

兆瓦级双馈式三电平风电变流器

关键技术研究

© 常州工学院 李渊 著

能源和环境是如今困扰人类生存和发展的两大紧迫问题,大力发展以风能为代表的新兴绿色能源是解决该问题的重要手段。合理发展风能不仅具有巨大的经济利益,还蕴含着更多的社会效益和环境效益。因此,近年来风电发展实现了惊人的增长速度。风电变流器是风电系统中的核心设备,也是制约风电产业完全国产化的重要瓶颈。研究高性能风电变流器对于完善我国风电产业链,提升风电制造业整体水平具有重要意义。随着风电机组单机容量不断增大,电压等级必然呈现提升的发展趋势,并且国家对风力发电电能质量的要求也将进一步提高。三电平拓扑结构由于自身优势,可适应更高的电压等级,提供更绿色的电能,因此采用三电平拓扑结构代替传统两电平模式是风电变流器研究的重要方向之一。

本书针对基于三电平结构的兆瓦级双馈式风电变流器一些关键技术进行了深入研究。首先提出了双馈式三电平风电变流器的整体设计方案,并对其一些重要部件的设计进行了详细的介绍;分析了简化式三电平 SVPWM 控制算法的实现;通过实验验证了设计方案的有效性。在深入分析网侧变流器数学模型和现有控制策略的基础上,提出了一种基于 LQRI 新型三电平网侧变流器控制策略,实现了网侧变流器最优控制;采用双电流控制方法实现了电网故障条件下网侧变流器的有效控制。

书中设计了一种基于模糊滑模控制的转子电流内环控制策略,利用滑模变结构特性抑制了并网前后电机数学模型变化带来的不利影响;有效地实现了并网前对电网电压跟踪以及并网后对功率给定的跟踪控制。采用一种基于定子磁链在不同坐标系下角度偏差的转子位置辨识策略,改进了一种磁链观测算法,实现了双馈式变流器无速度传感器控制。本书设计的三电平变流器先后通过不同试验平台以及风场现场试验验证,结果表明设计方案以及控制策略正确有效。

本专著在编写过程中，参考和吸收了中国矿业大学风电项目组成员李姗姗硕士的毕业论文。特别感谢中国矿业大学何凤有教授、谭国俊教授的支持和鼓励。本专著收集和引用了有关专家和学者的相关研究资料，在此一并向他们表示衷心的感谢。

本专著受到了江苏高校品牌专业建设工程资助项目（项目编号：PPZY2015B129）、“十三五”江苏省重点学科项目——电气工程重点建设学科、2016年度江苏省高校重点实验室建设项目——特种电机研究与应用重点建设实验室、教育部产学研合作协同育人项目（项目编号：201701068010）、河南省科技攻关项目——模块化多电平变换器关键技术研究（项目编号：162102210098）等项目的支持，在此表示感谢！

由于作者水平有限，书中错误之处在所难免，诚请广大师生和读者批评指正。

常州工学院 李渊

2017年8月

目 录

1 前言	001
1.1 概述	001
1.2 国内外研究概况	003
1.3 本书内容及安排	017
2 兆瓦级双馈式三电平风电变流器整体方案	021
2.1 引言	021
2.2 双三电平风电变流器总体设计	021
2.3 滤波器的设计	023
2.4 直流回路电容设计	029
2.5 控制器的设计	030
2.6 三电平 SVPWM 控制算法	033
2.7 变速恒频风电机组的数学模型	039
2.8 DFIG 系统仿真方法	045
2.9 实验	048
2.10 本章小结	051
3 网侧变流器控制策略研究	055
3.1 引言	055
3.2 三电平整流器的数学模型	056
3.3 新型 LQRI 整流控制策略研究	068

