

基于光 / 储电源的配电网优化运行策略

王天阔¹ 王迪扬¹ 黄佳¹ 李昕然² 徐梓鸣³ 周小萱³

(1. 华电电力科学研究院有限公司 2. 北方工业大学储能科学与工程学院 3. 华北电力大学(保定))

摘要: 大规模分布电源接入到配电网中,引起了配电网电压越界、潮流反转等问题。同时,分布式光 / 储电源在改善配电网电能质量、降低网络运行损耗、提高供用可靠性等方面的优势越发明显。对此,本文提出基于光 / 储电源的配电网优化运行模型,以配电网网损最小为目标,配电网安全稳定运行为约束,光储电源输出为决策变量;通过将该非线性非凸优化模型转化为凸优化模型,并采用 Cplex 求解器求解;最后,根据典型配电系统验证所提光 / 储电源参与配电网优化运行策略的有效性。

关键词: 分布式光伏; 配电网; 无功优化; 差分进化算法

0 引言

2024年2月,国家发展改革委、能源局联合发布了《关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》,意见明确,到2025年,配电网将具备5亿kW左右分布式新能源、1200万台左右充电桩接入能力;同时在《关于加强电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见》中指出,要推进新型电力系统的智能化调度能力建设,健全新型配电网调度运行机制,探索多能源品种和源-网-荷-储协同调度机制。大规模新型源荷的多层级接入为配电网的安全、稳定、经济运行带来了诸多问题。在电网侧,局部地区光伏发电无法消纳,末端新能源功率倒送导致系统过电压、功率损耗增加^[1-2]。对此,本文提出基于光 / 储电源的配电网优化运行模型,通过将该非线性非凸优化模型转化为凸优化模型,并采用 Cplex 求解器求解,解决了分布式电源接入引起的配电网电压越界的问题。

1 光伏电源与储能电源模型

1.1 光伏电源模型

正常情况下,光伏逆变器采用最大功率点跟踪控制模式,计及各个光伏集群无功容量的差异性,采用无功的变下垂控制实现光伏集群间无功功率的协调分配,从而最大化地保证光伏的消纳能力,若逆变器的无功容量不足,则根据优先级削减部分光伏集群输出的有功功率,满足系统的无功需求。在夜间或系统无功缺额较为严重时,可切换到静止同步补偿器模式下,使光伏逆变器作为静止同步补偿器模式运行保证系统的动态无功需求。

光伏电源无功与有功输出之间的关系可表示为:

$$Q_{PV} = \sqrt{S_{PV}^2 - P_{PV}^2} \quad (1)$$

式中, P_{PV} 为光伏逆变器输出的有功功率; S_{PV} 为光伏逆变器视在功率; Q_{PV} 为此时光伏电源可以输出的最大无功功率。

1.2 储能电源充放电模型

电池储能系统模型主要包括电池荷电状态 (State of Charge, SOC) 约束, 充放电功率约束等。式 (2) ~ 式 (3) 表示电池充放电过程中的 SOC 约束; 式 (4) ~ 式 (7) 表示 SOC 与充放电功率约束; 式 (8) 表示整个调度周期内电池储能系统的容量平衡。

$$\text{SOC}_{\text{BS}}^{t+1} = \text{SOC}_{\text{BS}}^t (1 - \delta_{\text{BS}}) + \frac{P_{\text{BS},c}^t \eta_{\text{BS}}^c \Delta t}{C_{\text{BS}}} \quad (2)$$

$$\text{SOC}_{\text{BS}}^{t+1} = \text{SOC}_{\text{BS}}^t (1 - \delta_{\text{BS}}) - \frac{P_{\text{BS},d}^t \Delta t}{\eta_{\text{BS}}^d C_{\text{BS}}} \quad (3)$$

