

基于双PWM控制技术的双馈风力发电系统

胡蓉¹,王勇²

(1. 广东工程职业技术学院 机电工程学院, 广东 广州 510520;

2. 南京信息职业技术学院 电子信息系, 江苏 南京 210023)

摘要:针对双馈风力发电系统直流母线电压波动的问题,提出采用双PWM变换器协调控制策略改善系统的性能。基于双馈异步发电机的数学模型,建立了转子侧和网侧PWM变换器控制系统,分析了两侧变换器独立控制时存在的缺点。根据转子侧和网侧PWM变换器之间的动态关系,提出了一种负载电流前馈的新型双PWM变换器协调控制策略。搭建了双馈风力发电系统模型,对风速突变时独立控制和协调控制策略进行仿真分析。结果表明,所提控制策略能有效地抑制直流母线电压的波动,提高了系统的安全性和稳定性。

关键词:双馈风电系统;双PWM变换器;最大风能捕捉;协调控制

中图分类号:TM351 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19525

Doubly-fed Wind Power Generation System Based on Dual PWM Control Technology

HU Rong¹, WANG Yong²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong Engineering Polytechnic,

Guangzhou 510520, Guangdong, China; 2. Department of Electronic Information,

Nanjing Institute of Information Technology, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problem of DC bus voltage fluctuation in doubly-fed wind power generation system, coordinated control strategy was proposed to improve the performance of the system by using dual PWM converter. Based on the mathematical model of the doubly-fed induction motor, the rotor and grid side PWM converter control systems were established, and the shortcomings of independent control for the two converters were analyzed. A new dual PWM converter coordinated control strategy of load current feedforward was proposed based on the dynamic relationship of the rotor side PWM converter and grid side PWM converter. The simulation model of doubly-fed wind power generation system was built. The control strategies of independent control and coordinated control were analyzed when wind speed mutated. The results show that the proposed control strategy can effectively reduce the DC bus voltage fluctuation and improve the safety and stability of the system.

Key words: doubly-fed wind power system; dual PWM converters; maximum wind power capture; coordinated control

在双馈风力发电系统中,由于交-直-交双PWM变换器功率因数高、传输性能好、整流器侧谐波含量少等优点,而被广泛运用^[1-2]。双PWM变换器由转子侧PWM变换器(rotor side converter, RSC)和网侧PWM变换器(grid side converter, GSC)共同组成,两者协同工作。最大风能捕捉和P-Q解耦控制是RSC的首要控制目标,GSC控制主要是保证直流母线电压稳定。

目前,最大风能追踪控制策略^[3-5]主要有:最

佳叶尖速比法、三点法、反馈功率信号法等,近年来,国内外学者基于上述控制策略做了很多改进,如模糊自适应控制^[6]、改进爬山搜索法^[7]、最大功率曲线法^[8]、滑模控制法^[9]等控制策略。功率解耦常采用的控制方法有:矢量控制、模糊控制、自抗扰功率器控制策略。GSC控制主要包括直流电压控制和交流电流控制两个方面,三相电压源型变换器常被用于此控制,来建立双PI闭环控制,外环是直流电压控制环,内环是交流电流控制环。

基金项目:广东省教育厅科研项目(2017GDSJY168)

作者简介:胡蓉(1981—),女,硕士,讲师,Email:yxyld@163.com

文献[10]采用矢量控制的SPWM技术对交流侧电压进行控制。文献[11]提出的对功率的预测控制,动、静态性能较好,但由于该方法矢量选择比较复杂,而且可能存在矢量租用时间为负的问题。

然而以往的研究中,RSC和GSC的控制系统是互相解耦的。RSC和GSC通过中间直流母线连接,在风电场实际运行中风速不断变化,通过RSC和GSC的瞬时能量往往不可能达到动态平衡,双馈风力发电系统会受到较大的冲击,一般通过增大直流母线电容的方法,这必然会使整个系统出现包括体积的增大、成本增加以及安全方面问题^[12]。因此从控制策略上来考虑对直流母线电压波动的抑制作用有重要的工业应用意义。文献[13]提出了负载前馈协调控制中将RSC和DFIG作为负载,逆变桥有功功率被反馈至整流桥电流控制环上,PR控制器作为控制元件而非PI控制器,控制起来较为复杂。文献[14]采用Master-Slave控制模式,RSC被看成Master系统,Slave系统则由GSC充当,控制目标是Slave系统功率与Master系统功率保持实时相等,从而实现两部分功率平衡,也是从功率控制入手。文献[15]利用小信号线性化法建立了负载电流前馈控制的小信号模型,计算出直流母线波动方程,通过精确的参数设计使直流母线电压受负载影响最小。文献[16]将储能元件与双PWM变换器相结合,利用蓄电池的快速充放电来抑制由于风速突变引起的直流母线电压波动,但存在储能元件的控制问题。

