

项目 3 储能技术及选配

【项目描述】

蓄电池是一种既能将电能转化为化学能，又能将化学能转化为电能的化学储能元件，是光伏系统中重要的组成部件。由于太阳光变化无常，光伏系统的功率输出也变化无常，因此需要蓄电池对光伏系统产生的电能进行储存和调节。在实际光伏发电系统，特别是在离网光伏发电系统中，蓄电池是主要的部件之一，对蓄电池的选择、蓄电池容量设计是一个重要内容。

【知识目标】

1. 了解储能系统的作用及储能的分类。
2. 熟悉铅酸蓄电池的结构、工作原理及相关参数。
3. 掌握光伏发电系统铅酸蓄电池容量的设计方法。
4. 了解超级电容的结构、特点，掌握光伏发电系统超级电容容量的设计方法。
5. 熟悉飞轮储能、超导储能、蓄水储能、锂电池的特点，了解其在光伏发电系统中的应用。

【能力目标】

1. 能准确描述储能种类及各储能特点。
2. 能准确描述铅酸蓄电池的结构和电池特性参数。
3. 能准确分析离网光伏发电系统中蓄电池组、超级电容等储能容量。

【素质目标】

1. 树立正确的学习观，积极参与课前、课中、课后等教学活动。
2. 增强科技强国、专业报国意识，了解我国各种储能产业发展，能正确分析抽水储能的发展现状。
3. 树立节能环保意识，能正确分析铅酸蓄电池使用方法，提升使用寿命。
4. 树立大国工匠精神，严谨科学，能正确、合理设计光伏发电系统蓄电池容量。

3.1 铅酸蓄电池认知



蓄电池种类及
铅酸蓄电池

3.1.1 铅酸蓄电池结构

【任务说明】

蓄电池主流产品有 4 类：铅酸蓄电池、碱性蓄电池、锂离子蓄电池、镍氢蓄电池。尽管它们结构形态各异，但工作原理都是将电能以化学能的形式储存起来，需要时再将化学能转化为电能。本节通过铅酸蓄电池的学习，了解储能系统的作用及储能分类，掌握铅酸蓄电池的结构和工作原理，掌握铅酸蓄电池的参数及容量识别方法，掌握铅酸蓄电池的充放电特点。

【任务实施】

1. 储能必要性和意义

电能的缺点是不易大规模储存，如果不计输配电及用电损耗的话，对于所有在使用的电能，其耗电量即为发电量。对于传统火力发电厂来说，其燃料消耗量随着负载需求的变化而

变化，从而保障负载用电需求。但对于光伏发电和风力发电等间歇性电源来说，受气象环境制约，就不能随时满足负荷需求，其由当时的气象条件所决定，例如光伏发电会受到光照时间的限制。因此，对于离网光伏发电系统和离网型风电而言，储能设备成为必备设备，用以存储和输出电能。另外储能设备能够显著改善负荷用量需求的可靠性，而且对电力系统的能量管理、安全稳定运行、电能质量控制等均有重要意义。

近年来，随着光伏发电、风力发电设备制造成本的大幅度降低，将其大规模接入电网成为一种发展潮流，给电力系统原本在“电力存取”这一薄弱环节带来了更大的挑战。

众所周知，电能“发、输、供、用”运行过程中，必须在时空两方面都要达到“瞬态平衡”，如果出现局部失衡就会引起电能质量问题，即闪变。“瞬态激烈”失衡还会带来灾难性事故，并可能引起电力系统大面积停电事故。要保障公共电网安全、经济和可靠地运行，就必须在电力系统的关键节点上建立强有力的“电能存取”单元（储能系统）对电力系统给予支撑。

另外，储能能在孤立电网或离网、电动汽车、轨道交通、UPS 电源、电动工具以及电子产品等方面有众多应用。图 3-1 是离网光伏发电系统蓄电池所处的位置及功能。在白天，当太阳能资源充足时，光伏电池组件发电，通过光伏控制器将电能送给蓄电池组（储能设备）进行储能；当负载需要用电时，蓄电池通过光伏控制器给各负载供电。

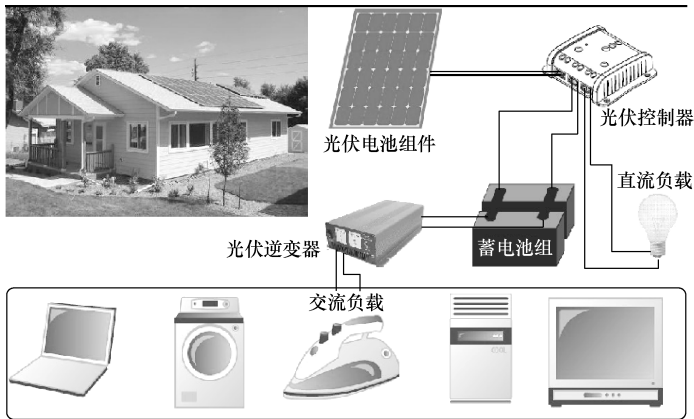


图 3-1 离网光伏发电系统蓄电池的功能

2. 储能的分类

从广义上讲，储能即能量储存，是指通过一种介质或者设备，把能量存储起来。从狭义上讲，针对电能的存储，储能是指利用化学、物理或其他方法将产生的电能存储起来并在需要时释放的一系列技术和措施。

按照储能的狭义定义，储能可以分为物理储能、化学储能和其他储能方式，具体分类见表 3-1。

表 3-1 储能技术分类

分 类	形 式	特 点
物理储能	抽水储能、压缩空气储能、飞轮储能	采用水、空气等作为储能介质；储能介质不发生化学变化
化学储能	铅酸电池、锂离子电池、液流电池、熔融盐电池、镍氢电池电化学电容器	利用化学元素做储能介质；充放电过程伴随储能介质的化学反应或者变化
其他储能	超导储能、燃料电池、金属-空气电池	

蓄电池组是光伏电站常见储能装置，作用是将光伏电池阵列从太阳辐射能转换来的直流电转换为化学能储存起来，以供负载使用。

光伏电站中与光伏电池阵列配套的蓄电池组通常是在半浮充电状态下长期工作，其蓄电能量比用电负荷所需要的电能量要大。因此，多数时间是处于浅放电状态。当冬季和连阴天由于太阳辐射减少，而出现光伏电池阵列向蓄电池组充电不足时，可启动光伏电站备用的电源（如柴油发电机组），给蓄电池组充电，以保持蓄电池组始终处于浅放电状态。

固定式铅酸蓄电池性能优良、质量稳定、容量较大、价格较低，是我国光伏电站目前主要选用的储能装置。因此，下面将重点介绍固定式铅酸蓄电池的结构、原理与维护等。

3. 铅酸蓄电池结构

铅酸蓄电池结构如图 3-2 所示，主要由正极板、负极板、接线端子、隔板、安全阀、电解液、跨桥、电池盖、接头密封材料及附件等部分组成。

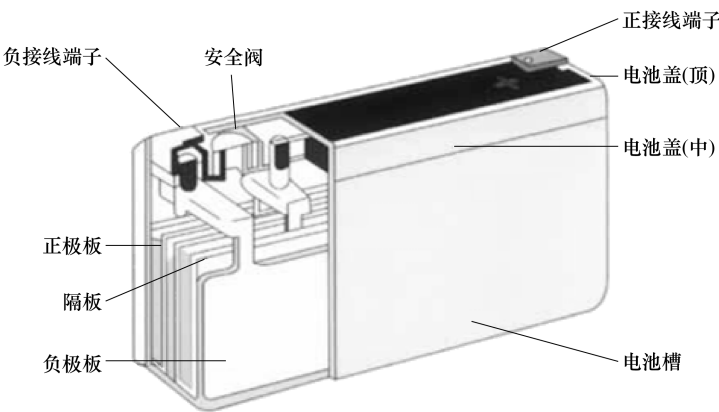


图 3-2 铅酸蓄电池的结构

(1) 正、负极板

蓄电池的充电过程是依靠极板上的活性物质和电解液中硫酸的化学反应来实现的。正极板上的活性物质是深棕色的二氧化铅（ PbO_2 ），负极板上的活性物质是海绵状、青灰色的纯铅（ Pb ）。正、负极板的活性物质分别填充在铅锑合金铸成的栅架上，加入锑的目的是提高栅架的机械强度和浇铸性能。但锑有一定的副作用，锑易从正极板栅架中解析出来而引起蓄电池的自行放电和栅架的膨胀、溃烂，从而影响蓄电池的使用寿命。负极板的厚度约为 1.8mm，正极板约为 2.2mm，为了提高蓄电池的容量，国外大多采用厚度为 1.1 ~ 1.5mm 的薄型极板。另外，为了提高蓄电池的容量，将多片正、负极板并联，组成正、负极板组。在每单格电池中，负极板的数量总比正极板多一片，正极板都处于负极板之间，使其两侧放电均匀，否则因正极板机械强度差，单面工作会使两侧活性物质体积变化不一致，造成极板弯曲。

(2) 隔板

为了减少蓄电池的内阻和体积，正、负极板应尽量靠近但彼此又不能接触而短路，所以在相邻正负极板间加有绝缘隔板。隔板应具有多孔性，以便电解液渗透，而且应具有良好的耐酸性和抗碱性。隔板材料有木质、微孔橡胶、微孔塑料等。近年来，还有将微孔塑料隔板

