

响水风电场风力发电机组的并网控制技术

梅华贵

(中国水电七局有限公司机电安装分局,四川 彭山 620860)

摘要 介绍响水风电场 FD77-1.5MW 风力发电机组的并网控制技术以及双 PWM 变频技术。FD77-1.5MW 风力发电机组采用双馈绕线式异步发电机,使风力发电机在可变的转速下工作,不需要通过大功率变频器就可将全部功率传送出来。采用双馈异步发电机-变频器系统是目前世界上兆瓦级风力发电机组最流行的工作模式。

关键词 双馈绕线式发电机 发电机并网 PWM 变频技术 IGBT 技术 响水风电场

中图分类号 TM712 **文献标识码** B **文章编号** 1006-7647(2010)S2-0025-05

在风力发电机组(以下简称风机)的启动阶段,需要对发电机进行并网前调节以满足并网条件(发电机定子电压和电网电压的幅值、频率、相位均相同),使之能安全地切入电网,进入正常的并网发电运行模式。发电机并网是风力发电系统正常运行的“起点”,其主要要求是避免发电机在并网时的瞬变电流对电网造成过大的冲击。当电网的容量比发电机的容量大很多时(大于 25 倍),发电机并网时的冲击电流可以不予考虑。但风力发电机组的单机容量越来越大,目前已经发展到兆瓦级水平,机组并网对电网的冲击已不能忽视,其不但会引起电网电压的大幅下降,而且还会对发电机组各部件造成损坏。更为严重的是,长时间的并网冲击,会造成电力系统的解列以及威胁其他发电机组的正常运行。因此,必须通过合理的发电机并网技术来抑制并网冲击电流,并网技术已成为风力发电技术中一个不可忽视的环节。

1 FD77 双馈绕线式风力发电机组并网技术

双馈绕线式异步发电机可以使风机在可变的转速下工作,不需要通过大功率变频器将全部功率传送出来。其主要特点为可靠性高、结构紧凑、体积小、重量轻(较永磁式同步发电机)、变频器功率小(只需风机功率的 1/5 左右)、低风力特性(低起动风速、高效率)、低噪音传播,特别是低风速以及电网供电特性都得到了明显改善。

FD77 风机配备有变速发电机-变频器系统,在变桨调节系统的共同作用下,通过变速操作能够保

证能量产出、效率、机械压力和电网电压质量等方面达到最佳状态,系统可最大程度地避免出现过压和峰值负荷。由发电机提供的操作控制装置允许在部分负载范围内只通过最小的波动就能实现均衡的能量输出。在额定负载范围内,能够在几乎恒定的功率下工作。

变速发电机的工作原理是根据双馈绕线式并带有可利用 IGBT(insulated gate bipolar transistor)技术的变频器的发电理念,无论风轮转速如何,系统保证按照与电网匹配的电压和频率持续发电,根据风速大小,风轮转速和功率能够自动进行调节。

在次同步工作模式下(部分负荷范围),发电机向电网输送 100% 的电能。此外,通过发电机的滑环从变频器向风轮提供转差功率。在超同步工作模式下(额定负荷范围),发电机通过定子直接将大约 83% 的功率输送给电网,剩余的功率(大约 17%)由发电机转子通过变频器输送到电网。

FD77 双馈绕线式风力发电机组投入运行时,靠转差率来调整负荷,因此对机组的调速精度要求不高,不需要同步设备和整步操作,只要转速接近同步转速时就可并网。变速发电机提供了在部分载荷条件下相当大的功率波动滤波以及在额定功率工作条件下的几乎完全滤波。这可使风机运转时的噪音明显减小并大幅度降低该结构上的动力载荷。阵风通过风轮的加速得到缓冲而能够平稳地进入电网,传送到电网的电压和频率保持绝对恒定。此外,变频器控制系统能被调节到电网的整个范围并且能够支持较

