

# 永磁直驱风电系统双 PWM 变换器前馈补偿控制

刘波, 金昊

(东北电力大学自动化工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 永磁直驱风电系统双PWM变换器在常规控制策略下当风速变化时, 直流母线电压波动幅度较大、控制系统的响应速度较慢, 这将不利于系统的安全、稳定运行。为此, 根据瞬时有功功率平衡关系, 提出有功功率前馈补偿协调控制策略。将发电机侧瞬时有功功率直接前馈于网侧双闭环瞬时有功功率内环给定, 避免了电压控制外环对功率的间接调节, 加快了控制系统的响应速度, 协调两侧变换器瞬时有功功率及时平衡, 有效抑制了直流母线电压的波动。为加强前馈控制对扰动的抵消作用, 在前馈控制通道中加入补偿环节, 进一步提高前馈控制效果。对比仿真结果验证了控制策略的正确性和有效性。

**关键词:** 直驱风电系统; 双PWM变换器; 直接功率控制; 前馈补偿; 协调控制

## Feed forward compensation control of dual PWM converter for permanent magnet direct driven wind turbine

LIU Bo, JIN Hao

(School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** As for dual PWM inverters in direct-drive permanent-magnet wind power system under the normal control, when the wind speed changes, the DC bus voltage fluctuates greatly and the control system responds slowly, which is unfavourable to system safe and stable operation. Therefore, according to the instantaneous active power balance relationship, this paper puts forward the control strategy of coordination power feed forward compensation. It makes the generator side of instantaneous active power be a feed forward in the grid side converter of double loop instantaneous active power ring given, avoids the voltage control loop indirect regulation of power, accelerates the respond speed of control system. Moreover, it achieves the coordination of the DC bus side instantaneous active power timely balance, effectively restrains the DC bus voltage fluctuation. In order to strengthen the feed forward control to offset the disturbance, it is necessary to join the compensation in the feed forward control channel, to further improve the feed forward control effect. The comparison of simulation verifies the correctness and effectiveness of the control strategy.

**Key words:** direct-driven wind energy conversion system; dual PWM converter; direct power control; feed forward compensation; coordinated control

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0052-06

## 0 引言

永磁直驱风力发电系统常采用双脉冲宽度调制 PWM (Pulse Width Modulation) 变换器实现并网发电。当风速变化时, 永磁发电机输出功率将随之改变, 在常规控制过程中, 双 PWM 变换器直流母线电压会随之出现大幅度波动, 影响系统的安全运行。因此, 在风电机组的运行中有效抑制双 PWM 变换器直流母线电压波动是双 PWM 变换器控制的关键<sup>[1-2]</sup>。文献[3-4]采用机侧变换器电流前馈的控制方法, 发

电功率的变化通过前馈控制使网侧变换器电流控制内环给定值随之改变, 而不影响到直流母线电压, 但是采样电流随开关状态变化不规则脉动, 采用低通滤波器又降低了控制的响应速度; 文献[5]通过将机侧瞬时有功功率直接前馈到网侧瞬时有功功率控制环输入端, 避免了电压环对功率的间接、滞后调节, 加快了系统的响应速度, 减小了功率扰动的干扰, 有效抑制了直流母线电压的波动。经深入分析, 在功率前馈通道增加补偿环节可减小甚至完全消除功率扰动对直流母线电压的影响。为此, 本文提出功率前馈补偿的协调控制策略, 进一步提高前馈控制效果。

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目(2009102)

## 1 双 PWM 变换器控制策略

基于双 PWM 变换器的永磁直驱风电系统结构如图 1 所示。

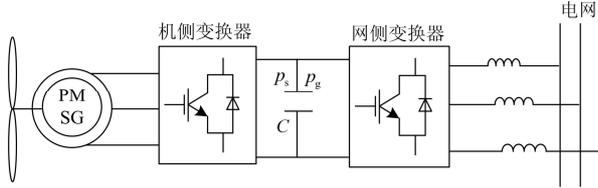


图 1 基于双 PWM 变换器的永磁直驱风电系统结构图

Fig. 1 Structure of permanent magnet direct driven wind power generation system based on back to back PWM converter

### 1.1 机侧变换器的控制

永磁直驱风电系统机侧变换器的控制目标是将永磁同步发电机输出的频率和幅值不断变化的电压、电流, 经 PWM 变换器转化为电压恒定的直流电, 同时控制永磁同步发电机运行, 使其输入电流为正弦波, 并通过调节发电机定子电流来控制其转速, 确保风力机运行过程中捕获最大风能<sup>[6]</sup>。

根据永磁同步电机的原理及矢量的等效坐标变换, 使电机定子电流合成矢量  $i_s$  定向于 q 轴, 则其 d 轴电流分量将为零, 即  $i_{sd}=0$ , 机侧变换器的整体控制如图 2 左半部分所示。采用速度外环、电流内环的双闭环控制结构, 其中外环角速度的参考值  $\omega^*$  是根据最大功率追踪算法给定。

