



化学储能技术 及其在电力系统中的应用

苏 伟 刘世念 钟国彬 编著
魏增福 张 静 王 琤



科学出版社

化学储能技术及其在 电力系统中的应用

苏 伟 刘世念 钟国彬 编著
魏增福 张 静 王 琤

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书综合、系统而详细地介绍了各种化学储能技术的特点及其在电力系统发输配用各领域的应用、国内外储能技术的发展状况和各国储能产业政策。

全书共分6章,主要内容有新能源发电概况;储能技术概况;化学储能技术;化学储能技术在电力系统中的应用;化学储能示范工程;全球储能产业政策分析等。

本书适合从事储能技术研发、储能技术应用等领域的相关科研人员、技术人员、管理人员参考使用,也可供国家政府工作人员在制定相关政策时参考借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

化学储能技术及其在电力系统中的应用 / 苏伟等编著. —北京: 科学出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-03-038231-3

I. ①化… II. ①苏… III. ①化学电池-基本知识 IV. ①O646.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 174180 号

责任编辑: 霍志国 / 责任校对: 包志虹

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2013年8月第一版 开本: B5 (720×1000)

2013年8月第一次印刷 印张: 22 1/4

字数: 445 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

日益突出的环境问题和资源问题促进了以风能和太阳能为代表的新能源的迅猛发展，目前，这些可再生能源的发展都面临电力品质差和并网难的瓶颈问题。同时，现阶段用户对电能质量和电力品质要求越来越高，传统的电力系统已经不能很好地满足用户的需求，坚强型智能电网和微电网等电网新技术应运而生。储能技术被视为解决新能源发电并网、建设智能电网的关键技术。那么什么是储能技术？有哪些储能技术可用？这些储能技术有什么特点？这些储能技术在电力系统中如何应用？哪些储能技术最具发展潜力？已建的储能示范工程运行情况如何？国家和地方政府应该如何制定相应的政策来推动储能产业的发展？这些问题都将在本书中得到解答。

本书共分为6章。第1章新能源发电概况，简要地介绍了风能、太阳能、海洋潮汐能、核能、地热、生物质等新能源发电技术的现状、发展趋势、面临的问题及解决方法。第2章储能技术概况，作者从储能的概念和分类谈起，介绍了抽水蓄能等12种储能技术的特点和发展趋势。第3章化学储能技术，作者从基本情况、发展应用现状、生产制造、产业链、生厂商等多个方面介绍了铅蓄电池、锂离子电池、液流电池、超级电容器、钠硫电池、金属-空气电池等化学储能技术，并简要介绍了与储能系统配套的电池管理系统和能量转换系统。第4章化学储能技术在电力系统中的应用，作者将电力系统中的应用细分为发电领域、输配电领域、用户端、辅助服务领域、新能源并网领域、分布式发电以及微电网领域，描述了化学储能技术在这六个领域的具体应用和收益，并介绍了一些领先的化学储能系统集成商。第5章化学储能示范工程，作者选择最具储能应用潜质的铅蓄电池、锂离子电池、液流电池和钠硫电池，分别选取了2~3个示范工程进行介绍。第6章全球储能产业政策分析，在介绍美国、欧洲、日本等先进发达国家和地区的储能政策的同时，也对国内从中央到地方的各种储能产业政策进行了介绍，分析了目前储能产业所面临的机遇和挑战。

本书由广东电网公司电力科学研究所的苏伟、刘世念、钟国彬、魏增福和中

关村储能产业技术联盟储能专业委员会（CNESA）张静、王琤等编著。在写作的过程中，作者还参考了大量的国内外关于储能方面的论文、专著和资料，在此对这些论文、专著和资料的作者和编者一并表示谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在谬误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2013年3月

