

# 光储直柔配电系统分块建模及协调管控策略研究

郭宇能, 雷占和\*, 彭朝雄, 郭健伟

(南方电网综合能源股份有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要** 光储直柔配电系统由于涉及光伏、储能、直流配电等多种资源类型, 如何建立准确、全面的资源模型成为技术难点; 不同类型资源之间缺乏协调控制策略, 导致资源优化调度和互补利用难以实现。为解决以上问题, 本研究聚焦于该系统中涉及的光伏发电技术、储能技术、直流配电技术和柔性控制技术等主要技术分别进行建模, 以实现对系统的清晰认识, 并在此基础上讨论如何将各种技术进行整合控制, 对系统协调控制, 以实现系统高效稳定地运行, 最后针对上述方法的应用进行案例分析, 结果证明了提出的光储直柔配电系统分块建模方法和协调管控策略的有效性。

**关键词** 光储直柔配电系统; 分块建模; 分层控制; 电能质量控制

**中图分类号**: TM7; TP3

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.04.004

## 0 引言

在全球能源转型与新型电网建设的大背景下, 光伏发电等分布式能源于电力供应的占比持续上扬。光储直柔配电系统精准融合光伏、储能与直流负荷, 凭借柔性控制技术, 巧妙应对分布式能源的间歇性、波动性, 大幅提升能源利用效率, 有效减少对传统电网的依赖, 环境与经济效益颇为显著。但是, 系统内多种资源特性迥异, 运行工况繁杂, 给建模和控制工作带来诸多难题, 深入钻研其多类型资源建模与协调策略意义重大。本研究针对系统关键技术逐一详细建模分析, 提出涵盖功率平衡、电能质量把控、优化调度及能量管理的完整协调控制策略, 经应用及案例分析, 有力验证了分块建模及管控策略的有效性、可行性, 为系统广泛应用筑牢理论根基、提供技术指引。但此次研究仅考量部分不确定因素, 后续可围绕系统不确定性、多能源协同运作及与智能电网深度融合深入探索, 推动技术进阶。

## 1 光储直柔配电系统分块建模

### 1.1 光伏系统建模

#### 1.1.1 光伏电池等效电路模型

光伏发电原理如图1所示<sup>[1]</sup>。

在实际的研究进程里, 人们往往运用单二极管模

型对光伏电池进行建模, 以此呈现光伏电池的电气特性。此模型涵盖了光伏电池的光生电流、二极管反向饱和电流、串联电阻以及并联电阻等各项参数, 凭借构建非线性方程的方式, 来展现光伏电池输出电压与电流之间的关联。特征方程如下:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

其中,  $I$  为光伏电池输出电流;  $I_{ph}$  为光生电流;  $I_0$  为二极管反向饱和电流;  $V$  为输出电压;  $R_s$  为串联电阻;  $R_{sh}$  为并联电阻;  $q$  为电子电荷量;  $n$  为二极管特性。

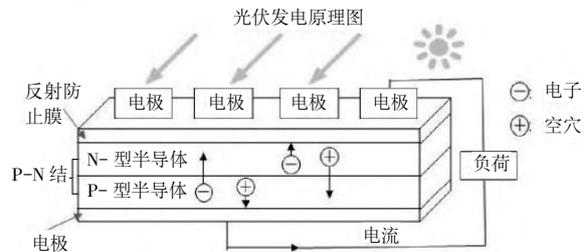


图1 光伏发电原理示意图

#### 1.1.2 光伏组件建模

光伏组件由多个光伏电池串、并联组合而成, 假设一个光伏组件由  $N_s$  个电池串联和  $N_p$  个这样的串联支路并联组成, 组件的电流  $I_m$  和电压  $V_m$  与单个电池的电流  $I$  和电压  $V$  的关系为:

\*本文通信作者, E-mail: leizhanhe@csg.cn。

$$I_m = I \times N_p, V_m = V \times N_s \quad (3)$$

考虑到失配情况,即在实际的光伏组件中,不同光伏电池因为外部因素很难做到输出功率一样,可能会出现失配现象<sup>[2]</sup>。这种失配会导致组件的输出功率降低,可以通过引入失配因子减少失配现象造成的影响。

## 1.2 储能系统建模

电池储能是光储直柔配电系统中最常见的储能方式,常使用到的有锂离子电池、铅酸电池等。锂离子电池具备能量密度高、自放电率低等优点,然而其容量、输出等参数会受充放电次数、温度等因素的影响而发生变化,这一问题依然存在<sup>[3-4]</sup>。

对电池储能建立等效电路模型,常用的等效电路模型是 Thevenin 模型。它由一个理想电压源  $E$ 、一个串联电阻  $R_s$  和一个并联 RC 的电路构成。理想电压源  $E$  代表电池的开路电压,其大小与电池的荷电状态有关。串联电阻  $R_s$  主要反映电池在充放电过程中的欧姆损耗,包括电极材料、电解液和连接部件等的电阻。并联的 RC 电路用于模拟电池的极化现象,其中电容表示电池的极化电容  $C_p$ ,电阻表示极化电阻  $R_p$ 。

