

文章编号: 1007-2861(2009)05-0512-05

变速恒频双馈风力发电系统的励磁电源

俞俊杰, 崔开涌, 张翼, 陈国呈

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200072)

摘要: 给出了变速恒频双馈风力发电系统中交流励磁电源的控制方案. 在基于电网电压定向的基础上, 分别对转子侧变换器和网侧变换器进行了研究. 分析了双馈电机数学模型, 并对空载并网控制策略进行了设计, 实现了系统在变风速条件下无冲击电流并网. 采用直接电流控制对网侧变换器进行控制, 并实现了能量双向流动, 功率因数可调, 使双馈风力发电系统能运行在次同步和超同步两种状态下. 实验结果证实了理论分析的正确性和控制策略的有效性.

关键词: 变速恒频; 双馈感应电机; 励磁电源; 电网电压定向; 空载并网; 直接电流控制

中图分类号: TM 310

文献标志码: A

AC-Excited Power Supply for Variable-Speed Constant-Frequency Wind Energy Generation with Doubly-Fed Induction Generator

YU Jun-jie, CUI Kai-yong, ZHANG Yi, CHEN Guo-cheng

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai Key Laboratory of Power Station Technology, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: This paper proposes a control method of AC-excited power supply for variable-speed constant-frequency (VSCF) wind energy generation with doubly-fed induction generator (DFIG). Based on grid voltage orientation, rotor-side converter and grid-side converter are studied. By analyzing the mathematical model of DFIG, the control strategy of idle load grid-connection is designed. It realizes grid-connection without impact current under variable wind speed. The grid-side converter is controlled by direct current control, achieving bidirectional energy flow and power factor adjustment. DFIG wind energy generation can be realized both in subsynchronous and supersynchronous operations. Experiments show accuracy of the theory and effectiveness of the control strategy.

Key words: variable-speed constant-frequency (VSCF); doubly-fed induction generator (DFIG); AC-excited power supply; grid voltage orientation; idle load grid-connection; direct current control

近年来,随着电力电子技术的飞速发展,风力发电技术也由以前的恒速恒频风力发电逐渐向变速恒频风力发电转变^[1-3]. 在变速恒频风力发电方案中通常选用双馈发电机来实现系统变速恒频运行^[4-5],其

中的核心控制装置就是交流励磁电源.

目前双脉冲宽度调制(PWM)变换器是交流励磁电源的主流方案^[6-7]. 双PWM变换器不但可靠性高,而且相互独立解耦控制,使得它对故障的抗干扰

能力大大增强,其结构如图1所示。

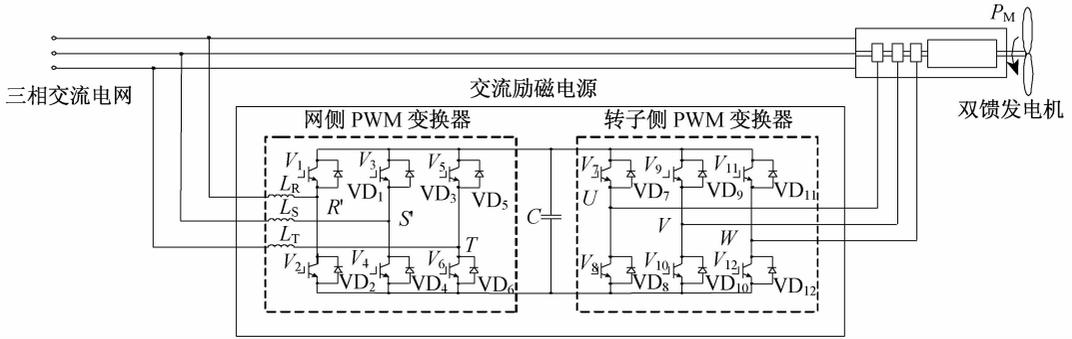


图1 双PWM变换器的结构框图

Fig.1 Structure of double PWM converter

在变速恒频交流调速系统的运行过程中,两个PWM变换器经常会在整流和逆变两种状态下切换。因此,用整流器和逆变器来称呼不是很合适,可以根据两个PWM的位置不同,将其分为网侧PWM变换器和转子侧PWM变换器。