做成袋状，紧包在正极板的外部，防止活性物质脱落。

(3) 电池槽和电池盖

蓄电池的外壳是用来盛放电解液和极板组的，外壳应耐酸、耐热、耐震，以前多用硬橡胶制成，现在国内已开始生产聚丙烯塑料外壳。这种壳体不但耐酸、耐热、耐震，而且强度高，壳体壁较薄（一般约为 3.5mm，而硬橡胶壳体壁厚约为 10mm）、重量轻、外形美观、透明。壳体底部的凸筋是用来支撑极板组的，并可使脱落的活性物质掉入凹槽中，以免正、负极板短路，若采用袋式隔板，则可取消凸筋以降低壳体高度。

(4) 电解液

电解液的作用是使极板上的活性物质发生溶解和电离，产生电化学反应，传导溶液正负离子。它由纯净的硫酸与蒸馏水按一定的比例配制而成。

(5) 正、负接线端子

蓄电池各单格电池串联后，两端单格的正、负极桩穿出蓄电池盖，形成蓄电池正、负接线端子，实现电池与外界的连接，接线端子的材质一般是镀银钢材，正极标“+”号或涂红色，负极标“-”号或涂蓝色、绿色。

(6) 安全阀

安全阀一般由塑料材料制成，对电池起密封作用，阻止空气进入，防止极板氧化；同时可以将充电时电池内产生的气体排出电池，避免电池产生危险。使用时必须将排气栓上的盲孔用铁丝刺穿，以保证气体溢出通畅。

4. 铅酸蓄电池的基本工作原理

蓄电池通过充电过程将电能转化为化学能，使用时通过放电将化学能转化为电能。铅酸蓄电池充放电的化学反应式为：



当铅酸蓄电池接通外电路负载放电时，正极板上的 PbO_2 和负极板的 Pb 都变成了 PbSO_4 ，电解液的硫酸变成了水；充电时，正负极板上的 PbSO_4 分别恢复为原来的 PbO_2 和 Pb ，电解液中的水变成了硫酸。

性能较好的蓄电池可以反复充放电上千次，直至活性物质脱落到不能再用。随着放电的继续进行，蓄电池中的硫酸逐渐减少，水分增多，电解液的相对密度降低；反之，充电时蓄电池中水分减少，硫酸浓度增大，电解液相对密度上升。大部分铅酸蓄电池放电后的密度在 $1.1 \sim 1.3\text{kg}/\text{cm}^3$ ，充满电后的密度在 $1.23 \sim 1.3\text{kg}/\text{cm}^3$ ，所以在实际工作中，可以根据电解液相对密度的高低判断蓄电池充放电的程度。这里必须注意，在正常情况下，蓄电池不要放电过度，不然将会使活性物质（正极的 PbO_2 ，负极的海绵状 Pb ）与混在一起的细小 PbSO_4 结晶成较大的结晶体，增大了极板电阻。按规定铅酸电池放电深度（即每一充电循环中的放电容量与电池额定电容量之比）不能超过额定容量的 75%，以免在充电时，很难复原，缩短蓄电池的寿命。

3.1.2 铅酸蓄电池参数及容量识别

【任务说明】

铅酸蓄电池的优点是放电时电动势较稳定，缺点是比能量（单位重量所蓄电能）小，对环境腐蚀性强。铅酸蓄电池的工作电压平稳、使用温度及使用电流范围宽、造价较低，因



铅酸蓄电池认识
及参数识别

而应用广泛。通过本节的学习，认识铅酸蓄电池参数及蓄电池容量识别方法。

【任务实施】

1. 铅酸蓄电池的相关术语

1) 蓄电池充电。蓄电池充电是指通过外电路给蓄电池供电，使电池内发生化学反应，从而把电能转化成化学能并存储起来的操作过程。

2) 过充电。过充电是指对已经充满电的蓄电池或蓄电池组继续充电。

3) 放电。放电是指在规定的条件下，蓄电池向外电路输出电能的过程。

4) 自放电。蓄电池的能量未通过外电路放电而自行减少，这种能量损失的现象叫自放电。

5) 活性物质。在蓄电池放电时发生化学反应从而产生电能的物质，或者说是正极和负极存储电能的物质统称为活性物质。

6) 放电深度。放电深度是指蓄电池在某一放电速率下，电池放电到终止电压时，实际放出的有效容量与电池在该放电速率的额定容量的百分比。放电深度和电池循环使用次数关系很大：放电深度越大，循环使用次数越少；放电深度越小，循环使用次数越多。经常使电池深度放电，会缩短电池的使用寿命。

7) 极板硫化。在使用铅酸蓄电池时要特别注意的是：电池放电后要及时充电，如果蓄电池长时期处于亏电状态，极板就会形成 PbSO_4 晶体，这种大块晶体很难溶解，无法恢复原来的状态，将会导致极板硫化无法充电。

8) 相对密度。相对密度是指电解液与水的密度的比值。相对密度与温度变化有关，25℃时，充满电的电池电解液相对密度值为 1.265g/cm^3 ，完全放电后降至 1.120g/cm^3 。每个电池的电解液密度都不相同，同一个电池在不同的季节，电解液密度也不一样。大部分铅酸蓄电池放电后的密度在 $1.1 \sim 1.3\text{g/cm}^3$ 范围内，充满电之后一般为 $1.23 \sim 1.3\text{g/cm}^3$ 。

2. 铅酸蓄电池常用技术指标

1) 蓄电池的容量。处于完全充电状态下的铅酸蓄电池在一定的放电条件下，放电到规定的终止电压时所能输出的电量称为电池容量，以符号 C 表示。常用单位是安时 ($\text{A} \cdot \text{h}$)。通常在 C 的下角处标明放电时率，如 C_{10} 表明是 10h 率的放电容量， C_{60} 表明是 60h 率的放电容量。

电池容量分为实际容量和额定容量。实际容量是指电池在一定放电条件下所能输出的电量。额定容量（标称容量）是按照国家或有关部门颁布的标准，在电池设计时要求电池在一定的放电条件下（如在 25℃ 环境下以 10h 率放电到终止电压），应该放出的最低限度的电量值。

2) 放电率。根据蓄电池放电电流的大小，放电率分为时间率和电流率。时间率是指在一定放电条件下，蓄电池放电到终止电压时的时间长短。常用时率和倍率表示。根据 IEC 标准，放电的时间率有 20h 率、10h 率、5h 率、3h 率、1h 率、0.5h 率，分别表示为 20h、10h、5h、3h、1h、0.5h 等。电池的放电倍率越高，放电电流越大，放电时间就越短，放出的相应容量越少。

3) 终止电压。终止电压是指在蓄电池放电过程中，电压下降到不宜再放电时（非损伤放电）的最低工作电压。为了防止电池不被过放电而损害极板，在各种标准中都规定了在不同放电倍率和温度下放电时电池的终止电压。单体电池，一般 10h 率和 3h 率放电的终止

电压为每单体 1.8V, 1h 率的终止电压为每单体 1.75V。由于铅酸蓄电池本身的特性, 即使放电的终止电压继续降低, 电池也不会放出太多的容量, 但终止电压过低对电池的损伤极大, 尤其当放电达到 0V 而又不能及时充电时将大大缩短蓄电池的寿命。对于太阳能光伏发电系统用的蓄电池, 针对不同型号和用途, 放电终止电压设计也不一样。终止电压视放电速率和需要而规定。通常, 小于 10h 的小电流放电, 终止电压取值稍高一些; 大于 10h 的大电流放电, 终止电压取值稍低一些。

4) 电池电动势。蓄电池的电动势在数值上等于蓄电池达到稳定时的开路电压。电池的开路电压是无电流状态时的电池电压。当有电流通过电池时所测量的电池端电压的大小将是变化的, 其电压值既与电池的电流有关, 又与电池的内阻有关。

5) 浮充寿命。蓄电池的浮充寿命是指蓄电池在规定的浮充电压和环境温度下, 蓄电池寿命终止时浮充运行的总时间。

6) 循环寿命。蓄电池经历一次充电和放电, 称为一个循环 (一个周期)。在一定的放电条件下, 电池容量使用至某一规定值之前, 电池所能承受的循环次数, 称为循环寿命。影响蓄电池循环寿命的因素有很多, 不仅与产品的性能和质量有关, 而且还与放电倍率和深度、使用环境和温度及使用维护状况等外在因素有关。

7) 过充电寿命。过充电寿命是指采用一定的充电电流对蓄电池进行连续过充电, 一直到蓄电池寿命终止时所能承受的过充电时间。其寿命终止条件一般设定在容量低于 10h 率额定容量的 80%。

8) 自放电率。蓄电池在开路状态下的储存期内, 由于自放电而引起活性物质损耗, 每天或每月容量降低的百分数称为自放电率。自放电率指标可衡量蓄电池的储存性能。

9) 电池内阻。电池的内阻不是常数, 而是一个变化的量, 它在充放电的过程中随着时间不断地变化, 这是因为活性物质的组成、电解液的浓度和温度都在不断变化。铅酸蓄电池的内阻很小, 在小电流放电时可以忽略, 但在大电流放电时, 将会有数百毫伏的电压降损失, 必须引起重视。蓄电池的内阻分为欧姆内阻和极化内阻两部分。欧姆内阻主要由电极材料、隔膜、电解液、接线柱等构成, 也与电池尺寸、结构及装配因素有关。极化内阻是由电化学极化和浓差极化引起的, 是电池放电或充电过程中两电极进行化学反应时极化产生的内阻。极化电阻除与电池制造工艺、电极结构及活性物质的活性有关外, 还与电池工作电流大小和温度等因素有关。电池内阻严重影响电池工作电压、工作电流和输出能量, 因而内阻越小的电池性能越好。

