

# 永磁同步风电系统网侧单周期控制研究

何雄峰<sup>1</sup>, 吉同舟<sup>1</sup>, 李先允<sup>2</sup>, 张 迈<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)  
(2. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

[摘要] 对单周期控制进行了理论分析,进而提出了基于单周期控制的直驱永磁同步风力发电系统全功率换流器网侧控制策略.该方法采用输出电压作为参考量,输出电流作为积分量,实现输出电流跟踪输出电压,以达到自适应功率因数校正的目的,且能有效抑制直流母线电压波动给输出电压带来的影响,提高了永磁同步风电系统的低电压运行能力.就其控制策略在 PSCAD/EMTDC 中创建了仿真模型,仿真结果表明了单周期控制策略的正确性和有效性.

[关键词] 永磁同步电机,单周期控制,单位功率因数,低电压运行,PSCAD/EMTDC  
[中图分类号] TM315 [文献标志码] A [文章编号] 1672-4292(2012)04-0027-06

## Study on One-Cycle Control of Grid-Side Inverter for PMSG Wind Power System

He Xiongfeng<sup>1</sup>, Ji Tongzhou<sup>1</sup>, Li Xianyun<sup>2</sup>, Zhang Mai<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)  
(2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** This paper analyzes a principle of one-cycle control and proposes a one-cycle control for fully rated converter of permanent magnet synchronous generator (PMSG) wind power system on grid-side. With the output current as integral reference and grid voltage as the comparative reference, the output current is always tracking the output voltage. It aims to automatically adjust power factor and can effectively inhibit DC bus voltage fluctuation from impacting output voltage, and to improve low voltage ride-through (LVRT) capability of PMSG wind power system. The model and its control strategy are created in PSCAD/EMTDC. The simulation results show the correctness and validity of one-cycle control strategy.

**Key words:** PMSG, one-cycle control, unity-power-factor, LVRT, PSCAD/EMTDC

随着风电机组单机容量的不断增加,双馈风电系统(DFIG)中齿轮箱故障问题日益突出,直驱永磁同步风电系统(PMSG)因不需要齿轮箱、滑环、碳刷等组件而越来越受到重视<sup>[1]</sup>.PMSG通过背靠背换流器与电网连接,对其换流器的控制策略主要采用SPWM和SVPWM调制技术,但这些方法存在成本高或算法实现复杂等问题<sup>[2]</sup>.单周期控制具有输入扰动抑制能力强、动态响应速度快、鲁棒性好、控制电路简单等特点<sup>[3,4]</sup>.近年来备受国内外学者关注.目前对单周期的控制研究主要在交直流变换电路的应用,如交流调压电路、功率校正电路、有源滤波电路、并网逆变电路和同步补偿装置等<sup>[4-6]</sup>.

本文在分析单周期控制理论的基础上,对PMSG网侧逆变器(GSI)运用单周期控制策略,采用输出电压作为参考量,输出电流作为积分量,实现输出电流跟踪输出电压,使得该控制策略具有自适应功率因数校正的特点,输出电压、电流更接近正弦波,有效降低谐波含量,且能有效抑制直流母线电压波动对输出电压的影响,提高低电压运行能力.在PSCAD/EMTDC中创建了仿真模型,仿真结果证明了单周期控制策略的正确性和有效性.

## 1 单周期控制原理

单周期控制的核心是在每个开关周期实时控制开关管的占空比 $D$ ,使输出受控量的平均值等于或正

收稿日期:2012-11-02.

通讯联系人:吉同舟,副教授,研究方向:风力发电控制技术与电网安全. E-mail: 61035@njnu.edu.cn

比于参考量. 单周期控制的主电路由带复位的积分器、比较器、触发器、时钟脉冲和参考量等构成. 单周期控制用固定的脉冲频率同时开通开关管和启动积分电路, 电路原理如图 1 所示<sup>[7]</sup>.

