

摘 要

随着风力发电机组单机容量越来越大,发电机并网时造成的电流冲击已不能忽视,必须对风力发电机并网技术进行深入研究。本文首先对 DFIG 的运行理论进行了分析,对 DFIG 数学模型、坐标变换及运行特性进行了理论推导,为全文的研究奠定了理论基础。其次根据交流励磁双馈电机矢量控制原理,提出了交流励磁变速恒频风力发电机空载并网同期控制策略,分析了定子电压频率、幅值及相位的控制规律,建立了双馈电机空载模型以及并网同期控制系统的仿真模型。最后仿真和试验结果表明该控制策略能够有效地控制电机定子电压与电网电压在幅值、频率及相位上相一致,具有并网速度快,并列电流冲击小的优点,是一种较为理想的实现方案。

关键词: 交流励磁, 变速恒频, 磁场定向矢量控制, 并网同期控制

ABSTRACT

With the increasing capacity of wind power generators, the current impact on grid connection could not be ignored, thus the grid connection techniques should be investigated in depth. First, this dissertation analyzes DFIG operation theory, including mathematic model of DFIG coordinate transformation, DFIG operation characteristics, which establishes the theoretical foundation for succeeding study. The second, the strategy of grid connection synchronous control of AC-Excited Doubly-Fed generator was put forward based on flux oriented vector control principle of double feed induction generator. The double feed induction generator no-load model and grid-connection synchronous control system model were established by analyzing the control regulation of the station voltage frequency, magnitude and phase. At least, the result of the simulation and experiment showed that the control strategy can effectively control that the stator voltage frequency, magnitude and phase is the same as the electrical network, and is an ideal approach to realize the fast and no-impact-current cutting-in network.

Shen Yan(Power System and its Automation)

Directed by prof. Mi Zengqiang

**KEY WORDS: AC-excitation, VSCF (variable speed constant—frequency),
flux-oriented vector control, grid-connection synchronous control**

声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《变速恒频交流励磁风力发电机组并网同期控制研究》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 沈妍 日 期： 2007.12.31

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保留、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名： 沈妍

导师签名： 李士田

日 期： 2007.12.31

日 期： 2007.12.31

第一章 引言

1.1 风力发电的发展现状及未来发展趋势

面对煤炭、石油等不可再生燃料日益枯竭的威胁，以及日益严峻的能源困局，风能、太阳能等可再生能源已在世界范围内受到重视。其中，风力发电是新能源中技术最成熟、最具规模开发条件及商业化发展前景的可再生能源技术。同时，风能资源又是清洁能源，根据国际绿色和平组织和世界风能协会共同发布的《风力12》预计，2020年世界电力12%将来自风电，将大大减少因火力发电给大气层带来的危害。风能的合理开发和利用可以有效缓解目前能源匮乏及燃料资源给环境带来的污染问题，在远期有可能成为世界上重要的替代能源。

1.1.1 国外风电发展现状

世界上很多国家，尤其是发达国家，已充分认识到风电在调整能源结构、缓解环境污染等方面的重要性，对风电的开发给予了高度重视。德国与西班牙在风力发电方面领先欧洲及世界各国，两国借风力产生的电能占欧盟总风力发电量70%，在本国的电能供应中也占有很大的比重。美国在经历了20世纪90年代的沉寂之后，很快又成为世界最大的风电市场之一。2005年风电仅次于天然气电为美国第二大新能源电力来源，为250万个美国家庭提供电力。丹麦拥有世界上最大的海上风电场，提供了大约20%的本国电力需求。作为发展中国家的印度，从上世纪80年代起就一直积极发展风电，仅2005年新装机容量就达1430MW。图1.1为2005年底风力发电机组累计安装容量的前十大国家的风电装机总量。

根据全球风能委员会(GWEC)的报告，2006年全世界共新增风电装机容量11769MW，较2005年的8207MW增长了43%，创造了新的年度装机纪录。截止2006年底，世界风电装机总容量为59322MW，较2005年同期增长了25%。就新增装机容量而言，美国以2431MW高居首位，其次是德国(1808MW)、西班牙(1764MW)、印度(1430MW)、葡萄牙(500MW)和中国(498MW)。根据丹麦BTM咨询公司预测，2010年之前，全球风电机组安装量的年均增长率将达16.4%，风能市场在今后5年的价值将达到1324亿美元。

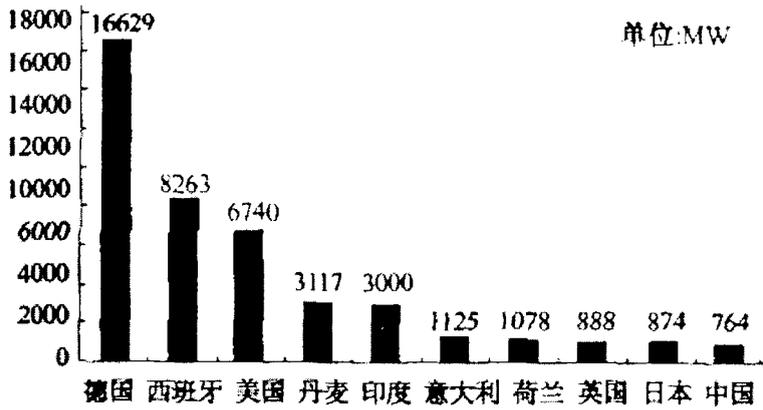


图1.1 至2005年底风力发电机组累计安装容量前十大国家的风电装机总量

伴随着风电技术的开发在世界各国的不断发展，风力发电呈现出以下主要特点：

(1) 装机规模不断扩大。风电行业近5年的平均增长率为15.8%，风电发电量占世界总电量的比例逐年增加，从占总量的不到1%。发展到2005年的7%。

(2) 发电机单机容量不断扩大。作为提高风能利用率和发电效益的有效途径，发电机单机容量从1997年以前的500~750KW主流机型发展到目前3.6MW机组的批量安装。欧美已成功制造7.5MW风电机组，并开始研制10MW以上的巨型风力机。

(3) 海上风电场逐步商业化。海上风电场具有风速高、风力稳定、各种干扰少、发电量大等特点，可以有效利用风电机组的发电容量。2002年丹麦在Horns Rev海域建成了装机容量16万KW的世界上最大的海上风电场，标志着大规模的商业化海上风电场启动。

(4) 风力发电成本不断降低。风电的建设投资成本较高，但营运用费用很低。经过欧美国家近二十年的研发，风电成本已接近火电，如果考虑因化石燃料燃烧造成污染所带来的外部成本，风电已具有与传统常规电源发电竞争的潜力。

(5) 风电结构日趋庞大。随着发电机单机容量的不断扩大，叶片的长度也从20m左右发展到50m以上，使得整体发电机组结构非常庞大。德国REpower公司生产的5MW机组，其叶片长61.5m，旋翼区直径为126m，面积相当于2个足球场。

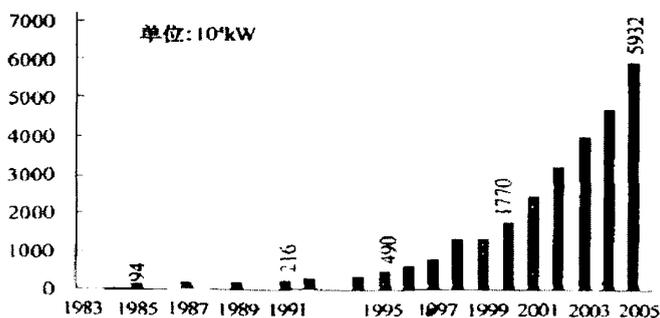


图1.2 近年全世界风力发电装机总量发展情况

1.1.2 国内风电发展现状

自1986年第一个风电场在山东荣城并网发电后，中国依靠政府拨款和外国赠款引进国外风电机组，陆续建起了一批风电场。风电并网技术当时仅处于示范阶段，未引起足够重视。政府从1990年开始意识到风电对改善能源结构、保护环境的重要性风电得到较大发展(表1)。尤其近几年，我国成为继欧洲、美国和印度之后发展风力发电的主要市场之一。

为了增加能源供应、保护环境，实现社会的可持续发展，2005年2月中国通过了《可再生能源法》，建立了国家可持续能源利用的法律框架，确定了风电发展的3项原则：(1)对风电实行保护型固定电价。(2)电网无条件收购风电，价差由参加网分摊。(3)国家财政设立专项资金，支持可再生能源发展。显然，在今后一定时期之内，中国的风电产业将有一个快速增长阶段，成为新能源构成中的一个重要部分。

在大型风力发电机组及其部件的设计制造方面，中国已经基本掌握单机容量750KW及以下风力发电设备的制造技术，并且在整机、叶片、控制系统、发电机、齿轮箱、塔架等方面，都在逐渐形成规模化的制造能力。目前正在研发MW级的大型风电设备，具有自主知识产权的1.2MW直驱型已于2005年研制成功并投入试运行。但是中国的风电设备技术同国际先进水平仍有一定差距，重要设备大部分还要依赖国外进口。

年度	风电装机总量($\times 10^4$ kW)	风电场数量(个)
1998	10.5	19
1999	26.8	24
2000	34.6	26
2001	40.2	27
2002	46.8	32
2003	56.7	40
2004	76.4	43
2005	126.6	61

表1 近年我国(除台湾省外)风电装机总量和风电场的发展

“十五”期间，中国的并网风电得到迅速发展。截至目前，全国风电装机容量达到126万KW，位居世界第十位，亚洲第三位，成为继欧洲、美国和印度之后发展风力发电的主要市场之一。

据介绍，中国风能资源丰富，可开发利用的风能储量约10亿KW，其中，陆地上风能储量约2.53亿KW(陆地上离地10米高度资料计算)，海上可开发和利用的风能储量约7.5亿KW。目前，中国的风力发电还处于初期阶段。2005年，中国新投入运

行的风机容量接近50万KW,年增长率达到60%。据国家发展规划提出的目标,到“十一五”末期,全国风电中装机为1.5MW。

截至目前,中国已建成了44座风电场。

1.1.3 风力发电的未来发展

地球上的煤、石油、天然气等积蓄了亿万年的化石能源,经过数百年的巨大消耗将不可逆转地趋向枯竭。因此,采用新的可再生能源来逐渐取代化石能源已成为全球各国的广泛共识。风能因其资源丰富、开发技术成熟、清洁、无污染等优势成为新能源开发的重点。按照国际能源署(IEA)在《世界能源展望2002》(World Energy Outlook 2002)中的预测,全世界风电装机在2010年、2020年、2030年将分别达到5500万万kW、11200万kW、19500万kW。

我国电力70%来自燃煤火电,对环境造成巨大的压力。随着《可再生能源法》的实施,风能作为清洁的可再生能源将得到大规模开发,风电产业将进入一个前所未有的高速发展时期。根据《可再生能源中长期发展规划》的目标,我国风电机组装机容量到2010年、2015年、2020年将分别达到500万KW、1000万KW、3000万KW,届时风电将占全国总发电装机10亿KW容量的3%。2020年以后,由于化石燃料资源减少、成本增加,风电将更具市场竞争能力。2030年以后,水能资源也将大部分开发完毕,近海风电市场进入大规模开发时期。

总之,风力发电在未来的2030年内将达到一个新的发展高峰,为风能的开发和研究提供了前所未有的机遇和挑战。

1.2 变速恒频风力发电技术^[43-53]

发电机及其控制系统是风力发电系统的另一大核心部分,它负责将机械能转换为电能,风力发电机及其控制系统的运行状况和控制技术,也决定着整个系统的性能、效率和输出电能质量。根据发电机的运行特征和控制技术,风力发电技术可分为恒速恒频(Constant Speed Constant Frequency,简称CSCF)风力发电技术和变速恒频(Variable Speed Constant Frequency,简称VSCF)风力发电技术。

1.2.1 恒速恒频风力发电技术

恒速运行的风力机转速不变,而风速经常变化, C_p 值往往偏离其最大值,使风力机常常运行于低效状态。恒速恒频发电系统中,多采用笼型异步电机作为并网运行的发电机,并网后在电机机械特性曲线的稳定区内运行,如图1.3所示,异步发电机的转子速度高于同步转速。当风力机传给发电机的机械功率随风速而增加时,发电机的输出功率及其反转矩也相应增大。当转子速度高于同步转速3%-5%时达到最大值,若超过这个转速,异步发电机进入不稳定区,产生的反转矩减小,导致

转速迅速升高，引起飞车，这是十分危险的。

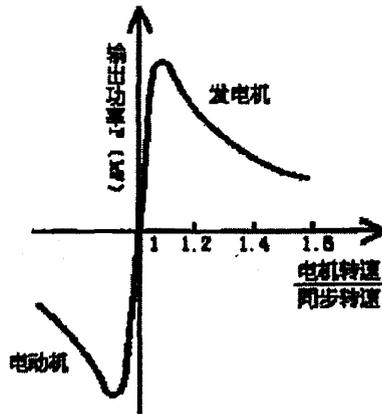


图1.3异步电机输出功率曲线

1.2.2 变速恒频风力发电技术

虽然目前大多数采用异步发电机的风力发电系统属于恒速恒频发电系统但作为一种新型发电技术，变速恒频发电是一种新型的发电技术，非常适用于风力、水力等绿色能源开发领域，尤其是在风力发电方面，变速恒频体现出了显著的优越性和广阔的应用前景^[21, 22, 54]：

