

# 光伏发电驱动下制氢 - 储能智能微网的建模与控制

杜清岭<sup>1</sup> 谢瑞胜<sup>1</sup> 张建党<sup>2</sup> 孙希德<sup>1</sup>

1. 山东弘图电力科技有限公司; 2. 山东银河建筑规划设计有限公司

**摘要:** 本文研究了光伏发电 - 制氢 - 混合储能系统在智能微网中的协同运行机制, 分析了光伏升压变换、电解槽建模、蓄电池与超级电容等储能结构的特性及控制要求。通过引入模糊 MPPT 策略、PI 闭环制氢控制、改进型下垂控制及 LADRC 自抗扰策略, 实现了系统能量的动态优化管理与稳定输出。

**关键词:** 光伏发电; 混合储能; 智能微网控制

随着清洁能源技术的迅速发展, 光伏发电因其绿色高效、获取便捷等优势, 在智能微网中得到了广泛应用。然而, 光照不稳定性带来的输出波动问题仍是制约其大规模应用的关键因素。为此, 构建集成制氢与混合储能系统的智能微网, 成为提升可再生能源利用率、增强供电稳定性的有效手段。

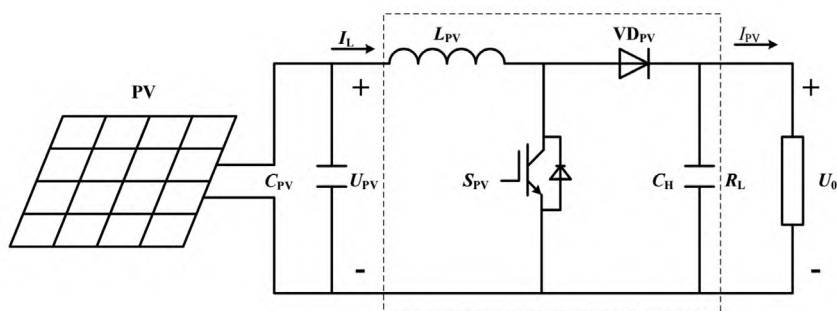


图 1 Boost 变换器

## 1 光伏发电系统原理与优化控制技术

### 1.1 光伏发电系统电压变换技术

1) Boost 升压变换器工作原理。Boost 升压变换器是光伏发电系统中关键的能量调节单元, 主要作用是将光伏电池输出的较低直流电压升高至系统所需水平。其基本电路由电感、电容、二极管及开关器件组成。当开关导通时, 光伏电池通过电感储能; 开关闭合后, 储能电感与光源共同释放能量, 使输出电压升高。该过程中电感两端的平均电压为零, 依据伏秒平衡原理, 可推导出输入与输出电压的关系公式:  $U_{pv} = (D) U_o$ , 其中  $D$  为占空比。

2) 在微电网中的应用场景。由于光伏电池阵列输出的电压常因辐照和温

度变化而波动, 直接并入微电网直流母线存在稳定性风险。通过 Boost 变换器 (见图 1) 可将不稳定的光伏电压调节至系统所需的恒定电压水平, 确保与其他分布式电源和负载实现有效能量协同。特别是在多源互补的微电网环境中, Boost 变换器不仅提升了能量利用效率, 还为最大功率点追踪 (MPPT) 算法的实现提供了硬件基础。

### 1.2 最大功率点跟踪 (MPPT) 策略研究

1) MPPT 基本原理与作用。由于光伏电池输出特性受光照强度、温度等环境因素影响, 其最大功率点不断变化。MPPT 控制器通过持续监测电压、电流变化, 实时调整工作状态, 使光伏系统始终运行于最优功率点, 从而提升整体

能量转换效率。该技术在提升发电量、降低系统损耗方面发挥关键作用, 尤其在分布式发电与微电网系统中, MPPT 能有效缓解负载波动影响, 提升系统稳定性与经济性, 是光伏发电系统不可或缺的控制环节。

2) 基于模糊控制的改进型 MPPT 算法。为提升 MPPT 的响应速度与跟踪精度, 本文采用双输入模糊控制器, 输入变量为当前电压与最大功率点电压的偏差  $\Delta U$ , 以及前一时刻占空比变化量  $\Delta D(n-1)$ 。通过引入历史扰动信息, 控制器能更全面判断当前运行状态, 避免因突变误判引发的不稳定扰动。

