

文章编号: 1006-4710(2011)03-0301-05

变速恒频风力发电用双 PWM 变换器的协调控制研究

马浩森^{1,2}, 高勇¹, 杨媛¹, 杨彪¹, 王立虎¹

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 陕西师范大学 计算机科学学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 在研究网侧变换器与机侧变换器的传统协调控制策略的基础上, 为提高网侧变换器对机侧变换器的响应速度, 提出了一种改进型协调控制策略。该协调控制策略将双馈电机转子侧有功电流动态微分值引入直流母线电压控制中。有效提高了网侧变换器对机侧变换器的负载响应能力, 从而改善了直流母线电压的波动。仿真和实验验证了所提出的协调控制策略的正确性和可行性。

关键词: 风力发电; 变速恒频; 协调控制; 直流母线

中图分类号: F830.5 **文献标志码:** A

Coordinated Control of Dual PWM Converters for VSCF Wind Power Generation System

MA Haomiao^{1,2}, GAO Yong¹, YANG Yuan¹, YANG Biao¹, WANG Lihu¹

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Based on researching the traditional coordinator control strategy of grid side converter and machine side converter, the paper puts forward a progressive coordinator control strategy in order to improve response speed of grid side converter on machine side converter. And the active current dynamic differential value of grid side is introduced to DC bus voltage control, whereby, effectively raising the load response capability of grid side converter on machine side converter, and improving the fluctuation of DC control voltage. Simulation and practical experiments verify accuracy and feasibility of the coordinator control strategy.

Key words: wind power generation; VSCF; coordination control; DC bus

风能作为一种绿色能源, 越来越受到重视, 随之而来就是对风力发电技术的研究。风力发电机组控制技术主要有定桨距失速调节技术、变桨距调节技术、主动失速调节技术和变速恒频技术。其中变速恒频风力发电技术备受关注^[1]。变速恒频双馈风力发电系统发电部分由双馈电机、网侧变换器和机侧变换器构成^[2]。网侧和机侧变换器是各自独立控制的, 但网侧变换器要通过对机侧变换器的响应来使直流母线电压工作在稳定的状态, 由于机侧负载的变化,

经常会引起直流母线电压的波动。因此, 本研究提出一种新型的网侧变换器与机侧变换器的协调控制策略。该策略提高了网侧变换器对机侧变换器负载的响应速度, 使网侧变换器主动地为机侧变换器提供励磁电流^[3], 从而改善了直流母线电压波动。

1 直流母线电压波动原理

在双 PWM 变换器构成的双馈异步发电机 DFIG(doubly-fed induction generator) 励磁电源系统

收稿日期: 2011-04-20

基金项目: 陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项基金资助项目(2007ZDKG-29); 陕西省重点学科建设专项基金资助项目(10700-080903)。

作者简介: 马浩森(1978-), 女, 陕西咸阳市人, 博士生, 研究方向为变速恒频双馈风力发电及电力电子技术。E-mail: mahao-miao@sina.com。高勇(1956-), 男, 山东宁津人, 教授, 博导, 研究方向为新型半导体器件与电力电子技术等。E-mail: gaoy@xaut.edu.cn。

中,机侧变换器和双馈发电机可作为一个整体视为网侧变换器的负载(见图1(a))。两个变换器之间依靠直流母线相连。依靠网侧变换器的控制策略和直流母线上的电容稳定母线电压。网侧变换器工作在能量能双向流动的工作状态,维持着直流母线电压的稳定。转子电流变化引起直流母线电流变化从而引起直流母线电压波动,波动后网侧变换器才能被动的去稳定直流母线电压。