(1) 风能是一种具有随机性、爆发性、不稳定性特征的能源。如前述，风力机在不同风速下有一个最佳运行转速，此时对风能的捕获效率最高，而且风施加给风力机的应力最小，所以应控制风力发电机组运行在这个优化的转速下。传统的恒速恒频发电方式由于只能固定运行在同步转速上，当风速改变时风力机就会偏离最佳运行转速，导致运行效率下降，不但浪费风力资源，而且增大风力机的磨损。采用变速恒频发电方式，就可按照捕获最大风能的要求，在风速变化的情况下实时地调节风力机转速，使之始终运行在最佳转速上，从而提高了机组发电效率，优化了风力机的运行条件。

(2) 变速恒频发电可以在异步发电机的转子侧施加三相低频电流实现交流励磁，控制励磁电流的幅值、频率、相位实现输出电能的恒频恒压。同时采用矢量变换控制技术，实现发电机输出有功功率、无功功率解耦(简称P、Q解耦)控制^[32, 43]。控制有功功率可调节风力发电机组转速，实现最大风能捕获的追踪控制；调节无功功率可调节电网功率因数，提高风力发电机组及电力系统运行的动、静态稳定性。

(3) 采用变速恒频发电技术，可使发电机组与电网系统之间实现良好的柔性连接，比传统的恒速恒频发电系统更易实现并网操作及运行^[22, 54]。变速恒频发电技术的诸多优点使其受到了人们的广泛关注，它越来越多地被应用到风力发电中。自上世纪90年代开始，国外新建的大型风力发电系统大多采用变速恒频方式，特别是

MW级以上的大容量风电系统。随着风力发电技术的广泛应用，变速恒频风力发电方式将得到更多的重视，应用范围将不断扩大。

变速恒频发电风力发电系统有多种形式^[44-46]：交-直-交风力发电系统、磁场调制发电机系统、交流励磁双馈型异步发电系统、无刷双馈型发电机系统、爪极式发电机系统和开关磁阻发电机系统。这些系统有的是通过发电机与电力电子装置相结合实现变速恒频，有的是通过改造发电机本身结构而实现变速恒频。它们具有各自的特点，适用于各种不同场合。本文研究对象是采用双馈型异步发电机的交流励磁变速恒频风力发电系统。

(3) 交流励磁双馈型异步发电系统^[49, 54]

系统如图1.4所示，该系统采用转子交流励磁的双馈型异步发电机，双馈型异步发电机的定子并到电网上，转子通过励磁变换器和进线电抗器与电网相连。

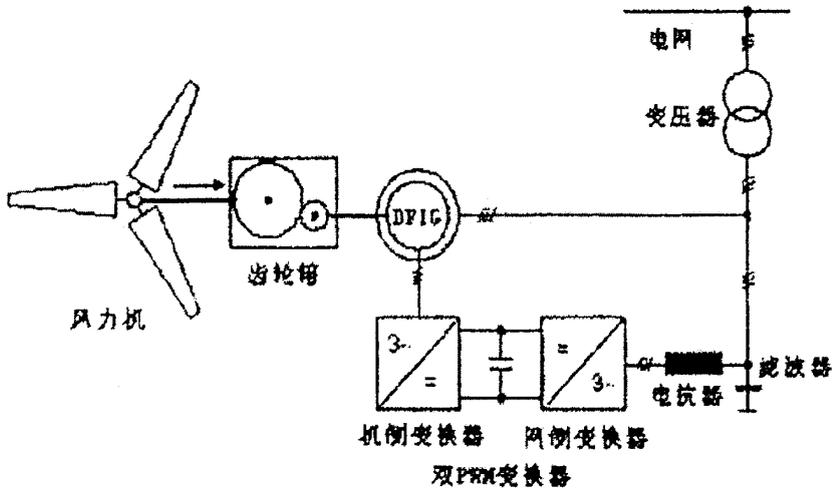


图1.4采用双馈型异步发电机的交流励磁变速恒频风力发电系统

当风速变化引起发电机转速变化时，控制转子电流的频率，可使定子频率恒定，即应满足

$$f_1 = p_n f_m + f_2 \tag{1.2.1}$$

式中： f_1 为电网频率；

f_m 为转子机械频率， $f_m = n_m / 60$ ， n_m 为发电机机械转速；

p_n 为电机的极对数；

f_2 为转子电流频率。

发电机的机械转速和电转速之间的关系为 $n_r = p_n n_m$ 或 $\omega_r = p_n \omega_m$ 。当发电机的转速 n_r 小于同步转速 n_1 时，处于亚同步状态，此时励磁变换器向发电机转子提供交流励磁，发电机由定子发出电能给电网；当发电机的转速 n_r 大于同步转速 n_1 时，处于超同步状态，此时发电机同时由定子和转子发出电能给电网，励磁变换器的能量流向逆向；当 $n_r = n_1$ 时，处于同步状态，此时发电机作为同步电机运行， $f_2 = 0$ ，励磁

变换器向转子提供直流励磁。

由式(1.2.1)可知,当发电机的转速 n_m 变化时,即 $p_n f_m$ 变化时,若控制 f_2 相应变化,可使 f_1 保持恒定不变,实现了变速恒频控制。

由于这种变速恒频控制方案是在转子电路实现的,流过转子电路的功率是由发电机的转速运行范围所决定的转差功率,仅为定子额定功率的一部分,因此图中所示的双向励磁变换器的容量仅为发电机容量的一小部分,成本将会大大降低。交流励磁双馈型异步发电机的控制方案除了可实现变速恒频控制、减小变换器的容量外,在磁场定向矢量控制下还可实现P、Q解耦控制,对电网而言可起到无功补偿的作用。

双馈型异步发电机对转子侧励磁变换器的主要要求是输入、输出特性好,功率可以双向流动。图1.4所示系统采用的是双PWM型交-直-交变换器,它由两个PWM型变换器组成:靠近发电机的称为机侧变换器,靠近电网的称为网侧变换器。双PWM型变换器输入输出特性好,能量可以双向流,是双馈型异步发电机较理想的一种励磁变换器^[35]。

1.3 课题的研究现状

1.3.1 变速恒频风电机组控制技术的研究现状

变速恒频发电机系统是20世纪90年代开始兴起的一种机组形式。其主要优点在于通过风轮的变速运行在很宽的风速范围内保持近乎恒定的最佳叶尖速比,从而获得比恒速风力机高得多的运行效率。国内外许多科研单位都开展了对发电机及控制系统的研究,并取得了大量的成果。如,文献[6]在分析变速恒频风力发电系统变桨距控制研究现状的基础上,基于自抗扰控制理论设计风力发电系统变桨距控制器。建立了风机及变桨距机构模型,以转速为量侧输入设计扩张状态观测器,观测系统状态及风速扰动,利用前馈环节予以补偿;同时,根据状态偏差配置非线性结构,抑制转速偏差。有效改善变了风力发电系统桨距控制效果。文献[7]分析了双馈发电机定子磁场定向矢量控制原理,采用基于速度外环的并网发电控制策略和一种不依赖风机特性和空气密度的最大风能捕获的算法,构建了110KW变速恒频双馈风力发电模拟平台,实现了变速恒频双馈风力发电机的有功、无功功率的前馈解耦控制和最大功率点跟踪控制。文献[8]针对采用余弦交点法控制的交-交变频器,通过对输出电压波形的基本结构进行分析,找出了谐波的内在规律,并以有源滤波为基础,提出了谐波同步消除方法,滤波效果明显,有效提高了发电机输出的电能质量。文献[2]基于变速恒频双馈风力发电系统能实现最大风能追踪,在定子磁链定向的转子励磁控制策略基础上,提出在最大风能追踪的过程中,采用速度模式控制的系统动态特性优于采用电流模式控制的动态特性,并给出了状态空间解释。文献

[10]进行了关于电控系统基本功能与机组控制策略的设计,提出了兆瓦级变速恒频风电机组电控系统硬件与软件的总体实现方案。文献[11]基于空间电压矢量闭环控制的投切控制策略,在PI调节器控制的基础上提出了自适应谐振调节器与PI调节器并行控制的控制策略,有效抑制了定子电压幅值的波动,使定子电压具有较好的控制响应。文献[12]在分析双馈型异步发电机数学模型和磁场定向矢量变换控制的基础上,提出了变速恒频风力发电机的有功、无功功率解耦控制策略。文献[13]讨论了变速恒频风力机组变桨距机构在低于额定风速阶段和高于额定风速阶段的不同控制策略。文献[14]使用模糊逻辑推理系统来确定低风速时的发电机参考转速,保证低风速时机组获得最大风能利用系数。文献[15]按照发电机惯例建立了以暂态电势为变量的风力发电机组的数学模型并对风力发电机组运行进行了模拟。文献[16]分析了风力机运行特性及其最佳风能利用原理,提出了在实验室条件下模拟风力机运行特性的一种实用方法。文献[17]根据自抗扰控制器的原理,设计了风力发电系统的最大风能捕获控制器。

1.3.2 变速恒频风电机组并网运行特性的研究现状

风能具有间歇性和不可调度性的特点,大量风电并网后会对电力系统的安全稳定运行带来一定的影响^[18,19]。此外,我国目前采用较多的异步发电机系统在发出有功功率的同时还要从系统吸收无功功率,给电网造成一定的负担。因此,研究并网风电场的运行特性以及改善其运行的稳定性是风力发电技术中的重要问题^[20-23]。

目前国内已有不少学者对风电并网作了大量的研究,并取得了很多成果。如,文献[21]建立了变速恒频风力发电机空载并网仿真模型,文献[25]研究了超导储能装置SMES对并网风电场运行稳定性的改善。文献[9]针对双馈电机定子电压控制进行研究,对比分析了空载并网方式、带负载并网方式以及“孤岛”并网方式,并指出了各自的优缺点。文献[4]依据电磁场基本理论,将电机电磁场的有限元计算与外部电路相结合,建立了双馈感应发电机的场路耦合数学模型,并计算出空载运行时不同转速下发电机的特性曲线。文献[5]通过对风力机的风功率特性分析,阐明了为最大限度地利用风能风力发电系统的主流控制方式是变速恒频的控制方式,对交流整流子、电磁滑差联接、转差频率励磁、磁场调制、交-直-交变换、双绕组双速异步、高滑差异步以及开关磁阻等几种常见的变速恒频风力发电系统的并网控制进行了介绍及对比分析。文献[3]介绍了一种计算风电场功率极限的方法,确保风电场的装机容量不超过系统最大负荷,保证电网稳定。文献[20]介绍了风力机组并网技术和风力发电机并网及运行试验,分析了风力发电机组并网对电网电能质量的影响,探讨了引起波动和闪变的机理及闪变测量模型,及电压波动与闪变的抑制方法。

1.4 本文的选题背景及研究内容

1.4.1 本文选题背景

风能具有非常强的随机性和间歇性，随着风电装机容量的增加及在电网中所占比例的扩大，对电网的安全性、稳定性运行提出了更高的要求。由于风能的波动性大，不仅对电网质量产生影响，而且降低了风力发电机组自身的使用效率，使风力发电设备不可避免地遇到反复停机或者达不到本身的最佳运行状态，为此采用先进的、可靠性安全性高的风力发电技术是非常有必要的。变速恒频风力发电技术正是克服了风力发电中的上述缺陷，因此研究和讨论该技术及相关的控制原理对推动我国风力发电事业的发展有着重要意义。

1.4.2 课题研究内容

变速恒频双馈发电机组能够良好运行的前提条件是机组能够顺利并网，然而随着风力发电机组单机容量越来越大，发电机并网时造成的电流冲击已不能忽视；因此必须对风力发电机并网技术进行深入研究。本文在研究交流励磁变速恒频风力发电理论（包括变速恒频的运行机理、交流励磁发电机的矢量变换控制）的基础上，提出了交流励磁变速恒频发电机空载并网同期控制策略，具体有以下几方面：

1、以交流励磁双馈异步发电机为研究对象，介绍了变速恒频的风力发电技术及交流励磁风力发电机的并网技术的研究现状，给出了风力发电机变速恒频的基本原理。

2、对双馈型变速恒频风力发电机进行了矢量控制模型分析。双馈型变速恒频风力发电机是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统。若用常规的控制方法将十分复杂，而且效果难以令人满意，而矢量控制可以简化电机内部各变量间的耦合关系，简化控制。

3、介绍了交流励磁变速恒频风力发电机的空载并网同期控制策略，建立了发电机在空载时的数学模型，在此基础上运用MATLAB软件中搭建了电机模型，并给出了MATLAB的仿真结果。

4、在DFIG转子励磁电源的研究中，分析了双PWM型变换器的特点，讨论了网侧变换器的控制方法。

由于时间仓促，论文中错误和不足之处在所难免，希望各位专家、学者给予批评指正。

第二章 双馈型变速恒频风力发电系统的基本理论

2.1 风力机的基本理论

2.1.1 风力机的运行特性

风力机是风力发电系统中能量转换的首要部件,它用来截获流动空气所具有的动能,并将风力机叶片迎风扫掠面积内的一部分动能转换为机械能。它不仅决定了整个风力发电系统的有效输出功率,而且直接影响机组的安全、稳定、可靠运行,是风力发电系统中关键部件之一。

