

配电台区分布式光伏供用电储能调配优化

程智搏¹ 赵伦加¹ 邱奕铭¹ 江全才²

1 国网湖北省孝感供电公司

2 三峡大学电气与新能源学院

DOI:10.32629/etd.v7i4.20283

[摘要] 供电系统配电台区是分布式光伏能源接入的基本区域单元,分布式光伏接入配电台区装机容量规模优化控制、发电能力、供用电需求平衡、光伏电能储能和供电时域转移是光伏能源发展的关键,本文以某供电区域为样本数据来源,通过对配电台区光伏发电能力、供电时序的间歇性、分散性等实际统计数据的数理分析,建立了光伏能源供电能力-供电时序数学模型;通过对配电台区用电量、用电时序不均匀性等实际统计数据的综合分析,建立了台区用电量-用电时序数学模型;基于对光伏能源供电能力-供电时序和台区用电量-用电时序的差异对比分析,提出配电台区光伏能源装机容量规模的优选原则和光伏能源的合理调配原则;对分布式光伏大规模接入情况下,以配电台区光伏能源年度总体发电供电量与年度总体用电量平衡为条件,提出配电台区光伏电能储能应对策略,实现配电台区全时域任意时刻(时段)的供用电量平衡,重点解决配电台区光伏能源建设规模规划、光伏能源供电时序迁移削峰填谷的储能应对策略。本研究成果已实际应用,具有推广价值。

[关键词] 光伏; 供电时序; 用电时序; 平衡调配; 储能

中图分类号: U223 **文献标识码:** A

Optimization of Distributed Photovoltaic Energy Storage Provisioning for Power Supply and Use in Distribution Pedestal Areas

Zhibo Chen¹ Lunjia Zhao¹ Yiming Qiu¹ Quancai Jiang²

1 State Grid Hubei Province Xiaogan Power Supply Company

2 China Three Gorges University, College of Electrical Engineering and New Energy

[Abstract] The distribution substation of the power supply system serves as the basic regional unit for the integration of distributed photovoltaic energy. The optimization control of installed capacity scale, generation capacity, balance between power supply and demand, photovoltaic energy storage, and time-domain power transfer in distribution substations are critical factors for the development of photovoltaic energy. This paper uses a specific power supply area as the data source. Through mathematical analysis of actual statistical data on the photovoltaic power generation and supply capacity, the intermittent and dispersed nature of power supply sequence in distribution substations, a mathematical model linking photovoltaic energy supply capacity to power supply sequence was established. Through comprehensive analysis of actual statistical data on electricity consumption and the uneven distribution of power consumption sequence in distribution substations, a mathematical model linking substation electricity consumption to power consumption sequence was established. Based on a comparative analysis of the differences between the photovoltaic energy supply capacity-supply sequence and the substation electricity consumption-power consumption sequence, optimal principles for determining the scale of photovoltaic energy installed capacity in distribution substations and reasonable principles for photovoltaic energy allocation are proposed; Under the condition of balancing the annual total power generation and supply of photovoltaic energy with the annual total electricity consumption in distribution substations under the scenario of large-scale grid connection of distributed photovoltaic systems, this study proposes photovoltaic energy storage response strategies for distribution substations to achieve power supply and consumption balance at any time (time segment) across the entire time domain, focusing on

addressing issues related to the planning of photovoltaic energy construction scale and storage response strategies for peak shaving and valley filling in photovoltaic energy power supply sequence migration. The research findings have been applied in practice and have significant potential for broader implementation.