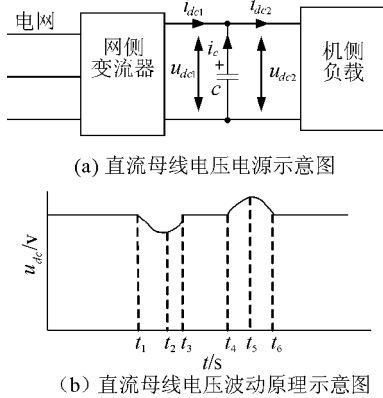


图1 直流母线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the DC

由以上分析可知,网侧变换器应该具备优良的动态响应能力。但在实际的工程应用中网侧变换器具有控制上的时间延迟。当负载电流出现波动时引起直流母线电压的波动,只有直流母线电压出现相应的波动才会使得网侧变换器控制策略的直流母线电压采集值和设定值之间存在偏差。这个偏差使网侧控制电路发出控制指令以增大或减小直流母线电压。由于存在控制延时,使得直流母线电压变化一定时间后控制电路才会开始修正直流母线电压。这样网侧变换器总是被动在直流母线电压出现波动之后才修正直流母线电压。

如图1(b)所示,当DFIG转子机械能发生变化时,机侧变换器从直流吸收电能, i_{dc2} 发生突变,引起 u_{dc} 突变。在 t_1-t_2 时段内, u_{dc2} 下降,表明机侧负载增大。首先电容放电维持直流母线电压恒定, i_{dc1} 增大(从网侧变换器吸收电能), u_{dc1} 电压下降。在 t_2-t_3 时段内,网侧变换器开始提高直流母线电压到设定值。在 t_4-t_5 时段内, u_{dc2} 上升,表明机侧负载减小,电容电压升高, i_{dc1} 减小, u_{dc1} 电压增大。在 t_5-t_6 时段内网侧变换器开始降低直流母线电压到设定值。

2 传统协调控制策略

传统的协调控制策略是将转子负载电流前馈入网侧控制策略中^[4]。但MW级变速恒频双馈风力发

电系统的转子侧功率变化范围大,转差功率大,所以一般不采用电流电压检测方案来获知转差功率^[5]。通过在机侧变换器控制策略中获得的两相旋转坐标系下的转子电压和电流。忽略铜耗和磁损耗,转差功率可以表示为:

$$P_{out} = \frac{3}{2}(u_{d2}i_{d2} + u_{q2}i_{q2}) \quad (1)$$

式中, u_{d2} 、 u_{q2} 为转子电压 d 、 q 轴分量, i_{d2} 、 i_{q2} 为转子电流 d 、 q 轴分量,忽略机侧变换器损耗,假设直流母线电压恒定,机侧负载电流可表示为:

$$i_{dc} = \frac{P_{out}}{V_{dc}} = \frac{3}{2} \frac{u_{d2}i_{d2} + u_{q2}i_{q2}}{V_{dc}} \quad (2)$$

式中, V_{dc} 为直流母线电压。由于网侧变换器采用电网电压定向矢量控制算法所以机侧变换器电流成为:

$$i'_d = \frac{P_{out}}{E_d} = \frac{u_{d2}i_{d2} + u_{q2}i_{q2}}{u_d} \quad (3)$$

式中, u_d 为网侧电网电压 d 轴分量。

图2为传统负载电流前馈控制原理图。

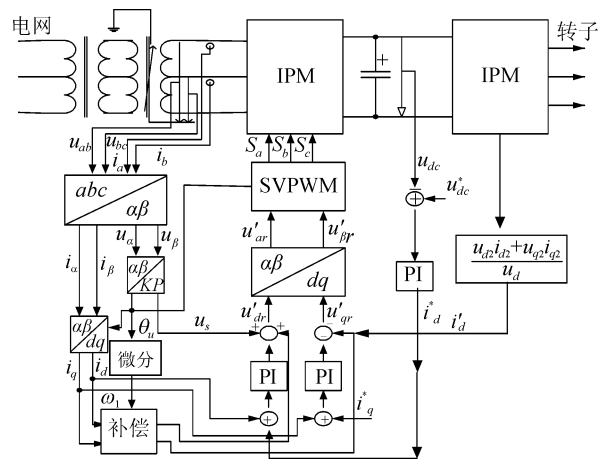


图2 传统负载电流前馈控制原理图

Fig. 2 Traditional load current feedforward control schematic

这种将负载电流引入网侧变换器的策略^[6],使直流母线电压的波动减小(见图2)。但由于反馈的电压电流是采集的定子电压和转子电流通过 dq 转换得到的。而转子电流、定子电压是在机侧控制策略控制PWM变换器后产生的^[7],即反馈的负载电流是上一时刻转子机械转速下的负载电流。前馈电流值相比实际值存在滞后性,所以只能代表DFIG转子静态电流值。这种控制策略仍然会造成直流母线电压的波动。只有前馈的电流值能正确的反映机侧负载动态电流,这样网侧变换器才能对机侧动态电流做出响应。

