

基于双静止坐标系的风力发电机单位功率因数运行控制策略

张为民¹, 谢常莹¹, 胡伟², 年珩²

(1. 合肥为民电源有限公司, 安徽 合肥 230001; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为实现风力发电机的单位功率因数运行, 提出了一种基于双静止坐标系的控制方法, 分别在 $\alpha\beta$ 坐标系和超前 $\alpha\beta$ 坐标系 90° 的两相双静止坐标系下对风力发电机的输出电压进行Clarke变换, 并将变换后的各轴分量经处理后进行叠加, 由此获得风力发电机运行在单位功率因数输出模式对应的整流器参考指令。在该控制策略下, 风力发电机的输出电压与输出电流的相位相反, 实现单位功率因数发电运行。该方法避免了传统方法中锁相环的复杂运算过程, 实现方法简单, 响应速度快。最后通过仿真和实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 风力发电; 单位功率因数; 双静止坐标系

Unit power factor operation control strategy of wind power generator based on dual static coordinate systems

ZHANG Weimin¹, XIE Changying¹, HU Wei², NIAN Heng²

(1. Hefei Win Power Co., Ltd., Hefei 230001, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To realize the unit power factor operation of wind power generator, a control method based on dual static coordinate systems is proposed. The output voltage of wind power generator is transformed by Clarke transform in two-phase static coordinate system and 90 degrees advanced coordinate system respectively. The transformed components of each axe are superimposed after processing. Then reference instructions of the rectifier corresponding to the unit power factor output mode of the wind power generator are obtained. Under this control strategy, phases of the output voltage and the output current of the wind power generator are opposite. Thus the unit power factor operation is realized. This method avoids the complex operation of phase-locked loop in traditional methods. Therefore, this method is simple with fast response speed. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation and experiment.

Key words: wind power generator; unit power factor; dual static coordinate systems

0 引言

现有的风力发电机单位功率因数运行控制策略大多建立在两相同步旋转坐标系上, 依靠锁相环来检测转子位置信号^[1], 因此锁相环的检测

准确性成为影响风力发电机组控制性能的关键因素^[2]。但在风力发电机输出交流电压发生畸变或频率发生突变时, 传统的锁相环无法快速精确地检测转子位置信号。另外, 锁相环中需要用到比

例积分控制器，涉及到控制器的参数设计，增加了控制系统的复杂性，降低了风力发电机组的运行性能。

针对上述问题，目前风力发电机的无锁相环控制方法得到一定的发展。文献[3]推导了电网电压矢量角的正余弦值与电网电压在两相 $\alpha\beta$ 静止坐标系下分量之间的关系，从而获得电网电压矢量角信息，实现三相并网变流器在 dq 坐标系下的无锁相环控制。文献[4]通过在直接转矩控制闭环调节中引入基于二阶矢量积分器的直接谐波控制，避免了锁相环带来的稳定性问题，并改善了逆变器在谐波电网下的运行性能。文献[5]由控制器直接生成与电网电压同频不同相的相角基准参与坐标变换，并采用无功功率闭环调节控制策略，对频率给定进行实时校正。但以上这些文献中的控制方法均是基于固定旋转频率的虚拟 dq 坐标系，需要进行多次坐标变换，增加了控制算法的复杂性，降低了系统的响应速度。

为了能够简单、快速地实现风力发电机的单位功率因数运行，本文提出一种基于双静止坐标系的无锁相环控制方法，分别在 $\alpha\beta$ 坐标系和超前 $\alpha\beta$ 坐标系 90° 的两相静止坐标系中对风力发电机的输出电压进行Clarke变换，并将变换后的各轴分量经过处理后进行叠加，由此得到使得风力发电机单位功率因数输出对应的整流器参考指令，并采用空间矢量脉冲宽度调制（Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM）算法控制三相脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）整流器的运行。在该控制策略下，风力发电机的输出电压与输出电流保持反相位，实现单位功率因数运行，避免了传统控制方法中锁相环复杂的运算过程，实现方法简单，响应速度快。最后搭建Matlab仿真模型，并搭建30 kW实验系统，对所提控制策略进行仿真和实验验证。