[Key words] photovoltaic; power supply sequence; power consumption sequence; balanced allocation; energy storage

引言

随着全球能源转型进程的加速与“双碳”目标的深入推进,以光伏为代表的可再生能源正以前所未有的规模接入电力系统。其中,分布式光伏凭借其就近消纳、清洁灵活的特性,在配电网台区层面得到了广泛应用,成为推动新型电力系统建设的重要力量。然而,随着光伏能源的大规模快速发展,带来新能源政策及供电运营模式等诸多方面的新问题,制约了光伏能源的进一步快速发展。一方面,技术进步和规模化使得光伏投资成本大幅降低,促进了光伏能源的发展,吸引了投资人;多样化的光伏能源资源使得光伏建设项目实现“能建尽建”的指引政策具备了广阔的发展空间,提供了光伏能源建设发展的有利条件;另一方面,光伏能源全面进入无补贴市场化的发展阶段,对光伏能源建设投资产生了一定的制约;最重要的是,光伏发电固有的间歇性与波动性,与刚性负荷需求的时序不匹配性,随着渗透率的急剧提升而被急剧放大。这一“源-荷”时序冲突在配电网层面造成了巨大的运行压力,导致电压越限、潮流反送、设备过载等问题频发。为确保电网安全,供电公司不得不采取限制光伏发电规模和弃光电措施,难以保证光伏电能“应接尽接”新能源政策执行力,给投资人带来负面影响。

供电系统配电网台区是分布式光伏能源接入的基本区域单元,落实新能源政策,保障分布式光伏大规模健康发展,需要掌握配电网台区所在区域光伏能源单位装机发电能力、供电时域分布特征和台区用电需求、用电时域分布特征,以供用电需求总体平衡为原则,解决光伏能源装机容量优化控制,以保障配电网台区全时域任意时刻(时段)的供用电量需求同步平衡为目标,采取储能应对策略,解决光伏能源供电时序转移,平衡调配供用电时序。

国内外对分布式光伏储能调配优化方向做了大量研究。文献^[1]应用鲁棒优化和二阶锥松弛技术解决了分布式电源接入引起的配电网电压偏移和网损问题。文献^[2]应用贪婪算法和功率损耗灵敏度解决了分布式储能系统容量优化配置问题,提高了计算效率。文献^[3]应用虚拟储能模型和多时间尺度优化调度解决了建筑微网灵活资源的优化调度问题,降低了运行成本并缓解了可再生能源波动。文献^[4]应用电压灵敏度分析和粒子群优化算法解决了分布式光伏接入引起的配电网电压越限问题,优化了运行成本。文献^[5]讨论了基于电池管理系统、能量管理系统等策略,解决了配电网储能设备运行策略与容量的协调优化问题。文献^[6]应用日前-日内两阶段协调优化策略,结合CVaR风险度量与二阶锥规划解决了分布式光伏和储能的主动支撑问题,兼顾供电质量与经济性。文献^[7]应用双层规划方法,上层规划优

化储能配置,下层优化运行策略,解决了不同光伏渗透率下配电网净负荷波动问题,通过需求响应和储能协同提升经济性。文献^[8]应用改进Shapley值法,结合稳定贡献度、偏差调整贡献度等指标,解决了台区分布式新能源共享储能联盟的收益分配公平性问题,提升合作效益。文献^[9]应用虚拟电厂聚合技术解决了配电网电压越限问题,通过协同调度降低运行成本。上述文献均为理论研究,通过仿真算例验证有效性,未能得到实际应用,光伏能源发电能力和供电时域分布以及配电网台区用电时域分布的地区差异大,需要更具针对性的深入研究。

本文将根据某区域配电网台区实际样本数据,统计分析分布式光伏单位装机发电能力,对比台区用电需求,提出配电网台区光伏装机容量规模的控制原则;基于对光伏能源供电时序的间歇性、分散性和台区用电时序的不均匀性的数据差异分析,提出配电网台区光伏能源的合理调配原则及储能应对策略;对分布式光伏大规模接入情况下,以配电网台区光伏能源年度总体发电供电量与年度总体用电量平衡为条件,重点解决配电网台区光伏能源建设规模规划、光伏能源供电时序迁移削峰填谷的储能应对策略,为光伏能源建设健康发展提供借鉴。

1 光伏能源供用电时序差异与需求分析

1.1 光伏能源供电能力与时序特征

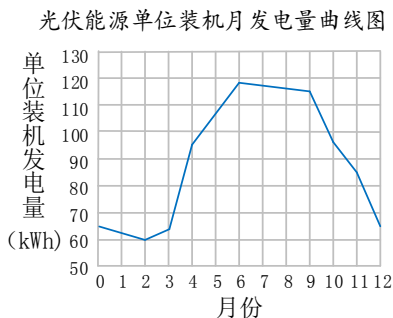
依据文献资料整理分析并依据选择某区域供电公司配电网接入光伏近5000余户的综合统计数据为样本分析处理,结果显示:

