

含电动汽车的交直流混合微电网优化调度研究

任昊,邱晓燕,张志荣,孙旭,张明珂

(四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:随着电动汽车的发展,电网中存在大量的电动汽车充电负荷。交直流微电网因其独特的优势,更加便于交流慢充桩和直流快充桩的接入。但是大规模电动汽车并网会给电网带来冲击,危害电网安全运行。针对含电动汽车的交直流微电网的优化调度问题,计及电动汽车的移动储能特性,根据充电紧急度确定用户的充电方式,以用户侧成本、网损成本、弃风弃光成本和负荷波动成本最小为目标建立了模型。基于二阶锥松弛、绝对值线性化、乘积变量线性化等方法,进行求解。最后算例结果表明了该调度策略的有效性,可以满足电动汽车良好接入交直流微电网。

关键词:电动汽车;交直流微电网;有序充放电;线性化方法;优化调度

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23027

Study on Optimal Dispatching of AC/DC Hybrid Micro Grid with Electric Vehicle

REN Hao, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, SUN Xu, ZHANG Mingke

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: With the development of electric vehicle(EV), there are a large number of EV charging load in the power grid. Because of its unique advantages, AC/DC microgrid is more convenient for the access of AC slow charging pile and DC fast charging pile. However, large-scale EVs integration will bring impact to the power grid and endanger the safe operation of the power grid. Aiming at the optimal dispatching problem of AC/DC microgrid with EVs, taking into account the mobile energy storage characteristics of EV, the charging mode of users was determined according to the emergency degree of charging, the model was established with the minimum goal of user side cost, network loss cost, abandoned wind and light cost and load fluctuation cost. Based on the methods of second order cone relaxation, absolute linearization and linearization of product variables, the solution was presented. Finally, the results show that the dispatching strategy is effective and can satisfy the good access of EVs to AC/DC microgrid.

Key words: electric vehicle(EV); AC/DC microgrid; orderly charge and discharge; linear method; optimized scheduling

电动汽车(electric vehicle, EV)作为一种无污染的出行工具,因其以电能为动力,具有环保、低碳和可与电网互动(vehicle to grid, V2G)的特点吸引了各界的广泛关注^[1-2]。随着电动汽车数量的迅速增加,交直流微电网的出现有效地克服了传统的交流微电网存在的电网谐波、三相不平衡等局限性,便于整合不同类型的负荷,交流慢充桩和直流快充桩可以直接接入交流区域与直

流区域,减少中间变流器的损耗^[3]。然而,大规模电动汽车随机充电会对电力系统造成峰谷差增大、电能质量降低等影响。因此,研究交直流微电网中电动汽车的优化调度问题,对电动汽车合理选择充电桩类型、实现削峰填谷,有着重要的意义。

目前关于电动汽车与交直流微电网的研究已取得了一些成果,但对电动汽车在交直流微电

基金项目:四川省科技厅重点研发项目(2017FZ0103)

作者简介:任昊(1995—),男,硕士研究生,Email:1123639201@qq.com

通讯作者:邱晓燕(1964—),女,博士,教授,Email:scuqx@scu.edu.cn

网中调度问题的研究相对较少。文献[4]提出了一种基于模糊控制的电动汽车V2G策略,结果表明该策略可以为电动汽车选择合适的充电方式,避免无序充电造成的负荷尖峰。文献[5]基于数据挖掘的方法获得系统的特征指标,对充电设施进行了布置,并建立了两阶段优化模型。文献[6]建立了模拟快速充电站的双层动态队列模型,可以有效地引导用户进行充电站的选择。文献[7]建立了考虑分布式电源与电动汽车的分级优化调度模型,其仿真结果表明分级调度策略具有更好的经济性。文献[8]考虑了电动汽车有序充电对于拓展交直流微电网中分布式电源装机容量的影响,结果表明交直流微电网相对于交流微电网更具经济性。文献[9]给出了未来智慧城市中电动汽车的运营模式,表明电网与用户两方参与的运营模式更有利于电动汽车对社会的经济效益,是未来电动汽车运营模式的发展方向。文献[10]将电动汽车充电模式分为交流充电、直流充电和无线充电三种模式,提出了一种充电桩自适应管理策略。

电网的优化调度问题一般属于非线性非凸问题,并被证明是一个NP-hard问题,其中,NP指非确定性多项式(non-deterministic polynomials, NP)传统的优化算法不易求得最优解,且求解速度较慢。但是将非凸问题通过二阶锥松弛和线性化方法转化为凸问题再求解,可以有效地加快求解速度,且在松弛精确的情况下易得到最优解^[11]。文献[12]在实例中验证了二阶锥松弛与线性化技术的有效性,并与传统算法比较,证明了二阶锥模型的求解速度较快。

本文在上述研究的基础上,以分时电价引导电动汽车有序充放电,对电动汽车充电功率与充电地点进行优化,建立了交直流微电网优化调度模型,最后运用线性化方法与二阶锥松弛技术,将模型转化为混合整数二阶锥凸优化问题求解。算例结果表明,该调度策略可以充分发挥电动汽车的移动储能特性,使电动汽车良好入网。

