

引用格式:李鹏,刘嘉彦,李佳蔚,等.考虑光伏与电动汽车充电站协同的配电网电压控制方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):121-130.

Citation: LI Peng, LIU Jiayan, LI Jiawei, et al. A voltage control method for distribution networks considering photovoltaic and electric vehicle charging station coordination[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 121-130.

考虑光伏与电动汽车充电站协同 的配电网电压控制方法

李 鹏¹, 刘嘉彦², 李佳蔚³, 祖文静¹, 杨钦臣¹, 李慧璇¹, 李 勇²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450000; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 厦门大学电子科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

摘要:配电网中光伏和电动汽车充电站的接入会影响配电网稳定运行,但其各自的灵活调度特性也为配电网增强了一定灵活特性,故提出一种考虑光伏利用效率与电动汽车充电设施数量限制的配电网分布式资源协调控制策略(distributed resource coordination control strategy, DRCCS)。该方法在光伏侧考虑配网中光伏控制能力,协调配网各光伏逆变器的 $V-Q$ 下垂控制斜率,实现光伏出力优化控制。在电动汽车充电侧考虑实际充电站内充电设施的数量限制,实现电动汽车有序充电,在保证充电需求的前提下调用充电灵活性实现对配网的辅助支撑。综合构建考虑光伏利用效率与电动汽车充电设施数量限制的协调控制模型,实现维持配网电压稳定,提升光伏逆变器有功输出,并保证电动汽车充电需求的目标。所构建的混合整数非线性问题采用广义 Benders 分解算法(generalized Benders decomposition, GBD)进行求解,并通过仿真验证了该方法的有效性。

关键词:配电网;光伏;电动汽车;协调控制;电压稳定;广义 Benders 算法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.013 **中图分类号:** TM863 **文章编号:** 1673-9140(2024)06-0121-10

A voltage control method for distribution networks considering photovoltaic and electric vehicle charging station coordination

LI Peng¹, LIU Jiayan², LI Jiawei³, ZU Wenjing¹, YANG Qinchen¹, LI Huixuan¹, LI Yong²

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The integration of photovoltaic (PV) and electric vehicle (EV) charging stations into the distribution network affects the stable operation of the distribution network, but the respective flexible scheduling characteristics of PV and EV charging stations enhance the flexibility of the distribution network. Therefore, a distributed resource coordination control strategy (DRCCS) for the distribution network is proposed, which considers the efficiency of PV utilization and the limitation of the number of EV charging facilities. On the PV side, the $V-Q$ droop control slope of each PV inverter in the distribution network is coordinated, and optimal output control of PV is achieved by considering the PV control capability in the distribution network. On the EV charging side, the number of charging facilities in actual charging stations is considered to achieve orderly charging of EVs. The flexibility of charging is utilized to provide auxiliary support for the distribution network while ensuring charging needs. The coordination control model considering the efficiency of PV utilization and the limitation of the number of EV charging facilities is comprehensively constructed, so as to ensure stable distribution network voltage, improve the active output of PV inverters, and satisfy

收稿日期:2023-04-13;修回日期:2024-05-17

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U22B20104);国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2022YFE0129300);长沙市自然科学基金(kq2208028)

通信作者:刘嘉彦(1994—),男,博士,助理教授,主要从事电力系统稳定控制与优化运行等研究;E-mail:jiayanliu0707@hnu.edu.cn

the charging demand of EVs. The mixed integer nonlinear problem constructed in this paper is solved by the generalized Benders decomposition (GBD) algorithm, and its effectiveness is verified through simulation.

Key words: distribution network; photovoltaic; electric vehicle; coordination control; voltage stabilization; generalized Benders decomposition algorithm

近年来,越来越多的分布式资源接入配电网,尤其是分布式光伏的渗透率及装机容量逐渐上升^[1]。分布式资源的出力不确定性强,会造成配电网潮流双向流动,进而带来配电网高电压和低电压问题,不利于电网稳定运行,同时限制了新能源的进一步利用^[2-6]。而分布式资源具备灵活可调的特性,因此通过灵活调节配电网的分布式资源可以提升新能源利用效率,同时对配电网稳定运行起到一定的辅助支撑作用。

电动汽车由于其具有环境友好性,也获得了迅速发展。德国等国家已明确制定了利用电动汽车替代传统汽车的计划^[7-8]。电动汽车接入电网(vehicle to grid, V2G)可以替代储能装置改善分布式光伏出力的波动,缓解光伏渗透率受限问题,同时有利于保护环境,节约成本。电动汽车与光伏发电进行协调控制,可以提高系统稳定性,改善配电网的电能质量。但电动汽车充电时间主要受私家车车主出行意愿影响^[9-10],其无序充电将影响配电网对负荷的消纳能力。大规模的无序电动汽车接入电网会对电网调控产生不利影响,故须调控电动汽车进行有序充电。

电动汽车的调度控制主要分为集中控制^[11]和分散控制^[12]2种协调控制策略。文献[13]结合可再生能源系统,针对电动汽车充电站设计了议价博弈,可考虑相关利益者的利益进行充放电控制。文献[14]提出一种多时段动态充电价格机制,引导车主有序充电,并以配电网负荷波动最小为目标函数,优化电动汽车充电行为。文献[15]提出了基于深度强化学习的电动汽车优化充电方法,根据充电站容量动态调整充电价格,提升服务质量。文献[16]提出了一种价格与激励联合需求响应下电动汽车长时间尺度充放电调度策略,以减小负荷波动和电动汽车调度成本。

学者们针对光伏发电的协调控制也开展了相关研究。文献[17]分析了光伏接入配电网导致电压波动的机理,提出了考虑最小网络功率损耗和最小电压波动2个方面的光伏选址优化方法与优化运行方法。文献[18]针对分布式光伏接入配电网影响其安全稳定运行的问题,提出了一种分布式光伏

协调控制策略,以提高分布式光伏的消纳能力。文献[19]提出了考虑配电网电压稳定性的光伏逆变器三级分层协调电压-无功控制方法,实现了降低网络功率损耗和总线电压偏差的目标。文献[20]提出了一种计及演化驱动因素的含高渗透率分布式光伏配电网的多阶段优化规划方法,实现光伏配电网的多阶段自适应规划。