1 主电路

风力发电系统的主电路拓扑如图1所示。其中， u_{ga} 、 u_{gb} 和 u_{gc} 为风力发电机组输出的交流电压， i_{ga} 、 i_{gb} 和 i_{gc} 为风力发电机输出的三相电流，

L 、 R 分别为三相PWM整流器交流侧的滤波电感及其寄生电阻， u_{ca} 、 u_{cb} 和 u_{cc} 为三相PWM整流器交流侧的电压， C 为三相PWM整流器的直流母线电容， U_{dc} 、 I_{dc} 分别为直流母线电容的电压、电流，Battery为直流母线上连接的蓄电池。

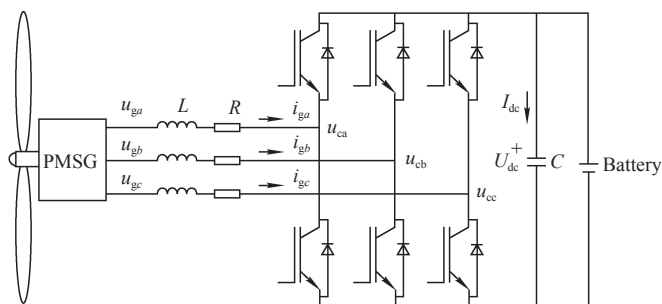


图1 风力发电系统主电路拓扑

Fig. 1 Main circuit topology of wind power system

风力发电系统的主电路在 $\alpha\beta$ 坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} u_{g\alpha} = Ri_{g\alpha} + L \frac{di_{g\alpha}}{dt} + u_{c\alpha} \\ u_{g\beta} = Ri_{g\beta} + L \frac{di_{g\beta}}{dt} + u_{c\beta} \end{cases} \quad (1)$$

式中， α 、 β 为在两相静止坐标系下的 α 、 β 轴分量。

2 控制策略

为了实现风力发电机的单位功率因数运行，采用如图2所示的控制结构图，主要由信号检测与调理电路、DSP控制电路和驱动与保护电路三个部分组成，各部分的功能如下。

1) 信号检测与调理电路。实时检测风力发电机的输出电压、电流以及直流母线电压、电流等信息，并将这些信号传输到DSP控制电路中。本文的主要工作即是在该模块中进行的。

2) DSP控制电路。按照设定的控制逻辑，结合输入的电气量，输出控制整流电路功率开关器件的PWM信号。

3) 驱动与保护电路。驱动电路用于将DSP输出的PWM信号进行放大并增强其驱动能力，用于驱动功率开关器件；保护电路作用于直流母线电容，当其电压超出预设上限阈值时，通过保护电路限制直流母线电压的幅值。

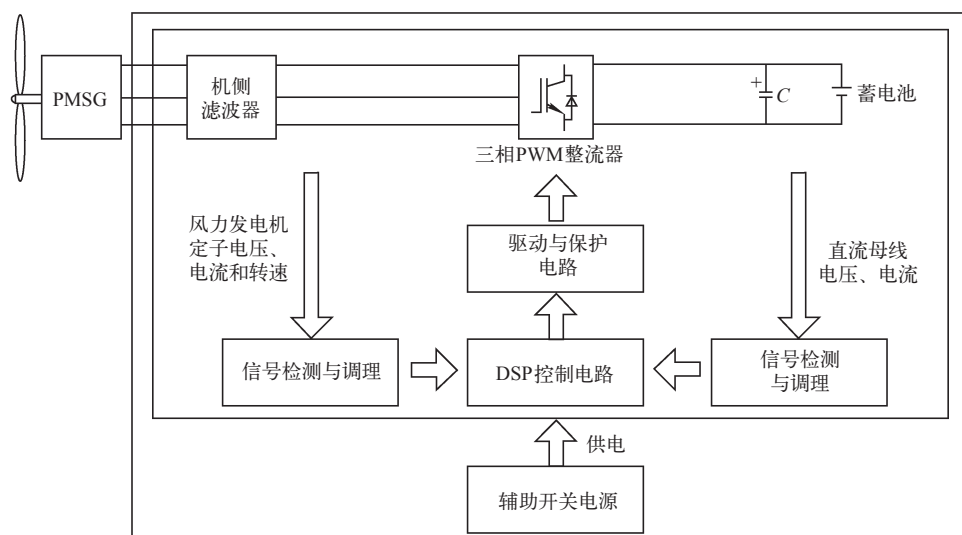


图2 风力发电机单位功率因数运行控制结构图

Fig. 2 Unit power factor operation control structure diagram of wind power system