1 电动汽车调度管理系统

基于电动汽车的发展趋势,本文做出如下假设:电动汽车用户与电网达成协议供电网调度,但电网公司要保证电动汽车用户充电成本最小,当微网内有功率缺额时,再从主网购电。充电桩实行变功率充电,电网根据电动汽车入网时的充

电紧急度来合理安排电动汽车的充电模式,将紧急度较高的电动汽车安排直流快充,充电桩数量能满足电动汽车需求,且充电结果满足其出行时的期望荷电状态(state of charge, SOC),调度策略流程图如图1所示。

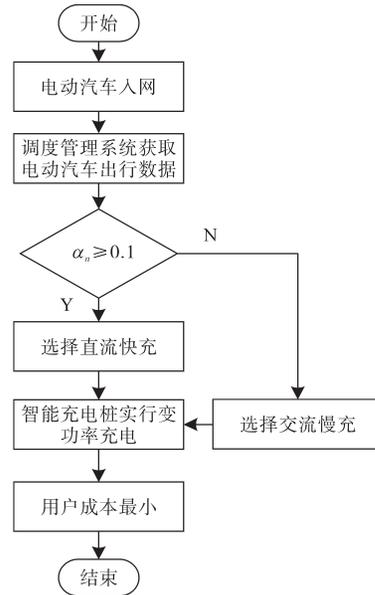


图1 EV调度策略流程图

Fig.1 Flow chart of dispatching strategy for EV

定义充电紧急度如下式所示:

$$\begin{cases} \alpha_n = \frac{T_{n,A}}{T_{n,w}} \\ T_{n,A} = \frac{(S_{n,e} - S_{n,b})Q_e}{P_{ch,max}^{EV,AC}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: α_n 为第 n 辆电动汽车的充电紧急度, $\alpha_n \geq 0.1$ 代表充电较紧急选择直流快充桩, $\alpha_n < 0.1$ 选择交流慢充桩; $T_{n,A}$ 为第 n 辆电动汽车以交流慢充最大功率至期望SOC的时长; $T_{n,w}$ 为第 n 辆电动汽车入网停留的时长; $P_{ch,max}^{EV,AC}$ 为交流慢充桩的充电功率的上限; $S_{n,b}$ 为第 n 辆电动汽车返回时刻的SOC; $S_{n,e}$ 为第 n 辆电动汽车的期望SOC; Q_e 为电池容量。

经数据统计,发现电动汽车的日出行时刻、日返回时刻满足标准正态分布;期望SOC、日行驶里程满足对数正态分布。

1)标准正态分布抽样函数:

$$f_s(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_s} \exp\left[-\frac{(x-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & 0 < x \leq \mu_s + 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_s} \exp\left[-\frac{(x-24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & \mu_s + 12 < x \leq 24 \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ_s 和 σ_s 分别为标准正态分布的均值和标准差。

2)对数正态分布抽样函数:

$$f_1(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] \quad (3)$$

式中: μ_1, σ_1 分别为对数正态分布的均值和标准差。

电动汽车返回时刻的SOC,由其日行驶里程决定:

$$S_{n,b} = S_{n,e} - \frac{w_{100}}{100} \cdot \frac{d_n}{Q_e} \quad (4)$$

式中: d_n 为第 n 辆电动汽车的日行驶里程; w_{100} 为电动汽车百公里耗电量。

采用蒙特卡洛抽样方法,由式(2)~式(4)可以得到电动汽车的出行模型。

2 含电动汽车的交直流微电网优化模型

2.1 目标函数

本文的优化调度模型,旨在充分协调电动汽车的移动储能特性,消纳新能源,减小运行成本,降低微电网损耗,目标函数如下式所示:

$$C_{\text{sum}} = \min(C_e + C_b + C_p + C_{\text{DG}} + C_{\text{loss}}) \quad (5)$$

式中: C_{sum} 为最小总成本; C_e 为充电成本; C_b 为电池折旧成本; C_p 为负荷波动惩罚成本; C_{DG} 为弃风弃光成本; C_{loss} 为网损成本。

1)用户总成本。用户总成本将直接影响到用户的可调度积极性,包括 C_e 和 C_b 两部分。

$$C_e = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N [(C_{t,\text{ch}}^{\text{EV}} P_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,AC}} - C_{t,\text{dis}}^{\text{EV}} P_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,AC}}) + (C_{t,\text{ch}}^{\text{EV}} P_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,DC}} - C_{t,\text{dis}}^{\text{EV}} P_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,DC}})] \Delta T \quad (6)$$

$$C_b = \lambda_{\text{EV}} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (P_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,AC}} + P_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,AC}} + P_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,DC}} + P_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,DC}}) \Delta T \quad (7)$$

式中: T 为调度周期; ΔT 为单位时长; N 为电动汽车总数量; $C_{t,\text{ch}}^{\text{EV}}, C_{t,\text{dis}}^{\text{EV}}$ 分别为 t 时段电动汽车充电电价与放电电价; $P_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,AC}}$ 为第 n 辆电动汽车 t 时段的交流慢充桩充电功率; $P_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,AC}}$ 为第 n 辆电动汽车 t 时段的交流慢充桩放电功率; $P_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,DC}}$ 为第 n 辆电动汽车 t 时段的直流快充桩充电功率; $P_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,DC}}$ 为第 n 辆电动汽车 t 时段的直流快充桩放电功率; λ_{EV} 为电池折旧成本系数。