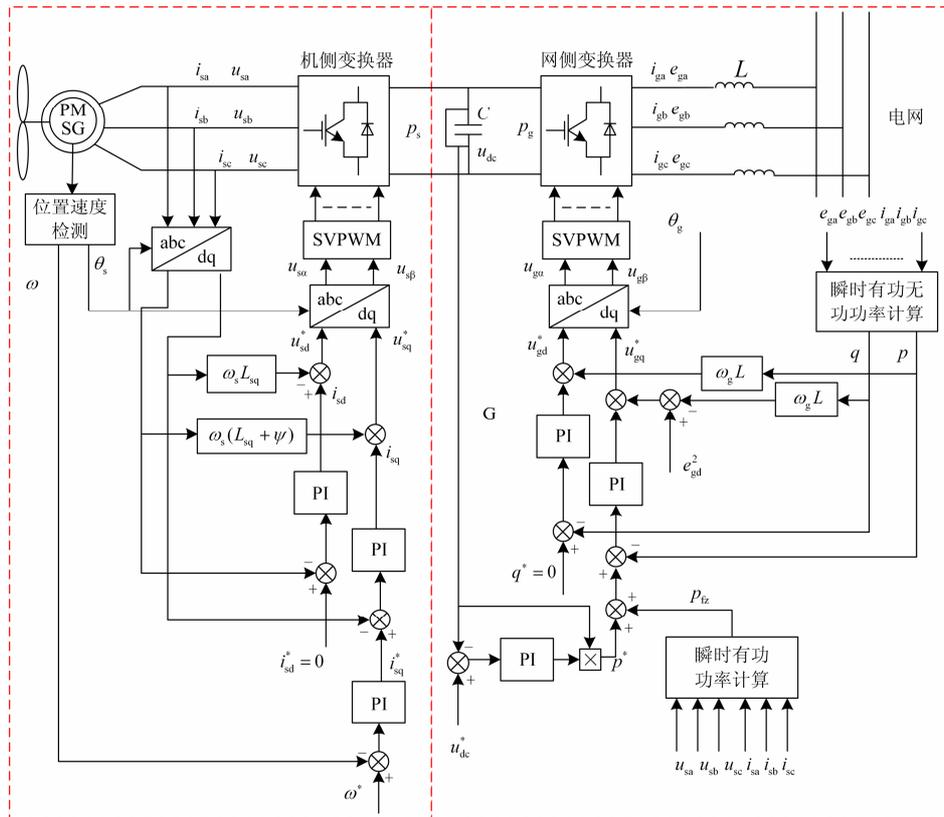


图 2 双 PWM 变换器负载功率前馈控制结构图

Fig. 2 Load power feed forward control of dual PWM converter

### 1.2 网侧变换器的控制

永磁直驱风电系统网侧变换器的控制目标是实现直流母线电压稳定及变换器与电网之间的无功功率为零。由图 1 可以看出, 永磁直驱风电系统运行中永磁同步电机 PMSG (Permanent Magnetic Synchronous Generator) 输出的瞬时有功功率  $P_s$  随风速变化并经机侧变换器馈入直流母线侧, 若忽略机侧和网侧变换器功率损耗, 机侧变换器输出功

率  $P_s$  与发电机输出功率相等, 同理, 直流侧经网侧变换器与电网之间的瞬时有功功率即为  $P_g$ ; 当风速变化时  $P_s$  随之变化, 若  $P_g$  不能及时跟踪其变化, 多余的能量将由直流母线电容器所吸收或释放, 使直流电压产生波动<sup>[7]</sup>。

如果在风速变化时能把发电机输出的有功功率通过双 PWM 变换器及时馈入电网, 实现网侧瞬时有功功率与电机侧瞬时有功功率动态平衡, 则可使



$$G(s) = G_T(s) + G_R(s) = \frac{K_p s + K_I}{s(sL + R)} - 1 \quad (5)$$

由此可见, 对负载功率扰动的控制效果取决于传递函数  $G(s)$ , 为了进一步减小扰动的影响, 可以使负载功率扰动的总体作用为零。为此, 在功率前馈通道中增加一个环节  $G_f(s)$ , 对功率前馈控制通道进行补偿, 使前馈控制通道完全抵消负载功率的扰动, 系统结构如图 6 所示。