本工作对双馈电机数学模型进行了深入研究,给出了转子侧PWM变换器的控制策略来实现空载无冲击电流并网。同时,研究了网侧PWM变换器的直接电流控制策略,实现单位功率因数并网和低电流谐波,并进行了实验研究。

1 转子侧变换器控制策略

通过转子侧PWM变换器可以对双馈感应电机(DFIG)的功率进行控制,进而实现风力发电系统柔性并网、最大功率点跟踪等控制。而转子侧PWM变换器的控制对象是双馈电机,所以首先必须对双馈电机的数学模型进行分析。

1.1 双馈电机的数学模型^[8-9]

双馈电机在三相静止ABC坐标系下是一个多变量、强耦合、非线性高阶系统。经过等功率 $3s/(2r)$ 变换后,双馈电机在dq坐标系下的磁链方程和电压方程^[9]为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}, \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}, \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd}, \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq}, \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd}, \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_s \psi_{rq}, \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_s \psi_{rd}, \end{cases} \quad (2)$$

式中, $L_m = 1.5L_{ms}$, $L_s = L_{ls} + L_m$, $L_r = L_{lr} + L_m$, L_{ms} , L_{ls} , L_{lr} 分别为定子互感、定子漏感和转子漏感。

由于定子电压受到电网钳制,其频率、幅值基本不变,因此可忽略定子磁链动态变化过程,这样就可以将电压方程式(2)降阶写为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_1 \psi_{sq}, \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_1 \psi_{sd}, \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_2 \psi_{rq}, \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_2 \psi_{rd}. \end{cases} \quad (3)$$

式(3)可作为双馈电机风力发电矢量控制依据,按照不同的矢量定向方式可得到不同的控制方案。

1.2 空载并网控制策略

空载并网是指在并网前定子侧开路,通过调节转子电流使得定子发出的电压与电网电压的频率、幅值、相位都一致。因此可以得到并网前定子电流的关系为 $i_{sd} = 0, i_{sq} = 0$ 。双馈电机空载并网矢量形式T型等效电路如图2所示。

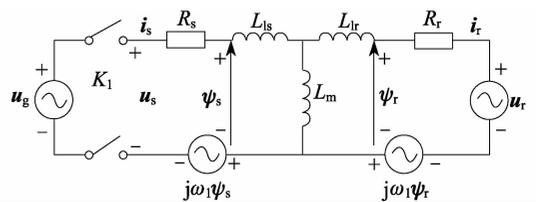


图2 空载并网DFIG矢量等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of DFIG idle load grid-connection

将上述关系代入式(1)和式(3)可得

$$\begin{cases} u_{sd} = -\omega_1 L_m i_{rq}, \\ u_{sq} = \omega_1 L_m i_{rd}, \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p i_{rd} - \omega_2 L_r i_{rq}, \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p i_{rq} + \omega_2 L_r i_{rd}. \end{cases} \quad (4)$$

由于定子电压应与电网电压一致,所以 $u_{sd} = u_{gd}, u_{sq} = u_{gq}$,当采用电网电压定向时,有

$$\begin{cases} u_{sd} = u_{gd} = \sqrt{3}U_g, \\ u_{sq} = u_{gq} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

式中, U_g 为电网电压的有效值. 把式(5)代入式(4)定子电压方程可得

$$\begin{cases} i_{rd} = 0, \\ i_{rq} = -\frac{\sqrt{3}U_g}{\omega_1 L_m}. \end{cases} \quad (6)$$

根据式(4)和式(6)可以对空载并网的控制策略进行设计,式(6)是根据电网电压计算出转子电流的给定值,然后再根据式(4)设计转子电流的两个电流环,其中式(4)中的 $-\omega_2 L_r i_{rq}, \omega_2 L_r i_{rd}$ 可作为系统的解耦补偿项. 根据上述关系,空载并网控制框图如图3所示.