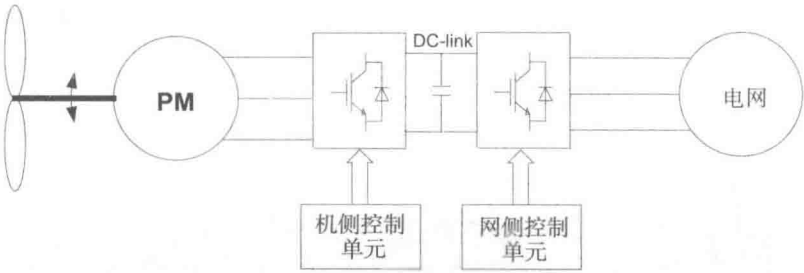
3.4	电网故障条件下控制策略研究	074
3.5	本章小结	084
4	机侧变流器控制策略研究	087
4.1	引言	087
4.2	双馈发电机的数学模型	089
4.3	并网控制策略的研究	097
4.4	并网后控制策略研究	110
4.5	本章小结	116
5	无速度传感器控制策略研究	119
5.1	引言	119
5.2	双馈式发电机无速度传感器控制策略原理	120
5.3	双馈式发电机无速度传感器控制策略的实现	126
5.4	本章小结	130
6	应用研究	135
6.1	某风电整机厂家测试平台的应用	135
6.2	某风场现场应用	136
7	结论及展望	141

1.1 概述

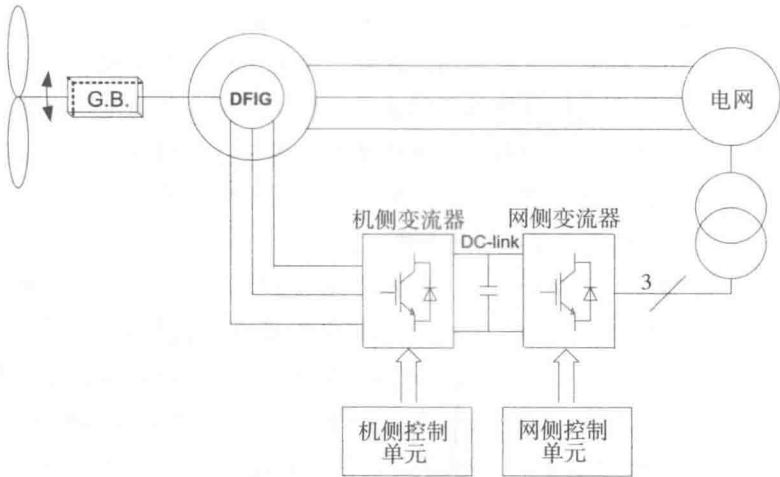
风能作为一种清洁的绿色能源，其发电运行不依靠其他外部能源，与其他常规能源相比，不受原料成本价格制约。此外，风电运行、维护成本较为稳定，也不存在 CO₂ 排放等温室气体排放的环境成本。另一方面，全球范围内可利用的风能分布非常广泛，遍及陆地和海洋。正是基于上述特点，风力发电已成为世界各国可持续发展战略的重要举措之一。按照全球风能理事会的分析，各国的风力发电产业增长速度呈现出跨越式发展的态势。21 世纪初至 2010 年，年风电装机容量平均增长率达到 28%，2009 年年底，世界装机总量攀升至 14 000 万千瓦，每年新增的装机容量高达 2 000 万千瓦，每年流入风电产业的资金达到了 200 亿欧元。仅 2009 年，全球风电资金中 15% 流向了我国，资金总额达 400 亿人民币，我国真正成为全球最大的风电市场。2008 年国际能源署（IEA）颁布的《2050 年能源技术情景》指出，截至 21 世纪中叶，全球风电平均年装机容量将增加 7 000 万千瓦，由此可见风力发电将会成为一个兴盛的电力市场^[1]。

我国幅员辽阔，风力资源极其丰富。从北国之疆，到南海之滨，西起戈壁荒滩，东至“宝岛”台湾，都蕴藏着大量的风力资源。2006 年，国家气候中心采用数值模拟方法对我国风能资源进行评价，评估数据显示：在未计入青藏高原的风力资源的情况下，我国陆地离地面 10 米高度层风能资源可开发量为 25.48 亿千瓦，居世界首位^[2]。发展风电对于我国能源结构调整有着重要的意义，各级政府先后推出一系列扶植政策，如设立了 2010 年和 2020 年风电装机容量分别达到 1 000 万千瓦和 3 000 万千瓦的目标，制定了风电设备国产化有关政策，以及实施了“风电特许权招标”等举措，从而有力地推动了技术创新、风电市场培育以及风电产业化发展。目前，随着能源问题凸显以及环境效益的双重需求，风力发电已在我国能源体系中崭露头角，对于减少温室气体排放、构建安全新型能源应用、节约常规能源等方面做出了应有的贡献^{[1][2]}。