开关管频率  $f$  远大于输入电压  $u_i$  和参考电压  $u_{ref}$  的频率, 在每一个开关周期  $T_s$  中, 开关开通时间为  $T_{on}$ , 开关关断时间为  $T_{off}$ ,  $T_{on} + T_{off} = T_s$ . 对于传统的控制方法, 开关管的占空比为  $D = T_{on} / T_s$ , 占空比  $D$  由参考电压  $u_{ref}$  线性调制而成, 则输出电压值为:

$$u_0(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_i(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} u_i(t) dt = D \cdot u_i(t) \quad (1)$$

由式(1)知, 对于传统的控制方法, 输出端电压  $u_o$  是输入电压  $u_i$  和占空比  $D$  的函数. 而采用占空比的非线性调制后, 使得输出电压在开关开通时间内的积分正好等于控制电压在整个周期内的积分, 即有:

$$\int_0^{T_{on}} u_i(t) dt = \int_0^{T_s} u_{ref}(t) dt \quad (2)$$

输出电压的平均值在每个周期内等于控制电压的平均值, 即有:

$$u_0(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} u_i(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_{ref}(t) dt = u_{ref}(t) \quad (3)$$

由这个概念去控制开关的技术被定义为单周期控制技术, 所以在一个周期内开关的有效输出为:

$$u_0(t) = K \cdot u_{ref}(t) \quad (4)$$

由此可见, 输出电压只是和参考电压  $U_{ref}$  存在线性关系, 与输入信号无关, 这种控制方法把一个非线性问题转换成了简单的线性问题.

## 2 PMSG 网侧逆变器控制策略

变速恒频直驱永磁同步风电系统定子通过背靠背全功率换流器即机侧整流器(GSR)和网侧逆变器(GSI)与电网连接, 其主电路结构如图 2 所示. 图 3 所示为直驱永磁同步变速恒频风电系统网侧逆变电路拓扑, 网侧逆变器输出电压为  $u_a, u_b, u_c$ , 输出电流为  $i_a, i_b, i_c$ , 电网电压为  $e_a, e_b, e_c$ .  $C$  为直流母线稳压电容, 逆变器经过电感  $L$  与电网相连. 反并联续流二极管的 6 个 IGBT 分别用  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  表示.

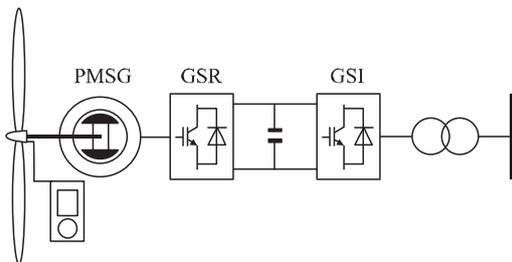


图 2 直驱永磁同步风电系统拓扑电路  
Fig. 2 Circuit of D-PMSG for wind power system

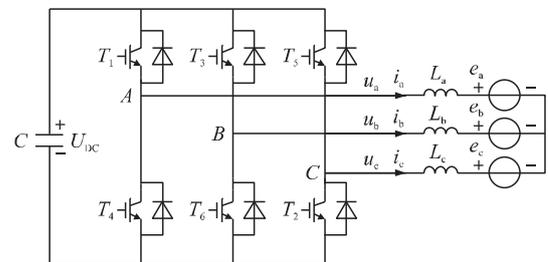


图 3 三相网侧逆变器  
Fig. 3 Three-phase grid-side inverter circuit

为了实现三相逆变电路的单周期控制, 根据三相输出电压的周期性, 可以通过过零检测的方法将三相输出电压划分成 6 个区间, 如图 4 所示. 其中, 每个区间有且仅有一相电压的绝对值最大.