由风力机的空气动力学知,风力机的输入功率为

$$P_v = \frac{1}{2}(\rho S_w v)v^2 = \frac{1}{2}\rho S_w v^3 \quad (2.1.1)$$

式中: ρ 为空气密度,一般为 1.25 kg/m^3 ;

S_w 为风力机迎风扫掠面积;

v 为空气进入风力机扫掠面以前的风速(即未扰动风速)。

由于,通过风轮旋转面的风能不是全部都能被风轮吸收利用,其风能利用系数 C_p 为

$$C_p = \frac{\text{风力机输出的机械功率}}{\text{输入风轮面内的功率}} = \frac{P_o}{P_v} \quad (2.1.2)$$

所以风力机的输出机械功率为

$$P_o = C_p P_v = \frac{1}{2}\rho S_w v^3 C_p = \frac{\pi}{8}\rho D_w^2 v^3 C_p \quad (2.1.3)$$

式中: D_w 为叶片的直径。

风能利用系数 C_p 是表征风力机效率的重要参数,它与风速、叶片转速、叶片直径、桨叶节距角均有关系。为了便于讨论 C_p 的特征,定义风力机的另一个重要参数叶尖速比 λ , 即叶片的叶尖线速度与风速之比:

$$\lambda = R_w \omega_w / v = \pi R_w n_w / (30v) \quad (2.1.4)$$

式中: R_w 为叶片的半径, $R_w = 0.5D_w$;

ω_w 为叶片旋转的角速度;

n_w 为叶片的转速, $n_w = 30/(\pi\omega_w)$ 。

值得说明的是,因为风力机通过一增速比为 N 的变速齿轮箱驱动发电机,则发电机转速与风力机转速的关系为 $\omega_m = N\omega_w$ 或 $n_m = Nn_w$ 。

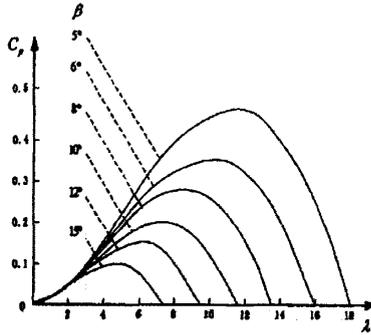


图 2.1 变桨距风力机性能曲线

风力机可分为变桨距和定桨距两种。变桨距风力机的特性通常由一族风能利用系数 C_p 的无因次性能曲线来表示。如图 2.1 所示。风能利用系数 C_p 是叶尖速比 λ 的函数（表示为 $C_p(\lambda)$ ），同时也是桨叶节距角 β 的函数（表示为 $C_p(\beta)$ ），综合起来可表示为 $C_p(\lambda, \beta)$ 。从图中可以看出，当桨叶节距角 β 逐渐增大时， $C_p(\lambda)$ 曲线将显著缩小。

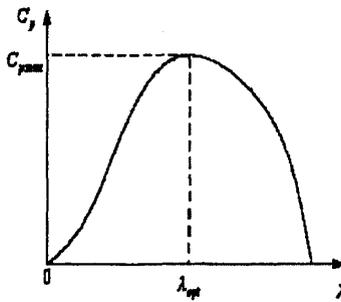


图 2.2 定桨距风力机性能曲线

如果保持桨叶节距角 β 不变，风能利用系数 C_p 只与叶尖速比 λ 有关系，则可用一条曲线描述 $C_p(\lambda)$ 特性，这就是定桨距风力机的性能曲线，如图 2.2 所示。在定桨距情况下，叶尖速比 λ 决定着风能利用系数 C_p 的大小。对于一个特定的风力机，具有唯一使得 C_p 最大的叶尖速比，称之为最佳叶尖速比，用 λ_{opt} 表示，对应的 C_p 为最大风能利用系数，用 $C_{p,max}$ 表示。从图 2.2 可以看出，当叶尖速比大于或小于最佳叶尖速比 λ_{opt} 时，风能利用系数 C_p 都会偏离最大风能利用系数 $C_{p,max}$ ，引起机组效率的下降。根据贝茨理论，风能利用系数的最大值为 0.593。一般的水平轴风力机， $C_p = 0.2 \sim 0.5$ ，同时考虑到在风场中风力机会受到风速与风向波动的影响，实际的 $C_{p,max}$ 大致在 0.4 左右，很难超过 0.5。

变桨距风力机是定桨距风力机的改进和发展，但定桨距风力机特性是变桨距风力机特性的基本情况，具有代表意义，是讨论最大风能追踪的依据，因此定桨距风力机及其特性是本文研究的重点。从上面的分析可知，在某一固定的风速 v 下，随着风力机转速 n_w 的变化， C_p 的值会相应地变化，从而使风力机输出的机械功率 P_o 变

化,也就是说,转速 n_w 变化,会导致风力机捕获风能的能力发生变化。根据图 2.2 和(2.1.3)式,可以导出不同风速下风力机的输出功率和转速的关系,如图 2.3 所示。图中不同风速下风力机的功率—转速曲线组成了曲线簇,每条功率—转速曲线上最大功率点的连线称为风力机的最佳功率曲线(P_{opt} 曲线)。风力机运行在 P_{opt} 曲线上将会输出最大功率 P_{max} ,其值为

$$P_{max} = k_w \omega_w^3 \tag{2.1.5}$$

式中 $k_w = 0.5 \rho S_w (R_w / \lambda_{opt})^3 C_{p,max}$ 。

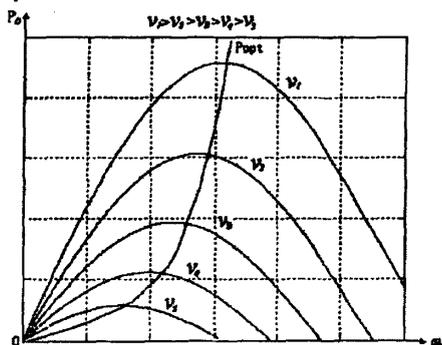


图 2.3 定桨距风力机功率转速

从(2.1.5)式知,对于特定的风力机,其最佳功率曲线是确定的,最大功率和转速成三次方关系。定桨距风力机的特点可总结如下:

- (1)在某一固定的转速下,风速 v 越大,风提供的输入功率越大,风力机输出的机械功率也越大;
- (2)在某一固定的风速下,风力机在某一转速时可以输出最大的功率,转速较小或较大时风轮机输出功率都会降低,该点与图 2.2 中 $\lambda = \lambda_{opt}$ 、 $C_p = C_{p,max}$ 点相对应,此时的转速称为最佳转速;
- (3)风力机最佳转速是相对于某一确定的风速来说的,随着风速的增加,风力机最佳转速也增加。

2.2 双馈型异步发电机的优势

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(Doubly-Fed Induction Generator,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、转子两套绕组。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，可调量有三个：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两个，控制上更加灵活：改变转子励磁电流频率，DFIG可以实现变速恒频运行；改变转子励磁电流的相位，使转子电流产生的转子磁场在气隙空间上有一个位移，改变了发电机电势相量与电网电压相量的相对位置，调节了发电机的功率角，所以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：

(1) 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，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。

(2) 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。

(3)可实现发电机安全、便捷的并网^[21, 26]

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2.4来进一步说明。

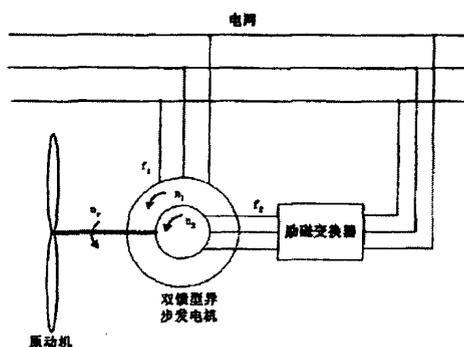


图2.4 DFIG变速恒频运行原理

图2.4中 f_1 、 f_2 分别为DFIG定、转子电流的频率， 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

$$n_1 = n_2 + n_r \quad (2.2.1)$$

因 $f_1 = n_1/60$ 及 $f_2 = n_2/60$ ，故有

$$\frac{n_r}{60} + f_2 = f_1 \quad (2.2.2)$$

从上式可知，当发电机转速 n_r 变化时，可通过调节转子励磁电流频率 f_2 保持定子输出电能频率 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。

2.3 双馈型异步发电机的数学模型

在讨论DFIG在三相静止坐标系和两相同步速旋转坐标系下的数学模型时，定子绕组采用发电机惯例，定子电流以流出为正；转子绕组采用电动机惯例，转子电流以流入为正。为了便于分析问题，假定如下：

(1) 忽略磁饱和和空间谐波，设三相绕组对称，均为星形连接，磁动势沿气隙正弦分布；

(2) 不考虑温度对电机参数的影响；

(3) 转子绕组均折算到定子侧，折算后每相绕组匝数相等。

2.3.1 三相静止 abc 坐标系下的数学模型^[27-30]

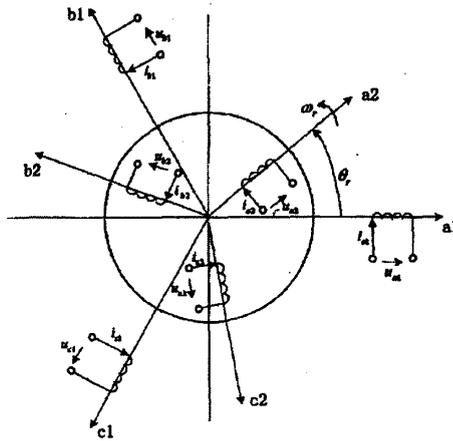


图2.5 DFIG的物理模型

进行绕组折算后，DFIG的绕组等效为图2.5的物理模型。根据规定的正方向，可得到DFIG在三相静止坐标系下的数学模型。

1. 电压方程

三相定子绕组电压方程

$$\begin{cases} u_{a1} = -R_1 i_{a1} + \frac{d\psi_{a1}}{dt} \\ u_{b1} = -R_1 i_{b1} + \frac{d\psi_{b1}}{dt} \\ u_{c1} = -R_1 i_{c1} + \frac{d\psi_{c1}}{dt} \end{cases} \quad (2.3.1)$$

三相转子绕组电压方程

$$\begin{cases} u_{a2} = R_1 i_{a2} + \frac{d\psi_{a2}}{dt} \\ u_{b2} = R_1 i_{b2} + \frac{d\psi_{b2}}{dt} \\ u_{c2} = R_1 i_{c2} + \frac{d\psi_{c2}}{dt} \end{cases} \quad (2.3.2)$$

式中： $u_{a1}, u_{b1}, u_{c1}, u_{a2}, u_{b2}, u_{c2}$ 为定、转子相电压瞬时值，下标“1”、“2”分别表示定子，转子；

$i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}, i_{a2}, i_{b2}, i_{c2}$ 为定、转子相电流瞬时值；

$\psi_{a1}, \psi_{b1}, \psi_{c1}, \psi_{a2}, \psi_{b2}, \psi_{c2}$ 为定、转子各相绕组磁链；

R_1, R_2 为定、转子绕组等效电阻。

写成矩阵形式为：

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + d\boldsymbol{\psi} \quad (2.3.3)$$

其中：

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= [u_{a1}, u_{b1}, u_{c1}, u_{a2}, u_{b2}, u_{c2}]^T \\ \mathbf{i} &= [i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}, i_{a2}, i_{b2}, i_{c2}]^T \\ \boldsymbol{\psi} &= [\psi_{a1}, \psi_{b1}, \psi_{c1}, \psi_{a2}, \psi_{b2}, \psi_{c2}]^T \\ \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

d 为微分算子， $d = d/dt$ 。

2. 磁链方程

矩阵形式的磁链方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_1 \\ \boldsymbol{\psi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11} & \mathbf{L}_{12} \\ \mathbf{L}_{21} & \mathbf{L}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_1 \\ \mathbf{i}_2 \end{bmatrix} \quad (2.3.4)$$

式中：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_1 &= [\psi_{a1}, \psi_{b1}, \psi_{c1}]^T \\ \boldsymbol{\psi}_2 &= [\psi_{a2}, \psi_{b2}, \psi_{c2}]^T \\ \mathbf{i}_1 &= [-i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}]^T \\ \mathbf{i}_2 &= [-i_{a2}, i_{b2}, i_{c2}]^T \\ \mathbf{L}_{11} &= \begin{bmatrix} L_{m1} + L_{l1} & -0.5L_{m1} & -0.5L_{m1} \\ -0.5L_{m1} & L_{m1} + L_{l1} & -0.5L_{m1} \\ -0.5L_{m1} & -0.5L_{m1} & L_{m1} + L_{l1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\mathbf{L}_{22} = \begin{bmatrix} L_{m2} + L_{l2} & -0.5L_{m2} & -0.5L_{m2} \\ -0.5L_{m2} & L_{m2} + L_{l2} & -0.5L_{m2} \\ -0.5L_{m2} & -0.5L_{m2} & L_{m2} + L_{l2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{21} = \mathbf{L}_{12}^T = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos\theta_r \end{bmatrix}$$

式中： L_{m1} 是与定子绕组交链的最大互感磁通对应的定子互感；

L_{m2} 是与转子绕组交链的最大互感磁通对应的转子互感，有 $L_{m1} = L_{m2}$ ；

L_{l1}, L_{l2} 分别为定、转子漏电感；

θ_r 为转子的位置角(电角度)，参见图 2.2。对 θ_r 取微分得到转子电角速度 ω_r ：

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

3. 转距方程

$$T_e = 0.5p_n [i_2^T \frac{d\mathbf{L}_{21}}{d\theta_r} \mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_1^T \frac{d\mathbf{L}_{12}}{d\theta_r} \mathbf{i}_2] \quad (2.3.5)$$