弱的电网。这是证明在选择电力供应受限时需要系统的决定因素并能在电网连接成本方面得到大幅度改善的优点。并网后需要关注的主要问题如下：

a. 电能质量。根据国家标准,对电能质量有5个方面的要求:电网高次谐波、电压闪变与电压波动、三相电压及电流不平衡、电压偏差、频率偏差。风电机组对电网产生影响主要有高次谐波和电压闪变与电压波动。

b. 电压闪变。风机大多采用软并网方式,但是在启动时仍然会产生较大的冲击电流。当风速超过切入风速时,风机会从额定出力状态自动退出运行。如果整个风电场所有风机几乎同时动作,这种冲击对配电网的影响十分明显,容易造成电压闪变与电压波动。

c. 谐波污染。风电给系统带来谐波的途径主要有2种。一种是风机本身配备的电力电子装置可能带来谐波问题。对于直接和电网相连的恒速风机,软启动阶段要通过电力电子装置与电网相连,因此会产生一定的谐波,不过过程很短。对于变速风机是通过整流和逆变装置接入系统,如果电力电子装置的切换频率恰好在产生谐波的范围内,则会产生很严重的谐波问题,不过随着电力电子器件的不断改进,这个问题也在逐步得到解决。另一种是风机的并联补偿电容器可能和线路电抗发生谐振,在实际运行中,曾经观测到在风电场出口变压器的低压侧产生大量谐波现象。当然与闪变问题相比,风电并网带来的谐波问题不是很严重。

d. 电网稳定性。在风电领域经常遇到的一个的难题是:薄弱的电网短路容量、电网电压的波动和风机的频繁掉线。尤其是越来越多的大型风机并网后,对电网的影响更大。在过去的20年间,风电场主要是采用感应发电机,装机规模较小,与配电网直接相连,对系统的影响主要表现为电能质量。随着电力电子技术的发展,大量新型大容量风机开始投入运行,风电场装机达到可以和常规机组相比的规模,直接接入输电网,与风电场并网有关的电压、无功控制、有功调度、静态稳定和动态稳定等问题越来越突出,这需要对电力系统的稳定性进行计算、评估,要根据电网结构、负荷情况决定最大的发电量和系统在发生故障时的稳定性。国内外对电网稳定性都非常重视,开展了很多关于风电并网运行与控制技术方面的研究。

传统的恒速恒频发电机与电网之间为“刚性连接”,并网操作依赖于机组转速的调节,实现条件严格因而比较困难;交流励磁变速恒频风力发电机与电网之间为“柔性连接”,采用转子交流励磁后,

DFIG(double-fed induction generator)和电网之间构成了“柔性连接”。“柔性连接”是指可根据电网电压、电流和DFIG的转速,通过控制机侧变换器来调节DFIG转子励磁电流,从而精确地控制DFIG定子电压,使其满足并网条件。

根据DFIG并网前的运行状态,DFIG并网方式有2种:①空载并网方式。并网前DFIG空载,调节DFIG的定子空载电压实现并网的方法。并网前DFIG空载,定子电流为零,提取电网的电压信息(包括频率、相位、幅值)作为依据供DFIG控制系统实现励磁调节,使建立的DFIG定子空载电压与电网电压的频率、相位和幅值一致。空载并网方式控制结构如图1所示。②负载并网方式并网前DFIG接独立负载(如电阻),调节其定子电压实现并网的方法。负载并网方式的思路是并网前DFIG负载运行(如电阻性负载),根据电网信息和定子电压、电流对DFIG进行控制,在满足并网条件时进行并网。负载并网方式的特点是并网前DFIG已带有独立负载,定子有电流,因此并网控制所需的信息不但取自于电网侧,同时还取自DFIG定子侧,如图2所示。2种并网方式都允许机组转速在较大的范围内变化,故适用于变速恒频风力发电系统。在2种并网方式控制下,DFIG定子电压能迅速向电网电压收敛,实现较小冲击的并网。