式中, SOC_{BS}^t 为 t 时刻蓄电池的荷电状态; δ_{BS} 为蓄电池的自损耗率; $P_{\text{BS},c}^t$ 、 $P_{\text{BS},d}^t$ 为 t 时刻充、放电功率; C_{BS} 为蓄电池安装容量; η_{BS}^c 、 η_{BS}^d 为蓄电池的充、放电效率。

$$\text{SOC}_{\text{BS}}^{\min} \leq \text{SOC}_{\text{BS}}^t \leq \text{SOC}_{\text{BS}}^{\max} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{\text{BS},c}^t \leq v_{\text{BS},c}^t \cdot P_{\text{BS},c}^{\max} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{\text{BS},d}^t \leq v_{\text{BS},d}^t \cdot P_{\text{BS},d}^{\max} \quad (6)$$

$$v_{\text{BS},c}^t + v_{\text{BS},d}^t \leq 1 \quad (7)$$

式中, $\text{SOC}_{\text{BS}}^{\min}$ 、 $\text{SOC}_{\text{BS}}^{\max}$ 分别为蓄电池荷电状态上、下限; $P_{\text{BS},c}^{\max}$ 、 $P_{\text{BS},d}^{\max}$ 分别为蓄电池最大充、放电功率, $v_{\text{BS},c}^t$ 、 $v_{\text{BS},d}^t$ 分别为电池储能机组充放电状态 0~1 变量。

$$\text{SOC}_{\text{BS}}^1 = \text{SOC}_{\text{BS}}^T \quad (8)$$

式中, SOC_{BS}^1 、 SOC_{BS}^T 分别为运行模型调度计算开始、结束时刻的电池系统的荷电状态。

2 基于光 / 储电源的配电网优化运行策略

2.1 基于光 / 储电源的配电网优化运行模型

基于光 / 储电源的配电网无功优化模型优化目标为配电网网损, 约束条件为光 / 储电源输出有功、无功约束, 配电网潮流约束等, 决策变量为光储电源出力^[3]。

以配电网网损最小为配电网优化目标函数:

$$\min f = \sum_{j,k \in B} r_{jk} I_{jk}^2(t) \quad (9)$$

式中, r_{jk} 为母线 j 到母线 k 的线路电阻; $I_{jk}(t)$ 为 t 时刻母线 j 到母线 k 的线路电流。

约束条件包括等式约束和不等式约束, 分别对安全运行、决策变量、状态变量进行相关约束。

$$P_k^{\text{PV}}(t) - P_k^{\text{L}}(t) = \sum_{l \in L(k)} P_{kl}(t) \quad (10)$$

$$- \sum_{j \in J(k)} (P_{jk}(t) - r_{jk} I_{jk}^2(t))$$

$$Q_k^{\text{inv}}(t) - Q_k^{\text{L}}(t) = \sum_{l \in L(k)} Q_{kl}(t) \quad (11)$$

$$- \sum_{j \in J(k)} (Q_{jk}(t) - x_{jk} I_{jk}^2(t))$$

$$U_k^2(t) = U_{j,k}^2(t) - \quad (12)$$

$$2(r_{jk} P_{jk}(t) + x_{jk} Q_{jk}(t)) + (r_{jk}^2 + x_{jk}^2) I_{jk}^2(t)$$

$$I_{jk}^2(t) = \frac{P_{jk}^2(t) + Q_{jk}^2(t)}{U_j^2(t)} \quad (13)$$

$$U_{\min} \leq U_k(t) \leq U_{\max} \quad (14)$$

$$0 \leq I_{jk}(t) \leq I_{jk}^{\max} \quad (15)$$

式中, j 、 k 、 l 为配电网母线索引; $J(k)$ 与 $L(k)$ 分别为双亲节点与子节点; x_{jk} 为母线 j 到母线 k 的线路电感; $P_k^{\text{L}}(t)$ 、 $Q_k^{\text{L}}(t)$ 、 $U_k(t)$ 分别为 t 时刻母线 k 的有功负荷、无功负荷与母线电压; $P_{jk}(t)$ 、 $Q_{jk}(t)$ 分别为节点 j 到节点 k 的有功功率与无功功率; I_{jk}^{\max} 为节点 j 与节点 k 之间线路电流 I_{jk} 的上限; U_{\max} 、 U_{\min} 分别为配电网电压上、下限。

2.2 基于光 / 储电源的配电网优化运行模型求解

配电网优化问题一般被描述为基于最优潮流问题。由于该问题的非凸性, 一般的求解方法不能保证收敛到全局最优解。目前广泛用于处理 MINLP 非凸性的方法为凸松弛技术, 如二阶锥松弛。其基本策略是先引入松弛变量, 利用二阶锥规划松弛技术对含松