目 录

前言

第 1 章 新能源发电概况	1
1.1 新能源发电的主要形式、现状及发展趋势	1
1.1.1 新能源发电的主要形式	1
1.1.2 新能源发电的现状	13
1.1.3 新能源发电的发展趋势	22
1.2 新能源发电面临的问题及机遇	24
1.2.1 新能源发电面临的问题	24
1.2.2 新能源发电问题的解决方案以及储能的机遇	31
第 2 章 储能技术概况	34
2.1 储能技术的概念	34
2.2 储能技术的分类	34
2.3 各类储能技术特点	35
2.3.1 抽水蓄能	35
2.3.2 压缩空气储能	36
2.3.3 飞轮储能	37
2.3.4 超导储能	38
2.3.5 铅蓄电池	39
2.3.6 锂离子电池	39
2.3.7 液流电池	40
2.3.8 熔融盐电池	41
2.3.9 镍氢电池	42
2.3.10 超级电容器	42
2.3.11 燃料电池	43
2.3.12 金属-空气电池	44
2.4 化学储能技术的优势	44

2.5	储能技术发展趋势	46
2.5.1	抽水蓄能技术发展趋势	46
2.5.2	压缩空气储能技术发展趋势	47
2.5.3	飞轮储能技术发展趋势	48
2.5.4	超导储能技术发展趋势	49
2.5.5	铅蓄电池技术发展趋势	50
2.5.6	锂离子电池技术发展趋势	50
2.5.7	液流电池技术发展趋势	52
2.5.8	熔融盐电池技术发展趋势	53
2.5.9	镍氢电池技术发展趋势	53
2.5.10	超级电容器技术发展趋势	54
2.5.11	燃料电池技术发展趋势	55
2.5.12	金属-空气电池技术发展趋势	55
2.6	全球储能规模及分布格局	56
2.6.1	全球储能规模及分布情况	56
2.6.2	世界储能发展趋势	61
第3章	化学储能技术	64
3.1	铅蓄电池	64
3.1.1	铅蓄电池简介	64
3.1.2	铅蓄电池的发展应用现状	76
3.1.3	铅蓄电池的生产制造简述	80
3.1.4	铅蓄电池产业链简述	81
3.1.5	铅蓄电池国内外主要生产商	84
3.2	锂离子电池储能	89
3.2.1	锂离子电池的基本情况介绍	89
3.2.2	锂离子电池的发展应用现状	99
3.2.3	锂离子电池的生产制造	104
3.2.4	锂离子电池产业链简述	109
3.2.5	锂离子电池国内外主要产商介绍	111
3.3	液流电池储能	119
3.3.1	液流电池的基本情况介绍	119
3.3.2	液流电池的发展应用现状	128

3.3.3	液流电池的生产制造简述	134
3.3.4	液流电池产业链简述	136
3.3.5	液流电池国内外主要产商介绍	138
3.4	超级电容器储能	142
3.4.1	超级电容器的基本情况介绍	142
3.4.2	超级电容器的发展应用现状	146
3.4.3	超级电容器产业链简述	149
3.4.4	超级电容器国内外主要产商介绍	152
3.5	钠硫电池储能	155
3.5.1	钠硫电池的基本情况介绍	155
3.5.2	钠硫电池的发展应用现状	159
3.5.3	钠硫电池的生产制造简述	163
3.5.4	钠硫电池产业链简述	164
3.5.5	钠硫电池国内外主要产商介绍	165
3.6	其他化学储能技术	166
3.6.1	锌-空气电池	166
3.6.2	锂-空气电池	170
3.6.3	氢能存储	172
3.6.4	太阳能热储存	187
3.7	电池配套系统	196
3.7.1	电池管理系统	196
3.7.2	能量转换系统	199
第4章	化学储能技术在电力系统中的应用	204
4.1	储能在电力系统中的应用	204
4.2	化学储能在电力系统中的应用领域	206
4.2.1	发电领域	206
4.2.2	输配电领域	208
4.2.3	用户端	211
4.2.4	辅助服务领域	220
4.2.5	新能源并网领域	225
4.2.6	分布式发电以及微网领域	228

