

基于多目标优化的电力-交通系统协同运行分析

吕思¹, 卫志农¹, 马骏超², 陈胜¹, 彭琰²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 211100;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江省杭州市 310014)

摘要: 电动汽车渗透率的日益提升显著增强了城市交通系统和电力系统的耦合程度。综合考虑电力-交通耦合系统的多主体特性以及在经济成本、碳排放量等多目标上的优化调度需求,提出一种基于多目标优化的电力-交通系统协同运行模型。首先,采用混合用户均衡模型和二阶锥DistFlow模型来描述交通流和电力流的分布情况;其次,建立了描述经济成本和碳排放量的函数模型,并根据不同的利益主体和调度目标分别建立了3组多目标优化调度模型;再次,结合增强epsilon约束法和若干线性化手段高效求解各多目标优化的帕累托前沿,提出了基于公平性的折中解获取方法以平衡各主体利益;最后,基于12节点环形交通网和IEEE 33节点配电网对各组多目标问题的调度结果进行了深入分析。

关键词: 电动汽车; 电力系统; 交通系统; 多目标优化; 帕累托前沿; 增强epsilon约束法

0 引言

加速推进能源供给侧的低碳化转型和能源消费侧的电能替代是助力中国实现“碳达峰、碳中和”目标的有效手段^[1]。在此背景下,以电动汽车(electric vehicle, EV)为核心的电气化交通的广泛普及将显著加深城市交通系统和电力系统的耦合程度^[2-3]。为了缓解EV充电对电力系统的负面影响,促进充电负荷与新能源出力相匹配,同时提高用户在交通系统中的通行效率,有必要考虑由高渗透率EV带来的两系统间的耦合特性,研究能源转型视角下的电力-交通系统协同运行^[4]。

针对耦合系统的协同调度问题,文献[5]通过调整路段通行费和分布式电源(distributed generator, DG)出力来实现耦合系统的社会成本最小;文献[6]以制定充电站服务费的方式来引导EV的充电选择,进而缓解交通阻塞并促进清洁能源消纳;文献[7-9]同时考虑路段通行费和充电服务费,通过对EV、燃油汽车(gasoline vehicle, GV)以及分布式电源的联合调控,实现耦合系统的运行成本最小;文献[10]利用动态价格同时调控交通系统中EV的时

空分布和电力系统中灵活性负荷的用能情况,进而消除两系统的网络阻塞;文献[11-12]研究了耦合系统在节点边际电价作用下所达到的动态均衡状态。

上述研究均是以系统经济成本或全社会经济成本为目标。然而,在能源转型背景下,两系统产生的碳排放成为社会成本中不可忽视的重要组成部分。一方面,碳排放来源于交通系统中GV的直接排放;另一方面,碳排放来源于EV充电以及常规用电负荷在电网电源侧产生的间接排放。值得一提的是,EV负荷与清洁能源出力的不匹配会造成电力系统碳排放量的增加,进而削弱交通电气化的减碳成效^[13]。为此,文献[14]在目标函数中纳入了电力系统碳排放成本,通过优化EV的行驶路径和充电地点来促进清洁能源消纳,实现两系统经济成本和电力系统碳排放成本的改善;文献[15]通过调控加氢站的服务费来引导氢燃料车的加氢选择,进而改善交通阻塞、电网经济成本和碳排放量,其中GV的单位碳排放量被设定为与行驶距离相关的恒定常数;进一步,文献[16]采用宏观排放模型来刻画交通阻塞对GV碳排放量的影响,提出差异化调控机制以实现耦合系统的低碳调度-经济调度。上述研究均以碳税的形式将碳排放量转化为经济成本统筹考虑。

然而,电力-交通耦合系统同时具有多主体特性和多目标需求。两系统的协同运行通常由系统主体(包括电力系统和交通系统)和用户主体(包括EV

收稿日期: 2021-12-31; 修回日期: 2022-04-27。

上网日期: 2022-05-18。

国家自然科学基金资助项目(U1966205);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B220203016);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX_220603)。

