

工 学 院 1 班 级 电 气 工 程 及 其 自 动 化 专 业 姓 名 徐 浩 宇 学 号 2018180140 (线) (封)

V

四川师范大学

本科课程考查专用封面

题 目： 基于永磁同步风力发电的冷电联供系统

所修课程名称： 新能源与微电网

所修课程时间： 2021 年 9 月至 2021 年 10 月

考查方式： 设计报告

考查日期： 2021 年 10 月 28 日

考查成绩：

考查意见：

1. 优秀：实习态度端正，无缺勤和违纪，勤奋，积极主动；实际操作能力强，理论联系实际好，实习单位平时考核成绩优秀，实习报告内容完整，格式正确。并能配合指导老师完成实习任务。
2. 良好：实习态度端正，无缺勤和违纪，积极主动；有较强实际操作能力，能较好完成实习任务，实习单位平时考核成绩良好以上，实习报告内容完整，格式正确。
3. 中等：实习态度端正，无缺勤和违纪，实习工作中有一定主动性；有一定实际操作能力，能较好完成实习任务，实习单位平时考核成绩中等以上，实习报告内容较完整，格式正确。
4. 及格：学习态度基本端正，实习期间工作积极性一般，无违纪现象；能基本完成实习任务；实习单位平时考核成绩及格以上。实习报告撰写基本符合要求。
5. 不及格：实习期间凡是满足下列行为之一者，均评定为不及格。（1）不服从带队老师和用人单位管理，无故不参加实习；（2）实习期间未经允许擅自离开实习单位；（3）实习期间严重违反实习单位规定；（4）实习期间有违法违纪行为。

按照学生实习情况，根据以上标准，对应实习成绩。

评阅教师签名：

年 月 日

目录

一、	课题背景及选题意义	2
二、	国内外研究现状及发展趋势	2
三、	风能发电原理以及我国风能的地理地域分布情况	3
	3.1 利用风能发电的基本原理	3
	3.2 我国风能的地理地域分布情况	5
四、	风能发电系统的组成	6
	4.1 风力发电系统结构	6
	4.2 风电机组结构框架	7
五、	四种风力发电系统的比较	8
六、	风电机组故障诊断研究现状	10
七、	能源储存和能源载体	11
	7.1 电解制氢技术	12
	7.1 氢的储存与运输	13
八、	冷电联供的案例分析	15
九、	实际应用展望:	16
	参考文献:	19

基于永磁同步风力发电的冷电联供系统

一、 课题背景及选题意义

常规能源终究有限，资源枯竭的窘境愈发明显，这就迫切需要找到一些无污染、可再生的替代能源，而风能就是一种清洁、安全的选择。较于太阳能和生物质能等新能源发电方式，风力发电成本较低、技术较成熟、对环境影响较小，最具大规模开发和商业应用的条件，因而受到世界范围内的普遍关注。

风能作为一种清洁和可再生能源被广泛接受，风能凭借着其建设周期短、环境要求低、储量丰富、利用率较高等特点在世界各国得到了持续快速的发展。如何充分地利用风能成为了热门研究方向。风力发电以其技术成熟、成本较低和大规模开发利用的优势成为新能源发展最快、最具有竞争力的发电技术。随着风力发电技术向着大规模制造的方向发展，如何利用现有的创新设计方法和创新技术来满足风力发电的设计要求，是实现风力发电大规模制造和使用的关键

二、 国内外研究现状及发展趋势

风力发电是目前可再生能源开发利用的重要方式之一，风力发电技术日趋成熟，未来发展前景十分广阔。首先，对于大型的陆上风力发电系统，未来的单机容量会不断增大，风机的高度也在不断上升，产出效率也会不断增加。其次，未来小型的风力发电行业预计会迅速发展。中小型风电场的建设成本低，相对于常规电力优势明显。目前需要克服的主要问题是无风期间不能供电，针对这个问题，可以在发电机组配备少量蓄电池，同时风力发电组还可以和其他动力源联合使用，比较常见的联合方式有风力-柴油发电、风力-太阳能电池发电等。

风能是一种清洁的可再生能源，全球风能总量大约为 $2.74 \times 10^9 \text{WM}$ ，其中可利用的风能为 $2.74 \times 10^7 \text{WM}$ ，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。风能利用潜力大、价值高、易开采和储量足，与其他能源相比，风能不仅不会污染空气，而且取之不尽用之不竭。因此，风能引起了世界各国的广泛关注。当前，风能利用的主要方式是风力发

电。随着风力发电技术的快速发展和日趋完善，大量的风力发电机组投入运营。从 2001 年以来，全球风力发电装机容量迅速增加。图 1 显示了近十多年来的世界风电装机容量，从整体趋势上来看，全球风电装机容量整体稳步增长，截止 2014 年，全球风电装机容量已经达到 369.597GW。

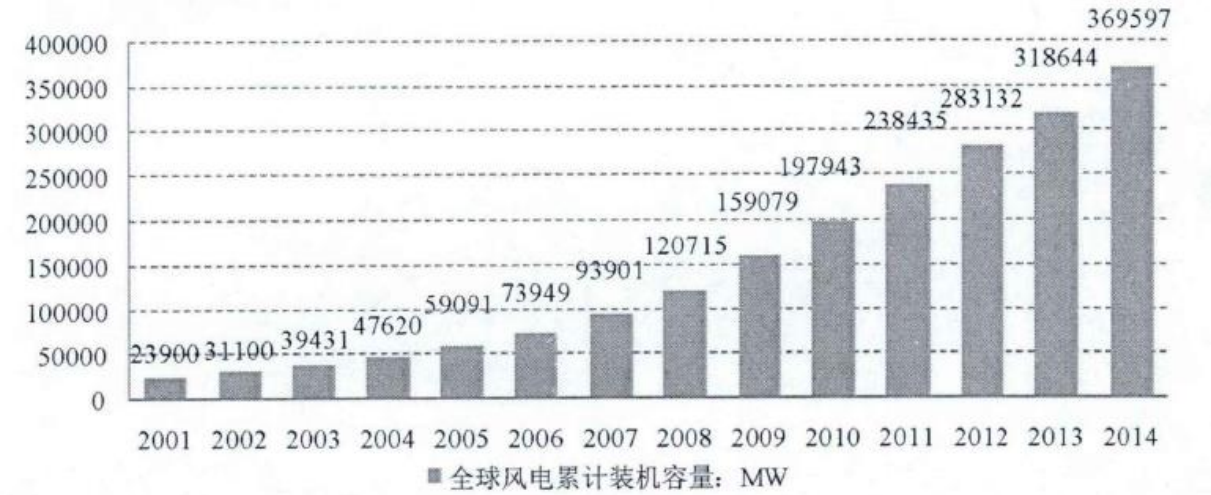


图 2 全球累计风机装机容量

目前，风力发电已经在全球掀起了一股发展热潮。德国、美国、丹麦和荷兰是世界上风能利用最好、发展最好、技术也比较先进的四个国家。美国的目标是到 2030 年其风电装机总容量达到国内总电能 300GW 的 20%，欧盟的风电覆盖率预计在 2020 年达到 12%—14%，到 2030 达到总电能的 25%，根据新能源振兴规划，预计到 2022 年我国风机装机总量将达到 1.5 亿 kW，将超过电力总装机总量的 10%。