为此,本文基于RSC和GSC之间存在的电气量控制关系,分析两者独立控制策略的不足,提出一种新型双PWM变换器协调控制策略。基于RSC的拓扑结构建立了RSC控制模型,对转速外环和电流内环的双闭环进行PI控制,实现最大风能捕捉及P-Q解耦控制。对直流电压外环、交流电流内环进行PI控制,实现直流母线电压的稳定运行及单位功率因数运行。搭建了完整的双馈风力发电系统模型,并在风速突变即负载突变情况下对独立控制策略与协调控制策略进行了仿真对比,验证了新型协调控制策略的有效性。

1 双馈发电机的数学模型

双馈发电机的数学模型可以由定子和转子电压方程、磁链方程和运动方程构成。假定双馈

发电机的定、转子绕组三相对称,所产生的磁动势沿气隙正弦分布;忽略磁路的非线性饱和和铁心损耗;忽略涡流、铁耗、磁滞损耗等。则在d-q同步旋转坐标系下,双馈发电机的定、转子电压方程可表示为

$$\begin{cases} u_{ds} = -r_s i_{ds} + \omega_1 \Psi_{qs} - p \Psi_{ds} \\ u_{qs} = -r_s i_{qs} - \omega_1 \Psi_{ds} - p \Psi_{qs} \\ u_{dr} = r_r i_{dr} - (\omega_1 - \omega_r) \Psi_{qr} + p \Psi_{dr} \\ u_{qr} = r_r i_{qr} + (\omega_1 - \omega_r) \Psi_{dr} + p \Psi_{qr} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}$ 和 $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ 以及 $\Psi_{ds}, \Psi_{qs}, \Psi_{dr}, \Psi_{qr}$ 分别为定、转子的电压、电流、磁链的d,q轴分量; r_s, r_r 分别为定、转子电阻; ω_1, ω_r 分别为旋转磁场下的同步转速和转子角速度;p为微分算子。定、转子电压方程可表示为

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} - L_m i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} - L_m i_{qr} \\ \Psi_{dr} = -L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \Psi_{qr} = -L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_s 为定子绕组间的自感; L_r 为转子绕组间的互感; L_m 为定、转子绕组间的互感。

运动方程可表示为

$$T_m - T_e = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中: T_m 为双馈发电机输出机械转矩; T_e 为电磁转矩; J 为转动惯量; n_p 为发电机极对数; ω 为电角速度。

定子输出的有功功率P和无功功率Q为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}) \\ Q = \frac{3}{2} (u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad (4)$$

2 双PWM变换器独立控制研究

2.1 转子PWM变换器控制研究

RSC主要向双馈异步发电机(double fed induction generator,DFIG)转子绕组传输励磁能量,对DFIG进行变频调速,实现最大风能捕捉和有功、无功功率的解耦控制。为了实现P-Q解耦控制,采用基于定子电压定向的最大风能捕捉控制策略,则 $u_{ds}=u_s, u_{qs}=0$,其中 u_s 为电网电压。由于并网运行时DFIG的定子频率固定在电网频率上,因此只需考虑定子电抗的影响,此时DFIG定子绕组总磁链的相位恰好超前定子绕组端电压 90° ,存在 $\Psi_{ds}=0, \Psi_{qs} \approx u_s/\omega_1$ 。则可以将DFIG定子输出的有功功率P和无功功率Q分别表示为