用户和GV用户)共同参与。当前研究仅涉及多个主体的整体成本^[5-10],同时将碳排放量通过碳税转化为经济成本^[14-16],进而以单目标优化的形式来建模和求解。然而,单目标优化难以兼顾系统优化过程中多项性能指标或多个主体利益之间的协调,无法体现各目标之间的关系进而为两系统协同运行提供有效指导^[17]。

为此,本文基于多目标优化来分析电力-交通耦合系统的协同运行。根据耦合系统中不同主体的利益以及不同的调度目标,将低碳调度-经济调度、电力系统最优调度-交通系统最优调度、系统最优调度-用户最优调度分别建模为3组多目标优化问题,采用增强 epsilon 约束法^[18-19]获取帕累托前沿,并提出考虑公平性的折中解获取方法。最后,基于12节点环形交通网和IEEE 33节点配电网对各组多目标问题的调度结果进行了深入分析。

1 电力-交通系统多目标协同运行分析框架

电力-交通耦合系统中多主体、多目标及其相互间的耦合关系如图1所示。其中,上层系统主体通过价格激励手段来调控用户的行驶/充电行为,以期达到理想的系统运行状态;下层用户主体基于价格信号和路网状况,以最小化各自的出行成本为目标来选择行驶路径和充电地点。

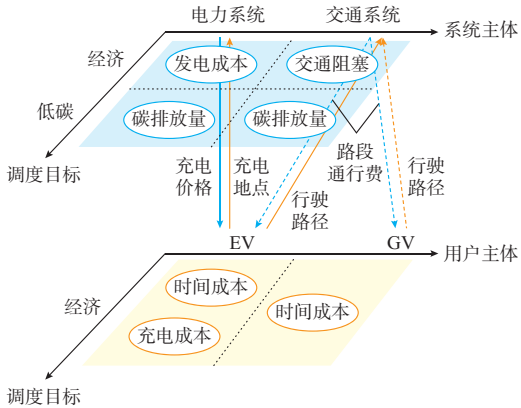


图1 电力-交通系统多目标、多主体协同分析框架
Fig. 1 Multi-objective and multi-stakeholder coordinated analysis framework of power-transportation system

根据不同主体的利益以及调度目标的不同侧重点,可以得到以下3组多目标优化问题:1)低碳调度-经济调度;2)电力系统最优调度-交通系统最优调度;3)系统最优调度-用户最优调度。其中,前两组多目标优化问题通常由系统主体内部进行考虑,其目的在于平衡电力系统和交通系统、经济成本和碳排放量之间的冲突性。基于各主体的理性假设,用户的出行成本通常不包括在系统主体的目标函数

中^[9]。第3组多目标优化问题通常由独立于系统主体和用户主体的非盈利实体(如市场监管机构)考虑,其目的在于平衡两主体运行目标的冲突性,在降低系统运行成本的同时保障出行用户的利益,实现整体社会效益的提升。

2 电力-交通系统协同运行模型

2.1 基于混合用户均衡的交通分配模型

交通网是由若干节点和路段构成的连通图,可以表示为 $G_T=(T_A, T_N)$ 。其中, T_N 表示节点集合,包括起始点、到达点和十字路口节点; T_A 表示路段集合,包括连接各节点的交通路段。采用 T_R 和 T_S 分别指代起始点 r 和到达点 s 的集合,交通网中不同起始-终点(origin-destination, OD)对的出行用户从起始点 r 出发前往终点 s ,每个OD对之间均由一组路径 K_{rs} 连接。为了方便对EV和GV的充电/行驶行为进行统一描述,本文将常规道路路段扩展为3类路段,即常规路段 T_A^{rg} 、充电路段 T_A^{ch} (表征EV的充电行为)和旁道路段 T_A^{by} (表征车辆路过充电站而不进行充电),该扩展方法已被广泛应用于电力-交通系统的协同分析中,详细模型可参考文献[5]。基于此,描述混合用户均衡的交通分配模型可叙述如下。