弛变量的不等式约束和二次等式约束进行凸松弛形成二阶锥约束；然后用平方项替换潮流方程中的变量，从而将原有的非线性方程转化为线性方程^[4-5]。

本文将考虑光伏逆变器可靠性的电网无功优化模型中的非线性部分线性化和二阶锥松弛，将原非线性非凸模型转化为二阶锥规划模型，最后利用 Cplex 求解器进行优化模型求解。

首先，引入变量 $i_{jk}(t)$ 、 $u_k(t)$ 进行模型线性化，即：

$$\begin{cases} i_{jk}(t) = I_{jk}^2(t) \\ u_k(t) = U_k^2(t) \end{cases} \quad (16)$$

则部分约束条件变化为：

$$P_k^{PV}(t) - P_k^L(t) = \sum_{l \in L(k)} P_{kl}(t) - \sum_{j \in J(k)} (P_{jk}(t) - r_{jk} i_{jk}(t)) \quad (17)$$

$$Q_k^{inv}(t) - Q_k^L(t) = \sum_{l \in L(k)} Q_{kl}(t) - \sum_{j \in J(k)} (Q_{jk}(t) - x_{jk} i_{jk}(t)) \quad (18)$$

$$u_k(t) = v_{j,k}(t) - \quad (19)$$

$$2(r_{jk} P_{jk}(t) + x_{jk} Q_{jk}(t)) + (r_{jk}^2 + x_{jk}^2) i_{jk}(t)$$

$$U_{\min}^2 \leq u_k(t) \leq U_{\max}^2 \quad (20)$$

$$0 \leq i_{jk}(t) \leq (I_{jk}^{\max})^2 \quad (21)$$

由于式 (20) 仍然为非凸方程，进一步进行二阶锥松弛处理，可得：

$$\begin{cases} 2P_{jk}(t) \\ 2Q_{jk}(t) \\ i_{jk}(t) - u_j(t) \end{cases} \leq i_{jk}(t) + u_j(t) \quad (22)$$

同时，配电网有功网损表示为：

$$P_{\text{net,loss}} = \sum_{j,k \in B} r_{jk} i_{jk}(t) \quad (23)$$

综上，基于光 / 储电源的配电网优化运行模型已由原非线性非凸模型转化为二阶锥规划模型，可利用 Cplex、Gurobi 等求解器进行快速求解。

3 仿真分析

3.1 配电网仿真算例

以 IEEE 33 节点配电系统为例，分别在节点 6、8、10、14、22、24、28、31、33 节点接入分布式光伏电源，每个接入点分别接入容量为 800kW 的分布式光伏电源。储能设备连接到配电网的节点 22、31。储能设备的容量为 500kW，储能设备的充电和放电效率均为 0.95，荷电状态的变化范围为 0.1~0.9。配电系统初始总有功负荷为 3715kW，总无功负荷为 2300kvar。根据初始有功负荷与无功负荷，仿真中基准功率取 10MVA，基准电压取 12.66kV，光伏电源有功出力曲线如图 1 所示。

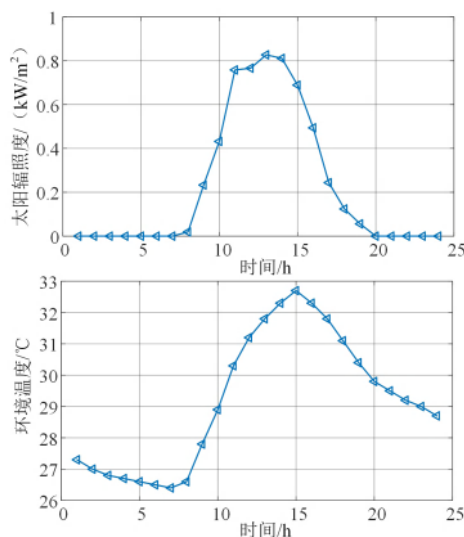


图 1 光伏电源有功出力曲线

3.2 分布式光伏接入对配电网电压影响分析

当分布式光伏电源不参与配电网无功电压控制时，配电网运行 24h 的各节点电压分布图如图 2 所示。可见，在晚间时段，配电网中部分节点存在电压越下界情况；在中午时段，配电网中部分节点存在电压越上界情况。此时，大规模分布式电源接入配电网影响了配电网电压质量。

