

响水风电场风力发电机组变速恒频风力发电技术

刘

(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 风力发电机组的变速恒频风力发电技术、交流励磁双馈发电机的工作原理、变速恒频风力发电系统的运行区域以及交流励磁双馈发电机的矢量控制技术。

关键词 :风力发电机组 ;变速恒频 ;双馈异步发电机 ;最大风能捕获 ;响水风电场

中图分类号 :TM614 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2010)S2-0009-04

风力发电系统主要有恒速恒频风力发电机系统和变速恒频风力发电机系统 2 大类。恒速恒频风力发电系统一般使用同步电机或者鼠笼式异步电机作为发电机 ,通过定桨距失速控制的风轮机使发电机的转速保持在恒定的数值继而保证发电机端输出电压的频率和幅值恒定 ,其运行范围比较窄 ,只能在一定风速下捕获风能 ,发电效率较低。变速恒频风力发电系统一般采用永磁同步电机或者双馈电机作为发电机 ,通过变桨距控制风轮使整个系统在很大的速度范围内按照最佳的效率运行 ,是目前风力发电技术的发展方向。响水 FD77 风力发电机组就是采用了这种变速恒频双馈感应发电机 ,其调速范围一般在同步速的 50% ~ 150% 之间 ,如果采用普通鼠笼式异步电机系统或者永磁同步电机系统 ,变频器的容量要求与所拖动的发电机容量相当 ,是非常不经济的。双馈异步风力发电系统定子和电网直接相连接 ,转子和功率变换器相连接 ,通过变换器的功率仅仅是转差功率 ,这是各种传动系统中效率比较高的 ,该结构适合于调速范围不宽的风力发电系统 ,尤其是大、中容量的风力发电系统。

1 变速恒频风力发电技术

变速恒频双馈风力发电机组技术是当前国际风力发电的新技术。其采用双馈感应发电机 ,定子接入电网 ,转子绕组由频率、幅值、相位可调的电源供给三相低频励磁电流。该低频励磁电流相对于转子形成一个低速旋转磁场 ,该磁场转速与转子的机械转速相加等于定子磁场的同步转速 ,这样便使发电机定子绕组感应出同步转速的工频电压。当风速变

化时 ,调解转子励磁电压相量 ,使转子机械转速随风速的变化而变化 ,在发生变化的同时 ,转子旋转磁场的转速也应发生相应的变化来补偿发电机转速的变化 ,以达到变速恒频稳定运行的目的。变速风力发电机组的基本结构如图 1 所示。

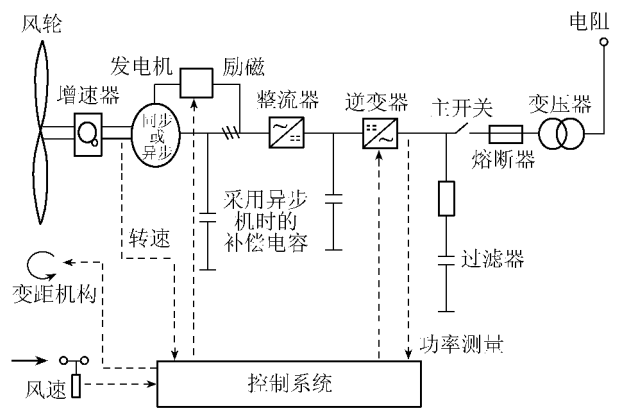


图 1 变速风力发电机组的基本结构

当转子电压幅值和相位改变时 ,由转子电流产生的转子磁场在电机气隙空间的位置产生一个位移 ,从而改变了电机的功率角。因此 ,调节发电机转子励磁电压不仅可以调节风力发电机组定子侧无功功率 ,也可以调节定子侧有功功率。对电网而言 ,它既可输出无功功率起到就地无功补偿的作用 ,又可以吸收过剩无功功率起到调节电压的作用。另外 ,变频器安装于转子侧 ,其容量仅为发电机额定容量的一小部分(约为 20% ~ 30%) ,这也大幅度节省了成本 ,因此 ,变速恒频双馈发电机组的众多优点使得该种机型成为当前风力发电机组的主流机型和研究焦点。