针对传统扰动观察法在稳态时易产生功率振荡的问题, 本文引入模糊控制机制动态调节扰动步长, 避免固定步

长带来的效率损失。在接近最大功率点时,控制器自动减小步长,精细调整输出;在偏离时则快速响应,提高收敛速度。仿真结果显示,该改进算法显著减少了功率波动,提升了光伏系统在动态环境下的最大功率点跟踪能力,实现了稳定性与效率的双重优化。

3) 仿真模型与效果对比分析。在 Matlab/Simulink 平台上,构建基于模糊控制的改进型 MPPT 算法仿真模型。通过将模糊控制器嵌入光伏发电系统中,对输出电压和电流进行了对比分析。仿真结果表明,与传统扰动观察法相比,改进算法在追踪最大功率点的过程中能有效抑制输出波动,使电流和电压曲线更为平滑、稳定。在环境光照和温度变化条件下,该算法表现出更快的响应速度和更高的跟踪精度,有效避免了稳态时的功率振荡问题。

2 混合储能系统研究

2.1 制氢系统设计与建模

1) 电解槽类型比较与 AWE 选择依据。目前主流电解槽包括碱性水电解 (AWE)、质子交换膜 (PEM) 和固体氧化物 (SOEC) 3 种类型。PEM 具备高效率和响应快的优势、但成本高;SOEC 效率高但稳定性和安全性尚未突破;相比之下,AWE 技术成熟、成本低、寿命长以及适合大规模制氢,是当前应用最广泛的技术。考虑到本文系统需稳定对接光伏输出,综合经济性与可靠性,最终选择 AWE 电解槽作为制氢核心设备。

2) AWE 电解槽原理与反应特性分析。AWE 电解槽通过施加直流电解水生成氢气和氧气,阳极析氧、阴极析氢,其反应原理与燃料电池相反。系统采用氢氧化钾溶液作为电解介质,提高导电性能;阳极材料选用抗腐蚀镍钴合金,阴极为掺铂镍基复合材料,提升电化学反应效率,制氢设备结构原理如图 2 所示。

3) 制氢系统数学模型与 Simulink

仿真。基于电解槽工作原理与热力学特性,构建了其电压 - 电流特性和热模型,融合欧姆阻抗、电极过电位及温度因子,建立了完整的数学模型。随后,在 Matlab/Simulink 中搭建仿真系统,模拟碱性电解槽在不同温度与输入电流下的响应,清晰展示了系统在起始电压、稳定分解点及能耗效率等方面的性能表现,验证了模型的准确性和工程适用性。

4) 制氢速率与电流密度的关系分析。仿真分析表明,制氢速率与电流密度呈显著正相关。随着电流密度的提升,电解反应加剧,单位时间内水分子分解更充分,氢气产量明显增加。但若电流密度过高,会加速电极腐蚀、降低系统寿命,因此需控制在合理区间。通过构

建氢气速率模块与电流模块耦合模型,进一步验证了控制电流对提升系统效率的关键作用。

2.2 混合储能系统构建与控制策略

1) 储能结构拓扑对比。混合储能系统主要由蓄电池与超级电容构成,常见拓扑包括无源、半有源和有源结构。无源结构简单但缺乏能量调控能力;半有源结构中仅对蓄电池或电容加变换器,实现部分可控;有源结构对两者均采用 DC/DC 双向变换器控制,具备高精度功率管理能力,适应负载快速变化,系统灵活性与稳定性最强。综合性能考虑,本文采用有源连接拓扑,超级电容结构如图 3 所示。