分布式光伏和可控的电动汽车充电站作为配电网中可控灵活资源,可以进行集中的运行控制,以此实现支撑电网与提升能源利用效率的目的。目前已经有学者就相关方向开展了研究工作。文献[21]提出了一种有效利用光伏发电与电动汽车充电的配电网运行管理方案。该方案通过改变客户电动汽车的充电周期来协调光伏输出的自我消耗量,并减少低压配电系统因电压上升而导致的光伏弃电,但并未考虑实际中电动汽车充电设施的容量限制。文献[22]提出了一种利用电动汽车的电池能量管理和分布式光伏的无功、有功调节配电网电压的控制策略,但并未考虑电动汽车用户的经济利益。文献[23]针对含有分布式光伏和电动汽车充电站的配电网,提出了一种基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的配电系统协调的分布式电压控制方法,但忽略了光伏的利用效率。

综上所述,目前已经就分布式光伏和电动汽车充电参与的配电网协调运行开展了相应的研究工作,但是大部分的研究工作没有兼顾配电网电压支撑、光伏高效利用和充电用户需求,对于有限的充电设施建模也过于简化^[24]。因此,本文提出一种考虑光伏利用效率与电动汽车充电设施数量限制的配电网分布式资源协调控制策略(distributed resource coordination control strategy, DRCCS),通过协调控制配电网中的分布式光伏电源和电动汽车充电站,在考虑光伏利用效率与电动汽车充电设施数量限制的条件下进行光伏发电和充电功率的优化,从而达到协调控制的目的,其运行架构如图1所示。通过采集光伏逆变器节点信息和充电站节点信息,基于网架结构和潮流特性构建约束,进行DRCCS优化控制运算,进而得到光伏逆变器的

V-Q 斜率和电动汽车充电站的充电功率,并让光伏电源和充电站按照对应的结果进行运行。其中,DRCCS 算法综合考虑光伏利用效率、充电站的容量限制、用户充电需求和光伏出力叠加充电功率对配网电压的影响,协调优化所有光伏电源的 V-Q 曲线斜率和充电站的充电功率,从而在保证配电网电压安全稳定运行的同时,提高可再生能源利用效率,并保障用户充电需求。

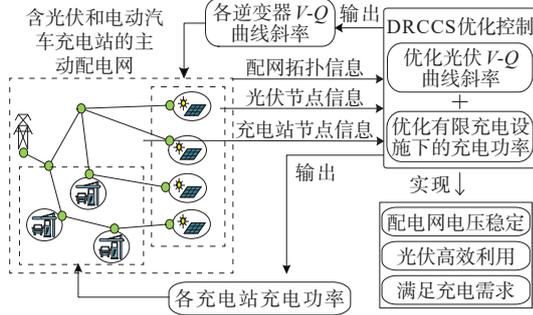


图 1 光伏与电动汽车协调调度控制策略架构

Figure 1 Framework of PV and EV coordination control strategy

1 分布式资源优化模型

配电网可以用图论来表示,即 $G_{DN}=(\Omega^B, \Omega^L)$, 其中 Ω^B 和 Ω^L 分别表示母线集合和线路集合。令 L_{ij} 表示连接母线 i 和 j 的电力线, $\pi^B(i)$ 表示从母线 i 开始的母线集合。

1.1 V-Q 控制斜率优化

光伏电源经过逆变器并入配电网中,通常采用 V-Q 控制策略并网作为调压手段,被广泛用于缓解电压波动问题。传统 V-Q 控制作为一种就地控制策略,预先给光伏逆变器设置好无功补偿斜率,根据电压偏移量补偿电压值。令 Ω^P 表示带有光伏电源的母线节点集合。如图 2 所示,无功功率输出如下:

$$\epsilon_m = \frac{Q_m^{\max}}{V_m^{\text{up}} - V_m^{\text{max}}} \quad (1)$$

$$Q_{m,t}^g = \begin{cases} Q_m^{\max}, & V_{m,t} \leq V_m^{\min} \\ \epsilon_m (V_{m,t} - V_m^{\text{low}}), & V_m^{\min} < V_{m,t} \leq V_m^{\text{low}} \\ 0, & V_m^{\text{low}} < V_{m,t} \leq V_m^{\text{up}} \\ \epsilon_m (V_{m,t} - V_m^{\text{up}}), & V_m^{\text{up}} < V_{m,t} \leq V_m^{\text{max}} \\ -Q_m^{\max}, & V_{m,t} > V_m^{\text{max}} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, $m \in \Omega^P$ 为安装有光伏并网逆变器的节点; $Q_{m,t}^g$ 为逆变器 m 在 t 时刻的无功功率输出; Q_m^{\max} 为逆变器 m 的最大无功功率输出; V_m^{\max} 、 V_m^{\min} 分别为

并网点 m 处的电压上限和下限; V_m^{up} 、 V_m^{low} 分别为并网点 m 处的动作电压的上限和下限; $V_{m,t}$ 为节点 m 在 t 时刻的电压。

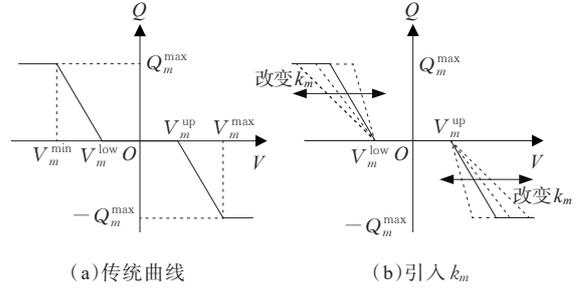


图 2 V-Q 控制曲线

Figure 2 V-Q control curves

然而,传统 V-Q 控制策略将斜率设定为固定值,不能实现多个逆变器的协调,造成部分区域过补偿和欠补偿。因此,本文引入了下垂控制斜率自变量 $k_{m,t}$,表示逆变器 m 在 t 时刻的下垂斜率。通过优化调整各个逆变器 $k_{m,t}$ 的值,控制不同逆变器的无功补偿力度从而提高系统效率。逆变器 m 的修正无功功率输出为

$$Q_{m,t}^g = \begin{cases} Q_m^{\max}, & V_{m,t} \leq \frac{Q_m^{\max}}{k_{m,t}} + V_m^{\text{low}} \\ k_{m,t}(V_m - V_m^{\text{low}}), & \frac{Q_m^{\max}}{k_{m,t}} + V_m^{\text{low}} < V_{m,t} \leq V_m^{\text{low}} \\ 0, & V_m^{\text{low}} < V_{m,t} \leq V_m^{\text{up}} \\ k_{m,t}(V_m - V_m^{\text{up}}), & V_m^{\text{up}} < V_{m,t} \leq -\frac{Q_m^{\max}}{k_{m,t}} + V_m^{\text{up}} \\ -Q_m^{\max}, & V_{m,t} > -\frac{Q_m^{\max}}{k_{m,t}} + V_m^{\text{up}} \end{cases} \quad (3)$$

