

风力发电技术的应用研究

唐嘉悦¹, 张雁²

(巴中职业技术学院, 四川巴中 636000)

摘要: 本文从当前能源问题出发, 介绍了风力发电的研究背景及其意义。从对风的描述来引出风能, 讲述了风能近年来的发展历史, 进而详细阐述了风力发电的原理。从不同的角度和标准, 将风力发电系统划分成多种类型。本文从机组容量大小、风力发电机的运行方式、风力发电机风轮轴的位置、输出功率的调节方式以及变频器功率变流技术等多个方面, 描述不同的风电系统所具备的性能以及优缺点。然后阐述了我国风电产业当前的发展规模, 包括各大风电基地的建设情况和风电产业所应用的情况。风力发电技术发展的现状, 同时分析了目前风力发电所存在的问题。最后本文叙述了当前风力发电技术正在面临的问题, 并提出了解决措施。

关键词: 风能, 风力发电, 风电系统, 风电并网

1 研究背景以及意义

1.1 风力发电的研究背景

1.1.1 能源危机的出现

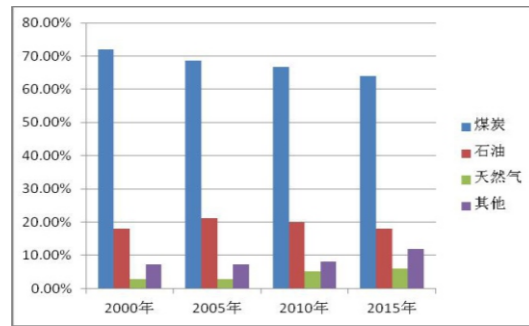
当今世界能源危机所带来的问题和影响早已席卷全球。尽管可再生能源的应用区域仍然在持续增加, 但从当下情况来看, 传统意义上的化石能源仍然占据了绝对重要的位置, 其社会需求仍然节节攀升。最为重要的是现今世界上使用的主流能源的储量有限, 伴随着长时间无节制的开采和数量巨大的消耗, 煤炭、石油与天然气这些不可再生的化石燃料其所拥有的储量正在急剧下降。并且现目前所拥有的能源开发设备与手段仍然不够先进, 在开采过程当中会伴随大量能源消耗浪费的现象。面对日趋匮乏的能源原料和不断增加能源供给, 人类必将面对能源危机带来的严峻挑战。

1.1.2 环境污染严重

按照统计近二十年以来我们国家的能源使用组成。通过表1.1可以得知, 我们国家能源使用的主体仍然是煤炭, 其消耗比例占总体能源消耗比例的70%。而大量消费使用煤炭, 使煤炭燃烧利用后释放出的CO、CO₂、SO₂、NO₂粉尘等物质污染了大气环境, 导致多数城市空气质量变差, 居民生活环境受到影响。

作者简介: 1.唐嘉悦(1996.01-), 女, 四川巴中人, 巴中职业技术学院专任教师, 能源与动力工程, 数学。2.张雁(1990.08-)男, 四川巴中人, 巴中职业技术学院专任教师, 研究方向: 通信工程、计算机科学技术、风力发电。

表1.1 我国能源消费结构图



据估算,全国烟尘排放量的70%、SO₂排放量的90%、CO₂排放量的70%都来源于煤炭的燃烧[1]。而出现酸雨的主要原因也是燃煤电厂排放的SO₂和氮氧化物。把煤炭当做主要消费能源的模式给我们的环境带来的污染不容小觑,不仅是对大气的污染,也对人类的日常生活和身体健康带来了恶劣的影响。

1.2 风力发电的研究意义

为缓和当前全球性能源危机问题,以及降低大量使用化石燃料所带来的对环境的破坏情况,人们必须考虑采用新兴能源降低对自然环境的伤害。

风能是干净的可再生能源。可通过充分开发利用来降低对化石燃料的使用和消耗。同时也迎合了国家对能源改革的政策和方向,实现固体、气体零排放。

2 风力发电技术

2.1 风力发电原理

风力发电是通过风轮机将风能转换为机械能,从而带动发电机发电的过程[2]。

如图2.1所示,为基本的风力发电原理图。风力发电机主要包括两大部分,一是风力机,二是发电机[3]。其基本原理是通过风力吹动浆叶转动,获得一个旋转的动力,通过齿轮箱加速,将动力传送给发电机后进行发电。风力机是将风能转换为机械能,而发电机是将机械能转换为电能[4]。