2) 双向 DC/DC 变换器原理与能

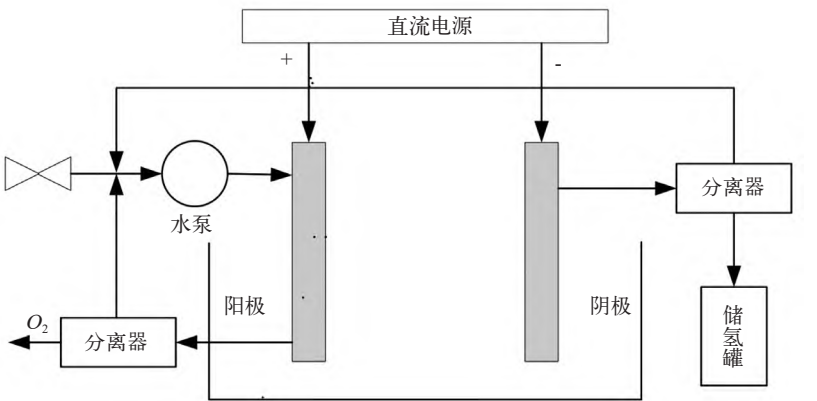


图 2 制氢设备结构原理图

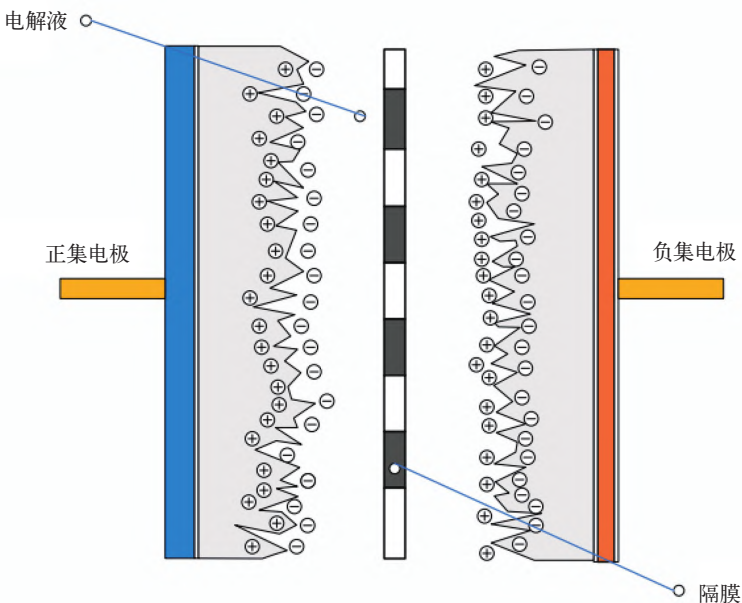


图 3 超级电容结构

量流控制。双向 DC/DC 变换器是实现储能单元与直流母线能量交换的核心部件,可在升压(Boost)与降压(Buck)模式间切换。当光伏输出多余时,系统处于 Buck 模式储能;当负载需求高于供给时,进入 Boost 模式释放储能。通过调节晶体管 T1 与 T2 的导通状态与占空比,实现双向功率流调控,确保系统输出平稳,并提升储能系统的响应灵活性与控制精度。

3) 蓄电池工作机制与等效电路模型。蓄电池依靠电化学反应进行储能与放电,其等效模型采用电压源串联内阻与电压恢复项构成,可模拟其充放电特性。本文选用带指数项的 Thevenin 模型,能有效描述蓄电池在不同荷电状态(SOC)下的输出特性。模型参数包括初始电压、极化电压、容量和等效内阻,可用于 SOC 估算与动态特性分析,是后续系统能量管理与控制算法设计的关键基础。

### 3 智能微网控制策略研究

#### 3.1 智能微网系统结构与功能

1) 智能微网系统构成与模块功能概述。智能微网系统由光伏发电单元、电解水制氢单元、蓄电池储能单元、超级电容单元及负载构成。光伏系统作为主要可再生能源输入,通过 Boost 变换器实现电压调节与最大功率点追踪(MPPT);蓄电池负责能量长期存储,超级电容器承担短时功率调节与波动平衡;制氢单元则将富余电能转化为氢气,实现深度储能。各模块通过双向 DC/DC 变换器与直流母线互联,实现能量协同流动与策略控制。

2) 能量流动与协同机制。智能微网内部通过 DC 母线构建能量汇聚平台,各功能模块基于电压、电流、荷电状态(SOC)及功率需求动态调整充放电行为。在光照充足时,光伏系统优先供电,冗余电力通过变换器分别供给制氢模块或充电至储能系统。当负载需求