由于DFIG转子电流电压和时间密切相关,某一时刻下这两个量又由当前PWM周期内的脉冲占

空比所决定。同时静态负载电流前馈反馈的是上一时刻的负载特性,而真实的负载情况是下一时刻传输的前馈负载。因此需进一步研究机侧变换器在转子机械功率发生变化时所需要提供的能量,该能量即当前时刻网侧变换器需要提供的能量。这样才能使前馈电流动态的反映机侧负载的变化。基于以上原理,本研究提出了一种改进型的控制策略。

3 改进型协调控制策略

从数学角度出发,通过静态量进行时间微分就可以反映出这个量的动态情况,通过对常规负载电流前馈策略中的前馈电流微分就能克服前馈静态电流的滞后性^[8],从而提高该控制策略对动态负载的响应能力。

用欧拉数值微分公式求得前馈负载电流的微分量 $s((u_{d2}i_{d2} + u_{q2}i_{q2})/u_d)$ 。由于机侧负载转子电流电压分量是和时间密切相关的量,同时在一个 PWM 周期内转子电流电压分量是已知的。该时刻的电压电流又决定了下一个周期内的 PWM 占空比。需要通过数值微分的方法估计下一次的 u_{d2} 、 u_{q2} 、 i_{d2} 、 i_{q2} ,从而确定动态负载电流。

由于机侧变换器的控制电压 u_{d2} 、 u_{q2} 和网侧变换器控制电压 u_{d1} 、 u_{q1} 由上一个时刻 PWM 控制波形决定。双 PWM 变换器通过直流母线相连接,所以表征公式为:

$$\begin{bmatrix} u_{d2}(t) \\ u_{q2}(t) \\ u_{d1}(t) \\ u_{q1}(y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{d2}^{k-1} \\ n_{q2}^{k-1} \\ n_{d1}^{k-1} \\ n_{q1}^{k-1} \end{bmatrix} u_{dc}(t) \quad (4)$$

其中, n_{d2} 、 n_{q2} 为机侧变换器 PWM 控制波形在 d 、 q 轴上的分量, n_{d1} 、 n_{q1} 为网侧变换器 PWM 控制波形 d 、 q 轴上的分量。

新的机侧负载电流为:

$$i_{inu} = \frac{3}{2}(n_{rd}^{k-1}i_{rd} + n_{rq}^{k-1}i_{rq}) \quad (5)$$

由于需要网侧变换器输入电流电压分量和直流母线电压,才能最终求得转子电流电压分量通过计算可得出前馈的负载电流为:

$$\frac{2}{3u_d}s(V_{dc}i_{inu}) = \frac{1}{u_dT_s} [V_{dc}(k+1)(n_{d2}^k i_{d2}(k+1) + n_{q2}^k i_{q2}(k+1) - V_{dc}(k)(n_{d2}^{k-1} i_{d2}(k) + n_{q2}^{k-1} i_{q2}(k))] \quad (6)$$

传统的协调控制策略是将机侧动态负载电流直接前馈入常规控制策略 u'_{dr} 处,认为这样做可以

有效地避免由于 PI 运算造成的控制滞后。为了进一步提高网侧变换器的协调能力,本研究的提出将负载电流直接馈入网侧变换器控制策略的 i'_d 处而言,通过 PI 作用后再产生控制指令维持直流母线电压的稳定。这相对于传统的协调控制策略,由于 PI 调节的作用,减小了由机侧变换器和 DFIG 的干扰所引起的动态电流的误差^[9],提高了网侧变换器控制直流母线电压稳定的能力,也使双 PWM 变换器具有更好的独立控制、同步协调的能力。