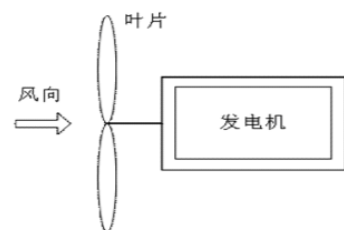


图2.1 风力发电原理图

当前的风力发电技术是只要风速达到3m/s就可以进行发电。风力发电因为原材料简单且无污染,不会产生任何的辐射或空气污染,并且取材方便,拥有着数不清的优势,所以取得了许多国家的推广和使用。

2.2 风力发电机的基本结构

在传统的风力发电机中,主要部件包括风轮、机舱、发电机、增速器、储能装置及相关控制器。其结构图如2.2所示。

- ①轮毂: 连接着浆叶根部和主轴,可以控制叶片桨距。
- ②增速箱: 将缓慢的转速通过齿轮比来带动小扭力驱动的发电机,让转速维持需要的输出频率。
- ③机舱罩: 保护风力发电机组的内部组件。
- ④联轴器: 保护电机。
- ⑤电控系统: 完成对风电机组的偏航控制、功率控制、开停机控制。
- ⑥发电机: 将风轮的机械能转化为电能。
- ⑦冷却器: 保护风电机组不被烧坏。
- ⑧泵站: 可提供一定的压力与动力。
- ⑨偏航驱动: 驱动风轮,使浆叶始终保持迎风状态。
- ⑩偏航制动: 使风轮减速或停止运转,保障机组安全运行。
- ⑪偏航轴承: 连接驱动装置和制动装置。
- ⑫底座: 保持各部件的稳定。
- ⑬弹性底座: 保护底座不被形变。
- ⑭叶片: 捕捉风能,决定风轮的转速。

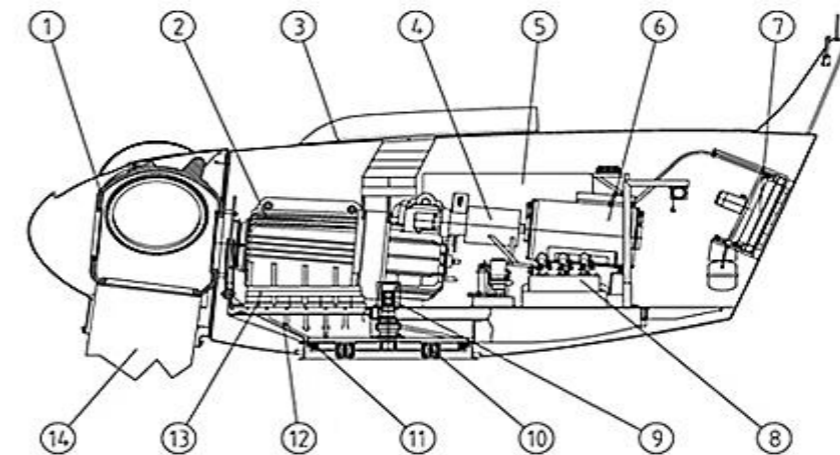


图2.2 风力发电机结构图

风力发电机种类繁多，可根据浆叶数量、浆叶的工作原理、风力机的容量、风轮轴的位置等多个标准划分为多种的风力发电系统。本文按照以下几个标准，叙述了不同种类的风力发电系统的运行原理以及优缺点。