目前，主流的变速恒频风力发电机组可分为全功率风力发电机组，如图 1-1（a）所示；双馈式风力发电机组，如图 1-1（b）所示。两者在使用发电机类型、变流器类型以及机械构造上存在差异。



（a）全功率风力发电机组结构图



（b）双馈式风力发电机组结构图

图 1-1 两种常见风电机组示意图

（1）全功率式直接驱动变速恒频风力发电机组

这种风力发电机组采用多极永磁同步发电机与叶轮直接连接进行驱动的方式，可不需要使用增速齿轮箱。

优点：系统结构较为简单。由于省去了齿轮箱，降低了故障点，便于机组维护。发电机运行转速范围增大，效率有所提升。

缺点：发电机直径较大，由于存在运输问题，其直径上限为不能超过 4 米。并且随着机组设计容量增大，对发电机设计和加工制造带来困难；变流器为全容量逆变装置，设备投资大，控制成本增加。

(2) 双馈式变速恒频风力发电机组

机组结构形式为定子绕组直接与电网连接,双馈式发电机转子绕组可通过四象限变流器连接至电网。调节转子绕组励磁电流,实现对控制定子侧输出电压与电网一致,以及调节机组有功、无功功率输出大小及功率因数等,可以提高并网电能质量。

优点:机组所需变流器容量小,机组成本有效地得到降低,对于大容量机组优势更为显著;风机可运行的转速范围较宽,即电机转速可运行在同步速上下30%的范围;电机输出电能质量高,并可以根据需求调整有功、无功功率输出;此外,还可以实现对功率因数的调节,对电网实现无功补偿。

缺点:由于电机转子绕组有滑环和碳刷,提高了设备故障率,增加了维护成本;系统控制结构复杂,控制难度较高。

本书涉及内容《兆瓦级双馈式三电平风电变流器关键技术研究》,旨在解决设计双馈式三电平风电变流器中的一些关键技术问题,充分发挥三电平拓扑结构为系统带来的优势,并通过研究、改进相关算法实现系统性能指标的提高。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 国内外风力发电发展概况

若不考虑环境成本的制约问题,以及针对风电行业现有技术状况而言,风电的运行成本仍然高于常规电力方式。正是基于该现状,许多国家采取了经济手段、行政干预、政策激励等措施,给予了不同层面的引导和对风电产业发展的支持。以德国和西班牙等欧洲国家为代表,其相关政府机构制定了长期保护性电价政策,就风电和其他可再生能源开发商提供了最低上网电价底限。通过各种干预手段实现电力公司与风力发电开发商签署长期购电协议。此外,英、美等国对可再生能源制定了配额制政策,强制要求可再生能源在总电力供应量中应达到规定比重,对于发展稳定、有效的供需市场,提供了相应的保证。市场调节风电上网电价,并使相关幅值政策列入政府的发展规划,建立长期有效的政策机制;通过建立公共效益基金,对风力产业发电的发展提供支持。该公共效益基金可成为风能和其他可再生能源发展的一种融资机制,其常用手段是通过增加一定比例的电费实现。此方法被许多国家采用。此外,欧美国家地方政府采用税务调节手段,降低风电开发和运营成本。还有一些国家采取绿色电力交易的方式,以不同的视角,引导

和支持风电的发展。综上所述,鼓励风电发展的政策不尽相同,其可操作性以及支持力度不尽相同。但这些举措均反映出同一个现状:当前在风电不具备核心竞争力的条件下,必须予以非常照顾。目前,在全球气候变化压力不断加剧以及水电、核能等新型能源对生态环境造成不利影响的背景下,风电已成为最具有发展潜力的可再生能源,并作为长期策略用以应对未来能源和气候变化压力。2008年是风电发展具有里程碑意义的一个年份,该年全球装机超过1亿千瓦,在可再生能源中,仅次于水电,排名第二。2006—2008年,风电场建设投资每年接近150亿欧元,风电在大力发展的同时,也为社会创造出大量的就业机会,实现了经济效益和社会效益的双丰收^{[1][2][3]}。