2 交流励磁双馈发电机的工作原理

长期以来,较常采用的发电机是同步发电机,其次是异步发电机。同步发电机采用直流励磁,而异步发电机没有专门的励磁绕组,其磁场由定子励磁电流建立。近来,随着电力电子技术和微机控制技术的发展,双馈型异步发电机(简称DFIG)得到了广泛的重视。DFIG在结构上类似绕线式异步电机,具有定、转子2套绕组。在控制中,DFIG转子一般由接到电网上的变换器进行交流励磁。由于实际上发电机的定、转子都参与了励磁,“双馈”的含义因此而得。DFIG兼有异步发电机和同步发电机的特性,如果从发电机转速是否与同步转速一致来定义,则DFIG应当被称为异步发电机,但DFIG在性能上又不像异步发电机,相反具有很多同步发电机的特点。例如,异步发电机是通过定子由电网提供励磁,本身无励磁绕组,而DFIG与同步发电机一样,具有独立的励磁绕组,异步发电机无法改变功率因数,DFIG与同步发电机一样可调节功率因数。所以DFIG可称为交流励磁同步发电机,或称为同步感应发电机,又可称为异步化发电机。实际上,它是具有同步发电机特性的交流励磁异步发电机,相对于同步发电机,DFIG具有很多的优越性。

同步发电机励磁电流的可调量只有幅值,所以一般只能调节无功功率。而DFIG实行交流励磁,可调量有3个:一是励磁电流幅值;二是励磁电流频率;三是励磁电流相位。由于DFIG励磁电流的可调量比同步发电机多了2个,控制上更加灵活,改变转子励磁电流频率,DFIG可以实现风力发电机组的变速恒频运行。交流励磁不仅可调节无功功率,也可调节有功功率。当发电机吸收无功功率时,往往由于功率角变大使运行稳定度降低。通过调节交流励磁的相位可减小发电机的功率角,使机组的运行稳定性提高,可更多地吸收无功功率,改善目前由于晚间负荷下降、电网电压过高的不利局面。利用矢量变换控制技术,综合改变DFIG转子励磁电流的相位和幅值,可以实现DFIG输出有功功率和无功功率的解耦控制,因此,在功率调节上DFIG较同步发电机有更多的优越性。

由于DFIG具有同步发电机所不具备的变速恒频运行的能力,使它在以下几方面的应用中有明显的优势:

a. 在原动机变速运行场合中,实现高效、优质发电。在很多发电场合中,原动机转速是时刻变化的,如潮汐电站中,水头是变化的,使水轮机转速也变化;风力发电中,随风速的变化风力发电机转速也

会变化。船舶与航空发电机的转速跟着推进器的速度而变化。以往的发电方式中,由于受电网频率和同步发电机特性的限制,发电机转速不能变,迫使原动机在不同水头、不同风力等情况下维持一个转速,使得机组运行效率降低,原动机磨损增大,发电质量下降或被迫降低出力,甚至停机。DFIG可通过调节转子励磁电流的幅值、频率与相位,在原动机速度变化时也可保证发出恒定频率的电能,从而提高了机组的运行效率,降低了机组的磨损,延长了机组的使用寿命。

b. 能参与电力系统的无功功率调节,提高系统稳定性。现代电力系统的发展趋势是单机容量越来越大,送电距离日益增长,输电线电压等级逐渐提高。此外,电网负荷变化率也随社会需求越来越大,经常出现输电线传输有功功率高于其自然功率的工况。这时线路出现过剩无功功率,引起持续工频过电压,这会危及系统的安全运行和增加损耗。目前解决的办法是在线路上加装静止电抗器、调相机或静止无功补偿器,或要求发电机进相运行,这些措施提高了运行的技术和经济成本。由于DFIG可以调节励磁电流的相位,达到改变功率角使发电机稳定运行的目的,所以可通过交流励磁使发电机吸收更多无功功率,参与电网的无功功率调节,解决电网电压升高的弊病,从而提高电网运行效率、电能质量与稳定性。

c. 可实现发电机安全、便捷地并网。采用同步发电机或异步发电机时,并网控制较为复杂,往往需要精确的转速控制和整步、准同步操作。而采用DFIG时,通过对转子实施交流励磁,精确地调节发电机定子输出电压,使其满足并网要求,实现安全而快速的“柔性”并网操作。

