v_k}$  的最大值，当且仅当  $\tau_k = T$  时  $\overline{v_k}$  取得最大值。

令  $\overline{v_k} = v_{out}$ ，由式(2)、式(3)可得：

$$\tau_k = \arcsin\{\alpha \sin T \cos(\omega_2 t)\} \quad (4)$$

这样，通过控制每个波头的导通区大小  $2\tau_k$  就能使输出电压波形接近理想的参考分频输出电压波形。

## 2 基于 PWM 交交变频器的分频风电系统

近年来风力发电在我国蓬勃发展，随着风机单机容量的增大，整个风力发电装置变得过于庞大，给设计和维护带来问题，为了保证发出 50 Hz 的工频电力，多级行星齿轮的插入使机组重量、效率、成本及可靠性问题没有得到很好的协调解决。此外，受风力的自然特性的影响，风电场的选址一般都比较偏僻，没有大的输电线路通过，百万千瓦级的大风电场发出的电能馈入工频电力系统存在问题。分频输电理论固有特性表明它特别适合应用于风电系统中，首先低频输电可以提高线路的输送容量，其次低频发电可以提高风电机组的整体效率，因为风电机组的齿轮箱是仅次于塔架的笨重部件，重达 50~100 t，相对于 50 Hz 的工频系统，50/3 Hz 系统则减少了齿轮增速比，可以大大减少变速箱的重量，降低后期的维护费用，并且由于交交变频器参与控制<sup>[6, 19-21]</sup>，风机能够运行在变速变频状态，提高了风能捕获率。

本文把 PWM 交交变频器应用于分频输电系统中，以期达到更佳的工频侧功率因数和更优的运行性能，整个系统框图如图 5 所示。风电场发出的分频电力经升压变压器升压后由输电线路传输，并通过交交变频器换流站馈入工频电力系统，其中交交变频器换流站又由 PWM 交交变频器、平波电抗器及换流变压器组成。根据上述系统框图，在 Matlab 的 Simulink 环境下的建模框图如图 6 所示，图中的 A、B、C 分别为工频侧、交交变频器输出侧及分频

侧的观测点。

工频电网额定电压为 110 kV, 分频风电系统的电源电压为 0.69 kV, 分频升压变压器的额定容量为

120 MVA, 额定变比为 110 kV/0.69 kV, 平波电抗器取值为 0.8 H, 架空导线为钢芯铝绞线 LGJ-185, 长度为 200 km。

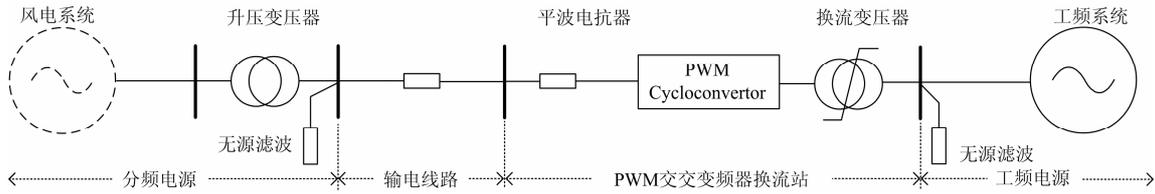


图 5 分频风电系统结构框图

Fig. 5 Structure diagram of FFWPS

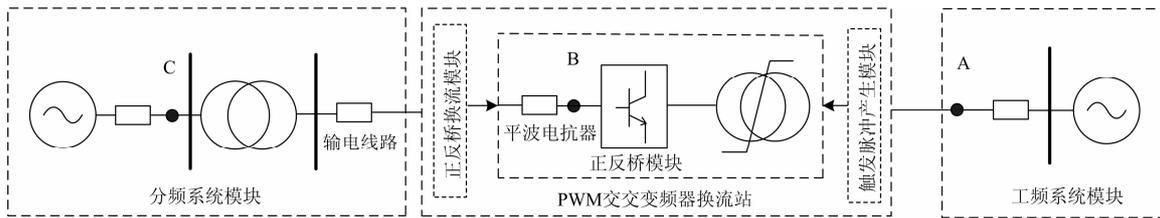


图 6 分频风电系统 Matlab/Simulink 模型框架

Fig. 6 Structure diagram of FFWPS in Matlab/Simulink

### 3 仿真分析

根据图 6 所示的系统框图, 利用 Matlab 中的 Simulink 组件搭建一回交流 200 km/110 kV 的分频输电系统, 其中交交变频器换流站主要由换流变压器、PWM 交交变频器以及平波电抗器构成, 其结构如图 7 所示。