根据图2所示的控制结构图，设计出了如图3所示的基于静止坐标系的无锁相环节风力发电机单位功率因数运行的控制框图。

在Clarke变换模块1中，根据式(2)对风力发电机组输出的三相交流电压 u_{ga} 、 u_{gb} 和 u_{gc} 进行坐标变换，得到两相静止坐标系下的 α 轴分量 $u_{g\alpha}$ 和 β

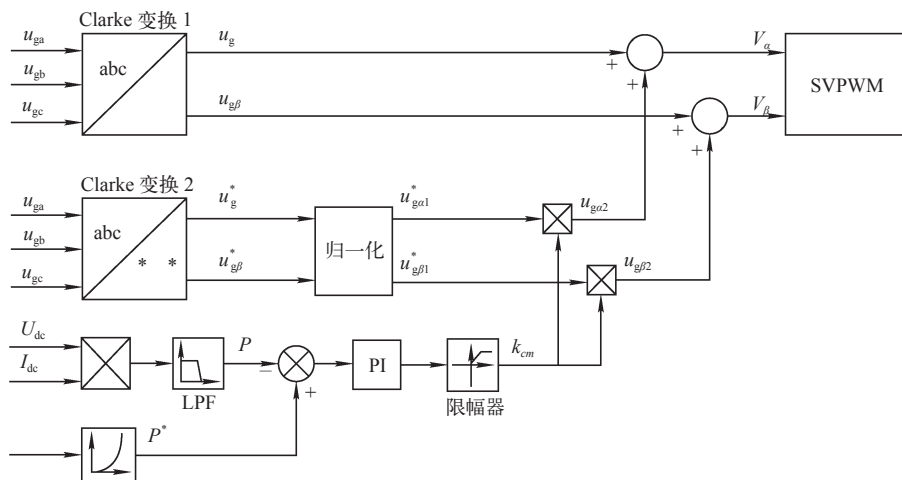


图3 风力发电机单位功率因数运行控制框图

Fig. 3 Unit power factor operation control block diagram of wind power system

轴分量 $u_{g\beta}$ 。

$$\begin{bmatrix} u_{g\alpha} \\ u_{g\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将 $\alpha\beta$ 坐标轴逆时针旋转 90° ，得到超前 $\alpha\beta$ 坐标系 90° 的新坐标系 $\alpha^*\beta^*$ ，在Clarke变换模块2中，根据式(3)对风力发电机组输出的三相交流

电压 u_{ga} 、 u_{gb} 和 u_{gc} 进行坐标变换，得到两相静止坐标系 $\alpha^*\beta^*$ 下的 α^* 轴分量 $u_{g\alpha}^*$ 与 β^* 轴分量 $u_{g\beta}^*$ 。

$$\begin{bmatrix} u_{g\alpha}^* \\ u_{g\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