三、 风能发电原理以及我国风能的地理地域分布情况

3.1 利用风能发电的基本原理

风力发电的过程就是把风能经由机械能转换为电能的过程，风能转化为机械能的过程由风轮实现，机械能转化为电能的过程由风力发电机及其控制系统实现。风力进入发电系统后便作为发电系统的输入信号，通过风力控制器输出桨距角信号，调整机械转矩和输出功率。该机械功率接着被传输到发电机中，转化为电能后最终传输到电网中，完成了从风能到电能转化的全过程。

风力发电的主要特点有：可再生清洁能源、建设周期短、装机规模灵活、可靠性高、造价低、运行维护简单、实际占地面积小、发电发电方式多样化、单机容量小。

从变速恒频风力发电机类型来看，主要有交流励磁的双馈感应电机和不需要励磁的直驱永磁电机两种。

双馈感应发电机的定子绕组直接与电网相连，转子绕组通过并网变换器连接电网，具有调速性能良好、有功和无功功率独立可调等优点，但高速运行的双馈感应发电机与低速风轮之间的传动需要大型变速齿轮箱连接，降低了机组整体效率。

而且对于双馈感应风电机组而言，由于双馈感应发电机定子与电网直接相连接，在电网电压发生跌落时，由于较大的电磁过度过程，可能导致转子过电压、过电流，易造成变换器的损坏。

永磁直驱风电机组采用全功率并网变换器与电网连接，实现了发电机与电网之间完全的隔离。因为永磁直驱风电机组省去了变速齿轮箱，机组可靠性和整体效率得到了提升。永磁同步发电机由永磁体提供励磁，发电机效率较高。通过控制全功率并网变换器，使永磁同步发电机随着风速变化做相应的变速运行，实现最大风能的捕获。另外，永磁同步发电机和电网之间通过全功率变换器实现解耦，电网故障不会直接影响到永磁同步发电机本身的运行，所以其应对电网故障的能力更强。

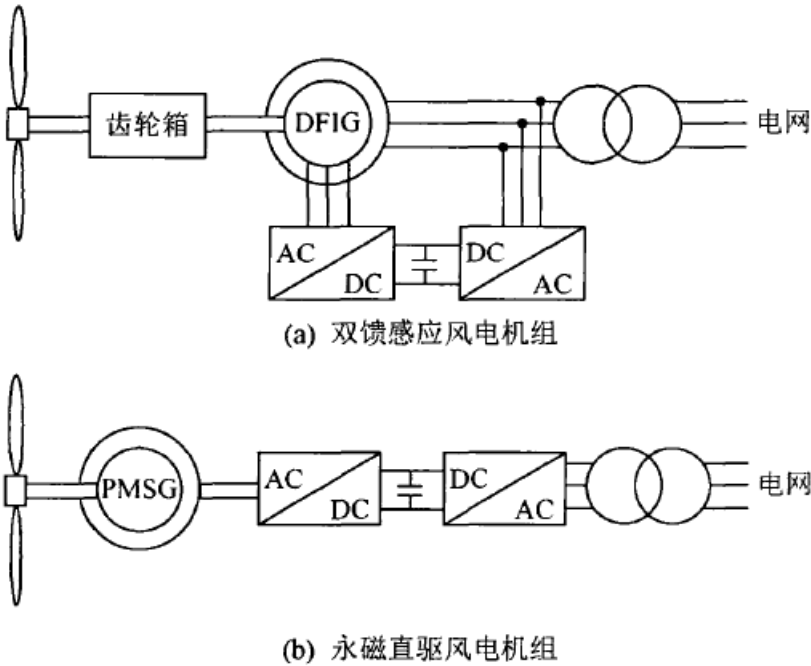


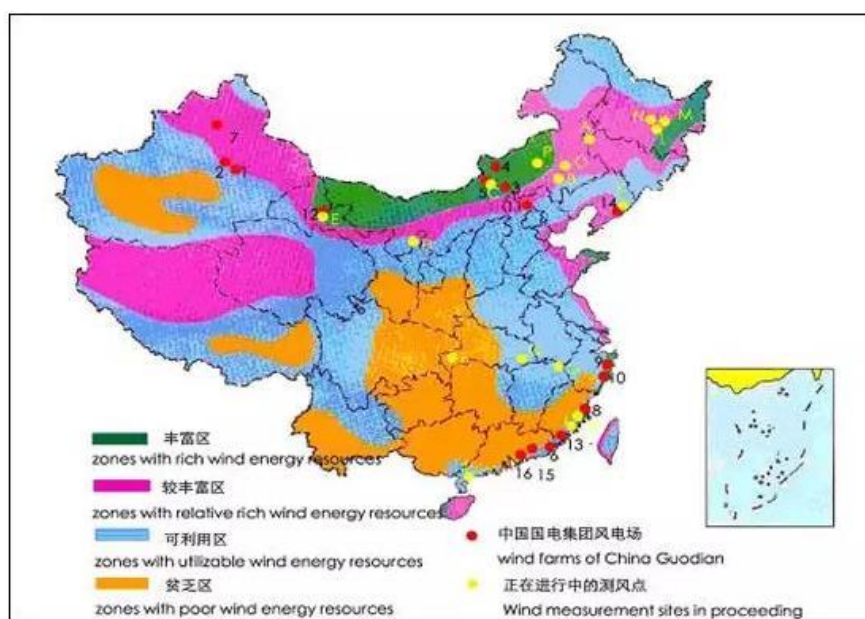
图 3 风力发电机类型

因此，永磁直驱风电机组相较双馈感应风电机组具有相当大的经济性和可靠性优势。

3.2 我国风能的地理地域分布情况

我国是风力资源丰富的国家之一，我国的风力资源主要分布在“三北”地区（东北三省、内蒙古、甘肃、青海和新疆等）、东南沿海地区和内陆局部地区，这些地区可开发利用的风能储量约 2 亿 kW，占全国可利用储量的 80%。

图表 中国风力资源分布图



资料来源：中国风能协会

图 4 中国风力资源分布图

现阶段，我国风力发电的规模还在不断增大，也就意味着风力发电在我国电力资源中的比例在不断增加。在国家政策鼓励支持下，我国的风电技术取得了一定的成果，但是和国际先进水平相比较，还存在一定的差距。其中风力发电应用中的很多关键技术被国外少数企业垄断，阻碍了风力发电的进一步推广应用。