式中 T_e 为发电机的电磁转距。

4. 运动方程

$$T_i - T_e = \frac{J_g}{p_n} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{D_g}{p_n} \omega_r + \frac{K_g}{p_n} \theta_r \quad (2.3.6)$$

式中： T_i 为风力机提供的拖动转距；

J_g 为发电机的转动惯量；

D_g 为与转速成正比的阻转距阻尼系数；

K_g 为扭转弹性转距系数。

方程 (2.3.3)~(2.3.6)是 DFIG 在三相静止坐标系下的数学模型。可以看出模型方程中有一些系数随定、转子的夹角和转速变化，使得描述电机行为特性的数学模型是一组非线性时变系数的微分方程组，显然这样的非线性时变系数微分方程组是难以求解的，这就造成了双馈电机的动态数学模型十分复杂，进行分析和求解都十分困难，一般需要采用坐标变换的方法对双馈电机的数学模型加以变换，使其分析和求解变得相对容易一些。坐标变换的方法很多，根据交流励磁双馈发电机的特点，选用以恒定同步转速 ω_1 转动的两相旋转坐标系 dq 中的变量替代三相静止坐标系上的真实变量，通过坐标变换能得到两相同步旋转坐标系下的数学模型。

2.3.2 两相同步速旋转 dq 坐标系下的数学模型^[35, 41]

坐标变换的思想是：将一个三相静止坐标系里的矢量，通过变换用一个两相静

止坐标系或两相旋转坐标系里的矢量表示，在变换时可采取功率不变或幅值不变的原则。

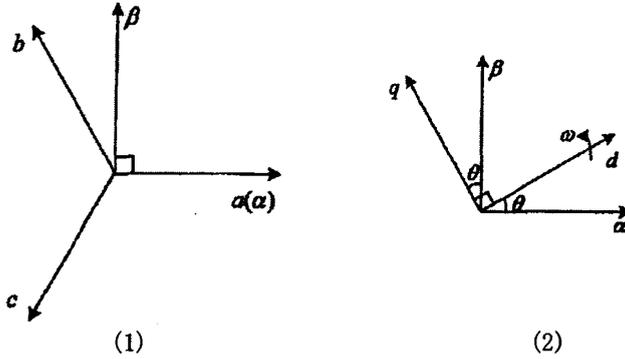


图 2.6 坐标变换关系示意图

空间坐标位置关系如图 2.6 所示。经常采用的基本坐标变换关系有：

(1) 三相静止 abc 坐标系与两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系之间的变换关系

由三相静止 abc 坐标系到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系的变换关系可用变换矩阵(恒功率变换)来表示。

$$C_{3s/2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3.7)$$

由两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系到三相静止 abc 坐标系的变换矩阵(恒功率变换)则为

$$C_{2s/3s} = C_{3s/2s}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3.8)$$

(2) 两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系与两相 ω 速旋转 dq 坐标系之间的变换关系

由两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系到两相旋转 dq 坐标系的变换矩阵为

$$C_{2s/2r} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.3.9)$$

其中， θ 为 d 轴与 α 轴之间的夹角： $\theta = \omega t$ 。

由两相旋转 dq 坐标系到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系的变换矩阵为

$$C_{2r/2s} = C_{2s/2r}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.3.10)$$

(3) 三相静止 abc 坐标系与两相旋转 dq 坐标系之间的变换关系

根据 (1)、(2)，可得由三相静止 abc 坐标系到两相旋转 dq 坐标系的变换矩阵为

$$C_{3s/2r} = C_{2s/2r} C_{3s/2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.3.11)$$

同理可得到从两相旋转 dq 坐标系到三相静止 abc 坐标系的变换矩阵为

$$C_{2r/3s} = C_{2s/3s} C_{2r/2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin(\theta - 30^\circ) & \sin(\theta + 60^\circ) \\ -\sin(\theta + 30^\circ) & \sin(\theta - 60^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.3.12)$$

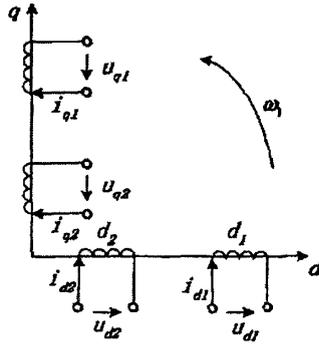


图 2.7 dq 轴下 DFIG 的物理模型

如果 $\omega = \omega_1$ (ω_1 为同步角速度)，则内坐标系即为两相同步速旋转坐标系。利用上述的坐标变换关系，将三相静止坐标系下 DFIG 数学模型中的电压、电流、磁链和转矩变换到 dq 坐标系下，可得到两相同步速旋转坐标系下的 DFIG 的数学模型，变换后 DFIG 的绕组等效为图 2.7 的物理模型。由于 dq 坐标轴相互垂直，两相绕组之间没有磁的耦合，DFIG 的数学模型得到很大的简化。同步旋转 dq 坐标系下的 DFIG 的数学模型表示如下。

1. 电压方程

定子绕组电压方程

$$\begin{cases} u_{d1} = -R_1 i_{d1} - p\psi_{d1} + \omega_1 \psi_{q1} \\ u_{q1} = -R_1 i_{q1} - p\psi_{q1} - \omega_1 \psi_{d1} \end{cases} \quad (2.3.13)$$

转子绕组电压方程

$$\begin{cases} u_{d2} = R_2 i_{d2} + p\psi_{d2} - \omega_s \psi_{q2} \\ u_{q2} = R_2 i_{q2} + p\psi_{q2} + \omega_s \psi_{d2} \end{cases} \quad (2.3.14)$$

式中： $u_{d1}, u_{q1}, u_{d2}, u_{q2}$ 分别为定、转子电压的 d 、 q 轴分量；

$i_{d1}, i_{q1}, i_{d2}, i_{q2}$ 分别为定、转子电流的 d 、 q 轴分量；

$\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ 为 dq 坐标系相对于转子的角速度。

2. 磁链方程

定子磁链方程

$$\begin{cases} \psi_{d1} = L_1 i_{d1} - L_m i_{d2} \\ \psi_{q1} = L_1 i_{q1} - L_m i_{q2} \end{cases} \quad (2.3.15)$$

转子磁链方程

$$\begin{cases} \psi_{d2} = -L_m i_{d1} + L_2 i_{d2} \\ \psi_{q2} = -L_m i_{q1} + L_2 i_{q2} \end{cases} \quad (2.3.16)$$

式中： $\psi_{d1}, \psi_{q1}, \psi_{d2}, \psi_{q2}$ 分别为定、转子磁链的 d 、 q 轴分量；

$L_m = 1.5L_{m1}$ 为 dq 坐标系下同轴定、转子绕组间的等效互感；

$L_1 = L_{l1} + 1.5L_{m1}$ 为 dq 坐标系下两相定子绕组的自感；

$L_2 = L_{l2} + 1.5L_{m2}$ 为 dq 坐标系下两相转子绕组的自感。

将 (2.3.15)、(2.3.16) 代入 (2.3.13) (2.3.14) 可得到电压与电流之间的关系：

$$\begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} \\ u_{d2} \\ u_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1 - L_1 p & \omega_1 L_1 & L_m p & -\omega_1 L_m \\ -\omega_1 L_1 & -R_1 - L_1 p & \omega_1 L_m & L_m p \\ -L_m p & \omega_s L_m & R_2 + L_2 p & -\omega_s L_2 \\ -\omega_s L_m & -L_m p & \omega_s L_2 & R_2 + L_2 p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} \quad (2.3.17)$$

3. 转矩方程

$$T_e = p_n (\psi_{q1} i_{d1} - \psi_{d1} i_{q1}) = p_n L_m (i_{d1} i_{q2} - i_{q1} i_{d2}) \quad (2.3.18)$$

4. 运动方程与三相静止坐标系下一致。

2.4 本章小结

本章总结了 DFIG 的特点及其在变速恒频风力发电中的优势，说明了 DFIG 实现变速恒频运行的原理。当发电机转速发生变化时，可通过调节转子励磁电流频率 f_2 从而保持定子输出电能频率恒定。介绍了坐标变换理论，推导了 DFIG 的数学模型，为交流励磁变速恒频风力发电系统的运行特性分析和控制方法研究奠定了理论基础。

第三章 交流励磁变速恒频风力发电机并网同期控制系统

3.1 风力发电机并网技术的概述

在风力发电机组的启动阶段，需要对发电机进行并网前调节以满足并网条件（发电机定子电压的幅值、频率、相位和电网电压的幅值、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”，其主要的要求是限制发电机在并网时的瞬变电流，避免对电网造成过大的冲击。当电网的容量比发电机的容量大得多时（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。比较严重的后果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，甚至还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的一个不可忽视的环节。

3.2 交流励磁变速恒频风力发电机矢量控制模型分析

众所周知，DFIG 是一个高阶、多变量、非线性、强耦合的机电系统，采用近似单变量处理的传统标量控制无论在控制精度还是动态性能上远不能达到要求。为了实现 DFIG 的高性能控制，应采用磁场定向的矢量变换控制技术^[40, 45, 46]。

矢量变换控制一般用于交流电动机的高性能调速控制上，是交流传动调速系统实现解耦控制的核心技术。它通过电机统一理论和坐标变换理论，把交流电动机的定子电流分解成磁场定向旋转坐标系中的励磁分量与与之相垂直的转矩分量。分解后的定子电流励磁分量和转矩分量不再具有耦合关系，对它们分别控制，就能实现交流电动机磁通和转矩的解耦控制，使交流电动机得到可以和直流电动机相媲美的控制性能。

DFIG 定子绕组直接连在无穷大电网上，可以近似地认为定子的电压幅值、频率都是恒定的，所以 DFIG 矢量控制一般选择定子电压或定子磁场定向方式。本文将从分析变速恒频风力发电机组的运行特点出发，把磁场定向矢量控制技术移植到 DFIG 的并网控制上。

我们将同步速旋转 dq 坐标系中的 d 轴定在 DFIG 定子磁链方向，并将磁场定向后的坐标系重新命名为 mt 坐标系，如图 3.1 所示。图中 $\alpha_1\beta_1$ 为定子两相静止坐标系， α_1 轴取定子 a 相绕组轴线正方向； $\alpha_2\beta_2$ 为转子两相坐标系， α_2 取转子 a 相绕组轴线正方向。 $\alpha_2\beta_2$ 坐标系相对于转子静止，相对于定子绕组以转子角速度 ω_r 逆时针方

定子磁链定向时, 定子磁链矢量 ψ_1 与 m 轴方向一致, 因此, m 、 t 轴上的磁链分量分别为: $\psi_{m1} = \psi_1$ 、 $\psi_{t1} = 0$ 。由于 DFIG 定子侧频率为工频, 定子电阻远小于定子绕组电抗, 可以忽略, 即 $R_1 = 0$, 因而 DFIG 感应电动势近似等于定子电压。因为感应电动势矢量 e_1 落后 ψ_1 90° , 故 e_1 和定子电压矢量 u_1 (并网后的定子电压矢量 u_1 等于电网电压矢量 u_s) 位于 t 轴的负方向, 从而有 $u_{m1} = 0, u_{t1} = -u_1$, 其中 u_1 为定子电压矢量 u_1 的幅值, 当 DFIG 连接到理想电网上时 u , 为常数。将 $u_{m1} = 0, u_{t1} = -u_1$, 代入 (3.2.5) 式可得

$$\begin{cases} P_1 = -u_1 i_{t1} \\ Q_1 = -u_1 i_{m1} \end{cases} \quad (3.2.6)$$

由 (3.2.6) 式可知, 在定子磁链定向下, DFIG 定子输出有功功率 P_1 、无功功率 Q_1 分别与定子电流在 m 、 t 轴上的分量 i_{t1} 、 i_{m1} 成正比, 调节 i_{t1} 、 i_{m1} 可分别独立调节 P_1 、 Q_1 。

因为对于 P_1 、 Q_1 的控制是通过 DFIG 转子侧的变换器进行的, 应推导转子电流、电压和 i_{t1} 、 i_{m1} 之间的关系。

将 $R_1 = 0$ 、 $u_{m1} = 0$ 、 $u_{t1} = -u_1$ 及 $\psi_{m1} = \psi_1$ 、 $\psi_{t1} = 0$ 代入 (3.2.1) 式和 (3.2.3) 式有

$$\begin{cases} \psi_1 = \frac{u_1}{\omega_1} \\ p\psi_1 = 0 \end{cases} \quad (3.2.7)$$

$$\begin{cases} i_{m2} = \frac{1}{L_m} (L_1 i_{m1} - \psi_1) \\ i_{t2} = \frac{L_1}{L_m} i_{t1} \end{cases} \quad (3.2.8)$$

