

不平衡电网电压下永磁直驱风力发电系统 网侧变流器控制策略

苏绍泽, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川成都 610065)

A Control Strategy of the Grid-side Converter for Directly-driven Wind Turbine With PM Synchronous Generator Under Unbalanced Grid Voltage Level

SU Shaoze, YANG Honggeng

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

摘要: 建立了电网电压不平衡环境下永磁直驱风力发电机电网侧变流器的数学模型, 分析了直流侧电压 2 倍频分量产生机理, 讨论了并网电抗器上的功率波动对网侧变流器双电流控制策略的影响。为抑制不平衡电网电压下直流侧电压 2 倍频分量, 在计及并网电抗器上功率波动的基础上, 提出了一种基于正负序电压分别定向的双电流控制策略, 并引入了并网电抗器上功率波动修正量对控制算法中的参考电流进行修正。仿真结果表明所提控制策略不仅能有效地控制正负序电流、抑制直流侧电压的 2 倍频分量, 还能减少并网电流的谐波含量。

关键词: 风力发电; 不平衡电网电压; 网侧变流器; 电压定向; 双电流控制

Abstract: A mathematical model of the grid-side converter for directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator (PMSG) under unbalanced grid conditions is built, the formation mechanism of voltage double-frequency components on DC side is analyzed, and the influence of power ripple of grid-connected reactor on dual current control is discussed. To suppress the voltage double-frequency component on DC side, an orientated dual current control strategy, which is based on positive and negative sequence voltages respectively, is proposed by considering the power ripple on grid-connected reactor, and the correction of power ripple on grid-connected reactor is introduced to revise reference current in control algorithm. Simulation results show that the proposed control strategy can not only effectively control positive and negative sequence currents and depress voltage double-frequency component on DC side, but also can reduce harmonic component of grid-connected current.

Keywords: wind power generation; unbalanced grid voltage;

grid-side converter; voltage-oriented; dual current control

0 引言

由于风电场接入电网的功率不断增加, 风电场与电网的交互影响越来越大, 为了提高电网的稳定性及电能质量, 电网对风电场并网提出了一系列的要求, 其中包括低电压穿越要求^[1-2]。

采用全功率变流器并网的永磁直驱同步风力发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG), 实现了风力发电机与电网的完全解耦, 控制灵活, 通过合理控制能极大地提高低电压穿越能力^[3-4]。

电网不对称故障或不对称负载、输电线非全换位等, 都可以导致电网电压不平衡。电网电压不平衡时, 由于负序分量的产生, 如果变流器采用传统正序控制策略, 将导致直流侧电压产生 2 倍频波动^[5-6], 造成直流电容频繁充放电, 降低电容器寿命。而直流侧的 2 次谐波电压和电流将通过脉宽调制(pulse width modulation, PWM)的作用在交流侧产生 $2n+1$ 次非特征谐波^[7]。因此, 研究不平衡电网电压条件下直流侧电压的稳定控制策略尤为重要。

文献 [8-9] 直接通过稳定输至电网的有功功率来抑制直流端电压的 2 倍频分量。大多数文献则利用改进的基于对称分量法的双电流控制策略来抑制直流端的 2 倍频分量^[10-13]。文献 [12] 提出了一种正负序电压分别定向的双电流控制策略, 并结合能量泄放回路来实现直流侧电压的稳定。文献 [13] 针对电网频率波动情况, 加入了锁相环频率

修正环节,提出了一种直流侧采样电压带2倍频陷波函数的双电流控制策略。以上控制策略都是在忽略并网电抗器上的功率波动条件下,通过注入电网一个合适的正负序电流来实现对输至电网的有功功率的控制,从而实现对直流电压的控制。但对于兆瓦级的风电机组中,全功率变流器开关频率较低(约2 kHz),并网电抗器的电感值相对较大,因此忽略并网电抗器上的功率波动将对控制效果带来不利影响^[14]。文献[15-16]通过引入网侧变流器桥臂输出电压变量,虽然可以消除直流端的2倍频分量,但控制系统复杂。文献[17]提出了一种考虑并网电抗器上的功率波动,电压外环引入前馈的控制策略,但计算过程复杂。