2.1.1 交通流量守恒约束

式(1)、式(2)描述了出行需求与路径流量的关系;式(3)、式(4)描述了路段流量与路径流量的关系。

$$\pi^g q_{rs} = \sum_{k \in K_{rs}^g} f_{k,rs}^g \quad (1)$$

$$\pi^e q_{rs} = \sum_{k \in K_{rs}^e} f_{k,rs}^e \quad (2)$$

$$x_a^g = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^g} f_{k,rs}^g \delta_{a,k,rs}^g + \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^e} f_{k,rs}^e \delta_{a,k,rs}^e \quad a \in T_A^{rg} \quad (3)$$

$$x_a^e = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^e} f_{k,rs}^e \delta_{a,k,rs}^e \quad a \in T_A^{ch} \quad (4)$$

式中: q_{rs} 为OD对 $r-s$ 之间的总体出行需求; π^g 和 π^e 分别为GV和EV的渗透率; K_{rs}^g 和 K_{rs}^e 分别为 $r-s$ 之间GV和EV的路径集合; $f_{k,rs}^g$ 和 $f_{k,rs}^e$ 分别为选择路径 k 的GV和EV车流量; x_a^g 为常规路段 $a \in T_A^{rg}$ 上的车流量; x_a^e 为虚拟路段 $a \in T_A^{ch}$ 上的EV流量,即前往相应充电站充电的EV数量; $\delta_{a,k,rs}^g$ 、 $\delta_{a,k,rs}^e$ 用于表征路段与路径的耦合关系,若路段 a 属于路径 k 则取1,反之取0。

2.1.2 行驶/充电时间

对于常规路段 $a \in T_A^{rg}$,采用BPR函数^[20]来描述路段通行时间 t_a^{rg} 与车流量 x_a^g 的关系:

$$t_a^{\text{rg}} = t_a^0 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_a^{\text{rg}}}{c_a^{\text{rg}}} \right)^4 \right] \quad a \in T_A^{\text{rg}} \quad (5)$$

式中: t_a^0 为常规路段的自由通行时间; c_a^{rg} 为路段容量, 通常设为 $t_a^{\text{rg}} = 1.15t_a^0$ 时的路段流量。

采用 $M/M/c/K$ 模型来描述 EV 在充电站的排队时间, 则 EV 在充电站 $a \in T_A^{\text{ch}}$ 中停留的总时长 t_a^{ch} 可以表示为^[21]:

$$t_a^{\text{ch}} = \frac{E}{p} + t_a^{\max} \left(\frac{x_a^e}{c_a^{\text{ch}}} \right)^3 \quad x_a^e \leq c_a^{\text{ch}}, a \in T_A^{\text{ch}} \quad (6)$$

式中: E 和 p 分别为单台 EV 的充电需求和充电功率, 进而 E/p 表示 EV 的充电时长; t_a^{\max} 为充电站满载时的排队时间; c_a^{ch} 为充电站能够同时服务的最大 EV 数量。

2.1.3 出行成本

用户的整体出行成本是其所经路段的通行成本之和, 主要包括时间成本、充电成本以及对系统运营商价格调控的响应成本。将 GV 和 EV 的出行成本 $c_{k,rs}^g$ 、 $c_{k,rs}^e$ 分别定义如下:

$$c_{k,rs}^g = \sum_a (\omega t_a^{\text{rg}} + \theta_a^{\text{rg}}) \delta_{a,k,rs}^g \quad (7)$$

$$c_{k,rs}^e = \sum_{a \in T_A^{\text{rg}}} (\omega t_a^{\text{rg}} + \theta_a^{\text{rg}}) \delta_{a,k,rs}^g + \sum_{a \in T_A^{\text{ch}}} (\omega t_a^{\text{ch}} + \lambda E + \theta_a^{\text{ch}}) \delta_{a,k,rs}^e \quad (8)$$

式中: ω 和 λ 分别为出行用户的单位时间成本和充电站基准电价; θ_a^{rg} 和 θ_a^{ch} 分别为系统运营商施加于交通路段和充电站的路段通行费用和充电服务费用。