从上面的讨论中可以看出,具有变速恒频运行的能力是DFIG一个非常重要的优势。变速恒频的机理可用图2来进一步说明。

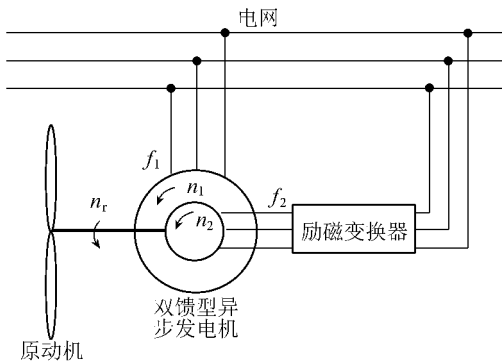


图2 DFIG变速恒频运行原理示意图
图2中 f_1 和 f_2 分别为DFIG定、转子电流的频率

率 n_1 为定子磁场的转速(即同步转速), n_2 为转子磁场相对于转子的转速, n_r 为 DFIG 转子的电转速。由电机学的知识可知, DFIG 稳定运行时定、转子旋转磁场相对静止, 即

$$n_1 = n_2 + n_r \tag{1}$$

因 $f_1 = n_1/60$ 及 $f_2 = n_2/60$ 故有

$$f_2 + \frac{n_r}{60} = f_1 \tag{2}$$

从式(2)可知, 当 n_r 变化时, 可通过调节 f_2 来保持 f_1 恒定, 这是变速恒频运行的原理。当发电机亚同步运行时 $f_2 > 0$, 转子绕组相序与定子相同; 当发电机超同步运行时 $f_2 < 0$, 转子绕组相序与定子相反; 当发电机同步速运行时 $f_2 = 0$, 转子进行直流励磁。

3 交流励磁变速恒频风力发电系统的运行区域

根据不同的风况, 交流励磁变速恒频风力发电机组的运行可以划分为 3 个区域。3 个运行区域的控制手段和控制任务各不相同, 风力机控制子系统和发电机控制子系统的控制重点和协调关系也不同。

第 1 个运行区域是启动阶段, 此时风速从零上升到切入风速。在切入风速以下时发电机与电网相脱离, 风力发电机不能发电运行, 直到风速大于或等于切入风速时发电机方可并入电网。这个区域的主要任务就是实现发电机的并网控制, 在进行并网控制时, 风力发电机控制子系统的任务是通过变桨距系统改变桨叶节距来调节机组的转速, 使其保持恒定或在一个允许的范围内变化。发电机控制子系统的任务则是调节发电机定子电压, 使其满足并网条件, 并在适当的时候进行并网操作。

第 2 个运行区域是风力发电机并入电网并运行在额定风速以下的区域。此时风力发电机获得能量并转换成电能输送到电网。根据机组转速, 此阶段又可分为 2 个区域: 变速运行区和恒速运行区。当机组转速小于最大允许转速时, 风力发电机组运行

在变速运行区。为了最大限度地获取能量, 在这个区域里实行最大风能追踪控制, 机组转速随风速变化相应地进行调节, 确保风力发电机的风能利用系数 C_p 始终保持为最大值 C_{pmax} , 故该区域又称为 C_p 恒定区。在 C_p 恒定区追踪最大风能时, 风力发电机控制子系统进行定桨距控制, 发电机控制子系统通过控制发电机的输出功率来控制机组的转速, 实现变速恒频运行。当机组转速超过最大允许转速时进入恒转速区。在这个区域内, 为了保护机组不受损坏, 不再进行最大风能追踪, 而是将机组转速限制到最大允许转速上。恒转速区的转速控制任务一般是由风力发电机控制子系统通过变桨距控制来实现。