在区间 I 内, 网侧逆变器的等值电路如图 5 所示. 开关  $T_1$  在整个区间内一直导通,  $T_3, T_4, T_5$  在整个区间内一直关断, 通过控制  $T_2, T_6$  来实现  $i_b$  和  $i_c$  分别跟随电网电压  $e_b, e_c$ . 在此区间内只有  $T_2, T_6$  两个开关动作, 从而极大地减小了开关损耗, 提高了开关管的效率. 由于三相电压的对称性,  $i_b$  将自动跟随  $e_b$ , 从而实现单位功率因数. 此时, 网侧逆变器  $T_2, T_6$  开关状

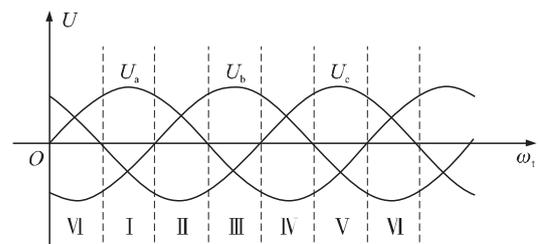


图 4 三相电压输出区间划分  
Fig. 4 Sectors of output three-phase voltage

态有  $2^2$  种<sup>[8]</sup>,如图 5 所示.在区间 I 内  $\mu_b$ 、 $u_c$  分别为单调递增和单调递减.经单周期控制后的两开关管的导通和关断时间不同步,因此  $T_2$ 、 $T_6$  仅存在两种开关次序,即 a-b-d 或 a-c-d.在这种情况下,调节每个相电流跟踪对应的相电压,即可得到每个开关在开关频率对应的占空比  $D_6$ 、 $D_2$ ,即<sup>[9]</sup>:

$$\begin{bmatrix} D_6 \\ D_2 \end{bmatrix} = K_1 + \frac{1}{U_{DC}} \begin{bmatrix} e_b \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (5)$$

为了实现单位功率因数,电流和电压对应成比例,即有  $i_b = Ru_b$ ,  $i_c = Ru_c$ ,将其带入式(5)得出相应的占空比控制方程为:

$$K_1 \begin{bmatrix} e_b \\ e_c \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_b \\ i_c \end{bmatrix} = K_2 \cdot R_s \cdot U_{DC} \begin{bmatrix} D_6 - 1 \\ D_2 - 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

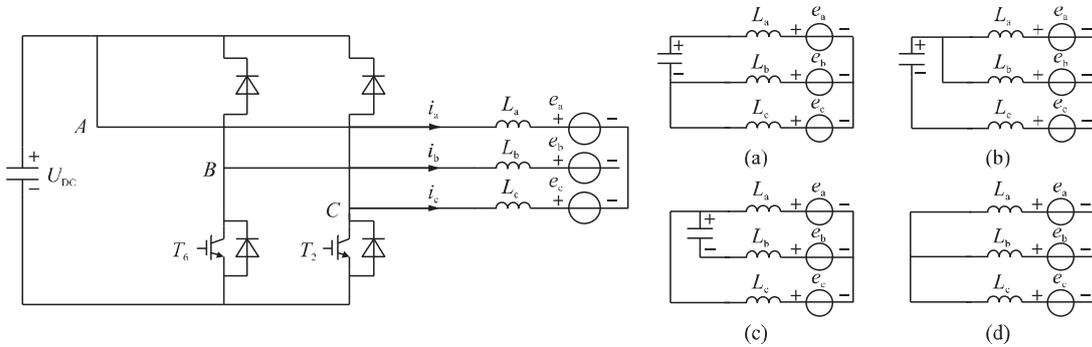


图 5 区间 I 内网侧逆变器的等值电路

Fig. 5 Equivalent circuit for grid-side inverter in region I

式(5)和式(6)中  $K_1$ 、 $K_2$  均为给定值,  $R_s$  为检测电阻.在每个开关周期中,三相电网电压作为单周期控制器中比较器的控制参考值,  $K_1$  用来控制输出电流,  $K_2$  用来控制输出功率,当控制电流满足式(6)时,系统实现单位功率因数.同理,该控制策略可适用于整个工频周期内.按照此要求和对称规律,根据电压大小可推导出每个区间各个开关管的工作情况,归纳结果如表 1 所示.表 1 中“1”表示开关管处于常通状态,“0”表示开关管处于常闭状态,“OCC”表示开关管处于单周期控制状态.