10) 比能量。比能量是指电池单位质量或单位体积所能输出的电能, 单位分别是 $W \cdot h/kg$ 或 $W \cdot h/L$ 。比能量有理论比能量和实际比能量之分, 前者指 1kg 电池反应物质完全放电时理论上所能输出的能量, 实际比能量为 1kg 电池反应物质所能输出的实际能量。由于各种因素的影响, 电池的实际比能量远小于理论比能量。比能量是综合性指标, 它反映了蓄电池的质量水平, 表明生产厂家的技术和管理水平, 常用比能量来比较不同厂家生产的蓄电池, 该参数对于太阳能光伏发电系统的设计非常重要。

3. 铅酸蓄电池型号识别

根据 JB/T 2599—2012《铅酸蓄电池名称、型号编制与命名方法》部颁标准的有关规定, 铅酸蓄电池的型号由单体蓄电池的格数、型号、额定容量、电池功能和形状等组成。通常分为 3 段表示 (如图 3-3 所示): 第 1 段为数字, 表示单体电池的串联数, 每一个单体蓄

电池的标称电压为 2V，当单体蓄电池串联数（格数）为 1 时，第一段可省略，6V、12V 蓄电池分别用 3 和 6 表示；第 2 段为 2~4 个汉语拼音字母，表示蓄电池的类型、功能和用途等；第 3 段表示电池的额定容量。蓄电池常用汉语拼音字母的含义见表 3-2。

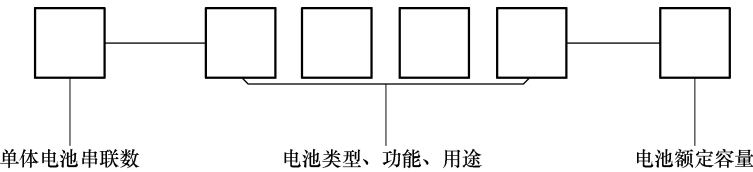


图 3-3 蓄电池型号

表 3-2 蓄电池常用汉语拼音字母的含义

第 1 个字母	含 义	第 2~4 个字母	含 义
Q	启动用	A	干荷电式
G	固定用	F	防酸式
D	电瓶车用	FM	阀控式密封
N	内热机用	W	无须维护
T	铁路客车用	J	胶体
M	摩托车	D	带液式
KS	矿灯酸性用	J	激活式
JC	舰船用	Q	气密式
B	航标灯用	H	湿荷式
TK	坦克用	B	半密闭式
S	闪光用	Y	液密式

例如，6-QA-120 表示有 6 个单体电池串联，标称电压为 12V，启动用蓄电池，装有干荷电式极板，20h 率额定容量为 120A·h。

GFM-800 表示为 1 个单体电池，标称电压为 2V，固定式阀控密封型蓄电池，20h 率额定容量为 800A·h。

6-GFMJ-120 表示有 6 个单体电池串联，标称电压为 12V，固定式阀控密封型胶体蓄电池，20h 率额定容量为 120A·h。

3.1.3 铅酸蓄电池充电

【任务说明】

在蓄电池的放电过程中，正、负极板都受到硫酸化，同时电解液中的硫酸逐渐减少，水分逐渐增多，从而导致电解液的比重下降。在实际使用中，可以通过测定电解液的比重来确定蓄电池的放电程度。本节主要分析铅酸蓄电池常规充电方法和理想充电方法。

【任务实施】

1. 常规充电方法

(1) 恒定电流充电法

在充电过程中，充电电流始终保持不变，叫作恒定电流充电法，简称恒流充电法或等流



充电法。在充电过程中由于蓄电池电压逐渐升高，充电电流逐渐下降，为保持充电电流不因蓄电池端电压升高而减小，充电过程必须逐渐升高电源电压，以维持充电电流始终不变，这对于充电设备的自动化程度要求较高，一般的充电设备是不能满足恒流充电要求的。恒流充电法，在蓄电池最大允许的充电电流情况下，充电电流越大，充电时间越短。但在充电后期若充电电流仍不变，这时由于大部分电流用于电解水上，电解液产生气泡过多而显沸腾状，这不仅消耗电能，而且容易使极板上活性物质大量脱落，温升过高，造成极板弯曲，电池容量迅速下降而提前报废。所以，这种充电方法很少采用。

(2) 恒定电压充电法

在充电过程中，充电电压始终保持不变，叫作恒定电压充电法，简称恒压充电法或等压充电法。由于恒压充电开始至后期，电源电压始终保持一定，所以在充电开始时充电电流相当大，大大超过正常充电电流值。但随着充电的进行，蓄电池端电压逐渐升高，充电电流逐渐减小。当蓄电池端电压和充电电压相等时，充电电流减至最小甚至为零。由此可见，采用恒压充电法的优点在于，可以避免充电后期充电电流过大而造成极板活性物质脱落和电能的损失。但其缺点是，在刚开始充电时，充电电流过大，电极活性物质体积变化收缩太快，影响活性物质的机械强度，致使其脱落。而在充电后期充电电流又过小，使极板深处的活性物质得不到充电反应，造成长期充电不足，影响蓄电池的使用寿命。所以这种充电方法一般只适用于无配电设备或充电设备较简陋的特殊场合，如汽车上蓄电池的充电、1号~5号干电池式的小蓄电池的充电均采用等压充电法。采用恒定电压充电法给蓄电池充电时，所需电源电压：酸性蓄电池每个单体电池为2.4~2.8V，碱性蓄电池每个单体电池为1.6~2.0V。

(3) 有固定电阻的恒定电压充电

为补救恒定电压充电的缺点而采用的一种方法。即在充电电源与电池之间串联一电阻，这样充电初期的电流可以调整。但有时最大充电电流受到限制，因此随充电过程的进行，蓄电池电压逐渐上升，电流直线衰减。

(4) 阶段等流充电法

综合恒流和恒压充电法的特点，蓄电池在充电初期用较大的电流，经过一段时间改用较小的电流，至充电后期改用更小的电流，即不同阶段内以不同的电流进行等流充电的方法，叫作阶段等流充电法。阶段等流充电法一般可分为两个阶段进行，也可分为多个阶段进行。

阶段等流充电法所需充电时间短，充电效果也好。由于充电后期改用较小电流充电，这样减少了气泡对极板活性物质的冲刷，减少了活性物质的脱落。这种充电法能延长蓄电池使用寿命，并节省电能，充电又彻底，所以是当前常用的一种充电方法。一般蓄电池第一阶段以10h率电流进行充电，第二阶段以20h率电流进行充电。各阶段充电时间的长短，各种蓄电池的具体要求和标准不一样。

(5) 浮充电法

间歇使用的蓄电池，其充电方式多为浮充电法。一些特殊场合使用的固定型蓄电池一般均采用浮充电法对蓄电池进行充电。浮充电法的优点主要在于能减少蓄电池的析气率，并可防止过充电，同时由于蓄电池同直流电源并联供电，用电设备大电流用电时，蓄电池瞬时输出大电流，这有助于稳定电源系统的电压，使用电设备用电正常。浮充电法的缺点是个别蓄电池充电不均衡和充不足电，所以需要进行定期的均衡充电。

2. 快速充电

(1) 定电流定周期快速充电法

这种方法的特点是，以电流幅度恒定和周期恒定的脉冲充电电流对蓄电池充电，两个充电脉冲之间有一放电脉冲进行去极化，以提高蓄电池的充电接受能力。在充电过程中，充电电流及其脉宽不受蓄电池充电状态的影响。因此，它是一种开环式脉冲充电。这种充电方法易使蓄电池充满容量，但如果不增加防止过充电的保护装置，容易造成强烈的过充电，影响蓄电池的使用寿命。在这种充电方法中，虽然整个充电过程均加有去极化措施，但是这种固定的去极化措施，难以符合充电全过程的要求。



蓄电池快速充电方法

(2) 定电流定出气率脉冲充电放电去极化快速充电法

这种充电方法的特点是：在整个充电过程中，充电电流脉冲的幅值和蓄电池的出气率始终保持不变。充电过程初期，充电电流略低于蓄电池的初始接受电流。在充电过程中，由于蓄电池可接受的电流逐渐减小，所以经过一段时间后，充电电流将超过蓄电池的可接受电流，因而蓄电池内将产生较多的气体，出气率显著增加。此时，气体检测元件能够及时发出控制信号，迫使蓄电池停止充电，进行短时放电。这样蓄电池内部的极化作用很快消失，因而出气率可以始终保持在较低的预定值内。

(3) 定电流定电压脉冲充电放电去极化快速充电法

这种充电方法的特点是：以恒定大电流充电，待充到一定电压（相当于蓄电池出气点的电压）时，停止充电并进行大电流（或小电流）放电去极化，然后再以恒定大电流充电，依此充放电过程交替地进行。放电脉冲的频率随充入电量的增加而增加，充电脉冲的宽度随充入电量的增加而减少。当充电量和放电量基本相等时，表示蓄电池已充满电，立即结束充电。

根据这种方法，国内外都有多种方案来实现蓄电池快速充电。这种方法，充电初期无去极化措施。在加去极化措施后充电脉冲宽度不断减小，使得充电电流平均值下降较快，延长了充电时间。