因此，需要对目前的风力发电技术不断完善，在技术上不断创新拥有自主知识产权。从风力发电的成效上看，我国很多建成的风电场处于闲置状态，输出电能利用率较低。造成风电“发得出、送不出”的情况的主要原因是风电入网问题。因为我国风能资源主要分布区域也是电网分布较弱的地区，因此风力发电面临着电网不堪重负的问题。这需要统筹协调电力规划，同时也需要技术突破降低入网成本。总而言之，我国目前的风力发电还有很大的发展空间，风力发电技术的研究也至关重要。

四、 风能发电系统的组成

4.1 风力发电系统结构

风力发电系统主要由叶轮、变桨系统、齿轮箱、偏航系统、制动系统、发电机、电气系统、主控系统、塔架和地基等子系统组成，而每一个子系统又有若干零部件构成。

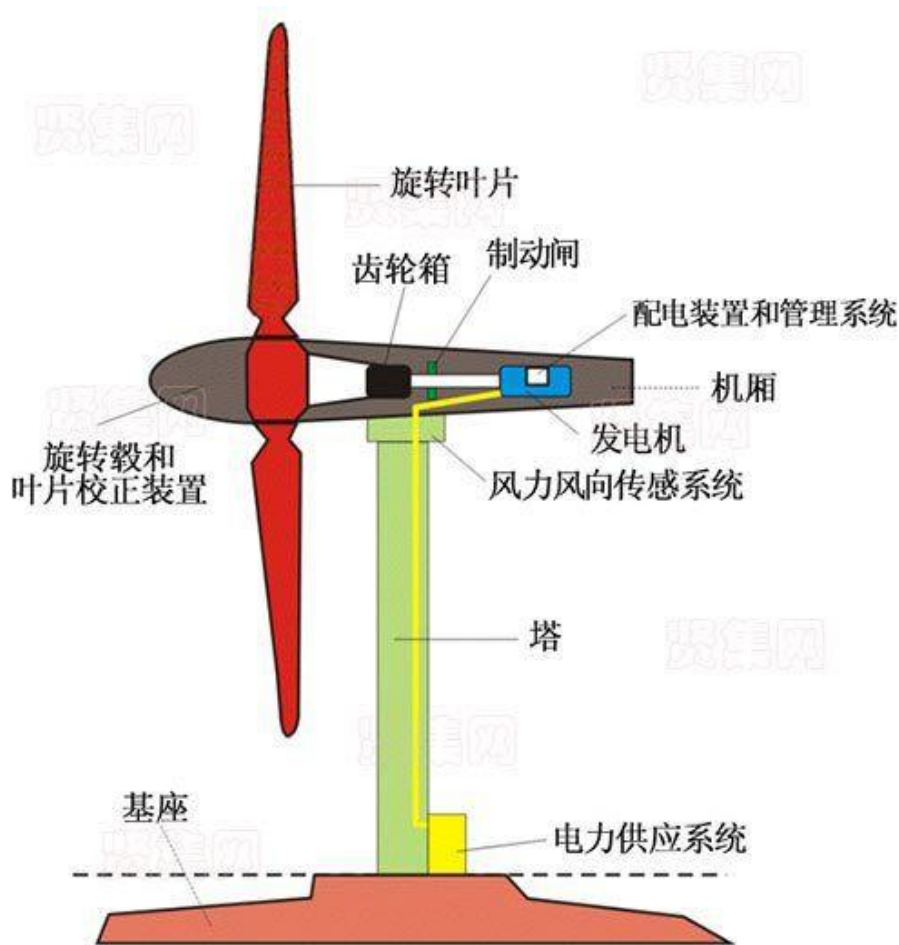


图 5 风力发电系统结构图

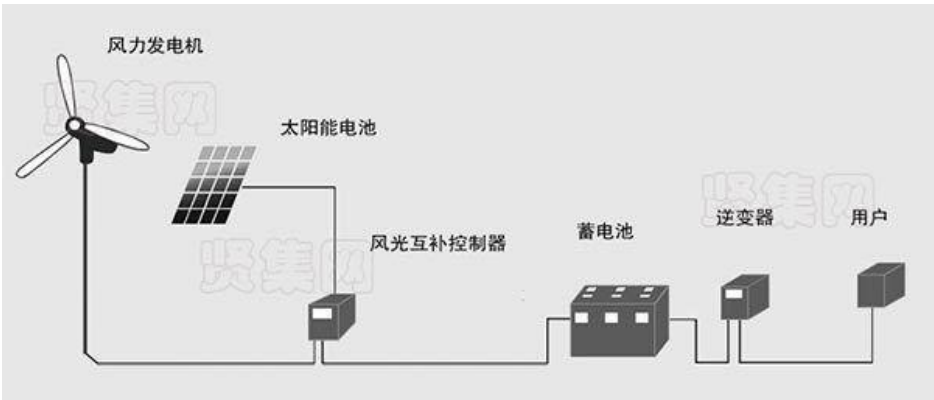


图 6 风力发电原理图

4.2 风电机组结构框架

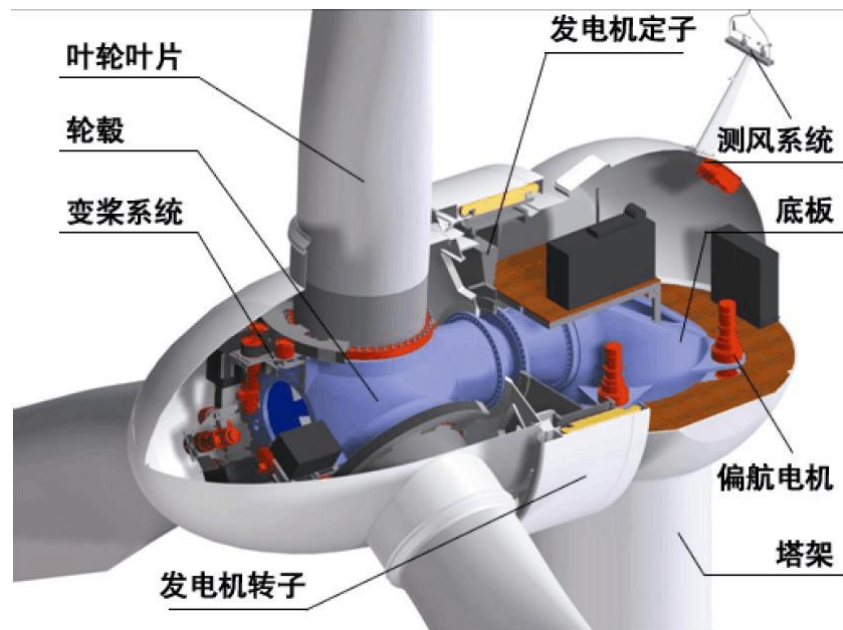


图 7 直驱永磁风力发电机组的基本结构

直驱式风力机发电机为永磁同步式发电机，转子为永磁式结构，无需外部提供励磁电源，提高了效率。采用永磁同步发电机可做到风力机与发电机的直接耦合，省去齿轮箱，为直接驱动式结构，大大减小系统运行的噪声，提高的发电系统的可靠性。