2.1.4 混合用户均衡条件

假设出行用户在选择出行路径时, 均以最小化自身的行驶成本为目标, 那么交通流分布最终将达到一个稳定的用户均衡 (user equilibrium, UE) 状态, 以至于所有用户均无法通过调整自身的路径选择来降低其出行成本^[18]。该均衡状态的数学表述如下:

$$0 \leq f_{k,rs}^g \perp c_{k,rs}^g - u_{rs}^g \geq 0 \quad (9)$$

$$0 \leq f_{k,rs}^e \perp c_{k,rs}^e - u_{rs}^e \geq 0 \quad (10)$$

式中: u_{rs}^g 和 u_{rs}^e 分别为 OD 对 r - s 之间的 GV 和 EV 的最小行驶成本。

2.2 基于二阶锥松弛的电力系统支路潮流模型

本文采用二阶锥 (second-order cone, SOC) 形式的 DistFlow 模型来描述电力系统中的潮流分布情况。其中, 式(11)、式(12)表示节点功率守恒; 式(13)定义了线路电压与电流的关系; 式(14)表示二阶锥松弛; 式(15)对节点电压、电流幅值的平方施加上下限约束; 式(16)表示电源有功、无功出力的上下

限。具体形式如下:

$$P_{ij}^1 + p_j^{\text{gen}} - r_{ij}^1 i_{ij}^1 = \sum_{h \in H(j)} P_{jh}^1 + p_j^d \quad (11)$$

$$Q_{ij}^1 + q_j^{\text{gen}} - x_{ij}^1 i_{ij}^1 = \sum_{h \in H(j)} Q_{jh}^1 + q_j^d \quad (12)$$

$$U_j = U_i - 2(r_{ij}^1 P_{ij}^1 + x_{ij}^1 Q_{ij}^1) + (z_{ij}^1)^2 i_{ij}^1 \quad (13)$$

$$i_{ij}^1 \geq \frac{(P_{ij}^1)^2 + (Q_{ij}^1)^2}{U_i} \quad (14)$$

$$\begin{cases} i_{ij}^1 \leq \bar{i}_{ij} \\ U_i \leq U_i \leq \bar{U}_i \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} p_i^{\text{gen}} \leq p_j^{\text{gen}} \leq \bar{p}_i^{\text{gen}} \\ q_i^{\text{gen}} \leq q_j^{\text{gen}} \leq \bar{q}_i^{\text{gen}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_{ij}^1 和 Q_{ij}^1 分别为流经线路 ij 的有功和无功功率; $H(j)$ 为与节点 j 相连的子节点集合; p_j^{gen} 和 q_j^{gen} 分别为位于节点 j 的发电机发出的有功和无功率; p_j^d 和 q_j^d 分别为位于节点 j 的有功和无功负荷, 其中 $p_j^d = p_j^{\text{reg}} + \sum_{a \in C(j)} x_a^e E$, p_j^{reg} 为该节点的常规用电负荷,

$C(j)$ 为与该节点相连的充电站集合; z_{ij}^1 、 r_{ij}^1 和 x_{ij}^1 分别为线路 ij 的阻抗、电阻和电抗; U_i 和 i_{ij}^1 分别为节点 i 电压幅值的平方和支路 ij 电流的平方; \bar{i}_{ij} 为支路 ij 电流平方的上限; \underline{U}_i 和 \bar{U}_i 分别为节点 i 电压幅值平方的下限和上限; $\underline{p}_i^{\text{gen}}$ 、 \bar{p}_i^{gen} 和 $\underline{q}_i^{\text{gen}}$ 、 \bar{q}_i^{gen} 分别为节点 i 处发电机的有功和无功出力的下限、上限。

3 多目标优化调度建模及求解

3.1 多目标优化模型

首先, 对交通系统和电力系统中的碳排放量和运行成本进行建模; 然后, 根据不同主体来定义相应的多目标优化问题。

3.1.1 碳排放量建模

本文采用以下宏观碳排放模型来描述路段通行时间与单位碳排放量的关系^[22]:

$$\phi_a^{\text{emi,rg}} = 0.2038 t_a^{\text{rg}} e^{0.7962 \frac{t_a^{\text{rg}}}{t_a^0}} \quad a \in T_A^{\text{rg}} \quad (17)$$

式中: $\phi_a^{\text{emi,rg}}$ 为常规路段 a 中由 GV 直接产生的碳排放量, 其与路段阻塞程度直接相关; t_a^{rg} 为路段 a 的长度。