高于发电能力时,蓄电池与超级电容依序放电以维持电压稳定。此种动态能量流调控机制确保了系统整体能效、稳定性与高响应速度的融合。

3) 控制系统总体架构设计。智能微网控制系统基于分布式协调控制思想,核心由智能主控单元实现各模块状态识别、策略分发与功率调度。控制器根据负载变化、光照强度、电池 SOC 等实时参数生成控制指令,分配至各 DC/DC 变换器,驱动光伏、制氢与储能单元执行相应充放电操作。该架构具备自适应性强、容错能力高与运行安全性的优势,是微网实现自治与智能运行的基础保障。

#### 3.2 智能微网核心控制策略设计

1) 光伏发电的 MPPT 控制策略。为充分提升光伏系统的能量转化效率,本文采用基于模糊逻辑的改进型最大功率点跟踪(MPPT)策略。该方法融合了扰动观察法(P&O)与模糊控制器的双重优势,通过引入光伏电压与功率变化趋势作为输入,动态调节 Boost 变换器的占空比,使光伏阵列在不同光照强度与温度条件下始终运行在最大功率输出点。与传统固定步长算法相比,模糊控制策略具备更强的环境适应能力与快速响应特性,显著减少功率振荡,提升系统稳定性,光伏发电制氢储能微网结构如图 4 所示。

2) 制氢单元的动态功率调控策略。制氢系统采用 PI 闭环控制策略实现动态电流调节,以匹配光伏电源波动条件下的能量输入。控制器首先根据目标功率与电解槽实时电压计算出参考电流值,随后将该参考值与实际电流进行对比,差值输入至 PI 控制器,生成占空比修正信号,调节 DC/DC 变换器控制逻辑,从而实现对电解电流的动态调整。该方法在不稳定输入功率背景下,确保制氢效率与系统运行稳定性并重。基于 Simulink 仿真平台的测试结果表明,该控制策略可有效降低电解槽电流的波动幅度,提升氢气产量,确保在光伏富余电能存在时进行高效储氢,满足智能微网灵活、高效的能源转换需求。

3) 蓄电池控制方法与改进型下垂控制策略。针对微网中蓄电池并联运行的功率协调问题,本文引入改进型下垂(见图 5)控制策略,即传统电压-电流下垂控制与电压二次补偿机制相结合。基本原理是将蓄电池输出电压与输出电流关联,利用虚拟阻抗调节功率分配,实现并联蓄电池之间的负载均衡。通过构建充电、放电及混合充放工况仿真模型,验证该控制策略在不同 SOC 初始条件下均能实现输出电流趋同与 SOC 平衡,同时确保母线电压稳定在目标值附近。该策略有效提升了储能系统的协

(下转 87 页)

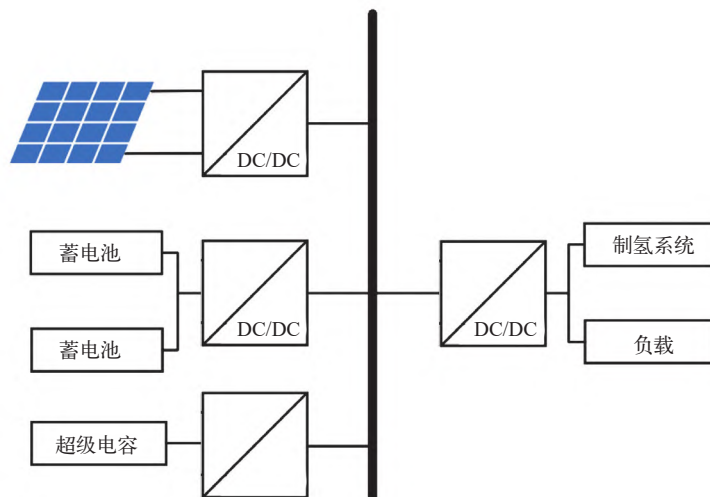


图 4 光伏发电制氢储能微网结构图

之分,主要区别如下:A型子系统是结构简单的子系统,其失效模式可以完整定义,失效行为可以完全确定,并且能够获取足够的失效概率数据。石油化工行业内常见的A型子系统有:热电偶、热电阻、机械开关型仪表、电磁阀、阀门、继电器等。B型子系统是结构复杂的子系统,其失效模式无法完整定义、失效行为无法完全确定、无法获取足够的失效概率数据。石油化工行业内常见的B型子系统有:智能变送器、可编程控制器等。系统能力是系统安全完整性的度量,用SC1到SC4表示。一个SIL<sub>n</sub>的子系统的系统能力为SC<sub>n</sub>。