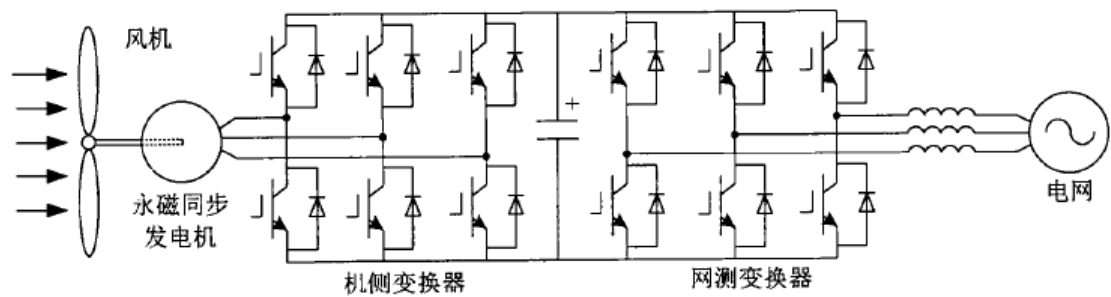


图 8 永磁式直驱风电机组拓扑结构图

采用 PWM 变换器拓扑结构并网的永磁直驱风电机组的结构如图 9 所示。从图中可看出，该系统主要由风力机、传动链系统、永磁同步发电机、PWM 变换器和直流侧电容等部分组成。其中,靠近永磁同步发电机侧的变换器称为机侧变换器，靠近电网侧的变换器称为网侧变换器。该拓扑结构能够实现能量的双向流动，将频率和幅值变化的交流电转换成频率和幅值符合并网要求的电能送入电网。

五、 四种风力发电系统的比较

从电机转速看，可分为高速、中速和低速三种结构风力发电系统，而从变速恒频风力发电机类型来看，主要有交流励磁的双馈感应电机和不需要励磁的直驱永磁电机两种。

综合电机转速和电机类型来看，目前在 MW 级风力发电系统中获得实际应用的主要有以下四种：①高速双馈感应发电机（DFIG）；②高速永磁发电机（HSPM）；③中速半直驱永磁发电机（MSPM）；④低速直驱永磁发电机（DDPM）

四种不同结构风力发电系统的示意图如图。除了低速直驱以外，高速和中速风电系统皆需要增速齿轮箱，而采用永磁发电机的系统皆需要全功率的功率变换器。从发电机来看，不同的风电系统有其自身的设计特点。

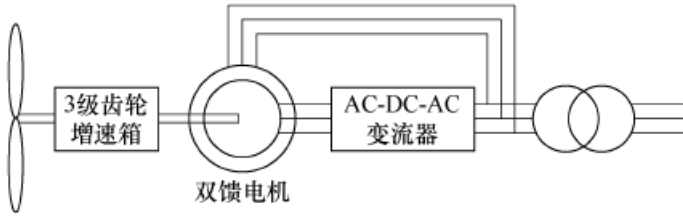


图 10 高速双馈电机风力发电系统（DFIG）

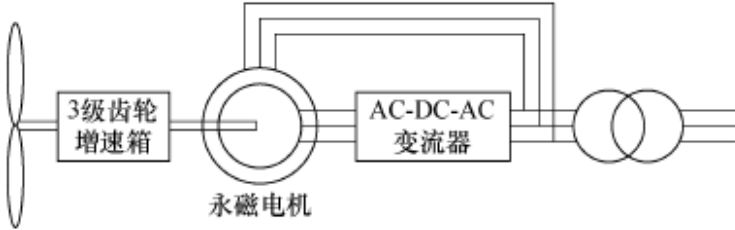


图 11 高速永磁电机风力发电系统（HSPM）

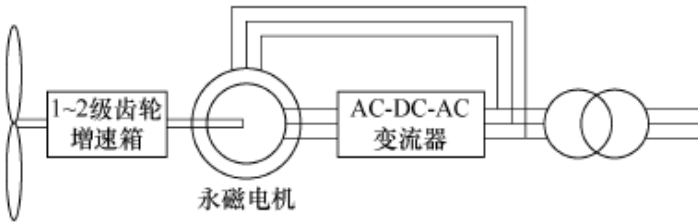


图 12 中速半直驱永磁风力发电系统（MSPM）

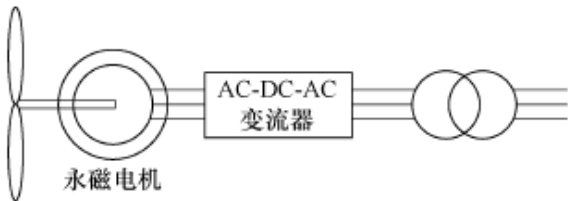


图 13 低速直流永磁电机风力发电系统（DDPM）

在高速双馈风力发电系统(DFIG)中, 由于额定转速远高于同步转速, 在额定转速运行时双馈发电机转子绕组的电流频率较高, 转子铜耗和铁耗比感应电机大得多。变流器供电系统的谐波电流也会产生转子附加损耗, 因此在设计中需要充分考虑转子的散热问题。

在高速永磁风力发电系统(HSPM)中, 用永磁电机取代双馈电机的优点为: 取消了转子的集电环和电刷, 提高了电机的运行可靠性; 减小了转子的铜耗和铁耗, 提高了电机的效率; 减小了电机的体积和重量, 提高了电机的功率密度。

中速永磁风力发电系统(MSPM)是高速和低速风力发电系统的一种折中方案。相对来说, 中速永磁风力发电机的设计比较灵活, 比较困难的是发电机额定转速和运行速度范围的选取, 即增速机构和速比的选取。需要综合考虑风力机、变速箱和发电机传动链的参数匹配, 变速箱的性能和运行可靠性以及发电机的性能价格比等多方面因素, 确定增速箱的结构和传动速比。

对于低速永磁风力发电系统(DDPM), 由于低速永磁电机体积大、用料多, 并且永磁材料价格昂贵, 其用量直接关系到电机的成本, 因此设计的重点在于进行优化设计和提高电机的性能价格比。

同样以额定功率 2MW 的发电机为例, 对于三种平均风速不同结构风力发电机年发电量的对比见图表 1。可以看出, 对于平均风速 5.4m/s 的低风速情况, 低速直驱永磁风力发电机的年发电量最多; 而对于中等和较高平均风速, 中速永磁风力发电机的发电量最多。各种风速条件下, 双馈发电机的发电量皆为最少, 由此可以看出永磁风力发电机的优势所在。

平均风速/ (m/s)	结 构			
	DFIG	HSPM	MSPM	DDPM
5.4	2 535MWh	2 535MWh	2 535MWh	2 535MWh
	100%	104.7%	108.3%	108.5%
6.8	4 041MWh	4 146MWh	4 263MWh	4 233MWh
	100%	102.6%	105.2%	104.3%
8.2	5 338MWh	5 427MWh	5 566MWh	5 499MWh
	100%	101.7%	104.4%	103.0%
排 名	4	3	1	2