(4) 定电流提升电压脉冲充电放电去极化快速充电法

这种方法是定电流定电压脉冲充电放电去极化快速充电方法的改进。它是以恒定电流（如 I_C ）充电，当蓄电池电压达到充电出气点电压后（单格电池电压 $2.35 \sim 2.5V$ ）时，停止充电并进行放电，然后再充电。在加有放电去极化脉冲以后，用积分器件阶梯形跟踪调高充电控制电压（提升出气点电压），以加快充电速度和提高充满程度。其他和定电流定电压法相同。

(5) 定电压定频率脉冲充电放电去极化快速充电法

这种方法的特点是：充电脉冲的电压幅值保持恒定，随着充电过程的进行，蓄电池电动势逐渐上升，充电电流幅值逐渐减小，充电脉冲电流的频率恒定，在两个充电脉冲之间加放电去极化脉冲。

(6) 端电压和充放电频率选择脉冲充电放电去极化快速充电法

这种方法的特点是：根据蓄电池充电过程中的极化情况选择充放电脉冲的频率，并在充电后期将蓄电池端电压限定在预选的数值，使出气率限制在一定的容许范围内。

(7) 适应全过程去极化脉冲充电放电去极化快速充电法

这种方法的特点是：在充电全过程都适时加去极化的放电脉冲，在放电脉冲后充电电流

恢复之前，均进行去极化效果检测，达到一定去极化效果再转回充电，否则再次进行去极化放电，直至达到去极化要求的效果才转回充电，这样可使去极措施适应全过程。这种方案能有效地将气体析出量控制在很小的数值内。

3. 三阶段理想充电法

上述常规充电方法，是在缺乏充电规律认识的情况下，被迫采用的不合理的充电方法。常规充电方法的缺点是充电时间长、效率低、出气量大、蓄电池的利用周转率低、充电管理制度繁杂等。这种充电方式的落后性与蓄电池应用的广泛性是存在着一定的矛盾的。为此，在充电领域内，必须加强对充电规律的认识和研究，逐步探讨一套既快又好的充电方式。

航空蓄电池均采用阶段恒流充电法进行充电。一般酸性航空蓄电池采用恒流两阶段充电法。碱性航空蓄电池采用恒流两阶段充电法或恒流一阶段充电法。但这种充电法在充电中间阶段远离了充电电流接受率曲线，所以三阶段充电法更好一点。

三阶段充电法是两阶段恒流充电法和恒压充电法相结合的方式。充电开始和结束时采用恒定电流，中间阶段为恒定电压充电。蓄电池在充电初期用较大的电流，经过一段时间改为恒压充电，当电流衰减到预定值时，由第二阶段转到第三阶段。采用三阶段充电法的优点是：避免了恒压充电法开始充电电流过大，而后期电流又过小的情况，比二阶段等流充电在中间阶段更接近充电电流接受率曲线。这种充电法减少了充电出气量，充电又彻底，延长了蓄电池使用寿命。三阶段充电法充电电流和充电电压变化曲线如图 3-4 所示。

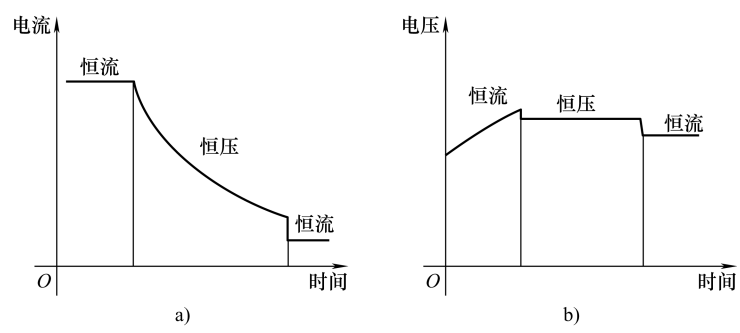


图 3-4 三阶段充电法
a) 充电电流曲线 b) 充电电压曲线



3.2 蓄电池组容量设计

【任务说明】

在离网光伏发电系统中，为了保障负载零缺电，需要配置合适容量的蓄电池。蓄电池容量与离网系统的负载用电量、太阳资源光伏组件容量等因素直接相关。选择何种蓄电池及蓄电池容量，直接关系到光伏发电系统成本及技术指标。本节主要学习离网光伏系统中蓄电池种类选择、蓄电池容量影响因素及蓄电池容量配置的一般方法。

【任务实施】

光伏发电系统用的蓄电池主要有固定型铅酸蓄电池、密封型铅酸电池和碱性蓄电池等，这几种电池各有优缺点，在选购蓄电池时，要根据实际情况进行选择。

1. 蓄电池种类选择

(1) 固定型铅酸蓄电池

固定型铅酸蓄电池的优点是：容量大、单位容量价格便宜、使用寿命长和轻度硫酸化可恢复。与启动用蓄电池相比，固定型蓄电池的性能更贴近光伏系统的要求。目前在功率较大的光伏电站多数采用固定型（开口式）铅酸蓄电池。开口式铅酸蓄电池的主要缺点是：需要维护，在干燥气候地区需要经常添加蒸馏水、检查和调整电解液的相对密度。此外，开口式蓄电池带液运输时，电解液有溢出的危险，运输时应作好防护措施。

(2) 密封型铅酸蓄电池

近年来我国研发了蓄电池的密封和免维修技术，引进了密封型铅酸蓄电池生产线。因此，在光伏发电系统中也开始选用专门的密封型铅酸蓄电池，即使倾倒电解液也不会溢出，不向空气中排放氢气和酸雾，安全性能好；缺点是对过充电敏感，因此对过充电保护器件性能要求高，当长时间反复过充电后，电极板易变形，且间隔较普通开口式铅酸蓄电池高。近年来，国内小功率光伏电池已选用密封型铅酸蓄电池。10kW 级以上的光伏电站也开始采用密封型铅酸蓄电池，随着工艺技术的不断提高和生产成本的降低，密封型铅酸蓄电池在光伏发电领域的应用将不断扩大。

(3) 碱性蓄电池

目前常见的碱性蓄电池有镉镍电池和铁镍电池。碱性蓄电池（指镉镍电池）与铅酸蓄电池相比，主要优点是：对过充电、过放电的耐受能力强，反复深放电对蓄电池寿命无大的影响，在高负荷和高温条件下，仍具较高的效率，维护简便，循环寿命长；缺点是：内电阻大，电动势小，输出电压较低，价格高（为铅酸蓄电池的 2~3 倍）。

为适应光伏电站对蓄电池的要求，我国进行了光伏专用铅酸蓄电池的研制，并取得了一定进展。国内尚无光伏发电储能专用铅酸蓄电池技术标准和检测标准，一些厂家虽在开发、试制专用储能铅酸蓄电池方面进行了努力，但技术不够成熟且品种较少。因此，目前选用完全适合于光伏发电的储能铅酸蓄电池，仍受到一定限制。

2. 蓄电池容量主要影响因素

1) 蓄电池单独工作的天数。在特殊气候条件下，蓄电池允许放电达到蓄电池总容量的 80%（放电深度 80%）所经过的天数。

2) 蓄电池每天放电容量。对于日负载稳定且要求不高的场合，日放电周期深度可限制在蓄电池所剩容量占额定容量的 80%（放电深度 20%）。

3) 蓄电池要有足够的容量来保证不会因为过充电所造成的失水。一般在选择电池容量时，只要蓄电池容量大于光伏电池阵列峰值电流的 25 倍（即用光伏电池阵列峰值电流充电 25h，可充满蓄电池），则蓄电池在充电时不会造成失水。

4) 蓄电池的自放电。随着电池使用时间的增长及电池温度的升高，自放电率会增加。对于新的自放电率通常小于容量的 5%；但对于旧的、质量不好的电池，自放电率可增加 10%~15%。

3. 光伏电站蓄电池容量的计算方法

在确定蓄电池容量时，并不是容量越大越好，一般要求放电后蓄电池所剩容量占额定容量 20% 以上。因为在日照不足时，蓄



离网系统蓄电池
选配及容量设计
影响因素



离网光伏发电系
统蓄电池容量设
计方法

电池组可能维持在部分充电状态，这种欠充电状态导致电池硫酸化增加，容量降低，寿命缩短。不合理地加大蓄电池容量，将增加光伏系统的成本。

在离网光伏发电系统中，对蓄电池的要求主要与当地气候和使用方式有关，因此各有不同。例如，标称容量有5h率、24h率、72h率、100h率、240h率以及720h率。每天的放电深度也不相同，南美的秘鲁用于“阳光计划”的蓄电池要求每天40%~50%的中等放电深度，而我国“光明工程”项目有的户用系统使用的电池只进行20%~30%左右的放电深度，日本用于航标灯的蓄电池则为小电流长时间放电。蓄电池又可分为浅循环和深循环两种类型。因此选择太阳能用蓄电池既要经济又要可靠，不仅要防止在长期阴雨天气时导致电池的储存容量不够，达不到使用目的；又要防止电池容量选择过小，不利于正常供电，并影响其循环使用寿命，从而也限制了光伏发电系统的使用寿命；还要避免容量过大，增加成本，造成浪费。确定蓄电池容量的公式为：

$$C=\frac{D\times F\times P_0}{L\times U\times K_a}$$

式中， C 为蓄电池容量，单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ； D 为最长无日期间用电时数，单位为 h ； F 为蓄电池放电效率的修正系数（通常取1.05）； P_0 为平均负荷容量，单位为 kW ； L 为蓄电池的维修保养率（通常取0.8）； U 为蓄电池的放电深度（通常取0.5）； K_a 为包括逆变器等交流回路的损耗率（通常取0.7~0.8）。上式可简化为：

$$C=3.75\times D\times P_0$$

这是根据平均负荷容量和最长连续无日照时的用电时数算出的蓄电池容量的简便公式。由于蓄电池容量一般以安时数表示，故蓄电池容量为：

$$C'(\text{A}\cdot\text{h})=1000\times\frac{C(\text{kW}\cdot\text{h})}{V}$$

$$C'(\text{A}\cdot\text{h})=I\times H$$

式中， C' 为蓄电池容量，单位为 $\text{A}\cdot\text{h}$ ； V 为光伏系统的电压等级（系统电压），通常为12V、24V、48V、110V或220V； I 为充电电流； H 为充电时间。