4.3	化学储能的应用价值	231
4.3.1	储能应用于电网中的收益分析	231
4.3.2	不同化学储能技术的优势应用领域	233
4.4	化学储能电池在电力系统应用中的领先集成商	235
第5章	化学储能示范工程	248
5.1	铅蓄电池储能示范工程	248
5.1.1	美国宾夕法尼亚州莱昂斯超级电池储能项目	248
5.1.2	PNM 光伏储能项目	249
5.2	锂离子电池储能示范工程	251
5.2.1	圣丽塔监狱微电网项目	251
5.2.2	张北风光储输示范项目	253
5.2.3	深圳宝清储能站项目	254
5.3	液流电池储能示范工程	255
5.3.1	美国 Gills 洋葱加工厂储能项目	255
5.3.2	加利福尼亚州莫德斯托变电站项目	257
5.4	钠硫电池储能示范工程	258
5.4.1	加拿大电网储能应用项目	259
5.4.2	美国 AEP 储能项目	260
5.5	其他储能示范工程	261
5.5.1	纽约州电力与天然气公司高级压缩空气储能项目	261
5.5.2	“十二五”期间我国抽水蓄能电站建设规划	263
5.5.3	Beacon Power 20 MW 飞轮调频电站	265
第6章	全球储能产业政策分析	268
6.1	美国储能产业政策	268
6.1.1	2009 年可再生与绿色能源存储技术法案 S. 1091	270
6.1.2	2010 年可再生与绿色能源存储技术法案 S. 3617	270
6.1.3	2011 年可再生与绿色能源存储技术法案 S. 1845	272
6.1.4	2011 ~ 2015 年储能计划 (DOE)	273
6.1.5	美国能源部 (DOE) 2011 ~ 2015 年的储能计划政策补充版	273
6.1.6	联邦能源管理委员会 (FERC) 755 号令: 竞争电力市场的 调频服务补偿	275

6.1.7	联邦能源管理委员会 (FERC) 745 号令：在电力批发市场中对需求响应端进行补偿	275
6.1.8	AB 2514 号法案：美国加利福尼亚州储能支持法案	276
6.1.9	加利福尼亚州-自发电激励政策 (SGIP-CA)	277
6.1.10	ARRA 储能示范项目的资金支持	278
6.2	日本储能产业政策	281
6.3	欧洲储能产业政策	288
6.3.1	欧盟	288
6.3.2	德国	292
6.3.3	其他欧洲国家	294
6.4	中国储能产业政策	296
6.4.1	国家政策	296
6.4.2	地方政策	305
6.5	储能产业政策分析	331
6.5.1	国外政策分析	331
6.5.2	国内政策分析	335
参考文献		342

第 1 章 新能源发电概况

1.1 新能源发电的主要形式、现状及发展趋势

1.1.1 新能源发电的主要形式

(一) 风力发电

1891 年，丹麦人 Poul LaCour 设计建造了世界上第一座风力发电试验站，其后经过一个多世纪的发展，目前风力发电已经成为风能最主要的利用形式。

风力发电的过程是将风的动能转化为机械能，进而转化为电能的过程。如图 1-1 所示，一个简化的风力发电机主要由叶片和发电机组成，叶片所在的叶轮的转轴和发电机的转轴可通过连接装置相连。当风速达到一定的要求后，作用在叶片上带动叶轮旋转，将动能转换成机械能。如果此时将叶轮转轴与发电机转轴相连，叶轮的旋转将带动发电机旋转，从而产生电能。

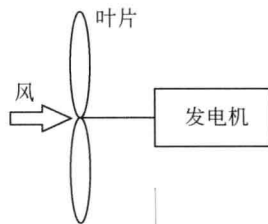


图 1-1 风力发电原理示意图

风能资源的自然特性以及风力发电本身的技术特性给风力发电带来了许多区别于其他发电技术的显著特性。

1. 风力发电的波动性

风力发电的波动性是由于风能资源的波动性造成的。风能是因空气流动而具有的能量，风力发电机利用接近地面的风能发电，由于自然界的风具有随机性和不稳定性，因此给风力发电也带来了波动性。例如，亚秒到分钟时段内的阵风可造成湍流峰值，从而带来短时的发电功率波动；由于日风速的变化带来的日峰