因此,在每个 t 时刻,每个逆变器都对 V-Q 曲线的斜率进行更新,并根据 V_m 节点电压输出不同的无功功率 Q_m 。斜率则通过最大化一条馈线中所有逆变器的总有功功率输出得到。

逆变器 m 的有功功率输出是由逆变器的容量 S_m 、最大功率点跟踪的结果 P_{mppt} 和无功功率输出决定的,如图 3 所示。逆变器的无功功率输出可以通过调节功率因数角从 $-\varphi$ 移至 φ 来实现,它随着有功功率的变化而变化^[16]。由于逆变器容量的限制,如果无功功率从 Q_m 增加到 Q'_m ,最大允许有功功率从 P_m 降低到 P'_m 。

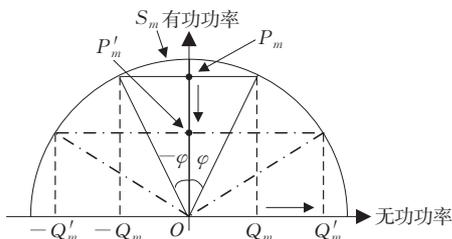


图3 有功和无功功率容量曲线

Figure 3 Active and reactive power capacity curves

因此,光伏逆变器输出的有功功率如下:

$$P_{m,t}^g = \begin{cases} \sqrt{S_{m,t}^{g^2} - Q_{m,t}^{g^2}}, & \sqrt{S_{m,t}^{g^2} - Q_{m,t}^{g^2}} \leq P_{m,t}^{mppt} \\ P_{m,t}^{mppt}, & \sqrt{S_{m,t}^{g^2} - Q_{m,t}^{g^2}} > P_{m,t}^{mppt} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $S_{m,t}^g$ 为逆变器 m 的容量; $P_{m,t}^{mppt}$ 为第 m 个光伏逆变器最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)的结果^[17], 也是逆变器 m 在当前阶段所能产生的最大有功功率。但由于要保证配电网电源运行在额定范围内, 需要进行适当的无功补偿, 因此会减少有功功率输出, 从而降低光伏利用效率。

图4展示了通过逆变器 m 的本地控制, 将优化后的结果 $k_{m,t}$ 代入式(3), 可以得到更新后的斜率变化的 V - Q 曲线, 进而计算逆变器需要输出的无功功率 $Q_{m,t}^g$, 然后根据式(4), 可以计算出输出的有功功率 $P_{m,t}^g$, 并将其分别设定为逆变器控制器的参考无功功率和有功功率。

因此, 光伏逆变器之间的协调可以转化为优化问题, 其目标是 minimized 光伏的总无功功率输出:

$$C_{PV}(k_{m,t}) = \min Q_t = \sum_t \sum_m Q_{m,t}^g \quad (5)$$

式中, Q_t 为逆变器的总无功功率输出。

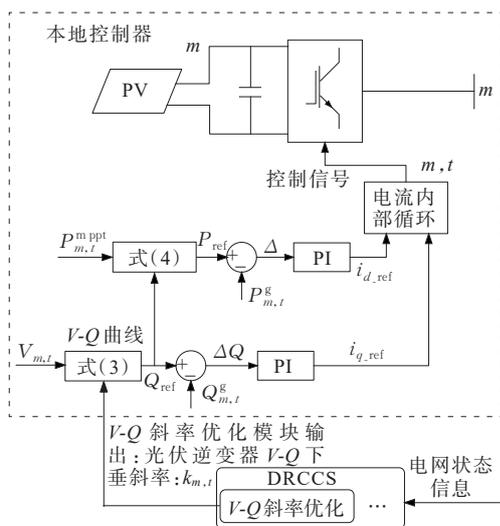


图4 DRCCS中的 V - Q 斜率优化

Figure 4 V - Q slope optimization in DRCCS

1.2 电动汽车充电调度优化

电动汽车作为灵活可控的充电负荷, 可以通过灵活控制充电功率参与支撑电网的辅助服务^[25], 而在实际充电过程中, 充电站的充电设施数量是有限的, 而且只有连接到真实充电车辆的充电器才能参与充电优化。在优化充电功率时, 必须保证用户的充电需求得到满足, 即在停留时间内, 车辆需要完成充电。然而, 目前大多数研究只是简单地将充电站的约束定义为整体的容量约束, 并未实际考虑用户的充电需求^[26]。电动汽车充电用户通常可以分为2类: 有紧急充电需求并希望尽快完成充电的刚性充电用户, 以及有经济性充电需求并愿意花费较长时间以较低价格完成充电的柔性充电用户, 可以通过用户的停留时间来判断其为刚性或柔性充电负荷。当用户有紧急充电需求时, 停留时间为最短充电时间, 而对于没有紧急充电需求的用户, 用户停留更长的时间, 从而具备一定的调度灵活性。

因此, 针对配网中可控的电动汽车充电资源, 本文提出的 DRCCS 方法考虑了充电站容量限制。如图5所示, 在车辆有序进站后, 由于充电设施数量有限, 根据充电站内充电器的状态, 给每辆车分配合适的充电器(考虑充电器为其他车辆充电的时间和车辆自身所需要的最小充电时间), 令二进制变量 $a_{r,t}$ 表示第 r 辆电动汽车在 t 时刻是否连接到充电器, 再根据每辆车连接到充电器的时间, 合理分配每辆电动汽车的充电功率, 令 $P_{r,t}$ 表示第 r 辆电动汽车在 t 时刻的充电功率。由此在保证电动汽车充电需求的前提下调用其充电灵活性^[24], 从而实现配电网的辅助支撑。