图4为实现风力发电机输出电压、电流的反相控制过程示意图。

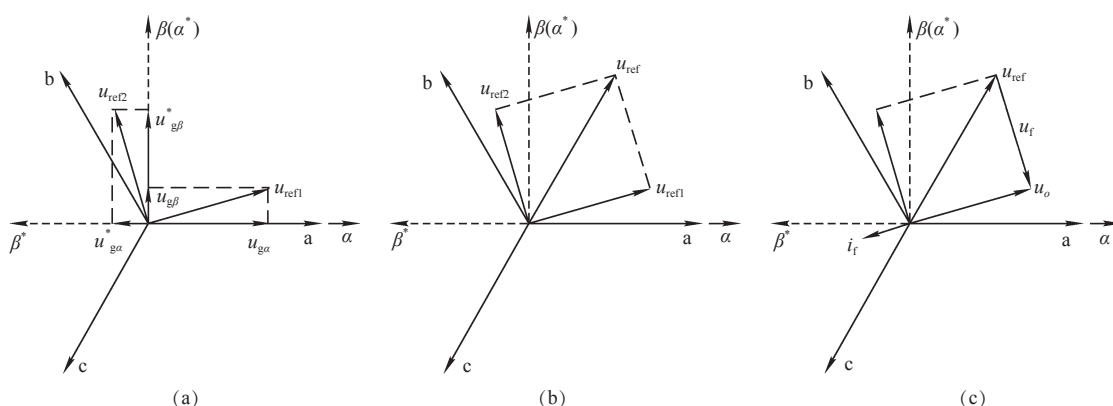


图4 风力发电机输出电压、电流控制过程示意图

Fig. 4 Output voltage and current control process diagram of wind power generator

Clarke变换模块1与Clarke变换模块2中相应的坐标关系如图4a所示。其中， u_{ga} 、 u_{gb} 合成的电压矢量为 u_{ref1} ， u_{ga}^* 、 u_{gb}^* 合成的电压矢量为 u_{ref2} ， u_{ref1} 与 u_{ref2} 合成的电压矢量为 u_{ref} 。由于两坐标系互差 90° ，因此 u_{ref2} 超前 u_{ref1} 90° ，如图4b所示。图1中电感 L 上的电压降 u_f 为风力发电机输出电压 u_o 与逆变器输出电压 u_{ref} 之差，如图4c所示。由于电感 L 上的电流 i_f 滞后电压 u_f 90° ，因此电感电流 i_f ，也即风力发电机的输出电流与风力发电机输出电压 u_o 的相位相差 180° ，实现了风力发电机的单位功率因数运行。

对 u_{ga}^* 、 u_{gb}^* 进行归一化，得到满足式(4)所示关系的 u_{ga1}^* 、 u_{gb1}^* 。

$$(u_{ga1}^*)^2 + (u_{gb1}^*)^2 = 1 \quad (4)$$

直流母线电容的电压 U_{dc} 与电流 I_{dc} 之积通过低通滤波器 (Low Pass Filter, LPF) 后，得到三相PWM整流器直流侧的实时输出功率 P 。根据风力发电机的最大输出功率与转速的关系曲线，查表得到风力发电机当前的转速 ω 对应的最大输出功率 P^* 。对 P 与 P^* 的差值进行PI调节，并将PI调节器的输出经限幅器限幅，得到调节系数 k_{cm} ，且满足 $k_{cm} \geq 0$ ，防止三相PWM整流器的直流母线向风力发电机反向充电。

将 k_{cm} 分别与 u_{ga1}^* 、 u_{gb1}^* 相乘，如式(5)所示，得到 u_{ga2} 、 u_{gb2} 。

$$\begin{aligned} u_{ga2} &= k_{cm} u_{ga1}^* \\ u_{gb2} &= k_{cm} u_{gb1}^* \end{aligned} \quad (5)$$

将 u_{ga} 、 u_{gb} 分别与 u_{ga2} 、 u_{gb2} 进行叠加，如公式

(6) 所示，得到 V_α 、 V_β 。

$$\begin{aligned} V_\alpha &= u_{ga} + u_{ga2} \\ V_\beta &= u_{gb} + u_{gb2} \end{aligned} \quad (6)$$

将 V_α 、 V_β 送入SVPWM模块中，生成用于控制三相PWM整流器各相桥臂功率开关器件开通和关断所需的脉冲信号，实现PWM整流器的输出对蓄电池充电的有效控制。