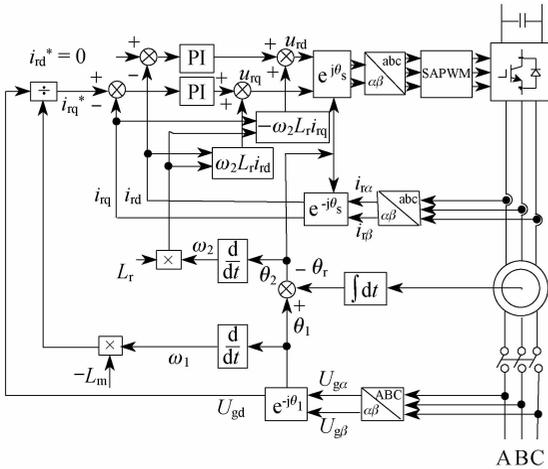


图3 空载并网控制结构图

Fig. 3 Control structure of DFIG idle load grid-connection

2 网侧变换器控制策略

当双馈风力发电系统转速运行在同步速以下时称为次同步状态,运行在同步速以上时称为超同步状态. 当发电机处于次同步状态时,转子侧吸收能量,网侧 PWM 变换器处于整流状态. 当发电机处于超同步状态时,转子把能量馈送给电网,网侧

PWM 变换器处于逆变状态. 所以对于网侧变换器来说,转子侧变换器就是一个时刻变化的负载. 而保持母线电压恒定是两个 PWM 正常运行的前提条件. 所以网侧变换器不但要保证能量双向流动,而且需要有较好的抗扰性,并且能实现功率因数可调.

本研究采用直接电流控制的方法对网侧 PWM 变换器进行控制,其中网侧变换器的拓扑如图4所示.

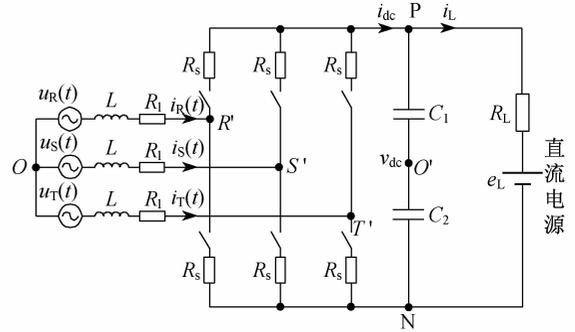


图4 网侧变换器主电路拓扑

Fig. 4 Main circuit of the grid-side converter

根据文献[10],网侧 PWM 变换器在 dq 坐标轴上的数学模型为

$$\begin{cases} C \frac{dv_{dc}}{dt} = (i_d S_d + i_q S_q) - i_L, \\ L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + R i_d = u_d - S_d v_{dc}, \\ L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + R i_q = u_q - S_q v_{dc}, \end{cases} \quad (7)$$

式中, S_d, S_q 分别是开关函数的 d 轴、q 轴分量. 当采用电网电压矢量定向时,则有

$$\begin{cases} u_d = \sqrt{3}u_g, \\ u_q = 0. \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),可以得到

$$\begin{cases} C \frac{dv_{dc}}{dt} = (i_d S_d + i_q S_q) - i_L, \\ L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + R i_d = \sqrt{3}u_g - S_d v_{dc}, \\ L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + R i_q = -S_q v_{dc}. \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9)可以对网侧变换器的控制策略进行设计. 网侧变换器的控制框图如图5所示.