2)负荷波动惩罚成本。当电动汽车响应分时电价进行有序充放电时,可能会由于电动汽车负荷数量巨大而产生峰谷倒置的现象。因此在

对电动汽车进行调度时,还应考虑负荷波动对微电网的影响。

$$C_p = \lambda_p (\Delta P_{\text{EV}} - \Delta P_L) \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta P_L = \sum_{t=1}^T |P_t^{\text{load}} - P_{\text{av}}| \\ \Delta P_{\text{EV}} = \sum_{t=1}^T |P_t^{\text{sum}} - P_{\text{av}}^{\text{EV}}| \end{cases} \quad (9)$$

式中: λ_p 为单位负荷波动惩罚费用; $\Delta P_{\text{EV}}, \Delta P_L$ 分别为调度后与调度前的功率负荷波动; P_t^{load} 为 t 时段的基础负荷功率; P_{av} 为基础负荷的平均值; P_t^{sum} 为调度之后 t 时段的总负荷; $P_{\text{av}}^{\text{EV}}$ 为调度后负荷的平均值。

3)弃风弃光成本:

$$C_{\text{DG}} = \lambda_D \sum_{t=1}^T \sum_{q=1}^{q_{\text{dc}}} (P_{q,t,\text{max}}^{\text{DG}} - P_{q,t}^{\text{DG}}) \Delta T \quad (10)$$

式中: λ_D 为单位弃风弃光成本; q_{dc} 为分布式电源的数量; $P_{q,t,\text{max}}^{\text{DG}}, P_{q,t}^{\text{DG}}$ 分别为分布式电源 q 在 t 时段的有功功率最大值和实际有功功率。

4)网损成本:

$$C_{\text{loss}} = \lambda_L \sum_{t=1}^T \left(\sum_{l \in L^{\text{AC}}} I_{l,t}^2 R_l + \sum_{l \in L^{\text{DC}}} I_{l,t}^2 R_l + \sum_{m=1}^{m_{\text{VSC}}} I_{m,t}^2 R_m \right) \Delta T \quad (11)$$

式中: λ_L 为单位网络损耗成本; $I_{l,t}, I_{m,t}$ 分别为 t 时段的线路 l 和第 m 个换流器的电流幅值; R_l, R_m 分别为线路 l 和换流器 m 的电阻; m_{VSC} 为换流器的数量; $L^{\text{AC}}, L^{\text{DC}}$ 分别为交流和直流支路的集合。

2.2 约束条件

2.2.1 电动汽车约束

1)电动汽车充放电状态约束。每辆电动汽车在同一时段仅能充电或放电,充放电状态约束如下式所示:

$$\begin{cases} \mu_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,AC}} + \mu_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,AC}} \leq y_n^{\text{AC}} \\ \mu_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,DC}} + \mu_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,DC}} \leq y_n^{\text{DC}} \end{cases} \quad t \in T^{\text{F}} \quad (12)$$

式中: $\mu_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,AC}}, \mu_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,AC}}$ 分别为第 n 辆电动汽车交流慢充的充、放电状态; $\mu_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,DC}}, \mu_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,DC}}$ 分别为第 n 辆电动汽车直流快充的充、放电状态; $y_n^{\text{AC}}, y_n^{\text{DC}}$ 分别为第 n 辆电动汽车充电方式,交流慢充时 $y_n^{\text{AC}}=1$,反之则 $y_n^{\text{DC}}=1$ (上述变量均为0-1变量); T^{F} 为电动汽车空闲时间的集合。

2)电动汽车功率约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,AC}} \leq \mu_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,AC}} P_{\text{ch,max}}^{\text{EV,AC}} \\ 0 \leq P_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,AC}} \leq \mu_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,AC}} P_{\text{dis,max}}^{\text{EV,AC}} \\ 0 \leq P_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,DC}} \leq \mu_{n,t,\text{ch}}^{\text{EV,DC}} P_{\text{ch,max}}^{\text{EV,DC}} \\ 0 \leq P_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,DC}} \leq \mu_{n,t,\text{dis}}^{\text{EV,DC}} P_{\text{dis,max}}^{\text{EV,DC}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{ch,max}^{EV,AC}$, $P_{dis,max}^{EV,AC}$ 分别为交流慢充桩充、放电功率的上限; $P_{ch,max}^{EV,DC}$, $P_{dis,max}^{EV,DC}$ 分别为直流快充桩充、放电功率的上限。

3) 直流充电桩爬坡功率约束:

$$-P_{sub}^{EV,DC} \leq P_{n,t}^{EV,DC} - P_{n,t+1}^{EV,DC} \leq P_{sub}^{EV,DC} \quad (14)$$

式中: $P_{sub}^{EV,DC}$ 为电动汽车直流快充爬坡功率限制。

4) 电动汽车充电地点约束:

$$\begin{cases} \sum_{q=1}^{q_{AC}} \gamma_{n,t,q}^{AC} = 1 \\ \sum_{q=1}^{q_{DC}} \gamma_{n,t,q}^{DC} = 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\gamma_{n,t,q}^{AC}$, $\gamma_{n,t,q}^{DC}$ 分别为第 n 辆电动汽车 t 时段选择第 q 个交流慢充或直流快充的状态变量, 均为 0-1 变量; q_{AC} , q_{DC} 分别为交流慢充站、直流快充站的数量。