### 3.4 验算结果的确定

SIF回路的SIL等级最终能否满足回路定级的要求,需要3方面条件同时满足才能确定。首先系统结构约束必须达到相应的SIL等级要求,其次回路要

求的失效概率要在所需的失效概率范围之内,再次各子系统的系统能力必须达到SC<sub>N</sub><sup>[5]</sup>。

## 4 结论

综上所述,安全仪表系统的评估对于安全仪表系统正确地执行安全功能至关重要。目前,安全仪表系统在设计、安装、调试和维护等生命周期各阶段,还存在着风险分析不完全、设计选型不严谨、结构设置不理想、使用维护管理不健全等问题,因此需要加强和规范安全仪表系统管理、完善安全仪表系统的评估,通过安全仪表系统的安全完整性评估使得安全仪表系统在风险分析、设计选型、结构设计等方面更合理、更完善,从而将石油化工装置的潜在风险发生的可能性降到最低,保障人民生命和财产的安全。

## 参考文献:

- [1] 国家安全生产总局.关于加强化工安全仪表系统管理的指导意见:安监总管三[2014]116号[A/OL].(2014-11-05).<http://www.mem.gov.cn/>.
- [2] 过程工业领域安全仪表系统的功能安全:GB/T 21109—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [3] 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全:GB/T 20438—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [4] 石油化工安全仪表系统设计规范:GB/T 50770—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [5] 张建国.安全仪表系统在过程工业中的应用[M].北京:中国电力出版社,2010.

(上接83页)

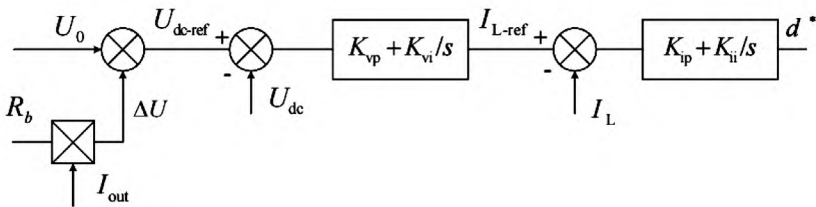


图5 传统下垂控制框图

调控制性能和运行可靠性。

4) 超级电容器的自抗扰控制策略。超级电容器作为微网系统中短时间高功率输出的关键储能单元,其控制策略需兼顾动态响应与鲁棒性。本文引入线性自抗扰控制(LADRC)替代传统PI控制,通过构建包含跟踪微分器、扩张状态观测器(LESO)及误差反馈控制器的控制架构,实现对母线电压的快速稳压控制。LADRC无需依赖精确系统模型,能够实时估算系统扰动并动态补偿,使系统对光伏波动或负载突变具备更强的响应能力。相比于传统PI控制,LADRC在母线电压控制方面表现出更

低的超调率和更短的响应时间,有效保障了微网系统的动态稳定性和抗干扰能力,提升了超级电容器在复杂运行条件下的控制性能。

## 4 结论

本文基于光伏发电-制氢-混合储能智能微网构架,系统分析了电压变换、能量调控及控制策略设计,提出了多种优化方法,并通过仿真验证其稳定性与高效性。研究表明:模糊MPPT提升了发电效率,PI制氢控制保障了电解稳定运行,改进下垂控制和LADRC显著增强了储能系统的动态响应与母线电压

稳定性。

## 参考文献:

- [1] 席娜娜,鞠力,丁瑜,等.离网光储氢微网储能配置优化的混合构网型控制策略[J].电力自动化设备,2025,45(1):1-13.
- [2] 胡启明.硫酸铁高效催化氢化镁水解制氢研究[J].工业催化,2025,33(1):58-63.
- [3] 李欣,韦古强,强同波,等.压缩空气储能与氢能耦合系统的研究进展[J].发电技术,2025,45(1):1-17.
- [4] 荆捷,董砚,杨富荃.孤岛风电制氢系统日前及实时能量管理[J].科学技术与工程,2025,25(1):210-218.
- [5] 孔令国,范乃文,石振宇,等.风-储-氢-燃机协同平抑功率波动运行配置策略[J].高电压技术,2025,45(1):1-14.