

[优化运行]

分布式光伏和储能通过能量路由器参与主动配电网优化自治运行的方法

文/游春 兰捷 许远森 陈杰 彭搏
国网重庆市电力公司经济技术研究院

提出分布式光伏和储能通过能量路由器参与主动配电网优化自治运行的方法，采用K均值聚类法对分布式光伏出力进行优化，构建双层优化模型，并采用基于信息熵法的多目标粒子群算法进行模型求解。最后，采用IEEE33节点系统进行仿真，结果验证所提方法的有效性。

新能源技术的发展，使得主动配电网中分布式电源的渗透率上升，其中的分布式光伏（Distributed Photovoltaic, DPV）出力具有不确定性，影响电网稳定性，而储能系统（Energy Storage System, ESS）中的电能可以双向流动，实现消纳光伏等功能^[1]。所以研究DPV和ESS通过能量路由器的联合并网^[2]，对于主动配电网的运行具有重要意义。

文献[3]采用双层多目标粒子群算法对含智能开关的源-网-荷-储双层模型进行求解，最后使得经济效益更高、网损最小，并改善了配电网的电压质量。文献[4]通过双层优化配置方法，上层考虑光储微电网总成本，配电网总经济成本，下层考虑光储微电网运行成本为目标，以实际配电网算例验证了模型的可行性。使用概率工具处理负载与储能相关的不确定性，上层规划采用最优综合决策，下层规划考虑分布静态补偿器的最优配置，提出主动配电系统的随机框架。

目前，针对DPV和ESS并网的研究主要是经济效益等，忽略了新能源的消纳能力或未统筹多种可调资源进行配电网的规划运行。因此，研究分布式光伏和储能系统的双层联合规划配置，对提升电网

新能源的消纳能力具有重要现实意义。

分布式光伏和储能

由于大量的分布式光伏和储能设备直接并网会对电网带来较大的冲击，所以通过能量路由器接入主动配电网，不仅可以降低冲击，还可以提高能源利用效率，增强电网的可靠性和灵活性。

1. 分布式光伏

分布式光伏出力的核心在于通过光伏效应将太阳能转化为电能，其出力可以近似表达为

$$P(t) = \frac{P_s I(t)}{I_s} [1 - \partial_r (T_t - T_s)] \quad (1)$$

式中， I_s 为单位面积光照强度； P_s 为DPV的额定出力； ∂_r 为温度系数； T_t 为光伏电池 t 时刻的温度； T_s 为电池的标准温度。

由式(1)可知，太阳光照强度、电池温度随时间产生的变化使得光伏出力具有不确定性。而处理配电网当中的不确定性场景常用场景分析法^[5]，其中的K均值聚类法便是将具备相同特征的场景归为一类，把较多的场景通过归类以后减缩为几个典型场景。如图1所示，通过K均值法将我国中部地区某光伏电站

基金项目：1. 计及 EVs 多端口能量路由器规模接入的新型配电网设计与调控技术研究（522096230008）；2. 经研院2023—2024年多端口能量路由器建模与并网技术研究服务

2023年全年历史光照强度数据聚类成4个典型场景。

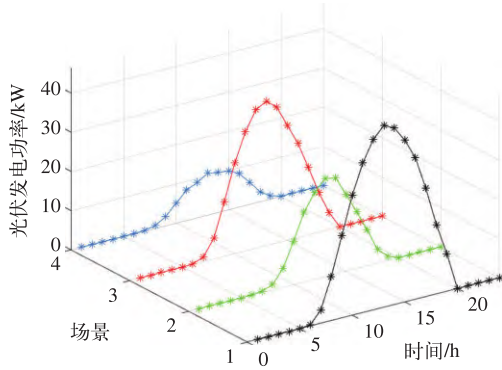


图1 光伏出力典型场景曲线

2. 储能系统

储能系统的建模主要考虑荷电状态 (State of Charge, SOC) 等参数, 故数学模型为

$$\text{SOC}_{\text{ESS}}(t) = \text{SOC}_{\text{ESS}}(t-1) - \eta_{\text{C/D}} \frac{P_{\text{DES}}(t)\Delta t}{E_{\text{ESS}}(t)} \quad (2)$$