1.1.1 接入配电网光伏发电供电时间段实际单位装机最大供电负荷均约0.7-0.8千瓦/千瓦,非发电时间段供电负荷为零;

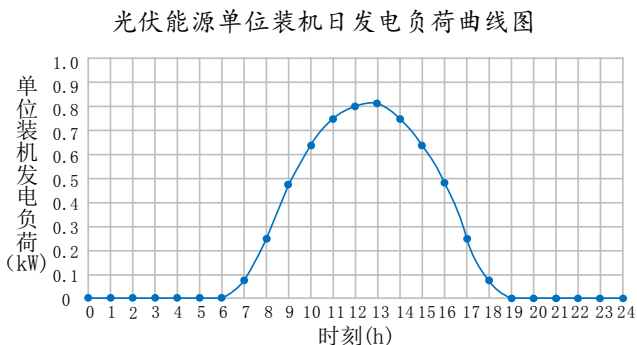
1.1.2 光伏发电实际单位装机年均发电量约800-1200千瓦时/千瓦,单位装机月均发电量约70-100千瓦时/千瓦;

1.1.3 光伏能源所提供的供电负荷、供电量按年统计存在明显的季节性差异,自4月至10月期间日照时间长,光照强,光伏能源所提供的供电负荷、供电量月均值高于年平均均值约4-5%,在春夏季阴雨天多,光伏能源所提供的供电负荷、供电量月均值波动幅度差异大,1月至3月及12月冬季日照时间短,光照弱,光伏能源所提供的供电负荷、供电量日均值和月均值低于年平均均值约5-6%;光伏能源单位装机月均发电负荷曲线如下图一:

1.1.4 分布式光伏发电负荷、发电量按日统计存在明显的日昼时间差异,时间间歇性强,光伏能源在白天有日照时间才能提供电能,所提供供电负荷、供电量在白天时间6时至18时呈现基本正态分布,午时达到最大值。供电负荷最大值约为光伏装机容量的80%,全天24小时均供电量约为光伏能源装机发电量的20-30%。样本区域光伏发电厂累计分时供电负荷曲线如下图二:



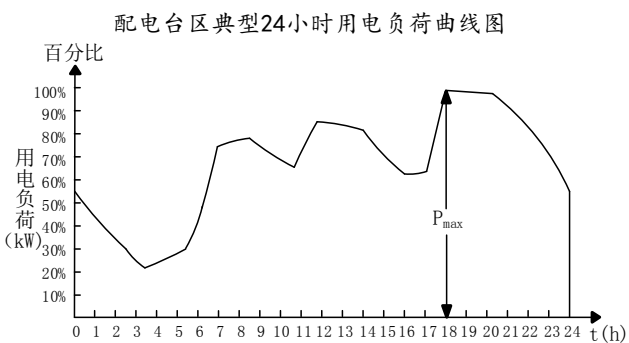
图一 光伏能源单位装机月均发电量曲线图



图二 光伏能源单位装机分时发电负荷曲线

1.2 配电台区用电时序特征

配电台区主要为城乡居民用电,典型用电负荷、用电量时域分布呈现明显的全时域波动,选择某区域供电公司近100余个配电台区用电统计数据为样本,综合分析处理结果显示,配电台区用电负荷、用电量在0点至6点时间段出现明显低谷,在7-8点和12-14点时间段出现小高峰,18-20点是用电高峰段,20-24点是用电高峰缓降时间段。各配电台区用电负荷、用电量波动幅度差异变化较大,并同时受季节性影响,配电台区用电负荷、用电量时序呈现高度不确定性,无明显规律可循。样本区域典型24小时用电负荷统计曲线如下图三:



图三 样本区域典型24小时用电负荷曲线

1.3 配电台区供用电时序差异

对比样本区域光伏发电厂供电负荷统计数据 and 典型用电负荷统计数据及供电和用电累计分时曲线,配电台区光伏能源供用电时序存在明显差异:

1.3.1 光伏能源可发电日在18时至6时和光伏能源非发电日

(阴雨天、设备维护检修日)发供电负荷基本为零,对配电台区用电负荷无支撑,此时间段内配电台区用电负荷只能由台区变或台区储能器供电,以及台区变和台区储能器双源联合供电;

1.3.2 光伏能源可发电日6时至18时,光伏能源发供电负荷与配电台区用电负荷在某一时刻必然存在正负差额,受配电台区接入光伏能源的规模(装机容量)的影响和制约;

1.3.3 光伏能源的日、月度、年度发供电负荷和配电台区的日、月度、年度用电负荷受各种因素影响无规律可循,随机性强。需通过台区变供电、光伏能源供电、台区储能供电三源进行供用电时序转移达到供用电时域动态平衡。

1.4 配电台区光伏能源供用电需求

来自供电公司的统计数据和实际样本调研显示,目前配电台区分布式光伏发电量所占台区年用电量比例在0%-30%,均约10%,说明当前电力系统分布式光伏接入配电台区规模较小,资源条件利用尚有限,各台区光伏装机容量差异明显;以配电网供用电技术导则分区户均容量标准,各台区配变容量很多未能达标;以现有台区配变容量的80%控制配电台区光伏装机容量的供电公司内部标准存在偏差,远不能达到实现以光伏能源单独满足配电台区用电需求目标的基础支撑条件,配电台区光伏能源建设空间巨大。

2 配电台区光伏装机容量建设规划策略

在“双碳”战略目标的宏观指引与一系列鼓励新能源发展的政策驱动下,配电台区作为分布式光伏接入的关键场景,正迎来规模化发展的重大机遇。“能建尽建、应接尽接”的政策导向为其提供了广阔的建设空间,但也对台区系统的承载与消纳能力提出了更高要求。为实现高质量可持续发展,需以系统化思维统筹规划,将分布式光伏总装机容量控制在合理范围内,力求实现台区全年光伏发电总量与用电需求的基本平衡,从能量总量上奠定低碳运行基础。然而,光伏出力的波动性、间歇性与负荷用电的时序不匹配,成为制约台区实现真正能源自洽的关键瓶颈。因此,必须引入储能系统作为关键灵活性资源,通过其“时序平移”和“削峰填谷”功能,化解源荷实时矛盾,提升台区自我调节能力。最终目标是构建以光伏能源为主、储能协调支撑的台区级微能源系统,逐步实现电能的“自给自足”,形成安全、高效、绿色的分布式能源利用新模式,为新型电力系统建设提供底层支撑。

目前配电台区分布式光伏发电量所占台区年用电量比例均约10%,占比小,分布式光伏总装机规模有大幅提高的空间。配电网供用电技术导则按配电台区分区划分为A、B、C、D区,分别制定了户均配变容量标准,以户均配变容量标准为光伏总装机容量目标限制条件具可行性和科学性,能够有效保证台区供用电需求总体平衡。根据统计分析结果,按各配电台区分布式光伏总装机容量的80%与各台区户均配变容量标准对等来控制分布式光伏总装机容量,可保障实现光伏能源单独满足配电台区用电需求目标。

按当前实际现状,接入配电台区的分布式光伏总装机容量

所产生的发电量尚不能满足总体用电量需求, 仍然需要通过台区变向上级电网取供电, 台区总体电能平衡方程如2-1:

$$P_T + \sum_1^n P_{G_i} \times 80\% = \bar{P}_h \times M \quad (2-1)$$

其中 P_T : 台区变供电容量; P_{G_i} : 第*i*光伏发电户装机容量 (*i*=1~*n*); \bar{P}_h : 网络台区户均配变容量; M : 台区用电用户数。