值, 以及天气、季节性循环带来的天气峰值会对电力系统的长期功率平衡产生影响。

2. 风能资源的不完全利用性

风能被转化为风轮的旋转机械动能后, 气团的移动速度降低, 但在旋转面内不可能完全停止, 风能无法全部被风力发电机利用。根据德国物理学家贝兹 (Betz) 提出的贝兹理论, 风能转化为机械能的最大效率为 59.3%, 如果考虑机械能转化为电能的效率, 那么实际风能发电的利用率还会降低。

3. 滞环和切出现象

一般情况下, 风速在 12 ~ 16m/s 的时候, 风力发电机达到额定输出功率 (根据不同的风力发电机设计, 这一数值有所不同)。若风速达到 20 ~ 25m/s, 为了保障安全, 风力发电机将退出运行。使风力发电机退出运行的风速称为切出风速。发生大风暴时, 往往会发生风力发电机的切出现象。当风速降至切出风速以下时, 退出运行的风力发电机往往需要一段时间的延迟, 才会重新启动运行。风力发电机切出后重新启动被称为滞环启动。

风力发电机的滞环和切出现象, 对于电力系统而言, 可能会忽然导致大量风力发电的损失, 给电力系统带来不可靠性。目前一些制造商对风力发电机进行改进, 使输出功率随风速增加逐渐减少, 而不是突然切除, 一定程度上降低了风速过高对电力系统产生的负面影响。

4. 集中效应

随着风电场风力发电机数量的增加和风电场分布区域的扩大, 风电场输出电能的质量会有很大改善, 对电力系统的运行也将产生积极影响, 表现出一定的集中效应。增加风力发电机的数量可以减少湍流峰值影响。短时大风不会同时冲击所有的风力发电机, 整个风电场的输出功率变动会随着风力发电机数量的增加而下降。扩大风电场的分布区域, 天气的变化不可能同时影响所有的风力发电机, 从而可大大降低日峰值和天气峰值带来的影响。

5. 利用时间小于传统发电厂

根据风力资源和风力发电机的类型, 风电场的年利用数大致为 2200 ~ 3500h。如果考虑电网的接纳能力, 风电场的年利用数还会降低, 风电场的利用时间远远低于火电厂和水电站等传统发电厂。例如, 我国 2011 年发电资源年平均利用数为火电 5294h、水电 3028h、核电 7772h、风电 1920h, 2012 年发电资源年平均利用数为火电 4965h、水电 3555h、核电 7838h、风电 1890h。风电场利用时间少, 意味着如果要获得同火电、核电等发电厂相同的电能, 那么风电场的装机容量要远远大于传统发电厂。

6. 其他

风力发电还具有一些其他的特点, 例如, 洁净能源, 不消耗化石资源, 不污

染环境；建设周期短，一个10MW级的风电场建设期不到一年；单机容量小，装机规模灵活，可根据资金和实际需求情况灵活配置；运行维护简单，可在无人值守的情况下正常工作，无需大修，只需定期进行必要维护；发电方式多样化，既可并网运行，也可与柴油发电、光伏发电、水力发电等形成互补系统，独立运行。

(二) 太阳能光伏发电

1887年，德国科学家赫兹注意到，在光的照射下，物体中的电子会发生脱出的现象，即“光电效应”。20世纪初，爱因斯坦提出光子学说，建立了“光电效应”的数学模型。1954年，美国科学家恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室首次制成了实用的单晶硅太阳能电池，将太阳光能转换为电能的实用光伏发电技术诞生了。