进一步, 将路段碳排放量 $\phi_a^{\text{emi,rg}}$ 乘以相应路段的 GV 流量和路段通行时间 (转化为小时) 并进行累加, 便可以得到交通系统的碳排放量 $\psi_{\text{TN}}^{\text{emi}}$:

$$\psi_{\text{TN}}^{\text{emi}} = \sum_{a \in T_A^{\text{rg}}} \frac{\phi_a^{\text{emi,rg}} t_a^{\text{rg}} \left(\sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^g} f_{k,rs}^g \delta_{a,k,rs}^g \right)}{60} \quad (18)$$

电力系统中的碳排放主要由常规机组在发电过程中产生。本文假设常规机组的单位碳排放量与其发电量呈线性关系^[14],得到电力系统碳排放量 $\psi_{\text{PDN}}^{\text{emi}}$ 如下:

$$\psi_{\text{PDN}}^{\text{emi}} = \sum_{i \in G} \mu_i^{\text{CO}_2} p_i^{\text{gen}} + \sum_{h \in H(0)} \mu_0^{\text{CO}_2} p_{0h}^1 \quad (19)$$

式中: p_{0h}^1 为主网购电量; $\mu_i^{\text{CO}_2}$ 和 $\mu_0^{\text{CO}_2}$ 分别为分布式电源*i*和主网的碳排放系数,即单位发电量/购电量所产生的碳排放量; G 为分布式电源集合; $H(0)$ 为与根节点相连的子节点集合。

3.1.2 经济成本建模

交通系统的经济成本 $\psi_{\text{TN}}^{\text{eco}}$ 主要由交通流的整体时间成本来体现,可以表示为:

$$\psi_{\text{TN}}^{\text{eco}} = \omega \left(\sum_{a \in T_a^{\text{rg}}} x_a^{\text{rg}} t_a^{\text{rg}} + \sum_{a \in T_a^{\text{ch}}} x_a^{\text{ch}} t_a^{\text{ch}} \right) \quad (20)$$

电力系统的经济成本 $\psi_{\text{PDN}}^{\text{eco}}$ 主要包括发电成本和从主网购电的成本:

$$\psi_{\text{PDN}}^{\text{eco}} = \sum_{i \in G} b_i p_i^{\text{gen}} + \rho \sum_{h \in H(0)} p_{0h}^1 \quad (21)$$

式中: b_i 为各机组的单位发电成本; ρ 为主网购电费用。

3.1.3 多目标优化建模

结合上述碳排放量和经济成本的定义,可以建立以下3组多目标函数组合:

1)M1(低碳调度-经济调度):

$$\begin{cases} \min F_{\text{emi}} = \psi_{\text{TN}}^{\text{emi}} + \psi_{\text{PDN}}^{\text{emi}} \\ \min F_{\text{eco}} = \psi_{\text{TN}}^{\text{eco}} + \psi_{\text{PDN}}^{\text{eco}} \end{cases} \quad (22)$$

2)M2(电力系统最优调度-交通系统最优调度):

$$\begin{cases} \min F_{\text{TN}} = \nu \psi_{\text{TN}}^{\text{emi}} + \psi_{\text{TN}}^{\text{eco}} \\ \min F_{\text{PDN}} = \nu \psi_{\text{PDN}}^{\text{emi}} + \psi_{\text{PDN}}^{\text{eco}} \end{cases} \quad (23)$$

3)M3(系统最优调度-用户最优调度):

$$\begin{cases} \min F_{\text{sys}} = \nu(\psi_{\text{TN}}^{\text{emi}} + \psi_{\text{PDN}}^{\text{emi}}) + \psi_{\text{TN}}^{\text{eco}} + \psi_{\text{PDN}}^{\text{eco}} \\ \min F_{\text{user}} = \sum_{rs} (u_{rs}^e \pi^e q_{rs} + u_{rs}^g \pi^g q_{rs}) \end{cases} \quad (24)$$

