

文章编号: 1005-0523(2007)05-0131-04

变速恒频双馈风力发电技术概述

赵芳, 宋平岗, 张超伟

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 概述了变速恒频双馈电机风力发电的技术, 其中包括双馈电机运行理论、交流励磁用变换器技术、发电机并网技术、有功功率和无功功率独立调节的矢量变换控制技术以及风电系统输出电能质量控制技术等. 分析了当今的热点及进一步的工作, 为大型风力机组的工程实现奠定了一定的理论及技术基础.

关键词: 交流励磁; 变速恒频; 双馈电机; 风力发电

中图分类号: TM614

文献标识码: A

0 引言

风能是一种非常具有开发潜力的可再生能源, 近年来风力发电技术已经得到了各国学者的广泛关注和重视. 风力发电技术中的变速恒频发电方式是当前风力发电技术的发展方向. 双馈风力发电系统是一种较合适的变速恒频方案, 其发电机的定子绕组接入工频电网, 通过改变转子绕组供电电源的频率、幅值、相位、相序来实现变速恒频控制, 该方案的变频器只传递转差功率, 所以其容量可以降低^[1].

交流励磁双馈电机变速恒频风力发电技术包括双馈电机运行理论、交流励磁用变换器技术、发电机并网技术、有功功率和无功功率独立调节的矢量变换控制技术以及风电系统输出电能质量控制技术等.

1 交流励磁变速恒频运行原理^[1]

交流励磁变速恒频发电系统原理性示意图如图1所示. 发电机为三相绕线式异步发电机, 定子绕组并网, 转子绕组外接三相转差频率变频器实现交流励磁. 当发电机转子旋转频率 f_n 变化时, 控制转子励磁电流频率 f_2 确保定子输出频率 f_1 恒定. 设 p 为极对数, 则有: $f_1 = p f_n + f_2$ (1)

在不计铁耗和机械损耗的情况下, 可以得到双馈发电机的能量流动关系

$$\begin{cases} P_{mech} + P_2 = P_1 + P_{cu1} + P_{cu2} \\ P_2 = s \cdot (P_1 + P_{cu1}) + P_{cu2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{mech} —— 转子轴上输入的机械功率

P_2 —— 转子励磁输入的电功率

P_1 —— 定子输出的电功率

P_{cu1} —— 定子绕组铜耗

P_{cu2} —— 转子绕组铜耗

s —— 转差率

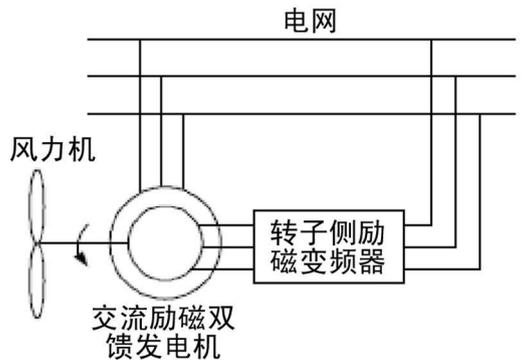


图1 交流励磁双馈电机原理图

在忽略定、转子绕组铜耗条件下, 可近似为

$$P_2 \approx s P_1 \quad (3)$$

由此可知, 当发电机处于亚同步速运行时, $s > 0$, $P_2 > 0$, 变频器向转子绕组送入有功功率; 当发电机处

于超同步速运行时, $s < 0$, $P_2 < 0$, 转子绕组向变频器送入有功功率; 当发电机处于同步速运行时, $s = 0$, $P_2 = 0$, 变频器不向转子绕组提供有功功率。

2 双馈电机交流励磁用变换器技术

交流励磁双馈电机变速恒频风力发电方案中, 其发电机的定子绕组接入工频电网, 通过改变转子绕组电压电流的频率、幅值、相位来实现变速恒频控制, 由于该方案的变频器只处理转差功率, 大大减小了系统对变换器容量的要求, 降低了变换器的成本。变速恒频风力发电机对转子励磁电源有如下要求^[2]:

(1) 为了追踪最大风能并最大限度地减少励磁变频器的容量, 需要发电机在同步速上、下运行, 要求变频器具有能量双向流动的能力;

(2) 为了确保发电质量, 励磁变频器要有优良的输出特性;