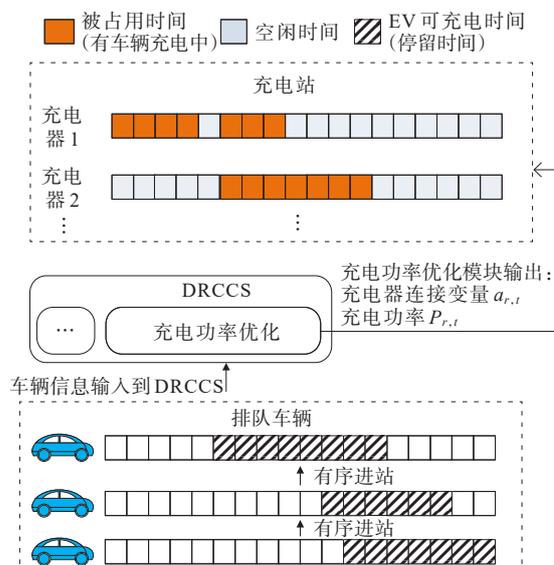


图5 DRCCS中的充电功率优化

Figure 5 Charging power optimization in DRCCS

当第 r 辆电动汽车进站时,时间记录为 t_r^a 。用户停留时间为 t_r^e ,初始的电池充电状态值为 S_r^{ini} ,所需的电池充电状态值为 S_r^{req} ,电池容量为 C_r 。因此,可以得到第 r 辆电动汽车所需的能量如下:

$$E_r^{\text{req}} = (S_r^{\text{req}} - S_r^{\text{ini}})C_r \quad (6)$$

用户的停留时间 t_r^e 不能小于所需最小充电时间:

$$t_r^e \geq E_r^{\text{req}}/P_{\max} \quad (7)$$

式中, P_{\max} 为最大充电功率。

电动汽车 r 的离站时间如下:

$$t_r^d = t_r^a + t_r^e \quad (8)$$

本文提出的协调充电调度算法充分利用了现有充电设施的灵活特性。设 $\Omega^E(n)$ 为分配给充电站 n 进行充电的电动汽车集合,则位于母线 j 的充电站 n 在时间段 t 的充电功率为

$$P_{j,t}^c = \begin{cases} \sum_{r \in \Omega^E(n)} a_{r,t} P_{r,t}, & \forall j \in \Omega^E(n) \\ 0, & \forall j \notin \Omega^E(n) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $P_{r,t}$ 为充电功率; $a_{r,t}$ 为二进制变量,考虑充电器的数量限制,其代表每辆电动汽车的连接状态:

$$a_{r,t} = \begin{cases} 1, & r \in \Omega^E(n), t \text{时刻和充电器相连} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

设 $M(n)$ 为充电站 n 的充电器数量, Ω^C 为充电站的集合,由于充电站的服务能力有限,只能同时为 $M(n)$ 辆电动汽车充电:

$$\sum_{r \in \Omega^E(n)} a_{r,t} \leq M(n), \forall n \in \Omega^C \quad (11)$$

由于电动汽车不在充电站时无法连接到充电器,因此应满足以下约束条件:

$$a_{r,t} = 0, \text{如果 } \forall t \notin [t_r^a, t_r^d], \forall r \in \Omega^E(n) \quad (12)$$

充电功率不能超过最大充电功率 P_{\max} :

$$P_{r,t} \leq P_{\max}, \forall r \in \Omega^E \quad (13)$$

没有连接到充电器时,电动汽车不能充电:

$$P_{r,t} = 0, \text{如果 } a_{r,t} = 0, \forall r \in \Omega^E \quad (14)$$

每辆电动汽车的能源需求如下:

$$\sum_{t=t_r^a}^{t_r^d} \Delta t P_{r,t} = E_r^{\text{req}}, \forall r \in \Omega^E \quad (15)$$

式中, Δt 为控制时间间隔。

每个充电器所能提供的最大充电功率是有限的,设为 P_{\max}^{ch} ,充电站 n 中的充电器数量为 $M(n)$,所以总的充电功率 $P_{j,t}^{\text{cs}}$ 应该满足 $P_{j,t}^{\text{cs}} \leq M(n) \cdot P_{\max}^{\text{ch}}$ 。因此,在充电站分配模型中,还应考虑容量限制。充电站剩余的充电余量应满足电动汽车在其停留时间内的能量需求。假设预期充电功率由 $g(g \in \Omega^E(n))$

辆停留在充电站 n 的电动汽车叠加而成。对于新到达的电动汽车 $g+1$,充电站的分配必须遵循:

$$E_{r+1}^{\text{req}} + \Delta t \sum_{t=t_{r+1}^a}^{t_{r+1}^d} P_{j,t}^{\text{cs}} \leq \Delta t (t_{r+1}^d - t_{r+1}^a + 1) M(n) P_{\max}^{\text{ch}} \quad (16)$$

本文利用电动汽车灵活充放电特性对配电网电压稳定进行支撑,因此,电动汽车优化充电的目标为最小化充电功率对配网电压偏移的影响,如下:

$$C_{\text{EV}}(a_{r,t}, P_{r,t}) = \min \sum_t \sum_i (V_{i,t} - V_{\text{ref}})^2 \quad (17)$$

式中, $V_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的电压; V_{ref} 为节点额定电压,充电功率对配电网电压的影响取决于每辆电动车得到的充电功率,即决策变量为 $a_{r,t}$ 和 $P_{r,t}$,由于 $a_{r,t}$ 为二进制变量,因此该模型成为混合整数非线性问题(mixed integer nonlinear programming, MINLP)。

2 DRCCS策略模型构建与求解

2.1 优化模型构建

2.1.1 目标函数

本文提出的DRCCS方法旨在协调光伏逆变器的电压无功补偿斜率和电动汽车充电站的充电功率,保证配电网电压稳定的同时提升可再生能源的利用效率,因此定义目标函数为

$$\min_{k_{m,t}, a_{r,t}, P_{r,t}} (\omega_1 C_{\text{PV}} + \omega_2 C_{\text{EV}}) \quad (18)$$

其决策变量为每个逆变器的设定 V - Q 斜率 $k_{m,t}$ 和每个充电站的充电功率 $P_{j,t}^{\text{cs}}$ 。其中 ω_1, ω_2 为各目标函数的权重系数。