表 1 每个周期内开关管导通情况与三相输出电压区间的对应关系

Table 1 Relationship between switch driver status and sectors of output three-phase voltage in one cycle

区间	I	II	III	IV	V	VII
$T_1$	1	OCC	0	0	0	OCC
$T_2$	OCC	1	OCC	0	0	0
$T_3$	0	OCC	1	OCC	0	0
$T_4$	0	0	OCC	1	OCC	0
$T_5$	0	0	0	OCC	1	OCC
$T_6$	OCC	0	0	0	OCC	1

根据表 1 的对应关系,选取网侧电流信号  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  作为单周期控制器中积分器的输入信号,电网电压信号  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  作为单周期控制器中比较器的控制参考值.在一个开关周期内,电流积分信号与电网电压信号进行实时比较,产生相应的脉冲作用于 RS 触发器,形成 SPWM.对应每个开关周期内不同的区间,关联相应的 SPWM 驱动脉冲,关联后的 SPWM 脉冲直接作用于网侧逆变器,实现网侧变换器的控制目标和控制性能.

### 3 仿真结果及分析

为了验证单周期控制策略的正确性和有效性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建了基于单周期控制的直驱永磁同步风电系统网侧逆变器的仿真模型.本文将风电系统的风能机、永磁同步电机和发电机侧整流器用直流电压源等值,其主电路如图 6 所示.相关仿真参数如下:直流母线电容  $C=5$  F;直流母线初始电压  $U_s=1$  kV;三相电感  $L_a=L_b=L_c=10$  mH;三相电阻  $R_a=R_b=R_c=0.02$   $\Omega$ ,交流侧三相对称电源电压有效值为  $E_a=E_b=E_c=690/\sqrt{3}$  V,频率为 50 Hz,单周期控制的时钟脉冲频率为 2.4 kHz.仿真持续时间 0.5 s,采样周期为 1  $\mu$ s.

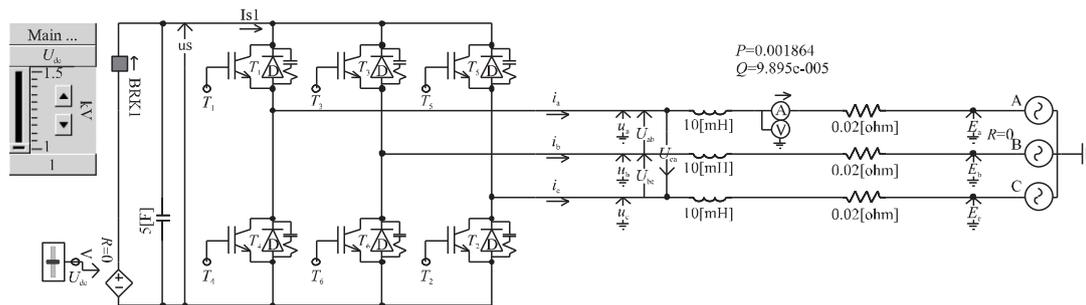


图 6 永磁同步风电系统等值仿真模型

Fig. 6 Equivalent model of PMSG in PSCAD/EMTDC

图 7 为 0.07 s 内 6 个开关管的触发脉冲,可以看出每个区间均有 3 个开关管处于工作状态,其中一个为导通状态,另外两个受 SPWM 脉冲控制,SPWM 的产生顺序与表 1 中开关管的理论动作顺序完全一致,证明了理论分析的正确性。