2.3 风力发电系统

如图2.3所示，典型的风力发电系统通常由风能资源、风力发电机组、控制装置、传动系统、液压系统、偏航系统、制动系统、控制系统、蓄能装置以及电能用户组成。

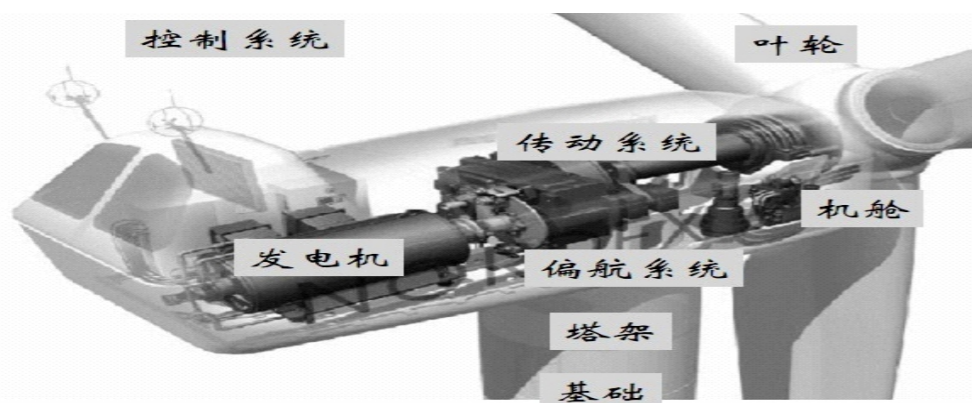


图2.3 风力发电系统图

各系统的工作原理及在风电系统中主要功能如表2.4所示。

表2.4 风力发电各系统功能

系统名称	系统的主要功能
传动系统	主要包括低速轴、高速轴、齿轮箱、联轴器等。风轮与发电机的连接纽带。通过齿轮箱，风轮的低转速才能使发电机以接近额定的转速旋转，达到并网发电的目的。
液压系统	为变矩机构和制动系统提供动力来源。
偏航系统	使风轮的扫掠面始终与风向垂直，使风轮一直处于迎风状态，以最大限度地提升风轮对风能的捕获能力，并同时减少风轮的载荷，可以有效的提高发电效率。
制动系统	使风轮减速和停止运转的系统。
控制系统	控制系统包括控制和监测两部分。监测部分将采集到的数据送到控制器，控制器以此为依据完成对风力发电机组的偏航控制、功率控制、开停机控制等控制功能。

2.3.1 按机组容量划分

- (1) 小型机组：机组容量为0.1—1 kW
- (2) 中型机组：机组容量为1—1000 kW
- (3) 大型机组：机组容量为1—10 MW
- (4) 特大或巨型机组：机组容量为10 MW以上

2.3.2 按风电机运行方式划分

(1) 恒速恒频(constant speed constant frequency, CSCF)风力发电系统

恒频即是当风力发电机的频率与电网频率在并联运行情况下相同。恒速恒频风力发电机结构图如图2.5所示，基本原理为：在发电过程中，使发电机的转速不变，从而得到不变的频率^[5]。这种发电方式具有性能可靠、控制技术简单的优点。但恒速恒频发电机有着很多根源性问题，如：风能利用率低、输出功率低、导致发电效率也降低等。