2.1.2 约束条件

本文考虑配电网的运行状态,因此需要保证配电网的功率和潮流平衡,相关约束^[27]为

$$P_{ij,t} + P_{j,t}^g - r_{ij} I_{ij,t}^2 = \sum_{z \in \pi^L(j)} P_{jz,t} + P_{j,t}^{\text{load}} + P_{j,t}^{\text{cs}}, \forall L_{ij} \in \Omega^L \quad (19)$$

$$Q_{ij,t} + Q_{j,t}^g - x_{ij} I_{ij,t}^2 = \sum_{z \in \pi^L(j)} Q_{jz,t} + Q_{j,t}^{\text{load}}, \forall L_{ij} \in \Omega^L \quad (20)$$

$$V_{i,t}^2 - V_{j,t}^2 = 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2, \forall L_{ij} \in \Omega^L \quad (21)$$

$$V_{i,t}^2 I_{ij,t}^2 = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2, \forall L_{ij} \in \Omega^L \quad (22)$$

$$\underline{P}_j^g \leq P_j^g \leq \overline{P}_j^g, \forall j \in \Omega^B \quad (23)$$

$$\underline{Q}_j^g \leq Q_j^g \leq \overline{Q}_j^g, \forall j \in \Omega^B \quad (24)$$

$$\underline{V}_j \leq V_j \leq \overline{V}_j, \forall j \in \Omega^B, k_{m,t} \geq 0 \quad (25)$$

$$\sqrt{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2} \leq S_{ij,t}, \forall L_{ij} \in \Omega^L \quad (26)$$

式(19)~(22)描述了节点的功率平衡,其中下标 t 表示时间。 $P_{j,t}^g, Q_{j,t}^g$ 分别为节点 j 的光伏有功出力、无功出力; $\overline{P}_j^g, \underline{P}_j^g$ 分别为节点 j 的光伏有功出力上、下限; $P_{j,t}$ 为线路 L_{ij} 上的有功功率; r_{ij}, x_{ij} 分别为线路 L_{ij} 的阻抗和电抗; $V_{j,t}$ 为母线 j 的电压; $I_{ij,t}$ 为线路 L_{ij} 上的电流; $P_{ij,t}, Q_{ij,t}$ 分别为线路 L_{ij} 上的有功功率和无功功率; $P_{j,t}^{\text{load}}, Q_{j,t}^{\text{load}}$ 分别为母线 j 处的有功和无功功率负荷; P_m, Q_m 分别为光伏 m 的有功和无功功率输出; $P_{j,t}^{\text{cs}}$ 为位于母线 j 的充电站在时间段 t 的总充电功率。 $\overline{V}_j, \underline{V}_j$ 分别为节点 j 的电压上、下限。约束条件式(23)~(26)表示发电机的有功和无功功率界限,以及母线 j 处的电压幅值边界。式(26)是电力线 L_{ij} 上的潮流约束。

光伏逆变器的无功功率输出取决于并网节点电压值,即满足约束式(3)。进一步,有功功率应满足约束式(4),通过调节下垂系数可实现对电压的无功补偿,下垂系数约束应满足:

$$k_{m,t} \geq 0 \quad (27)$$

此外,对于电动汽车充电,本文考虑了电动汽车充电站的充电容量因素,因此电动汽车的充电功率应满足式(9)~(12)。同时,充电站在进行功率调度时,也应该保证用户的充电需求满足式(15)。

因此,DRCCS优化模型为

$$\min_{k_{m,t}, a_{r,t}, P_{r,t}} (\omega_1 C_{\text{PV}} + \omega_2 C_{\text{EV}}) \quad (28)$$

s.t. 式(3)、(4), 式(9)~(16), 式(19)~(26)

通过求解优化问题,可以得到最优决策变量 $k_{m,t}, a_{r,t}$ 和 $P_{r,t}$,从而得到光伏的最佳输出功率 $P_{m,t}^g$ 和 $Q_{m,t}^g$,以及充电站的最佳充电功率 $P_{j,t}^{\text{cs}}$ 。

2.2 模型求解

由于二进制变量 $a_{r,t}$ 的存在,所建立的优化模型成为MINLP问题,因此需要提出对应的求解方法。本文采用广义Benders算法(generalized Benders decomposition, GBD)进行求解,使用该算法的条件为当整型变量为固定值时,其余变量所组成的优化模型为凸。在本文提出的模型里,当 $a_{r,t}$ 为固定值时,可以得到以 $k_{m,t}$ 和 $P_{r,t}$ 为决策变量的优化模型如下:

$$\begin{cases} \min_{k_{m,t}, P_{r,t}} (\omega_1 C_{\text{PV}} + \omega_2 C_{\text{EV}}) \\ \text{s.t. 式(3)、(4), 式(13)~(15), 式(19)~(26)} \end{cases} \quad (29)$$

由于 $a_{r,t}$ 是常数,因此可以忽略约束条件式(9)~(12)、式(16)。在其余的约束条件中,非凸情况由

式(22)引起,其可以被松弛^[27]为

$$V_{i,t}^2 I_{ij,t}^2 \geq P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2, \forall L_{ij} \in \Omega^L \quad (30)$$

因此所建立的模型符合采用GBD算法求解的条件。

图6展示了详细的DRCCS流程图。首先,采集配电网网架信息、光伏节点信息和充电站节点。根据当前节点信息和网络拓扑状态构建DRCCS优化模型式(28),并采用GBD算法1进行求解。得到光伏逆变器的 V - Q 控制斜率 $k_{m,t}$ 和每辆车的充电器连接状态 $a_{r,t}$ 以及充电功率 $P_{r,t}$ 。通过式(3)、(4)计算得到光伏的最佳输出功率 $P_{m,t}^g$ 和 $Q_{m,t}^g$,通过式(9)计算得到充电站的最佳充电功率 $P_{j,t}^{\text{cs}}$,从而指导光伏和充电站运行。

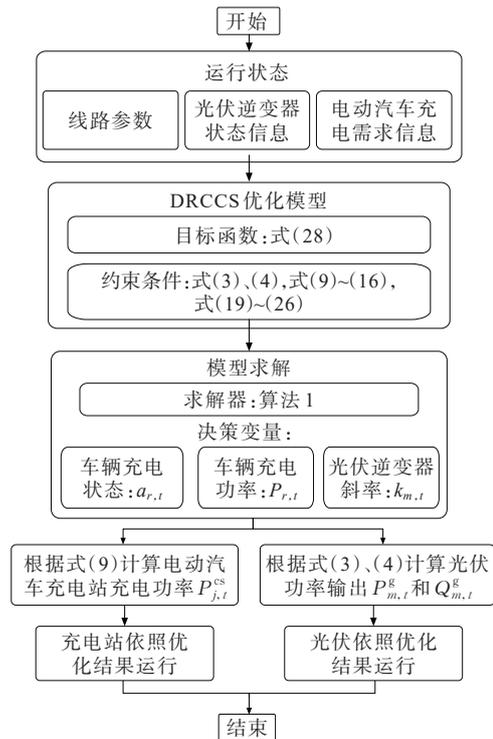


图6 DRCCS方法流程

Figure 6 Flow of DRCCS

3 算例分析

本文采用改进的IEEE 33节点系统模型对提出的DRCCS方法进行验证,加上光伏和充电站后配电网的拓扑结构如图7所示。本案例中共有5个充电站,设充电站内的充电器数量都为6个,每个充电器提供的最大充电功率 $P_{\text{max}}=45$ kW,光伏分别安装在4个节点,其容量为500 kW。

