基于直流发电机的风力发电系统及其控制策略

马宏忠,徐树峰,鞠　平,严惠敏,张利民,陈　奋,朱统亮

(河海大学电气工程学院,江苏 南京　210098)

摘要:针对风力发电系统的特点,结合直流发电机的特性,提出了基于直流发电机的风力发电系统.从理论上分析了该系统的可行性及其优点,重点对其控制策略进行研究,在动模实验室内建立基于直流发电机的风力发电系统的模拟系统,以直流电动机作原动机,调节直流电动机的转速,模拟风速变化引起的风力机转速的变化,并通过试验验证了该系统的可行性.

关键词:直流发电机;直流电动机;风力发电系统;控制策略;实验模拟

中图分类号:TM331　　文献标识码:A　　文章编号:1000-1980(2007)03-0334-04

随着人类社会的发展,能源和环境问题成为当今人类社会生存和发展所面临的重大问题,以清洁、可再生能源为主的能源结构将成为未来发展的必然趋势.风能作为一种清洁、无污染、易实现大规模开发的可再生能源,正越来越受到世界各国的普遍重视,风力发电将成为 21 世纪最具开发前景的新能源之一[1].

近年来,在广大科研人员和工程技术人员的共同努力下,风力发电机组由最初的定桨距型发展到了变速变桨距型,发电效率有了显著的提高,现在世界上主要的风电机组制造商生产的主流机组大都是采用双馈异步发电机的变速恒频风力发电机组,广大学者及相关研究人员也对这种机组的各种性能进行了深入的研究[2-6].基于双馈异步发电机的变速恒频风力发电技术是目前的研究热点.相对于传统的异步发电机,双馈发电机具有显著的优点,但与传统异发电机一样,这种风力发电机组仍需配备变速齿轮箱,这不但增加了机组成本和运行噪声、降低了风能的利用效率.更重要的是双馈异步发电机的控制系统相当复杂,对其可靠性要求高,目前有很多问题仍未得到很好的解决[7-11],而且其成本也很高.

直流发电机的重要特点是调节电压方便,电机转速在一定的变化范围内,通过调节励磁电流可以使输出电压稳定,特别适用于转速频繁波动的风力发电系统.本文根据风力发电系统的特点,结合直流发电机的特性,提出了基于直流发电机的风力发电系统.该系统包括变桨距风力机、励磁可调的直流发电机、具有低频环节的 IGBT 逆变器以及相应的控制调节部分.

1　直流发电机的特性

1.1　概述

直流发电机在结构上有永磁式及电励磁式 2 种类型.永磁式直流发电机利用永久磁铁来提供发电机所需要的励磁磁通,而电励磁式直流发电机是借助在励磁线圈中流过的电流产生磁通来提供发电机所需的励磁磁通.对于电励磁式直流发电机,当发电机所带负载或转速变化时,可以通过调节发电机的励磁电流的大小来维持发电机的输出电压恒定,与异步发电机相比,其发电运行的可靠性高,控制简单,不但克服了永磁发电机输出电压调节困难和内部故障时无法灭磁的缺点,也解决了异步发电机需要从电网吸取无功的不足.电励磁式直流发电机按照励磁方式的不同分为他励和自励 2 种.由于他励发电机的电压变化率小,且励磁电流能在相当大的范围内调节,适用于需要大幅度频繁调压的场合.因此,本系统采用了他励直流发电机.

1.2　电压、电流和转矩、转速之间的关系

1.2.1　发电机的电压与电流之间的关系

他励直流发电机电枢电流 I_a 等于负载电流 I_L,即

收稿日期:2006-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50477010);教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划专项资金资助项目

作者简介:马宏忠(1962—),男,江苏如皋人,教授,博士,主要从事电机理论及电气设备故障诊断研究.

$$I_a = I_L \tag{1}$$

发电机的感应电势为端电压与内部电压降之和，即

$$E_a = C_e \Phi n = U + I_a R_a + 2\Delta U \tag{2}$$

式中：C_e——发电机的电势系数；Φ——发电机每极下的磁通量；R_a——电枢绕组的电阻；E_a——绕组感应电势；U——电枢端电压；n——发电机的转速；ΔU——每个电刷的接触压降，因为电刷接触电阻往往随电流的增大而减小，通常可假定 ΔU 为常数，当用石墨电刷或碳-石墨电刷时，可取 $\Delta U = 1$ V.

