

含电动汽车和智能软开关的配电网动态重构

林文键¹,朱振山^{1,2},温步瀛¹

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108;

2. 智能配电网装备福建省高校工程研究中心,福建 福州 350108)

摘要:提出含分布式能源、智能软开关(SOP)和电动汽车(EV)有序接入的配电网重构策略。基于上班族的出行习惯模拟EV的无序充电模型,并构建配电网重构下的SOP模型;对于接入的EV无序充电负荷,采用拉格朗日松弛分散式优化算法和虚拟电价进行EV的有序调度;以最小化网损费用,SOP运行费用,弃风、弃光费用与开关动作费用之和为目标函数,通过大M法和二阶锥松弛将配电网重构模型转化为混合整数二阶锥规划模型,采用CPLEX求解器进行求解。IEEE 33节点标准系统的仿真结果表明,在配电网动态重构中采用SOP代替传统开关能够提升配电网运行的经济性,同时采用所提有序调度方法优化EV充电可以改善配电网电压质量。

关键词:配电网重构;电动汽车;智能软开关;拉格朗日松弛分散式优化;虚拟电价

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202207028

0 引言

配电网是电能从生产者到消费者之间传输的最终环节,对能源经济的发展有重大影响。现行的配电网存在以下问题:分布式能源(DG)的接入使配电网的潮流双向流动,线路损耗更加复杂且难以控制,这给配电网的经济运行带来影响^[1];电动汽车(EV)的普及使得负荷侧呈现出较强的随机性和波动性,降低了配电网的电压质量。

传统配电网仅通过配电网重构(DNR)提高配电系统的可靠性和经济性^[2]。DNR是指通过改变配电系统的开关组合寻求更好的网络运行拓扑,从而改善节点电压以及降低网损。DNR方法主要分为静态重构和动态重构2种。静态重构^[3]在进行DNR时仅考虑单一时间断面,假定整个时段的负荷恒定不变,局限性较大;动态重构^[4]是对一段时间内的配电网架构进行动态优化,以提升网络的灵活性。实际配电网的负荷总是不断变化的,动态重构更能应对网络的复杂性。

同时,由于EV的接入会加剧配电网末端节点的电压降落以及增大网损^[5-6],为减轻EV充电的随机性对配电网运行稳定性和经济性的影响,需对EV充电负荷进行有序调度。文献[7]提出“延时”和“错峰”2种充电策略,对EV无序充电负荷进行引导,但这2种策略针对的均是EV集群,不能实现EV的分散式调度,存在较大的误差。文献[8]提出拉格朗日分散式优化方法,但其对于需求响应采用的是固定分时电价策略,不能实时响应电网的负荷波动。文献[9]提出虚拟电价理论,可结合配电网的基础负荷制定实时电价,用于提升EV负荷错峰填谷的效果。

近几年,电力电子器件的发展为打破传统配电网的物理结构提供了新的思路,以智能软开关(SOP)^[10]为代表的电力电子柔性互联器件,可用于代替传统的配电网物理开关,起到提升配电系统运行经济性和可靠性的作用。文献[11]提出SOP接入位置和接入数量的不同会对网络的灵活性和经济性产生较大的影响。文献[12]提出需求响应和SOP的协同优化可以减少配电网的运行成本。现有关于SOP应用的研究主要关注配电网的优化运行方面^[13-14],而较少以SOP代替DNR时的联络开关。SOP在DNR时代替联络开关,可以起到控制线路潮流和电压水平的作用,从而增加配电网的灵活性。

目前,已有一些研究关注EV有序调度在配电网中的应用^[15],但较少有研究应用拉格朗日分散式优化方法进行EV调度,且一般采用固定分时电价策略来引导EV的有序调度,EV负荷的错峰填谷效果较差。此外,现有关于EV调度的研究均未考虑与SOP和DNR的联合优化运行,不能充分发挥配电网灵活调节的能力。

综上,本文在新能源接入的背景下,提出综合考虑EV和SOP的多时段DNR策略,有效利用EV的有序调度和SOP灵活控制潮流的特性,进一步降低DNR费用,提高新能源的消纳率。在算法方面,提出基于拉格朗日松弛分散式优化方法和虚拟电价对

收稿日期:2022-04-26;修回日期:2022-06-20

在线出版日期:2022-07-28

基金项目:福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT190043);
国网福建省电力有限公司科技项目(52130N220012)

Project supported by the Young and Middle-aged Teachers Education Scientific Research Project of the Education Department of Fujian Province (JAT190043) and the Science and Technology Program of State Grid Fujian Electric Power Co.,Ltd.(52130N220012)

EV 进行有序调度,将包含 DG、EV 和 SOP 的配电网动态重构模型转化为混合整数二阶锥规划(MISOCP)问题进行求解。为提升求解速度,在 DNR 模型中加入 3 类加速条件。为验证本文所提方法对于 DNR 经济性和电压幅值的提升作用,在 MATLAB 中采用 CPLEX 求解器进行算例仿真分析。

1 EV 调度模型

本文采用拉格朗日松弛分散式优化方法和虚拟电价相结合的方法对 EV 进行调度。拉格朗日松弛分散式优化方法可以实现对每辆 EV 的充电优化。以虚拟电价代替固定分时电价可实现与电网负荷的实时匹配,但虚拟电价本身不作为电价的真实结算标准,仅用于根据电网负荷引导 EV 负荷实现错峰填谷。

1.1 EV 充电负荷基础模型

假定在充电结束时 EV 电量可达到其期望值,且每辆 EV 均愿服从充电调度。从出行需求角度考虑 EV 到达目的地时是否需要充电,以预测每辆 EV 的充电时段分布,得到预测的无序 EV 负荷^[8]。

1)EV 用户的行驶里程。

每辆 EV 上下班的行驶里程分布用对数概率密度函数 $f_m(\cdot)$ 表示,如式(1)所示。

$$f_m(R_d) = \frac{1}{\sigma_m R_d \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln R_d - \mu_m)^2}{2\sigma_m^2}\right] \quad (1)$$

式中: R_d 为住宅到单位的距离;期望 $\mu_m = 1.51$; 标准差 $\sigma_m = 0.87$ 。

2)EV 接入电网的时间。

EV 到达单位的时间和回到住宅的时间服从正态分布概率密度函数 $f_s(\cdot)$, 表示为:

$$f_s(t_w) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_w - \mu_w)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (2)$$

$$f_s(t_h) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_h - \mu_h)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (3)$$

式中: t_w 、 t_h 分别为 EV 到达单位和回到住宅的时间;期望 $\mu_w = 8.5$; 期望 $\mu_h = 17.5$; 标准差 $\sigma_s = 0.5$ 。