太阳能光伏发电是指通过光伏发电系统将太阳光的辐射能转化为电能的过程，其基本原理如下：太阳能电池是实现光电转化的关键部件，是一种半导体器件。当太阳光照射到由p型和n型两种不同导电类型的同质半导体材料构成的pn结上时，在一定条件下，光能被半导体吸收，在导带和价带中产生非平衡载流子——电子和空穴。它们分别在p区和n区形成浓度梯度，并向pn结做扩散运动，到达结区边界时，pn结势垒区存在的强内建电场作用将空穴推向p区，电子推向n区；在势垒区的非平衡载流子亦在内建电场的作用下，各向相反方向运动，离开势垒区，结果使p区电势升高，n区电势降低，在pn结两端形成光生电动势，当在电池两端连上负载后，就可以形成光生电流，从而实现光伏发电（图1-2）。

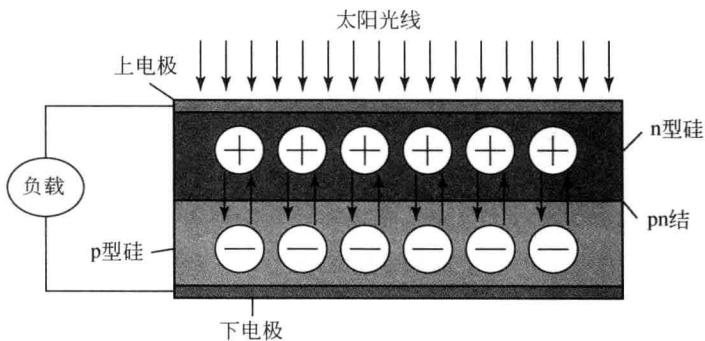


图 1-2 硅基太阳能光伏电池发电原理示意图

值得提出的是，光伏电池发出来的电与风电机组不同，它是直流电。如果要

并入交流电网供电，还需要逆变器进行直流-交流转化。如图 1-3 所示为太阳能光伏发电系统示意图。

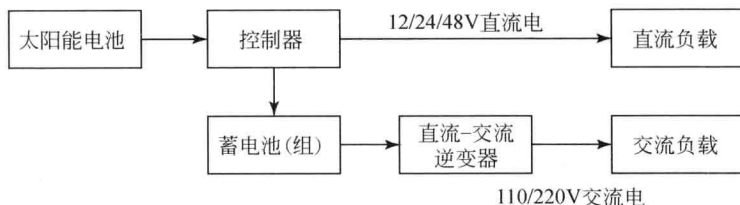


图 1-3 太阳能光伏发电系统示意图

太阳能光伏发电技术是一类洁净发电技术，也是最具可持续发展特征的可再生能源发电技术之一，具有以下几个主要特点：

1. 可利用资源总量巨大

太阳能资源是目前地球最大的能源资源之一，据美国能源部相关研究报告，全球太阳能资源总量达到 12 000TW（1TW = 10^9 kW），其中可经济开发总量达到 600TW，远高于风电（4TW）、地热（12TW）等可再生能源资源的储量。另一方面，用于制造太阳能光伏电池的硅材料，其元素在地球中的含量丰富（在地壳中的含量为 26.3%，排第二），并且无毒、性能稳定。

2. 能量转换过程简单，理论上能源利用效率高

太阳能光伏发电是直接由光子到电子的转换，没有中间过程（如热能转换为机械能，机械能转换为电磁能等）和机械运动，不存在机械磨损。根据热力学第二定律，光伏发电具有很高的理论发电效率，技术开发潜力巨大。但目前的实际应用过程中，由于光伏电池材料本身的原因，光吸收、载流子输运、载流子收集等原因大大降低了太阳能光伏发电的能源利用效率，技术还有待提高。

3. 环保洁净

太阳能光伏发电本身不使用燃料，不排放包括温室气体和其他废气在内的任何物质，不污染空气，不产生噪声，对环境友好。

4. 地域和空间适应性强

只要有光照的地方就可以使用光伏发电系统，不受地域、海拔等因素的限制。光伏发电还可以很方便地与建筑物结合，构成光伏建筑一体化发电系统，不需要单独占地，可节省宝贵的土地和空间资源。