5) 电动汽车 SOC 约束:

$$\begin{cases} S_{n,min} \leq S_{n,t} \leq S_{n,max} \\ S_{n,t} \geq S_{n,e} \\ S_{n,t+1} = S_{n,t} + P_{n,t}^{EV} \Delta T / Q_e \end{cases} \quad (16)$$

式中: $S_{n,min}$, $S_{n,max}$ 分别为第 n 辆电动汽车 SOC 的上下限, 取 $S_{n,min}$ 为 0.1, $S_{n,max}$ 为 1; $S_{n,t}$ 为第 n 辆电动汽车 t 时段初的 SOC; $P_{n,t}^{EV}$ 为第 n 辆电动汽车 t 时刻的实际功率, 充电为正, 放电为负; S_{n,t_s} , $S_{n,e}$ 分别为第 n 辆电动汽车出行时刻的 SOC 与期望 SOC。

2.2.2 交直流微电网约束

1) 电压源换流器 (voltage source converter, VSC) 约束

本文采用简化的稳态 VSC 潮流模型^[13], 其等效电路如图 2 所示。

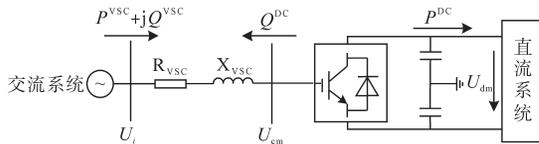


图2 VSC等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of VSC

在稳态运行时, VSC 两侧电压满足:

$$U_{cm} = \frac{\sqrt{2}}{2} \mu M_m U_{dm} \quad 0 \leq M_m \leq 1 \quad (17)$$

式中: U_{cm} , U_{dm} 分别为 VSC 内部电压与直流侧电压; μ 为直流电压利用率, 其值与调制方式有关,

在双极性调制时, $\mu = \frac{\sqrt{3}}{2}$; M_m 为调制深度。

对于 VSC 两侧电压标幺值与基准值有:

$$\begin{cases} U_{cm}^* = M^* U_{dm}^* \\ U_B^{AC} = \frac{\sqrt{2}}{2} \mu M_B U_B^{DC} \end{cases} \quad (18)$$

式中: 上标“*”为相应变量的标幺值; 下标“B”为相应变量的基准值; U_B^{AC} , U_B^{DC} 分别为交、直流侧的基准电压。

根据式(17)、式(18)可以得到:

$$U_{cm}^* \leq \frac{\sqrt{6} U_B^{DC}}{4 U_B^{AC}} U_{dm}^* \quad (19)$$

VSC 两侧的功率满足:

$$\begin{cases} P^{VSC} - I_{VSC}^2 R_{VSC} = P^{DC} \\ Q^{VSC} - I_{VSC}^2 X_{VSC} = -Q^{DC} \end{cases} \quad (20)$$

式中: P^{VSC} , Q^{VSC} 分别为 VSC 交流侧注入的有功功率和无功功率; P^{DC} 为 VSC 向直流侧传输的无功功率; I_{VSC} 为 VSC 支路的电流; R_{VSC} , X_{VSC} 分别为 VSC 支路的电阻与电抗; Q^{DC} 为 VSC 向交流侧发出的无功功率。

2) 支路潮流约束

本文采用辐射状电网稳态潮流模型——Distflow 潮流模型^[13], 如下式所示:

$$\begin{cases} \sum_{k \in A(j)} P_{jk} - \sum_{i \in \Omega(j)} (P_{ij} - I_{ij}^2 R_{ij}) = P_j \\ \sum_{k \in A(j)} Q_{jk} - \sum_{i \in \Omega(j)} (Q_{ij} - I_{ij}^2 X_{ij}) = Q_j \\ U_j^2 = U_i^2 - 2(P_{ij} R_{ij} + Q_{ij} X_{ij}) + I_{ij}^2 (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) \\ I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \end{cases} \quad (21)$$

$$P_j = P_j^{load} - P_j^{AC,DG} + \sum_{n=1}^{n_{AC}} \sum_{t=1}^T P_{n,t}^{EV,AC} \gamma_{n,t}^{AC} \quad \forall i, j \in N^{AC} \quad (22)$$

式中: $A(j)$ 为以节点 j 为起点的支路的终点的集合; $\Omega(j)$ 为以节点 j 为终点的支路的起点的集合; N^{AC} 为交流节点的集合; P_{ij} , Q_{ij} 分别为支路 ij 的首端有功、无功功率; P_{jk} , Q_{jk} 分别为支路 jk 的首端有功、无功功率; P_j , Q_j 分别为节点 j 有功功率与无功功率的净注入量; U_i , U_j 分别为节点 i, j 的电压; I_{ij} , R_{ij} , X_{ij} 分别为支路 ij 的电流、电阻、电抗; n_{AC} 为选择交流慢充的电动汽车数量。