3)初始荷电状态(SOC)。

根据实际情况,假定 EV 电量在上班之前都满足车主出行的最低电量要求,数学模型为:

$$S_{Rd} = S_{dl} R_d \quad (4)$$

式中: S_{Rd} 为 EV 从单位(住宅)到住宅(单位)单程所需 SOC; S_{dl} 为 1 km 所消耗的 SOC。

根据 EV 的单程行驶距离,为考虑每辆 EV 初始 SOC 的差异,可将 EV 的初始 SOC 表示为:

$$S_{s,i} = A_i(1 - S_{Rd}) + S_{Rd} \quad (5)$$

式中: $S_{s,i}$ 为第 i 辆 EV 的初始 SOC; A_i 为 N 维(0,1)取值随机行向量中的第 i 个值, N 为 EV 数量。

对于已知初始 SOC 和上下班单程距离的 EV,首先应判断该 EV 在到达单位或回到住宅后是否具有充电需求:若到达单位或回到住宅后 EV 的 SOC 满足式(6),则为保证 EV 电量可以满足出行要求,需对该 EV 进行充电。

$$S_{soc}(i) < S_{Rd}(i) + a \quad (6)$$

式中: $S_{soc}(i)$ 为第 i 辆 EV 到达单位或回到住宅时的 SOC; $S_{Rd}(i)$ 为第 i 辆 EV 单程所需 SOC; a 为很小的常数,用于模拟电池的自放电。假设符合式(6)的 EV 均服从优化调度,且其充电需求均能被满足。

1.2 基于虚拟电价的 EV 充电调度

本文设定虚拟电价^[9]的调度周期 $T=24$ h,将调度周期离散成若干等长的时段,每个时段的时长 $\Delta T=0.25$ h。虚拟电价和配电网基础负荷的关系为:

$$\gamma(P_{l,a}(t), t) = \varphi_0 + \varphi_1 P_{l,a}(t) + \varphi_2 [P_{l,a}(t) - \phi_{R,0}]^+ \quad (7)$$

$$\varphi_k = \frac{P_{pri,k}}{\phi_{R,k}} \quad k=1, 2 \quad (8)$$

式中: $\gamma(P_{l,a}(t), t)$ 为 EV 接入时刻 t 的虚拟电价, $P_{l,a}(t)$ 为 t 时刻接入配电网的总负荷,如式(9)所示; φ_0 、 φ_1 、 φ_2 为制定虚拟电价时的调整系数,为使虚拟电价与现行的峰谷电价处于同一比例金额,令 $\varphi_0 = -0.21$ 元/(kW·h); $\phi_{R,0}$ 为负荷基准值; $[\cdot]^+$ 表示 $\max\{0, \cdot\}$; k 取值 1、2 分别表示峰时段、谷时段, $P_{pri,1}$ 、 $P_{pri,2}$ 分别为峰时段、谷时段电价, $\phi_{R,1}$ 、 $\phi_{R,2}$ 分别为峰时段、谷时段负荷均值。对式(7)求负荷的偏导,可得 $\varphi_1 \geq 0$, 因此总体上虚拟电价与当前负荷水平呈正相关性, φ_2 的设置是为了使总负荷大于负荷基准值时的虚拟电价有一个更大的提升。

$$P_{l,a}(t) = P_{l,bc}(t) + P_{l,Ev}(t) \quad (9)$$

式中: $P_{l,bc}(t)$ 为 t 时刻的基础负荷; $P_{l,Ev}(t)$ 为 t 时刻接入配电网的 EV 负荷。

1.3 拉格朗日松弛分散式优化

1.3.1 集中式模型

集中式优化调度的目标函数设定为在满足 EV 用电需求的前提下 EV 的充电费用 F 最小,即:

$$\min F = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T J_i' P_e \Delta T \gamma(P_{l,a}(t), t) \quad (10)$$

式中: J_i' 为 t 时刻第 i 辆 EV 的充电状态^[16],如式(11)所示; P_e 为 EV 充电功率,假定其值不变。

$$J_i' = \begin{cases} 1 & \text{充电状态} \\ 0 & \text{非充电状态} \end{cases} \quad (11)$$

1)每辆 EV 的充电需求约束^[16],即:

$$S_{e,i} C_c \leq S_{s,i} C_c + \sum_{t=1}^T P_e \eta J_i' \Delta T \leq C_c \quad (12)$$

式中: $S_{e,i}$ 为第 i 辆 EV 的期望 SOC; C_c 为电池容量; η 为充电效率。

2)EV 可调度时间约束^[16]。

设定EV仅在接入时段末和离开时段的前一个时段末接受虚拟电价的调度,因此有:

$$J_i^t = 0$$

$$t=1, 2, \dots, t_{e1,i}, t_{l1,i}+1, \dots, t_{e2,i}; i=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

式中: $t_{e1,i}$ 、 $t_{e2,i}$ 分别为第 i 辆EV第1次和第2次接入电网的时刻; $t_{l1,i}$ 为第 i 辆EV第1次离开电网的时刻。

3) 系统功率约束^[8]。

在任意时刻 t , 所有EV负荷和配电网基础负荷叠加后的值应小于配电网所能承受的最大负荷, 即:

$$P_{l,bc}(t) + \sum_{i=1}^N P_e J_i^t < P_{l,m} \quad (14)$$

式中: $P_{l,m}$ 为配电网所能承受的最大负荷。

1.3.2 拉格朗日松弛分散式优化模型

1.3.1 节的优化模型是针对集中式优化方法的, 本文采用拉格朗日松弛分散式优化方法将集中式模型转化为分散式模型。算法流程图^[17]如图1所示。图中: ξ 为约束条件数; $\lambda(v)$ 为第 v 次迭代的拉格朗日乘子; $\alpha(v)$ 为第 v 次迭代的步长; $h(x^{(v)})$ 为第 v 次迭代对应的次梯度与该次梯度对应的1范数的比值。

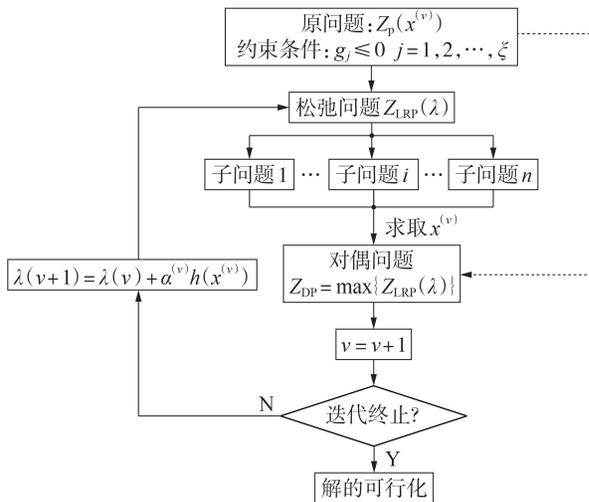


图1 拉格朗日松弛法的一般流程图

Fig.1 General flowchart of Lagrange relaxation method

根据图1, 将集中式优化模型转化为分散式模型的步骤如下。

1) 目标函数不变, 仍为1.3.1节式(10)。

2) 将式(14)乘以拉格朗日乘子, 并将其加入原目标函数中, 得到无系统性约束的原问题的拉格朗日松弛问题 $L(J_i^t, \lambda^t)$, 即:

$$L(J_i^t, \lambda^t) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T J_i^t P_e \Delta T \gamma(P_{l,a}(t), t) + \lambda^t \left(P_{l,bc}(t) + \sum_{i=1}^N P_e J_i^t - P_{l,m} \right) = P_e \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T J_i^t \left(\Delta T \gamma(P_{l,a}(t), t) + \lambda^t \right) + \sum_{t=1}^T (P_{l,bc}(t) - P_{l,m}) \quad (15)$$