由 (3.2.7) 式可知, 并入理想电网后, DFIG 定子磁链将保持恒定, 其值为定子电压与同步角速度之比。

由于 DFIG 定子磁链矢量 ψ_1 超前于定子端电压矢量 u_1 90° 空间角度, 若 u_1 相角为 θ_u , 则 ψ_1 的相角 θ_s 为

$$\theta_s = \theta_u + 90^\circ \quad (3.2.9)$$

ψ_1 的幅值 ψ_1 可根据 (3.2.7) 式求出。

3.3 交流励磁变速恒频风力发电机并网同期控制

3.3.1 发电机并网同期控制策略

目前双馈电机并网控制策略有 3 种, 空载并网控制、带负载并网控制和孤岛并网控制^[9]。

带负载并网方式的特点是：并网前DFIG已经带有独立负载，定子有电流，因此并网控制所需要的信息不仅取自于电网侧，同时还取自于DFIG定子侧。负载并网方式发电机具有一定的能量调节作用，可与风力机配合实现转速的控制，降低了对风力机调速能力的要求，但控制较为复杂。

孤岛并网控制方式是：能量首先在网侧变流器、电机侧变流器以及双馈电机之间流动，使它们共同组成一个孤岛运行方式^[56]。当定子侧电压的幅值，频率和相位都与电网侧相同时闭合断路器，使发电机并入电网。然而研究过程中发现，发电机定子输出电压不可能控制在十分稳定的状态，当发电机定子输出电压幅值的给定值和电网电压完全一致时，系统会出现较大的振荡现象且不易稳定。因此必须使发电机定子输出电压幅值的给定值稍高于电网电压的幅值。这种控制方法虽然在并网后定子侧几乎没有出现大的冲击电流，但是调节时间长。

空载并网方式并网前发电机不带负载，不参与能量和转速的控制，调节DFIG的定子空载电压，使其与电网电压在幅值、频率及相位上相一致，因此本文将同期控制策略运用在空载并网控制上。该控制策略可迅速地控制发电机定子电压满足并网条件，具有并网过程平稳、电流冲击较小的优点。

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。控制原理如图3.2所示。

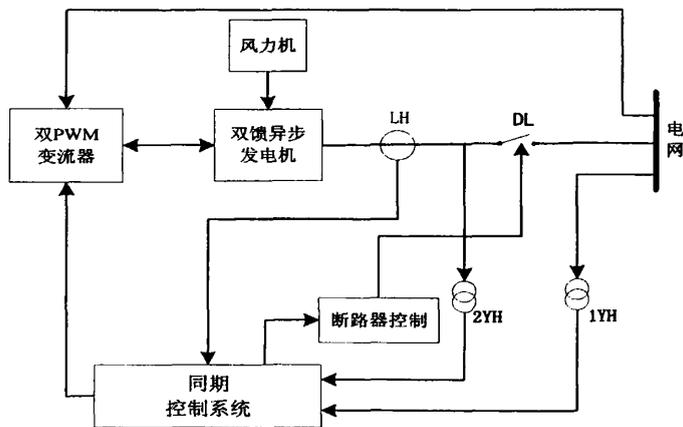


图 3.2 并网同期控制结构图

图 3.2 是同期控制原理框图，分为同期控制和断路器合闸控制两部分。同期并网控制系统是一个闭环自动控制系统，调速同期装置的输入为发电机电压和系统电压。它自动检测 ΔU 、 Δf 和 $\Delta\delta$ 实时控制发电机的励磁电流，使发电机电压的幅值、频率和相角分别跟踪电力系统电压的幅值、频率和相角，控制目标是使 ΔU 、 Δf 和 $\Delta\delta$ 三者同时为零。

3.3.2 双馈型异步电机的空载数学模型

为了研究 DFIG 空载并网控制的原理，需要推导 DFIG 的空载数学模型。空载时 DFIG 定子各分量电流为零，即 $i_{m1} = i_{t1} = 0$ 。将 $i_{m1} = i_{t1} = 0$ 代入 (3.2.1) ~ (3.2.4)，得到 DFIG 空载时的电压方程和磁链方程。

定子电压方程

$$\begin{cases} u_{m1} = -p\psi_{m1} + \omega_1\psi_{t1} \\ u_{t1} = -p\psi_{t1} + \omega_1\psi_{m1} \end{cases} \quad (3.3.1)$$

转子电压方程

$$\begin{cases} u_{m2} = R_2 i_{m2} + p\psi_{m2} - \omega_s \psi_{t2} \\ u_{t2} = R_2 i_{t2} + p\psi_{t2} + \omega_s \psi_{m2} \end{cases} \quad (3.3.2)$$

定子磁链方程

$$\begin{cases} \psi_{m1} = -L_m i_{m2} \\ \psi_{t1} = -L_m i_{t2} \end{cases} \quad (3.3.3)$$

转子磁链方程

$$\begin{cases} \psi_{m2} = L_2 i_{m2} \\ \psi_{t2} = L_2 i_{t2} \end{cases} \quad (3.3.4)$$

将 (3.2.3) 式代入 (3.2.1) 式、将 (3.2.4) 式代入 (3.2.2) 式分别得到

$$\begin{cases} u_{m1} = (-R_1 - L_1 p)i_{m1} + \omega_1 L_1 i_{t1} + L_m p i_{m2} - \omega_1 L_m i_{t2} \\ u_{t1} = -\omega_1 L_1 i_{m1} - (R_1 + L_1 p)i_{t1} + \omega_1 L_m i_{m2} + L_m p i_{t2} \end{cases} \quad (3.3.5)$$

$$\begin{cases} u_{m2} = -L_m p i_{m1} + \omega_s L_m i_{t1} + (R_2 + L_2 p)i_{m2} - \omega_s L_2 i_{t2} \\ u_{t2} = -\omega_s L_m i_{m1} - L_m p i_{t1} + \omega_s L_2 i_{m2} + (R_2 + L_2 p)i_{t2} \end{cases} \quad (3.3.6)$$

将 $i_{m1} = i_{t1} = 0$ 代入 (3.3.5)、(3.3.6) 式得到 DFIG 空载时定、转子电压与电流之间的关系为

$$\begin{cases} u_{m1} = L_m p i_{m2} - \omega_1 L_m i_{t2} \\ u_{t1} = \omega_1 L_m i_{m2} + L_m p i_{t2} \end{cases} \quad (3.3.7)$$

$$\begin{cases} u_{m2} = (R_2 + L_2 p)i_{m2} - \omega_s L_2 i_{t2} \\ u_{t2} = \omega_s L_2 i_{m2} + (R_2 + L_2 p)i_{t2} \end{cases} \quad (3.3.8)$$

空载时 DFIG 的电磁转矩为零，即

$$T_e = 0 \quad (3.3.9)$$

将上式代入 (2.3.6) 式，得 DFIG 空载时的运动方程为

$$T_l = \frac{J_s}{p_n} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{D_s}{p_n} \omega_m + \frac{K_s}{p_n} \theta_m \quad (3.3.10)$$

(3.3.1)~(3.3.4)式、(3.2.7)~(3.2.10)式即为DFIG空载时的数学模型。根据DFIG空载时的数学模型，可以推导基于磁场定向的DFIG空载并网控制策略。采用定子磁场定向方式，坐标变换如图2.1所示，各符号的含义如前所述。由第二章的分析可知，在定子磁链定向和忽略定子电阻的情况下，具有以下的关系

$$\begin{cases} \psi_{m1} = \psi_1 \\ \psi_{i1} = 0 \end{cases} \quad (3.3.11)$$

$$\begin{cases} u_{m1} = 0 \\ u_{i1} = -u_1 \end{cases} \quad (3.3.12)$$

因此，(3.3.1)式可化为

$$\begin{cases} p\psi_1 = 0 \\ u_1 = \omega_1\psi_1 \end{cases} \quad (3.3.13)$$

即空载并网时，DFIG定子磁链保持恒定，其值为定子电压与同步角速度之比： $\psi_1 = u_1 / \omega_1$ 。同理(3.2.3)、(3.2.4)式可简化为

$$\begin{cases} \psi_1 = -L_m i_{m2} \\ i_{i2} = 0 \end{cases} \quad (3.3.14)$$

$$\begin{cases} \psi_{m2} = L_2 i_{m2} \\ \psi_{i2} = 0 \end{cases} \quad (3.3.15)$$

将(3.2.15)式代入(3.2.2)式得

$$\begin{cases} u_{m2} = (R_2 + L_2 p) i_{m2} \\ u_{i2} = \omega_s L_2 i_{m2} \end{cases} \quad (3.3.16)$$

3.3.3 交流励磁变速恒频风力发电机并网同期控制原理

根据(3.3.13)~(3.3.16)式，可确定交流励磁变速恒频风力发电机空载并网同期控制策略，其控制原理如图3.3所示。

第四章 交流励磁用双 PWM 变频器研究

4.1 双 PWM 型励磁变换器的特点

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 d 、 q 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。为改善风力发电系统输出电能质量,主要途径就是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,还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^[30, 49]

1. 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交-交直接变换型式的变换器。改变两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。

2. 矩阵式交-交变换器

这也是一种交-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，尚未实用。

3. 常规交-直-交变换器

通用变频器采用不控整流-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，但不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，不改造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 PWM 变换器。文献[35]中介绍了由两个背靠背(Back-to-Back)的 PWM 变换器组成的双 PWM 型变换器及其在变速恒频风力发电系统中的应用, 如图 1.4 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。

双 PWM 型变换器的主电路如图 4.1 所示, 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。

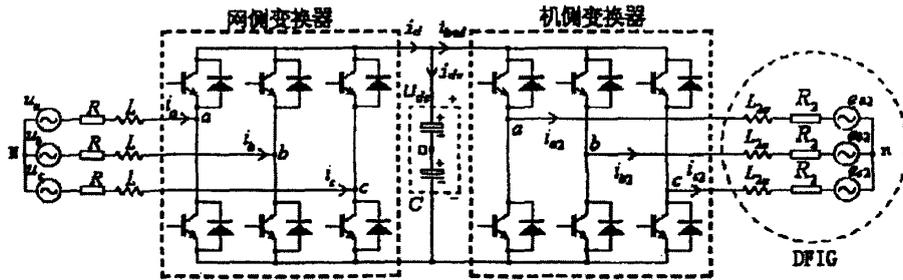


图 4.1 双 PWM 型变换器主电路结构图

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。

1. 双 PWM 型变换器由网侧和机侧两个 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。两个变换器通过相对独立的控制系统完成各自的功能，如图 4.2 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的，网侧变换器则是通过电网电压定向进行控制的。

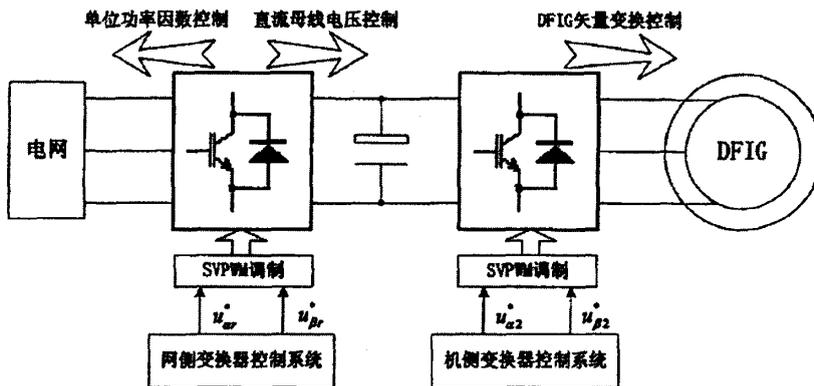


图 4.2 双 PWM 型变换器中两个变换器的功能划分

2. 双 PWM 型变换器的两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 4.3 表示了双 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。

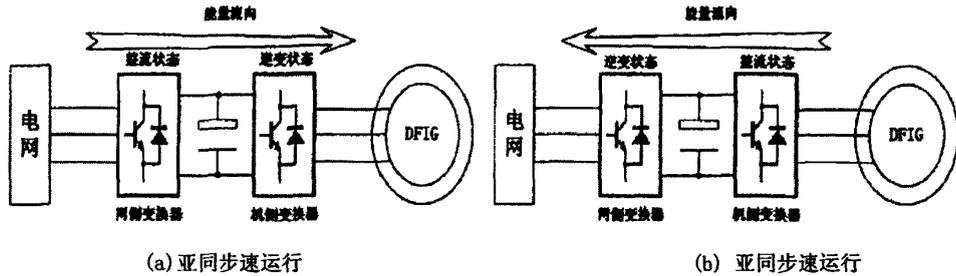


图 4.3 DFIG 亚、超同步运行时双 PWM 型变换器的工作状态

两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，两个变换器的工作状态随着 DFIG 工作区域的改变而自动切换。

3. 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 10K~20KHz，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。

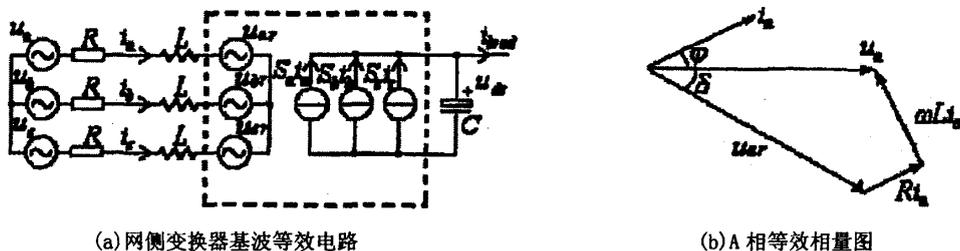
4. 双 PWM 型变换器具有较强的无功功率控制能力。由于 DFIG 是异步发电机，空载时转子需要吸收一部分无功功率进行励磁；而当定子输出感性无功功率时，转子需要吸收更多的无功功率。这就需要转子变换器具有产生一定无功功率的能力。双 PWM 型变换器的直流环节配置有电容，可以发出一定大小的无功功率。双 PWM 型变换器直流环节的电容容量的选取与直流环节电压大小和 DFIG 的运行范围有关，文献[36]对此作了研究。