对于直流支路同理, 仅不含无功和电抗, 本文不再赘述。

3) 主网传输功率约束

交直流微电网主网传输功率约束如下式所示:

$$\begin{cases} P_{min}^G \leq P_t^G \leq P_{max}^G \\ Q_{min}^G \leq Q_t^G \leq Q_{max}^G \end{cases} \quad (23)$$

式中: P_{max}^G , P_{min}^G 和 Q_{max}^G , Q_{min}^G 分别为主网发出的有功功率上、下限和无功功率上、下限。

4) VSC 功率约束

交直流微电网 VSC 功率约束如下式所示:

$$\begin{cases} -P_{\max}^{\text{VSC}} \leq P_t^{\text{VSC}} \leq P_{\max}^{\text{VSC}} \\ -Q_{\max}^{\text{VSC}} \leq Q_t^{\text{VSC}} \leq Q_{\max}^{\text{VSC}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{\max}^{\text{VSC}}, Q_{\max}^{\text{VSC}}$ 分别为 VSC 传输有功、无功功率的上限。

5) 分布式电源 (distributed generation, DG) 出力约束

交直流微电网 DG 出力约束如下式所示:

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{\text{AC,DG}} \leq P_{t,\max}^{\text{AC,DG}} \\ 0 \leq P_t^{\text{DC,DG}} \leq P_{t,\max}^{\text{DC,DG}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $P_{t,\max}^{\text{AC,DG}}, P_{t,\max}^{\text{DC,DG}}$ 分别为 t 时段交流 DG 和直流 DG 的出力上限。

6) 系统安全约束

系统安全约束主要包括节点电压约束和线路载流量约束,如下式所示:

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \\ (P_l^{\text{AC}})^2 + (Q_l^{\text{AC}})^2 \leq (S_{l,\max}^{\text{AC}})^2 \quad l \in L^{\text{AC}} \\ -P_{l,\max}^{\text{DC}} \leq P_l^{\text{DC}} \leq P_{l,\max}^{\text{DC}} \quad l \in L^{\text{DC}} \end{cases} \quad (26)$$

式中: U_{\max}, U_{\min} 为节点电压的上、下限; $S_{l,\max}^{\text{AC}}, P_{l,\max}^{\text{DC}}$ 分别为交流支路、直流支路的载流量限制。

3 二阶锥松弛与线性化方法

本文优化调度模型为非线性优化问题,需要通过多种线性化方法及二阶锥松弛,使其转化为混合整数二阶锥问题,便于求解。

3.1 含绝对值的目标函数线性化

本文的负荷波动惩罚函数中的 ΔP_{EV} 有绝对值项,为非线性项,不利于求解。可以引入中间变量 b_i 将其线性化,如下式所示:

$$\begin{cases} P_t^{\text{sum}} - P_{\text{av}}^{\text{EV}} \leq b_i \\ P_{\text{av}}^{\text{EV}} - P_t^{\text{sum}} \leq b_i \end{cases} \quad (27)$$

则式(8)可以转化为

$$C_p = \lambda_p \left(\sum_{i=1}^T b_i - \Delta P_L \right) \quad (28)$$

3.2 含平方项潮流约束二阶锥松弛

潮流平衡约束含有二次项,为非线性非凸问题,需要进行处理转化为凸问题。取中间变量代替电流与电压的平方项:

$$\begin{cases} \tilde{U} = U^2 \\ \tilde{I} = I^2 \end{cases} \quad (29)$$

对式(21)进行二阶锥松弛:

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{U}_{ij} \end{matrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{U}_{ij} \quad (30)$$

式中:上标“~”为中间变量。

3.3 载流量圆约束线性化

式(26)的交流载流量约束为一个圆,可以用一个多边形进行代替,近似精度与多边形的边成正比,本文用一个正八边形进行线性逼近,示意图如图3所示。

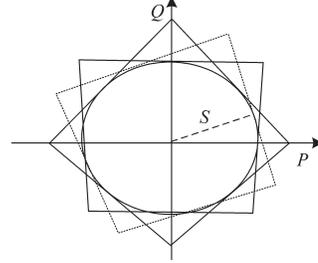


图3 圆约束线性化示意图

Fig.3 The schematic of circle constraint linearization

交流载流量约束方程如下:

$$\begin{cases} -S_{l,\max}^{\text{AC}} \leq P_l^{\text{AC}} \leq S_{l,\max}^{\text{AC}} \\ -S_{l,\max}^{\text{AC}} \leq Q_l^{\text{AC}} \leq S_{l,\max}^{\text{AC}} \\ -\sqrt{2} S_{l,\max}^{\text{AC}} \leq P_l^{\text{AC}} + Q_l^{\text{AC}} \leq \sqrt{2} S_{l,\max}^{\text{AC}} \\ -\sqrt{2} S_{l,\max}^{\text{AC}} \leq P_l^{\text{AC}} - Q_l^{\text{AC}} \leq \sqrt{2} S_{l,\max}^{\text{AC}} \end{cases} \quad (31)$$