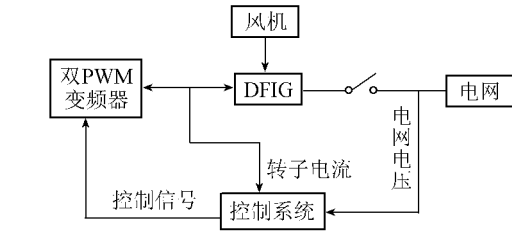


图1 空载并网控制结构

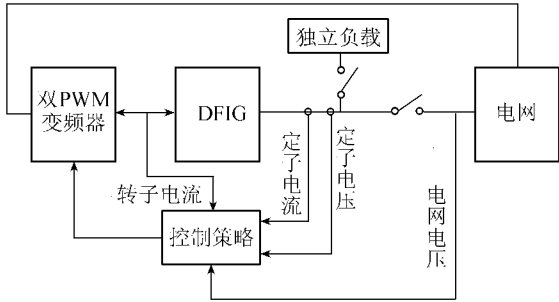


图2 负载并网控制结构

交流励磁变速恒频风力发电机的2种并网控制方式的作用是一致的,调节DFIG的定子电压使其与电网电压在幅值、相位、频率上达到高度吻合,使DFIG安全、顺利地并入电网,降低甚至消除并网冲击电流。

2 种并网方式的差别在于并网前运行方式不同。空载并网方式由于并网前发电机不带负载,不参与能量和转速的调节,为了防止在并网前发电机能量失衡而引起转速失控,应由风机来控制机组的转速。负载并网方式并网前接有负载,发电机可以参与风机的能量控制,主要表现在:一方面改变发电机的负载能调节发电机的能量输出,另一方面在负载一定的情况下,发电机转速的改变能改变能量在发电机内部的分配关系。前一个作用实现了发电机能量的“粗调”,后一个作用是发电机能量的“细调”。可以看出,空载并网方式需要风机具有足够的速度调节能力,对风机的要求比较高。负载并网方式发电机具有一定的能量调节作用,可与风机配合实现转速的控制,降低了对风机调速能力的要求,但控制较为复杂。

2 双 PWM 变频器工作原理

在交流励磁变速恒频风力发电系统中,DFIG 采用电力电子变换器作为转子的励磁电源。DFIG 的运行控制是通过其转子变换器实现的。根据机组的转速调节转子电流的频率,实现变速恒频输出。通过控制转子电流的 m, t 轴分量,实现 DFIG 的 P, Q 解耦控制和最大风能追踪运行。由此可知,高质量的转子励磁变换器是保证 DFIG 乃至整个风力发电系统正常运行的关键。交流励磁变速恒频风力发电系统的运行特点,决定了 DFIG 对励磁变换器特有的要求:①根据 DFIG 的功率关系可知,转子侧的能量流向与 DFIG 运行状态有关,亚同步运行时,能量从电网流向转子,超同步运行时,能量从转子流向电网。因此,作为 DFIG 转子励磁电源的变换器,必须具有能量双向流动的能力。②从 DFIG 的运行原理可知,由于采用了电力电子装置励磁,器件开关动作所形成的转子侧谐波可以通过定、转子的耦合在定子侧被放大,影响 DFIG 输出电能的质量。为了改善风力发电系统输出电能的质量,就必须优化变换器输出性能,消除励磁电压中的谐波成分。此外,由于励磁变换器连接于电网和 DFIG 转子之间,可以视为电网的一种非线性负载,会对电网直接造成谐波污染。因此,必须从调制和控制角度优化变换器的输入、输出特性。③风力发电系统在无功率方面对变换器有一定的要求。一方面,不希望变换器从电网吸收无功功率,另一方面,为了建立额定气隙磁通,DFIG 转子需要吸收一定的无功功率,尤其当 DFIG 向负载输出感性无功功率时,转子需要的无功功率更大。这都需要变换器具备提供一定容量无功功率的能力。

综上所述,交流励磁变速恒频风力发电系统要求励磁变换器首先应是一种“绿色”变换器:谐波污染小,输入、输出特性好;其次应具有功率双向流动的功能;最后还要能在不吸收电网无功功率的情况下具备产生无功功率的能力。目前适用于 DFIG 的励磁变换器主要有以下 3 种。