图 3 为本研究提出的动态负载电流前馈控制原理图。

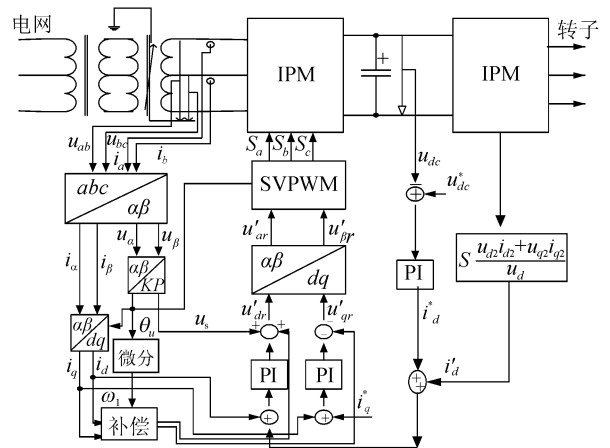


图 3 动态负载电流前馈网侧控制原理图

Fig. 3 Dynamic load current feed forward grid side of the control schematic

4 仿真研究

通过以上的分析,在 MATLAB/SIMULINK 中建立了仿真模型^[10-12],其主要参数为:双馈电机同步转速为 1 460 r/min;直流母线电压为 300 V;交流侧电压为 380 V;滤波储能电容容量为 5 000 μ F; PWM 开关频率为 10 kHz。在模型中,分别在有无协调控制策略情况下,对直流母线进行跟踪,具体的波形如图 4、图 5、图 6 所示。

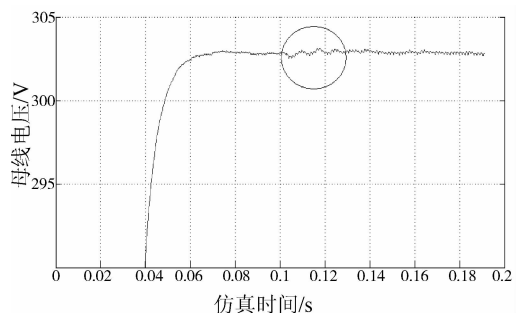


图 4 无协调控制时直流母线电压

Fig. 4 The DC bus voltage without coordinated control

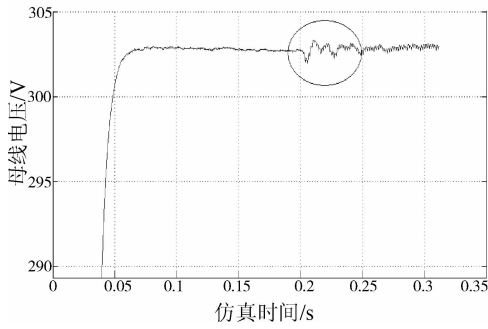


图5 传统协调控制时直流母线电压

Fig. 5 The DC bus voltage under traditional load control

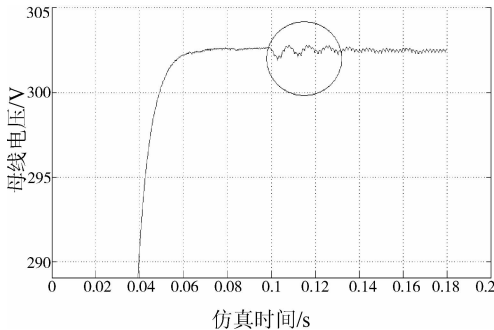


图6 有协调控制时直流母线电压

Fig. 6 The DC bus voltage under coordinated control

以上三幅仿真图是电机转速从 1 460 r/min 下降到 1 100 r/min 时直流母线的变化情况。我们可以看出,在 0.2 s 处,当转速发生变化即机侧负载发生变化时,在无协调策略的情况下(见图 4),直流母线有一个明显的波动,这是由于网侧不能根据负载的变化做出很好的调节。当加入传统协调控制策略(见图 5),直流母线电压波动有所减小。图 6 为加入了本文提出改进型协调控制策略。从仿真波形可以看出,直流母线电压波动明显减弱。仿真波形验证了本研究提出的协调控制策略的优越性。