3.4 乘积变量线性化

式(22)中 $P_{n,t,j}^{\text{EV,AC}} \gamma_{n,t,j}^{\text{AC}}$ 为0-1变量与连续变量乘积项,可以引入中间变量 $\tilde{y} = P^{\text{EV,AC}} \gamma^{\text{AC}}$ 采用下式将其线性化:

$$\begin{cases} \tilde{y} \leq P_{\max}^{\text{EV,AC}} \gamma^{\text{AC}} \\ \tilde{y} \leq P_{\max}^{\text{EV,AC}} \\ \tilde{y} \geq P^{\text{EV,AC}} - P_{\max}^{\text{EV,AC}} (1 - \gamma^{\text{AC}}) \\ 0 \leq \tilde{y} \leq P_{\max}^{\text{EV,AC}} \end{cases} \quad (32)$$

直流快充方式同理,本文不再赘述。

经过线性化与二阶锥松弛,本文的数学模型转化为混合整数二阶锥问题,可以通过调用商业求解器进行求解。

4 算例分析

本文的算例在 Matlab 2018b 进行仿真,通过 Yalmip 编写数学模型,调用 Gurobi 9.2 求解器求解,求解精度间隙为 0.1%。硬件环境为 AMD Ryzen 5 4600H CPU 3.00 GHz, 16 GB 内存。本文的算例系统采用由文献[14]改进的 IEEE 33 节点交直流混合微电网,如图4所示。分时电价见文献[15]。CS₁ 和 CS₂ 为交流慢充站,CS₃ 和 CS₄ 为直流快充站。光伏与风电出力最大值见文献[16]。节点1与主网相连,主网传输有功与无功上限分别为 6 MW 和 3 Mvar,电压标幺值区间为 [0.95, 1.05], 交流和

直流线路最大载流量分别为 $6 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 和 3 MW 。VSC电阻和电抗分别为 0.5Ω 和 1.5Ω ,传输有功和无功限制为 1.2 MW 和 1.2 Mvar 。直流快充桩的充电功率最大为 20 kW ,放电功率最大为 10 kW ,交流慢充桩的充电功率最大为 7 kW ,放电功率最大为 5 kW 。 λ_{EV} 取 $0.1 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, λ_{D} 取 $400 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})$, λ_{L} 取 $500 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})$, λ_{P} 取 $100 \text{ 元}/\text{MW}^{[13]}$ 。为方便计算, Q_e 取 $50 \text{ kW}\cdot\text{h}$, w_{100} 取 $30 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

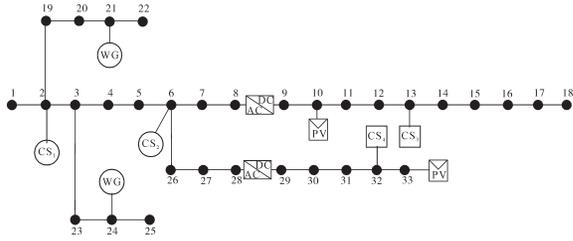


图4 改进的IEEE 33节点交直流微电网架构

Fig.4 Architecture of the modified IEEE 33-node AC/DCM

本文采用蒙特卡洛法抽取100辆电动汽车的出行数据,经过数据预处理后,93辆电动汽车数据为有效数据。

- 1) 日出行时刻按 $x \sim N(8.92, 3.24^2)$ 抽取。
- 2) 日返回时刻按 $x \sim N(17.47, 3.41^2)$ 抽取。
- 3) 日行驶里程按 $\ln x \sim N(3.2, 0.88^2)$ 抽取。
- 4) 日期望SOC按 $\ln x \sim N(0.8, 0.1^2)$ 抽取。

本文算例分为三个场景。

- 1) 场景1:电动汽车无序充电。
- 2) 场景2:电动汽车有序充电。
- 3) 场景3:电动汽车有序充放电。

表1为3个场景的成本费用对比。

表1 成本费用

Tab.1 Results of cost

场景	$C_c/\text{元}$	$C_b/\text{元}$	$C_{\text{DC}}/\text{元}$	$\Delta P_{\text{EV}}/\text{kW}$	$C_{\text{loss}}/\text{元}$
1	1 023	204	0	890	2 227
2	275	81	0	853	1 543
3	-924	595	0	697	1 110

经过充电紧急度的筛选有61辆电动汽车为交流慢充,32辆电动汽车为直流快充。由表1结果可知,电动汽车无序充电时的充电成本为1 023元,相比于电动汽车有序充电时,充电成本增加了为748元,电池损耗成本增加了123元。有序充电不仅可以减小充电成本,也可以延长电池的使用寿命,缓和负荷波动。对比场景2和场景3,虽然电动汽车V2G时,电池损耗成本较高,

相对于场景2增加了514元,但充电成本减少了1 199元,用户总成本减少了685元,网损成本比场景1和场景2分别降低了1 117元和433元,负荷波动相对于场景1和场景2也较为平缓。综上所述,电动汽车采用V2G策略更加有利于交直流微电网安全经济运行。