从式(2)可见，发电机的电动势与磁通成正比，而磁通与励磁电流之间的关系与磁化曲线相似(因为 $H \propto I_f$，$E_a \propto \Phi$)．励磁电流增加，磁通增加，则输出电压也增加．在不计饱和情况下，有

$$E_a = K_e n I_f \tag{3}$$

式中：I_f——励磁电流；K_e——比例常数.

1.2.2　发电机的电磁转矩与风力机的驱动转矩之间的关系

根据毕奥-萨伐尔(Biot-Savart)定律，直流发电机的电枢电流与电机的磁通相互作用会产生电磁力，并由此产生电磁转矩，电磁转矩可表示为

$$T = C_M \Phi I_a \tag{4}$$

式中：T——电磁转矩；C_M——发电机的转矩系数；I_a——电枢电流.

发电机的电磁转矩对于风力机的拖动转矩而言是制动性质的．当转速恒定时，风力机的拖动转矩与发电机的电磁转矩平衡，即

$$T_1 = T + T_0 \tag{5}$$

式中：T_1——风力机的拖动转矩；T_0——机械摩擦阻转矩.

当风速变化时，风力机的驱动转矩变化，则转矩的平衡关系为

$$T_1 = T + T_0 + J\frac{d\omega}{dt} \tag{6}$$

式中：J——风力机、发电机和传动系统的总惯量；ω——发电机转轴的旋转角速度；$J\frac{d\omega}{dt}$——动态转矩.

从式(6)可以看出，当发电机的负载不变(即 T 为常数)时，若风速增大，则发电机的转速将增加；反之，转速将下降．而由式(2)可以看出，发电机转速的变化将导致感应电势以及电枢端电压的变化.

由式(3)可见，通过调整发电机的励磁电流可以维持感应电势和电枢端电压不变.

2　系统结构与控制策略

2.1　系统结构

基于直流发电机直接控制的风力发电系统的拓扑结构如图 1 所示．该系统由风力机、直流发电机、IGBT 逆变器、控制器等构成.

在该风力发电系统中，采用风力机直接驱动直流发电机产生直流电能，然后通过 IGBT 逆变器将直流电转变为合格的交流电，经升压变压器并入系统．由于采用直接驱动技术，在风力机和直流发电机之间不需要安装增速齿轮箱，因而降低了机组的运行噪声，减小了维护工作量，并且在低风速时具有更高的运行效率.

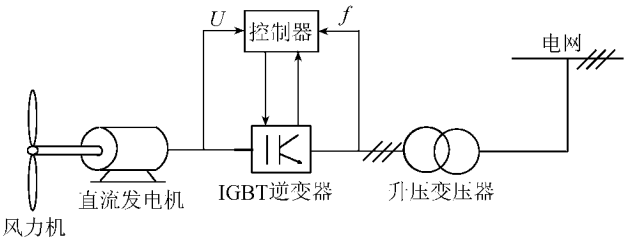

图 1　直流发电机直接控制的风力发电系统拓扑结构

Fig.1　Topological structure of wind power generation system directly controlled by DC generator

2.2　系统运行控制策略

本系统采用可调攻角的变桨距风力机，其控制原理框图如图 2 所示．系统控制的基本目标是在风速变化情况下，尽可能多地吸收风能，保持输出电压稳定，保持系统安全运行.

a. 当风速达到启动风速时，风力机开始启动，随着转速的升高，风力机叶片的节距角连续变化，使直流发电机的转速上升到给定转速值，待发电机满足并网条件时，发电机发出的电能经过 IGBT 逆变器并入电网.

b. 当风速超过额定风速时，如果风速持续增加，则风力机吸收的风能不断增大．风力机轴上的机械功率

输出大于发电机输出的电功率,则发电机的转速上升,发电机输出电压将会增大,这时适当调节励磁电流,使发电机输出电压下降(维持额定电压不变),同时,反馈到转速控制环节后,功率控制输出将使变桨距机构动作,改变风力机叶片攻角,以保证发电机输出功率不超过最大给定值,维持发电机在最大允许功率以下运行.

c. 当风速过高,通过变桨距调节无法保证转速在最大允许值以内时,由机组启停控制装置动作将风力发电机组停运.