a. 交—交变换器。这是一种由反并联的晶闸管相控整流电路构成的交—交直接变换形式的变换器。改变 2 组整流器的切换频率,就可以改变输出频率,改变晶闸管的触发控制角,就可以改变输出交流电压的幅值。这种变换器的输出电压是由若干段电网电压拼接而成,因而含有大量的低次谐波,其输入、输出特性一般不理想,但功率可双向流动。通常由 36 管 6 脉波三相桥式电路构成的交—交变换器输入功率因数低,输出电压中低次谐波含量大,不适合用作 DFIG 的励磁电源。72 管结构的 12 脉波变换器虽然降低了谐波含量,但结构和控制复杂。交—交变换电路主要用于大功率的变速恒频水力发电中,并不适合于风力发电的应用。

b. 矩阵式交—交变换器。这是一种交—交直接变换电路,所用的开关器件为全控型,主电路结构简单。其优点是输出频率不受限制,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,能量也可以双向流动。但目前因无商品化双向开关器件而使其电路结构较复杂,控制方法还不成熟。此外,无需电容等无源器件,用作风力发电系统励磁电源时,它通过开关器件的动作向 DFIG 提供无功功率,这方面还缺乏深入的理论研究,尚未使用。

c. 常规交—直—交变换器。通用变频器采用可控整流——PWM 逆变的电路拓扑方案可以使输出电压正弦化,改善了输出特性,但可控整流加电容滤波的变换会造成输入电流畸变、谐波增大、输入功率因数低下,故输入特性较差。此外,这种变流方式不具备能量双向流动的能力,不能用作风力发电系统中 DFIG 的励磁电源。

随着 PWM(脉宽调制)技术和高速自关断型电力电子器件(GTO, IGBT, MOSFET 等)的成熟, PWM 整流技术取得了很大的进展,利用此项技术可获得优良的输入特性。PWM 整流器已不是一般传统意义上的 AC/DC 变换器,当 PWM 整流器从电网吸收电能时,它运行于整流工作状态;当 PWM 整流器向电网输出电能时,它运行于有源逆变工作状态,其网侧电流和功率因数都是可控的。因此, PWM 整流器实际上是一个交、直流侧均可控的四象限运行变换器,既可工作于整流状态,又可工作于逆变状态。为了表明 PWM 整流器的这个特点,可更科学地称为

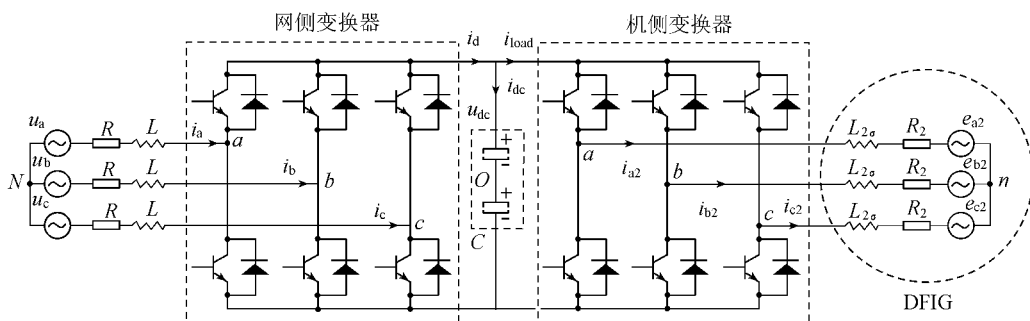


图 3 双 PWM 型变换器主电路结构

PWM 变换器。双 PWM 型变换器的主电路如图 3 所示,图中靠近 DFIG 转子的变换器称为机侧变换器,靠近电网的变换器称为网侧变换器。其中 u_a, u_b, u_c 为网侧变换器交流侧三相电网相电压, i_a, i_b, i_c 为网侧变换器交流侧三相流入电流。 R, L 是进线电抗器的等效电阻和电感, C 为直流环节的储能电容, u_{dc}, i_{dc} 分别是电容电压和电容电流, i_d, i_{load} 分别是流经网侧变换器和机侧变换器直流母线的电流; $L_{2\sigma}, R_2$ 是 DFIG 转子绕组的漏感和等效电阻, e_{a2}, e_{b2}, e_{c2} 是 DFIG 转子三相绕组感应电动势。