图表 2 不同结构风力发电机的年发电量对比

以额定功率 2MW 的变速恒频风力发电机为例，在相同运行条件下，不同结构风力发电机的运行效率计算值如图 14 所示，显然，低速直驱永磁风力发电机的效率最高，而双馈发电机的效率最低，特别是在低于 60%额定风速时，永磁风力发电机的优势更为明显，当风速低于 35%额定风速时，双馈发电机难以正常发电。

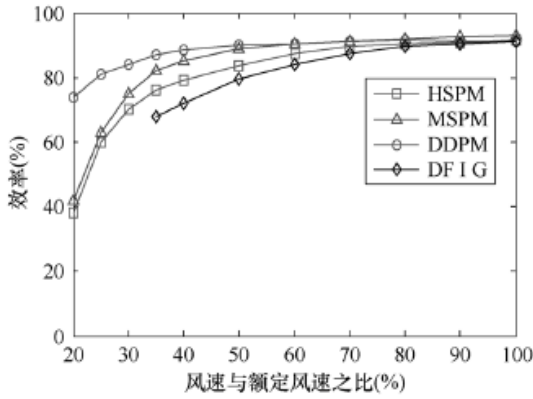


图 15 不同结构风力发电机的运行效率计算值

六、 风电机组故障诊断研究现状

发电机是风电机组的核心部件，负责将旋转的机械能转化成电能，并为电气系统供电。目前，随着风机容量的增大，发电机的规模也逐渐增加。发电机长期运行在变工况和电磁环境中，容易发生故障，从而影响发电机的工作效率。永磁电机故障大致可分为三类：电气故障、机械故障和永磁体故障。

综合目前国内外文献，永磁电机故障诊断方法可大致归纳为以下三类：

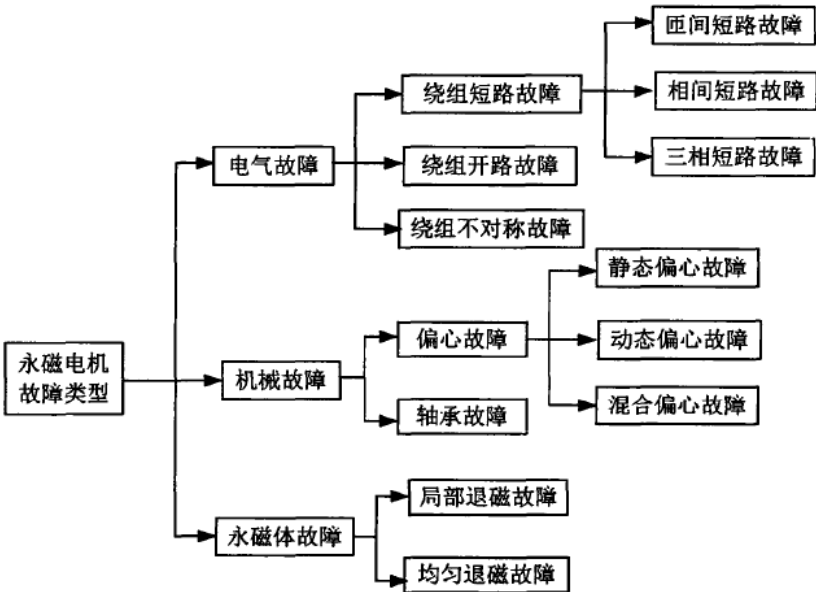


图 16 永磁电机故障类型

在永磁直驱风电机组中,变换器是最容易发生故障的部件之一,在永磁直驱风电机组中的变换器内 IGBT 作为功率开关管。它的常见故障包括:短路,开路、欠压、过压、过流、过热和通讯故障等,其中功率管的短路和开路是比较典型的两种故障。造成功率管开路的原因主要有器件破裂、驱动信号丢失或电路失效等。

变换器一旦发生故障,如不及时处理,轻则会引起电网电流波形畸变降低供电质量,重则将会影响整个风力发电系统,甚至危及电网安全,因此需要进行及时诊断。

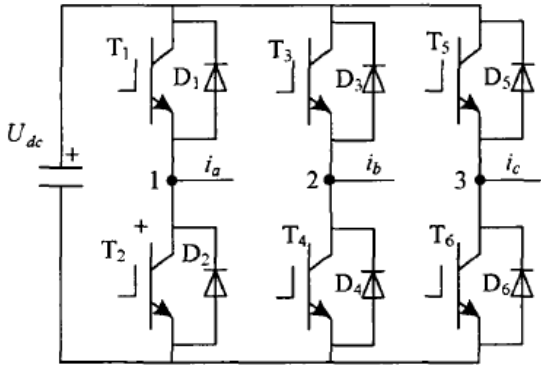


图 17 变换器结构

七、 能源储存和能源载体

在新能源体系中,氢能是一种理想的二次能源,与其他能源相比,氢热值高,其能量密度(140 MJ/kg)是固体燃料(50 MJ/kg)的两倍多。且燃烧产物为水,是最环保的能源,既能以气、液相的形式存储在高压罐中,也能以固相的形式储存在储氢材料中,如金属氢化物、配位氢化物、多孔材料等。因此,氢被认为是最有希望取代传统化石燃料的能源载体。对可再生和可持续能源系统而言,氢气是一种极好的能量存储介质。氢气作为能源载体的优势在于:①氢和电能之间通过电解水与燃料电池技术可实现高效率的相互转换;②压缩的氢气有很高的能量密度;③氢气具有成比例放大到电网规模应用潜力。

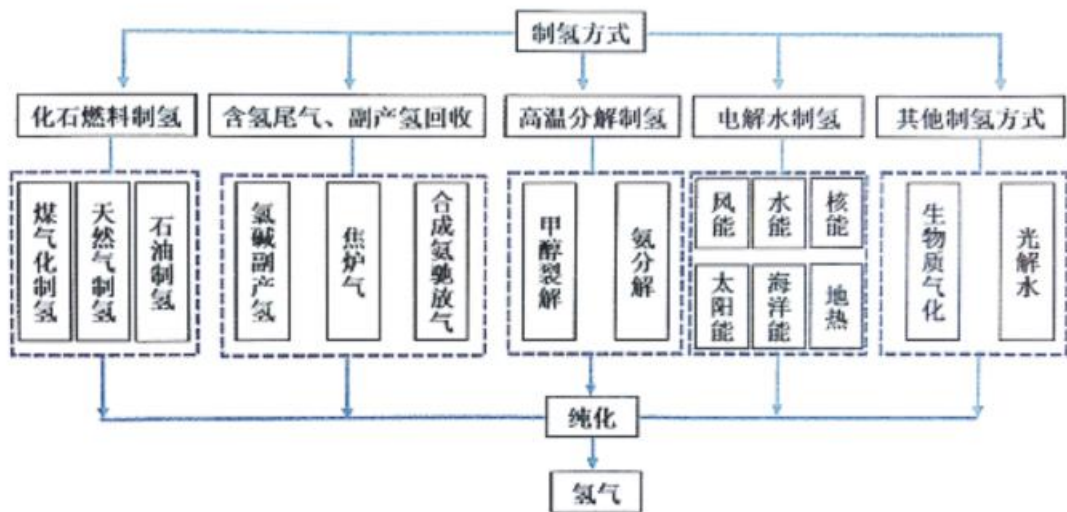


图 18 氢气的主要制取方式图

7.1 电解制氢技术

电解水制氢是在直流电的作用下，通过电化学反应将水分子解离为氢气与氧气，分别在阴、阳两极析出。根据隔膜不同，可分为碱水电解、质子交换膜水电解、固体氧化物水电解。目前可实际应用的电解水制氢技术主要有碱性液体水电解与固体聚合物水电解两类技术。