式中, $\text{SOC}_{\text{ESS}}(t)$ 为在 t 时刻的荷电状态; $\text{SOC}_{\text{ESS}}(t-1)$ 为在 $t-1$ 时刻的荷电状态; $P_{\text{DES}}(t)$ 为在 t 时刻的充放电功率; $\eta_{\text{C/D}}$ 为充/放电效率; $E_{\text{ESS}}(t)$ 为额定容量。

主动配电网双层优化模型

1. 上层优化模型的目标函数和约束条件

上层是规划层, 对分布式光伏和储能的容量和安装地点进行规划配置, 并将配置方案传递至下层, 以最小运行成本、最小设备投资成本为目标

$$\min F_1 = [C_{\text{COI}}, \min F_2] \quad (3)$$

$$C_{\text{COI}} = (C_{\text{pv}} \text{cap}_{\text{pv}} + C_{\text{cn}} \text{cap}_{\text{cn}}) \frac{r(r+1)^n}{(r+1)^n - 1} \quad (4)$$

式中, C_{COI} 为光伏储能投资成本; $\min F_2$ 为下层优化模型的最优目标; C_{pv} 为DPV单位容量投资成本; cap_{pv} 为DPV的总容量; C_{cn} 为DPV单位容量投资成本; cap_{cn} 为ESS的总容量; r 为贴现率; n 为光伏和储能设备的使用年限。

上层的约束条件如下。

分布式光伏容量约束为

$$0 \leq \text{cap}_{\text{pv}} \leq \text{cap}_{\text{pv_max}} \quad (5)$$

式中, $\text{cap}_{\text{pv_max}}$ 为分布式光伏的最大容量。

储能容量约束

$$0 \leq \text{cap}_{\text{cn}} \leq \text{cap}_{\text{cn_max}} \quad (6)$$

式中, $\text{cap}_{\text{cn_max}}$ 为储能的最大容量。

2. 下层优化模型的目标函数和约束条件

下层模型是运行层, 基于上层优化得到的配置进行优化调度, 以光伏消纳比例最大和运行成本最小为目标

$$\min F_2 = [f_1, f_2] \quad (7)$$

分布式光伏消纳比例最大: 采用弃光率进行衡量^[7], 弃光罚函数的表达式为

$$f_1 = \min c q_{\text{pv}} \sum_i^K (p(i) \text{cap}_{\text{pv}} - p v_s(i)) \quad (8)$$

式中, $c q_{\text{pv}}$ 为分布式光伏的弃光惩罚成本; $p(i)$ 为光伏出力第 i 种场景的概率; $p v_s(i)$ 为第 i 种场景下分布式光伏的出力。

运行成本函数为

$$f_2 = \min (C_y + C_g + C_{\text{loss}}) \quad (9)$$

$$C_y = c p v_y \sum_t^T p v_s(t) + c e s s_y \sum_t^T |c n_s(t)| \quad (10)$$

$$C_g = \sum_i^K \sum_t^T c_{\text{buy}} \text{gen}(i, t) \quad (11)$$

$$C_{\text{loss}} = \sum_i^K \sum_t^T c p_{\text{loss}} \text{branch}(i, t) \quad (12)$$

式中, C_y 为设备运维成本; C_g 为购电成本; C_{loss} 为电网网络损耗成本; $c p v_y$ 为分布式光伏的单位容量运行成本; $p v_s(t)$ 为 t 时的分布式光伏产生的有功功率; $c e s s_y$ 为储能的单位容量运行成本; $c n_s(t)$ 为第 t 时的储能出力; c_{buy} 为主动配电网向主网购电的购电价格; $\text{gen}(i, t)$ 为第 i 种典型场景下 t 时刻的主动配电网的电源参数; $c p_{\text{loss}}$ 为主动配电网的网损电价; $\text{branch}(i, t)$ 为第 i 种典型场景下 t 时刻的主动配电网的支路网络损耗。