第 3 个运行区域为功率恒定区。随着风速和功率不断增大, 发电机和变换器将达到其功率极限, 因此必须控制机组的功率小于其功率极限。当风速增加时机组转速降低, C_p 值迅速降低, 从而保持功率不变。在功率恒定区内实行功率控制一般也是由风力发电机控制子系统通过变桨距控制实现的。

从上面的讨论可以看出, 随着风速的变化, 风力发电机组运行在不同的区域, 各有不同的控制任务、不同的控制方法。图 3 表示了这些关系。图中 OA 为启动阶段, 对发电机进行并网控制, 发电机无功率输出。AB 段为 C_p 恒定区, 机组随着风速作变速运行以追踪最大风能。BC 段为转速恒定区, 随着风速增大, 转速保持恒定, 功率将增大。CD 段为功率恒定区, 随着风速增大, 控制转速迅速下降以保持恒定的功率输出。3 个运行区域的 C_p 值变化情况如图 4 所示。

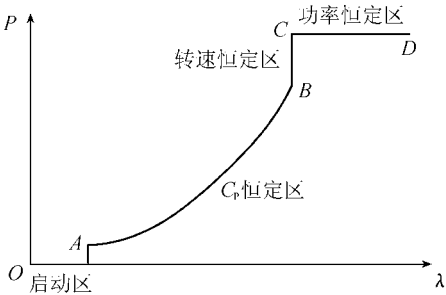


图 3 交流励磁变速恒频风力发电机组的运行区域

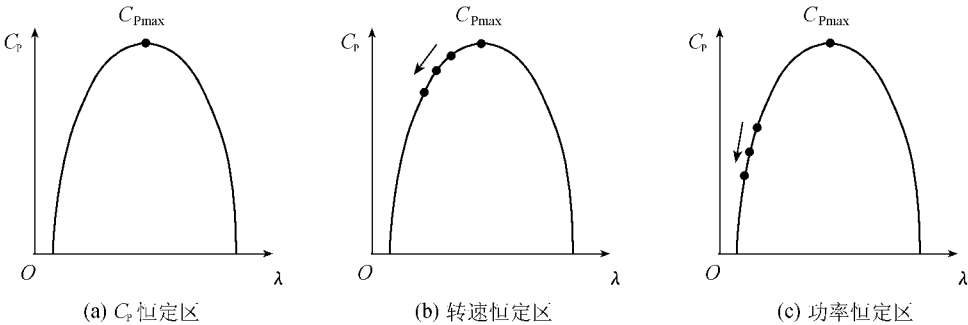


图 4 不同运行区域的 C_p 值变化情况

表 1 是风力发电机组运行区域的比较。

表 1 风力发电机组运行区域的比较

运行区域	控制任务	控制主体	C_p 值
启动区	发电机并网	发电机控制子系统	
C_p 恒定区	追踪最大风能	发电机控制子系统	最大
转速恒定区	限制转速	风力机控制子系统	较小
功率恒定区	限制功率	风力机控制子系统	很小

根据交流励磁变速恒频风力发电机组的运行区域,可将运行控制策略确定为:低于额定风速时实行最大风能追踪控制或转速控制,以获得最大的能量或控制机组转速;高于额定风速时实行功率控制,保持输出稳定。

4 交流励磁双馈发电机的矢量控制技术

德国工程师 F. Blashke 在 20 世纪 70 年代提出的矢量控制原理使得交流调速技术发生了一次质的飞跃,应用在双馈调速上,获得了令人振奋的动静态性能。矢量控制的理论基础是磁场定向原理,通过引入坐标变换,将原来复杂的双馈电机模型等效为 $d-q$ 模型的基础上,对坐标轴的交叉耦合信号进行有效的补偿,可以得到类似直流调速的效果。