例如，按宁波太阳能电源有限公司提供的晶体电池组件，对浙江南都电源动力股份有限公司的阀控式密封铅酸蓄电池进行选型。基本要求为：可为400W的负载连续5天阴雨天的情况下供电；蓄电池能放电到其额定容量的75%~80%，性能正常，并保证具有5年使用寿命。

浙江南都电源动力股份有限公司的AGM电池放电容量见表3-3。

表3-3 AGM电池的放电容量

电 池 类 型	10h 放电容量/ $\text{A}\cdot\text{h}$	3h 放电容量/ $\text{A}\cdot\text{h}$	1h 放电容量/ $\text{A}\cdot\text{h}$
GFM-800	870~900	620~673.3	403~469.3
GFM-1000	1060~1090	825~900	625~675
GFM-1500	1700~1720	1216~1237	800~850

功率400W太阳能电池阵列用蓄电池选型容量计算如下：

逆变器的转换效率为0.75，负载为400W，故实际所需功率为 $400\text{W}/0.75\approx533\text{W}$ 。

设系统工作电压为24V，则电流 $I=533\text{W}/24\text{V}\approx22.2\text{A}$ 。

如果连续使用5天，即120h，则放电容量为 $22.2\text{A}\times120\text{h}=2664\text{A}\cdot\text{h}$ 。如果按电池的

80% 利用率计算，则对电池的额定容量要求为：

$$\text{容量 } C = 2664\text{A} \cdot \text{h} / 0.8 = 3330\text{A} \cdot \text{h}$$

按照此设计，白天正常充电，晚上蓄电池放电（以放电 12h 为例）的情况下，逆变器转换效率按 75% 进行计算，该蓄电池的放电深度为：

$$U = 22.2\text{A} \times 12\text{h} / 3330\text{A} \cdot \text{h} = 8.0\%$$

方案 1：用两组 1500A·h 电池并联使用。上述测试数据可以看出，1500A·h 的电池容量比较富余，其 10h 容量平均可以达到 1700A·h，如果采用两组并联，容量达到 3330A·h 以上，可以满足要求。这一方案的优点是容量可以达到要求并有富余，同时只需要两组电池，维护相应较少，电池所占的空间要少。

方案 2：用 4 组 800A·h 电池并联使用。800A·h 电池 10h 的放电平均容量为 880A·h，如果采用 4 组并联，其容量可以达到 3500A·h，足以达到 3330A·h，容量比较富余。这一方案优点是使用 4 组为 800A·h 的电池并联，容量更充分、富余；其缺点是要并联使用 4 组电池，相对于 1500A·h 的电池，成本要增加，所占用的场地要增加，维护工作也要大些。

3.3 超级电容器容量设计

【任务说明】

超级电容器又叫双电层电容器，是一种新型储能装置，其具有充电时间短、使用寿命长、温度特性好、节约能源和绿色环保等特点，其储能的过程并不发生化学反应，并且这种储能过程是可逆的，也正因为如此，超级电容器可以反复充放电数十万次。本节主要学习超级电容器的工作特点及容量设计的一般方法。

【任务实施】

1. 超级电容器概述

超级电容器又名化学电容器或双电层电容器（如图 3-5 所示），是一种电荷的储存器，但在其储能的过程中并不发生化学反应，而且是可逆的。因此，这种超级电容器可以反复充放电数十万次。它可以被视为悬浮在电解质中的两个无反应活性的多孔电极板，在极板上加电，正极板吸引电解质中的负离子，负极板吸引正离子，实际上形成两个容性存储层，被分离开的正离子在负极板附近，负离子在正极板附近，故又称为双电层电容器。



图 3-5 各种超级电容器外形图

2. 电容器的工作原理

电容器是由两个彼此绝缘的平板形金属电容板组成，在两块电容板之间用绝缘材料隔开。电容器极板上所聚集的电量 E 与电压成正比。电容器的计量单位为法拉（F）。当电容充上 1V 的电压，如果极板上储存 1C 的电荷量，则该电容器的电容量就是 1F。

电容器的电容量计算公式为：

$$C = KA/D$$

式中， K 为电介质的介电常数，单位为 F/m； A 为电极表面积，单位为 m^2 ； D 为电容器间隙的距离，单位为 m。

电容器的电容量取决于电容板的面积，与面积的大小成正比，而与电容板的厚度无关。另外，电容器的电容量还与电容板之间的间隙大小成反比。当给电容元件进行充电时，电容元件上的电压增高，电场能量增大，电容器从电源上获得电能，电容器中储存的电量 E 计算公式为：

$$E = CU^2/2$$

式中， U 为外加电压，单位为 V。

当电容器进行放电时，电容器上的电压降低，电场能量减小，电容器从电源上释放能量，释放的最大电量为 E 。

3. 超级电容器的结构

超级电容器中，多孔化电极采用活性炭粉、活性炭和活性炭纤维，如图 3-6 所示，电解液采用有机电解质，如丙烯碳酸酯或高氯酸四乙基铵。工作时，在可极化电极和电解质溶液之间界面上形成了双电层中聚集的电容量。因电极采用多孔性的活性炭，有极大的表面积在电解液中吸附电荷，所以具有极大的电容量并可以存储很大的静电能量，超级电容器的这一特性使其介于传统的电容器与电池之间。尽管这能量密度是 5% 或是更少，但是这能量的储存方式，也可以应用在短时高峰大电流的场合。

当外加电压加到超级电容器的两个极板上时，与普通电容器一样，极板的正电极存储正电荷，负极板存储负电荷。在两极板上的电荷产生的电场作用下，电解液与电极间的界面上形成相反的电荷，以平衡电解液的内电场，这种正电荷与负电荷在两个不同相之间的接触面上，以正负电荷之间极短间隙排列在相反的位置上，这个电荷分布层叫作双电层，因此电容量非常大，如图 3-7 所示。当两极板间电势低于电解液的氧化还原电极电位时，电解液界面上电荷不会脱离电解液，超级电容器为正常工作状态（通常为 3V 以下），如电容器两端电压超过电解液的氧化还原电极电位时，电解液将分解，为非正常状态。由于随着超级电容器放电，正、负极板上的电荷被外电路泄放，电解液的界面上的电荷相应减少。由此可以看

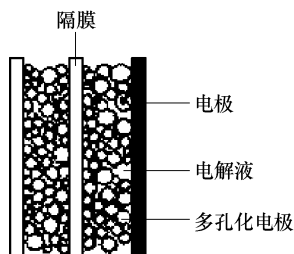


图 3-6 超级电容器结构

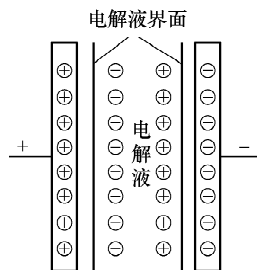


图 3-7 超级电容器工作原理

出，超级电容器的充放电过程始终是物理过程，没有化学反应。因此性能是稳定的，与利用化学反应的蓄电池是不同的。

4. 超级电容器的技术指标

超级电容器的主要技术指标有：容量、内阻、漏电流、能量密度、功率密度、循环寿命、高低温特性等。

- 1) 容量：电容器存储的容量，单位为 F。
- 2) 内阻：分为直流内阻和交流内阻，单位为 $m\Omega$ （毫欧）。
- 3) 漏电流：恒定电压下一定时间后测得的电流，单位为 mA（毫安）。
- 4) 能量密度：单位重量或单位体积的电容器所输出的能量，单位为 $W \cdot h/kg$ 或 $W \cdot h/L$ 。
- 5) 功率密度：单位重量或单位体积的超级电容器所输出的功率，代表超级电容器所承受电流的大小，单位为 W/kg 或 W/L 。
- 6) 循环寿命：超级电容器经历一次充电和放电，称为一次循环。可超过数十万次。
- 7) 高低温特性：超级电容器可以在 $-40 \sim 70^{\circ}C$ 范围内正常工作。

5. 超级电容器的特点

1) 使用寿命长，充放电大于 50 万次，是锂离子电池（Li-Ion）的 500 倍，是镍氢电池（Ni-MH）和镍镉电池（Ni-Cd）的 1000 倍，如果对超级电容每天充放电 20 次，连续使用可达 50 年以上，与蓄电池的差别见表 3-4。