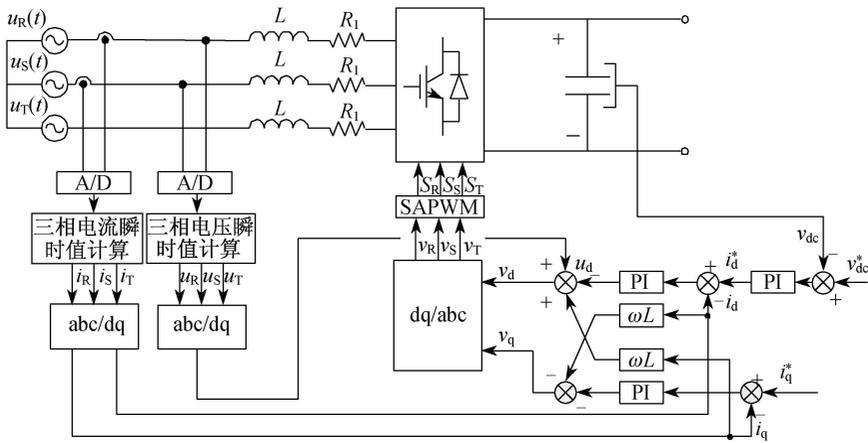


图5 直接电流控制框图
 Fig. 5 Control structure of direct current control

3 实验研究

本研究对转子侧 PWM 变换器和网侧 PWM 变换器分别进行了实验研究. 整个系统由 TMS320LF2407A 定点 DSP 控制, 载波频率 5.0 kHz, 网侧变换器进线电感为 5.2 mH, 直流母线电容容量为 2 700 μ F, 功率模块为西门康 100GB128D, 采用直流电动机模拟风机. 图 6 为本系统的实验框图.

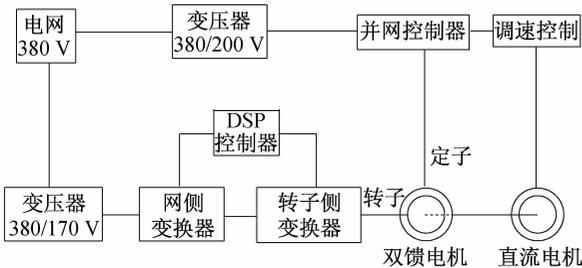
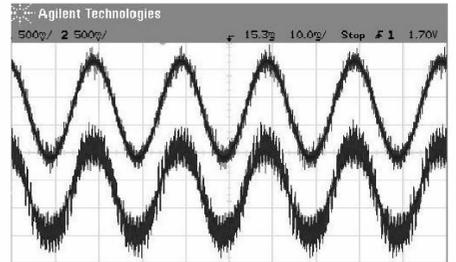
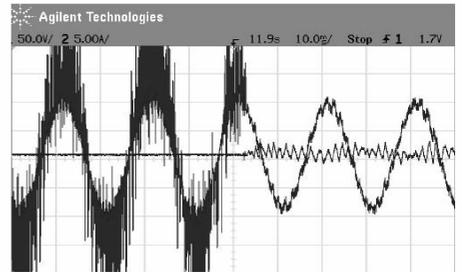


图6 双馈风力发电系统实验框图
 Fig. 6 Structure of doubly-fed wind power generation experimental system



(a) 空载并网前定子电压与网侧电压波形



(b) 并网时刻定子电压、电流波形

图7 空载并网实验波形

Fig. 7 Experimental waveform of idle load grid-connection

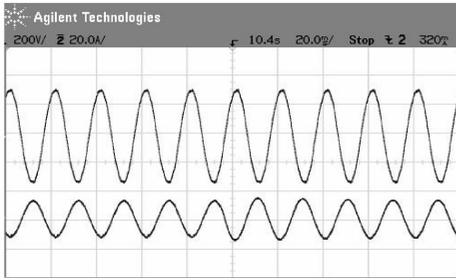
图 7 为空载并网的实验波形. 在空载并网前, 风机转速为 $n = 1\ 400\ \text{r/min}$, 模拟风力变化使其降低至 $n = 1\ 200\ \text{r/min}$. 图 7(a) 为双馈电机定子侧发出的电压和电网电压. 由图可见, 虽然风速发生了变化, 但是二者从幅值、频率和相位上来看几乎都是一致的. 图 7(b) 为并网时刻定子电压与定子电流波形, 可以看出并网瞬间定子与电网之间几乎无冲击电流产生, 产生的些微小电流只是为了提供电机运行所需的无功.