根据实际数据在1 d内的有充电需求的交通流以及光伏出力时间序列如图8所示。车流中既包括

有紧急充电需求的用户,也包括有经济性充电需求的用户。图 9 为配电网中不同类型负荷(不含电动汽车充电负荷)的变化情况。仿真中采用的负荷剖面为真实的日特性曲线。负荷包含 4 个典型的实例,并均匀地分配到配电网的节点上。

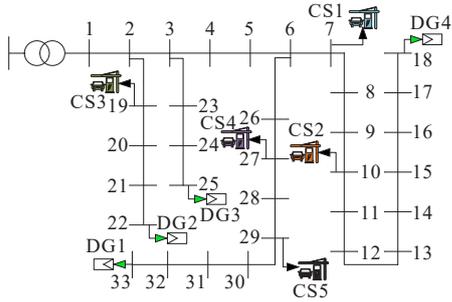


图 7 IEEE 33 节点配电网结构

Figure 7 Structure of IEEE 33-bus distribution network

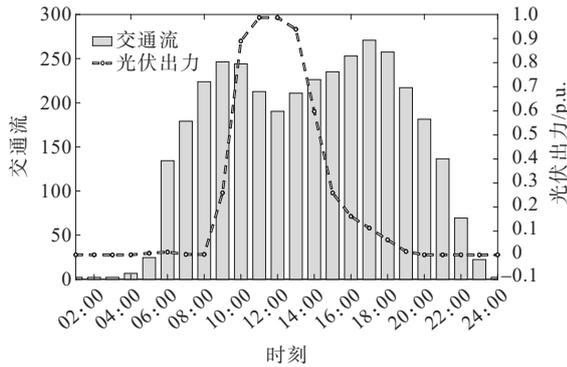


图 8 整体交通流和光伏出力波形

Figure 8 Overall traffic flow and profile of PV output

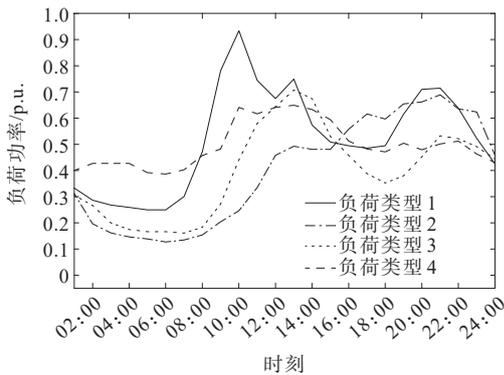


图 9 不同类型负荷日特性曲线

Figure 9 Daily characteristic curves of different types of loads

配电网在不同方法下的电压分布如图 10 所示。电网电压主要受电网运行状态的影响。在白天,光伏电源的输出增加,这是电压上升的主要原因;在夜间,光伏无法供电,而此时居民用电负荷增加,从而导致电压下降。即便如此,在所使用的控制方法下,电压都保持在正常范围内。相比之下,本文提

出的控制方法有效地减小了电压波动范围,对保持电网稳定具有积极作用。

图 11 展示了节点 18 在 1 d 中的电压波动情况,当不采取任何电压控制措施时,节点电压发生明显的波动,特别是在中午时分出现了严重的电压抬升问题,这不利于配电网的安全稳定运行,因此需要对电压进行控制。

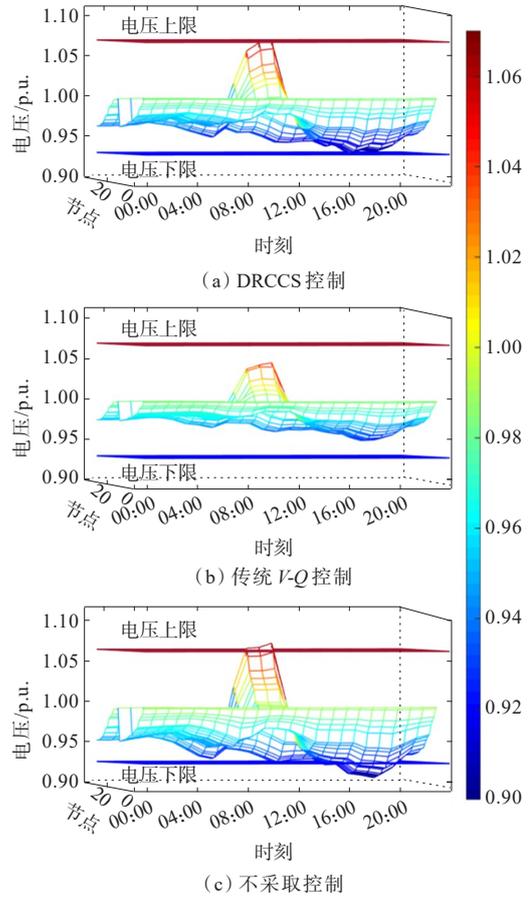


图 10 不同方法下的配电网电压分布

Figure 10 Voltage range in distribution network under different methods

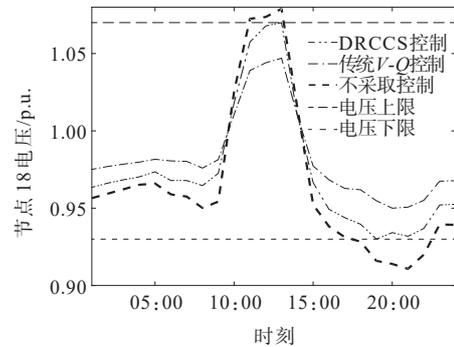
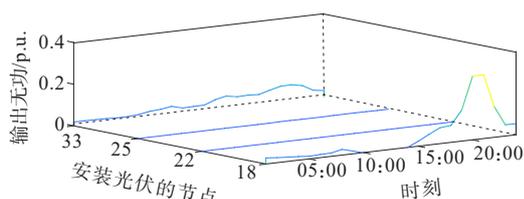