下层的约束条件除潮流约束以外, 还有如下约束。

1) 光伏出力约束。光伏通过能量路由器接入电网, 但能量路由器的输入、输出功率有限, 因此约束为

$$0 \leq p v_s \leq p v_{s\text{max}} \quad (13)$$

式中, $p v_{s\text{max}}$ 为分布式光伏的有功出力上限。

2) 储能出力约束。与光伏的出力约束同理, 约束为

$$|c n_s(t)| \leq c n_{s\text{max}} \quad (14)$$

式中， $cn_{\max}$ 为储能的有功输出的上限。

模型求解

本文采用的双层优化模型含有多个优化目标，所以采用基于外部存档与帕累托（Pareto）支配基本原理的多目标粒子群算法（Multi-Objective Particle Swarm Optimization，MOPSO）。

MOPSO通过帕累托支配对粒子进行选择：外部存档用于保存迭代过程中产生的非支配粒子，组成帕累托临时最优解集。随着迭代次数增加，当粒子数量增加至上限时，将无用的粒子剔除，得到最优方案集，然后决策者根据个人偏好选择最优方案，即目标函数的权重分配。

本文采用基于信息熵的逼近理想解排序法（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution，TOPSIS）进行决策^[8]，通过比较帕累托解集中各目标值的差异程度进行权重分配。在帕累托解集中，若各解的某个目标值呈现出较小的差异程度，则表明该目标值在决策过程中的影响力相对较弱，应当给予较低的权重值。根据前述内容，模型的求解流程如图2所示。

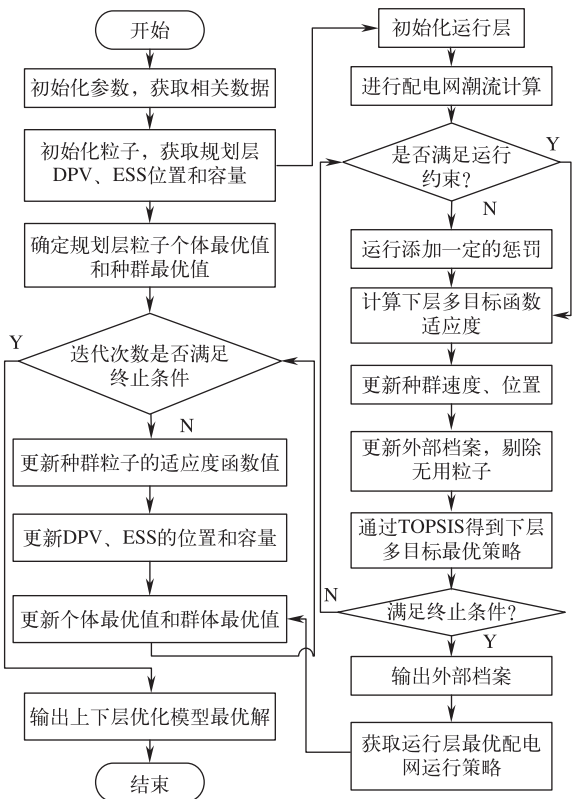


图2 上下层优化模型计算流程图

算例结果与分析

本文采用IEEE 33节点系统作为仿真算例，其结构如图3所示。负荷节点主要考虑两种情况：典型工作日负荷和典型节假日负荷，如图4所示。

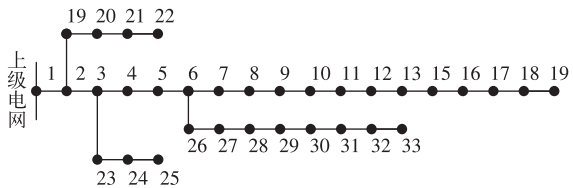


图3 IEEE33节点系统拓扑图

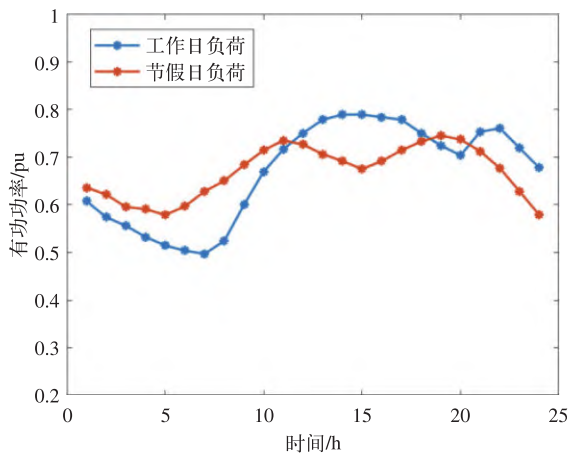


图4 两种典型情况下的日负荷曲线

仿真中涉及的分布式光伏、储能的部分经济性参数和求解算法中涉及的部分参数，见表1。

表1 参数设置

参数/变量	数值设置
单位功率光伏投资成本/kW	1 800元
弃光惩罚成本/（kW·h）	0.8元
单位容量储能投资成本/（kW·h）	2500元
主网购电价/（kW·h）	0.7元
个体学习因子	1.5
群体学习因子	2
最大、最小惯性系数	0.9、0.4
外部存档上限	50