4.2 网侧 PWM 型变换器的控制

由图 4.1 可见，双 PWM 型变换器中的网侧变换器和机侧变换器的主电路结构完全相同，而它们工作状态互逆：在 DFIG 转子侧能量流向改变时，能互换地实现整流和逆变的功能。但由于在整个励磁系统中分担的功能不同，因而具体的控制方法也有所不同。机侧变换器采用 DFIG 定子磁链定向矢量控制，网侧变换器将采用电网电压定向矢量控制方式^[49]。

为了讨论网侧变换器的运行机理和控制方式，需要建立它的数学模型。网侧变换器的三相桥式主电路各开关元件采用脉宽调制(PWM)方式工作，其交流侧电压

主要是正弦基波，也存在一些高次谐波。由于电感的滤波作用，高次谐波电压产生的谐波电流非常小，因而网侧变换器交流侧输入电流非常近似于正弦。如果只考虑电流和电压的基波，从电网侧看，网侧变换器可看作是一个可控的三相交流电压源。其基波等效电路图及 a 相等效相量图分别如图 4.4(a) 和 (b) 所示。



(a) 网侧变换器基波等效电路

(b) A 相等效相量图

图 4.4 网侧变换器的数学模型

由 4.4(b) 可知，只要调节网侧变换器输出交流电压的幅值和相位，就能控制变换器交流侧输入电流的大小和它与电网电压的相位角 φ ，从而可变换器运行于不同的工作状态：

(1) 单位功率因数整流运行：此时，交流侧电流正弦并与电网电压同相位，能量由电网流入变换器，电网和变换器之间没有无功功率的流动。

(2) 单位功率因数逆变运行：此时，交流侧电流正弦并与电网电压反相，能量由变换器流向电网，电网和变换器之间也没有无功功率的流动。

(3) 非单位功率因数运行状态：此时，交流侧电流基波与电网电压具有一定的相位关系。当交流侧电流正弦且与电网电压保持 90 度的相位关系时，变换器可作为静止无功功率发生器运行。另外，在变换器非单位功率因数运行时也可控制交流侧电流为所需的波形，即作为有源滤波器运行。

在各种运行状态中，单位功率因数整流和逆变运行是变速恒频发电系统中网侧变换器的两个典型运行状态，是网侧变换器的控制目标之一。由于基波功率因数可以控制为 1，所以减小了对电网无功功率的需求，这一点正是双 PWM 型变换器较其它变换器所独具的优点，使得它成为变速恒频风力发电系统中的主流变换器。设三相电网电压平衡，根据网侧变换器的拓扑结构(图 4.1)，其数学模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} u_a - L \frac{di_a}{dt} - Ri_a - S_a u_{dc} \\ = u_b - L \frac{di_b}{dt} - Ri_b - S_b u_{dc} \\ = u_c - L \frac{di_c}{dt} - Ri_c - S_c u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{load} \end{array} \right. \quad (4.2.1)$$

式中： S_a 、 S_b 、 S_c 分别为三相桥臂的开关函数。其中

$S_k=1$: 对应桥臂上管导通, 下管关断;

$S_k=0$: 对应桥臂下管导通, 上管关断, ($k=a, b, c$)。

在三相无中线系统中, 三相电流之和始终为零。即有

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4.2.2)$$

且三相电网电压平衡, 即有

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad (4.2.3)$$

利用上面两式可将式(4.2.1)化为一组一阶微分方程:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i_a - \frac{1}{L} \cdot (S_a - \frac{S_a + S_b + S_c}{3}) \cdot u_{dc} + \frac{1}{L} \cdot u_a \\ \frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i_b - \frac{1}{L} \cdot (S_b - \frac{S_a + S_b + S_c}{3}) \cdot u_{dc} + \frac{1}{L} \cdot u_b \\ \frac{di_c}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i_c - \frac{1}{L} \cdot (S_c - \frac{S_a + S_b + S_c}{3}) \cdot u_{dc} + \frac{1}{L} \cdot u_c \\ \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) - \frac{1}{C} \cdot i_{load} \end{cases} \quad (4.2.4)$$

该式写成矩阵形式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \cdot u_{dc} + \frac{1}{L} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \\ \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot [S_a \quad S_b \quad S_c] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{C} i_{load} \end{cases} \quad (4.2.5)$$

应用三相静止 abc 坐标系与两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系之间的变换阵 $C_{3s/2s}$ 、 $C_{2s/3s}$ 对上式变换可得

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \\ \frac{du_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{S_\alpha}{L} \\ 0 & -\frac{R}{L} & -\frac{S_\beta}{L} \\ \frac{3S_\alpha}{2C} & \frac{3S_\beta}{2C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ i_{load} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4.2.6)$$

式中

$$\begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} = C_{3s/2s} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (4.2.7)$$

再应用两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系与两相同步速旋转 dq 坐标系之间的变换阵 $C_{2s/2r}$ 、 $C_{2r/2s}$ 对上式变换, 可得

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{du_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_1 & -\frac{S_d}{L} \\ -\omega_1 & -\frac{R}{L} & -\frac{S_q}{L} \\ \frac{3S_d}{2C} & \frac{3S_q}{2C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ i_{load} \end{bmatrix} \quad (4.2.8)$$

上式即两相同步速旋转 dq 坐标系下网侧变换器的数学模型, 式中

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = C_{2s/2r} \cdot \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} \quad (4.2.9)$$

网侧变换器的控制目标是: (1) 保持输出直流电压恒定且有良好的动态响应能力; (2) 确保交流侧输入电流正弦, 功率因数为 1。故输入电流的有效控制是网侧变换器控制的关键。从本质上讲, 网侧变换器是一个涉及交、直流电能形态转换的能量变换系统。由于无穷大电网电压基本恒定, 对输入电流实施快速有效的控制也能有效地控制能量流动的速度和大小。

式(4.2.8)表示的输入电流满足下式:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega_1 Li_q + u_d - S_d u_{dc} \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega_1 Li_d + u_q - S_q u_{dc} \end{cases} \quad (4.2.10)$$

设变换器交流侧电压为

$$\begin{cases} u_{dr} = S_d u_{dc} \\ u_{qr} = S_q u_{dc} \end{cases} \quad (4.2.11)$$

则(4.2.10)式可写为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega_1 Li_q + u_d - u_{dr} \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega_1 Li_d + u_q - u_{qr} \end{cases} \quad (4.2.12)$$

此式表明 d 、 q 轴电流除受控制量 u_{dr} 、 u_{qr} 的影响外, 还受到交叉耦合项 ωLi_q 、 $-\omega Li_d$ 和电网电压 u_d 、 u_q 的影响, 需要寻找一种能解除 d 、 q 轴间电流耦合和消

除电网电压扰动的控制方法。将(4.2.12)式改写为

$$\begin{cases} u_{rd} = -u'_{dr} + \Delta u_{dr} + u_d \\ u_{rq} = -u'_{qr} - \Delta u_{qr} + u_q \end{cases} \quad (4.2.13)$$

其中

$$\begin{cases} u'_{dr} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \\ u'_{qr} = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q \end{cases} \quad (4.2.14)$$

$$\begin{cases} \Delta u_{dr} = \omega_1 Li_q \\ \Delta u_{qr} = \omega_1 Li_d \end{cases} \quad (4.2.15)$$

可以看出, u'_{dr} 、 u'_{qr} 分别是与 i_d 、 i_q 具有一阶微分关系的电压分量, 称之为解耦项; Δu_{dr} 、 Δu_{qr} 为 d 、 q 轴电压耦合补偿项。(4.2.13)式同时又引入电网扰动电压 u_d 、 u_q , 进行前馈补偿, 这样不但实现了 d 、 q 轴电流的独立控制, 而且还提高了系统的动态性能。

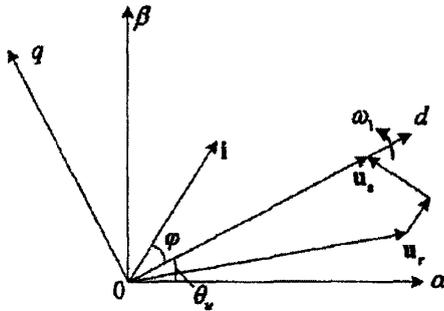


图 4.5 网侧变换器电压定向坐标变换关系

为简化控制算法, 可采用电网电压定向矢量控制, 坐标变换关系如图 4.5 所示。将同步速旋转 dq 坐标系的 d 轴定向于电网电压矢量 u_s 方向上, $\theta_u = \omega_1 t$ 是 d 轴和 α 轴的夹角, 即 u_s 的相角。这样, 电网电压的 d 、 q 分量为

$$\begin{cases} u_d = u_s \\ u_q = 0 \end{cases} \quad (4.2.16)$$

式中 u_s 为相电压的幅值。

计及(4.2.16)式, (4.2.13)式可表示为

$$\begin{cases} u_{dr} = -u'_{dr} + \Delta u_{dr} + u_s \\ u_{qr} = u'_{qr} - \Delta u_{qr} \end{cases} \quad (4.2.17)$$

网侧变换器从电网吸收的有功功率和无功功率(感性)分别为

$$\begin{cases} P_r = u_d i_d + u_q i_q = u_s i_d \\ Q_r = u_q i_d - u_d i_q = -u_s i_q \end{cases} \quad (4.2.18)$$

上式中, P_r 大于零表示变换器工作于整流状态, 从电网吸收能量; P_r 小于零表示变换器工作于逆变状态, 能量从变换器返回电网。 Q_r 大于零表示变换器相对于电网呈感性, 吸取感性无功电流; Q_r 小于零表示变换器相对于电网呈容性, 吸收容性无功电流。从上式可以看出, d 、 q 轴电流分量 i_d 、 i_q 实际上就是变换器的有功电流、无功电流分量, 调节 i_d 、 i_q 就可以分别控制网侧变换器吸收的有功功率和无功功率。

从双 PWM 型变换器电路拓扑结构可知, 当交流侧输入功率大于负载消耗功率时, 多余的功率会使直流环节电容电压升高; 反之, 电容电压会降低。换言之, 直流环节电压与变换器吸收的有功功率密切相关。因此, 直流环节电压可通过 i_d 进行控制, d 轴电流分量参考值 i_d^* 反映了直流环节电压的大小。当负载增加时, 直流环节电压降低, 电压调节器输出指令 i_d^* 增大, 网侧变换器工作于整流状态, 从电网吸收更多的能量为直流环节电容充电, 使输出直流电压升高。反之, i_d^* 减小, 网侧变换器工作于逆变状态, 直流环节向电网释放能量。当输入、输出功率达到平衡时, i_d^* 趋于稳定。

控制 q 轴电流分量 i_q 可以控制网侧变换器吸收的无功功率, 从而可以控制其交流侧的功率因数。因此, 可以根据需要的功率因数可确定 q 轴参考电流 i_q^* 。当进行单位功率因数控制时, 应该令 $i_q^* = 0$ 。

根据 (4.2.13) 式~(4.2.16) 式可确定网侧变换器的控制策略, 如图 4.6 所示。整个控制系统为双闭环结构, 外环为电压环、内环为电流环。直流环节给定电压 u_{dc}^* 和反馈电压 u_{dc} 相比较后的误差经 PI 调节器调节输出 i_d^* , 而 i_q^* 则由功率因数的性质决定。在双 PWM 型变换器作为 DFIG 的励磁电源时实行单位功率因数控制, 即 $i_q^* = 0$ 。 i_d^* 、 i_q^* 分别与对应的反馈值 i_d 、 i_q 相比较后的误差经过 PI 调节器调节后输出 u_{dr}' 、 u_{qr}' , 再与各自的解耦补偿项 Δu_{dr} 、 Δu_{qr} , 和电网电压扰动前馈补偿项 u_d 、 u_q 相运算后得到变换器交流侧参考电压 u_{dr}^* 、 u_{qr}^* 。参考电压 u_{dr}^* 、 u_{qr}^* 经坐标变换后得 $\alpha\beta$ 坐标系中的分量值 $u_{\alpha r}^*$ 、 $u_{\beta r}^*$, 由此进行脉宽调制, 产生驱动信号实现对网侧变换器的控制。