图 8 为网侧 PWM 变换器在能量双向流动情况下的波形. 图 8(a) 是网侧变换器在逆变状态时,

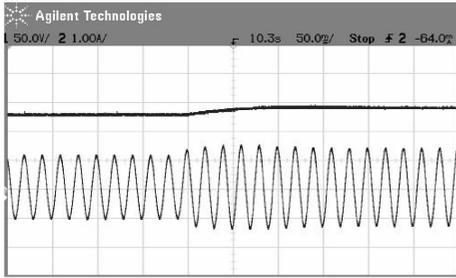
网侧电压和网侧电流的波形, 其中直流母线电压是 140 V. 可以看出, 此时逆变的功率因数为 1. 图 8(b) 是直流母线电压从 130 V 升到 140 V 时网侧电流的波形. 从中可以看出直接电流控制的调节时间很短, 约为 0.1 s 左右, 电流的超调也不大. 图 8(c) 是网侧变换器处于整流状态时, 突然切换到逆变状态的过程. 可以看到期间的调节时间约为 0.15 s, 且在整流和逆变的状态下, 功率因数都保持在 1.

4 结束语

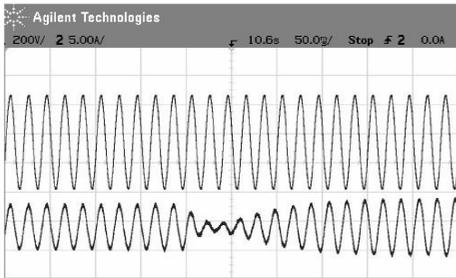
本工作研究了变速恒频双馈风力发电系统的交流励磁电源, 采用了双 PWM 变换器结构. 推导了双



(a) 网侧变换器在逆变时网侧电压、电流波形



(b) 母线电压变化时电流波形



(c) 从整流到逆变时的电压、电流波形

图8 网侧变换器实验波形

Fig. 8 Experimental waveform of grid-side converter

馈电机和网侧变换器的数学模型,并给出了空载并网和直接电流控制的控制策略.本研究采用电网电压定向的矢量控制技术,免去了定子磁链的观测,简化了控制策略.

在双馈风力发电实验平台中证明:在变风速的条件下,定子电压仍然能与电网电压基本保持一致,

实现无冲击电流并网.网侧变换器能量双向流动,使整个系统能处于次同步与超同步运行,并且网侧电流谐波含量小,功率因数可调.

参考文献:

- [1] XU L. Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation [J]. IEEE Trans Energy Convers, 2006, 21(3):750-758.
- [2] LEI Y Z, MULLANE A, LIGHTBODY G, et al. Modeling of the wind turbine with a doubly-fed induction generator for grid integration studies [J]. IEEE Trans Energy Convers, 2006, 121(1):257-264.
- [3] 王野平,高俊,李金东.风力发电的现状[J].机械设计与制造,2006(5):154-156.
- [4] 高绪明,杭乃善,梁雄,等.变速恒频双馈风力发电机的励磁控制系统设计及试验研究[J].黑龙江电力,2007,29(2):102-104.
- [5] 向大为,杨顺昌,冉力.电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的励磁控制策略[J].中国电机工程学报,2006,26(2):164-170.
- [6] 郭金东,赵栋利,林资旭,等.变速恒频双馈风力发电机励磁电源控制技术[J].电力电子技术,2007,41(4):1-3.
- [7] 张兴国,林辉,杨轲.变速恒频双馈发电独立电源的励磁控制策略[J].电器传动,2008,38(1):3-6.
- [8] 吴国祥,马伟炜,陈国呈,等.双馈变速恒频风力发电空载并网控制策略研究[J].电工技术学报,2007,22(7):169-175.
- [9] 陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].3版.北京:机械工业出版社,2005:190-205.
- [10] 赵仁德.变速恒频双馈风力发电机交流励磁电源研究[D].杭州:浙江大学,2005.

(编辑:刘志强)