根据基尔霍夫定律,电池的端电压可以表示为:

$$V = E - R_s I - V_p \quad (4)$$

其中  $I$  是充放电电流;  $V_p$  是极化电压。极化电压  $V_p$  的动态变化可以用微分方程表示:

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{I}{C_p} - \frac{V_p}{R_p C_p} \quad (5)$$

## 1.3 直流负荷建模

根据直流负荷的类型和特性,将其分为恒定功率负荷、可变功率负荷等。对于恒定功率负荷,其模型较为简单,可表示为  $P_L = \text{const}$ 。对于可变功率负荷,如一些具有时间特性或受外部因素影响的负荷,可建立基于时间序列或与相关变量关联的功率模型,例如某些电子设备的功率随时间呈周期性变化,可通过傅里叶级数等方法进行建模。

## 1.4 柔性控制元件建模

### 1.4.1 电力电子变换器模型

于光储直柔配电系统当中,光伏逆变器以及储能变流器这类电力电子变换器属于达成能量转换与控制的核心组件。可运用开关函数法或者状态空间平均法来构建它们的数学模型<sup>[5]</sup>。以单相全桥逆变器为例,运用开关函数去阐述它在不同开关状态时的电路拓扑结构,从而推断出其交流侧输出电压和直流侧输入电

压之间存在的关联。而状态空间平均法能够被用来剖析变换器处于连续工作模式时的动态特性,获取它的小信号模型,以此为依据开展控制器的设计工作。

### 1.4.2 柔性交流输电系统 (FACTS) 元件模型

如静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)等 FACTS 元件,可根据其工作原理建立相应的数学模型。STATCOM 可通过建立其与电网电压、电流以及无功功率之间的关系模型,来实现对电网无功功率的动态补偿和电压调节。

## 2 光储直柔配电系统协调控制策略

### 2.1 基于分层控制的功率协调策略

设计分层控制架构,包括上层的能量管理系统(EMS)和下层的本地控制器。EMS 根据系统的负荷预测、光伏功率预测以及储能系统的状态信息,制定全局的功率调度计划,确定光伏、储能系统和电网之间的功率分配目标。下层的本地控制器则负责具体执行功率控制指令,实现对光伏逆变器、储能变流器等设备的实时控制,以确保系统在不同运行工况下的功率平衡。例如,在光照充足且负荷较低时,控制光伏多余功率优先给储能充电;当负荷高峰且光伏功率不足时,控制储能放电补充功率缺额。

### 2.2 电能质量控制策略

#### 2.2.1 谐波抑制与无功补偿

借助控制电力电子变换器运用特定的控制算法,如滞环电流控制、空间矢量脉宽调制(SVPWM)等手段,实现对直流侧与交流侧的谐波抑制以及无功补偿的目标<sup>[6]</sup>。在直流侧方面,可以在储能变流器或者直流母线上连接有源电力滤波器(APF),通过检测直流电流里的谐波成分来实施补偿动作,以此削减直流电压的纹波。而在交流侧,凭借光伏逆变器或者 STATCOM 等 FACTS 元件所具备的无功调节能力,依据电网电压以及无功需求状况,动态地对无功输出予以调整,从而保障交流母线电压的稳定与正弦性,降低电压谐波畸变率。

#### 2.2.2 电压暂降与暂升补偿

当电网出现电压暂降或暂升等电能质量问题时,利用储能系统的快速响应能力和电力电子变换器的控制灵活性进行补偿。例如,在电压暂降时,储能系统通过变流器快速向系统注入额外的无功功率和有功功率,提升故障点附近的电压水平,保障敏感负荷的正常运行;在电压暂升时,储能系统可吸收多余的能量,防止电压过高对设备造成损害。

### 3 光储直柔配电系统协调控制策略应用及案例分析

#### 3.1 功率协调控制

在8:00至16:00光照充沛的白天时段,光伏阵列以最大功率点跟踪(MPPT)模式运行,输出功率随光照强度波动,超出负荷需求的电能经双向DC-DC变换器存入储能系统。在中午12:00左右,光照强度达 $800\text{ W/m}^2$ ,光伏阵列输出约40 kW,而柔性负荷仅需20 kW,剩余20 kW便被送至储能系统,使其SOC从0.5升至0.65。

到了18:00至22:00,夜幕降临或光照不佳且负荷需求大时,储能系统启动放电。例如20:00,负荷需求35 kW,光伏阵列输出仅5 kW,储能系统就得释放30 kW电能,SOC从0.65降至0.55。

凭借这套功率协调控制机制,系统实现了功率均衡稳定与优化分配,既提升了能源利用效率,又增强了供电可靠性与稳定性,确保不同工况下为用电设备与场景持续供电。

#### 3.2 电压协调控制

基于下垂特性的电压协调控制手段,专注稳定直流母线电压。系统功率变动时,直流变换器依下垂特性自动调节输出电压。如负荷瞬间增10 kW,直流母线电压短暂跌落,不过储能系统与光伏侧变换器会同步提功率,让电压0.5秒内回升至380 V额定值,波动限于 $\pm 3\text{ V}$ 。此策略解决了电压不稳的问题,为系统平稳、电能质量奠定了基础,保障了电力供应连续稳定,提升了应对复杂工况的能力。