5. 建设周期短

太阳能电池组件结构简单，体积小，质量小，便于运输和安装，而且根据用电负荷容量可大可小，方便灵活，极易组合、扩容。

6. 维护简易

太阳能光伏发电无机械传动部件，操作、维护简单，运行稳定可靠。一套光伏发电系统只要有太阳能电池组件就能发电，加之自动控制技术的广泛采用，基本上可实现无人值守，维护成本低。

(三) 海洋潮汐能发电

潮汐能是指从海水昼夜间的涨落中获得的水的势能，与天体引力有关，地球-月亮-太阳系统之间的吸引力以及热能是形成潮汐能的来源。潮汐能的能量与潮量和潮差成正比，但能量密度很低。

潮汐发电与普通水力发电原理类似，通过在海边建立水库，涨潮时将海水储存在水库内，以势能的形式保存，然后，在落潮时放出海水，利用高、低潮位之间的落差，推动水轮机旋转，带动发电机发电。差别在于海水与河水不同，蓄积的海水落差不大，但流量较大，并且呈间歇性，从而潮汐发电的水轮机结构要适合低水头、大流量的特点。

潮水的流动与河水的流动不同，它是不断变换方向的，潮汐发电有单池单向发电、单池双向发电、双池双向发电3种形式。

利用潮汐能发电具有下列优点：

1. 清洁环保

潮汐能依靠潮水每日涨落，周而复始，取之不尽，用之不竭，是一种清洁、不污染环境、不影响生态平衡的可再生能源。

2. 稳定可靠

潮汐能发电很少受气候、水文等自然因素的影响，全年总发电量稳定，不存在丰、枯水年和丰、枯水期影响，是一种相对稳定的可靠能源。

3. 节省土地资源

潮汐电站与水电站不同，不需淹没大量农田构成水库，不存在人口迁移、淹没农田等复杂问题。对于人多地少、农田非常宝贵的沿海地区，更是突出的优点。

4. 安全性较好

潮汐电站不需筑高水坝，即使发生战争或地震等自然灾害，水坝受到破坏，也不至于对下游城市、农田、人民生命财产等造成严重危害。

5. 性价比较高

潮汐能开发不受一次能源价格的影响，而且运行费用低，是一种经济能源。当然，潮汐能发电也具有一些缺点：

1. 间歇性

潮差和水头在一日内经常变化，在无特殊调节措施时，潮汐电站出力有间歇性，给用户带来不便。

2. 初期投资高

潮汐电站建在港湾海口，通常水深坝长，施工、地基处理及防淤等问题难度较大，故土建和机电投资大，造价较高。

3. 机组易腐蚀

潮汐电站发电机组长期浸泡在海水中，海水、海生物对金属结构物和海上建筑物有腐蚀和沾污作用。

(四) 核能发电

1954年，前苏联奥布宁斯克核电站并网发电，揭开核能用于发电的序幕，人类进入了和平利用核能的时代。

核能发电的过程是将核反应堆中的核燃料进行裂变反应所释放的核能转化为电能的过程，其基本原理如下：原子由原子核与核外电子组成，原子核由质子与中子组成。如图 1-4 所示，当反应堆中的铀-235 的原子核受到外来中子轰击时，一个原子核会吸收一个中子分裂成两个质量较小的原子核，同时放出 2~3 个中子，裂变产生的中子又去轰击另外的铀-235 原子核，引起新的裂变，从而发生链式反应。