表 3-4 超级电容器与蓄电池主要性能比较

性 能	蓄 电 池（ 锂 电 池）	超 级 电 容 器
额定电压/V	3.0 ~ 3.7	1.2 ~ 1.5
充电时间（充满）	5 ~ 6h	单体数秒
功率密度/(W/kg)	低，50 ~ 200	高，1000 ~ 2000
循环寿命（可充放电次数）	5000 ~ 10000 次	> 10 万次

2) 充电速度快，充电 10s 以上可达到其额定容量的 95% 以上。超级电容器在其额定电压范围内可以被充电至任意电位，且可以完全放出。而化学电池则受自身化学反应限制工作在较窄的电压范围，如果过放可能造成永久性破坏。

3) 在很小的体积下达到法拉级的电容量，无须特别的充电电路和控制放电电路，和电池相比，过充、过放都不对其寿命构成负面影响。

4) 保存使用不当会造成电解质泄漏等现象。它内阻较大，因而不可以用于交流电路。

5) 超级电容器与传统电容器不同，超级电容器在分离出的电荷中存储能量，用于存储电荷的面积越大、分离出的电荷越密集，其电容量越大。

传统电容器的面积是导体的平板面积，为了获得较大的容量，导体材料卷制得很长，有时用特殊的组织结构来增加它的表面积。传统电容器是用绝缘材料分离它的两极板，一般为塑料薄膜、纸等，这些材料通常要求尽可能的薄。超级电容器的面积是基于多孔碳材料，该材料的多孔结构允许其面积达到 $2000m^2/g$ ，通过一些措施可实现更大的表面积。超级电容器电荷分离开的距离是由被吸引到带电电极的电解质离子尺寸决定的。该距离比传统电容器薄膜材料所能实现的距离更小。这种庞大的表面积再加上非常小的电荷分离距离，使得超级电容器较传统电容器而言有大得惊人的静电容量，这也是其所谓“超级”的原因。

6. 超级电容器容量设计方法

在超级电容器的应用中,怎样计算超级电容器在以一定电流放电时的放电时间,或者根据放电电流及放电时间,怎么选择超级电容器的容量,可根据下面给出的简单计算公式计算。根据这个公式,可以简单地进行电容容量、放电电流、放电时间的计算,十分方便。

(1) 各计算单位及含义

$C(\text{F})$: 超级电容器的标称容量。

$U_1(\text{V})$: 超级电容器的正常工作电压。

$U_0(\text{V})$: 超级电容器的截止工作电压。

$T(\text{s})$: 在电路中的持续工作时间。

$I(\text{A})$: 负载电流。

(2) 超级电容器容量的近似计算公式

由于保持期间所需能量等于超级电容器减少的能量,且

$$\text{保持期间所需能量} = 0.5I(U_1 + U_0)T$$

$$\text{超级电容器减小能量} = 0.5C(U_1^2 - U_0^2)$$

因而,可得其容量(忽略由内阻引起的压降)为:

$$C = \frac{(U_1 + U_0)I \times T}{U_1^2 - U_0^2}$$

例如,一盏太阳能草坪灯,应用超级电容器作为储能蓄电元件,草坪灯工作电流为15mA,工作时间为每天3h,正常工作电压为1.7V,截止工作电压为0.8V,求需要多大容量的超级电容器能够保证草坪灯正常工作?

由以上公式可知:

$$\text{正常工作电压 } U_1 = 1.7\text{V}$$

$$\text{截止工作电压 } U_0 = 0.8\text{V}$$

$$\text{工作时间 } T = 10800\text{s}$$

$$\text{工作电流 } I = 0.015\text{A}$$

那么所需的电容容量为:

$$C = \frac{(U_1 + U_0)I \times T}{U_1^2 - U_0^2} = \frac{(1.7\text{V} + 0.8\text{V}) \times 0.015\text{A} \times 10800\text{s}}{(1.7\text{V})^2 - (0.8\text{V})^2} = 180\text{F}$$

根据计算结果,选择耐压2.5V、180~200F超级电容器就可以满足工作需要了。

3.4 其他储能技术

3.4.1 飞轮储能

【任务说明】

飞轮储能作为一种纯机电的储能系统,具有能量大、功率高、无二次污染、寿命长等优点,其以惯性(动能)的方式将能量储存在高速旋转的飞轮中。本节主要学习飞轮蓄能的工作原理及在光伏发电系统中的应用方法。



飞轮储能认识

【任务实施】

1. 飞轮储能技术

飞轮储能是机械储能的一种形式，以惯性能（动能）的方式，将能量储存在高速旋转的飞轮中。当车辆制动时，飞轮储能系统拖动飞轮加速，将车身的惯性动能转化为飞轮的旋转动能。当车辆需起动或加速时，飞轮减速，释放其旋转动能给车身。

目前，飞轮储能技术已经在 UPS、电力系统、混合动力机车等领域的应用获得了成功。飞轮储能技术涉及多种学科与技术，主要包括机械科学、电气科学、磁学、控制科学和材料科学等，以及复合材料的成型与制造技术、稀土永磁材料技术、磁悬浮技术、传感技术、用于变压变频的电力电子技术、高速双向电动机/发电机技术等。

飞轮储能装置的结构如图 3-8 所示，主要包括 5 个基本组成部分：采用高强度玻璃纤维（或碳纤维）复合材料的飞轮转子；悬浮飞轮的电磁轴承及机械保护轴承；电动/发电互逆式电机；电机控制与电力转换器；高真空及安全保护罩。

现代飞轮储能系统的飞轮转子在运动时由磁力轴承实现转子无接触支撑，而机械保护轴承主要负责转子静止或存在较大的外部扰动时的辅助支撑，以避免飞轮转子与定子直接相撞而导致灾难性破坏。高真空及安全保护罩用来保持壳体内始终处于真空状态，减少转子运转的风耗，同时避免转子产生爆裂或定子与转子相碰时发生意外。此外还有一些辅助系统，例如用来负责电机和磁悬浮轴承的冷却系统。

飞轮储能系统是一种机电能量转换与储存装置，它存在两个工作模式：一种为“充电”模式，这时电机作为电动机运行，由工频电网提供的电能经功率电子变换器驱动电机加速，电机拖动飞轮加速储能，能量以动能形式储存在高速旋转的飞轮体中；另一种为“放电”模式，当飞轮达到设定的最大转速以后，系统处于能量保持状态，直到接收到一个释放能量的控制信号，系统释放能量，高速旋转的飞轮利用其惯性作用拖动电机减速发电，经功率变换器输出适用于负载要求的电能，从而完成动能到电能的转换。由此，整个飞轮储能系统实现了电能的输入、储存和输出控制。其工作过程如图 3-9 所示。

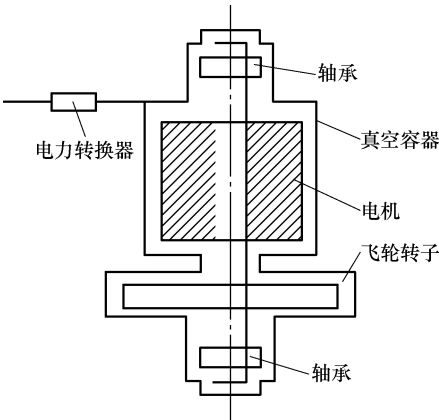


图 3-8 飞轮储能装置的结构

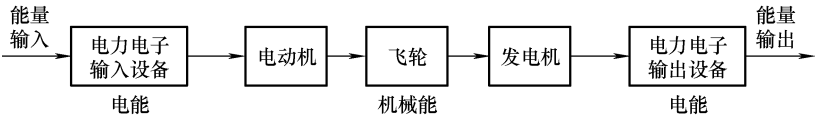


图 3-9 飞轮储能工作过程

飞轮储能需要电能的持续输入，以维持转子的转速恒定。一旦断电，飞轮储能通常只能维持一两分钟。这就是说，飞轮储能的优势不在于时间的长短，而在于充放的快捷。

2. 光伏系统飞轮储能

含有飞轮储能的小型光伏电站系统由光伏电池和飞轮电池两大主体以及控制器电路和

输电线路构成，而飞轮电池又由储能飞轮、磁力轴承、集成式电动机、发电机等关键零部件组成。由于光伏发电是一种随机性、波动性非常强的发电方式，一般只在白天发电，而且在一天不同时段，发电量的差异也非常大，因此必须对它输出的电力进行调节和控制。

一个完整的含有飞轮储能系统的光伏发电站的系统主要由光伏阵列、DC-DC 变换器、两个逆变器、集成式电动机/发电机、一个控制器以及监测和显示仪表等部分构成。具体结构如图 3-10 所示。

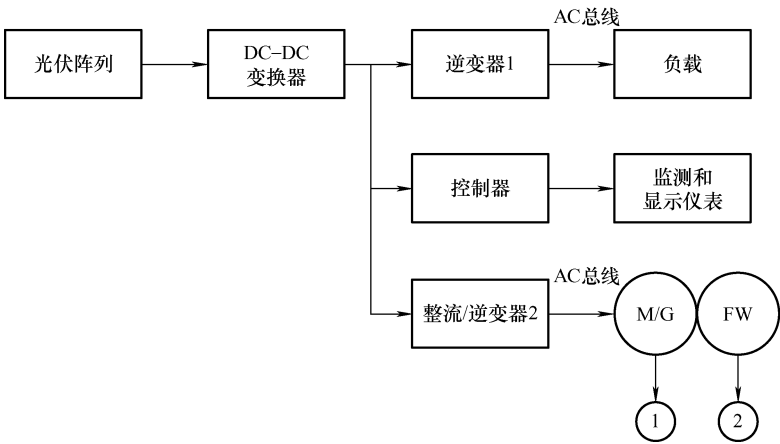


图 3-10 飞轮储能系统结构

DC-DC 变换器的主要作用是将直流输入端的电压提高，以匹配负载的供电电压；当电流通过 DC-DC 变换器升压后，输出部分接入逆变器 1 将直流电变成一定频率和幅值的交流输出到负载，或者接入到整流/逆变器 2 将直流转变成频率和幅值可调的交流电送入到电动机，控制电动机的转速变化，让飞轮电池转速升高而充电。当光伏阵列的输出功率不足或完全没有输出能力时，则负载要由飞轮电池补充或全部供电。由飞轮电池发电机发出的电力经过整流/逆变器 2 整流后送入直流总线部分，再经过逆变器 1 将直流电变成一定频率和幅值的交流电输出到负载，向负载供电。