#### 3.3 能量优化管理

MPC能量优化管理策略是先采集系统当下运行状态,再依据对未来光照强度、负荷需求和电价走势等信息的精准预测,为系统各组件定制最优控制方案。

以一个月为周期,在白天光照足且电价低时,系统优先用光伏阵列发电满足负荷需求,多余电能再被高效存入储能系统。到了夜晚峰电阶段,减少从电网购电,依靠储能系统放电,并合理调节柔性负荷来保障用电。通过这种能量优化管理模式,系统运行成本相比传统策略降低了18%,成效明显。而且储能系统的SOC能稳定处于0.4至0.6的合理区间,避免了电池过度充放电损害寿命,提升了系统的综合性能,在经济效益上也有重大突破,让系统在复杂能源环境下能稳定、高效、经济地运行,实现能源高效利用与成本控制。

### 4 结束语

本研究围绕光储直柔配电系统,针对光伏、储能、直流负荷与柔性控制元件精准建模,清晰呈现系统架构,进而结合功率平衡、电能质量把控、优化调度及能量管理等策略,全方位提升系统运行性能与稳定性,应用及案例分析也佐证了方法行之有效,但研究尚存短板,建模时仅纳入部分关键不确定因素,如极端天气、突发设备故障等现实复杂状况有所遗漏,后续需优化建模,使之更贴合真实运行情境。展望未来,伴随能源技术日新月异、电力需求节节攀升,光储直柔配电系统有望大放异彩。后续探索应聚焦多元突破:着力打造智能自适应控制策略,讲解系统复杂性与不确定性;强化跨学科协作,融汇电力电子、控制理论、能源管理等知识,驱动光储直柔配电技术迈向高效、智能、可持续新高度,为全球能源革新与电力系统现代化筑牢根基。

#### 参考文献:

- [1] 周洋. 新能源光伏发电场运维安全防护控制技术[J]. 科学技术创新, 2024(19):1-4.
- [2] 王佐. 局部阴影下光伏阵列输出特性分析及失配损失评估[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [3] 李俊豪, 何倩, 李军. 锂离子电池自修复材料的研究现状[J/OL]. 化工新型材料, 1-5[2025-01-10]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rq9xis5c9i\\_BIdZcumQky1AtfctCdY5ATB\\_oQc31pJSoO6oQro4PdwZmciuwx9m5TK-s117kPu4VxIS7U1oO7DG4dh0rtqMOUhNE90vldFPY3g8kZ\\_r62UDa9rPS71fpegfmBfiZLAhaBQZD0sBIHFJyZM6VAmtoy83JcYXDQNMTTX6GIBMUy2T05pCTwY9W&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rq9xis5c9i_BIdZcumQky1AtfctCdY5ATB_oQc31pJSoO6oQro4PdwZmciuwx9m5TK-s117kPu4VxIS7U1oO7DG4dh0rtqMOUhNE90vldFPY3g8kZ_r62UDa9rPS71fpegfmBfiZLAhaBQZD0sBIHFJyZM6VAmtoy83JcYXDQNMTTX6GIBMUy2T05pCTwY9W&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [4] 郑静, 苗楚婷, 秦潇. 抽水蓄能电站与新型储能技术经济性比较[J]. 水电与抽水蓄能, 2024, 10(03):11-15.
- [5] 梅念, 王光达, 陈钊, 等. 模块化多电平换流器子模块关键部件稳态电流应力全解析化计算[J]. 电网技术, 2022, 46(10):3712-3720.
- [6] 陆文俊, 李辉. 弱电网下基于LADRC控制策略的构网型变换器电压协调控制[J/OL]. 电力科学与工程, 1-10[2025-01-10]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rq9xis5c9i9Hj9pf1ph\\_nXJKb4ZGH21S6Q45S13euHrov\\_sl5ea9PXcWIFM1FwRiAgiao98fGW8n7Y5Bu0LpAVQWpsTwMZh-TgtXOhQsW1\\_onRug-SsF6fF2Afj\\_o92FBoHUuDPjSYfgKlc5sYiK4FGgNnvEkHgXsYj0EGMRrJP8\\_s-aQNCMnW8X0lXb13Z&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rq9xis5c9i9Hj9pf1ph_nXJKb4ZGH21S6Q45S13euHrov_sl5ea9PXcWIFM1FwRiAgiao98fGW8n7Y5Bu0LpAVQWpsTwMZh-TgtXOhQsW1_onRug-SsF6fF2Afj_o92FBoHUuDPjSYfgKlc5sYiK4FGgNnvEkHgXsYj0EGMRrJP8_s-aQNCMnW8X0lXb13Z&uniplatform=NZKPT&language=CHS).