30多年的不断进步,造就了风电市场的日趋繁荣,风电的成本逐年显著下降。据相关部门统计,每千瓦时风电成本在2007年降至4—5美分,比20世纪80年代而言,成本缩减了1/5—1/4。在风能资源较佳的区域,风电完全可与传统煤电行业竞争。可以引起关注的是,随着经济性提高以及多重措施推动作用下,2007年欧洲新增电源中,风电比例第一次跃居首位,超过天然气发电所占份额;同时期美国新增的风电装机总量也只是落后于天然气发电^{[1][2][3][4][5][6]}。作为世界上公认的风电预测的权威机构,全球风能理事会对世界范围内风电发展做出了预测:今后5年,全球风电增长平均增速将不小于20%。至2011年底,全球风电装机容量将高达2.4亿千瓦,年发电量达到5000亿千瓦时。风电电力比重将占全球电力供应的3%。从全球区域性发展来看,欧洲仍将占据装机容量的首位,近年来风电发展迅猛的亚洲将位列第二,超越北美。从风电装机容量角度预测,欧洲、亚洲和北美市场的风电装机容量可达到1.02亿千瓦、6600万千瓦和6130万千瓦,所占比重分别是42.5%、27.5%和25.5%。从上述分析中可以看出,亚洲的市场份额明显上升,其次是北美。作为风电发展的开拓者,欧洲在全球风电市场中的比重显著下降。中国和美国将成为亚洲和北美市场中增长最快、贡献最大的国家。全球风能理事会2006年发布的《2050年风电发展展望》中指出,风电在保持当前发展势头的前提下,21世纪中叶全球总装机容量将达到30亿千瓦,发电量可达到8万亿千瓦时。

从近几年来世界风电发展格局和趋势分析来看,主要有以下几个特征^[1]:

(1) 风电机组单机容量不断增大

为了提高对风力资源的利用效率,降低运营成本,增大单机机组容量是风电发展的一个必然趋势,如图1-2所示。

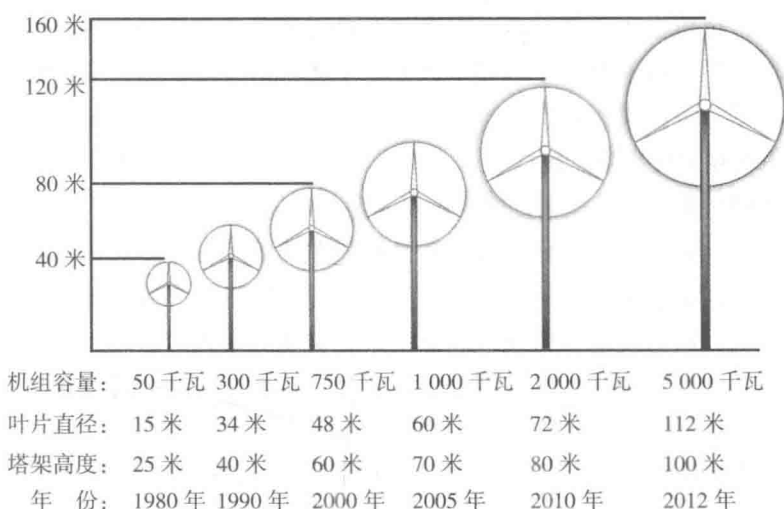


图 1-2 风电机组容量变化示意图

从图中可以看出,近年来主流机型的单机容量增大的速度不断加快,目前国外已着手研制单机容量为 12 兆瓦的大型机组^[7]。

(2) 风电发展向欧盟、北美和亚洲三驾马车并驾齐驱的格局转变

欧盟仍是目前风力发电产业发展的中心。欧盟风电发展规划中提及的发展战略为:截至 2020 年,欧洲风电装机总量应达到 1.8 亿千瓦,而发电量增加至 3 600 亿千瓦时,电装机容量为 20%,风电发电量比重为 12%;截至 2030 年,欧盟风电装机总量突破 3 亿千瓦,发电量增为 6 000 亿千瓦时,电装机容量为 35%,风电发电量比重为 20%。与此同时,美国、中国和印度近两年风电的发展势头正劲,尤其是美国和中国。2010 年两国计划装机容量将达到 1 000 万千瓦。业内人士普遍认为,由于政策推动和市场需求等多方面因素的影响,欧盟、北美和亚洲三驾马车并驾齐驱的这一格局还将维持相当长的时间。