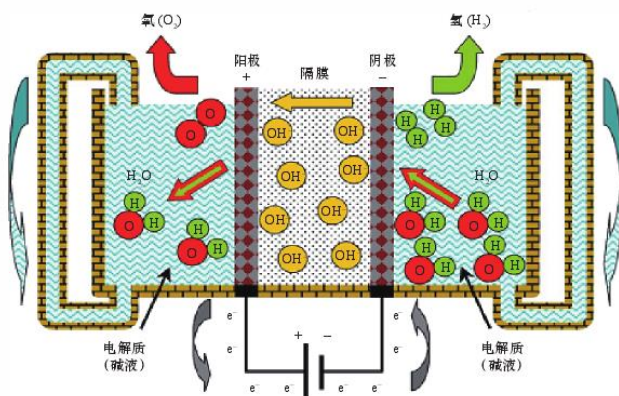


图 19 碱性液体水电解制氢

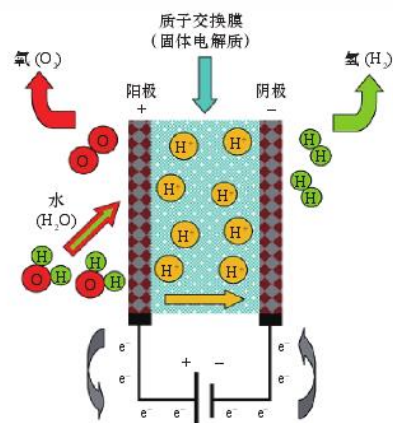


图 20 质子交换膜水电解制氢

碱性液体水电解技术是以 KOH 、 NaOH 水溶液为电解质，如采用石棉布等作为隔膜，在直流电的作用下，将水电解，生成氢气和氧气。如图 21 所示。在液体电解质体系中，所用的碱性电解液（如 KOH ）会与空气中的 CO_2 反应，形成在碱性条件下不溶

的碳酸盐，如 K_2CO_3 。这些不溶性的碳酸盐会阻塞多孔的催化层，阻碍产物和反应物的传递，大大降低电解槽的性能。另外，碱性液体电解质电解槽也难以快速的关闭或者启动，制氢的速度也难以快速调节，所以，碱性液体电解质电解槽难以与具有快速波动特性的可再生能源配合。

质子交换膜水电解池以质子交换膜替代石棉膜，传导质子，并隔绝电极两侧的气体，这就避免了碱性液体电解质电解槽使用强碱性液体电解质所带来的缺点。主要部件包括阴阳极端板、阴阳极气体扩散层、阴阳极催化层和质子交换膜等。其中，端板起固定电解池组件，引导电的传递与水、气分配等作用；扩散层起集流，促进气液的传递等作用；催化层的核心是由催化剂、电子传导介质、质子传导介质构成的三相界面，是电化学反应发生的核心场所；质子交换膜作为固体电解反应发生的场所，是电解池的核心部件。提高运行的电流密度，可以降低电解的设备投资。而且，宽范围的运行电流密度更有利于配合可再生能源的波动性。

7.1 氢的储存与运输

氢是自然界中最轻的元素，氢气在常温常压下的密度非常低，仅为空气密度的 $1/14$ 。目前氢气的储运技术主要包括气态储运、低温液态储运和固体储运等。每种氢气的储运技术都有其优缺点，可根据氢气用量和与氢源的距离评估储运成本，从而选择合适的储运方式。

气态储运是指以高压气罐为储氢容器来进行氢气储运的技术。它具有成本低、能耗相对较小，可以通过减压阀调节氢气的释放速度，充放气速度快，动态响应好，能在瞬间开关氢气。

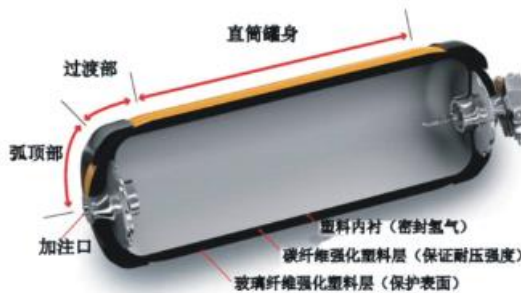


图 22 液态储运

氢的液态储运是指将氢气在低温下进行液化，然后将其存放在绝热的储存容器中进行运输，一般绝热容器的机构示意图如图 23 所示。氢气液化所需的温度非常低，要求达到 -255.65°C 以下时氢气才能变为液态，液氢的密度为 $0.07\text{g}/\text{cm}^3$ ，约是标准状态下气态氢气的 845 倍。与气态氢气相比，液氢在储运方面最大的优势是储运的质量和单位体积的储氢能量密度都有大幅提高，它的运输能力一般可达到气态运输的 10 倍以上。液氢虽然具有储运能量密度高的优势，但是该方式储运的成本很高。成本主要来源于两个方面：一是气态氢气液化压缩时需要消耗大量的能量，约是氢气本身能量的 30%，能耗很高；二是液氢储存的容器需要保障绝热并且耐高压，制作成本较高。

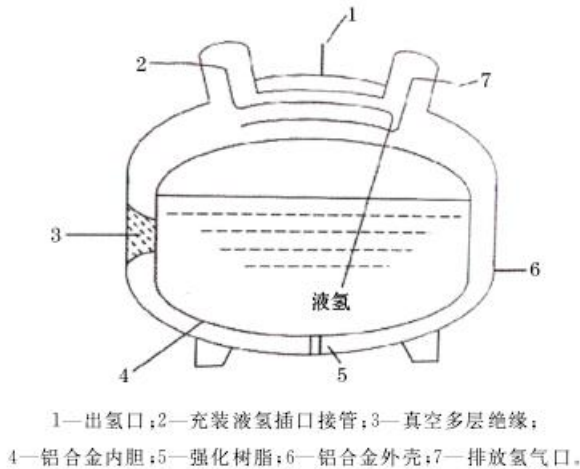


图 24 液氢绝热容器

氢气的固体储运是利用储氢材料在一定的温度和压力条件下可实现可逆的吸放氢的特性，将氢气先储存在储氢材料的内部，需要时再将储氢材料加热、减压，使氢气逐步放出的一种储运方式。固体储氢的质量储氢密度在 $1\% \sim 4.5\%$ ，储氢合金具有安全、无污染、可重复利用等优点。