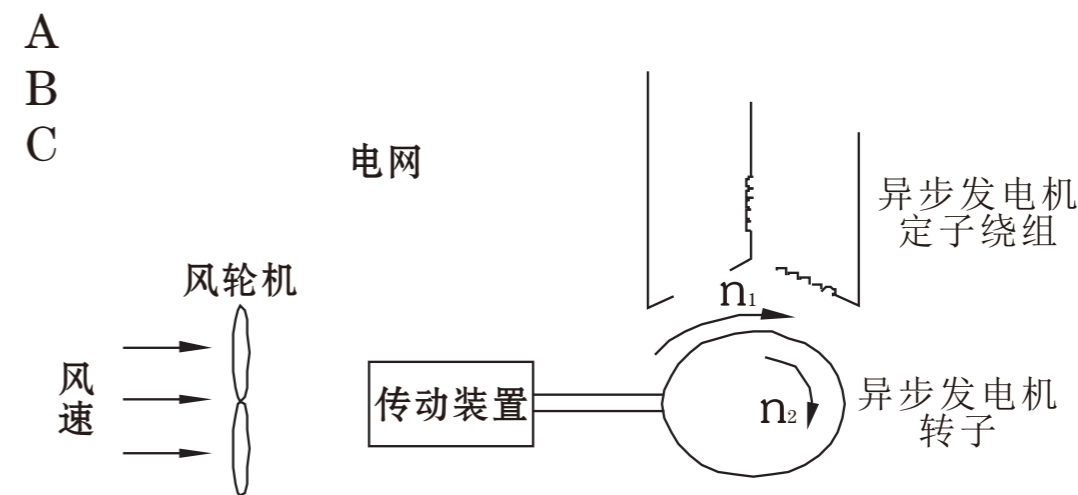


图 2.5 恒速恒频风力发电系统

(2) 变速恒频(variable speed constant frequency, VSCF)风力发电系统

变速恒频风力发电系统基本原理是：在风力发电过程中，发电机的转速可以随风速的变化而变化，再通过其他控制方式来得到恒定的频率^[6]。该系统通过调节发电机转子电流的大小、频率和相位，也可以通过控制变桨距，从而调节转速，使叶尖速比达到最完美，然后尽可能的高效将风能转化为电能。同时又可以采用一定的控制策略灵活调节系统的有功、无功功率，抑制谐波，减少损耗，提高系统效率，因此可以

大大提高风电场并网的稳定性^[7]。这种发电系统方式较多，如图 2.6图 2.7图2.8 所示，为其中几种形式。

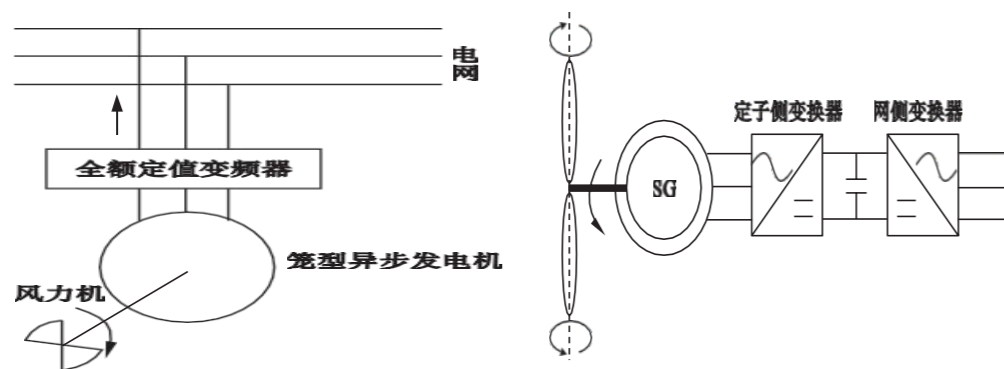


图 2.6 笼形一步异步电机变速恒频系统 图 2.7 无齿轮箱变速恒频系统

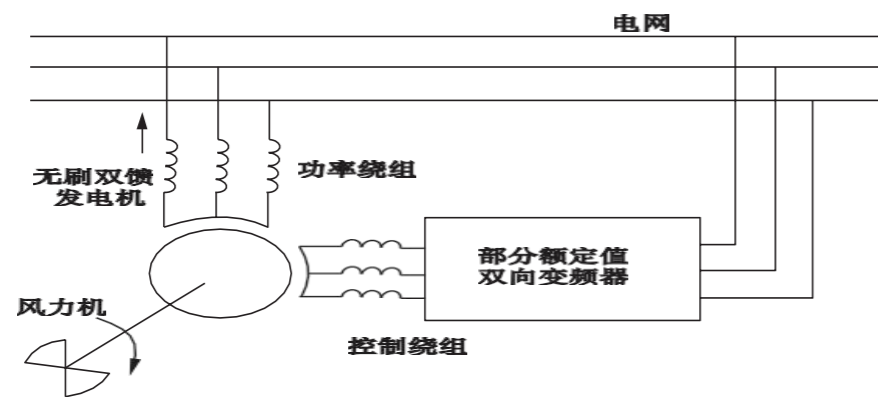


图 2.8 无刷双馈发电机变速恒频系统

2.3.3 按风电机风轮轴的位置划分

(1) 垂直轴风力发电机

垂直轴风力发电机 (vertical axis wind turbine VAWT) 发明于20世纪30年代，垂直轴风力发电机的传动链是在垂直方向上，主要包括w为阻力型和升力型。如图2.9所示，为垂直轴风力发电机。