直流母线电压外环、电流内环的双闭环矢量控制,理论上可以实现电压和电流的无静差调节。

3 双PWM变换器协调控制研究

在一些大功率的双馈风力发电机组中,双PWM变换器励磁系统直流母线电容的充、放电次数会大幅增加,且风速的不确定性和发电机转速的变化都将引起直流母线电压的波动,而RSC控制和GSC控制都是在直流母线电压稳定的基础上实现。为此,实现双PWM变换器的协调控制,以提高直流母线电压的动态性能是很有必要的。

3.1 直流母线电压的数学模型

图3为双PWM变换器的拓扑结构,考虑到IGBT的开关频率较高于转差率,则建立直流母线的数学模型时,仅仅考虑电容充放电的动态过程。

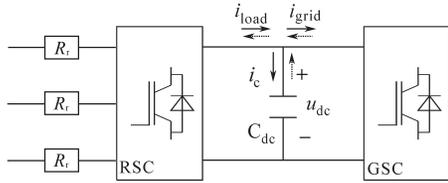


图3 双PWM变换器拓扑结构图

Fig.3 The topology diagram of dual PWM converter

图3中,存储在直流母线电容 C_{dc} 上的能量 W_{dc} 可以用下式表示:

$$W_{dc} = \frac{1}{2} C_{dc} u_{dc}^2 \quad (12)$$

一般变换器的实际损耗可以忽略不计,则存储在直流母线电容 C_{dc} 上的能量 W_{dc} 由两端变换器功率平衡与否来决定,即网侧变换器的功率 P_s 和转子侧变换器功率 P_r 共同决定,可得:

$$\frac{dW_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} C_{dc} \frac{d}{dt} u_{dc}^2 = C_{dc} u_{dc} \frac{d}{dt} u_{dc} = P_s - P_r \quad (13)$$

式中: u_{dc} 为网侧变换器的直流母线电压。故当 $P_s=P_r$ 时,直流母线电压将保持恒定。

3.2 负载电流前馈的协调控制策略

在网侧PWM变换器控制中,由于整流侧的输出电流总是滞后于负载电流的变化,故通过电容的电流始终在一定范围内变动,从而使直流母线电压不断波动。为此,采用负载电流前馈的协调控制策略对母线电压波动进行抑制。

首先将转子侧PWM变换器和双馈发电机看成整体进行研究,并将其作为网侧PWM变换器的一个时变负载,然后将该负载的动态电流信息引入到网侧PWM变换器的直流母线电压控制

中。图3中给出了双PWM变换器在不同运行状态下的电流流向, i_{load} 为负载电流、 i_{grid} 为网侧PWM变换器电流、 i_c 为直流母线电容电流,其中 i_{grid} 总是跟随 i_{load} 变化。实线箭头表示负载电流流向直流母线电容,对其进行充电,此时双馈发电机工作在超同步运行状态下,母线电压升高;虚线箭头则与实线箭头表示的方向相反,此时双馈发电机工作在亚同步运行,母线电压降低。因此,为了实现负载电流前馈的协调控制,需要直接将负载电流的动态信息叠加到网侧PWM变换器控制中内环控制电压上,但考虑到电流互感器的安装难度,本文利用转子侧的功率 P_r 估算负载电流大小,不计IGBT中的各种损耗时,会有:

$$P_r = u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr} = u_{dc} i_{load} \quad (14)$$

则负载电流 i_{load} 可表示为

$$i_{load} = \frac{u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr}}{u_{dc}} \quad (15)$$

借助小信号分析的方法,设交流侧电流的 d 轴分量 $i_d = I_d + \Delta i_d$, I_d 为 d 轴的稳态电流,可以得出:

$$I_d = \frac{u_{dc}}{e_d} i_{load} \quad (16)$$

根据式(15)和式(16),在 $d-q$ 同步旋转坐标系下,可以将网侧电压的 d, q 轴分量 u_d^*, u_q^* 表示为

$$\begin{cases} u_d^* = -L \frac{d\Delta i_d}{dt} - L \frac{dI_d}{dt} + \omega L i_q + e_d \\ u_q^* = -L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (17)$$

根据式(16)和式(17),可以将电流内环控制系统的数学模型用下式进行表示:

$$\begin{cases} u_d^* = -(K_p + K_I/s)(\Delta i_d^* - \Delta i_d) + (\omega L i_q + e_d - Ls \frac{u_{dc}}{e_d}) \\ u_q^* = -(K_p + K_I/s)(i_q^* - i_q) - (\omega L i_d - e_q) \end{cases} \quad (18)$$