5 实验研究

为了进一步验证该控制策略的有效性,在已有的实验平台上进行实验。该平台的风力模拟机由西门子直流调速柜控制直流电机构成,风力机和异步电机之间采用转轴直接相连,直流电机模拟风力机。

直流电机参数:控制 Z4 系列(Z4-132-3);励磁方式为他励;额定功率 $P = 18.5$ kW;额定转速为 1 540 r/min;额定电压为 440 V;额定电流为 48 A;励磁电压为 180 V。

异步电机参数:转子电阻为 0.105 8 Ω ;转子漏抗为 2.177 8 Ω ;转子开路电压为 186.7 V;转子

最大电流为 52.6 A;定子电阻(相)为 0.658 1 Ω ;定子漏抗为 1.334 6 Ω ;定转子匝数比为 3.419;励磁电抗为 42.734 Ω ;直流母线电压为 25 V。

整个控制系统的网侧和机侧是独立控制的,通过单片机实现两者之间的通讯,单片机的传输时间很短,其延时不会影响两边 DSP 的控制。

图 7 为电机在 900 r/min 转速下无协调控制的直流母线电压,图 8 为电机在 810 r/min 转速下无协调控制的直流母线电压。

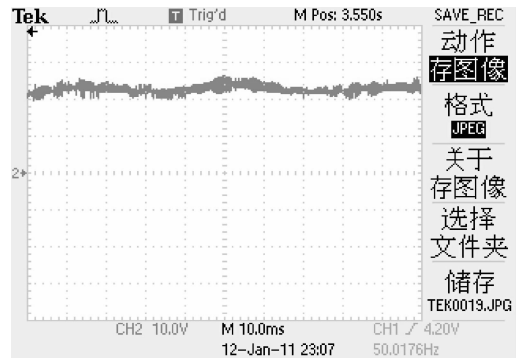


图7 电机 900 r/min 转速下无协调控制的直流母线电压

Fig. 7 The DC bus voltage without coordination of 900 r/min motor speed

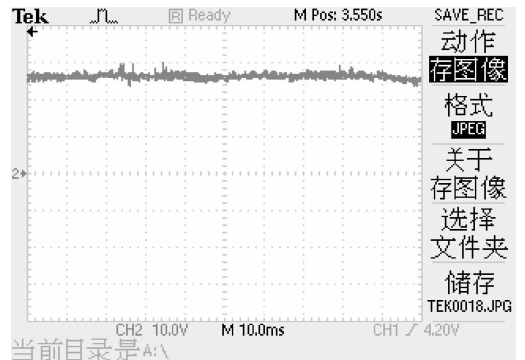


图8 电机 810 r/min 转速下无协调控制的直流母线电压

Fig. 8 The DC bus voltage without coordination of 810 r/min motor speed

由图 7、图 8 可见,在不加协调控制时,转速在 900 r/min 下的直流母线电压比在 810 r/min 情况下的直流母线电压有所降低,同时波形已经出现了很大的波动。因为高机械转速情况下,定子发出的功率一定时,机侧励磁功率在高转速下相比低机械转速情况下低。网侧变换器不能很好的跟踪负载电流的变化而使直流母线电压出现很大的波动。

加入改进型协调控制策略后,当机械转速从 860 r/min 下降到 790 r/min 时,直流母线电压和电网输入网侧变流器的电流波形如图 9 所示。因为引入了本研究提出的改进型协调控制策略,使得直流母线电压波动明显减小。实验结果验证了本研究提

出的改进型协调控制策略的有效性。

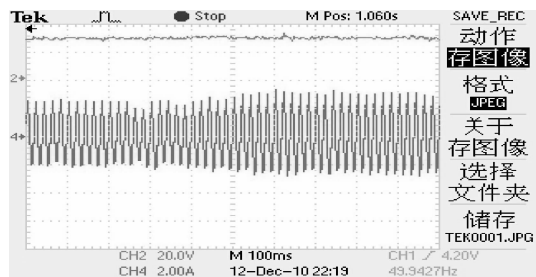


图9 协调控制时电机转速从860 r/min下降到790 r/min网侧波形

Fig. 9 The network side waveform under coordinated motor speed from 860 r/min down to 790 r/min