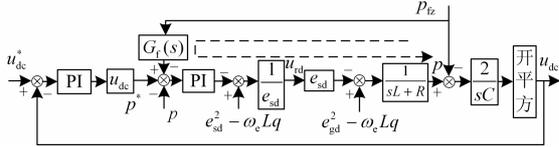


图 6 具有补偿环节的负载功率前馈控制结构图

Fig. 6 Load power feed forward compensation control

此时负载功率前馈控制通道传递函数为

$$G_{T1}(s) = G_T(s)G_f(s) = \frac{K_p s + K_I}{s(sL + R)} G_f(s) \quad (6)$$

则负载功率扰动的总传递函数为

$$G_1(s) = G_{T1}(s) + G_R(s) = \frac{K_p s + K_I}{s(sL + R)} G_f(s) - 1 \quad (7)$$

为完全消除扰动影响, 令

$$G_1(s) = 0 \quad (8)$$

即

$$\frac{K_p s + K_I}{s(sL + R)} G_f(s) - 1 = 0 \quad (9)$$

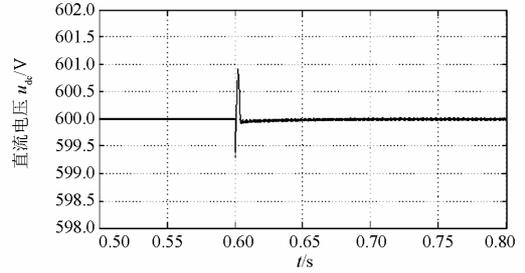
则

$$G_f(s) = \frac{s(sL + R)}{K_p s + K_I} \quad (10)$$

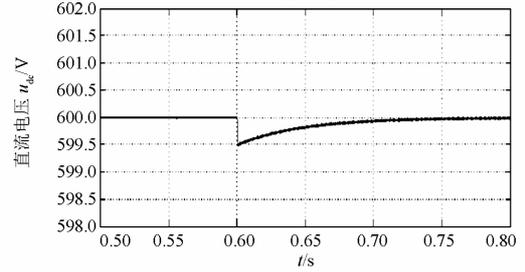
当负载功率变动时,  $G_f(s)$  环节对前馈控制通道进行补偿, 能抵消负载功率扰动对直流母线电压的扰动, 进一步减小由负载功率变化引起直流母线电压的波动。

## 2 对比仿真

为验证永磁直驱风电机组双 PWM 变换器负载功率前馈补偿控制策略的控制效果, 本文采用 Matlab/Simulink 软件工具分别对不具有补偿的和具有补偿的两种前馈控制策略在负载功率变化时的控制特性进行对比仿真, 仿真结果如图 7 和图 8 所示。在 0.6 s 时使网侧变换器负载突然增加 100% (相对于风速变化), 由图 7 可以看出, 负载功率扰动经前馈补偿控制, 直流母线电压跳跃峰值比无补偿情况减小, 且不产生震荡, 调节过程更加稳定。



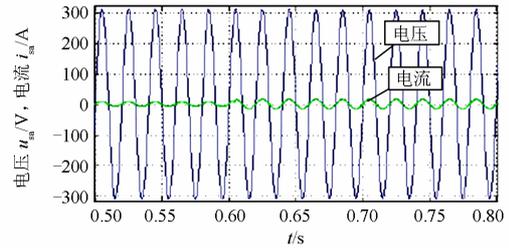
(a) 无补偿直流电压波形



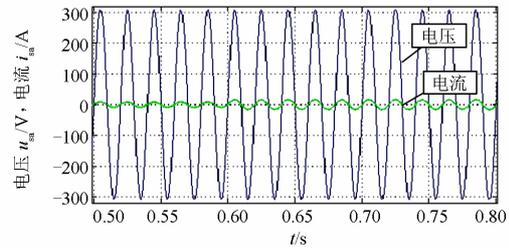
(b) 有补偿直流电压波形

图 7 直流侧电压仿真波形

Fig. 7 DC voltage simulation waveforms



(a) 无补偿环节 A 相电压电流波形



(b) 有补偿环节 A 相电压电流波形

图 8 A 相电压电流仿真波形图

Fig. 8 A simulation of the phase voltage and current waveforms

如图 8 的仿真结果所示, 负载突变时, 网侧 A 相电压仍能够保持与对应相电流同相位, 说明这种前馈补偿控制策略对网侧变换器的无功功率调节没有影响, 并进一步改善了直流母线电压的稳定控制效果。

## 3 结论

(1) 本文为永磁直驱风电机组双 PWM 变换器

的网侧变换器采用基于 SVPWM 调制的直接功率控制, 使开关频率固定, 有利于硬件电路设计, 减少了控制过程中的坐标变换, 提高了控制响应速度。

(2) 为减小风电机组运行中双 PWM 变换器直流母线电压波动, 提出对网侧变换器的有功功率采用发电机侧瞬时功率(负载功率)前馈控制策略, 实现了双 PWM 变换器输入输出功率的协调控制, 同时大大加快了系统的响应速度, 有效减小了直流母线电压的波动。