其中, d 轴电流的给定值 Δi_d^* 由直流外环的电压环输出值决定, d 轴电流的反馈值 Δi_d 可由下式计算得出:

$$\Delta i_d = i_d - \frac{u_{dc}}{e_d} i_{load} \quad (19)$$

因此,将式(19)代入式(18)中,可以使电流内环控制系统的数学模型变换为

$$\begin{cases} u_d^* = -(K_p + K_I/s)(\Delta i_d^* + \frac{u_{dc}}{e_d} i_{load} - i_d) + (\omega L i_q + e_d - Ls \frac{u_{dc}}{e_d} i_{load}) \\ u_q^* = -(K_p + K_I/s)(i_q^* - i_q) - (\omega L i_d - e_q) \end{cases} \quad (20)$$

母线电压从0 V增加到给定值450 V,且一直保持稳定。网侧PWM变换器工作在整流状态下时,交流侧电压与电流同相位,即GSC工作在单位功率因数运行下的整流状态。

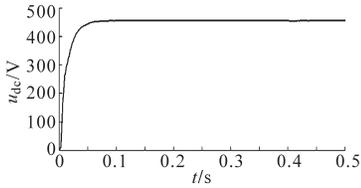


图8 直流母线电压波形

Fig.8 The oscillogram of DC bus voltage

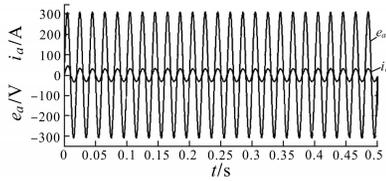


图9 交流侧A相电压和电流波形

Fig.9 The oscillograms of A phase voltage and current on AC side

本文所提负载电流前馈的新型双PWM变换器协调控制策略主要是为了解决直流母线电压波动的问题。图10为给定风速为10.2 m/s,0.5 s时,风速突增为12.2 m/s,1s时风速又变化到8.8 m/s,所对应的发电机转速 ω 变化波形;图11和图12分别为发电机定子的A相电流和转子的三相电流波形。可以看出,风速为10.2 m/s时双馈发电机运行在同步运行状态,当风速突变时,发电机转速能根据最大叶尖速比法对风速进行跟踪,运行于超同步运行状态或亚同步运行状态。当风速突变时,定子电流的频率始终不变,只是幅值发生了改变,而转子电流的频率发生了明显改变,则说明所提负载电流前馈的新型双PWM变换器协调控制策略能实现变速恒频发电。为了充分说明所提控制策略对直流母线电压波动的抑制效果,图13给出了双PWM变换器独立控制作用下和协调控制作用下,风速发生突变时直流母线电压的波动情况,其中 u_{dc} 和 u_{dc}^* 分别为双PWM变换器独立控制下和协调控制下的直流母线电压。可以看出,当风力机从同步运行状态过渡到超同步运行状态时,直流母线电压升高,而 u_{dc}^* 的波动较小,小于5 V;1.0 s时风力机从超同步状态过渡到亚同步运行状态,直流母线电压降低, u_{dc}^* 减小了大约为5 V,波动小于 u_{dc} 。直流母线电压的动态调节速度明显增加。因此,采用同样大小的母线电容时,验证了本文所提负载电流前馈的新型