针对上述问题,本文基于正负序电压分别定向原理,提出了不平衡电网电压下永磁直驱风力发电系统网侧变流器的双电流控制策略,并引入了并网电抗器上功率波动修正量对控制算法中的参考电流进行修正。仿真结果表明本文所提控制策略,不仅能有效地控制正负序电流、抑制直流侧2倍频分量,还能改善并网电流的谐波特性。

1 不平衡电网电压条件下网侧变流器数学模型

1.1 功率特性分析

基于全功率变流器并网的直驱式永磁同步风力发电机系统的主电路如图1所示。发电机发出的功率全部通过变流器输送至电网,电网与发电机通过直流环节隔离开来,实现了完全解耦。机侧变流器主要控制风机发出的有功功率和定子电压;网侧变流器则主要控制直流端电压和输至电网的无功功率^[18]。

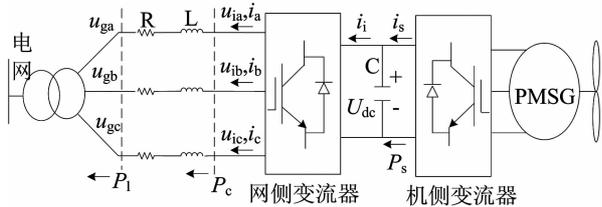


图1 永磁直驱风电机组结构

风电系统中通常采用三相无中线并网,无零序分量流通过径,因此电网电压不对称时只考虑正序分量和负序分量。所以,电网电压不平衡时,PMSG 机组网侧变流器解耦模型如式(1)^[5]。其中上标+和-分别表示正序、负序 dq 轴分量。

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} i_d^+ = u_{gd}^+ - u_{id}^+ - R i_d^+ + \omega L i_q^+ \\ L \frac{d}{dt} i_q^+ = u_{gq}^+ - u_{iq}^+ - R i_q^+ - \omega L i_d^+ \\ L \frac{d}{dt} i_d^- = u_{gd}^- - u_{id}^- - R i_d^- - \omega L i_q^- \\ L \frac{d}{dt} i_q^- = u_{gq}^- - u_{iq}^- - R i_q^- + \omega L i_d^- \end{cases} \quad (1)$$

当电网电压不对称时,风电机组馈入电网的有功、无功功率分别为

$$P_1 = P_{1_0} + P_{1_{-e2}} \cos 2\omega t + P_{1_{-s2}} \sin 2\omega t \quad (2)$$

$$Q_1 = Q_{1_0} + Q_{1_{-e2}} \cos 2\omega t + Q_{1_{-s2}} \sin 2\omega t \quad (3)$$

式中: P_{1_0} 、 Q_{1_0} 分别为馈入电网有功、无功功率直流分量, $P_{1_{-e2}}$ 、 $P_{1_{-s2}}$ 、 $Q_{1_{-e2}}$ 、 $Q_{1_{-s2}}$ 分别为有功、无功功率的2倍频余弦和正弦分量。

$$\begin{bmatrix} P_{1_0} \\ P_{1_{-e2}} \\ P_{1_{-s2}} \\ Q_{1_0} \\ Q_{1_{-e2}} \\ Q_{1_{-s2}} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{gd}^+ & u_{gq}^+ & u_{gd}^- & u_{gq}^- \\ u_{gd}^- & u_{gq}^- & u_{gd}^+ & u_{gq}^+ \\ u_{gd}^+ & -u_{gq}^+ & u_{gd}^- & -u_{gq}^- \\ u_{gd}^- & -u_{gq}^- & u_{gd}^+ & -u_{gq}^+ \\ u_{gd}^+ & -u_{gq}^+ & u_{gd}^- & -u_{gq}^- \\ u_{gd}^- & u_{gq}^- & -u_{gd}^+ & -u_{gq}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} \quad (4)$$