上述多目标优化问题的约束条件为:

$$\begin{cases} \text{式(1)一式(16)} \\ \underline{\theta}^{\text{rg}} \leq \theta_a^{\text{rg}} \leq \bar{\theta}^{\text{rg}}, \underline{\theta}^{\text{ch}} \leq \theta_a^{\text{ch}} \leq \bar{\theta}^{\text{ch}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: F_{emi} 和 F_{eco} 分别为耦合系统的总碳排放量和总经济成本; F_{TN} 和 F_{PDN} 分别为交通系统和电力系统的运行成本; F_{sys} 为两系统的整体运行成本; F_{user} 为用户的整体出行成本; $\bar{\theta}^{\text{rg}}$ 、 $\underline{\theta}^{\text{rg}}$ 和 $\bar{\theta}^{\text{ch}}$ 、 $\underline{\theta}^{\text{ch}}$ 分别为路段通行费和充电服务费的上、下限; ν 为碳税。

鉴于低碳目标-经济目标的冲突性可以由M1

建模和分析,本文在定义M2、M3中各主体的目标函数时统一将碳排放量通过碳税转化为经济成本,将多主体各自的低碳调度-经济调度问题建模为单目标优化,以便于直观地分析不同主体之间的利益冲突。 F_{user} 的详细推导过程如下:

$$\begin{aligned} F_{\text{user}} &= \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^g} c_{k,rs}^g f_{k,rs}^g + \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^e} c_{k,rs}^e f_{k,rs}^e = \\ &= \sum_{rs} u_{rs}^g \sum_{k \in K_{rs}^g} f_{k,rs}^g + \sum_{rs} u_{rs}^e \sum_{k \in K_{rs}^e} f_{k,rs}^e = \\ &= \sum_{rs} u_{rs}^g \pi^g q_{rs} + \sum_{rs} u_{rs}^e \pi^e q_{rs} \end{aligned} \quad (26)$$

3.2 增强 epsilon 约束法

本文采用增强 epsilon 约束法来求解上述多目标优化问题。其基本思想类似于传统 epsilon 约束法,即选取主要目标函数进行单目标优化,同时引入 epsilon 参数将其他目标函数(次要目标函数)放入约束条件中,通过逐步减小 epsilon 值来获取原多目标优化问题的帕累托前沿。为了避免传统方法存在的弱有效解问题,增强 epsilon 约束法通过引入松弛变量将与次要目标函数相关的不等式约束转化为等式约束,并将缩放后的松弛变量加入目标函数中,进而确保所得解的有效性^[18]。以M1为例,将其转化为式(27)所示单目标优化问题 M_1^{eps} 。这里,将 F_{emi} 作为主要目标并将 F_{eco} 放入约束中,将次要目标函数 F_{eco} 的取值区间等分为 N^{eps} 段,使 ϵ 遍历每一个数值并求解相应的 M_1^{eps} ,最终得到一组帕累托解集。显然, N^{eps} 越大,对帕累托前沿的拟合越准确,但是会显著增加计算时间,因此,通常基于对精度和效率的权衡来选取 N^{eps} 。

$$\begin{cases} \min \left(F_{\text{emi}} - \zeta \frac{s^{\text{eps}}}{w^{\text{eps}}} \right) \\ \text{s.t. 式(1)一式(16)} \\ \underline{\theta}^{\text{rg}} \leq \theta^{\text{rg}} \leq \bar{\theta}^{\text{rg}}, \underline{\theta}^{\text{ch}} \leq \theta^{\text{ch}} \leq \bar{\theta}^{\text{ch}} \\ F_{\text{eco}} + s^{\text{eps}} = \epsilon \quad s^{\text{eps}} > 0 \\ \epsilon = \overline{F_{\text{eco}}} - \kappa \frac{w^{\text{eps}}}{N^{\text{eps}}} \quad \kappa \in \{1, 2, \dots, N^{\text{eps}}\} \end{cases} \quad (27)$$

式中: s^{eps} 为引入的辅助变量; w^{eps} 为次要目标函数的上限 $\overline{F_{\text{eco}}}$ 和下限 $\underline{F_{\text{eco}}}$ 之差,即 $w^{\text{eps}} = \overline{F_{\text{eco}}} - \underline{F_{\text{eco}}}$,用于对松弛变量进行缩放; ζ 为权重系数,通常取为 $10^{-6} \sim 10^{-3}$; κ 为分段数目的索引; ϵ 为表征 epsilon 约束的辅助参数。