双PWM变换器协调控制策略会有效抑制直流母线电压波动,使电压调节更加迅速,提高了控制系统的可靠性。

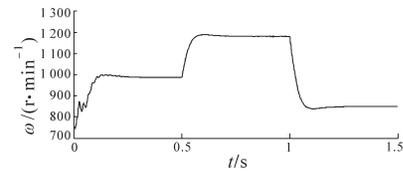


图10 发电机转速变化波形图

Fig.10 The oscillogram of generator revolving speed variation

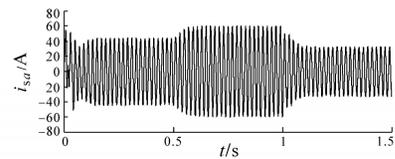


图11 发电机A相定子电流变化波形图

Fig.11 The oscillogram of generator stator A phase current variation

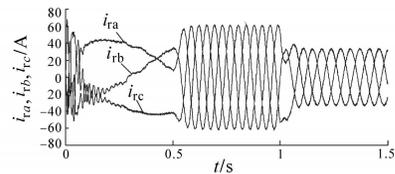


图12 发电机转子电流变化波形图

Fig.12 The oscillogram of generator rotor current variation

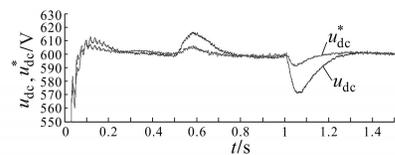


图13 2种控制策略下的直流母线电压波形图

Fig.13 The oscillogram of DC bus voltage under two different control strategies

5 结论

本文对基于双PWM变换器作为励磁电源的变速恒频风力发电方法进行了研究,对独立控制下的双PWM变换器的不足之处进行了分析。为了有效抑制直流母线电压波动,提出一种负载电流前馈的新型双PWM变换器协调控制策略。搭建了双馈风力发电系统模型,对风速突变时独立控制和协调控制策略进行对比分析。结果表明,利用双PWM协调控制策略能有效抑制直流母线电压的波动,从而提高系统的稳定性和可靠性。

参考文献

- [1] 邓禹,邹旭东,康勇,等. 变速恒频双馈风力发电系统最优风能捕获控制[J]. 通信电源技术, 2005, 22(3): 21-24.
- [2] 朱瑛,程明,花为,等. 考虑损耗转矩的风力发电系统最大风

- 能跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 39-46.
- [3] 钟沁宏, 阮毅, 赵梅花, 等. 变步长爬山法在双馈风力发电系统最大风能跟踪控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 22(8): 67-73.
- [4] Tu Z Q, Wang X, Zhao X. Terminal Sliding Mode Control Optimization for Maximal Wind Energy Capture of DFIG Without Speed Sensors[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 56(7): 1542-1546.
- [5] Alaboudy A H K, Azmy A M, Abdellatif W S E. Controller Performance of Variable Speed Wind Driven Doubly-fed Induction Generator[C]//IEEE Smart, Jeddah, Sadul Arabia, 2016: 456-459.
- [6] 薛花, 王育飞. 基于无源性的双馈感应风力发电系统自适应滑模控制方法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 43-48.
- [7] 周帅. 最大风能捕获改进爬山法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [8] 孙宗坡. 风力发电系统中最大功率点跟踪控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [9] 陈家伟, 陈杰, 陈冉, 等. 变速风力发电机组自适应模糊控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 93-101.
- [10] 丁立云. 变速恒频风力发电 PWM 整流及其控制策略的仿真研究[J]. 硅谷, 2011, 5(23): 75-76.
- [11] 杨波. 双馈异步风力发电系统网侧 PWM 变换器的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008: 21-24.
- [12] 张宇锟. 双馈式风力发电系统网侧变流器的控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.
- [13] 陈成. 变速恒频双馈风力发电系统双 PWM 变换器控制[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [14] Si W J, Zhang N. Application of Fuzzy Adaptive PID Control for Rotor Side Converter of DFIG based WPGS[C]//Applied Mechanics and Materials, Washington, D. C., USA, 2014, 541/542: 1238-1242.
- [15] 王锋, 姜建国. 风力发电机用双 PWM 变换器的功率平衡联合控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 134-139.
- [16] 郭浩. 风力发电系统与储能装置协调控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.

收稿日期: 2018-09-19

修改稿日期: 2018-11-26

欢迎订阅《电气传动》(月刊)

《电气传动》创刊于1959年,由天津电气科学研究院有限公司和中国自动化学会共同主办,是我国自动化类和电工技术类具有权威性的核心刊物。本刊以促进科技交流,沟通行业、产品信息,培养人才为宗旨。主要栏目包括:综述和专论、交、直流调速、计算机应用、微机及PLC应用、自动控制理论、自动控制系统、控制技术、设计计算、工业应用等。内容涵盖电气传动自动化最新研究成果、发展动态及新技术、新产品、新器件。是科研院所、工矿企业广大科技人员和高等院校师生发表学术见解、应用经验及学术争鸣的园地,也是了解新产品、新器件、新技术的窗口。

邮发代号:6-85 邮局全年订价:180元 零售价:15.00元