式中: λ^t 为 t 时刻的拉格朗日乘子。可再将式(15)分解为针对每辆EV的子问题, 如式(16)所示。

$$\min L(J_i^t, \lambda^t) = P_e \sum_{t=1}^T J_i^t \left(\Delta T \gamma(P_{l,a}(t), t) + \lambda^t \right) + \frac{\sum_{t=1}^T (P_{l,bc}(t) - P_{l,m})}{N} \quad (16)$$

可将约束式(12)和式(13)合并为:

$$S_{e,i} C_c \leq J_{s,i} C_c + \sum_{t=t_{e1,i}+1}^{t_{l1,i}} P_e \eta J_i^t \Delta T \leq C_c \quad (17)$$

求解以上 N 个子问题可得到每辆EV的 J_i^t 。

3) 对偶问题。

由拉格朗日松弛问题得到原问题的对偶问题 $D(\lambda')$, 将拉格朗日松弛函数中的 λ' 看作变量, 对偶问题为:

$$D(\lambda') = \max_{\lambda' \geq 0} \min_{J_i^t} L(J_i^t, \lambda') \quad (18)$$

4) 原问题与对偶问题的解。

将步骤2)中求得的 J_i^t 代入原问题和对偶问题。若求得的原问题和对偶问题目标函数的差值满足精度要求, 则可近似认为对偶问题的解即为原问题的解; 否则, 对 λ' 进行更新。

5) 采用次梯度法对 λ' 进行更新。

由于对偶问题是非光滑的, 因此采用次梯度法。次梯度法是从一个初值出发, 沿着次梯度的方向进行迭代, 设 k 为迭代次数, $k=1$ 时先给 λ' 一个初值, 迭代公式为:

$$\lambda'(v+1) = \lambda'(v) + \chi(v) \frac{\varphi(v)}{\|\varphi(v)\|_1} \quad (19)$$

式中: $\lambda'(v)$ 为 t 时刻第 v 次迭代的拉格朗日乘子; $\chi(v)$ 为第 v 次迭代的步长, $\chi(v) = 1/(m+nv)$, m, n 为常数, 且 $n < m$; $\varphi(v)$ 为第 v 次迭代的次梯度。

不断更新 λ' , 直到对偶间隙精度满足要求或 λ' 满足式(20)。

$$\frac{\lambda'(v) - \lambda'(v+1)}{\lambda'(v+1)} < \varepsilon \quad (20)$$

式中: ε 为拉格朗日乘子的迭代率。此时对偶问题的下确界为原问题的最优解, 迭代结束。

2 DNR 的 MISOC P 模型

本文对于配电网运行优化的研究分为2个阶段: 第1阶段根据配电网提供的基础负荷信息制定虚拟电价, 再通过拉格朗日松弛分散式优化方法和虚拟电价实现EV负荷的有序调度; 第2阶段根据制定的EV充电计划以及配电网节点的区域划分和负荷分配, 将EV负荷接入配电网, 在风、光等清洁能源接入的背景下, 建立含EV和SOP的多时段配电网优化重构模型, 提升配电网运行的经济性和电压水平。

对于模型中存在的非线性约束,采用二阶锥松弛和大 M 法进行线性转化。

2.1 DNR 的目标函数

本文提出的模型以弃风惩罚、弃光惩罚、网损费用、SOP 损耗费用和开关动作费用之和最小为目标函数,即:

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in B^{\text{line}}} C_{\text{loss}} (I_{ij}^t)^2 r_{ij} \Delta T + \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in B^{\text{line}}} C_{\text{switch}} \left(\left| \alpha_{ij}^t - \alpha_{ij}^{t-1} \right| \right) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i \in B^{\text{sop}}} C_{\text{soploss}} P_i^t \Delta T + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in B^{\text{wind}}} C_{\text{windloss}} (P_i^t \text{wind} - P_i^t \text{wind}) \Delta T + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i \in B^{\text{pv}}} C_{\text{pvloss}} (P_i^t \text{pvf} - P_i^t \text{pv}) \Delta T \end{aligned} \quad (21)$$

式中: C 为 DNR 模型的总费用; B^{line} 为配电网中含联络线的所有支路集合; B^{sop} 为配电网中接入 SOP 的节点集合; B^{wind} 为配电网中接入风电机组的节点集合; B^{pv} 为配电网中接入光伏的节点集合; C_{loss} 、 C_{switch} 、 C_{soploss} 、 C_{windloss} 、 C_{pvloss} 分别为网损费用系数、开关动作费用系数、SOP 运行费用系数、弃风费用系数和弃光费用系数; I_{ij}^t 为 t 时刻流经支路 ij 的电流; α_{ij}^t 为支路 ij 的开闭状态,是 0-1 变量,其值为 0 时表示 t 时刻支路 ij 断开,为 1 时表示 t 时刻支路 ij 闭合; $P_i^t \text{soploss}$ 为 t 时刻 SOP 接入节点 i 上换流器的损耗; $P_i^t \text{wind}$ 和 $P_i^t \text{pvf}$ 分别为 t 时刻风电接入节点和光伏接入节点发出的有功功率; $P_i^t \text{wind}$ 和 $P_i^t \text{pv}$ 分别为 t 时刻风电机组节点和光伏节点接入电网的实际功率。