为简化运算过程与控制结构,本文通过网侧电压锁相环实现正负序电压分别定向。在正序网络中,将 d^+ 轴定向于正序电压向量方向,在负序网络中将 d^- 轴定向于负序电压向量方向。因此在同步旋转坐标(dq坐标)系下电网电压向量为

$$\begin{bmatrix} u_{gd}^+ \\ u_{gd}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_m^+ \\ u_m^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{gq}^+ \\ u_{gq}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: u_m^+ 和 u_m^- 为正负序电压幅值。

直流侧功率平衡方程为

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} U_{dc} + P_c = P_s \quad (6)$$

式中: P_c 为网侧变流器端口输出的有功功率; P_s 为发电机侧整流器输至直流侧的有功功率。

在故障期间认为 P_s 保持不变。若忽略并网电抗器上的功率消耗,则 $P_c = P_1$, 将式(2)代入式(6)得

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{U_{dc} C} [(P_s - P_{1_0}) - P_{1_{-e2}} \cos 2\omega t - P_{1_{-s2}} \sin 2\omega t] \quad (7)$$

从上式中可以看出,只要合理控制 i_d^- 、 i_d^+ 、 i_q^+ 、 i_q^- , 使网侧有功功率的2倍频分量 $P_{1_{-e2}}$ 、 $P_{1_{-s2}}$ 为0, 就可以保证直流侧电容上的电压恒定。所以,以往的忽略并网电抗器上功率消耗的双电流

控制策略都是令 P_{1_c2} 、 P_{1_s2} 为 0，然后利用式(4)中的前 4 个方程求得正负序参考电流，再利用式(1)进行解耦控制^[10-13]。然而对于开关频率较低的全功率变流器而言，这种忽略了并网电抗器上的功率消耗的控制策略将对控制效果产生不利影响。

1.2 谐波传递特性分析

为简要分析直流电压波动对变流器交流侧的影响，只讨论基波电网电动势，采用传统正序控制策略时，记 a 相双极性开关函数基波分量为

$$S_a = A \cos(\omega t) \quad (8)$$

逆变器交流侧 a 相电压为

$$u_{ia} = \frac{1}{2} U_{dc} S_a = \frac{1}{2} U_{dc} A \cos(\omega t) \quad (9)$$

当电网电压不平衡时，由于功率传输的不平衡，直流侧电压将产生 2 倍频分量^[5-7]，所以

$$U_{dc} = \bar{U}_{dc} + \tilde{U}_{dc2} \cos(2\omega t + \theta_2) \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)，计算得

$$u_{ia} = \frac{1}{2} \bar{U}_{dc} A \cos(\omega t) + \frac{1}{4} \tilde{U}_{dc2} A [\cos(3\omega t + \theta_2) + \cos \theta_2] \quad (11)$$

可见，逆变器直流侧 2 次谐波电压将在逆变器交流侧产生 3 次谐波电压，从而导致网侧电流也含有 3 次谐波分量。进一步分析可知，通过 PWM 的调制作用，直流侧偶次谐波分量将在逆变器交流侧产生奇次谐波分量。

2 带并网电抗器功率波动修正量的直流侧电压稳定控制策略

2.1 网侧变流器电流参考值计算

本文采用网侧电压锁相环实现正负序电压分别定向，选取式(4)中前 4 个方程，并将(5)式代入可得

$$\begin{bmatrix} P_{1_0} \\ P_{1_c2} \\ P_{1_s2} \\ Q_{1_0} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{gd}^+ & 0 & u_{gd}^- & 0 \\ u_{gd}^- & 0 & u_{gd}^+ & 0 \\ 0 & -u_{gd}^- & 0 & u_{gd}^+ \\ 0 & -u_{gd}^+ & 0 & -u_{gd}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} \quad (12)$$