(3) 风电技术发展迅速,成本持续下降

全球风能理事会最近也对风力发电的成本进一步下降进行了研究,促成风电成本不断下降的原因可以归结为:60% 依赖于风电的规模化发展,另外 40% 依赖于技术进步。并且,随着风电技术的日臻成熟,依靠技术进步带来的成本下降将逐步减轻,更多的是依赖于风电产业规模化、系列化和标准化带来的成本削减。据全球风能理事会估计,截至 2020 年,风机总体造价将出现大幅度的下降,其中陆上风机的总体造价可降低 20%—25%,海上风机的造价可缩减 40% 以上。与此同时,风电发电成本可以同比例缩减。

(4) 政府支持仍然是欧洲风电发展的主要动力

一方面, 风电成本不断缩减, 以至于在风力资源良好的应用场合中, 计算其环境成本条件下, 风电具备了与煤电以及油电抗衡的资本。但另一方面, 由于风电受气候、季节等因素影响, 若想达到顺利发展和不断壮大的目标, 还需要各级政府积极出台相关政策予以扶持。

(5) 中国是未来世界风电发展最重要的潜在市场

近年来, 随着我国经济的飞速增长, 对能源的需求日益提高, 有限的能源和不断提升的发展需求形成了一定的矛盾。为了缓解能源压力以及实现对环境 and 生态保护的目的, 风力发电成为新型能源中最受关注的形式。尽管目前我国风电比重较低, 但其发展态势已被世界风电制造商和开发商认作全球最有发展前景的市场。努力扩展我国风电市场, 已成为其发展战略中不可或缺的一个方向。

总之, 发展风电已不再是各个国家在可持续发展道路中的一个“政治标语”, 而是落实为能源战略版图中的一个重要环节。进军风电产业, 在获得良好的社会效益的同时, 也着实能为企业获得丰厚的经济效益。因此, 风电产业已成为资本市场和能源产业战略争夺的一个重要战场, 还是各个国家经济结构调整的一个重要方向。

1.2.2 风电变流器的发展与现状

风电变流器 (Wind Power Converter) 是风电机组中最为关键的核心设备之一, 是将风能转化得到的机械能进一步转变为电能的桥梁。通过相应的控制手段, 将发动机发出的电能, 变化为频率、幅值和相位均与电网一致的电能。目前实际应用的风电变流器均采用变速恒频技术手段, 即控制变流器使得风速在一定范围内变化时, 发电机能发出稳定、优质的电能。根据机组采用的发电机的不同, 风电变流器可以主要分为双馈式风电变流器和全功率式 (直驱型) 风电变流器。虽然变流器在机组中成本所占比例较低, 一般小于 7%, 但目前市场国产化率却不足 10%。在我国风电变流器市场中, 市场占有率排名前三位的是 CONVERTEAM、ABB、EMERSON, 由此可见, 国内变流器企业在面临良好的机遇的同时, 也面临着巨大的挑战, 可谓任重道远^[8]。

近年来, 随着风电机组单机容量的不断攀升, 变流器的研发和生产主要有以下几个特点:

1.2.2.1 新型大功率器件的运用^{[9][10][11]}

随着各种新结构和新工艺的引入, 功率器件的性能不断得到提高和改善, 更

高电压、更好开关性能的大功率器件的出现,有效地降低了变流器的故障率和成本。当前新型大功率器件主要有 IGBT 和 IGCT。

新型大功率器件 IGCT 具有损耗低、开关速度快、内部机械部件少等优点,可以以较低的成本,结构紧凑地、可靠且高效率地用于 300 千伏安—10 兆伏安变流器,而不需要串联或并联。但是,IGCT 仍属于 GTO 系列的延伸,其门极驱动电路中包含驱动用 MOSFET 和诸多储能电容器,功率损耗较大,影响了系统的总效率。