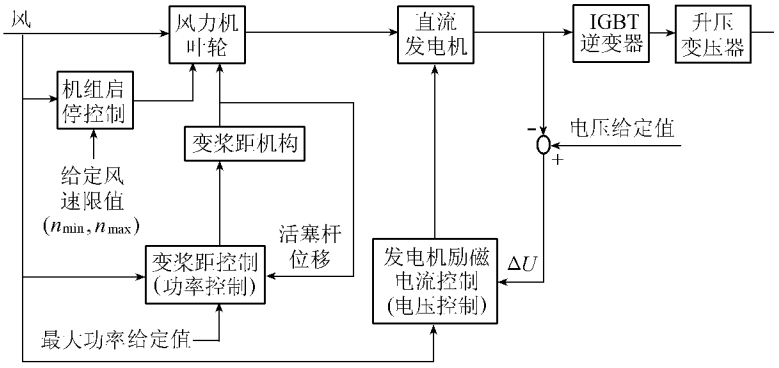

图2 机组控制原理框图

Fig.2 Control principle block diagram of unit

3 实验研究

3.1 实验电路与实验电机参数

实验在河海大学电力系统动态模拟实验室内进行,其目的是验证基于直流发电机的风力发电系统的可行性,并进一步研究其调节规律.

用直流电动机模拟风力机带动直流发电机运行,试验原理接线如图3所示,电机参数见表1.

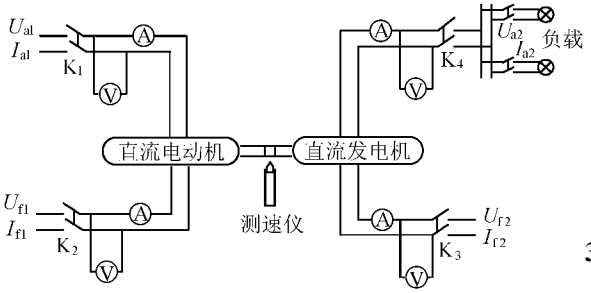

图3 试验原理接线

Fig.3 Principle wiring diagram of experiment

表1 电机主要参数

Table 1 Main parameters of electric motors

电机类型	型号	额定功率/kW	额定电压/V	额定转速/(r·min^{-1})	励磁电压/V	励磁电流/A
直流电动机	Z2-42	2.2	220	1500	220	0.61
直流发电机	Z2-41	2.2	220	1450	220	0.77

3.2 风速变化对发电机端电压的影响

在发电机带额定负载运行的情况下,调节直流电动机的励磁电流,使直流电动机转速变化,以模拟风速变化,当转速变化时发电机端电压的变化曲线如图4所示(其中枢电流标么值 $I_a^* = 0.6$).

从图4可以看出,当风速变化时,如果发电机的负荷和励磁电流均保持不变,发电机的端电压将发生相应变化,输出电压随风速按正比规律变化.比如风速变化使得风力机的转速从额定转速的30%升至额定转速时($I_f = 0.4$ A 曲线),发电机的端电压将由80 V升至294 V.可见,对于基于直流发电机的风力发电系统而言,当风速发生变化时,若负荷不变,则必须调整励磁电流来维持发电机的端电压.

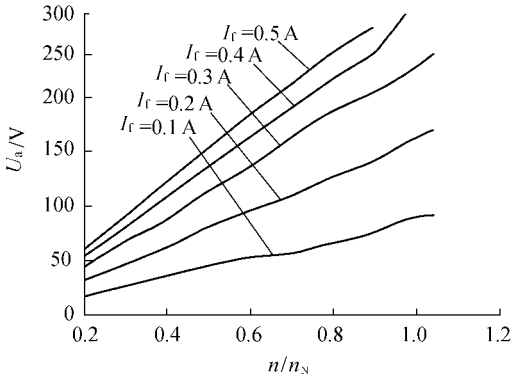

图4 风力机转速变化对发电机端电压的影响

Fig.4 Effect of variation of wind speed on terminal voltage of generator

3.3 通过调节励磁电流使风速变化时保持输出电压恒定

当风速发生变化时,为维持发电机端电压为额定值,所需的励磁电流与风力机转速之间的关系曲线如图5所示.图中,不同的曲线表示发电机带不同负荷,其中输出功率 $P_1 > P_2 > P_3 > P_4$.

从图5可以看出,在一定范围内,当风速变化引起风力机转速变化时,通过调整励磁电流可维持发电机的端电压为额定值.特别是当风速在额定值附近变化时,励磁电流需要的调整量很小,当然,当发电机转速很小时,仅依靠调节励磁

电流来维持电压恒定是比较困难的.