图 8 所示为网侧逆变器输出的交流线电压  $U_{ab}$  的频谱分析结果,频谱中低次谐波仅存在 5、7、11 次谐波,其基波和各次谐波有效值分别为  $U_{ab1} = 690.25 \text{ V}$ ,  $U_{ab5} = 9.49 \text{ V}$ ,  $U_{ab7} = 9.70 \text{ V}$ ,  $U_{ab11} = 6.88 \text{ V}$ ,谐波含量极低。结合图 9 所示的网侧逆变器输出的三相交流相电压  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  和线电压  $u_{ab}$ 、 $u_{bc}$ 、 $u_{ca}$ ,以及经滤波器滤波得到的各输出电压波形可知,三相输出电压经滤波器输出后波形严格对称,三相输出线电压和相电压为标准的正弦波。

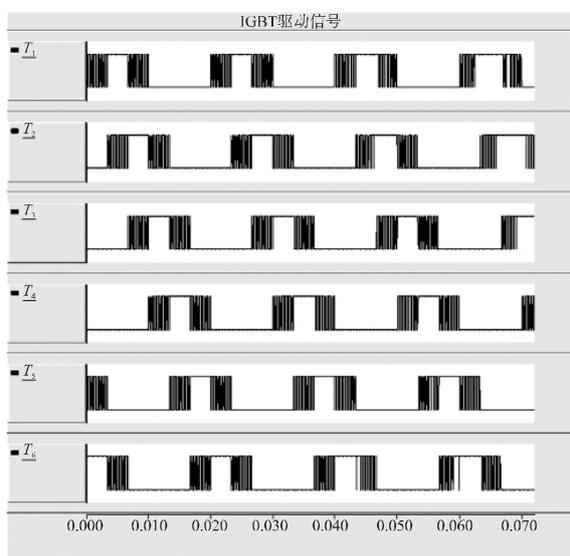


图 7 IGBT 驱动触发信号

Fig. 7 Driving signals of IGBT for controlling GSI

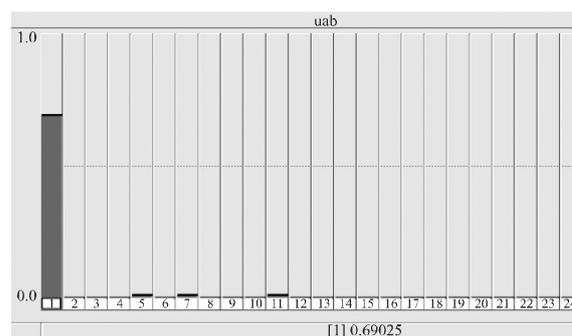


图 8 网侧逆变器输出线电压  $U_{ab}$  频谱分析

Fig. 8 Frequency spectrum of  $U_{ab}$  for GSI output voltage

为了研究电网故障情况下对永磁同步风电系统输出电压的影响,本文通过调节直流母线电压仿真电网发生故障时永磁同步风电系统直流母线电压升高过程。图 10 所示为直流母线电压变化时,网侧逆变器输出基波电压  $u_{a0}$  与基波电流  $i_{a0}$  的波形。由图可知,系统从初始过渡到稳定过程中输出电压超前输出电流,经过两个周波时段的自适应调节后,整个网侧逆变器输出基波电流准确地跟随输出基波电压,整个系统动态响应速度快、稳定性好、自愈能力强,并达到了自适应的功率因数校正目的,系统稳定后输出电压和输出电流相位几乎完全一致,功率因数接近 1。在整个直流母线电压变化过程中,输出基波电压不受其影响,且始终保持单位功率因数。仿真表明:该单周期控制策略能够有效抑制直流母线电压波动给输出电压带来的影响,使得风电系统具备一定的低电压运行能力,从而证明了控制策略的正确性与有效性。