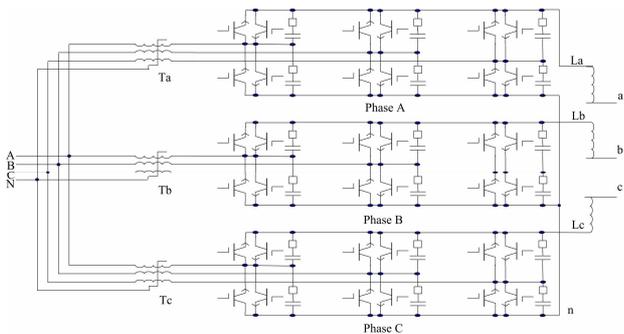


图 7 交交换流站结构图

Fig. 7 Structure diagram of cycloconverter station

设工频电源频率为 50 Hz, 分频电源频率为 50/3 Hz。仿真时间长度设为 0.72 s, 除去两个分频起动周期, 得到 10 个分频周波的仿真波形。系统在 30° 功角时工频侧电压和电流波形分别如图 8 所示, PWM 交交变频器输出电压和电流波形分别如图 9 所示, 分频侧电压和电流波形分别如图 10 所示。

改变系统功角, 测量不同系统功角下工频侧和分频侧的功率因数及系统传输容量如表 1 所示。数

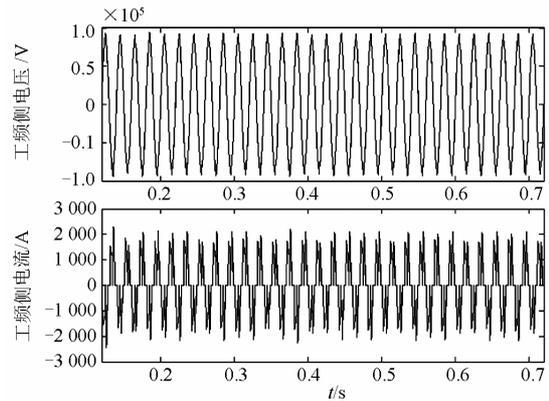


图 8 工频侧电压及电流波形

Fig. 8 Voltage and current waves at grid side

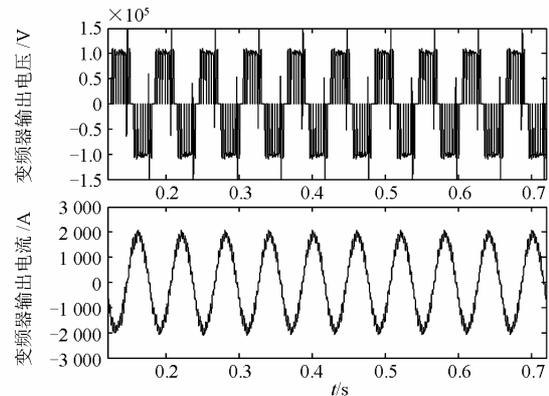


图 9 PWM 交交变频器输出电压及电流波形

Fig. 9 Waves of output voltage and current for PWM cycloconverter

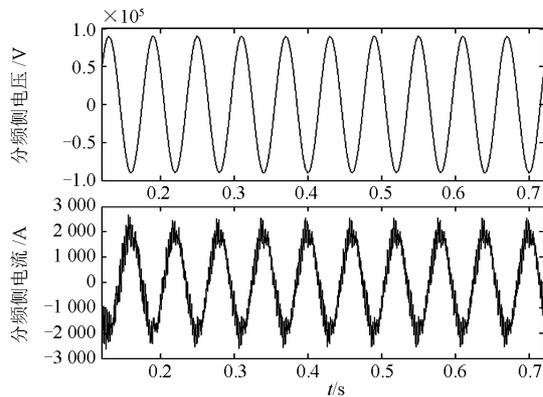


图 10 分频侧电压及电流波形

Fig. 10 Voltage and current waves at fractional frequency side

据表明 PWM 交交变频器工频侧功率因数较相控式交交变频器 0.7<sup>[2-3]</sup>左右的功率因数有了很大的提高。同时系统最大传输功率大于 90 MW，远比同条件下的工频交流输电容量大(同等条件下工频交流输电系统的最大输电功率约为 32 MW)。

表 1 功率因数及传输容量

Table 1 Power factor and transmission capacity

系统功角/(°)	工频侧位移因数	工频侧功率因数	分频侧功率因数	传输容量/MW
30	-0.999 9	-0.918 8	-0.911 6	57
60	-0.999 9	-0.904 1	-0.997 1	84
90	-0.999 9	-0.901 5	-0.747 3	96

对 PWM 交变频器的输出电压电流及工频侧电压电流的谐波分析如表 2 所示。由于工频电流和 PWM 交变频器输出电流的不连续性，导致其谐波含量较传统的相控式交变频器有所增加。

表 2 谐波分析

Table 2 Analysis of harmonics

系统功角/(°)	工频电压畸变率/%	工频电流畸变率/%	变频器电压畸变率/%	变频器电流畸变率/%
30	1.27	42.96	40.78	20.19
60	1.45	47.26	44.61	15.75
90	1.40	48.01	50.04	12.43

## 4 结论

本文利用 PWM 控制技术和全控型器件 IGBT 在 Matlab/Simulink 环境下搭建了一种新型的交交变频器，仿真表明 PWM 交变频器通过提高位移因数显著地提高了电源侧的功率因数，其中位移因数已接近 1。