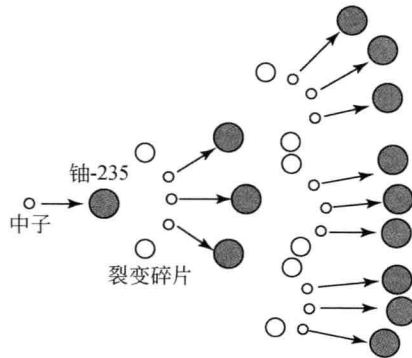


图 1-4 链式裂变反应示意图

链式反应产生大量热能，用循环水或其他物质带走热量的同时避免反应堆因过热烧毁，再将导出的热量用热交换的方式将水变成水蒸气，从而推动气轮机发电（注：可用于核能发电的重元素还有钚-239、铀-233 等）。

目前世界上核电站常用的反应堆有压水堆、沸水堆、重水堆和改进型气冷堆以及快堆等，对于不同类型的核反应堆，相应的核电厂的系统和设备有较大的差别。目前应用最广泛的是压水反应堆，它以普通水作冷却剂和慢化剂，是从军用堆基础上发展起来的最成熟、最成功的堆型。

压水堆核电站主要由压水反应堆、反应堆冷却剂系统（简称一回路系统）、蒸汽和动力转换系统（又称二回路系统）、循环水系统、发电机和输配电系统及其辅助系统组成。如图 1-5 所示。

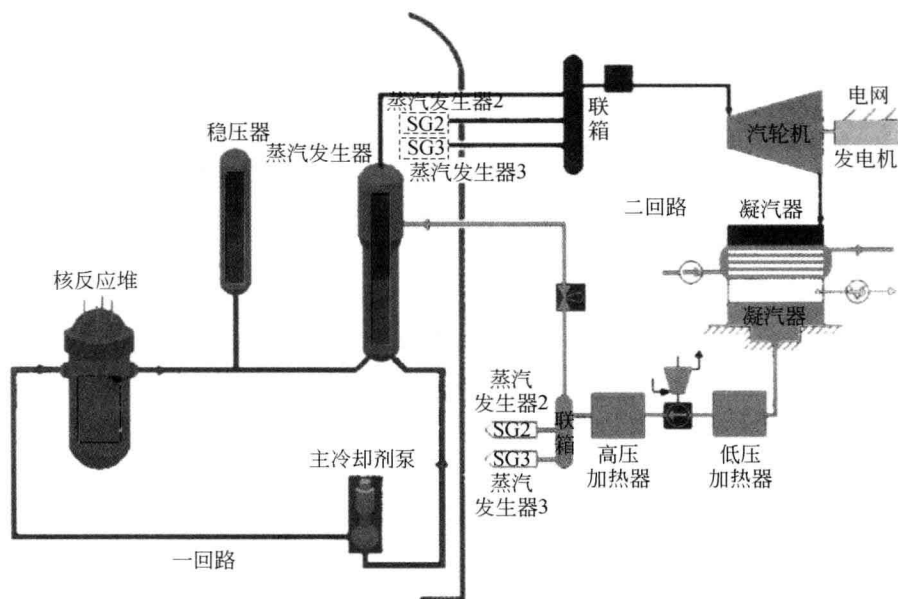


图 1-5 压水堆核电站的一回路系统、二回路系统原理流程示意图

一回路系统由核反应堆、主冷却剂泵（又称主循环泵）、稳压器、蒸汽发生器和相应的管道、阀门及其他辅助设备所组成。高温高压的冷却水在主循环泵的推动下在一回路系统中循环流动，当冷却水流经反应堆时，吸收核燃料裂变产生的热能，随后流入蒸汽发生器，将热量传递给蒸汽发生器管外侧的二回路给水。冷却水冷却后流入主冷却剂泵入口，经主冷却泵提压后，重新送入反应堆内。如此反复，形成一个密闭的循环回路。

二回路系统由汽水分离器、汽轮机、发电机、凝汽器、凝结水泵、给水泵、给水加热器、除氧器等设备组成。二回路给水在蒸汽发生器中吸收热量后成为水蒸气，然后进入汽轮机做功，汽轮机带动发电机发电。做功后的乏汽排入凝汽器凝结成水，并由凝结水泵送入加热器，加热后送入蒸汽发生器，从而形成二回路