3.4.2 超导储能

【任务说明】

超导储能（SMES）是利用超导体的电阻为零的特性制成的储存电能的装置，其不仅可以在超导体电感线圈内无损耗地储存电能，还可以通过电力电子换流器与外部系统快速交换有功和无功功率，用于提高电力系统的稳定性、改善供电品质。本内容主要学习超导储能的工作原理及在光伏发电系统中的应用。

【任务实施】

1. 超导储能系统认识

超导储能是将一个超导体圆环置于磁场中，降温至圆环材料的临界温度以下，撤去磁场，由于电磁感应，圆环中便有感应电流产生，只要温度保持在临界温度以下，电流便会持续保持下去。试验表明，这种电流的衰减时间不低于 10 万年。显然这是一种理想的储能装置，称为超导储能。



由于超导储能具备反应速度快、转换效率高等优点，可以用于改善供电质量、提高电力系统传输容量和稳定性、平衡电荷，因此在可再生能源发电并网、电力系统负载调节和军事等领域被寄予厚望。近年来，随着实用化超导材料的研究取得重大进展，世界各国相继开展超导储能的研发和应用的示范工作。

2. 超导储能工作原理

超导储能的基本原理是利用电阻为零的超导磁体制成超导线圈，形成大的电感，在通入电流后，线圈的周围就会产生磁场，电能将会以磁能的方式存储在磁能中。超导储能按照线圈材料可分为低温超导储能和高温超导储能。用于储能的超导技术已经开始显现极有前景的成果。其工作原理是能量储存在绕组的磁场中，由下式表示：

$$E = \frac{1}{2} I^2 L$$

式中， I 为绕组的电流，单位为 A； L 为绕组的电感，单位为 H（亨利）。

绕组必须承载电流，以产生所需的磁场。而产生电流需要在绕组端口施加电压。绕组电流 I 和电压 U 之间的关系为：

$$U = RI + L \frac{di}{dt}$$

式中， R 和 L 分别是绕组的电阻和电感。稳态储能时 $L \frac{di}{dt}$ 必定为 0，驱动电流环流所需电压简化为：

$$U = RI$$

绕组的电阻依赖于温度。对于大多数导体材料来说，温度越高，电阻越大。如果绕组温度下降，电阻也会下降，如图 3-11 所示。某些材料中，电阻会在某个临界温度时急剧下降到精确 0Ω 。图 3-11 中，该点标为 T_c 。在此温度以下，再无须电压来驱动绕组中的电流，绕组的端口可以被短接在一起。电流会在短路的绕组中永远不停地持续流动，相应的能量也就永远存储在绕组中。一个绕组具有零电阻，就称为获得超导状态，而绕组中的能量就被“冻结”。

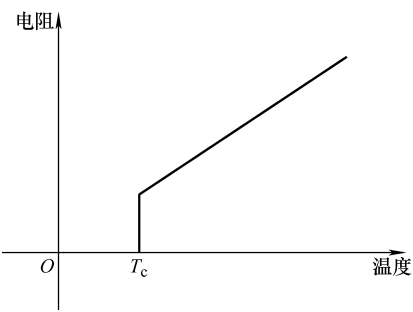


图 3-11 电阻和温度的关系

图 3-12 所示为典型超导储能系统原理。超导磁场的线圈由磁场电源中的 AC-DC 变换器充电。一旦充满，AC-DC 变换器只需提供持续的小幅电压，以克服部分电路元件向室温中的损耗，这样就保持恒定的直流电流在超导线圈中流动（冻结）。在储能模式下，电流通过正常闭合的开关循环流动。

系统控制器有 3 个主要功能：控制固态隔离开关；监视负载电压和电流；与电压调节器接口。该调节器控制直流功率流入和流出绕组。

如果系统控制器检测到线电压降落，就说明系统不能满足负载的要求。电压调节器中的开关在 1ms 之内断开，绕组中的电流此时就流入电容器组，直到系统电压恢复到额定水平。电容器功率被逆变成 60Hz 或 50Hz 的交流，反馈给负载。当电容器能量耗尽时，母线电压便会降落，开关再次打开，该过程继续为负载提供能量。根据为特定负载提供特定持续时间的电力，来确定系统储存能量的规模。

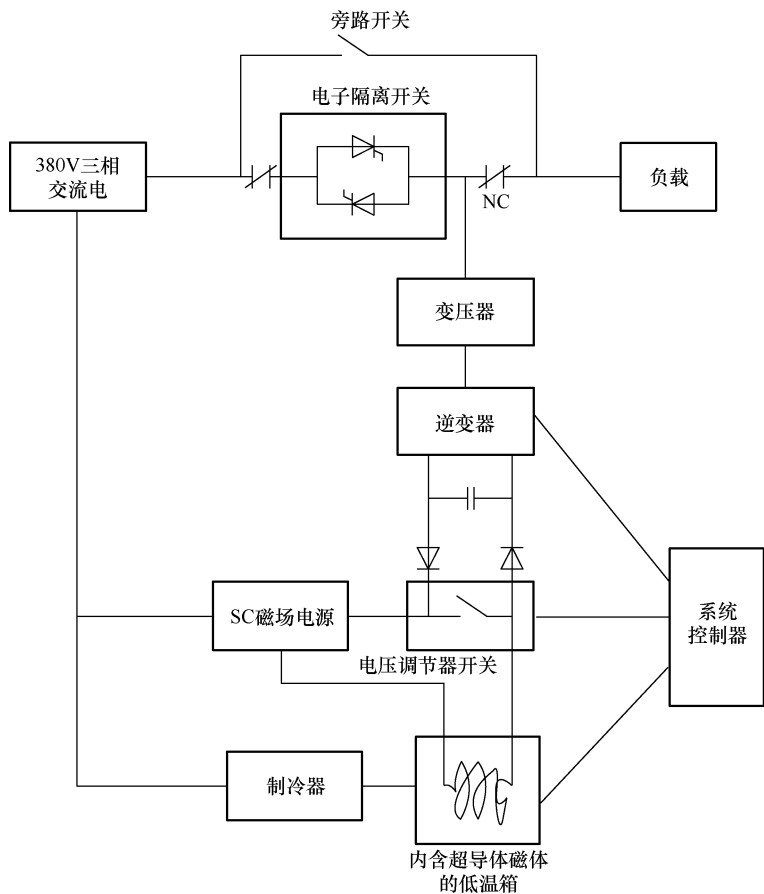


图 3-12 超导储能系统原理

3. 超导储能技术优缺点

(1) 超导储能技术的优点

- 1) 超导线圈运行在超导状态下无直流电流焦耳热损耗，同时它可传导的平均电流密度比一般常规导线线圈高两个数量级，可产生很强的磁场，能达到很高的储能密度（约 10^8 J/m^3 ）且能长时间无损耗地储能，而蓄电池储能重复次数一般在千次以下。
- 2) 能量的释放速度快，功率输送时无须能源形式的转换，可通过采用电力电子器件的变流器实现与电网的连接。响应速度快（ms 级），转换效率高（大于 96%），比容量（1 ~ 10kW · h/kg）和比功率（ $10^4 \sim 10^5 \text{ kW/kg}$ ）大。
- 3) 超导储能线圈的储能量与功率调节系统的容量，可独立地在大范围内选取。储能系统容易控制，超导储能装置独立地与系统进行四象限有功和无功功率的交换，可调节电网电压、频率、有功和无功功率，实现与电力系统的实时大容量能量交换和功率补偿。
- 4) 超导储能装置除了真空和制冷系统外没有转动磨损部分，因此装置使用寿命长。
- 5) 超导储能装置可不受地点限制，污染小。

(2) 超导储能技术的缺点

与其他储能技术相比，超导储能仍很昂贵，除了超导体本身的费用外，维持系统低温导

致的维修频率提高以及产生的费用也相当可观。

4. 超导系统在光伏发电系统中的应用

应用超导储能技术的光伏发电系统的整体结构如图 3-13 所示。光伏发电系统和超导储能系统通过交流母线相连为本地负载供电。电流型超导储能的控制，一般由外环控制和内环控制两部分组成。