2.2 约束条件

1) DistFlow 潮流约束。

DistFlow^[18] 是一种以支路功率为研究对象的潮流模型,本文所用的 DNR 的 DistFlow 潮流模型为:

$$\sum_{i \in f(j)} \alpha_{ij}^t \left[P_{ij}^t - r_{ij} (I_{ij}^t)^2 \right] = P_j^t + \sum_{k \in s(j)} \alpha_{jk}^t P_{jk}^t \quad (22)$$

$$\sum_{i \in f(j)} \alpha_{ij}^t \left[Q_{ij}^t - x_{ij} (I_{ij}^t)^2 \right] = Q_j^t + \sum_{k \in s(j)} \alpha_{jk}^t Q_{jk}^t \quad (23)$$

$$P_j^t = P_j^t \text{wind} + P_j^t \text{pv} + P_j^t \text{dis} + P_j^t \text{sop} - P_j^t \text{ch} - P_j^t \text{loada} \quad (24)$$

$$Q_j^t = Q_j^t \text{wind} + Q_j^t \text{pv} + Q_j^t \text{sop} - Q_j^t \text{loada} \quad (25)$$

$$\begin{cases} (V_j^t)^2 = (V_i^t)^2 - 2(r_{ij} P_{ij}^t + x_{ij} Q_{ij}^t) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) (I_{ij}^t)^2 \\ \forall (i, j) | ij \in B^{\text{line}}, \alpha_{ij} = 1 \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} (V_i^t)^2 (I_{ij}^t)^2 = (P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t)^2 \\ \forall (i, j) | ij \in B^{\text{line}}, \alpha_{ij} = 1 \end{cases} \quad (27)$$

式中: $f(j)$ 和 $s(j)$ 分别为节点 j 的父节点和子节点集合,即以节点 j 为中心节点的潮流传输的上节点和下节点集合; P_{ij}^t 和 Q_{ij}^t 分别为 t 时刻支路 ij 传输的有功和无功功率; r_{ij} 和 x_{ij} 分别为支路 ij 的等效电阻和电抗; P_j^t 和 Q_j^t 分别为 t 时刻节点 j 注入的有功和无功功率; $P_j^t \text{wind}$ 和 $Q_j^t \text{wind}$ 分别为 t 时刻节点 j 注入的风电机

组发出的有功和无功功率; $P_j^t \text{pv}$ 和 $Q_j^t \text{pv}$ 分别为 t 时刻节点 j 注入的光伏发电的有功和无功功率; $P_j^t \text{ch}$ 和 $P_j^t \text{dis}$ 分别为 t 时刻节点 j 接入的储能系统 (ESS) 充电和放电功率; $P_j^t \text{sop}$ 和 $Q_j^t \text{sop}$ 分别为 t 时刻节点 j 处 SOP 发出的有功和无功功率; $P_j^t \text{loada}$ 和 $Q_j^t \text{loada}$ 分别为 t 时刻节点 j 接入的总有功和总无功负荷, $P_j^t \text{loada} = P_j^t \text{loadbc} + P_j^t \text{loadEV}$, $Q_j^t \text{loada} = Q_j^t \text{loadbc} + Q_j^t \text{loadEV}$ 分别为 t 时刻节点 j 的基础有功负荷和 EV 负荷, $Q_j^t \text{loadbc}$ 为 t 时刻节点 j 的基础无功负荷; V_i^t 和 V_j^t 分别为 t 时刻节点 i 和节点 j 的电压幅值。

DNR 属于非线性非凸规划问题,收敛性难以得到严格的保证,因此,将其转化成凸的二阶锥约束,以降低模型复杂度,保证全局最优。令 $U_{ij}^t \text{sqr} = (V_i^t)^2$, $I_{ij}^t \text{sqr} = (I_{ij}^t)^2$, 消去式 (22)、(23) 中的平方项,得到:

$$\sum_{i \in f(j)} \alpha_{ij}^t (P_{ij}^t - r_{ij} I_{ij}^t \text{sqr}) = P_j^t + \sum_{k \in s(j)} \alpha_{jk}^t P_{jk}^t \quad (28)$$

$$\sum_{i \in f(j)} \alpha_{ij}^t (Q_{ij}^t - x_{ij} I_{ij}^t \text{sqr}) = Q_j^t + \sum_{k \in s(j)} \alpha_{jk}^t Q_{jk}^t \quad (29)$$

消去式 (26) 中的平方项后,再利用大 M 法松弛,使得该约束对所有配电网支路都适用,得到式 (30)、(31)。

$$U_{ij}^t \text{sqr} - U_i^t \text{sqr} \leq M(1 - \alpha_{ij}^t) - 2(r_{ij} P_{ij}^t + x_{ij} Q_{ij}^t) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^t \text{sqr} \quad (30)$$

$$U_j^t \text{sqr} - U_i^t \text{sqr} \geq -M(1 - \alpha_{ij}^t) - 2(r_{ij} P_{ij}^t + x_{ij} Q_{ij}^t) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^t \text{sqr} \quad (31)$$

式中: M 为足够大的正数。

消去式 (27) 中的平方项,再利用二阶锥松弛法松弛,将该式变换为二阶锥约束,即:

$$U_i^t \text{sqr} I_{ij}^t \text{sqr} \geq (P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t)^2 \quad (32)$$

2) 辐射状约束和开关状态寻优加速性约束。

DNR 需要保证重构后的配电系统呈辐射状,不存在孤岛和环网,因此,辐射状约束可表示为:

$$\begin{cases} \sum_{ij \in B^{\text{line}}} \alpha_{ij}^t = 1 & j \in B^n \setminus B^t; t = 1, 2, \dots, T \\ \sum_{ij \in B^{\text{line}}} \alpha_{ij}^t = N^n - N^t & t = 1, 2, \dots, T \end{cases} \quad (33)$$

式中: B^n 为配电网中所有节点的集合; B^t 为配电网中根节点的集合; N^n 和 N^t 分别为所有节点数和所有根节点数。

为减少开关状态的寻优时间,本文对开关状态进行相关约束^[19]。根据 IEEE 33 节点系统的拓扑特点,将支路分为不在环中的“树状支路”和在环中的“环状分支”2 种。在满足配电网辐射状且无孤岛运行的要求下,增加 3 种“加速性约束”:放射型支路全部闭合;非环状分支路集合至多有 1 条支路断开;环状支路集合至少有 1 条支路断开。

3) 开关动作次数约束。

为了保证开关在使用周期内正常运行,减少开关动作对开关使用寿命的影响,保证配电网运行的经济性,需要对开关动作次数进行限制,即:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{ij \in B^{lim}} |\alpha_{ij}^t - \alpha_{ij}^{t-1}| \leq s_{max} \quad (34)$$

式中: s_{max} 为一个周期 T 内开关动作次数上限; $t=1$ 时, $\alpha_{ij}^{t-1} = \alpha_{ij}^0$ 为配电网的初始拓扑,即配电网中所有联络开关支路断开、其余支路均闭合的拓扑结构。

4) 电压和电流约束。

为满足各节点的电压幅值安全性约束和线路的安全传输限制,必须限制电压和电流在允许的范围,约束为:

$$(V_{i,min}^t)^2 \leq U_{i,sqr}^t \leq (V_{i,max}^t)^2 \quad (35)$$

$$0 \leq I_{ij,sqr}^t \leq (I_{ij,max}^t)^2 \quad (36)$$

式中: $V_{i,min}^t$ 和 $V_{i,max}^t$ 分别为 t 时刻节点 i 允许的电压幅值的下限和上限; $I_{ij,max}^t$ 为 t 时刻支路 ij 允许通过的电流上限。