(3) 在以上控制策略的基础上, 为加强前馈控制对负载功率的抵消作用, 提出在负载功率前馈通道中加入补偿环节, 进一步提高了前馈控制效果。

(4) 采用 Matlab/Simulink 仿真, 结果验证了所提控制策略的正确性和有效性。

### 参考文献

- [1] 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): 124-158.  
XIAO Lei, HUANG Shou-dao, HUANG Ke-yuan, et al. DC voltage stability of directly-driven wind turbine with PM synchronous generator during the asymmetrical faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 124-158.
- [2] 黄守道, 肖磊, 黄科元, 等. 不对称电网故障下直驱型永磁风力发电系统网侧变流器的运行与控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 174-180.  
HUANG Shou-dao, XIAO Lei, HUANG Ke-yuan, et al. Operation and control on the grid-side converter of the directly-driven wind turbine with PM synchronous generator during asymmetrical faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 174-180.
- [3] 李剑林, 田联房, 王孝洪, 等. PWM 整流器负载电流前馈控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(11): 58-60.  
LI Jian-lin, TIAN Lian-fang, WANG Xiao-hong, et al. Study on load current feed forward control strategy for PWM rectifier[J]. Power Electronics, 2011, 45(11): 58-60.
- [4] 李时杰, 李耀华, 陈睿. 背靠背变流系统中优化前馈控制策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 74-79.  
LI Shi-jie, LI Yao-hua, CHEN Rui. Study of the optimum feed-forward control strategy in back-to-back converter system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 74-79.
- [5] 王明渝, 代同振, 吴喜红, 等. 双 PWM 变换器功率前馈控制策略仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(4): 892-896.  
WANG Ming-yu, DAI Tong-zhen, WU Xi-hong, et al. Simulation research of dual PWM converter based on power feed forward control strategy[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(4): 892-896.
- [6] 孟克其劳, 陈虎, 钱春震, 等. 直驱式永磁直驱风力发电系统最大功率追踪策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 83-93.  
MENG Keqilao, CHEN Hu, QIAN Chun-zhen, et al. Study on maximum power point tracking strategy for direct-driven permanent magnetsynchronous generating system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 83-93.
- [7] 程航, 曹五顺, 周明星. 不对称电网电压条件下直驱永磁风力发电机组并网逆变器的双电流闭环控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 67-72.  
CHENG Hang, CAO Wu-shun, ZHOU Ming-xing. Research on dual current-loop control strategy for grid-connected inverter of directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator under unbalanced network voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 67-72.
- [8] 包广清, 毛开富. 基于 PLECS 的直驱永磁风电系统直接功率控制研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(8): 1728-1732.  
BAO Guang-qing, MAO Kai-fu. Direct power control of direct-driven wind energy conversion system based on PLECS[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(8): 1728-1732.
- [9] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.  
LI He-ming, DONG Shu-hui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2013, 28(5): 73-81.
- [10] 张晓英, 程治状, 李琛, 等. 直驱永磁风力发电系统在不对称电网故障下的电压稳定控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 17-24.
- ZHANG Xiao-ying, CHENG Zhi-zhuang, LI Chen, et al. Voltage stability control for direct driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator in grid asymmetric faults[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 17-24.
- [11] 王久和, 李华德. 一种新的电压型 PWM 整流器直接功率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 49-50.
- WANG Jiu-he, LI Hua-de. A new direct power control strategy of three phase boost type PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 49-50.
- [12] 张先勇, 舒杰. 基于无源性理论的双馈风力发电机双 PWM 变换器协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 184-195.
- ZHANG Xian-yong, SHU Jie. Passivity-based co-operation control of dual PWM converters for doubly-fed wind power generator[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 184-195.
- [13] 郑征, 邹瑾, 陶海军. 双 PWM 变频器一体化协调控制策略研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2011, 44(3): 371-375.
- ZHENG Zheng, ZOU Jin, TAO Hai-jun. Strategy research on dual PWM inverter based on integrated control[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(3): 371-375.
- [14] 戴鹏, 朱方田, 朱荣伍, 等. 电容电流直接控制的双 PWM 协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 136-141.
- DAI Peng, ZHU Fang-tian, ZHU Rong-wu, et al. Direct control of capacitor current for dual PWM converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 136-141.
- [15] 黄守道, 陈继华, 张铁军. 电压型 PWM 整流器负载电流前馈控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2005, 39(4): 53-55.
- HUANG Shou-dao, CHEN Ji-hua, ZHANG Tie-jun. Investigation of load current feed for word control strategy for PWM voltage rectifier[J]. Power Electronics, 2005, 39(4): 53-55.

---

收稿日期: 2013-10-14; 修回日期: 2013-12-11

作者简介:

刘波(1960-), 男, 本科, 教授, 硕士生导师, 研究方向为控制理论与控制工程、电力电子技术与新能源发电。  
E-mail: 2006\_liuobo@sina.com