(3) 为了防止变频器对电网的谐波污染, 要求变频器有良好的输入特性。

目前适用双馈电机交流励磁用的变换器主要有^[3]: 交-交变换器^[4]、矩阵式变换器^[5]、交-直-交变换器^[6]。其中交-交变换器是一种由反并联的晶闸管相控整流电路构成的交-交直接变换型的变换器。由于这种变换器输出电压中低次谐波含量大, 通过定转子之间的气隙磁场可以耦合到定子端, 严重影响发电质量, 必须进行谐波抑制; 并且这种变换器结构和控制复杂, 限制了其在风力发电领域的应用。矩阵式变换器优点是理论上输出频率不受限制, 可获得正弦波的输入、输出电流, 可在接近于 1 的功率因数下运行, 能量可以双向流动。然而矩阵式变换器因无商品化双向开关器件使其结构和控制变的比较复杂, 并且矩阵式变换器技术还不够成熟, 尚处于小功率实验阶段, 市场并没有商业化产品出现。常规的通用交-直-交变换器采用二极管不控整流, 电网输入侧功率因数低, 电流存在畸变和谐波, 重要的是这种变换器不具备能量双向流动, 只有采取一定的措施才能适合双馈电机交流励磁应用。

目前双 PWM 变换器由于其良好的输入输出性能, 在双馈电机交流励磁风力发电领域得到广泛的应用^[7]。双馈电机交流励磁用双 PWM 变换器实际上是由两个背靠背连接的电压型 PWM 变换器构成的交-直-交(AC-DC-AC)变换器。其中, 靠近电网的称为网侧变换器, 是一个三相电压型 PWM 整流器(AC-DC); 靠近双馈电机转子的称为转子侧变换器(DC-AC)。网侧变换器为转子侧变换器提供恒定的直流电压; 而转子侧变换器实际上是一个电压

源逆变器, 为转子提供交流励磁。

3 双馈电机交流励磁控制技术

3.1 矢量控制^[8]

矢量控制技术是通过电机统一理论和坐标变换理论, 把感应电机的定子电流分解成磁场定向旋转坐标系里的励磁电流分量与与之相垂直的转矩分量, 然后分别对它们进行解耦控制, 可以实现与直流电机一样的控制性能。矢量控制技术是实现变速恒频运行和定子有功功率、无功功率解耦控制的核心。矢量控制系统需要将同步坐标系的 d 轴与某一电磁量的合成矢量相重合, 该矢量称为定向矢量。在双馈电机系统中可供选择的定向矢量有: 电压(定子电压和转子电压)、电流(定子电流和转子电流)、磁链(定转子磁链和气隙磁链)等。变速恒频双馈电机风力发电系统中常用的定向矢量有: 定子磁链、电网电压、转子磁链、气隙磁链、转子电流、转子感应电动势等。其中, 双馈电机的定子磁场定向矢量控制和电网电压定向矢量控制应用最为广泛。由于定子磁场需要实时计算, 对电机参数具有很强的依赖性, 电机参数的不准确和随温度等条件的变化往往造成定向不准确, 从而降低了矢量控制的性能。而电网电压可以直接测量, 电网电压定向矢量控制可以做到定向准确, 且不受电机参数的影响。

3.2 双馈电机的直接功率控制

鼠笼异步电机的直接转矩控制是通过转矩、磁链砰-砰控制确定逆变器的开关状态, 计算简单(在数字控制系统中, 转矩的计算是离散进行的, 为减少转矩的脉动, 与矢量控制相比直接转矩控制对计算速度的要求更高)^[8]。受直接转矩控制的启发, 文献[9]提出了变速恒频双馈电机的直接功率控制。不同与矢量控制, 直接功率控制采用空间矢量的概念来分析双馈电机的数学模型和控制其物理量, 从控制发电机定子侧有功功率和无功率的角度出发, 分析转子侧变频器输出的 6 个非零电压空间矢量和 2 个零电压空间矢量, 分别在亚同步速和超同步速运行状态对转子磁链矢量相位和幅值的影响, 即对电机定子有功功率和无功率的影响, 确定直接功率控制策略所需的电压矢量选择表。双馈电机直接功率控制的具体实现与直接转矩控制相似, 有功功率和无功率分别由两个砰-砰控制器将检测值与给定值进行滞环比较, 输出量按电压矢量选择表确定转子侧变换器的开关状态。该直接功率控制方案无需转子位置检测, 可实现无速度传感器的控制, 目前实验室研究取得了令人满意的控制效果^[9]。