5) 根节点输出功率约束,即:

$$\begin{cases} P_{i,min}^{t,f} \leq P_i^{t,f} \leq P_{i,max}^{t,f} \\ Q_{i,min}^{t,f} \leq Q_i^{t,f} \leq Q_{i,max}^{t,f} \end{cases} \quad i \in B^f, \forall t \quad (37)$$

式中: $P_i^{t,f}$ 和 $Q_i^{t,f}$ 分别为 t 时刻根节点 i 的有功和无功出力; $P_{i,min}^{t,f}$ 和 $P_{i,max}^{t,f}$ 分别为 t 时刻根节点 i 有功出力的下限和上限; $Q_{i,min}^{t,f}$ 和 $Q_{i,max}^{t,f}$ 分别为 t 时刻根节点 i 无功出力的下限和上限。

6) DG出力模型。

对于DG的建模,本文考虑风电和光伏出力的特点不同,设置不同的出力上限来限制DG的出力,不考虑DG出力的不确定性,模型为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_i^{t,wind} \leq P_i^{t,windf} \\ P_i^{t,wind} = Q_i^{t,wind} \tan \omega \end{cases} \quad i \in B^{wind}, \forall t \quad (38)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_i^{t,pv} \leq P_i^{t,pvf} \\ P_i^{t,pv} = Q_i^{t,pv} \tan \varpi \end{cases} \quad i \in B^{pv}, \forall t \quad (39)$$

式中: $Q_i^{t,windf}$ 为 t 时刻风电接入节点 i 发出的无功功率; $Q_i^{t,pvf}$ 为 t 时刻光伏接入节点 i 发出的无功功率; ω 和 ϖ 分别为风电机组出力和光伏发电的功率因数角。

7) SOP模型。

SOP可优化线路潮流,提升电压水平。对SOP建模时主要考虑其有功功率约束和容量约束,由于约束中存在非线性部分,因此利用二阶锥松弛对其进行凸化处理。

(1) SOP传输有功功率约束,即:

$$P_i^{t,sop} + P_j^{t,sop} + P_i^{t,soploss} + P_j^{t,soploss} = 0 \quad (40)$$

$$P_i^{t,soploss} = \eta^{sop} \sqrt{(P_i^{t,sop})^2 + (Q_i^{t,sop})^2} \quad (41)$$

$$P_j^{t,soploss} = \eta^{sop} \sqrt{(P_j^{t,sop})^2 + (Q_j^{t,sop})^2} \quad (42)$$

式中: $P_i^{t,sop}$ 和 $Q_i^{t,sop}$ 分别为 t 时刻SOP接入节点注入的有功功率和无功功率; $P_i^{t,soploss}$ 和 $P_j^{t,soploss}$ 分别为 t 时刻SOP接入节点 i 和节点 j 两端的SOP换流器的运行损耗; η^{sop} 为换流器的损耗系数,为常数,本文取为0.02。

(2) SOP容量约束,即:

$$\sqrt{(P_i^{t,sop})^2 + (Q_i^{t,sop})^2} \leq S_i^{t,sop} \quad (43)$$

$$\sqrt{(P_j^{t,sop})^2 + (Q_j^{t,sop})^2} \leq S_j^{t,sop} \quad (44)$$

式中: $S_i^{t,sop}$ 和 $S_j^{t,sop}$ 分别为 t 时刻接在节点 i 和节点 j 两端的SOP换流器的容量。

将SOP约束式中的式(41)~(44)转化为二阶锥形式,即:

$$\| [P_i^{t,sop} \quad Q_i^{t,sop}]^T \|_2 \leq \frac{P_i^{t,soploss}}{\eta^{sop}} \quad (45)$$

$$\| [P_j^{t,sop} \quad Q_j^{t,sop}]^T \|_2 \leq \frac{P_j^{t,soploss}}{\eta^{sop}} \quad (46)$$

$$\| [P_i^{t,sop} \quad Q_i^{t,sop}]^T \|_2 \leq S_i^{t,sop} \quad (47)$$

$$\| [P_j^{t,sop} \quad Q_j^{t,sop}]^T \|_2 \leq S_j^{t,sop} \quad (48)$$

8) ESS模型。

ESS的设置可以起到平缓常规发电机出力以及提升风、光出力的作用,因此配电网中需加上ESS。但ESS需满足多时段的约束限制,ESS的存在会使DNR过程中存在时间上的耦合,约束如下。

(1) 充放电状态约束,即:

$$\mu_{j,dis}^t + \mu_{j,ch}^t \leq 1 \quad j \in B^{ess}, \forall t \quad (49)$$

式中: $\mu_{j,ch}^t$ 和 $\mu_{j,dis}^t$ 分别为节点 j 接入的ESS的充电状态和放电状态,是0-1变量; B^{ess} 为ESS接入的配电网节点集合。式(49)用于限制ESS不能处于既充电又放电的状态。

(2) 充放电功率约束,即:

$$\begin{cases} \mu_{j,ch}^t P_{ch,min}^t \leq P_{j,ch}^t \leq \mu_{j,ch}^t P_{ch,max}^t \\ \mu_{j,dis}^t P_{dis,min}^t \leq P_{j,dis}^t \leq \mu_{j,dis}^t P_{dis,max}^t \end{cases} \quad (50)$$

式中: $P_{ch,min}^t$ 和 $P_{ch,max}^t$ 分别为 t 时刻ESS充电功率的下限和上限; $P_{dis,min}^t$ 和 $P_{dis,max}^t$ 分别为 t 时刻ESS放电功率的下限和上限。

(3) ESS容量限制,即:

$$\begin{cases} E_{j,ESS}^{t+1} = (1-\tau)E_{j,ESS}^t + \alpha_{j,ch}^t P_{j,ch}^t - \alpha_{j,dis}^t P_{j,dis}^t \\ E_{j,ESS,min}^t \leq E_{j,ESS}^t \leq E_{j,ESS,max}^t \end{cases} \quad (51)$$

式中: $E_{j,ESS}^t$ 为 t 时刻节点 j 接入的ESS电量; τ 为单位时段内ESS的自放电系数; $\alpha_{j,ch}^t$ 和 $\alpha_{j,dis}^t$ 分别为 t 时刻节点 j 接入的ESS的充电和放电效率系数,且 $0 < \alpha_{j,ch}^t < 1$ 、 $\alpha_{j,dis}^t > 1$; $E_{j,ESS,max}^t$ 和 $E_{j,ESS,min}^t$ 分别为 t 时刻ESS容量的最大和最小值。