4 结　　语

与当前使用的各种风力发电系统相比，基于直流发电机的风力发电系统具有调节方便、结构简单(可用风力机直接驱动发电机)等突出优点.本文结合风力发电系统和直流发电机的特点，提出基于直流发电机的风力发电系统，讨论了系统的特点和组成，分析了系统的运行控制策略，并在动模实验室搭建了一套模拟系统，进行了相关试验.试验证明了该系统的可行性，特别是对于风速频繁变化和负荷变化引起的电压波动具有很好的调节特性.当然，传统的直流发电机较异步电机结构复杂，但现代新型无刷直流电机使直流电机的结构和性能均有很大的改善，特别是一些新型混合励磁直流发电机将更适用于风力发电系统.

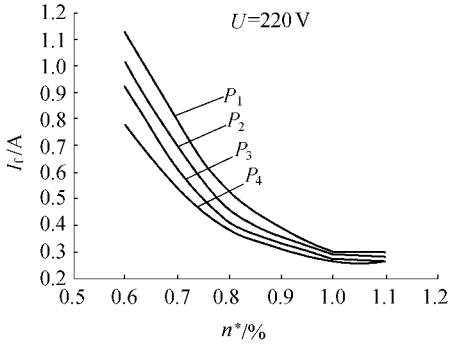

图 5　保持输出额定电压时风力机转速变化与发电机励磁电流的关系

Fig.5　Relationship between rotational speed of wind generator and field current of power generator under constant rated output voltage

参考文献：

[1] 王承煦，张源.风力发电[M].北京：中国电力出版社，2003：82-105.
[2] 刘其辉，贺益康，张建华.交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制及建模仿真[J].中国电机工程学报，2006，26(5)：43-50.
[3] SANTIAGO D R，MALCOLM D M. Control method comparison of doubly fed wind generators connected to the grid by asymmetric transmission lines[J]. IEEE Transaction on Industry Application，2000，36(4)：986-991.
[4] PODDAR G，JOSEPH A，UNNIKRISHNAN A K. Sensorless variable-speed controller for existing fixed-speed wind power generator with unity-power-factor operation[J]. IEEE Transaction on Industry Application，2003，50(5)：1007-1015.
[5] 伍小杰，柴建云.变速恒频双馈风力发电系统交流励磁综述[J].电力系统自动化，2004，28(23)：92-96.
[6] 邱瑞昌，姜学东，闫耀民，等.转子感应电势定向的双馈电机风力发电系统研究[J].电工技术学报，2004，19(4)：40-44.
[7] 潘文霞，陈允平，沈祖诒.风电系统及其电压特性研究[J].河海大学学报：自然科学版，2001，29(1)：88-92.
[8] SODERLUND L，ERIKSSON J-T，SALONEN J，et al. A permanent-magnet generator for wind power applications[J]. IEEE Transactions and Magnetics，1996，32(4)：2389-2392.
[9] 李龙文，王辉，高平，等.永磁电机直接驱动变速恒频风力发电控制技术[J].自动化技术，2004(4)：72-74.
[10] 马小亮.风力发电机组的电气控制[J].电工技术学报，2006，21(6)：11-16.
[11] 马宏忠.感应电机转子绕组故障仿真与实验研究[J].中国电机工程学报，2003，23(4)：107-112.

Research on wind power generation system based on DC generator and its control strategy

MA Hong-zhong，XU Shu-feng，JU Ping，YAN Hui-min，ZHANG Li-min，CHEN Fen，ZHU Tong-liang
(*College of Electrical Engineering*，*Hohai University*，*Nanjing* 210098，*China*)

Abstract：DC generator is convenient in voltage regulation. It can stabilize the output voltage by regulating the field current while the rotational speed of the generator varies in a certain range. Therefore，DC generator is especially suitable for wind power generation system with frequent speed fluctuation. In consideration of the characteristics of wind power system and DC generator，a wind power generation system based on DC generator was developed，and the feasibility and advantage of the system were analyzed theoretically，with emphasis placed on its control strategy. Then，a simulative system of wind power generation system based on DC generator was built in the power system dynamic simulative laboratory. With DC motor taken as the prime mover，the variation of rotational speed of wind generator induced by variation of wind speed was simulated by regulation of the rotational speed of DC motor，and the feasibility of the system was verified by elaborate experiments.

Key words：DC generator，DC motor，wind power generation system，control strategy，experiment simulation