为验证所提方法的有效性，本文设置以下6个场景进行仿真，得到表2的仿真结果。

- 1) 工作日负荷下。场景1：不接入光伏和储能；场景2：接入光伏，不接储能；场景3：接入光伏和储能；场景4：采用优化算法接入光伏和储能。
- 2) 节假日负荷下。场景5：接入光伏和储能；

场景6：采用优化算法接入光伏和储能。

表2 上下层模型光伏和储能优化规划结果

场景类型	DPV接入位置	DPV最大功率/ kW	DPV接入容量/ (kW·h)	ESS接入位置	ESS接入容量/ (kW·h)
1	—	—	—	—	—
2	6	489	1 000	—	—
3	6	600	1 000	6	360
4	8	695	850	6	450
5	6	526	850	6	420
6	30	743	800	14	430

比较场景3和场景2，场景3中储能接入后分布式光伏的容量不变，但是其输出的最大有功功率增加，说明储能的并网促进光伏的消纳。分别比较场景4和场景3、场景6和场景5，发现分布式光伏的接入容量都减少，但是出力增加，说明本文采用的优化算法进一步提高了光伏的消纳比例。

分析六种场景下仿真结果中的经济性指标，其仿真结果见表3。

表3 各场景经济性指标仿真结果

单位：千元

场景类型	投资成本	弃光成本	运维成本	网损成本	购电成本	总成本
1	—	—	—	207	2 172	2 379
2	97	28	15	186	1 926	2 252
3	171	64	14	176	1 727	2 154
4	154	58	14	168	1 605	2 000
5	151.4	62.1	14.5	162	1 743	2 132
6	144.9	49.6	14.7	158	1 625	1 992

比较场景2和场景1，分布式光伏的接入虽然增加了弃光、投资和运维成本，但是购电成本有所下降，其总成本下降约为5.63%。比较场景3和场景2，储能的接入增加投资成本，但是光伏的消纳比例提高，购电成本减少，说明分布式光伏和储能系统的合理运用与配置能有效降低配电网的成本。分别比较场景3和场景4、场景5和场景6，后者的弃光率更低，弃光成本更少，可知本文采用的优化方法能够进一步增加光伏消纳比例，降低主动配电网规划运行的总成本。