3 仿真和实验结果

对无锁相环控制的风力发电系统搭建Matlab/Simulink仿真模型。表1给出了系统主要的电气参数。

表1 系统主要电气参数

Tab. 1 Main electrical parameters of the system

参数	数值
风力发电机额定功率/kW	30
整流器额定功率/kW	30
直流母线额定电压/V	400
开关频率/kHz	10

图5为风力发电机输出电压经双静止坐标系进行Clarke变换之后的各轴分量的波形。其中， u_{ga} 、 u_{gb} 为Clarke变换模块1所得的 α 轴分量和 β 轴分量， u_{ga2} 、 u_{gb2} 为Clarke变换模块2所得的分量经归一化等处理后所得的 α 轴分量和 β 轴分量。可以看出， u_{ga2} 、 u_{gb2} 的相位分别超前 u_{ga} 、 u_{gb} 的相位 90° 。

图6为风力发电机A相的输出功率。从图6中可以看出，在 u_{ga2} 和 u_{gb2} 逐渐增大的过程中，风力发电机的输出功率也跟随控制指令逐渐增大，并趋于稳定。

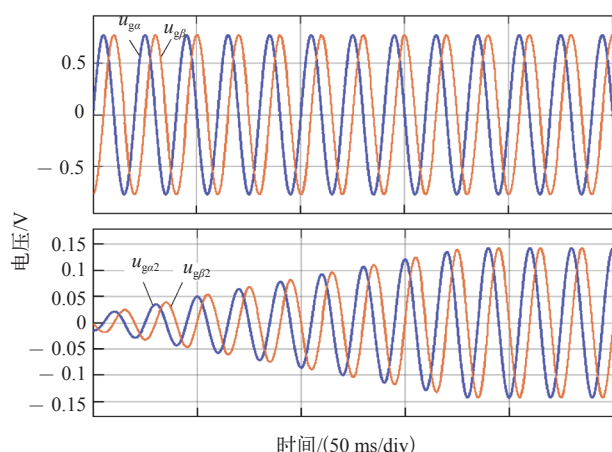


图5 风力发电机输出电压经变换后的各轴分量

Fig. 5 Converted components of each axis of output voltage of the wind power generator

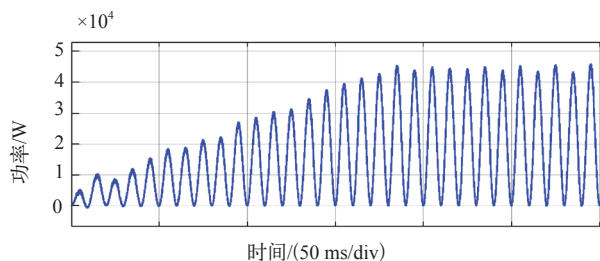


图6 风力发电机A相的输出功率

Fig. 6 Output power of A phase of wind power generator

图7为风力发电机输出相电压和相电流的波形。从图1中可以看出,采用本文所提控制方案,风力发电机输出的相电压与相电流保持同频反相,实现单位功率因数运行。

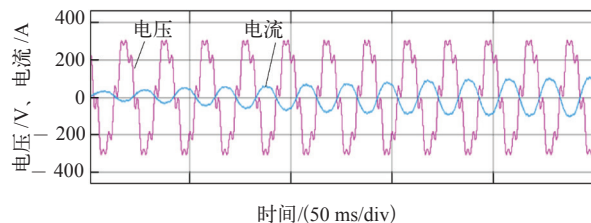


图7 风力发电机输出电压、电流仿真波形图

Fig. 7 Simulated waveform of the output voltage and current of the wind power generator

为了验证所提出的控制策略实际的应用效果,搭建了如图8所示的实验平台。使用电动机来拖动发电机运行,模拟风力发电的过程。三相PWM整流器的额定功率为30 kW,功率器件的开关频率为10 kHz。