图 11 在不同的控制方法下节点 18 的电压参数比较

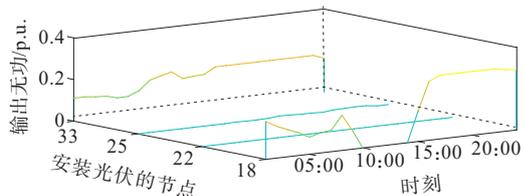
Figure 11 Comparison of voltage parameters of bus 18 under different control methods

通过分别采用传统的 $V-Q$ 控制方法以及本文所提出的 DRCCS 控制方法对配电网进行调控,可以发现,这 2 种方法都将节点电压控制在额定范围 $0.93\sim 1.07$ 。而在中午,DRCCS 下的电压高于 $V-Q$ 控制,这是由于本文提出的方法考虑了光伏电源的利用效率,使得光伏电源能够在中午太阳足够的情况下尽可能地多发出有功功率,但其仍在额定范围内,可满足电压调控的要求。

图 12 展示了 2 种控制方法的光伏节点的无功功率输出,在优先保证电压在额定范围内的情况下,需要一定量的无功功率来对节点电压进行调节。可以发现,采用 DRCCS 控制输出的无功功率整体少于传统 $V-Q$ 控制输出的无功功率。图 13 比较了分别在 DRCCS 控制和传统 $V-Q$ 控制下安装了光伏的节点的总有功功率输出。从图 13 中可以看出,采用本文提出的 DRCCS 方法使得配网内光伏的综合有功功率输出增加,因此提升了配网内可再生能源的利用效率,结合图 10、11 的配电网电压状况,可以发现本文提出的 DRCCS 方法在提升可再生能源利用效率的同时依然保证了节点电压维持在设定的稳定范围内,从而实现了稳定高效运行。



(a) 提出的 DRCCS 控制



(b) 传统 $V-Q$ 控制

图 12 光伏输出无功功率比较

Figure 12 Comparison of reactive power of PV output

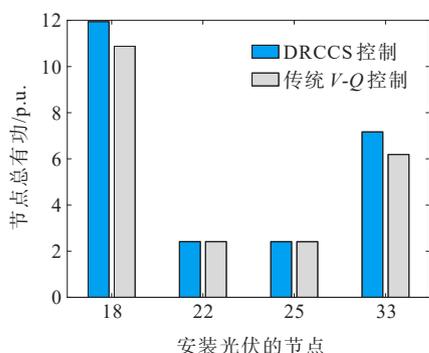
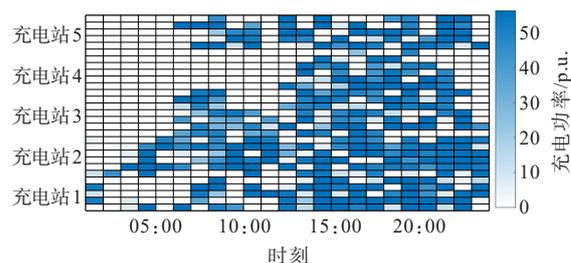


图 13 安装光伏的节点总有功功率比较

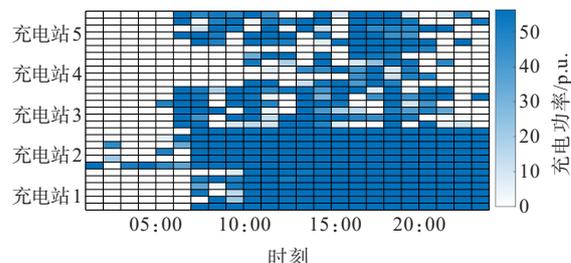
Figure 13 Comparison of total active power of PV buses

图 14 显示了 1 d 内的各个充电站和充电站内对应的充电器在不同控制方法下的充电功率。如图 14(a) 所示,本文提出的 DRCCS 策略充分考虑充电站内充电设施的数量限制,在仿真模型中能精确给出每个充电器在每个时刻的充电功率,而且每个充电器的利用效率更加平均,目前的绝大部分关于电动汽车充电调度的工作并未将充电功率调度精确到每一个充电器层级,而约束式(15)的设置也保证了每个用户的充电需求得到满足。图 14(b)展示了不受控情况下的充电功率,可以看到充电车辆更倾向于直接用满充功率快速实现充电,没有很好地利用充电灵活性。因此本文提出的 DRCCS 方法在考虑充电设施数量限制的情况下,提高了各充电站的充电器利用效率,提升了充电灵活性,同时也保证了用户充电需求。

不同方法下充电站的充电总功率如图 15 所示。



(a) DRCCS 控制下各充电器的充电功率



(b) 不采用 DRCCS 时各充电器的充电功率

图 14 充电站的充电功率

Figure 14 Charging power of charging stations

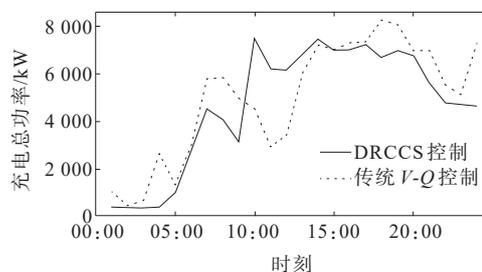


图 15 充电站的充电总功率

Figure 15 Total charging power of charging stations

可以看到,在光伏出力更多的中午,提出的 DRCCS 方法提升了整体的充电功率,从而起到了

消纳一部分光伏并缓解电压上升的目的。同样,在晚上,当光伏出力减小而其他用电负荷增加的时候,提出的DRCCS方法降低了整体充电负荷,进而缓解了电压下降趋势。因此,所提出的DRCCS方法起到支撑配电网安全稳定运行的作用。

4 结语

本文提出一种考虑光伏利用效率与电动汽车充电设施数量限制的配电网分布式资源协调控制方法,根据当前节点信息和网络拓扑状态构建优化模型,协调光伏逆变器的V-Q控制斜率和充电站的充电功率。仿真结果表明,与传统方法相比,本文提出的DRCCS控制算法综合考虑了配电网中的分布式光伏和电动汽车充电站的灵活控制能力,在考虑配电网电压稳定和电动汽车充电设施数量限制的情况下,提高了光伏逆变器的有功功率输出,提升了充电站的充电器利用率,并保证了用户的需求,实现了配电网的灵活可靠运行。

笔者在未来将进一步考虑利用配网中储能等其他灵活可控资源,以及主动配电网中各类分布式资源功率流动特性,合理协调多元件之间的出力,实现“源荷”两端供需平衡,提升主动配电网运行可靠性和经济性,促进可再生能源消纳。