当接入配电台区的分布式光伏发电量能够单独满足用电量需求时, 台区变供电 P_T 为零。

3 配电台区光伏电能调配与储能应对策略

以配电台区分布式光伏总装机容量的80%与各台区户均配变容量标准对等为光伏总装机容量控制条件有效地保障了台区供用电量总体平衡, 要实现配电台区全时域任意时刻(时段)的供用电量的动态平衡, 必须充分考虑光伏能源供电时序特征与配电台区的用电时序特征差异, 通过储能调节应对, 实现光伏能源供电时序转移, 峰谷互调, 供用电实时动态平衡。每一分布式光伏装机接入配电台区均自配置上网电量计量装置, 台区所有光伏装机接入户的上网电量之和为台区光伏接入上网电量, 同时, 配电台区所有用户用电量均自配置用电量计量装置, 台区所有用户用电量之和为台区用电量, 在全时域任意时刻(时段)的光伏供电量与用户用电量差余额均能实时获取并传输至储能运算控制器, 光伏装机以单相或三相T接入配电台区, 台区三相配电线路等同三条“母线”, 当“母线”上实时光伏发电量大于用户用电量, 供电有余时, 储能运算控制器控制“母线”给储能器充电, 此时储能器视作“虚拟用户”自然“用”(储)电, 存储电量; 当“母线”上实时光伏发电量小于用户用电量, 供电不足时, 储能运算控制器控制储能器向“母线”放电, 实现储能器供电; 保障台区全时域任意时刻(时段)的供用电量动态平衡。台区实时电能动态平衡方程如3-1

$$\sum_1^n P_{G_i}^t = \sum_1^m P_{y_i}^t \pm P_c^t \quad (3-1)$$

其中: $P_{G_i}^t$ 第*i*光伏发电户*t*时刻上网供电量 (*i*=1~*n*):

$P_{y_i}^t$ 第*i*台区用电户*t*时刻上网用电量 (*i*=1~*m*); P_c^t : 储能器*t*时刻存储电量(+为储电, -为放电)。

同时, 维持配电台区电压稳定和保障储能器容量是配电台区供用电稳定运行的基本条件。

随着光伏发电技术的快速迭代与设备性能的持续提升, 分布式光伏并网引起的接入点电压波动问题已得到有效控制。由于分布式光伏单体容量较小, 且以多点T接方式分散接入配电网, 单个节点的电压波动在多节点叠加与平均作用下显著平抑, 使得具备“母线”特征的配电台区整体电压稳定性趋于良好。对

多个光伏接入台区的实际运行数据进行统计分析表明, 其电压偏差、波动与闪变等电能质量指标均符合国家标准要求。为进一步提升系统电压鲁棒性与电能质量, 可在关键“母线”节点加装主动稳压装置, 构建多级协同、主动抑制的高可靠性配电架构, 为高比例光伏接入条件下的配电网安全稳定运行提供坚实保障。

配电台区储能器的任务就是实时保障台区全时域任意时刻(时段)的发供电量与用电量动态平衡。作为关键柔性调节资源, 储能器需根据光伏出力和用户负荷的实时变化, 快速响应并执行能量调度。在台区全时域任意时刻的光伏发供电量有余时, 储能器按“虚拟用户”能够全额接受余电, 在台区全时域任意时刻的光伏发供电量不足时, 储能器以“虚拟电厂”向台区放供电, 因此, 储能器基本存储容量应大于某设定时段的受放电余电差额, 基于对100余个配电台区供用电样本统计数据进行分析, 以台区光伏年度供用电总体平衡为约束条件, 储能器容量优化原则如下:

3.1.1 光伏正常发电时段, 为保障台区供用电动态平衡, 满足日昼供电时序迁移, 储能器容量应大于台区日均用电量30%;

3.1.2 光伏非正常发电时间段(阴雨雪天及设备维护), 为保障台区供用电动态平衡, 满足设定保障时段供电日昼需求, 储能器容量应大于台区设定保障时段日均用电量乘以设定保障日数; 基于样本统计分析, 配电台区设定保障时段不大于7日;

3.1.3 以上两原则配置储能器容量, 均可能出现储能器容量保障有余和保障不足的情况, 保障有余时, 采取加装储能器末端充电桩实现电能综合利用, 推动盈余电能的就地消纳与综合利用, 提升系统经济性; 保障不足时, 通过台区变取电以保障供电需求, 在台区光伏电能还不足以单独满足需求的过渡阶段亦如此。