图2.9 垂直轴风力发电机

第一类代表型，阻力型风轮机(Savonius 式风轮)，叶尖速度比小于1。它由两个轴交错的半圆柱体构成，其外形为S型风轮，如图2.8所示，主要是利用空气流动产生的阻力作为驱动力，主要优点为运行时转矩大。

第二类代表型，升力型风轮机(Darrieus 式风轮)，拥有着高达6的叶尖速比。风能利用率与水平轴的不相上下。常见有菱形、Y 型、H型(如图2.10所示)、Φ型(如图2.11所示)等多种类型。



图2.9 S型



图2.10 H型



图2.11 Φ型

表2.12 各类型风轮机的性能比较

风轮机类型	S 型	H 型	Φ型
主要功能	风力机叶尖速比较低，结构简单，自启性能较好，空间需求不大，成本低。	风力机叶尖速比较高，结构多样化设计，较为复杂，自启性能差，空间需求大，需要横杆及拉索支撑。	风力机叶尖速比较高，弯叶片只承受张力，没有离心载荷，因而弯曲应力小，自启性能差，空间需求大，叶片质量轻，运行速度快。

由表2.12可以看出，不同外形的风轮机拥有着不同的性能。在不同的条件下考虑，有着多种可以提供参考的意见。比如：从叶尖速比考虑，叶尖速比越高，叶片转动的越快，噪音就越大，反之噪音越小。从所需要空间大小考虑，如果可用空间大则可采用H型或者Φ型，如果可用空间小则可采用S型。

(2) 水平轴风力发电机

水平轴风力发电机可以分成升力型风力发电机和阻力型风力发电机[8]。它主要由旋转载、叶片、风力风向传感系统和发电机等原件组成。水平轴风力发电机可以集中气流，增加气流速度。由于水平轴风力发电机现在的技术较为完善和成熟，是目前应用最多最广的风力发电机。



图2.13 水平轴风力发电机

水平轴风力发电机有很多不同种类的样式，但大多都是如图2.13所示，其结构包括塔体和塔体顶部的翼舱以及浆叶，翼舱里有发电机、变速箱和转子等。风轮的浆叶片数一般为2~3片，叶片的外形一般为翼型 [9]。结构图如2.14所示。该类风电机启动力矩较大，可以很好很充分的利用风能。

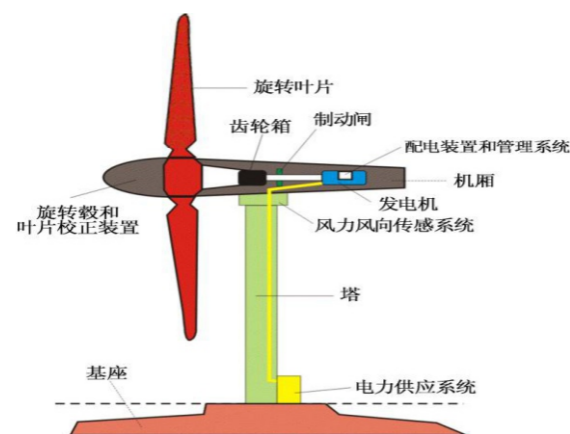


图2.14 水平轴风力发电机的结构图

由表2.15可观察到垂直轴与水平轴在某些方面的对比，更直观的了解两种发电机的优缺点。

表2.15 垂直轴风电机与水平轴风电机的对比

	风能利用率	起动风速	结构特点	叶尖速比
垂直轴风力发电机	40% 以上	2m/s	发电机可以安装在风轮的下部或是地面，维护维修方便	叶尖速比为1.5~2噪音较小
水平轴风力发电机	23%~29%	4~5m/s	发电机置于几十米的高空，安装和维护检修十分麻烦	叶尖速比为5~7，噪音较大

2.3.4 按输出功率调节方式划分

(1) 定桨距失速调节型

定桨距失速调节是固定叶片和轮载，使桨距角恒定。定桨距大多数应用于恒速运行，是传统丹麦风电技术的代表。

定桨距失速调节系统实现叶片的制动叶尖扰动，并结合自己的燃气叶片转速函数实现风机的动态特性。由于桨距角固定，所以当风速变化时，桨距角不会随着风的变化而变化[10]。当风速高于额定风速时，气流角达到失速，导致叶片表面产生涡流，发电机组效率变低，限制了发电机的功率输出。