解得

$$\begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{P_{1_0}^* u_{gd}^+ - P_{1_c2}^* u_{gd}^-}{(u_{gd}^+)^2 - (u_{gd}^-)^2} \\ -\frac{Q_{1_0}^* u_{gd}^+ - P_{1_s2}^* u_{gd}^-}{(u_{gd}^+)^2 + (u_{gd}^-)^2} \\ -\frac{P_{1_0}^* u_{gd}^- + P_{1_c2}^* u_{gd}^+}{(u_{gd}^+)^2 - (u_{gd}^-)^2} \\ -\frac{Q_{1_0}^* u_{gd}^- + P_{1_s2}^* u_{gd}^+}{(u_{gd}^+)^2 + (u_{gd}^-)^2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

在以往忽略并网电抗器上功率波动的控制策略中，认为式(13)中 $P_{1_0} = P_{c_0}$ 且 P_{1_c2} 、 P_{1_s2} 为 0，此方法实际上是控制馈入电网有功功率 P_1 无 2 倍频分量。但由于并网电抗器上的功率波动， P_c 仍然存在 2 倍频分量。也即是说直流侧电压仍然含有 2 倍频分量，这将不利于变流器的稳定运行。

实际上并网电抗器电感、电阻吸收的有功功率为^[17]

$$\begin{cases} \Delta P_0 = 1.5R[(i_d^+)^2 + (i_q^+)^2 + (i_d^-)^2 + (i_q^-)^2] \\ \Delta P_{c2} = 3[R(i_d^+ i_d^- + i_q^+ i_q^-) + \omega L(i_d^+ i_q^- - i_q^+ i_d^-)] \\ \Delta P_{s2} = 3[R(i_d^+ i_q^- - i_q^+ i_d^-) - \omega L(i_d^+ i_d^- + i_q^+ i_q^-)] \end{cases} \quad (14)$$

当考虑并网电抗器上消耗的有功功率时有

$$P_c = P_{c_0} + P_{c_c2} \cos 2\omega t + P_{c_s2} \sin 2\omega t = P_1 + \Delta P_0 + \Delta P_{c2} \cos 2\omega t + \Delta P_{s2} \sin 2\omega t \quad (15)$$

将(15)式代入(6)式得

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{U_{dc}C} [(P_s - P_{c_0}) - P_{c_c2} \cos 2\omega t - P_{c_s2} \sin 2\omega t] \quad (16)$$

当考虑并网电抗器上功率波动时，为了消除直流侧电压的 2 倍频分量，应使 P_c 无 2 倍频分量，即 $P_{c_c2} = 0$ 、 $P_{c_s2} = 0$ 。则(13)式中

$$\begin{cases} P_{1_0}^* = P_{c_0} - \Delta P_0 \\ P_{1_c2}^* = P_{c_c2} - \Delta P_{c2} = -\Delta P_{c2} \\ P_{1_s2}^* = P_{c_s2} - \Delta P_{s2} = -\Delta P_{s2} \end{cases} \quad (17)$$

当采用 PI 控制器对直流端电压进行调节时，网侧变流器端口输出的有功功率直流分量可以表示为

$$P_{c_0}^* = [(K_p + \frac{K_i}{s})(U_{dc}^* - U_{dc})] U_{dc}^* \quad (18)$$

其中： K_p 、 K_i 分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数。

当电网发生不对称故障，导致电压大幅跌落时，电网可能需要风电场提供无功支持，这时无功控制可以通过无功附加控制实现，但本文为便于控制，直接将无功参考值设为 0，即在故障时采用单位功率因数控制。

2.2 电量正负序分离及锁相环

电网电压不平衡时，由于负序的产生，若直接将电压电流信号进行 Park 变换，dq 坐标系下的电压电流分量将含有 2 倍频分量^[19]。本文利用 T/4 延时法在两相静止坐标系 ($\alpha\beta$ 坐标系) 下分离出电压电流的正负序分量，然后利用锁相环(PLL)得到