图9为风力发电机输出的AB线电压和A相电

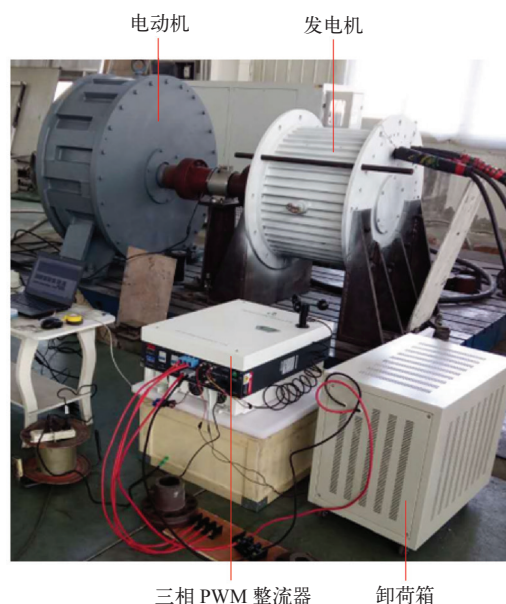


图8 30 kW整流器实验平台

Fig. 8 Experimental platform of the 30 kW rectifier

流的实验波形。从图9中可以看出,AB线电压的波峰超前A相电流的波谷约 30° 。由于线电压超前于相电压 30° ,因此A相电压的波峰与A相电流的波谷相位相同,即风力发电机的输出电压与电流的相位相反。

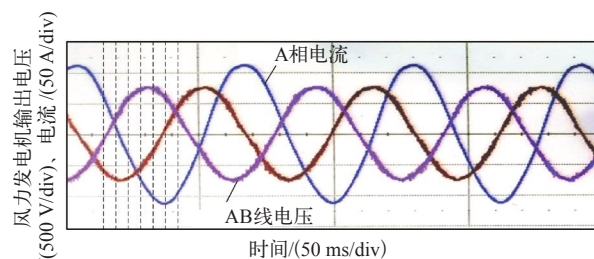


图9 风力发电机输出电压、电流实验波形

Fig. 9 Experimental waveform of the output voltage and current of the wind power generator

4 结束语

为实现风力发电机的单位功率因数运行,本文提出了一种基于双静止坐标系的控制方法,分别在 $\alpha\beta$ 坐标系和超前 $\alpha\beta$ 坐标系 90° 的两相静止坐标系中对风力发电机的输出电压进行Clarke变换,并将变换后的各轴分量经过归一化等处理后进行叠加,采用SVPWM调制算法控制三相PWM整流器的运行。该控制策略能够使风力发电机的输出电压与电流保持反相位,实现风力发电机的

单位功率因数运行, 并且避免了锁相环复杂的运算过程, 实现方法简单, 响应速度快。最后通过搭建Matlab仿真模型以及30 kW实验系统, 验证了所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 李小喜, 宋建成, 曲兵妮, 等. 单位功率因数三相PWM整流器的设计[J]. 工矿自动化, 2011, 37(8): 67-70.
LI Xiaoxi, SONG Jiancheng, QU Bingni, et al. Design of unit power factor three-phase PWM rectifier[J]. Industry and Mine Automation, 2011, 37(8): 67-70.
- [2] 李冉, 龙雪涛, 陈辉. 基于锁相环的永磁同步电机无传感器控制[J]. 电气传动, 2013, 43(8): 8-12.
LI Ran, LONG Xuetao, CHEN Hui. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on phase-locked loop[J]. Electric Drive, 2013, 43(8): 8-12.
- [3] 邹灿. 三相并网变流器的无锁相环控制策略研究[J]. 集成电路应用, 2019, 36(1): 18-22.
ZOU Can. Research on phase-locked loop-free control strategy of three-phase grid-connected converter[J]. Applications of IC, 2019, 36(1): 18-22.
- [4] 年珩, 李龙奇, 程鹏. 谐波电压下并网逆变器的无锁相环直接功率控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3243-3253, 3380.

NIAN Heng, LI Longqi, CHENG Peng. Direct power control without phase-locked loop for grid-connected inverters under harmonic voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3243-3253, 3380.

- [5] 郑昕昕, 肖岚, 田洋天, 等. 双向三相AC/DC变流器的无锁相环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 79-87, 12.

ZHENG Xinxin, XIAO Lan, TIAN Yangtian, et al. Phase-locked loop-free control strategy for bidirectional three-phase AC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 79-87, 12.

作者简介



张为民

张为民(1974-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为小型风力和光伏发电变流技术。

谢常莹(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术。

胡伟(1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力电子技术。

年珩(1978-), 男, 教授, 主要研究方向为新能源技术、风力发电技术等。

(收稿日期: 2019-03-25) **EA**