参考文献:

- [1] 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.
LI Junhui, SUN Dapeng, ZHU Xingxu, et al. Voltage regulation strategy for distributed energy storage considering coordination among clusters with high penetration of photovoltaics[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(10):47-56.
- [2] 谢李为,李勇,罗隆福,等. 基于节点电压差值的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(6):106-116.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. A novel fault location method employing node voltage difference value for a distribution network[J]. Power System Protection and Control,2023,51(6):106-116.
- [3] JAFARI M R, PARNIANI M, RAVANJI M H. Decentralized control of OLTC and PV inverters for voltage regulation in radial distribution networks with high PV penetration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2022,37(6):4827-4837.
- [4] GERDROODBARI Y Z, RAZZAGHI R, SHAHNIA F. Decentralized control strategy to improve fairness in active power curtailment of PV inverters in low-voltage distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2021,12(4):2282-2292.
- [5] 李谦,江宇栋,刘尧,等. 配电网低频涌流对电磁式电压互感器影响和抑制方法的分析[J]. 高压电器,2022,58(2):142-148+157.
LI Qian, JIANG Yudong, LIU Yao, et al. Analysis of influence of low frequency inrush current of distribution network on electromagnetic potential transformer and its suppression method[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(2):142-148+157.
- [6] 潘俊迪,陈中,倪纯奕,等. 基于无模型自适应控制的配电网电压控制方案[J]. 电力工程技术,2023,42(5):128-137.
PAN Jundi, CHEN Zhong, NI Chunyi, et al. Distribution network voltage control scheme based on model-free adaptive control[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(5):128-137.
- [7] LOISEL R, PASAOGU G, THIEL C. Large-scale deployment of electric vehicles in Germany by 2030:an analysis of grid-to-vehicle and vehicle-to-grid concepts [J].Energy Policy,2014,65:432-443.
- [8] LIU J Y, PEPER J, LIN G, et al. A planning strategy considering multiple factors for electric vehicle charging stations along German motorways[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2021,124:106379.
- [9] 陶星宇,杨健维,牛牧童,等. 计及电动汽车充电负荷的电力系统中长期生产模拟方法研究[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(1):18-26.
TAO Xingyu, YANG Jianwei, NIU Mutong, et al. A mid/long-term power system production simulation approach considering charging load of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 18-26.
- [10] 陶鑫,李婧,徐佳,等. 基于MDP及激励需求响应的电动汽车有序充电控制[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(5):79-86.
LIAO Xin, LI Jing, XU Jia, et al. Research on coordinated charging control for electric vehicles based on MDP and incentive demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(5):79-86.
- [11] HE C K, ZHU J Z, LI S L, et al. Sizing and locating planning of EV centralized-battery-charging-station considering battery logistics system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2022,58(4):5184-5197.
- [12] ZHENG Y, SONG Y, HILL D J, et al. Online distributed MPC-based optimal scheduling for EV charging stations in distribution systems[J]. IEEE Transactions on

- Industrial Informatics,2019,15(2):638-649.
- [13] WANG Y F, WANG X L, SHAO C C, et al. Distributed energy trading for an integrated energy system and electric vehicle charging stations: a Nash bargaining game approach[J]. Renewable Energy, 2020, 155: 513-530.
- [14] 于瀛涵, 陈嘉德, 韩子娇, 等. 电动汽车的有序充电管理及其对配电网的影响分析[J]. 东北电力技术, 2023, 44(2): 34-39.
- YU Yinghan, CHEN Jiade, HAN Zijiao, et al. Research on orderly charging management of electric vehicles and its impact on distribution network[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(2): 34-39.
- [15] ZHAO Z H, LEE C K M. Dynamic pricing for EV charging stations: a deep reinforcement learning approach [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(2): 2456-2468.
- [16] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 价格与激励联合需求响应下电动汽车长时间尺度充放电调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 46-55.
- HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Long-time-scale charging and discharging scheduling of electric vehicles under joint price and incentive demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 46-55.
- [17] WANG P Y, LIANG F Y, SONG J Y, et al. Impact of the PV location in distribution networks on network power losses and voltage fluctuations with PSO analysis[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(2): 523-534.
- [18] 袁方方, 赵江信, 郭宝甫, 等. 分布式光伏电源与配电网协调控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(24): 116-124.
- YUAN Fangfang, ZHAO Jiangxin, GUO Baofu, et al. Research on coordinated control strategy of distributed photovoltaic generation and distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24): 116-124.
- [19] ZHANG C, XU Y, WANG Y, et al. Three-stage hierarchically-coordinated voltage/var control based on PV inverters considering distribution network voltage stability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 868-881.
- [20] 叶琳浩, 徐敏, 郭祚刚, 等. 计及演化驱动因素的配网分布式光伏多阶段协调规划优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(8): 44-51+61.
- YE Linhao, XU Min, GUO Zuogang, et al. Optimization method of multi-stage coordinated planning for distributed photovoltaic in distribution network considering evolutionary driving factors[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(8): 44-51+61.
- [21] KIKUSATO H, FUJIMOTO Y, HANADA S I, et al. Electric vehicle charging management using auction mechanism for reducing PV curtailment in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1394-1403.
- [22] 王晓梅, 卢芳, 卢京祥, 等. 含分布式光伏和电动汽车的主动配电网电压一致性协同控制[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 101-107+134.
- WANG Xiaomei, LU Fang, LU Jingxiang, et al. Consensus-based cooperative voltage control of distributed photovoltaic and electric vehicles in active distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 101-107+134.
- [23] WANG L S, DUBEY A, GEBREMEDHIN A H, et al. MPC-based decentralized voltage control in power distribution systems with EV and PV coordination[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2908-2919.
- [24] LIU J Y, LIN G, HUANG S H, et al. Collaborative EV routing and charging scheduling with power distribution and traffic networks interaction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3923-3936.
- [25] KRIUKOV A, GAVRILAS M, IVANOV O, et al. Novel decentralized voltage-centered EV charging control algorithm using DSRC system in low voltage distribution networks[J]. IEEE Access, 2021, 9: 164779-164800.
- [26] LIU J Y, LIN G, HUANG S H, et al. Optimal EV charging scheduling by considering the limited number of chargers [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1112-1122.
- [27] PENG Q Y, LOW S H. Distributed optimal power flow algorithm for radial networks, I: balanced single phase case[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 111-121.