3.3 双馈电机多标量励磁控制策略

从本质上看,双馈电机和其它感应电机一样,是一个非线性多变量强耦合的系统,因此应用非线性控制理论研究其控制策略更能反映问题的本质. Z. Kizeminski 基于微分几何的非线性反馈线性理论提出了感应电机多标量模型及其控制策略^[10],并将其应用到了无速度传感器双馈发电机的交流励磁控制^[11]. 感应电机的非线性反馈线性化是通过非线性状态反馈和非线性变换实现系统的动态解耦和全局线性化. 由于非线性反馈线性化的基础是已知参数的电机模型及电机参数的精确测量或观测,然而在运行中电机参数受温度和磁饱和现象的影响,并且磁链观测的准确性很难保证,这些都影响系统的鲁棒性,目前国内外学者很少采用该模型来实现双馈电机变速恒频发电系统的交流励磁控制^[8].

3.4 非对称状态下双馈电机的交流励磁控制

交流励磁双馈电机变速恒频风力发电系统中发电机定子绕组直接与电网相连,通过对发电机转子侧变流器的控制,产生与电网同频率的电能. 运行过程中,电网电压的不对称、电网的断路故障等都将影响发电机的安全运行,特别是电网发生短路故障时,发电机将产生较高的瞬时电磁转矩和电磁功率,可能造成发电机的机械损坏或热损坏. 因此,发电机非对称条件下的状态分析和控制已成为一个很重要的研究方向^[8]. 目前主要有:定子三相短路状态时数学模型及特性的研究^[12]、以对称三相定子电流为目标的控制策略的研究^[13]和减小发电机定子侧短路故障对交流励磁系统危害措施的研究等.

4 双馈电机风电场的无功功率控制技术

随着变速恒频风力发电机组单机容量的增加和大型风电场的出现,风力发电并网容量不断增加. 因此,为保证并网后电网和风机组的运行效率、安全性和稳定性,风电机组与电网间的控制协调问题显得尤为重要. 目前的研究分为两类:一类是从电网对风电机组的影响出发,研究如何使风电机组在电网出现故障的时候安全运行;另一类从电网的安全出发,一方面研究如何减小风力发电机组并网过程以及正常运行过程对电网的负面影响,另一方面研究如何使风电机组在电网的安全中发挥自身的作用.

目前,变速恒频风电机组并网控制的研究主要是控制策略的分析和设计,包括电压调节策略和频率调节策略. 前者是目前的研究重点,其控制策略的设计依据风电并网容量的大小而不同. 当风电并网容量很小、风电系统输出功率的任何波动都不足以引起电网较大的调整时,控制策略一般以风能的最大利用率为目标,按着风速大小将机组最佳运行状

态分为启动阶段、最大风能追踪阶段、恒功率运行阶段及切除阶段. 风电机组由于风速波动而给电网带来的电压、频率影响都由系统承担^[14].

交流励磁双馈电机变速恒频风力发电技术的一个重要优点是双馈电机可以实现有功无功的独立灵活控制^[15]. 一方面系统通过双馈电机将风能转化为电能向电网输送有功功率;另一方面通过控制转子侧的电压电流,同样也可以实现定子侧向电网发出或者吸收无功功率. 因此,双馈电机变速恒频风力发电系统既可以作为有功电源也可以作为无功电源. 双馈电机风电系统具备一定的无功调节能力,其控制策略是在充分利用风能的基础上使风电机组参与电网的电压调节,在有限范围内分担电网的无功潮流,从而提高风电并网质量和系统的电压稳定性. 随着风电容量的不断增加,如何有效调节风电机组的有功功率和无功功率,使风电机组能合理参与电网电压、频率调整是风力发电技术的一个研究方向^[16].

5 风力发电机组的并网控制技术

随着风力发电机组单机容量的增大,在并网时对电网的冲击也越大. 这种冲击严重时不仅引起电力系统电压的大幅度下降,并且可能对发电机和机械部件(塔架、桨叶、增速器等)造成损坏. 如果并网冲击时间持续过长,还可能使系统瓦解或威胁其它挂网机组的正常运行. 因此,采用合理的并网技术是一个不可忽视的问题^[17].

变速恒频双馈风力发电系统中,发电机与电网之间是一种柔性连接关系,通过对发电机转子电流的控制,就可在变速运行中的任何转速下满足并网条件,实现成功并网,这是此类新型发电方式的优势所在^[18]. 目前,变速恒频风力发电机组的并网方式主要有空载并网,带独立负载并网,孤岛并网^[19]. 其中,空载并网和带独立负载并网2种方式中,转子励磁变换器直接与电网相连,双馈电机定子与电网经过开关相连,而孤岛并网方式则是定子与转子励磁变换器直接连接,再经过开关连接到电网,电网经过预充电变压器与直流母线电容连接.