IGBT 作为新型大功率开关器件,具备了以下优点:工作频率高,低开关频率;无缓冲电路;内部电流限制,无输出滤波器;简单的门极触发,高可靠性,模块化设计,使其在变流器及要求快速、低损耗的领域得到了广泛应用。

1.2.2.2 变流器新型拓扑结构的研究^[11]

随着风力发电机的单机容量越来越大,更多的风力发电拓扑正在被研究和开发。目前,双馈式风力发电机仍占主流,然而直驱式风力发电机以其固有的优势也逐渐受到关注。此外,风电变流器拓扑结构改进的另一个重要原因是受功率器件材料的耐压极限和制作工艺的限制。由于功率器件的容量有限,在大容量机组中,存在控制性能与减小损耗和降低电磁干扰之间的矛盾。

针对双馈式风力发电机而言,转子电能需要实现的双向流动,因此变流器应具备四象限运行能力。目前,可用于双馈式电机的变流器的拓扑结构主要有循环变流器(Cycloconverter)、矩阵变换器(MC)和交直交变流器(AC-AC-AC converter)三种类型。

1. 循环变流器

该拓扑形式的变流器是把电网工频交流电直接变换成频率电压可调的交流电。其优点可概括为:(1)省略去了中间储能环节,提高了变换效率。(2)功率器件多使用晶闸管,可满足更大的容量需求;由于其自然环流工作方式,使得可靠性较为提高。(3)功率器件的开关频率较低,开关损耗较低。然而,由于其谐波较大,在实际产品设计中鲜有采用。

2. 矩阵变换器

采用矩阵变换器结构实现双馈式风电变流器,可以省略直流储能元件,还可避免循环变流器谐波大的缺点,因此受到了一些学者的关注。但由于其可靠性问题,限制了其在实际场合中的进一步应用。

3. 交直交变流器

按照其中间储能环节的不同选择,交直交变流器通常可分为电流源型变流器和电压源型变流器,前者选用电感作为储能元件,而后者使用电容。

相对而言,电压源型交直交变流器的应用更为宽泛。

1.2.2.3 适用于高电压等级的变流器的研制

近年来,随着风电机组单机容量的不断攀升,风电变流器市场需求日益加大,风电变流器的电压等级也在不断提高,因此多电平变流器拓扑得到了广泛关注。变流器采用多电平后,可以在常规功率耐压基础上,实现高电压等级,获得更多级的输出电压,使波形更接近正弦,谐波含量少,电压变化率小,并获得更大的输出容量^[11]。

从上述分析可知,风电变流器又是风电整机的核心设备,风电变流器的技术水平在一定程度上标志着风电行业的技术水平。产品试验是变流器研发的重中之重,也是产品完善的关键环节,风电产品必须要进行风场试验才能不断地发现新问题并加以改进,以确保产品的性能。变流器是整个风力发电系统的中间环节,要想实现变流器的规模化生产,必须搭建一个完整试验平台,才能满足变流器出厂测试的需要。而由于大部分企业没有很强的试验能力,一定程度上导致了目前国产变流器产品性能上与国外产品差距仍然比较明显,尤其不少厂家在变流器的保护(即持续稳定运行性能)方面的确有待加强。

1.2.2.4 海上风电变流器的研制^{[12][13]}

随着风力发电的迅速发展,地面风力发电受到资源的限制,将风力发电机组从陆地移向海面已经成为一种新的趋势。基于可关断电力电子器件和 PWM 技术,结合海上风电场长距离直流输电的特点,目前海上风电柔性直流输电变流器的研究已成热点。

以 VSC 和 IGBT 为基础的轻型 HVDC,把 HVDC 的经济容量延伸到几兆瓦和几百兆瓦。轻型 HVDC 系统具有常规 HVDC 的优点,还可直接向小型孤立的远距离负荷供电,更经济地向市中心送电,便于连接分散,运行控制方式灵活多变,减少了输电线路电压降落和电压闪变,有助于进一步提高电能质量等。

为了满足海上风电场发展的需要,应综合考虑风负荷、波浪负荷、冰负荷以及腐蚀、水深、海底情况的基础结构设计适合的变流器。

1.2.2.5 电网故障情况下变流器的控制策略的改进

在电网故障导致极端电压骤降时,由于风力发电机的转子侧励磁换流器容量较小,承受过电流和过电压的能力有限,因而在电网故障导致机端电压骤降时,必须关注转子侧换流器的过电流和伴随的直流环节过电压,以防危害风电机组核