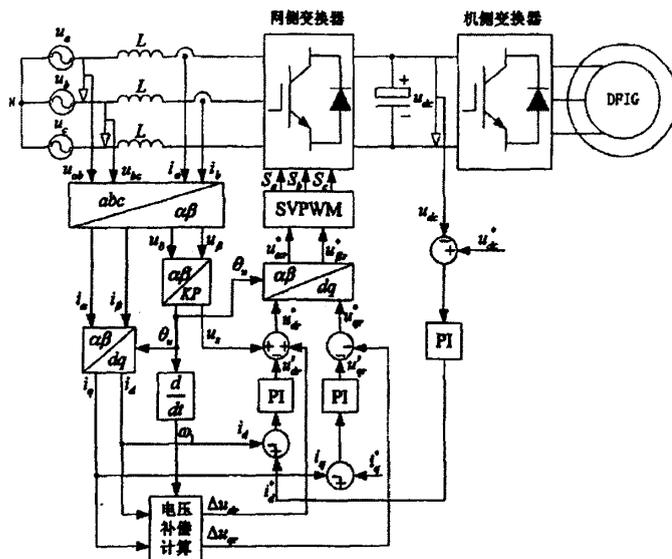


图 4.6 网侧变换器的控制原理框图

网侧变换器交流侧电流的控制框图如图 4.7 所示，图中 $G_{pi}(S)$ 为电流 PI 调节器的传递函数。

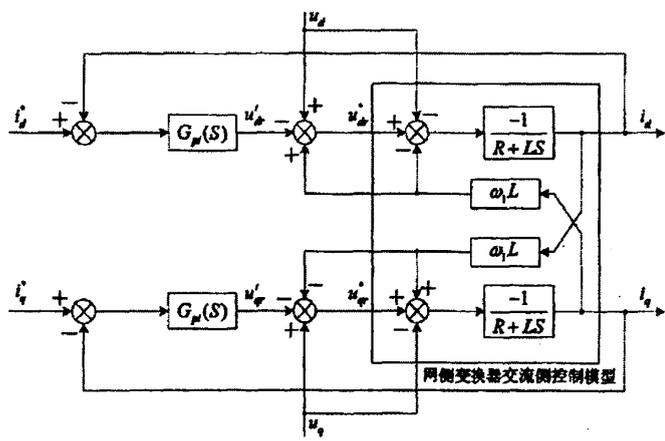


图 4.7 网侧变换器的交流侧电流控制框图

4.3 本章小结

DFIG 的励磁电源是确保交流励磁变速恒频风力发电系统输出电能质量和实现最大风能追踪变速运行控制的关键，实际上 DFIG 的运行控制都是通过其转子励磁变换器实现的，对其讨论的意义重大。本章在介绍了几种主要变换器方案的基础上，分析了变速恒频运行时 DFIG 对其转子励磁变换器的要求，探讨了双 PWM 型变换器的结构、特点和控制方法。本章主要研究内容和成果有：

- 1、分析了双 PWM 型变换器的结构和控制特点，指出网侧变换器应采用电网电

压定向矢量控制，以实现交流侧单位功率因数控制和直流环节电压控制：机侧变换器应采用 DFIG 定子磁链定向矢量控制，以实现发电机 P、Q 解耦控制，进而实现最大风能追踪控制。根据发电机在同步速上、下的不同运行情况，两个变换器可自动完成整流/逆变(或逆变/整流)状态的切换，无需人工干预地实现可逆运行，具有能量双向流动的能力。此外，双 PWM 型变换器采用高频全控开关器件，消除了低次谐波；直流环节配置有储能电容，能在不吸收电网无功功率的情况下向 DFIG 转子提供无功功率。因此，双 PWM 型变换器是目前电力电子器件条件下兆瓦级 DFIG 理想的励磁电源。

2、重点探讨了基于电网电压定向矢量控制的网侧变换器的控制原理。网侧变换器控制通过控制变换器交流侧电压来控制网侧输入电流，是一种间接电流控制方式。通过电网电压定向，交流侧输入电流可分为有功分量和无功分量，分别控制此有功、无功分量，可实现直流环节电压控制和交流侧单位功率因数控制。

第五章 交流励磁变速恒频风力发电机并网同期控制系统仿真模型

5.1 双馈型异步发电机空载仿真模型

本文以 Matlab/Simulink 为工具,对交流励磁变速恒频风力发电同期控制系统进行了深入、系统的仿真研究。Matlab/Simulink 功能强大,在数据计算、图像处理、编程、计算机仿真等方面得到了广泛的应用^[48]。Simulink 是 Matlab 内嵌的交互式仿真集成化环境,它提供了丰富的仿真工具包、仿真模型和图形用户界面。它的 Power System Block 是电气工程专业仿真工具包,提供了电机、测量表计、阻容元件、电源模块等器件的仿真模型。交流励磁变速恒频风力发电同期控制系统是一个复杂的机电能量转换系统,由多种元器件组成。很多器件的仿真模型可以直接由 Matlab/Simulink 提供,但由于交流励磁变速恒频风力发电系统的独特性,仿真软件 Simulink 提供的电机模型不能实现发电机空载运行,故需要建立发电机模型。对此,本文利用 Matlab/Simulink 环境自行建立了仿真模型。

由式 (3.3.1)~式 (3.3.4) 可建立基于 Simulink 的 DFIG 发电机的空载仿真模型如图 5.1 所示。

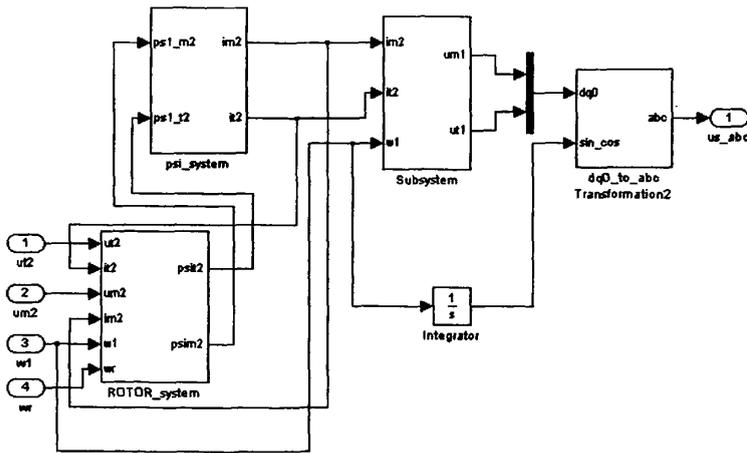


图 5.1 双馈发电机空载仿真模型

通过 Subsystem 将该子系统进行封装,使其在其它模型中可以直接作为标准的 Simulink 模块使用,封装后的发电机模型如图 5.2 所示。图中 A1、B1、C1 表示定子侧 A、B、C 表示转子侧。

双 PWM 型变换器, 额定功率为 3kW, 直流环节电容 $C=2000\mu\text{F}$, 进线电抗器电感 5mH, 开关频率 10KHz。

图 5.4 与图 5.5 分别表示了电网电压 u_s 与 DFIG 定子电压 u_1 波形。由两个波形的对比可以看出, 在并网同期控制下, 在 1.6s 后, u_1 很快地向 u_s 收敛, 直至满足并网条件。

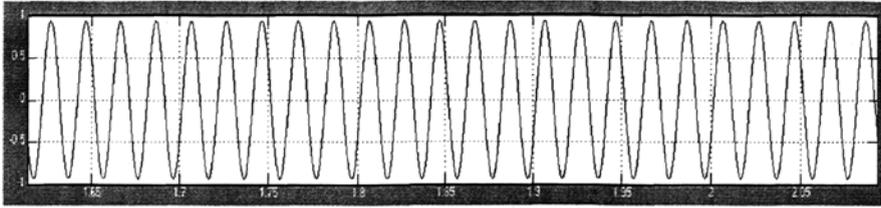


图 5.4 电网电压 u_s 的波形

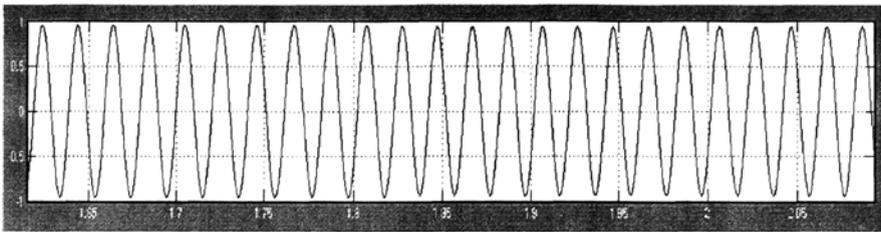


图 5.5 DFIG 定子电压 u_1 的波形

图 5.6 与图 5.7 分别表示了两个时间段内电网电压 u_s 与 DFIG 定子电压 u_1 的情况。可以看出在 1.78s 后, DFIG 定子电压 u_1 的波形与电网电压 u_s 的波形基本重合, 满足并网条件。

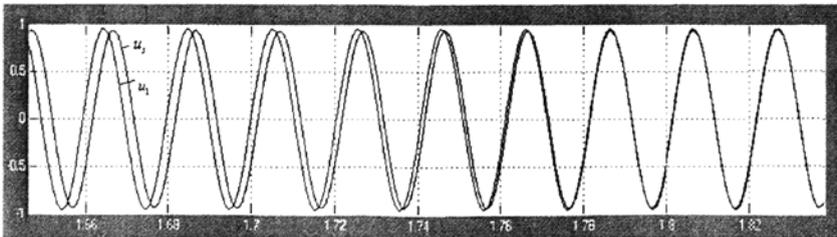


图 5.6 空载并网同期控制中 (1.66~1.82s) 电网电压 u_s 与 DFIG 定子电压 u_1

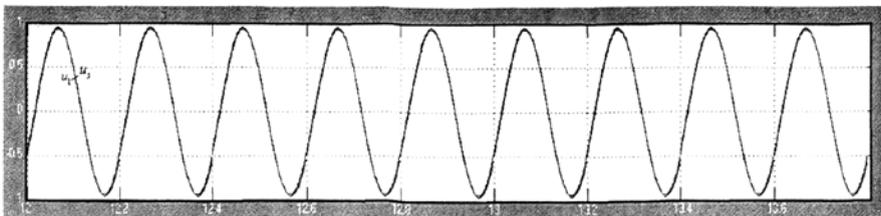


图 5.7 空载并网同期控制中 (12~13.6s) 电网电压 u_s 与 DFIG 定子电压 u_1

图 5.8 为空载并网控制中的电网电压与发电机电压差的变化过程，它从另一个角度说明了空载并网同期控制的有效性。

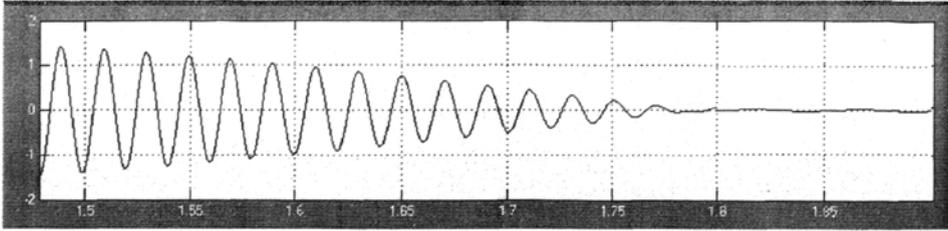


图 5.8 空载并网同期控制中电网电压与发电机电压差

图 5.9 与图 5.10 为并网前、后的 DFIG 转子电流 i_2 和定子电流 i_1 的过渡过程。并网时刻 $t = 1.79s$ ，由于在并网前 DFIG 定子电压 u_1 与电网电压 u_s 已经非常接近，并网瞬间定、转子的电流冲击很小，并网过程平稳，并网后 DFIG 很快地进入稳态。

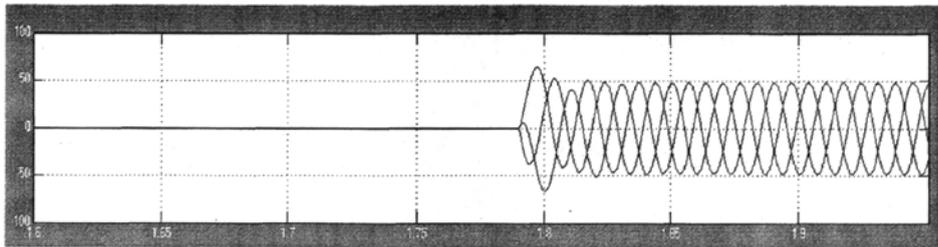


图 5.9 并网瞬间定子电流 i_1

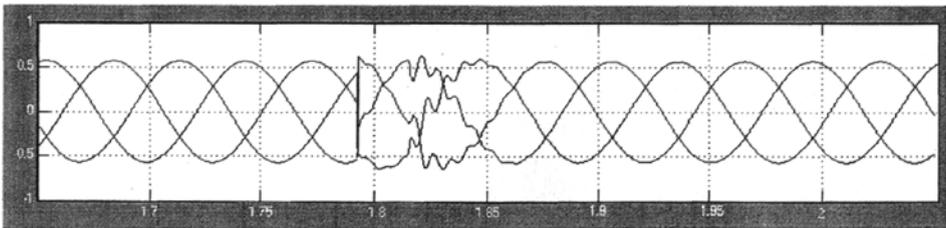


图 5.9 并网瞬间 DFIG 的转子电流 i_2

5.2.3 网侧变换器控制仿真

图 5.10 表示了网侧变换器工作状态按整流—逆变—整流规律变化时，电网电压 u_g 和流入变换器的电流 i_g 的变化情况。在整流状态时， u_g 和 i_g 的相位相同，能量从电网流入网侧变换器；逆变状态时， u_g 和 i_g 的相位相反，能量从网侧变换器流入电网。