失速调节方式的优点是功率调节简单，但叶片过大，使结构和成形过程复杂。

(2) 变桨距调节型

变桨距调节是通过控制轮载上的叶片来改变桨距角的大小，是由定桨距失速调节发展衍生过来的[11]。变桨距风力发电机的叶片和轮载不再固定，使风力发电机的桨距角随风速的变化而变化，保持输出功率在额定值附近[12]。

当机组条件达到标准时，系统将调节桨距角到45度，当转速恒定时，再调节回0度，直到风力机达到额定转速并网发电[13]。当输出功率小于额定功率时，使桨距角稳定为0度，不进行其他调节；当输出功率高于额定功率时，系统将根据输出功率的变化来调节桨距角的大小，使输出功率恒定[14]。

变桨距调节可以减少桨叶的受力，节省叶片制造材料，有效降低单位重量以及设备成本，桨距角可以根据风速自动调节，使风能转换率较高。其劣势是结构较为复杂，故障率高导致维护维修成本增加。

2.3.5 按变换器功率变流技术划分

(1) 交—交变换系统

交—交变换器可以四象限运行，其功率可以双向流动，大大的增加了工作效率。该系统由三组可逆整流电路组成，它是四象限变流器。

但这种大电流谐波转换器，开关必须吸收操作中的反应质量，所以功率因数低。大量的组件，以及转换器输出端需要隔离变压器，导致系统结构复杂，风电系统的应用受到限制。

(2) 交—直—交变换系统

交—直—交系统利用的是二极管不可控整流，为电压源型逆变器，输入电流畸变谐波增大，并且能量不能双向流动[15]。

该类变换器通常采用双脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM)。工作时，输出电流的谐波含量小，结构简单，功率因数可调，是目前大多数工程领域中应用最为广泛的变换器。然而，由于输入电流是非正弦波形电流，功率因数低，对电网谐波的影响。与交—交系统相比，该系统没有四象限的特点，设备越来越复杂，成本高，易损坏，导致系统可靠性差。

(3) 混合式变换系统

混合式变换系统是由电压型和电流型两种转换系统并联运行[16]。混合式系统操作方式灵活多变，不受其他因素影响，并且输出功率也很高。然而，这种类型转换器需要大量的功率器件和复杂的拓扑结构，这导致硬件的成本过高和控制系统设计的难度太大。

3 风力发电技术的发展趋势

3.1 我国风电产业的发展规模

3.1.1 建设成果

到2012年底，全国(不包括香港、澳门和台湾)建立了1445个风力发电场，吊装风电机组52827台，全国累计风电吊装容量70.21GW[17]。

统计显示，风电装机在2006年至2009年连续保持双增长，已进入平稳较快发展阶段。如表3.1所示，为近年来，风电容量的增长与累计情况(单位：万千瓦)

表3.1 2000-2012年风电新增、累计并网容量以及年增长率

年份	新增	累计	年增长率
2000	7.73	34.11	29.30%
2001	4.17	38.28	12.23%
2002	6.57	44.86	17.16%
2003	9.83	54.69	21.91%
2004	21.59	76.27	39.48%
2005	50.61	126.88	66.36%
2006	139.94	266.82	110.29%
2007	336.08	602.90	125.96%
2008	614.37	1217.27	101.90%
2009	549.73	1767.00	45.16%
2010	1364.00	3131.00	77.19%
2011	1653.00	4784.00	52.79%
2012	1482.86	6266.45	31.00%

3.1.2 应用情况

(1) 酒泉基地

酒泉风电基地的300万千瓦风电项目包括8个项目，建设地点在酒泉市瓜州县、玉门市和肃北县，整个项目在2012年九月由国家发改委批准，已经在“十二五”底完成。

(2) 通辽开鲁基地

通辽开鲁基地在2008年经国家批准，共有5个总容量为150万千瓦的项目。目前，该项目已获得批准，已连接到90万千瓦，其中北清河特许项目已经完成，其他项目正在建设中，在2013年已经完成投产。