由于双 PWM 型变换器具有以下特点,使之能较好地满足交流励磁变速恒频风力发电系统对励磁电源的要求。

a. 双 PWM 型变换器由网侧和机侧 2 个 PWM 变换器组成,各自功能相对独立。网侧变换器的主要功能是实现交流侧输入单位功率因数控制和在各种状态下保持直流环节电压稳定,确保机侧变换器乃至整个 DFIG 励磁系统可靠工作。机侧变换器的主要功能是在转子侧实现 DFIG 的矢量变换控制,确保 DFIG 输出解耦的有功功率和无功功率。2 个变换器通过相对独立的控制系统完成各自的功能,如图 4 所示。值得提出的是,机侧变换器是通过 DFIG 定子磁链定向进行控制,网侧变换器则是通过电网电压定向进行控制。

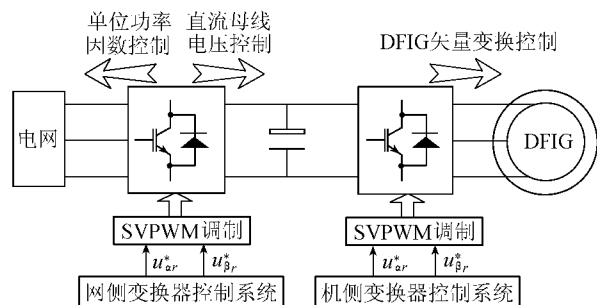


图 4 双 PWM 型变换器中 2 个变换器的功能划分

b. 双 PWM 型变换器的 2 个变换器的运行状态可控,均可以在整流/逆变(或逆变/整流)状态间实现可逆运行,以此实现变换器能量的双向流动。图 5 为

双 PWM 型变换器的运行状态与能量流向的关系。当 DFIG 亚同步运行时,网侧变换器运行在整流状态,机侧变换器运行在逆变状态,能量从电网流向 DFIG 转子;当 DFIG 超同步运行时,网侧变换器运行在逆变状态,机侧变换器运行在整流状态,能流从 DFIG 转子流向电网。

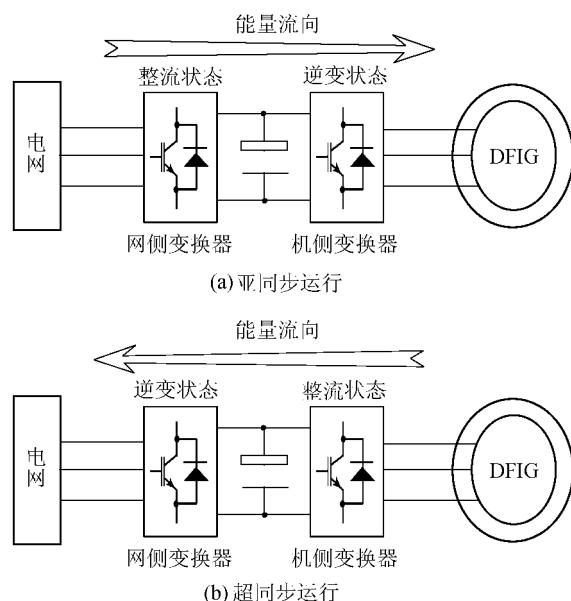


图 5 DFIG 亚、超同步运行时双 PWM 型变换器的工作状态

2 个变换器工作状态的切换是由 DFIG 运行区域决定的。DFIG 亚同步运行时,转子需要从直流环节吸收能量,机侧变换器在磁场定向矢量控制下工作于逆变状态。直流环节的电容由于放电,会导致其两端的直流电压有下降的趋势,为了保持直流电压稳定,在电压定向矢量控制下网侧变换器工作于整流状态;DFIG 超同步运行时,转子需要向直流环节释放能量,机侧变换器在磁场定向矢量控制下转换成整流状态,将 DFIG 转子回馈的交流电能整流成直流后向电容充电,引起直流环节电压的泵升。为了限制直流环节电压的泵升,网侧变换器需要将直流环节的电能返回电网,因此在电压定向矢量控制下转换成逆变状态。可以看出,在磁场定向矢量控制(机侧变换器)和电压定向矢量控制(网侧变换器)的共同作用下,实现了能量的双向流动。