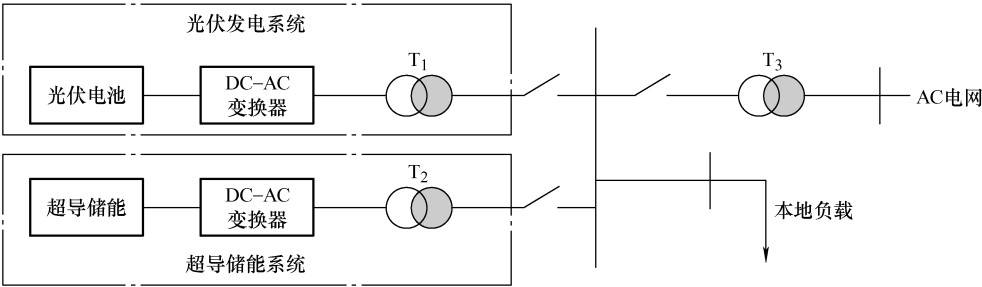


图 3-13 应用超导储能技术的光伏发电系统的整体结构

3.4.3 抽水蓄能

【任务说明】

抽水蓄能电站利用电力负载低谷时的电能抽水至上水库，在电力负载高峰期再放水至下水库发电的水电站，又称蓄能式水电站。它可将电网负载低时的多余电能，转变为电网高峰时期的高价值电能，还起到调频、调相及稳定电力系统的作用。本内容主要学习抽水蓄能电站的作用及其工作原理。

【任务实施】

抽水蓄能电站是一种特殊形式的水力发电系统。该系统集抽水与发电两类设施于一体，上、下游均设置水库，在电力负载低谷或丰水时期，利用其他电站提供的剩余能量，从地势低的下水库抽水到地势高的上水库中，将电能转换为势能；在日间出现高峰负载或枯水季节，再将上水库的水放下，驱动水轮发电机组发电，将势能转换为电能。图 3-14 所示为天荒坪抽水蓄能电站。

1. 抽水蓄能电站的作用

众所周知，随着工业化水平的发展和人民生活用电的增加，电网用电负载的峰谷差越来越大。图 3-14 是典型的日负载曲线。在 8:00~10:00 和 19:00~22:00 为两个高峰负载期，此期间电网的发电出力必须满足用电负载最大值 $P_{\max}$ （大于等于 $P_{\max}$ ）的要求；23:00 以后为低谷负载，电网的发电出力又必须限制在用电负载最小值 $P_{\min}$ 附近。

也就是说，发电出力必须满足调峰要求。随着电网的发展，大机组在电网中的比重将增加，用高压高温高效率的大机组来调节负载不仅在经济上是不合算的，而且对设备的安全和寿命也有影响，因此电网调峰将更为困难。抽水蓄能电站的作用就是在低谷负载期间吸取电网中的电能将水抽至上水库，积蓄能量；而在高峰负载期间再将上水库的水发电。即在图 3-15 中增加了“V”部分的用电负载，使常规机组负载不必降到 $P_{\min}$ 。而在高峰负载时，“P”部分的负载由抽水蓄能机组承担，使常规机组的负载不需要升高到 $P_{\max}$ 。“V”的面积必然是大于“P”的面积，因为在电能平衡上是要亏损的，然而这样却减小了大机组的调峰





图 3-14 天荒坪抽水蓄能电站

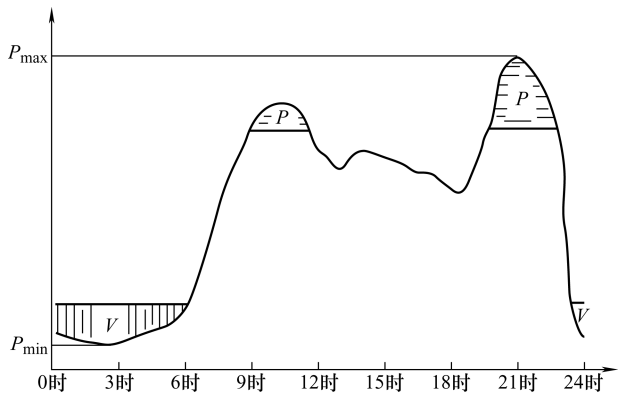


图 3-15 用电日负载曲线

幅度，降低了大机组由于带峰荷而引起的额外的燃料消耗，提高了大机组的利用率。从全网来衡量其经济效益是显著的。

抽水蓄能电站的综合效率一般在 65% ~ 75%，这一数字包括了抽水和发电时所损耗的机械效率。然而，大火电机组利用率的提高即意味着煤耗的降低。如火电厂在 30% ~ 40% 的额定工况运行时，其煤耗约比额定工况增加 35%，而且低负载运行可能要用油助燃，厂用电率也要比正常增加 1 ~ 2 个百分点。煤耗和厂用电的减少也可认为是在同样的能耗时发电量的增加。

此外，常规水力发电站虽然也具备调峰功能，但其发电出力往往与灌溉、防洪等矛盾。因为常规水电站的水库调度是一个综合的系统工程。而抽水蓄能电站的发电量及蓄水量是可以按日调节的，能够做到按日平衡，不影响水库的中长期调度。

综上所述，抽水蓄能电站的优越性可以归纳为以下几点。

- 1) 对电网起到调峰作用，降低火电机组的燃料消耗、厂用电和运行费用。
- 2) 提高火电机组的利用率，可降低火电装机容量。
- 3) 避免水电站发电与农业的矛盾，有条件按电网要求进行调度。

4) 作为事故备用电源, 起动快, 抽水工况与发电工况可以迅速转变, 并可以调相、调频。

5) 无环境污染。

因此, 国际上已经广泛地采用抽水蓄能站, 并向大容量发展。抽水蓄能电站的容量有的国家已经占装机容量的 7% ~ 10%, 占常规水电站装机容量的 20% ~ 30%。

2. 抽水蓄能电站的构成

抽水蓄能电站应有上水库 (池)、高压引水系统、主厂房、低压尾水系统和下水库 (池)。其构成如图 3-16 所示。

按水文条件来看, 如果上水库没有流域面积或流域面积较小, 且没有天然入流量, 则这一类抽水蓄能电站称为“纯抽水蓄能电站”, 厂房内安装流量基本相同的水轮机和 (或) 水泵。如果上水库有天然入流量, 则这一类抽水蓄能电站称为“混合式抽水蓄能电站”, 厂房内除安装抽水蓄能机组外, 尚可增装常规的水轮发电机, 其容量应与来水量相匹配。

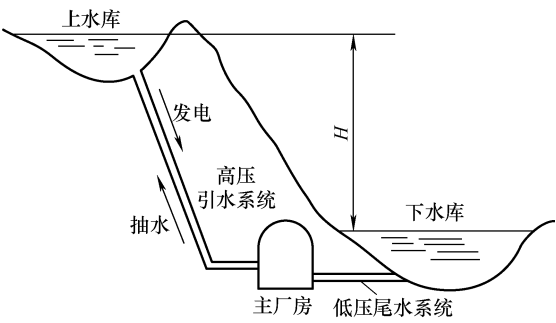


图 3-16 抽水蓄能电站示意图

3. 抽水蓄能电站现状与前景

我国抽水蓄能的发展呈现以下特点。

1) 我国的抽水蓄能电站近 20 年来得到快速发展, 到 2010 年年底, 投产装机容量达到 16345MW, 居世界第三; 在建装机容量达到 12GW, 居世界第一。但抽水蓄能电站装机容量占我国总装机容量的比例还比较低。

2) 施工技术达到世界先进水平, 大型机电设备原来依赖进口, 经过近几年的技术引进、消化和吸收, 基本具备生产能力。

3) 按照目前国家政策, 抽水蓄能电站原则上由电网企业建设和管理。

建设这一批具有良好调节性能、经济高效的抽水蓄能电站, 可以显著提高系统调节能力, 同时, 可以满足风电、光伏发电快速增长所增加的部分调峰需求, 为当地大规模发展清洁能源提供有利条件, 保障跨区跨省输电通道安全运行。根据《抽水蓄能产业发展报告 (2022)》显示, 截至 2022 年底, 我国抽水蓄能已建、在建装机规模达到 160GW, 其中, 已建规模约 46GW, 约占全球抽水蓄能装机的 26.2%, 位居世界首位。

3.5 本章练习

- 1. 简述储能的种类及各自的特点。
- 2. 比较超级电容器储能与铅酸蓄电池储能特点。
- 3. 要为一个太阳能楼宇发电系统设计超级电容, 已知工作电流 30mA, 每天工作 8h, 工作电压 1.8V, 截止工作电压 1.2V, 求超级电容器需要容量。
- 4. 一个离网光伏发电系统负载如表 3-5 所示, 分析该系统蓄电池容量。

表 3-5 离网光伏发电系统负载示例

序号	负载名称	AC/DC	负载功率/W	负载数量	合计功率/W	每日工作时间/h	每日耗电量/W·h
1	空调	AC	1500	1	1500	8	12000
2	电视	AC	100	1	100	8	800
3	日常照明	AC	30	4	120	3	360

5. 分析铅酸蓄电池结构、铅酸蓄电池工作原理、铅酸蓄电池技术参数。
6. 蓄电池型号为 12-GFM-800，型号的含义是什么？
7. 表 3-6 为南都电源几组蓄电池型号，如果要设计一个容量 C 为 3330A·h 的蓄电池组，应该如何选择和设计蓄电池结构。

表 3-6 南都电源蓄电池型号

电 池 类 型	10h 放电容量/A·h	3h 放电容量/A·h	1h 放电容量/A·h
CFM-800	870 ~ 900	620 ~ 673.3	403 ~ 469.3
GFM-1000	1060 ~ 1090	825 ~ 900	625 ~ 675
GFM-1500	1700 ~ 1720	1216 ~ 1237	800 ~ 850