图5为不同场景调度结果对比图。

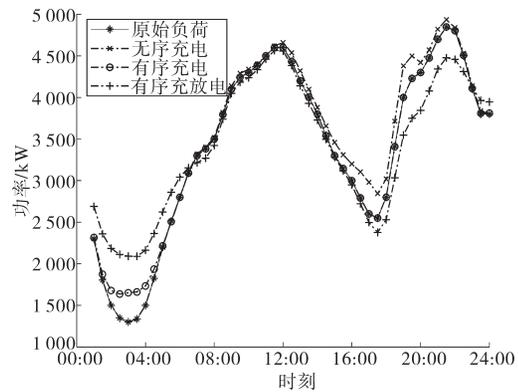


图5 不同场景调度结果对比

Fig.5 Comparison of different scene scheduling results

从图5可以看出,在18:00~22:00大部分电动汽车返程时间,若采用无序充电,则电动汽车到达充电站即开始充电,在返程高峰时刻大量电动汽车并网形成负荷高峰,不利于系统安全运行。若仅仅采用有序充电,在大量电动汽车负荷将会被引导在低谷时刻进行充电,起到了填谷的作用;若加入V2G策略,则电动汽车在电价高时进行放电,电价低时进行充电,充分发挥了移动储能的作用,既使用户获益,也减小了电网峰谷差。

图6为优化后VSC传输有功功率图。

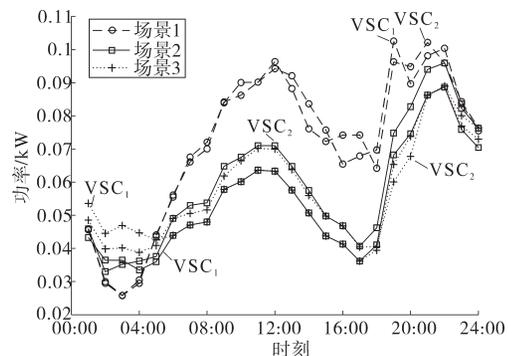


图6 优化后VSC传输有功功率

Fig.6 Active power transmission of VSC after optimization

由图6可以看出,由于直流区电动汽车响应分时电价,场景3相对于场景1和场景2,VSC传输的有功功率明显降低,VSC的传输功率更加平缓,换流器的损耗降低。

电动汽车在充电站的分配结果如图7所示。

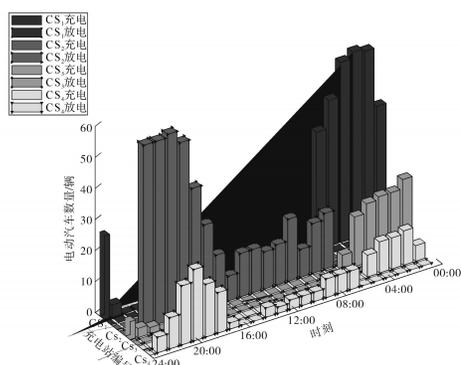


图7 电动汽车V2G地点分布

Fig.7 Distribution of EVs V2G locations

由图4和图7可以看出由于交流慢充站位于交流区域的主干支路,为了减少网络损耗,交流充电站的电动汽车优先在靠近主网的节点2充电,远离主网的节点6放电。直流充电站均在两条分支路,直流快充方式的电动汽车优先在重负荷节点放电,轻负荷节点充电。

定义二阶锥松弛误差为

$$\Delta_{ij,t}^{\text{diff}} = \left| P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 - \tilde{I}_{ij,t} \tilde{U}_{ij,t} \right| \quad (33)$$

图8为二阶锥松弛误差散点图。

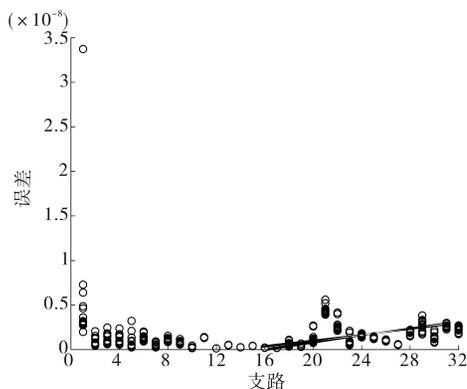


图8 二阶锥松弛误差散点图

Fig.8 Second order cone relaxation error scatter

由图8可以看出,进行二阶锥松弛后,整体精度在 10^{-8} 量级,满足松弛要求。

5 结论

电动汽车大规模发展,对电网来说是一把双刃剑。本文建立了计及电动汽车影响的交直流微电网优化调度模型,通过二阶锥松弛和线性化方法将其转化为商业求解器可以求解的凸模型,算例结果表明:

1) 本文的调度策略可以同时电动汽车的充电功率和充电地点进行优化;

2) 电动汽车作为移动储能可以使车主与电

网双方实现共赢,减小峰谷差,提高可再生能源消纳,降低网络损耗,提高交直流微电网运行的经济性;