器)的共同作用下,2个变换器的工作状态随着DFIG工作区域的改变而自动切换。

c. 由于双PWM型变换器采用高频自关断器件和空间矢量PWM(SVPWM)调制方法,开关频率高达1~2万Hz,消除了低次谐波,输入、输出特性好,对电网和DFIG造成的影响比较小,在谐波特性上能满足DFIG的励磁要求。

d. 双PWM型变换器具有较强的无功功率控制能力。由于DFIG是异步发电机,空载时转子需要吸收一部分无功功率进行励磁;而当定子输出感性无功功率时,转子需要吸收更多的无功功率。这就需要转子变换器具有产生一定无功功率的能力。

3 结 语

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,而且能使发电机和机械部件损坏。如果并网冲击时间持续过长,还可能使系统瓦解或威胁其他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。本文

介绍了响水FD77双馈绕线式变速恒频风力发电机组的并网控制技术及双PWM变频器的工作原理。

参考文献：

[1] LIMA M L, SILVINO J L. H_{∞} Control for a variable-speed adjustable-pitch wind energy conservation system [C]// Proceeding of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electronic and Computer Engineering. 1999,16(5) 556-561.

[2] BONQERS P M M, et al. Load reduction in a wind conservation system using H_{∞} controller [C]//The 2nd IEEE Conference on CA. Vancouver B C 1993,9 965-970.

[3] KRAAN I, BONGERS P M M. Control of a wind turbine using serval linear robust controller [C]//Proceeding of the 32nd Conference on Decision and Control. San Antonio, Texas, 1993 : 1928-1929.

[4] RONILSON R, LUIZ S, MARTINS F. A multivariable H_{∞} control for wind energy conservation system. 2002.

[5] CHEN J, PATTRON R J. Robust model-based fault diagnosis for dynamic system [M]. London : Kluwer Academic Publishers, 1999.

(收稿日期 2010-09-08 编辑 方字形)

(上接第 24 页)

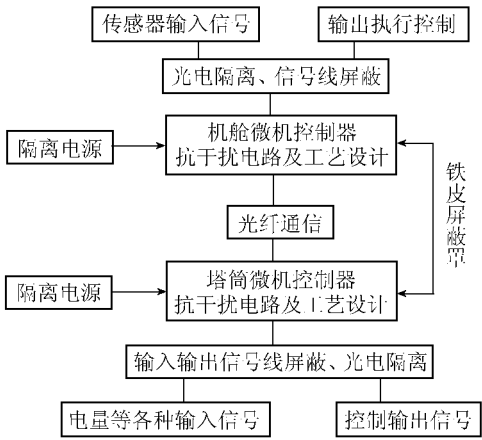


图2 微机控制器抗干扰系统

2 结 语

介绍了响水FD77风力发电机组的安全保护系统。风力机组的安全生产是一项安全系统工程,而控制系统是风力发电机组的重要组成部分,其安全系统作为整个安全系统的一部分需要以系统论、信息论、控制论为基础。纵向从设计、制造、安装、试验、运行、检修,横向从元器件购买、工艺、规程、标准、组织和管理等全面分析最后进行全面综合评价,使风力发电系统中各不安全因素减到最小,达到最佳安全生产状态。

参考文献：

[1] GREGOR E B, PETER M M B. Wind turbine control design and implementation based on experimental models [C]//IEEE Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control. Tucson, Arizona, 1992.

[2] HILLOOWALA R M, SHARAF A M. Modeling, simulation and analysis of variable speed constant frequency wind energy conservation scheme using self excited induction generator [J]. IEEE Trans, 2006 33-37

[3] WU Wei-sheng, DAI Hui-zhu. Application of models of the wind dnergy conversion system to wind power dynamic analysis [J]. IEEE Trans on Energy Conversion. 1998(4) :1406-1411

[4] RAHIM Y H. Controlled power transfer from wind driven reluctance generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 12(4) :12-16

[5] LARSON A. Flicker and slow voltage variations from wind turbines [C]//Proc 17th ICHOQP. Las Vegas, 1996 270-275

[6] JOSE C. A linear dynamic model for asynchronous wind turbines with mechanical fluctuations [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2002, 17(3) 681-687

(收稿日期 2010-09-10 编辑 方字形)