(3) 巴彦淖尔乌拉特中旗百万基地

该基地由10个风电场项目，总容量为210万千瓦。目前，国家已批准更多的伊犁乌兰国家特许项目，容量为30万千瓦。到2009年底，该项目已全部并网，其他9个项目已完成，已经在2013年批准。

(4) 新疆哈密风电基地

新疆哈密东南部风电基地200万千瓦风电场一期工程由10个项目组成，由中国新疆能源投资有限公司等10家企业投资建设，2012八月通过国家发改委批准。

各基地建设情况汇总如表3.2所示。

表3.2 各基地建设情况汇总表

基地名称	规划	核准	并网	在建
酒泉一期	380	380	380	0
酒泉二期	300	300	0	300
通辽开鲁	150	150	90	60
乌拉特中旗	210	30	30	0
包头达茂	160	160	20	140
张北一期	135	135	135	0
张北二期	165	60	50	10
承德	100	85	60	25
哈密东南部	200	200	0	200
合计	1800	1500	765	735

3.2 风力发电技术面临的问题

3.2.1 风电盈利效果薄弱

受着环境、季节的影响，陆地上优质的风电资源越来越少，盈利水平也就会逐渐降低。尤其是各地方政府、各投资企业对于风电事业期望值较高，导致成本不断增加。而且不久的将来大批风电机错过了质保期，维修维护成本将是一笔不小的数目。成本不断攀升，而收益却停滞不前。种种因素使风电事业未来的盈利效果将更加不佳。

3.2.2 风电基地的选址困难

风力发电机的正确选址是风电事业的基础，合适的地址不但可以降低投资成本，并且可以降低机器的维护维修成本，避免事故的发生。选址需要考虑的问题不仅是风能情况，还应该考虑其他自然环境的影响，比如：雷击、冰雪、沙尘等。

然而就我国目前的国情而言，寸土寸金。符合条件的土地上少之又少，如果要在这样土地上建立起大批的风力发电机，建设成本将大大提高。

3.2.3 风力发电机对环境的影响

我们可以忽略风能利用中所用材料在生产过程中对环境的污染，虽说通常风能利用是没有污染的，但由于人们对环境的保护要求越来越高，我们不得不重新审视环境污染所包含的范围。例如：

- (1) 风电机的噪声；叶片高速转动产生的噪音是无可避免的，长期性下去对人类的生存、生活环境造成了很大的影响。
- (2) 对鸟类的伤害；浆叶在高速转动时，所造成的的力是非常大的，如果鸟类不小心碰到正高速运转的叶片，将会被造成不可避免的伤害。
- (3) 对景观的影响；风电机的大批建设占用大量的土地，并且使景

观不美好。

(4) 对通讯的滋扰；风力发电机组所产生的磁场会对通讯造成一定的影响，所以一般在风电基地的通讯设备信号都不好。

3.3 风力发电技术的研究方向

3.3.1 大力发展大型风电机组

随着风电技术的不断发展与完善，为提高风电产业的盈利效果。风电机组正在向大型机组容量发展，这也是提高风电收益的最佳方法。

大型发电机组可划分成两种发展方向，一是陆地发展，二是海上发展。陆地风力发电主要是并网发电，主要采用的机型是大小2兆瓦小于5兆瓦的机组。相比较海上风力发电而言，陆地的电网信号更好。海上风电采用的机型是5兆瓦以上的大型机组，海上风力发电的优势凸显于海域辽阔，不占土地，并且风力资源丰富，有效的降低了建设成本。

3.3.2 用于风电场的储能技术

风力发电虽然在经济以及技术等方面还存在着某些的问题，但是风电场的储能技术可以有效的解决它们所出现的问题。显然，储能系统对维持电压频率的稳定起着重要的作用，风电场储能系统不仅能在很短的时间内进行能量的注入和吸收，而且可以将每15分钟内产生的风力进行大容量储能。

风电系统中拥有着很多种储能技术，如：机械储能、电磁储能、电化学储能等[18]。其中电化学储能系统依旧占着主导位置，该系统中包括锂(Li)电池、镍(Ni)电池以及铅酸蓄电池等储能技术。