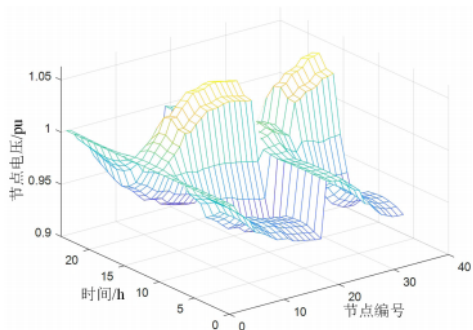


图2 优化前配电网运行24h的各节点电压分布图

3.3 配电网优化运行效果

以节点22为例，光伏电源出力与储能电源荷电状态如图3所示。可见，光伏电源出力与储能荷电状态均满足优化运行约束条件。

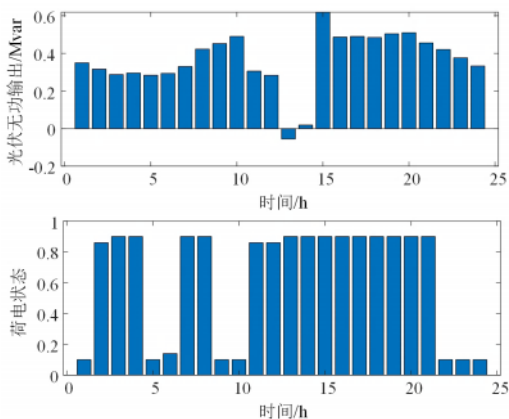


图3 节点22处光/储能运行数据

当光/储能参与配电网优化运行后，配电网运行24h的各节点电压分布图如图4所示。配电网各节点电压均在安全范围内，有效解决了分布式光伏电源接入配电网对配电网电压质量影响的问题。

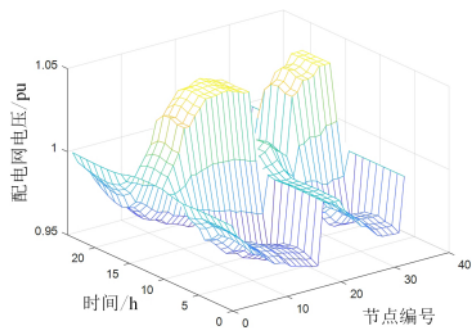


图4 优化后配电网运行24h的各节点电压分布图

光/储能参与配电网优化运行后，配电网网损

情况如图5所示，可见，配电网网损明显降低，本文所提无功电压优化方法可在保证配电网电压安全稳定运行同时有效降低了配电网网损。

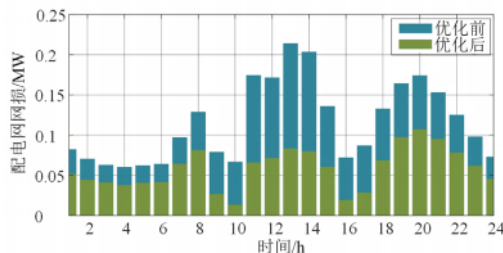


图5 配电网网损情况

4 结束语

本文提出了基于光/储电源的配电网优化运行模型，以配电网网损最小为目标，配电网安全稳定运行作为约束，光储电源输出为决策变量，通过将该非线性非凸优化模型转化为凸优化模型，并采用Cplex求解器求解。经算例分析，所提方法有效解决了配电网电压越界问题，提升了配电网中分布式光伏电源的消纳比例。

参考文献

- [1] 陈育明.基于遗传算法的低压配电网无功补偿优化方法研究[J].电气传动自动化, 2023, 45(5): 56-59.
- [2] 陈韶昱,倪秋龙,石博隆,等.10kV配电网分布式电压无功优化系统研究[J].电力电容器与无功补偿, 2023, 44(4): 19-26.
- [3] 姚璐勤,王琦,李妍,等.计及设备损耗成本的含光储配电网分布式电压控制策略[J].电力工程技术, 2023, 42(6): 52-63.
- [4] 商立群,郝天奇,李钊,等.基于二阶锥规划的无功补偿器选址定容策略[J].河北科技大学学报, 2023, 44(5): 431-439.
- [5] 张俊潇,高崇,李京平,等.考虑低碳和柔性负荷的有源配电网混合整数二阶锥规划[J].电力建设, 2022, 43(12): 66-73.

(收稿日期: 2024-06-12)