现分析各场景下的负荷峰谷差，如图5所示。

比较场景2和场景1，发现负荷峰谷差值变小，表明分布式光伏的接入能够缓解配电网的负荷供电压力。比较场景3和场景1，峰谷差值进一步减小，

且场景3的负荷曲线比场景2的负荷曲线更为平滑，因此储能的接入也能使负荷的峰谷差有所下降，说明DPV和ESS的有效配置能够实现负荷的削峰填谷。

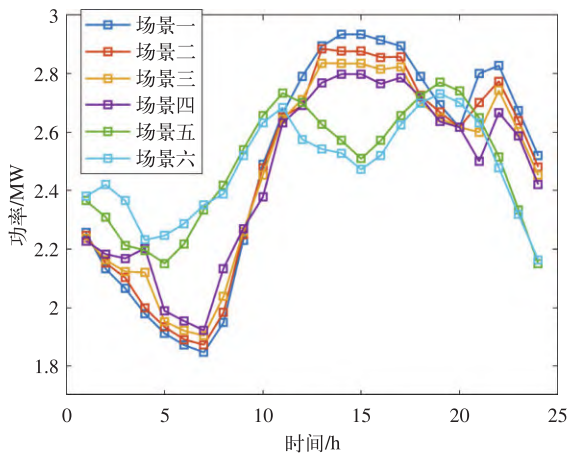


图5 各个场景的24 h负荷变化图

分别比较场景3和场景4、场景5和场景6，发现峰谷差值减小，且后者负荷曲线更平滑。由此可以表明本文采用的优化方法能够实现削峰填谷，并且体现出其优越性。

结束语

在新能源快速发展的背景下，分布式电源大规模的并入主动配电网已经成为促进“双碳”发展的重要举措。为保障主动配电网的安全、稳定运行，对通过能量路由器并网的分布式光伏和储能进行合理的规划配置具有重要的现实意义。针对上述问题，本文经过研究，系统探讨关于主动配电网在DPV与ESS联合并网条件下的优化自治运行策略。然后基于IEEE33节点系统进行了仿真分析，结果表明：①采用K均值聚类算法能一定程度上地解决分布式光伏出力不确定性问题，提高预测精确度；②所提出优化方法可以有效解决分布式光伏和储能的规划配置问题，和主动配电网的规划运行优化问题。另外，储能系统和分布式光伏的联合并网，能减少电网规划运行的成本，实现削峰填谷的效果，提高新能源的消纳比例，提高电网运行的经济性。EA

（收稿日期：2025-01-10）

参考文献

[1] 吴智泉，贾纯超，陈磊，等．新型电力系统中

- 储能创新方向研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 444-451.
- [2] 程林, 齐宁, 田立亭. 考虑运行控制策略的广义储能资源与分布式电源联合规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 27-35+43.
- [3] 张忠会, 雷大勇, 李俊, 等. 基于自适应 ε -支配多目标粒子群算法的含SOP的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2199-2212.
- [4] 刘娇扬, 郭力, 杨书强, 等. 配电网中多光储微网系统的优化配置方法[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2806-2815.
- [5] 王航. 考虑储能的分布式光伏接入配电网规划与运行及其求解方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [6] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2187-2201+2.
- [7] 张诗杭. 高渗透率光伏并网消纳能力研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [8] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405-3411.

(上接第 45 页)

身安全。此外, 通过实施该策略, 还提升电网的稳定性和经济性, 减少不必要的无功流动和光伏削减电量, 为配电网提供一种高效、经济的无功电压管理方案。

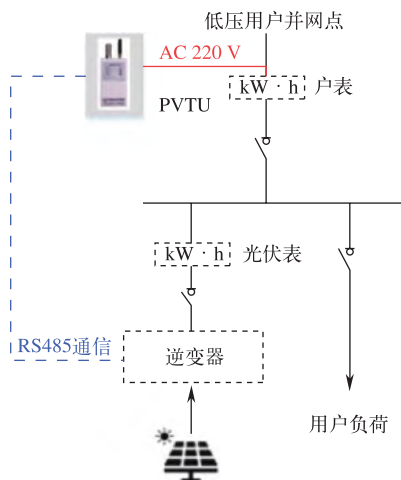


图4 光伏用户调控单元安装示意图

总结与展望

本研究提出一种基于高比例光伏台区的无功电压优化策略, 通过构建“群内自治、群间协调”的分层协同体系架构, 有效利用分布式光伏接入的分散性和逆变器的双向无功出力, 成功解决由大量分布式光伏接入引起的台区高电压等问题, 在提升电网运行经济性和可靠性方面具有显著的应用价值。

对特定环境下的适应性和泛化能力上存在局限, 例如对于不同地区、不同类型的配电网可能因具体条件的差异需要进一步调整优化, 以及在大规模部署和长期稳定性验证方面将面临挑战。EA

(收稿日期: 2024-05-17)

参考文献

- [1] 罗耀强. 配电台区高光伏渗透率下电压影响分析及治理策略[J]. 电力系统装备, 2022(3): 90-93.
- [2] 蔡永翔, 唐巍, 张璐, 等. 基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 133-141.
- [3] 李征, 王文宾, 韩胜峰, 等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 32-41.
- [4] 李军徽, 孙大朋, 朱星旭, 等. 光伏高渗透率下分布式储能群间协同的电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 47-56.
- [5] 杨涛, 曾国宏. 分布式光伏发电引起电压越限的储能解决方案[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4): 55-57.
- [6] 陈志华, 柯强, 胡经纬, 等. 含分布式光伏的有源配电网无功电压控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(2): 16-24.