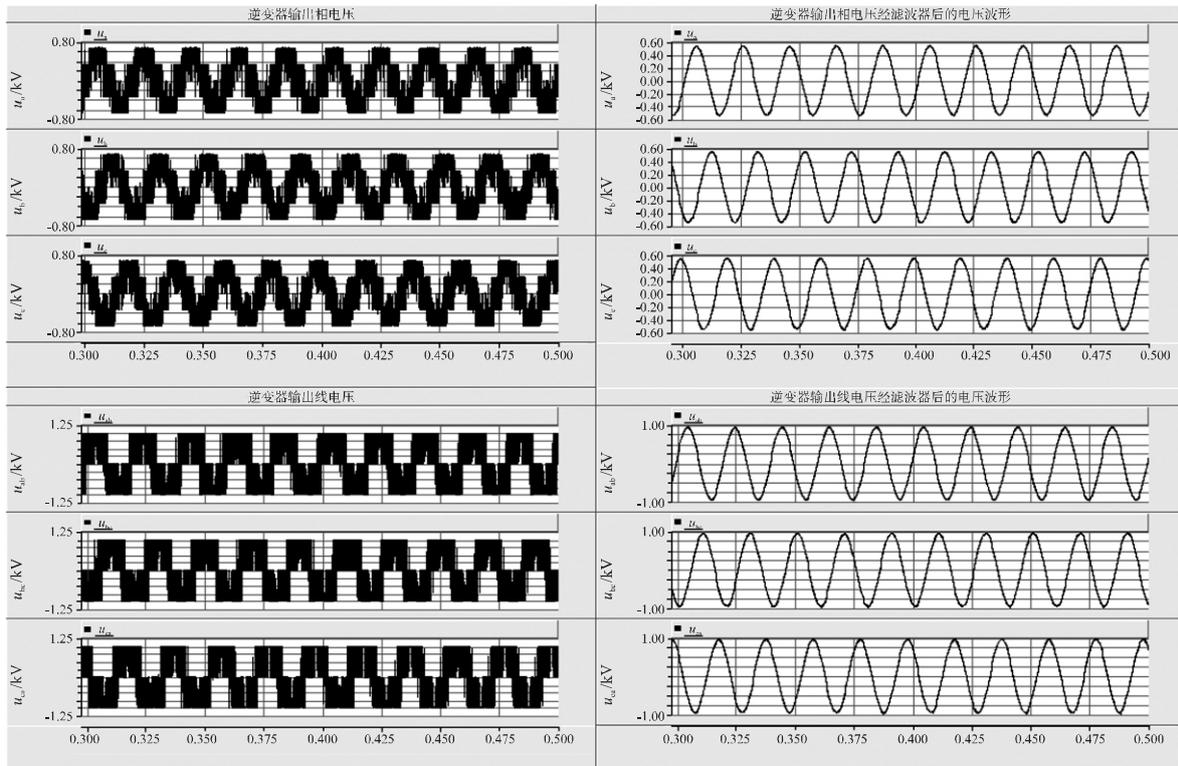


图9 网侧逆变器输出电压和输出电流波形

Fig. 9 Single-phase output voltage and current waveforms of grid-side inverter

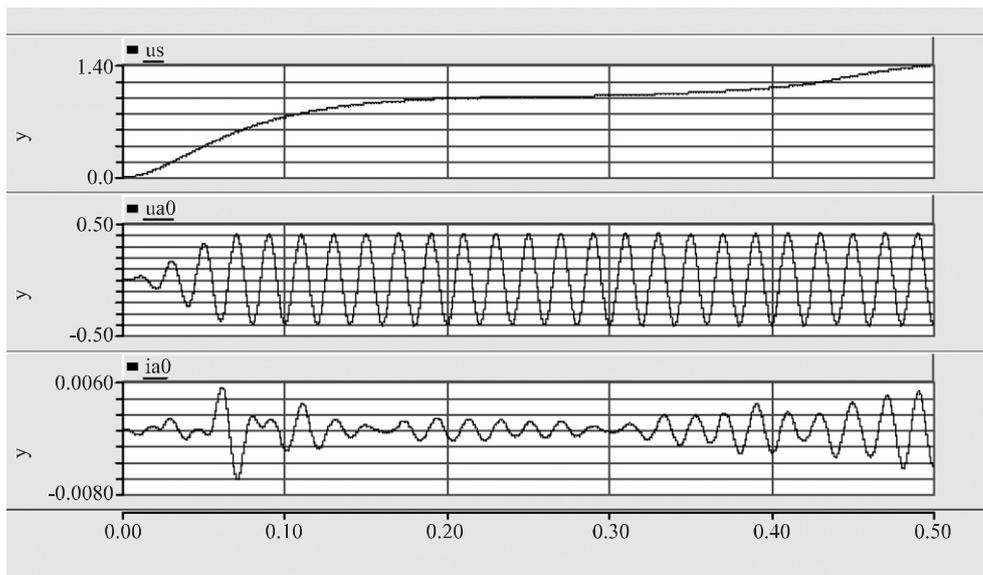


图10 网侧逆变器输出基波电压和电流波形

Fig. 10 Fundamental voltage and current waveform of grid-side inverter

## 4 结语

本文提出了一种基于单周期控制的直驱永磁同步风电系统网侧逆变器控制策略,由于引入了输入电流和电网电压前馈,其最突出的优点就是抑制直流母线电压扰动能力强,实现单位功率因数,输出波形更接近正弦波。在每个开关周期内仅两只开关管需要进行PWM控制,有效降低了开关损耗。仿真结果表明,基于单周期控制的直驱永磁同步风电系统具有良好的自适应功率因数校正和有效抑制直流母线电压扰动的特点,为直驱永磁同步风电系统低电压运行控制策略提供参考。

## [参考文献](References)

- [1] 胡书举. 直驱型风力发电系统概述[J]. 变频器世界 2009(10):55-59.  
Hu Shuju. Review of direct-driven wind power system[J]. The World of Inverters 2009(10):55-59. (in Chinese)
- [2] 杨喜军 姚苏毅 张哲民. 单周期控制的三相 SPWM 整流器[J]. 电力系统及其自动化学报 2011, 1(23):108-113.  
Yang Xijun, Yao Suyi, Zhang Zhemin. One cycle controlled three-phase SPWM rectifier[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 1(23):108-113. (in Chinese)
- [3] 胡书举 李建林 李政屹 等. 单周期控制在变速恒频风力发电中的应用[J]. 可再生能源 2007 25(6):55-59.  
Hu Shuju, Li Jianlin, Li Zhengyi, et al. Discussion on application of one-cycle control to variable-speed constant-frequency wind power system[J]. Renewable Energy Resources 2007 25(6):55-59. (in Chinese)