心部件的安全。从制造成本的角度出发,最佳的办法是不改变系统硬件结构,而是通过修改控制策略来达到相同的低电压穿越效果^[14]。

自2006年以来,我国开始大规模、强力度地扶植风电变流器科研和生产。表1-1列出了近年来国内风电变流器行业的相关政策^[8]。

表 1-1 中国风电变流器行业相关政策

时间	政策	颁布单位	主要内容
2008 年	《国防科技工业风力发电装备产业发展指南》	国防部	以关键技术的突破和掌握作为产业发展的基础和动力,以高技术含量和高附加值作为产品研发的目标与追求,2015 年前建成 2—3 个处于国内领先水平重点整机制造企业。
2009 年	无	发改委	为了减少进口,鼓励自主研发,《鼓励进口技术和产品目录》中,“2 兆瓦以上风电设备制造”从“鼓励发展的重点行业”中删除。
2008 年	更改大容量风力发电机组及其相关零部件和原材料进口税收政策的措施	财政部	国家将对国内企业自主研发、生产大功率风力发电机组而进口的关键元器件、特殊材质所缴纳的进口关税和进口环节增值税实行先征后退
2008 年	《风力发电设备产业化专项资金管理暂行办法》	财政部	中央财政将安排专项资金支持风力发电设备产业化。

表 1-2 总结了国内风电变流器研发状况。

表 1-2 国内风电变流器研发概况

年份	名称	研究机构
2010 年	三电平风电变流器	北京洲能科技有限公司
2009 年	谐波注入型直驱式风机变流器	东南大学

续 表

年份	名称	研究机构
2008 年	风力发电系统的背靠背飞跨电容变流器	中国科学院电工研究所
2008 年	海上风电柔性直流输电变流器控制系统	上海交通大学
2008 年	用于风力发电系统的五电平 H 桥级联背靠背变流器	中国科学院电工研究所
2007 年	兆瓦级风力发电用双级矩阵变流器	天津大学
2007 年	兆瓦级直驱式风电并网变流器	哈尔滨九洲电气股份有限公司
2007 年	兆瓦级风力发电用全功率并网变流器	哈尔滨九洲电气股份有限公司
2007 年	兆瓦级直驱式风电并网变流器	哈尔滨九洲电气股份有限公司
2007 年	风力发电系统的背靠背变流器及其环流控制方法	中国科学院电工研究所 北京科诺伟业科技有限公司
2006 年	风力发电用双馈型交直交变流器的控制结构	合肥阳光电源有限公司
2006 年	风力发电用全功率型交直交变流器的控制结构	合肥阳光电源有限公司

备注：资料来源——恒州博智风能研究中心 2010.3

表 1-3 为国内风电变流器生产企业概况。

表 1-3 国内风电变流器生产企业概况

国内主要生产企业	主要产品
北京清能华福风电技术有限公司	1—3 兆瓦变速恒频双馈异步风力发电机组和永磁直驱风力发电机组中的各种大功率变流器
北京科诺伟业科技有限公司	双馈式 KN-CVT-850-DF、KN-CVT-1500-DF、直驱式 KN-CVT-1000-DD、KN-CVT-1500-DD、KN-CVT-2000-DD
国电龙源电气有限公司	2009 年正式投产
北京能高自动化技术有限公司	兆瓦级风电机组全功率变流器
合肥阳光电源有限公司	全功率变流器：850 千瓦、1.5 兆瓦、2 兆瓦 双馈变流器：1 兆瓦、1.5 兆瓦、2 兆瓦、3 兆瓦

续 表

国内主要生产企业	主要产品
天津瑞能电气有限公司	—
哈尔滨九洲电气	PowerWinvert TM 风力发电变流器
重庆科凯前卫风电设备有限公司	—
鞍山容信电力电子股份有限公司	—