3) 本文优化模型中并未考虑换流器的控制方式与路网耦合对优化调度的影响,将在以后进一步研究。

参考文献

- [1] 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与利用[J].中国电机工程学报,2012,32(4):1-10,25.
Hu Zechun, Song Yonghua, Xu Zhiwei, *et al.* Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10, 25.
- [2] Xiang Y, Liu J Y, Li R, *et al.* Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates[J]. Applied Energy, 2016, 178: 647-659.
- [3] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
Li Xialin, Guo Li, Wang Chengshan, *et al.* Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [4] 张怡冰,刘其辉,洪晨威,等.基于模糊控制的区域电动汽车入网充放电调度策略[J].电力自动化设备,2019,39(7):147-153.
Zhang Yibing, Liu Qihui, Hong Chenwei, *et al.* Charging and discharging dispatch strategy of regional V2G based on fuzzy control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 147-153.
- [5] 张程嘉,刘俊勇,向月,等.基于数据挖掘的电动汽车充电设施配置与两阶段充电优化调度[J].中国电机工程学报,2018,38(4):1054-1064,1282.
Zhang Chengjia, Liu Junyong, Xiang Yue, *et al.* Electric vehicle charging facilities planning and its two-stage optimal charging based on data mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1054-1064, 1282.
- [6] 邵尹池,穆云飞,林佳颖,等.“车一站一网”多元需求下的电动汽车快速充电引导策略[J].电力系统自动化,2019,43(18):60-68,101.
Shao Yinchu, Mu Yunfei, Lin Jiaying, *et al.* Fast charging guidance strategy for multiple demands of electric vehicle fast charging station and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 60-68, 101.
- [7] 侯慧,薛梦雅,陈国炎,等.计及电动汽车充放电的微电网多目标分级经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(17):55-67.
Hou Hui, Xue Mengya, Chen Guoyan, *et al.* Multi-objective hierarchical economic dispatch for microgrid considering charging and discharging of electric vehicles[J]. 2019, 43(17): 55-67.
- [8] 丁明,史盛亮,潘浩,等.含电动汽车充电负荷的交直流混合

微电网规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 32-38,81.
 Ding Ming, Shi Shengliang, Pan Hao, *et al.* Planning of AC/DC hybrid microgrid with integration of electric vehicles charging load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 32-38,81.

[9] 徐诗鸿, 张宏志, 石栋, 等. 面向智慧城市的快充负荷充电服务费制定策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3187-3201.
 Xu Shihong, Zhang Hongzhi, Shi Dong, *et al.* Setting strategy of charging service fee for fast charging load of smart cities[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3187-3201.

[10] Wu C X, Quan J, Ye M K. Research on an adaptive management model of AC charging piles in community[C]// 2019 34rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, 2019: 11-16.

[11] 林哲, 胡泽春, 宋永华. 最优潮流问题的凸松弛技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3717-3728.
 Lin Zhe, Hu Zechun, Song Yonghua. Convex relaxation for optimal power flow problem: a recent review[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3717-3728.

[12] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1645.
 Gao Hongjun, Liu Junyong, Shen Xiaodong, *et al.* Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1645.

[13] 马鑫, 郭瑞鹏, 王蕾, 等. 基于二阶锥规划的交直流主动配电网日前调度模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 144-153.
 Ma Xin, Guo Ruipeng, Wang Lei, *et al.* Day-ahead scheduling model for AC/DC active distribution network based on second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 144-153.

[14] 李笑竹, 王维庆, 王海云, 等. 虚拟电厂参与的交直流混合微网双层多目标鲁棒优化调度[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2350-2361.
 Li Xiaozhu, Wang Weiqing, Wang Haiyun, *et al.* Bi-level and multi-objective robust optimal dispatching of AC/DC hybrid microgrid with virtual power plant participation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2350-2361.

[15] 谈丽娟, 赵彩虹, 陈子奇, 等. 电动汽车与分布式电源的微网经济调度[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 100-105.
 Tan Lijuan, Zhao Caihong, Chen Ziqi, *et al.* Economical dispatch for microgrids of electric vehicles and distributed power[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 100-105.

[16] 邱晓燕, 赵劲帅, 史光耀, 等. 基于HSMOPSO算法的微电网经济与环保协同优化方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1223-1230.
 Qiu Xiaoyan, Zhao Jinshuai, Shi Guangyao, *et al.* Collaborative optimization method of economic and environment in microgrid based on HSMOPSO[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1223-1230.

收稿日期:2021-01-26

修改稿日期:2021-02-03



(上接第16页)

IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1271-1277.

[12] Li S L, Yang X, Yang D. Active disturbance rejection control for high pointing accuracy and rotation speed[J]. Automatica, 2009, 45(8): 1854-1860.

[13] Chang X Y, Li Y L, Zhang W Y, *et al.* Active disturbance rejection control for a flywheel energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 991-1001.

[14] Zheng Q, Dong L L, Lee D H, *et al.* Active disturbance rejection control for MEMS gyroscopes[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(6): 1432-1438.

[15] Madonski R, Kordasz M, Sauer P. Application of a disturbance-rejection controller for robotic-enhanced limb rehabilitation trainings[J]. Isa Transactions, 2014, 53(4): 899-908.

[16] 李霞, 陈奕梅. 四旋翼飞行器降阶自抗扰控制[J]. 光电与控制, 2019, 26(10): 43-48, 72.
 Li Xia, Chen Yimei. Reduced-order active disturbance rejection control for quad-rotor aircraft[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(10): 43-48, 72.

[17] Tian G, Gao Z. Frequency response analysis of active disturbance rejection based control system[C]//IEEE International Conference on Control Applications. 2007: 1595-1599.

收稿日期:2021-02-06

修改稿日期:2021-03-18