2.3 优化流程

本文的优化调度流程图如图 2 所示。

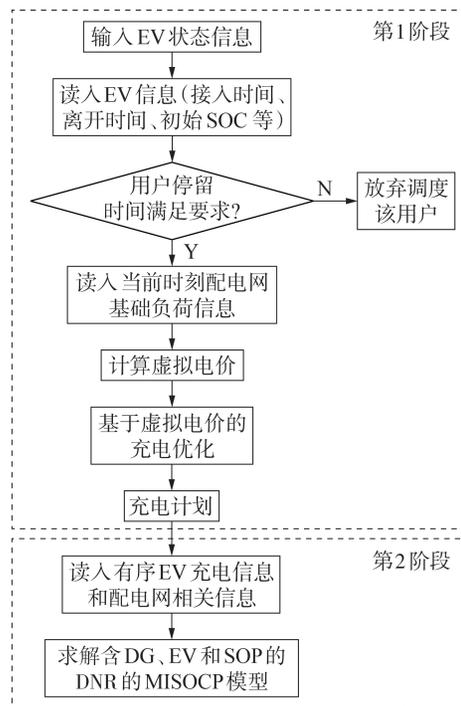


图 2 优化调度流程图

Fig.2 Flowchart of optimal scheduling

3 仿真和优化

3.1 EV 优化分析与负荷分配

设置配电网一天内服务的 EV 数量为 100 辆, EV 电池容量为 $30 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 额定充电功率为 10 kW , 充电效率为 0.9, EV 充电后离开的期望 SOC 均为 0.9。通过判定 EV 早晚出行到达目的地后的 SOC 是否满足下一次出行要求来确定 EV 是否需要充电。

附录 A 图 A1 为配电网基础负荷叠加无序 EV 充电负荷示意图。由图可以看出, 无序充电的 EV 车主充电习惯与生活用电习惯有重叠部分, 这造成配电网负荷峰值进一步提升, 出现“峰上加峰”的现象, 而通过与配电网负荷匹配的动态虚拟电价调度之后, 有序 EV 负荷接入配电网改变了高峰时段 EV 车主的充电习惯, 将高峰时段的负荷转移到了低谷时段, 起到了较好的填谷作用, 如附录 A 图 A2 配电网基础负荷叠加有序 EV 充电负荷示意图所示。

在提取出无序充电的 EV 负荷和有序充电的 EV 负荷数据后, 对配电网的区域划分进行改进, 将配电网分为商业区、办公区和住宅区。假设: 白天时, 80% 的 EV 车主出行到办公区, 15% 的 EV 车主出行到商业区, 5% 的 EV 车主留在住宅; 傍晚时, 95% 的 EV 车主回到住宅区, 5% 的 EV 车主留在办公区。无序充电的 EV 负荷和有序充电的 EV 负荷均按照该规律进行负荷分配。配电网的区域划分图如附录 B 图

B1 所示。

3.2 SOP 接入对配电网的影响

3.2.1 SOP 接入位置和接入数量分析

对于 DNR 模型, 本文通过二阶锥松弛将模型转化为可用求解器 CPLEX 求解的 MISOPC 问题。配电网的额定电压为 12.66 kV , 基准容量为 10 MW , 母线 0 为根节点, 电压为 1.00 p.u. , 为维持配电网的电压稳定, 设定电压最小值为 0.95 p.u. , 最大值为 1.05 p.u. 。在节点 19 和节点 32 接入 ESS。DNR 的目标函数中网损费用系数、开关动作费用系数、SOP 运行费用系数、弃风费用系数和弃光费用系数分别取为 $400 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})^{[20]}$ 、 $2 \text{ 元}/\text{次}^{[20]}$ 、 $400 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})^{[21]}$ 、 $400 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})^{[22]}$ 和 $400 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})^{[22]}$ 。在联络线支路涉及的节点接入容量为 1 MW 的 SOP。在节点 11 和节点 24 接入风电机组, 在节点 17 和节点 21 接入光伏电站, 所有 DG 均为恒功率因数发电, 功率因数为 0.95, DG 出力曲线如附录 C 图 C1 所示。

在无 EV 接入时, 设置如下 5 个场景来分析 SOP 对 DNR 的影响: 场景 1, 未接入 SOP 的 DNR; 场景 2, 线路 8-14 接入 SOP 的 DNR; 场景 3, 线路 11-21 接入 SOP 的 DNR; 场景 4, 线路 8-14 和线路 11-21 接入 SOP 的 DNR; 场景 5, 线路 8-14、线路 11-21 和线路 17-32 接入 SOP 的 DNR。DG 渗透率均为 40%。

各场景下的 DNR 运行费用如表 1 所示。由表可知: 渗透率为 40% 时 DG 可以被配电网完全消纳; 与场景 1 相比, 场景 2 的网损费用减少 23.46%, SOP 费用增加 24.63 元, 总费用减少 60.12 元; 场景 2 和场景 3 在不同位置接入单一 SOP 对配电网的运行经济性影响不同, 但是相较于场景 1, 接入 SOP 均会减少总费用和网损费用; 与场景 1 相比, 场景 4 的总费用减少 69.28 元, 网损费用减少 26.21%, 与场景 3 相比, 场景 4 的总费用减少 24.81 元, 网损费用减少 30.46 元; 与场景 4 相比, 虽然场景 5 的 SOP 运行费用增加 12.39 元, 但是网损费用减少 47.63 元, 总费用减少 35.24 元。

表 1 无 EV 接入场景下 DNR 运行费用

Table 1 DNR operation cost of scenarios without EVs

场景	总费用 / 元	网损费用 / 元	弃风、弃光费用 / 元	SOP 运行费用 / 元	开关动作费用 / 元
1	360.16	344.16	0	0	16
2	300.04	263.41	0	24.63	12
3	315.69	284.42	0	19.27	12
4	290.88	253.96	0	28.92	8
5	255.64	206.33	0	41.31	8

3.2.2 SOP 对 DNR 节点电压的影响

为更好地体现 SOP 维持电压的作用, 选用 19:00 时各节点的电压。附录 D 图 D1 为未接入 SOP 和接入单一 SOP 的节点电压图。由图可以看出, 接入

SOP时DNR的电压质量更好。

3.3 EV接入分析

3.3.1 EV接入下SOP的作用分析

为分析EV接入时SOP在有序和无序EV充电模式下的作用,设置以下5个场景:场景6,接入无序EV和不接入SOP的DNR;场景7,接入有序EV和不接入SOP的DNR;场景8,接入无序EV和线路7-20接入SOP的DNR;场景9,接入有序EV和线路7-20接入SOP的DNR;场景10,接入有序EV和线路7-20、11-21接入SOP的DNR。DG渗透率均为40%。

各场景下的DNR运行费用如表2所示。由表可知:在接入无序EV和有序EV时40%渗透率的DG仍可以完全被配电网消纳;未接入SOP时,对EV进行有序调度之后再将其接入配电网中,可以在一定程度上减少总费用;若再接入SOP,则会进一步减少总费用;配电网接入有序调度的EV之后,再在线路7-20、11-21接入SOP,会大幅减少网损费用,从而使总费用减少。