八、冷电联供的案例分

冷电联供系统只是一种供能方式，系统工作原理为：通过高温、高压的化学催化工艺，将氢气和二氧化碳合成甲烷，再将甲烷为主要燃料产生的高温烟气带动燃气轮机发电设备运行，将其中一部分能量转换成电能；从燃气轮机排出的中高温烟气进入余热锅炉，产生高湿高压的蒸汽，蒸汽进入蒸汽轮机发电设备，再将一部分能量转化成电能，两部分电能为用户提供电力需求；余热锅炉排出的尾气通过余热回收设备产生一定温度的热水，通过吸收式制冷机提供给冷负荷。整个系统实现燃料化学能向热能的转换、烟气热能向机械能和电能的转换、烟气热能向蒸汽热能的传递、蒸汽热能向电力的转换及系统热量向供冷的转换。系统的基本原理如图 25 所示。

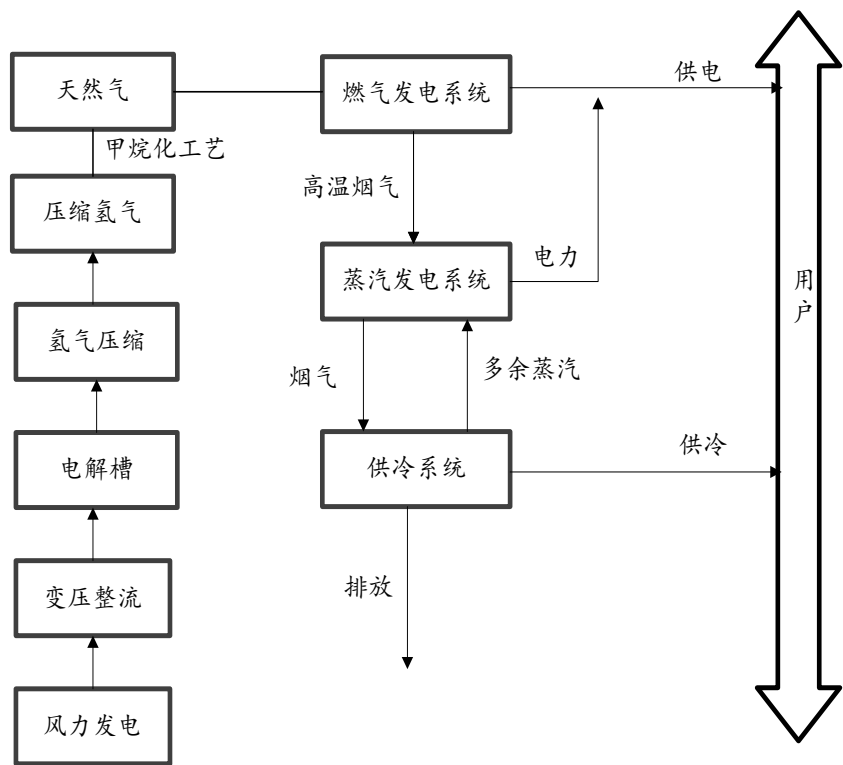


图 26 冷电联供系统基本流程图

对于常规的冷电联供系统，系统一般都包含燃气发电子系统、蒸汽轮机发电子系统、供冷子系统。用户的电力供应主要来自于燃气发电系统和蒸汽轮机发电系统产生的电能；冷负荷主要来自回收的烟气余热驱动制冷设备所提供，不足部分通过蒸汽轮机抽蒸汽补充。

发电设备主要包括燃气轮机、内燃机和燃料电池，该部分设备提供用户主要的电力需求，是燃料化学能向机械能或者电能转换的第一个环节，由于整个系统的热能都是从发电设备经过一次能量转换后余热获得的，因此，发电设备的容量大小决定了整个系统的发电量和供冷量，对系统具有决定性的影响。

蒸汽轮机发电子系统主要有余热锅炉、蒸汽轮机和其它换热设备组成，高温烟气通过余热锅炉产生的蒸汽，推动蒸汽轮机做功，然后通过凝汽器和回热器重新回到余热锅炉中。该子系统一方面输出一部分电能，另一方面通过汽轮机的抽汽对外供冷，在整个系统中处于中间环节。

供冷子系统在整个系统中处于最末端，能级品位也最低。对于供冷而言，是通过蒸汽驱动溴化锂吸收式制冷机和电压缩制冷实现的，由于电压缩制冷机的采用会大量的消耗电能，因此合理的供冷方案对系统的经济性有较大影响。

九、 实际应用展望：

氢燃料电池具有燃料能量转化率高、噪音低以及零排放等优点，可广泛应用于汽车、飞机、列车等交通工具以及固定电站等方面。在未来煤电占比相对较低的情况下，新能源汽车如纯电动汽车、基于电解水制氢的燃料电池汽车，排放强度会明显下降。而燃料电池汽车不同于纯电动汽车的是，它实现了上游发电和终端用电在时间上的“分离”，可将波动性较大的风能和太阳能通过氢能作为中间载体提高能量利用的稳定性。因此，发展氢能和氢燃料电池具有巨大的能源战略意义。

时间	总体目标	功能目标	发展重点
2020年	加氢站数量达到100座；燃料电池车辆达到万辆	冷启动温度达到-30℃，优化动力系统结构，降低车型成本	燃料电池堆、基础材料、控制技术、储氢技术等共性关键技术；关键零部件；氢气，氢气运输，加氢等基础设施建设
2025年	燃料电池车辆达到十万辆级规模	冷启动温度达到-40℃，批量化降低车成本，与同级别混合动力车相当	
2030年	加氢站数量达到1000座；燃料电池车辆保有量达到100万辆	整体性能与传统汽车相当，具有产品竞争优势	

图表 3 《中国氢能产业基础设施发展蓝皮书（2016）》提出的氢能产业发展路线图

加之氢气能可长期保存，如在较低投入前提下将富余的风电产生的能源电力用于电解水制氢，可以大大提高对风清洁能源的利用率。风能制氢及氢能利用的典型流程包括风力发电、变压整流、电解槽、氢气储贮、氢气压缩、长管拖车、加氢站(氢能消费)。