6 结论

本研究提出的改进型协调控制策略具有以下优点:

1) 提高了网侧变换器的响应速度,主动调节直流母线。

2) 通过PI调节,减小了机侧变换器和DFIG干扰以及误差引起的动态电流的误差。

3) 提高了网侧变换器控制直流母线电压稳定的能力。

仿真和实验结果表明了本研究提出的协调控制策略的优越性。

参考文献:

- [1] Helle L, Nielsen S M. Comparison of Converter Efficiency in Large Variable Speed Wind Turbines; Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. Boston, 2001.
- [2] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generation using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation[J]. IEEE Electrical Power Application, 1996, 143(3): 231-241.
- [3] 熊健, 张凯, 裴雪军, 等. 一种改进的PWM变换器间接电流控制方案仿真[J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 57-63.
Xiong Jian, Zhang Kai, Pei Xuejun, et al. Simulation of an improved indirect current control scheme of PWM converter[J]. Translations of China Electro-technical Society, 2003, 18(1): 57-63.
- [4] 董健, 李国杰, 孙元章. 并网双馈风力发电机矢量控制的改进及实现[J]. 可再生能源, 2007, 25(5): 61-65.
Dong Jian, Li Guojie, Sun Yuanzhang. Improvement and implementation on the control strategy of interconnected doubly-fed wind turbine generator[J]. Renewable Energy Resources, 2007, 25(5): 61-65.

- [5] Jung J, Lim K S, Nam K. A feedback linearizing control scheme for a PWM converter-inverter having a very small DC-link capacitor[J]. IEEE-IAS Annu, 1998, 2: 1497-1503.
- [6] 陆城. 变速恒频风力发电用双PWM变换器的协调控制[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
Lu Cheng. Coordinated Control of Dual PWM Converters for VSCF Wind Generation[D]. Beijing: The Chinese Academy of Sciences Graduate Institute, 2004.
- [7] 王锋, 姜建国. 风力发电用双PWM变换器的功率平衡联合控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 134-139.
Wang Feng, Jiang Jianguo. Research of power-balancing combined control scheme for back PWM converters used in the wind generator [J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(22): 134-139.
- [8] 伍小杰, 柴建云, 王祥珩. 变速恒频双馈风力发电系统交流励磁综述[J]. 电力系统自化, 2004, 28(23): 92-96.
Wu Xiaojie, Chai Jianyun, Wang Xiangheng. Overview of AC excitation for variable speed constant frequency double fed generator systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 92-96.
- [9] 赵振波, 李和明. 单位功率因素PWM变换器双闭环PI调节器设计[J]. 电工技术杂志, 2003, 84(5): 68-71.
Zhao Zhenbo, Li Heming. Design of double closed-loop PI regulator for unit power factor PWM converter [J]. Electro technical Journal, 2003, (5): 68-71.
- [10] 许凌峰, 吕跃刚, 徐大平. 变速恒频风机双PWM变换器协调控制策略研究[J]. 华北电力技术, 2008, (1): 1-5.
Xu Lingfeng, Lü Yuegang, Xu Daping. Coordinated control of dual PWM converters for variable-speed constant-frequency wind generation[J]. North China Electric Power, 2008, (1): 1-5.
- [11] 刘志华, 康现伟, 于克训. SVPWM变换器的三种矢量合成方法及其比较[J]. 电气传动自动化, 2005, 27(2): 31-34.
Liu Zhihua, Kang Xianwei, Yu Kexun. Three vector combination methods of SVPWM converter and their comparison [J]. Electric Drive Automation, 2005, 27(2): 31-34.
- [12] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 交流励磁变速恒频风力发电系统的运行与控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 129-136.
Liu Qihui, He Yikang, Zhao Rende. Operation and control of AC-excited variable-speed constant-frequency wind power generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 129-136.

(责任编辑 李虹燕)