表2 有EV接入场景下的DNR运行费用

Table 2 DNR operation cost of scenarios with EVs

场景	总费用/ 元	网损费 用/元	弃风、弃光 费用/元	SOP运行 费用/元	开关动作 费用/元
6	391.20	375.20	0	0	16
7	389.62	373.62	0	0	16
8	345.39	290.40	0	42.99	12
9	342.86	291.91	0	42.95	8
10	316.52	247.97	0	56.55	12

3.3.2 EV和SOP接入下DG渗透率灵敏度分析

本节在线路8-14接入单一SOP和接入有序EV背景下进行算例仿真分析。表3为不同DG渗透率下的模型求解结果。

表3 不同DG渗透率下的模型求解结果

Table 3 Model solution results under different permeabilities of DG

渗透率/ %	总费用/ 元	网损费 用/元	弃风、弃光 费用/元	SOP运行 费用/元	开关动作 费用/元
20	480.63	441.76	0	22.87	16
40	324.34	286.13	0	26.21	12
60	220.99	191.95	0	17.04	12
80	473.54	305.62	134.59	21.33	12

由表3可知:DG渗透率为20%时,DNR总费用较高,这是由于此时虽然DG完全被配电网消纳,但是还需要较多变电站节点出力,因此网损费用较高;DG渗透率为40%和60%时,DG出力完全被配电网消纳,由于负荷较多地利用较近的DG出力,这使网损费用减少,从而使DNR总费用减少;DG渗透率提高到80%时,此时DG出力无法完全被配电网消纳,网损费用增加,同时产生弃风、弃光费用,导致配电网总费用增加。

4 结论

本文在风、光等新能源接入背景下,考虑负荷特性的不同,对EV充电负荷进行有序调度,以DNR总费用最小为目标函数,建立计及SOP和EV的配电网动态重构的二阶锥模型,通过算例分析得到以下结论。

1)EV车主的充电习惯与生活习惯息息相关,无序EV负荷接入配电网会使负荷“峰上加峰”。应用拉格朗日松弛分散式优化方法和虚拟电价可有效引导EV有序充电,提升错峰填谷的效果。

2)采用SOP代替配电网的传统开关,通过算例分析可知,SOP的接入可有效减少网损费用和配电网总费用以及提高节点电压水平。

3)通过比较SOP接入位置和接入数量的不同对配电网的影响发现,接入位置的不同对配电网运行费用的减少效果有所不同,但总趋势是减少配电网运行的总费用,同时多个位置接入SOP对配电网运行费用的减少效果更加明显。

4)同时考虑SOP和EV的有序调度,可降低配电网的运行费用,同时提高风、光能源的消纳率。

5)配电系统对新能源的消纳能力有一定限度。当新能源渗透率过高导致系统无法消纳时,不仅会产生弃风、弃光费用,还会加剧配电系统的负荷峰谷差,增加网损费用。

本文中尚未考虑EV充电站和SOP的选址与定容问题,后续笔者将对这2类问题进行进一步研究,使得配电网能够更有效地应对负荷侧和电源侧的波动。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘路宁,彭春华,温泽之,等. 基于配电网动态重构的分布式光伏消纳策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):56-62.
LIU Luning, PENG Chunhua, WEN Zezhi, et al. Distributed photovoltaic consumption strategy based on dynamic reconfiguration of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 56-62.
- [2] 李扬,韦钢,马钰,等. 含电动汽车和分布式电源的主动配电网动态重构[J]. 电力系统自动化,2018,42(5):102-110.
LI Yang, WEI Gang, MA Yu, et al. Dynamic reconfiguration of active distribution network considering electric vehicles and distributed generations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 102-110.
- [3] 高纯,于艾清,丁雨. 基于改进递归有序聚类的有源配电网多时段动态重构[J]. 电力自动化设备,2021,41(2):84-90.
GAO Chun, YU Aiqing, DING Yu. Multi-period dynamic reconfiguration of active distribution network based on improved recursive ordered clustering [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 84-90.
- [4] CAPITANESCU F, OCHOA L F, MARGOSSIAN H, et al. Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution

- systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 346-356.
- [5] LU X, CHAN K W, XIA S W, et al. An operation model for distribution companies using the flexibility of electric vehicle aggregators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1507-1518.
- [6] SUN Y Y, CHEN Z Q, LI Z Y, et al. EV charging schedule in coupled constrained networks of transportation and power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4706-4716.
- [7] 李洪美, 崔翰韬, 万秋兰. 考虑电动汽车充电策略的配网重构二阶锥规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4674-4681.
- LI Hongmei, CUI Hantao, WAN Qiulan. Distribution network reconfiguration based on second-order conic programming considering EV charging strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4674-4681.
- [8] 程杉, 王贤宁, 冯毅焜. 电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 39-46.
- CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 39-46.
- [9] 杨晓东, 张有兵, 翁国庆, 等. 基于虚拟电价的电动汽车充放电优化调度及其实现机制研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 52-62.
- YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, WENG Guoqing, et al. Virtual time-of-use tariffs based optimal scheduling and implementation mechanism of electric vehicles charging and discharging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 52-62.
- [10] 姚天宇, 李勇, 乔学博, 等. 计及安全边界和智能软开关协同配置的配电网分布式光伏准入容量优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 63-70.
- YAO Tianyu, LI Yong, QIAO Xuebo, et al. Hosting capacity optimization of distributed photovoltaic in distribution network considering security boundary and coordinate configuration of SOP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 63-70.
- [11] 王成山, 李鹏, 于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 13-21.
- WANG Chengshan, LI Peng, YU Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 13-21.
- [12] 章博, 刘晟源, 林振智, 等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 86-94.
- ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration with high penetration of renewable energy considering demand response and soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 86-94.
- [13] 宋毅, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4390-4398, 4639.
- SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4390-4398, 4639.
- [14] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2315-2321.
- WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. A hybrid optimization method for distribution network operation with SNOP and Tie switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2315-2321.
- [15] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 计及电动汽车充电模式的主动配电网多目标优化重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 1-9.
- ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Multi-objective optimization of active distribution network reconfiguration considering electric vehicle charging mode[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 1-9.
- [16] 张良, 严正, 冯冬涵, 等. 采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 967-973.
- ZHANG Liang, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Two-stage optimization model based coordinated charging for EV charging station[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 967-973.
- [17] 陶继平. 基于拉格朗日松弛法的调度算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- TAO Jiping. Research on scheduling algorithm based on Lagrangian relaxation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [18] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
- WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [19] 刘山林. 含分布式电源的配电网最优潮流研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
- LIU Shanlin. Research on optimal power flow of distribution network with distributed generation[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2019.
- [20] CHEN S H, HU W H, CHEN Z. Comprehensive cost minimization in distribution networks using segmented-time feeder reconfiguration and reactive power control of distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 983-993.
- [21] 宋关羽. 面向多运行场景的智能配电网软开关运行与规划方法[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- SONG Guanyu. Operation and planning method of soft open point for multiple scenarios in active distribution network[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [22] 汤翔鹰, 胡炎, 耿琪, 等. 考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 81-90.
- TANG Xiangying, HU Yan, GENG Qi, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering multi-energy flexibility[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 81-90.