- [4] Yang Chen, Keyue Ma Smedley. One-cycle controlled three-phase grid-connected inverters and their parallel operation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications 2008 2(44):663-671.
- [5] 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):38-44.  
Yang Xinghua, Yang Xijun, Zhang Zhemin, et al. Research on one-cycle control strategy of matrix rectifies[J]. Transactions of China Electrotechnical 2012 27(2):38-44. (in Chinese)
- [6] 陈贤明 吕宏水 刘国华 等. 单周控制的三相 PWM 逆变器仿真研究[J]. 大功率整流技术 2009(6):1-5.  
Chen Xianming, Lu Hongshui, Liu Guohua, et al. Simulation on three-phase PWM inverter under one-cycle control[J]. High Power Converter Technology 2009(6):1-5. (in Chinese)
- [7] Keyue Ma Smedley, Slobodan Cuk. One-cycle control of switching converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(6):625-633.
- [8] 李建林 许洪华 高志刚 等. 风力发电中的电力电子变换技术[M]. 北京:机械工业出版社 2008.  
Li Jianlin, Xu Honghua, Gao Zhigang, et al. Power Electronic Converter Technology in Wind Power Generation[M]. Beijing: China Machine Press 2008. (in Chinese)
- [9] Yang Chen, Keyue Ma Smedley. One-cycle controlled three-phase grid-connected inverters and their parallel operation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications 2008 2(44):663-671.

[责任编辑:刘 健]