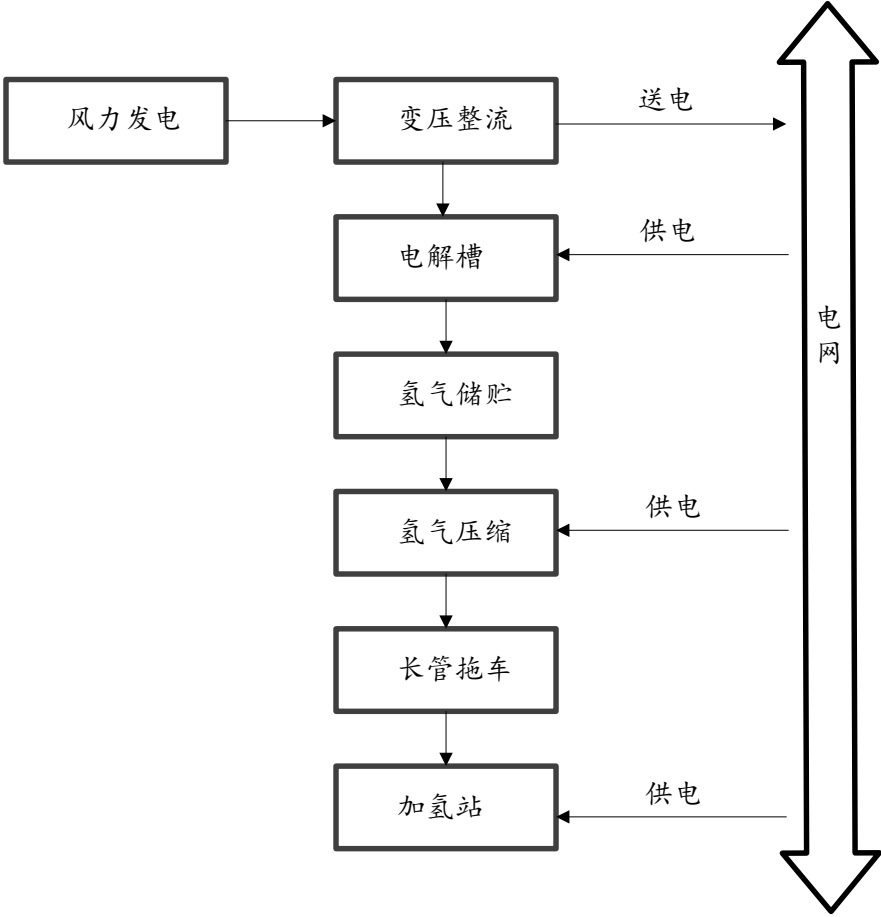


图 27 风能制氢及氢能利用的典型流程

制氢装置可根据风电发电量实现自动启停。风力发电机发电量随风速变化，为防止制氢设备过于频繁启停，具体启停方式如下：当风力发电机每小时发电量小于其临界值时不开启制氢设备；当风力发电机每小时发电量大于临界值时逐渐开启制氢设备。

氢气存贮、压缩及输送系统，从制氢车间接出后分为二路，一路进入压缩机压缩，经压缩机厂房外的支管直接充灌至氢气长管拖车，长管拖车内氢气直接外运至各加氢站；另一路接至厂内储气库，至制氢量大于用氢量时，多余氢气存储在储气库内，制氢量较低时利用储气库内氢气保障氢气的供应。

9.1 容量配置

(1) 系统设计总容量

考虑风电厂处理及波动特性等因素，对于某城市制氢站规划容量按产氢量为 3280t / 年，为最大限度利用本地风能、制氢电解槽暂按波动运行的方案考虑，即风电场规模为 $32 \times 2.5 = 80 \text{ MW}$ 。为充分提高系统风电消纳量，将制氢站与风电 110 kV 升压站一体布置于风场范围内。风场升压站直接给制氢站配电制氢，然后经氢气管束车运至城市各个加氢站。根据城市规划综合，城市内可设置 10 个加氢站，分布于城市各个地区。

(2) 系统供电设计

鉴于风力发电自身的随机不确定性特点，而制氢过程需要比较稳定的电力供应，采用电网给予制氢站电力供应，电网与风场之间需双向交换电量。此时，可配置 $10 \times 550 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 电解槽，其中 9 台运行，1 台备用。按照不因外购电提高风能制氢成本的原则，考虑到电量双向交换的电价差，与电解槽匹配需 29 台 2.5 MW 风机。考虑制氢站工艺电耗和厂用电耗，并留有少量裕量，风场规模暂定为 $34 \times 2.5 \text{ MW}$ 。风场发电量较低时，制氢站需外购电；风场发电量较高时，则余电上网。加氢站同样需外购电。

9.2 存贮、压缩及输送系统说明

(1) 氢气压缩系统

氢气压缩系统中的压缩机总容量选择考虑因素包括：与产气速率的匹配；合理减少长管拖车充装时间，以减少长管拖车数量和加氢站压缩机功率。选择 8 台氢气隔膜压缩机，其设计流量为 $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、入口压力为 1.6 MPa、出口压力为 22 MPa。

(2) 氢气充装系统

压缩车间出口设 6 个长管拖车充灌台，可同时为 5 辆长管拖车充灌氢气，1 辆长管拖车准备。

(3) 氢气存储系统

氢气存储系统容量选取原则包括：足够缓冲制氢系统产氢量的波动；保证加氢站 1 天存储容量下可靠的供氢能力。总的储气量按满足 32 h 消耗量(4373 kg)计。储气压力按制氢系统出口压力 1.6 MPa 共设置 4 台 2000 m³ 容积球罐

9.3 加氢站系统设计

根据国家标准对加氢站容量等级划分,考虑用户都在市区及周边,为降低安全风险以及运行难度,按三级加氢站的考虑,存储容量小于 1000kg。结合城市规划,共设置 10 座加氢站。根据目前以及近期车用燃料氢气压力等级需求,加氢压力等级设两种规格,分别为 35MPa 和 70MPa。氢气通过长管拖车送至加氢站,通过压缩机升压至 45MPa 存入低压储槽中,或升压至 87.5MPa 存入高压储槽中。每座加氢站氢气存储容量满足 1 天氢气需求量。

本方案风电系统联网运行,风能出力充足时,在满足制氢系统用电需求的同时,剩余电量可上网;在风能出力不足的情况下通过网侧购电维持制氢系统的平稳运行。考虑到风能的频繁波动性,为了尽量减少系统与电网的电能交换,充分利用风能资源,并保证制氢系统的产能稳定。本方案装机容量充分考虑到电解制氢的需求,并且相应配备了储能单元,可做到较少的与电网的交换电量,从而整体工程等同于一个并网型的微电网。

参考文献:

- [1]张勋奎.典型北方城市的风能制氢系统方案及其经济性评估 [J]. 节能技术, 2020.
- [2]赵冲. 冷热电三联供系统的方案设计及其多准则对比评价. 广东工业大学, 2016.
- [3]杭俊. 永磁直驱风力发电机组故障诊断技术研究[D]. 东南大学, 2016.
- [4]邵志刚, 衣宝廉. 氢能与燃料电池发展现状及展望[J]. 中国科学院院刊, 2019.
- [5]俞红梅, 衣宝廉. 电解制氢与氢储能[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3):1-140.