3.3.3 海上风力发电

我国海上风力发电优势明显，可捕捉风量庞大，风力资源非常丰富。海上风电技术中涡轮发电机主要依靠的是离岸安装，这样不仅便于安装，节省更多的空间与时间，而且这样产生的风能比安装在海岸边发电机系统所产生的能量更多，质量也更好。

解决风电场和电动阀问题的低成本且简便的方法就是传统的热流空气调节系统，而高压直流输电(HVDC)接入电网技术可以连接风电场和电网，也可以将电能安全地输送到负荷中心，同时该技术拥有以下的优点：

- (1) 离岸安装与陆地的扰乱是隔离的，不会受到其影响；
- (2) 电缆功率损耗较低；
- (3) 接收端和发送端的频率是彼此独立不影响的；
- (4) 每根电缆的功率传输容量较大；
- (5) 系统功率流确定并可控；
- (6) 负载电流不受直流传输距离的影响。

5 总结

本文所做的主要工作如下:

(1) 在当前能源危机和环境污染严重的背景下, 阐述了国内能源的现状, 清晰的了解到风力发电主要目的与其研究意义;

(2) 从风的起源开始, 对风能的进行了概述, 进而阐述了风力发电的原理, 介绍了风力发电机的基本结构, 针对不同的标准划分为多种风电系统, 并分析不同种类的发电机运作的原理;

(3) 针对国内风力发电的研究现状, 分析了它们所存在的问题, 并找到对应的解决途径;

(4) 综合其问题与解决途径, 阐述了风力发电的发展方向与前景。

伴随着社会经济持续的稳定发展, 环境问题也面临着巨大的考验。研发出无污染、可再生的新能源是我们奋斗的方向和目标, 风能作为资源量巨大的新能源, 值得我们去进一步的研发和推广。本文虽然对其在理论上作了一些研究工作, 但总体来说还是较为肤浅, 在许多方面还有待学习, 挖掘新问题, 找到新答案。

参考文献:

- [1] 杨静. 应对生态危机建设生态文明[J]. 经济研究导刊, 2008.
- [2] 张云辉. 基于模糊免疫PID控制下的风电变桨控制研究[D]. 西南交通大学, 2013.
- [3] 高新宇. 北京市可再生能源综合规划模型与政策研究[D]. 北京工业大学, 2011.
- [4] 陈坤, 黄石红. 风力发电装置的机电安全保护功能[J]. 风机技术, 2010.
- [5] 胡婷. 大规模风电并网运行频率稳定与控制策略研究[D]. 华北电力大学, 2015.
- [6] 谷文俊. 风力发电趋势及风能变压器安装方式探讨[J]. 科技风, 2014.
- [7] 王志新, 张华强. 基于PSCAD的变速恒频双馈风力发电机组并网稳定性仿真研究 [J]. 机电化一体, 2009.
- [8] 丁睿. 风一蓄联合电站运行方式及其经济效益研究[D]. 兰州理工大学, 2012.
- [9] 赵利杰, 赵斌, 靳姗姗, 刘庆, 伏冯玉, 朝王超, 刘玉宝. 双动力驱动的轴流风机群节电分析[J]. 电站系统工程, 2013.
- [10] 李小林. 基于AMESim风机系统级建模与仿真[D]. 北京交通大学,

2012.

[11] 房泽平. 独立运行小型风力发电系统功率控制技术研究[D]. 内蒙古工业大学, 2008.

[12] 沈小骞. 风力发电机变桨距控制系统的研究[D]. 沈阳工业大学, 2011.

[13] 王昌存. 变速恒频双馈风力发电系统的研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2008.

[14]]李颖, 郑宁, 杨健, 邹炳燕, 陈宽. 变桨距风力发电机组液压系统分析[J]. 天津职业院校联合学报, 2013.

[15] 王志新张华强. 风力发电技术与功率控制策略研究[J]. 自动化仪表, 2008.

[16] 汪旭旭, 刘毅, 江娜, 段延芳. 风力发电技术发展综述[J]. 电气开关, 2013.

[17] 宋国强. 双馈风力发电机雷电电磁干扰研究[D]. 新疆大学, 2015.

[18] 陈芳. 风储系统功率平滑控制策略研究[D]. 华北电力大学, 2013.