同时本文把 PWM 交变频器应用于柔性分频输电系统中，仿真同样表明可大大改善工频侧功率

因数；不足的是由于交交变频器输出电压的不连续性导致其输出电压及工频侧谐波电流有所增加，但可通过加装滤波装置予以滤除。

## 参考文献

- [1] 干永革, 王文, 李发海, 等. 交交变频同步电机矢量控制系统供电电网谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 21-25.  
GAN Yongge, WANG Wen, LI Fahai, et al. Study on harmonics of supply net of cycloconverter synchronous motor field-oriented control system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 21-25.
- [2] 马小亮. 大功率交-交变频调速及矢量控制技术[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2003: 20-58.
- [3] 郑诗程, 邓荣军, 陈玲. 基于脉冲阻塞原理的波头连续型三相交-交变频系统研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 149-156.  
ZHENG Shicheng, DENG Rongjun, CHEN Ling. Three phases cycloconverter with continuous wave heads based on plugged pulse principle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 149-156.
- [4] 滕予非, 宁联辉, 王锡凡. 分频输电系统交交变频器桥臂短路故障研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 56-61.  
TENG Yufei, NING Lianhui, WANG Xifan. Short fault of bridge arm in cycloconverter for fractional frequency transmission system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong university, 2014, 48(12): 56-61.
- [5] 叶志浩, 张晓锋, 李红江, 等. 交交变频同步电动机调速系统谐波转矩分析[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 29(6): 941-946.  
YE Zhihao, ZHANG Xiaofeng, LI Hongjiang, et al. Research on harmonic torque of the speed regulating control system with cycloconverter-fed synchronous motor[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 29(6): 941-946.
- [6] 宋卓彦, 王锡凡, 陶伟龙, 等. 基于永磁直驱同步风电机组的分频海上风电系统控制策略[J]. 电力系统及其自动化, 2014, 38(11): 27-33.  
SONG Zhuoyan, WANG Xifan, TAO Weilong, et al. Control strategy for PMSG based wind turbines in fractional frequency offshore wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 27-33.
- [7] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on

- simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [8] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.  
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [9] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 27-33.
- [10] 杨兴华, 杨喜军, 张哲民, 等. 矩阵整流器单周期控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 38-45.  
YANG Xinghua, YANG Xijun, ZHANG Zhemin, et al. Research on one-cycle control strategy of matrix rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 38-45.
- [11] 韦徵, 樊轶, 李臣松, 等. 三相四桥臂整流器的单周期控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 121-129.  
WEI Zheng, FAN Yi, LI Chensong, et al. Research of three-phase four legs rectifier based on one-cycle control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 121-129.
- [12] 程启明, 程尹曼, 薛阳, 等. 三相电压源型 PWM 整流器控制方法的发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 145-154.  
CHENG Qiming, CHENG Yinman, XUE Yang, et al. A summary of current control methods for three-phase voltage-source PWM rectifiers[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 145-154.
- [13] 李冬辉, 梁宁一. 带有源滤波功能的 PWM 整流器预测直接功率控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 82-87.  
LI Donghui, LIANG Ningyi. Predictive direct power control of PWM rectifier with active power filtering function[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 82-87.
- [14] 胡超凡, 王锡凡, 曹成军, 等. 柔性分频输电系统可行性研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(3): 16-21.  
HU Chaofan, WANG Xifan, CAO Chengjun, et al. Feasibility research of flexible fractional frequency transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(3): 16-21.
- [15] 王锡凡. 分频风电系统[J]. 现代电力, 2007, 24(2): 1.  
WANG Xifan. Fractional frequency wind power system[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(2): 1.
- [16] MIYAZAWA S, NAKAMURA F. New cycloconverter with static induction transistors[J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings B, 1989, 136(6): 293-298.
- [17] PELLY B R. Thyristor phase-controlled and cycloconverters[M]. New York: John Wiley & Sons, 1971.
- [18] 李少华. PWM 交交变频器分频风电系统研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2008.  
LI Shaohua. Research on PWM cycloconverter and fractional frequency wind power system[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008.
- [19] 迟方德, 王锡凡, 王秀丽. 风电经分频输电装置接入系统研究[J]. 电力系统及其自动化, 2008, 32(4): 59-63.  
CHI Fangde, WANG Xifan, WANG Xiuli. A new wind power grid connection method based on fractional frequency transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 59-63.
- [20] 朱卫平, 王秀丽, 王锡凡. 变速变频风力发电系统最优风能捕获运行方式[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 94-98.  
ZHU Weiping, WANG Xiuli, WANG Xifan. Optimal wind power capturing operational mode of a variable-speed variable-frequency wind power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 94-98.
- [21] 朱卫平, 王秀丽, 王锡凡. 考虑输变设备的分频风力发电系统最优控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 93-97.  
ZHU Weiping, WANG Xiuli, WANG Xifan. Optimal wind power output control of a fractional frequency wind-power generation system considering transmission and distribution equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 93-97.

收稿日期: 2014-09-26; 修回日期: 2015-01-16

作者简介:

苏 匀(1983-), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为风力发电及直流输电; E-mail: 121796033@qq.com

李少华(1982-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为直流输电、新型输电方式等;

王秀丽(1961-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统规划、电力市场、电力系统可靠性、电力系统分析、新型输电方式。

(编辑 葛艳娜)