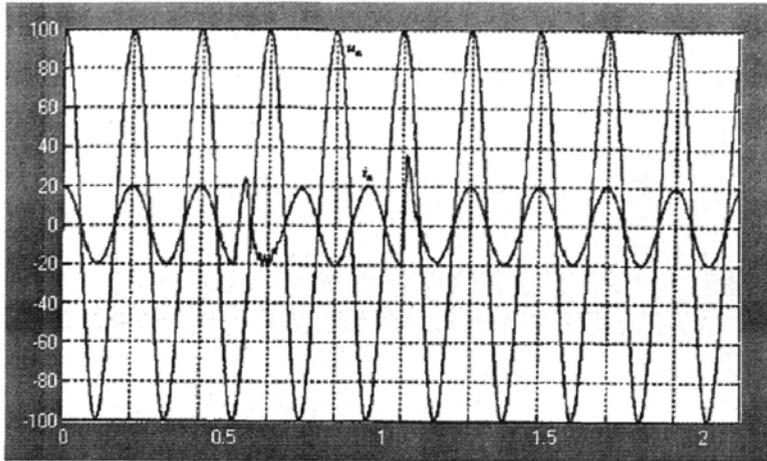


图 5.10 网侧变换器电网电压 u_{α} 和流入的电流 i_{α}

5.3 本章小结

本章讨论了基于 Matlab/Simulink 的交流励磁变速恒频风力发电系统并网同期控制仿真模型的建模思路和实现方法，采用所构建的系统仿真模型对交流励磁变速恒频风力发电系统进行了仿真研究，从仿真角度验证了本文理论分析和控制方法的正确性和有效性。本章的主要研究内容和成果有：

1、由于仿真软件 Simulink 提供的电机模型不能实现发电机空载运行，故建立了 DFIG 的空载模型。

2、利用交流励磁变速恒频风力发电系统并网仿真模型，进行了空载并网同期控制和网侧变换器控制等仿真研究，考察了变速恒频运行的实现效果。仿真研究表明，本文所研究的交流励磁变速恒频风力发电系统的并网控制策略是正确的，可行的，对以后的实验研究具有指导意义。

第六章 总结与展望

由于环境和能源问题,使得可再生能源特别是风能的开发利用得到世界各国的高度重视。加之电力电子器件制造和技术的飞速发展,大型兆瓦级变速恒频风力发电机组成为了风电机组的技术发展方向。其中能柔性连接风力机及其系统的变速恒频双馈风电机组已成为目前世界风电制造商开发的主流机型,因此变速恒频双馈风电机组的相关技术研究成为了风电领域重要的研究方向。

随着风力发电机组单机容量越来越大,发电机并网时的电流冲击已不能忽略,研究风力发电机并网技术具有很大的必要性。本文主要致力于交流励磁变速恒频风力发电系统并网控制原理的研究,采用矢量控制等已有方法进行了控制原理研究,给出了空载并网时的同期控制策略,并以 Matlab/Simulink 为工具,进行仿真验证。本文的主要研究结果有:

(1)从 DFIG 的通用数学模型出发,将磁场定向矢量控制技术应用到 DFIG 并网控制中,导出了基于定子磁链定向的交流励磁变速恒频风力发电机空载并网同期控制策略。该控制策略只需采集电网电压信息,据此对发电机实行交流励磁控制,通过调节定子电压与电网电压的一致,达到满足并网条件。空载并网方式采集量少,算法简单,实现方便。

(2)励磁变换器是实现 DFIG 控制的关键,对系统的控制性能和发电机输出电能质量具有决定性的影响。本文基于交流励磁变速恒频风力发电机的运行特点,对具有能量双向流动功能的双 PWM 型变换器的功能进行了分析,对其控制方法进行了讨论。

(3)采用所构建的交流励磁变速恒频风力发电系统并网仿真模型对交流励磁变速恒频风力发电系统进行了并网运行的仿真研究,从仿真角度验证了本文理论分析和控制方法的有效性,为进一步的实验研究提供了指导和参考。

论文虽然在风电并网领域内,对变速恒频双馈风电机组数学模型,运行特性及其并网控制策略进行了有益的研究和探索,并取得了一些研究成果,但风电并网及并网后的运行问题、稳定问题、安全问题,还有众多工作需要进一步研究。如在电力系统现有的分析程序中,如何建立一套完整的风电机组分析模块,使得风电并网的分析具备完整性、可靠性、通用性,再如,关于风电机组运行特性给电网带来的电压波动、电压闪变问题,电力电子器件的引入给电网带来的谐波污染问题以及风电输出功率波动带来的调频问题等都是很重要且有意义的研究方向,需要风电领域的专家和学者孜孜不倦的研究和探索。

最后,希望本文关于变速恒频双馈风电机组运行特性及并网控制策略的研究能为我国大型风电机组的研制、风电并网技术的提高提供一定的帮助。

参 考 文 献

- [1] 李登伟, 张烈辉, 郭了萍, 等. 中国 21 世纪可替代能源和可再生能源[J]. 天然气工业, 2006, 26(5): 1~5
- [2] 赵阳, 邹旭东, 康勇, 等. 变速恒频双馈风力发电系统的速度模式控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 40(1): 114~119
- [3] 国家经贸委可再生能源发电及热利用研究项目组. 中国可再生能源技术评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999: 15~16
- [4] 程鹏, 李伟力, 孙秋霞, 等. 变速恒频双馈感应发电机的空载特性[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(2): 101~105
- [5] 童路, 田铭兴. 变速恒频风力发电系统的并网控制分析[J]. 江苏电机工程, 2006, 25(6): 33~35
- [6] 夏长亮, 宋战锋. 变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 91~95
- [7] 谢震, 张崇巍, 张兴, 等. 基于 MPPT 的变速恒频双馈风力发电控制策略[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 148~151
- [8] 张强. 交流励磁变速恒频发电机谐波同步消除法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 124~129
- [9] 李建林, 赵栋利, 李亚西, 等. 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
- [10] 张庆利, 尤波, 胡海燕, 等. 兆瓦级变速恒频风电机组控制系统的研究与开发[J]. 机械工程师, 2007(3): 88~90
- [11] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 变速恒频双馈风力发电机投切控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 103~108
- [12] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 62~67
- [13] 林勇刚, 李伟, 叶杭冶, 等. 变速恒频风力机组变桨距控制系统[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 110~114
- [14] 张新房, 徐大平, 吕跃刚, 等. 大型变速风力发电机组的自适应模糊控制[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3): 573~577

- [15] 樊艳芳, 晁勤. 风力异步发电机的建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2002, 19(5): 56~58
- [16] 卞松江, 潘再平, 贺益康. 风力机特性的直流电机模拟[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 360~364
- [17] 杨金明, 吴捷, 杨俊华. 基于自抗扰控制器的风力发电系统的最大风能捕获控制[J]. 太阳能学报, 2004, 25(4): 525~529
- [18] 吴义纯, 丁明, 李生虎. 风电场对发输电系统可靠性影响的评估[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 72~76
- [19] Wiik J, Gjerde Jo, Gjengedal T. Impacts from large scale integration of wind farms into weak power systems[C]. Power System Technology Proc: Perth. W A Australia, 2000 稳定性的研究[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(3): 59~63
- [20] 马昕霞, 宋明中, 李永光. 风力发电并网技术及其对电能质量的影响[J]. 上海电力学院学报, 2006, 22(3): 283~286
- [21] 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.
- [22] Tripathy S C. Dynamic simulation of hybrid wind dieselpower generation system with superconducting magnetic energy stor-age[J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38(9): 919~930
- [23] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 63~66
- [24] 蔺红, 晁勤. 并网型风力发电机的建模与仿真[J]. 可再生能源, 2006, (4): 63~65.
- [25] 吴俊玲, 吴畏, 周双喜. 超导储能改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(3): 59~63
- [26] 贺益康, 刘其辉, 变速恒频风力发电机并网控制策略研究, 高技术通讯, 2003, (12)
- [27] 梦强, 潘建, 孟丽, 双馈变速恒频风电系统矢量控制分析, 2003, 23(11): 37~40
- [28] 孙茂相, 杨继华, 风电系统最大功率捕获的研究, 沈阳工业大学学报, 2003, 25(1): 40~42

- [29] 许洪华, 倪受元, 独立运行风电机组的最佳叶尖速比控制, 太阳能学报, 1998, 19(1):30~35
- [30] 黄明川, 高衡初, 变速恒频交流励磁风力发电机系统研究, 合肥工业大学学报, 2000, 23(2): 255~258
- [31] B. Malinga, J. E.Sneckenberger,A. Feliachi, Modeling and control of a wind turbine as a distributed resource, Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory, 2003:108~112
- [32] K. A.Stol, Time-varying control of wind turbines, Proceedings of the American Control Conference, Denver Colorado:2003:3793~3796
- [33] M. J.Balas, A. Wright, K. Stol, Dynamics and control of horizontal axis wind Turbines, Proceedings of the American Control Conference, Denver:2003: 3781~3793
- [34] Y.D.Song, Control of wind turbines using memory-based method, Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 85(3): 263~275
- [35] R.Chedid, F.Mrad, M.Basma, Intelligent control of a class of wind energy conversion systems, IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1597~1604
- [36] A. Dadone,L. Dambrosio, Estimator based adaptive fuzzy logic control technique for a wind turbine-generator system, Energy Conversion and Management, 2003, 44(1):135~153
- [37] 杨金明, 吴捷, 风力发电系统中控制技术的最新发展, 中国电力, 2003, 36(8): 65~67
- [38] 杨俊华, 吴捷, 风力发电机组的非线性控制聚变结构控制与鲁棒控制, 动力工程, 2003, 23(6): 2803~2809
- [39] T. Gjengedal, System control of Large scale wind power by use of automatic generation control(AGC), Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, CIGRE/PES 2003. CIGRE/IEEE PES International Symposium, 2003:15~21
- [40] D.Seyoum, M.F.Rahman, C. Grantham, Inverter supplied voltage control system for an isolated induction generator driven by a wind turbine, IEEE 38th IAS Annual Meeting on Industry Applications Conference, 2003., 2003:568~575

- [41] J. Ekanayake, L. Holdsworth, N. Jenkins, Control of DFIG wind turbines, IEE Power Engineer, 2003, 17(1):28~32
- [42] S. K.Salman,A.L.3.Teo, Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator, IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 793~802
- [43] 汤宏, 吴俊玲, 周双喜, 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真, 电网技术, 2004, 28(1): 38~41
- [44] 刘志刚, 汪志中, 范瑜, 新型可再生能源发电馈网系统研究, 电工技术学报, 2003, 18(4): 108~113
- [45] 高景德, 王祥晰, 李发海, 交流电机及其系统的分析, 北京:清华大学出版社, 1993
- [46] 杨兴瑶, 电动机调速的原理及系统, 北京:水利电力出版社, 1995
- [47] 谢麟阁, 自动控制原理, 北京:水利电力出版社, 1986
- [48] 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研究, 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122~125
- [49] 邱瑞昌, 闰耀民, 姜学东, 准稳态转子感应电势定向的双馈调速风力发电机的研究, 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 133~138
- [50] 吴学光, 风电场并网运行的数学模型及遗传算法模型的优化研究, 博士学位论文, 武汉, 武汉水利电力大学, 2000
- [51] M. Shinozuka, C.M. Jan, Digital simulation of random process and its applications, Sound and Vibration, 1972, 25(11):111~128
- [52] 陈国呈, PWM 变频调速及软开关电力变换技术, 北京:机械工业出版社, 2001
- [53] 申洪, 变速恒频风电机组建模及其在电力系统分析中的应用, 博士学位论文, 北京, 中国电力科学研究院, 2003
- [54] 叶杭冶, 风力发电机组的控制技术, 北京:机械工业出版社, 2002
- [55] 李亚西, 王志华, 赵斌, 等. 大功率双馈发电机“孤岛”并网方式[J]. 太阳能学报, 2006, 27(1): 1~6

致 谢

本论文是在导师米增强教授的悉心关怀和指导下完成的。米老师渊博的学识、宽广的胸怀、一丝不苟的工作治学态度给我留下了深刻的印象，始终激励着学生奋发进去，也是学生未来学习和工作的人生楷模。米老师不仅给予我学业上的帮助，在生活上业给予了我无微不至的关怀。自始至终，米老师对我的论文给予了很大的指导和帮助，在选题和发表论文时米老师颇费心思，本文的顺利完成凝聚着米老师辛勤的汗水。至此论文完成之际，谨向辛勤培育我的恩师致以衷心的感谢和崇高的敬意！

同时还要感谢我的师兄苏勋文博士、刘兴杰博士和同导师的吕鑫以及师妹田海峰对我的帮助，使我能够顺利地得到与课题中有关的资料。谨向所有关心和帮助过我的领导、老师和朋友们致以衷心的感谢！

在学期间发表的学术论文和参加科研情况

发表论文情况:

- [1] 沈妍, 米增强, 苏勋文. 交流励磁变速恒频风力发电机组快速同期并网控制研究. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第 23 届电力系统及其自动化年会论文集. 合肥, 合肥工业大学, 2006, 11
- [2] Mi Zeng-qiang, Shen Yan, Wang Xin. Synchronous Control of Connecting AC Excited Doubly-Fed Generator to the Grid. IEEE International Conference on Industrial Technology. Sichuan University, Chengdu, 2008, 4(已录用)
- [3] 吕鑫, 沈妍. 基于潮流转移因子的减载策略研究. 河北电力技术. 2007, 5
- [4] 王鑫, 沈妍. 并网风电场最大安装容量分析综述. 21 世纪电力, 2007, 10
- [5] 王鑫, 沈妍. 交流励磁变速恒频风力发电机组并网同期控制研究. 太阳能, 2008, 1