6 结论

从目前国内外文献可以看出,研究高效低成本的交流励磁变频电路拓扑及其控制策略是双馈电机变速恒频风力发电系统发展的关键. 双馈电机变速恒频风力发电系统发展到今天,已取得了许多非常

有意义得成果,但仍存在一些问题待解决.在今后的-段时间内,关于变速恒频双馈风力发电系统交流励磁的研究应围绕以下几个方面开展:①研究低成本高效的交流励磁变频电路,有效降低风力发电的成本;②研究具有较高动态性能、能适应参数变化、控制算法相对简单、对电源电压不对称有一定适应能力的双馈电机励磁控制策略;③研究高性能的无速度传感器控制策略等.

参考文献:

- [1] 赵仁德,贺益康,黄科元,卞松江.变速恒频风力发电机用交流励磁电源的研究[J].电工技术学报,2004,19(6):1—6.
- [2] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M].机械工业出版社,2003:2—12.
- [3] 苑国锋,柴建云,李永东.变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(8):90—94.
- [4] 赵荣祥,尹强,许大中.磁场定向交流励磁电机调速调功系统研究[J].电工电能新技术,1998,17(1):15—19.
- [5] 黄科元,贺益康,卞松江.矩阵式变换器交流励磁的变速恒频风力发电系统研究[J].中国电机工程学报,2002,22(11):100—105.
- [6] Datta R, Ranganathan V T. Decoupled Control of Active and Reactive Power for a Grid-connected Doubly-fed Wound Rotor Induction Machine without Position Sensors. Proceedings of IEEE IAS Conference, Phoenix, 1999:728—735.
- [7] 刘其辉.变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D].浙江大学博士论文,2005:82—83.
- [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].电力系统自动化,2004,28(23):92—96.
- [9] Datta R, Ranganathan V T. Direct Power Control of Grid-connected Wound Rotor Induction Machine without Rotor Position Sensors[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2001, 16(3):390—399.
- [10] Kizeminski Z. Nonlinear Control of Induction Motor[J]. IFAC 10th World Congress on Automatic Control, Munich, 1987, (3):349—354.
- [11] Kizeminski Z. Sensorless Multiscalar Control of Double Fed Machine for Wind Power Generators[J]. Proceedings of Power Conversion Conference, Osaka, 2002, (1):334—339.
- [12] Vicatoris M S, Tegopoulos J A. Transient State Analysis of a Doubly-fed Induction Generator under Three Phase Short Circuit[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1991, 6(1):62—68.
- [13] Brekken T, Mohan N. A Novel Doubly-fed Induction Wind Generator Control Scheme for Reactive Power Control and Torque Pulsation Compensation under Unbalanced Grid Voltage Conditions[J]. Proceedings of IEEE PESC Conference, A-capulco, 2003, (2):760—764.
- [14] 林成武,王凤祥,姚兴佳.变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术的研究[J].中国工程学报,2003,23(11):122—125.
- [15] Datta R, Ranganathan V T. Variable-speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine: A Comparison with Alternative Schemes[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2002, 17(3):414—421.
- [16] 李晶,方勇,宋家骅,王伟胜.变速恒频双馈风电机组分段分层控制策略的研究[J].电网技术,2005,29(9):15—21.
- [17] 叶杭冶.风力发电机组的控制技术[M].第2版.机械工业出版社,2006.
- [18] 刘其辉,贺益康,卞松江.变速恒频风力发电机空载并网控制[J].中国电机工程学报,2004,24(3):6—11.
- [19] 李建林,赵栋利,李亚西,许洪华.几种适合变速恒频风力发电机并网方式对比分析[J].电力建设,2006,27(5):8—10.

Summerary of Variable Speed And Constant Frequency Doubly-fed Induction Wind Generator

ZHAO Fang, SONG Ping-gang, ZHANG Chao-wei

(School of Electrical and Electronical Information, East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013, China)

Abstract: In this paper, the technical approaches of VSCF DFIG wind scheme are comprehensively investigated, including the discussion on issues such as the VSCF principle of the DFIG, the exchange excitation with converter technology, grid-connected technology, active power and reactive power of the independent regulator transformation vector control technology and wind power system output power quality control technology. The paper also analyzes the current hot and further work, lays the theoretical and technical basis for the engineering development of the large modern wind-power generator.

Key words: AC excitation; VSCF; doubly-fed induction generation; wind generation