往的双电流控制策略基础上考虑了并网电抗器上的功率波动,从而使网侧变流器端口输出有功功率 P_c 的 2 倍频波动得到有效抑制,直流端电压也就得到了稳定。由于本文所提控制策略目的在于控制直流端电压无 2 倍频分量,但由于并网电抗器上的功率波动,使得馈入电网的有功功率 P_1 仍含有部分 2 倍频分量。

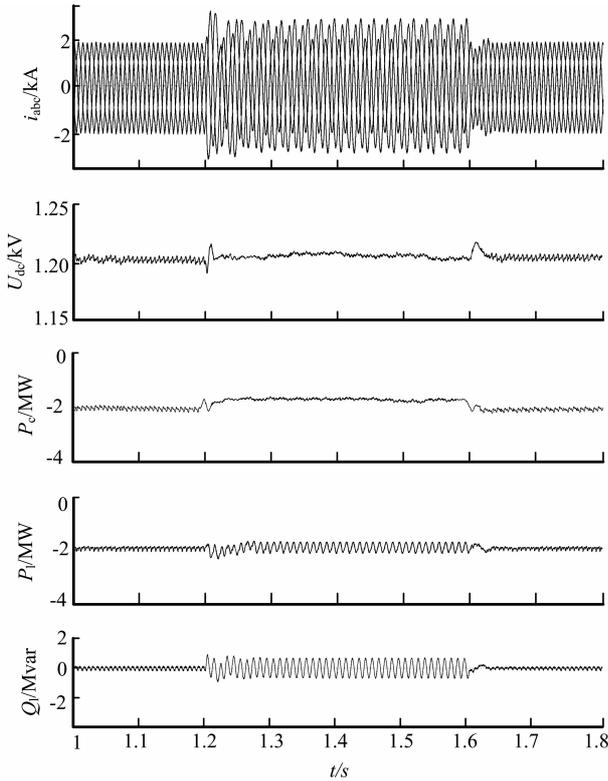


图 5 本文所提控制策略仿真结果

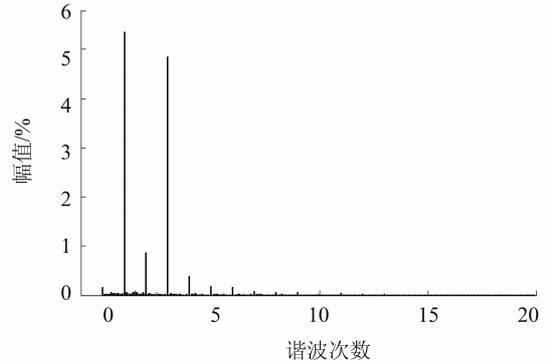
3.3 小结

从图 4 和图 5 中电流的波形可以看到,采用本文所提控制策略,故障情况下电流不对称度有所增加,但由于本文所提控制策略能对负序电流进行有效控制,在抑制直流侧电压 2 倍频分量的同时也减少了网侧电流的谐波含量。

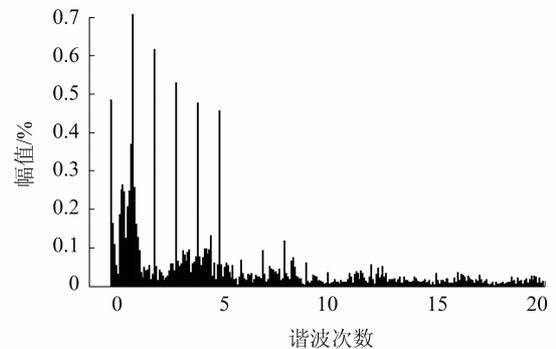
对其中一相电流进行傅里叶分析,如图 6 所示,由图可知,采用本文策略后,谐波幅值大为减小。对并网电流三相进行傅里叶分析,电流的总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)分别从 4.89%、5.13%、5.15% 下降到了 1.19%、2.92%、1.59%。