双馈系统的矢量控制结构通常将转子交流量分解成有功分量和无功分量,并对之进行闭环控制。通常为了简化双馈矢量控制系统的电磁转矩和其他矢量之间的复杂关系,需要使坐标轴定向在某个矢量上。一般地,在双馈系统可以选择的定向矢量为定子磁链、气隙磁链、定子电压以及转子电流等,其中比较常用的是以定子磁链和气隙磁链为定向矢量的控制方法。

最大风能追踪的机理就是通过控制 DFIG 输出有功功率,控制 DFIG 的电磁阻转矩来实现最佳转速控制。在实际发电运行中,除了要控制 DFIG 的输出有功功率以外,还需控制 DFIG 的输出无功功率,综合称之为 DFIG 的功率控制。DFIG 功率控制的优劣直接影响最大风能追踪的效果以及电网或发电机运行的经济性和安全性。要实现 DFIG 功率控制,首先需要计算 DFIG 参考功率(参考有功功率和参考无功功率)。

交流励磁变速恒频风力发电系统的 DFIG 控制系统采用双闭环结构,外环为功率控制环,内环为电流控制环。在功率环中, P_1^* 和 Q_1^* 分别由参考有功功率计算模型和参考无功功率模型计算得出, P_1^* 和 Q_1^* 与功率反馈值 P_1 和 Q_1 进行比较,差值经 PI 型功率调节器运算,输出定子电流无功分量及有功分量参考指令 i_{m1}^* 和 i_{t1}^* 。根据 i_{m1}^* 和 i_{t1}^* 计算得到转子电流的无功分量和有功分量参考指令 i_{m2}^* 和 i_{t2}^* ,

i_{m2}^* 和 i_{t2}^* 以及转子电流反馈量 i_{m2} 和 i_{t2} 比较后的差值送入 PI 型电流调节器,调节后输出电压分量 u'_{m2} 和 u'_{t2} , u'_{m2} 和 u'_{t2} 加上电压补偿分量 Δu_{m2} 和 Δu_{t2} 就可获得转子电压指令 u_{m2}^* 和 u_{t2}^* , u_{m2}^* 和 u_{t2}^* 经坐标变换后得到 DFIG 转子电压在两相静止 $\alpha_2\beta_2$ 坐标系的控制指令 $u_{\alpha_2}^*$ 和 $u_{\beta_2}^*$ 。根据 $u_{\alpha_2}^*$ 和 $u_{\beta_2}^*$ 进行空间电压矢量 PWM(SVPWM)调制后输出对机侧变换器的驱动信号,实现对 DFIG 的控制。

5 结 语

随着变频技术的发展,变速恒频异步发电技术特别是双馈异步风力发电技术得以快速使用,其单机容量已经达到兆瓦级,迅速成为风电场的主力机型。近 20 年来,在风力风电的变频技术上取得了许多有意义的成果,我国在变频器的产业化上也取得了很大的进展。本文详细介绍了响水 FD77 风力发电机组的变速恒频风力发电技术,相信双馈变速恒频风力发电技术必将在未来相当长的一段时间内在风力发电领域扮演非常重要的角色。

参考文献:

[1] JOHNSON K, PAO L, BALAS M, et al. Stability analysis of an adaptive torque controller for variable speed wind turbines[J]. IEEE Conf on Decision and Control, 2004(4):4016-4021.

[2] JOHNSON K, FINGERSH L, BALAS M, et al. Methods for increasing region power capture on a variable speed wind turbine[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2004, 126(4):1092-1100.

[3] SONG Y, DHINAKARAN B, BAO X. Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms[J]. Journal of Wind Engineering, 2000, 85(3):293-308.

[4] HERNÁN D B, RICARDO J. Dynamical variable structure controller for power regulation of wind energy conversion systems[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2004, 19(12):756-759.

[5] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.

[6] BURTON T, SHARPE D, JENKINS N. Wind Energy Handbook [M]. Manhallan: John Wiley & Sons Ltd, 2005.

(收稿日期:2010-09-06 编辑:高建群)