3.1.4 配电台区光伏供电不足时, 储能器供电优先, 以保障储能器适时“储”“放”功能更有效。

综上, 配电台区储能系统的容量规划需统筹考虑日内调节、多日备份与运行策略, 在数学建模与实测分析相结合的基础上进行优化设计, 以支撑配电台区逐步迈向高比例可再生能源消纳与高效自平衡的目标。

4 结论

本文运用数理统计学原理, 以某供电区域配电台区接入分布式光伏现有5000余发电户和20000余用电户三年发供电及用电量实际数据为基础, 通过对光伏发供电能力、供电时序特征性分析, 建立了光伏能源供电能力-供电时序数学模型; 同时, 结合配电台区用电量及用电时序不均匀性的实际统计特征, 建立了用电量-用电时序数学模型; 利用模型完成了供电能力-供电时序和用电量-用电时序差异对比分析, 提出了配电台区光伏能源装机容量规模控制和供用电优化调配策略; 对分布式光伏大规模接入, 台区光伏能源年度总体发、供、用电量平衡条件下, 以满足配电台区全时域任意时刻供用电动态需求为目标, 提出了配电台区光伏电能储能转移优化策略。

本研究成果具体针对特定供电区域并实际应用,方法简单适用。尽管不同地区在分布式光伏发电能力方面存在差异,但在发用电平衡与时序协调方面具有共性特征,因此本研究形成的模型与策略具有一定推广价值。本文首次提出的储能器按“虚拟用户”全时域全额接受余电、适时按需放供电的储能应对策略,有效保障了分布式光伏能源“能建尽建”“应接尽接”新能源政策执行力。后续研究将聚焦于提升台区发用电实时数据与储能系统“储”“放”功能协同控制软硬件的可靠性,以进一步增强系统的实用性与鲁棒性。

[基金项目]

国家自然科学基金青年科学基金项目(52407009)。

[参考文献]

- [1]吴科成.考虑分布式储能功率四象限输出的主动配电网鲁棒优化调度模型[J].南方电网技术,2021,15(11):75-84.
- [2]郭雨涵,郁丹,杨鹏.基于贪婪算法的分布式储能系统容量优化配置方法[J].储能科学与技术,2022,11(07):2295-2304.
- [3]黄旭,祖国强,司威.配电台区灵活资源多时间尺度优化调度方法——以含虚拟储能的建筑微网为例[J].储能科学与技术,2024,13(02):568-577.
- [4]顾怡,邢洁,马洪艳.计及配网电压越限的光储协同优化运行策略[J].储能科学与技术,2024,13(03):893-902.

[5]张杨,陶生虎,张笑波.配电网储能设备运行策略与容量的协调优化[J].储能科学与技术,2024,13(03):903-905.

[6]黄立滨,蔡海青,顾浩瀚.计及分布式光伏和储能主动支撑的配电网日前日内协调优化运行策略[J].南方电网技术,2024,18(08):51-60.

[7]周燕,刘卫民,陈帆.不同光伏渗透率下考虑需求响应的配电网储能双层规划[J].高压电器,2024,60(10):64-77.

[8]郝俊博,闫广颖,裴红兰.基于贡献度的台区分布式新能源共享储能合作联盟收益分配策略[J].储能科学与技术,2025,14(06):2462-2472.

[9]刘军会,龚健,佟炳坤.基于分布式储能与光伏的虚拟电厂与配电网协同优化方法[J].中国电力,2025,58(06):1-9.

作者简介:

程智搏(1996--),男,汉族,湖北人,硕士,国网湖北孝感供电公司,高级工程师,从事无功电压分析、电能质量管理工作。

赵伦加(1990--),男,工程师,硕士,从事电网技改大修项目管理。

江全才(1962--),男,副教授,硕导,从事电气工程及其自动化专业教学科研工作。

邱奕铭(1994--),男,工程师,本科,从事电力专业生产管控工作。