备注：资料来源—恒州博智风能研究中心 2010.3

除了上述企业外，国内一些变频器、变流器、电源生产企业都在关注该领域，例如南京冠亚电源、许继电气、南车时代等。2010 年，左右国内瓦级风机变流器的产能可以达到 3 000 套左右。由于多数企业将产品定位在 1.5 兆瓦，按照该产品级别计算，预计兆瓦级风电变频器产能将达到 4 500 兆瓦左右。随着风电行业产能的扩大，风电行业的变流器产品也开始扩大需求，中国新能源战略开始把大力发展风力发电设为重点。随着风电机组容量的扩张，风电设备对变流器的要求越来越高。另外，国产化是风电行业的重要趋势。国产变流器厂商若要在风电领域占有一席之地，也要加强和提高自己的技术水平，才可以与国外变流器厂商在风电行业展开激烈竞争。变流器产品是风电设备的重要组成部分，整个行业的自动化产品市场也有几个亿的空间，并且，风电行业的快速发展，直接带动了变流器产品在该行业的市场容量。未来兆瓦级风机将成为市场上的主流机型，预计 2012 年左右将占到装机容量的 70% 以上。按照 6 000 元 / 千瓦的转机成本计算，风机变流器占总成本的 7.6%，2012 年 2 兆瓦风机变流器的市场规模将达到 40 亿元左右^[8]。

1.2.3 双馈式风电变流器发展与现状

双馈风力发电的原理结构如图 1-3。当机组发出启动信号后，风机叶片随风速变化通过传动装置带动双馈电机转动。通过对接入双馈电机转子回路中的变流器的控制，可实现定子发出电压的调节。当定子电压跟踪电网电压至一定的误差范围后，可实现并网操作。风机主控系统将根据风速变化发出相应的功率给定信号，实现对发动机有功功率和无功功率的解耦控制。由于双馈式风电变流器可实现能量双向流动，在发动机不同转速时，转子中的转差功率将流入或馈向电网。若机组需要对电机转速实现控制时，可通过变桨系统对转速进行调节。网侧变流器采用可控整流，因此可实现对功率因数的控制，从而保证了供电质量，实现“绿色”发电。

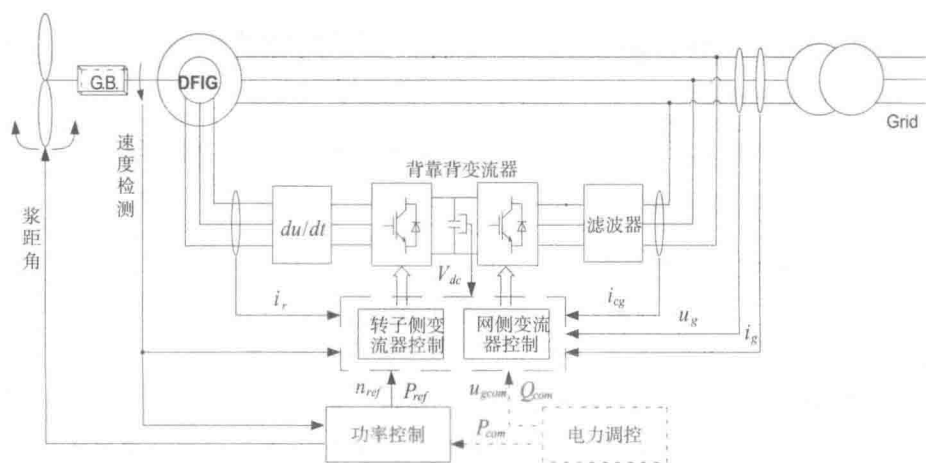


图 1-3 双馈风力发电的原理结构

目前，双馈式风电变流器的发展主要体现在以下几个方面：

(1) 变流器拓扑结构的改进

表 1-4 为双馈式风电变流器拓扑结构技术现状。

表 1-4 双馈式风电变流器拓扑结构概况

变流器类型	特征类型	控制技术	备注
背靠背式	电压源型变流器	PWM	成熟技术
背靠背式	电流源变流器	PWM	未验证技术
串联式	电流源整流器 + 电压源变流器	PWM	未验证技术
矩阵式	—	PWM	未验证技术
多电平	电压源型变流器	PWM	成熟技术
谐振式	电压源型变流器	PWM	未验证技术

本课题采用先进的背靠背三电平二极管钳位拓扑结构，如图 1-4 所示。