作者简介:



林文键

林文键(1996—),男,硕士研究生,研究方向为配电网优化运行(**E-mail**:linwenjian168@icloud.com);

朱振山(1989—),男,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统运行与控制(**E-mail**:zhenshan198@126.com);

温步瀛(1967—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化运行(**E-mail**:524558261@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

(下转第 217 页 continued on page 217)

Optimization strategy of frequency regulation performance of load-side virtual synchronous machine for electric vehicle based on virtual resistance

RUI Yuechen, XIAO Guochun, HE Yurui, GAO Zipeng

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: LVSM (Load-side Virtual Synchronous Machine) technology enables EV (Electric Vehicle) charging piles and other loads to actively participate in grid frequency regulation, but in the EV two-stage charging structure, the characteristics of the post-stage DC/DC converter based on PI (Proportion Integration) control weaken the frequency regulation performance of LVSM. Therefore, a VR (Virtual Resistance) control strategy is proposed, which optimizes the frequency regulation performance of LVSM by reshaping the input impedance of the post-stage DC/DC converter as resistive, and the grid-load interaction ability of LVSM is fully utilized. The responses of grid frequency variation, DC-link voltage variation and charging current variation of each LVSM after load disturbance when using traditional PI control and the proposed VR control are theoretically compared. The results show that VR control can stabilize the grid frequency through charging current regulation process, without adversely affecting the stability of DC-link voltage of LVSM. Finally, the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the proposed control method are verified by simulation and experiment.

Key words: electric vehicles; load-side virtual synchronous machine; inertia; frequency regulation; virtual resistance

(上接第 209 页 continued from page 209)

Dynamic reconfiguration of distribution network with electric vehicles and soft open point

LIN Wenjian¹, ZHU Zhenshan^{1,2}, WEN Buying¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Province University Engineering Research Center of Smart Distribution Grid Equipment, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A reconfiguration strategy for distribution network with DG (Distributed Generation), SOP (Soft Open Point) and orderly access of EVs (Electric Vehicles) is proposed. The disordered charging model of EVs is simulated based on the travel habits of office workers, and the SOP model under the reconfiguration of distribution network is constructed. For the disordered charging load of the accessed EVs, Lagrange relaxation decentralized optimization algorithm and virtual electricity price are adopted for orderly scheduling of EVs. The minimum sum of network loss cost, SOP operation cost, curtailment cost of wind power and photovoltaic power and switch operation cost is taken as the objective function, the reconfiguration model of distribution network is converted to a mixed-integer second-order cone programming model by big-M method and the second-order cone relaxation, and CPLEX solver is adopted for solution. The simulative results of IEEE 33-bus standard system show that the operation economy of distribution network can be improved by using SOP instead of traditional switch in the dynamic reconfiguration of distribution network, and the voltage quality of distribution network can be improved by adopting the proposed orderly scheduling method for the optimization of EV charging.

Key words: distribution network reconfiguration; electric vehicles; soft open point; Lagrange relaxation decentralized optimization; virtual electricity price

附录 A

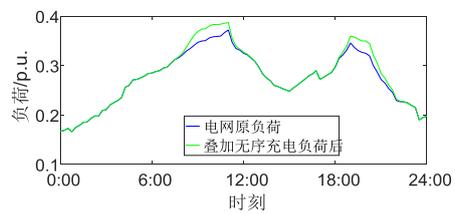


图 A1 配电网基荷叠加无序 EV 充电负荷示意图

Fig.A1 Schematic diagram of base charge of distribution network superimposed with disorderly EV charging load

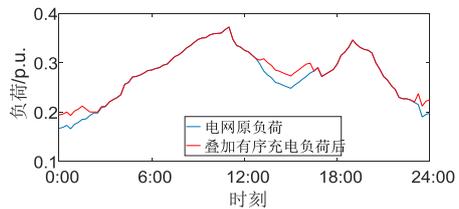


图 A2 配电网基荷叠加有序 EV 充电负荷示意图

Fig.A2 Schematic diagram of base charge of distribution network superimposed with orderly EV charging load

附录 B

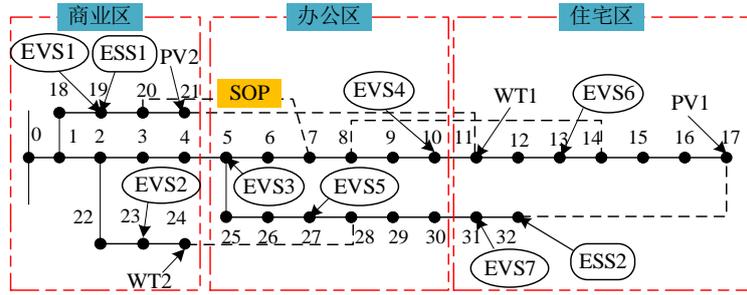


图 B1 配电网区域划分

Fig.B1 Area division of distribution network

附录 C

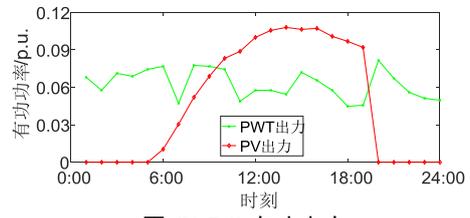


图 C1 DG 有功出力
Fig.C1 Active power of DG

附录 D

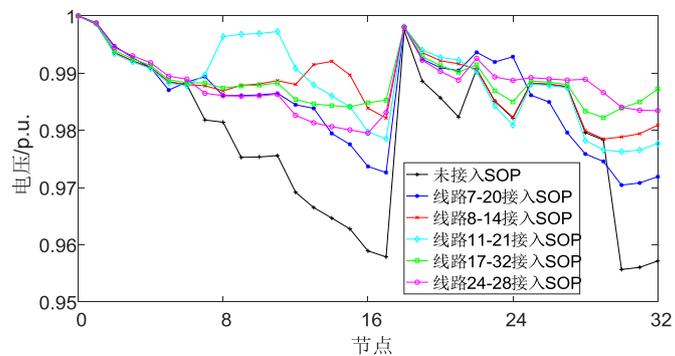


图 D1 SOP 对配电网节点电压的影响

Fig.D1 Influence of SOP on node voltage of distribution network