4 结论

① 电网电压不平衡时,永磁直驱风力发电机



(a) 传统平衡控制策略



(b) 本文所提控制策略

图 6 两种控制策略下并网电流频谱分析

组全功率变流器直流端将出现 2 倍频波动。对于开关频率相对较低的全功率变流器而言,忽略并网电抗器上的功率波动,将直接影响双电流控制策略的控制效果。

② 基于正负序电压分别定向的原理,并计及并网电抗器上的功率波动,提出了一种不平衡电网电压下永磁直驱风力发电系统网侧变流器的双电流控制策略。仿真结果表明,所提策略不仅能有效地抑制直流侧电压 2 倍频分量,还能减少并网电流谐波含量。

③ 下一步还应考虑本文所提双电流控制策略与直流侧 Crowbar 电路的协调控制策略,以提高严重不对称故障时永磁直驱风力发电机低电压穿越能力。

参 考 文 献

- [1] 姚骏, 廖勇, 庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 91-95.
- [2] 中国电力科学研究院. 风电场接入电网技术规定 [S]. 修订版. 北京: 国家电网公司, 2009.
- [3] 李建林, 胡书举, 孔德国, 等. 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究 [J]. 电力系统

- 自动化, 2008, 32(19): 92-95.
- [4] Conroy J F, Watson R. Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator [J]. IET Renew. Power Gen, 2007, 1(3): 182-189.
- [5] 李建林, 许洪华. 风力发电系统低电压运行技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [6] Ng C H, Li Ran, Bumby J. Unbalanced grid fault ride through control for a wind turbine inverter [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2008, 44(3): 845-856.
- [7] 袁旭峰, 高璐, 文劲宇, 等. VSC-HVDC三相不平衡控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 1-5.
- [8] 耿强, 夏长亮, 阎彦, 等. 电网电压不平衡情况下PWM整流器恒频直接功率控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(36): 79-85.
- [9] 赵紫龙, 吴维宁, 王伟. 电网不对称故障下直驱风电机组低电压穿越技术 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 87-91.
- [10] Salvador Alepuz, Sergio Busquets-Monge, Josep Bordonau, et al. Control Strategies Based on Symmetrical Components for Grid-Connected Converters Under Voltage Dips [J]. IEEE Trans. on Industry Electronics, 2009, 5(6): 2162-2173.
- [11] Kim K H, Jeung Y C, Lee D C, et al. LVRT Scheme of PMSG Wind Power Systems Based on Feedback Linearization [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2012, 27(5): 2376-2384.
- [12] 肖磊, 黄守道, 黄科元, 等. 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统直流母线电压稳定控制 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 123-129.
- [13] 陈毅东, 杨育林, 王立乔, 等. 电网不对称故障时全功率变流器风电机组控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 75-79.
- [14] 胡家兵, 贺益康, 王宏胜. 不平衡电网电压下双馈感应发电机网侧和转子侧变流器的协同控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 97-104.
- [15] Yongsug Suh, Lipo Thomas A. Control scheme in hybrid synchronous stationary frame for PWM AC-DC converter under generalized unbalanced operating conditions [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2006, 42(3): 825-835.
- [16] Yongsug Suh, Thomas A, Lipo. Modeling and Analysis of Instantaneous Active and Reactive Power for PWM AC/DC Converter Under Generalized Unbalanced Network [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2006, 21(3): 1530-1540.
- [17] 廖勇, 庄凯, 姚骏. 电网电压不平衡时全功率风电并网变流器的控制策略 [J]. 电网技术, 2012, 36(1): 72-78.
- [18] Hansen A D, Michalke G. Multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbines' grid support capability in uninterrupted operation during grid faults [J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(3): 333-348.
- [19] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

收稿日期: 2013-03-22

作者简介:

苏绍泽(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源的并网控制, E-mail: 513853116@qq.com;

杨洪耕(1949—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电能质量、无功电压控制、智能电网等方面的教学和科研工作。

(责任编辑: 杨秋霞)