3.3 模型线性化

为了提高每个单目标优化问题的求解效率,本文采用一系列线性化手段,将非线性模型转化为混合整数二阶锥模型。具体而言,对于较为复杂的高

次非线性项 ψ_{TN}^{emi} , 首先引入辅助变量 χ_a^{rg} 和 $\tilde{\chi}_a^{rg}$, 得到

$$\psi_{TN}^{emi} = \sum_{a \in T_a^{rg}} \frac{0.2038\chi_a^{rg}}{60} \quad (28)$$

$$\chi_a^{rg} = \tilde{\chi}_a^{rg} (t_a^{rg})^2 e^{0.7962 \frac{t_a^{rg}}{t_a^{rg}}} \quad (29)$$

$$\tilde{\chi}_a^{rg} = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^g} f_{k,rs}^g \delta_{a,k,rs}^g \quad (30)$$

进一步, 对式(29)两边进行对数变换, 同时引入极小正数 ν 来避免奇异, 得到以下非线性约束:

$$\ln(\chi_a^{rg}) = \ln(\tilde{\chi}_a^{rg} + \nu) + 2\ln(t_a^{rg}) + 0.7962 \frac{t_a^{rg}}{t_a^{rg}} \quad (31)$$

最后, 采用分段线性化方法对模型中余下的常规非线性项(对数函数项、幂函数项、反比例函数项)进行线性近似。对于非线性互补约束(式(9)、式(10)), 采用 Big-M 法^[23] 将其转化为一组线性约束, 此处不再赘述。

3.4 考虑公平性的折中解获取方法

本文以确保各目标公平性为原则从帕累托前沿中选取折中解, 其基本思路如图2所示。图中, f_1^{max} 、 f_1^{min} 和 f_2^{max} 、 f_2^{min} 分别为各目标函数的最大、最小值; 横轴和纵轴上的数值是各目标函数相对于理想点处目标函数值(即最小值)的倍数。在此基础上, 通过计算并比较各候选运行点相对于理想点在不同目标方向上的增量(已归一化), 将增量比接近于1的运行点作为公平折中解。由于理想点是各自目标独立优化时所能达到的最优解, 基于该原则获取的折中点能够确保各个目标(主体)所作出的妥协是接近的。

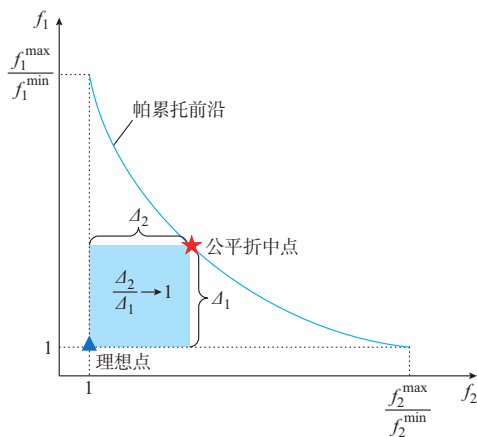


图2 考虑公平性的折中解
Fig. 2 Compromise solution considering fairness

对于包含3个目标的多目标优化问题, 公平折中点处应该确保两两目标(主体)之间皆公平, 即3组增量比均接近于1。因此, 所选择的公平折中点应该满足: $\Delta_2/\Delta_1 + \Delta_3/\Delta_1 + \Delta_3/\Delta_2 \rightarrow 3$, 其中, Δ_1 、

Δ_2 、 Δ_3 分别为各组目标函数相对于理想点的增量, 且上述增量比均取其假分数形式(即大于或等于1)。

4 算例分析

4.1 算例描述

为了确保电力-交通系统在空间上相匹配, 本文效仿文献[24], 采用12节点环形城域交通网^[5]和两组IEEE 33节点配电网^[25]来构造电力-交通耦合系统, 其网络拓扑结构和耦合关系如图3所示, 具体参数设置见附录A。本文所有仿真均基于GAMS平台, 通过调用Gurobi求解器获取每个单目标优化问题的最优解。

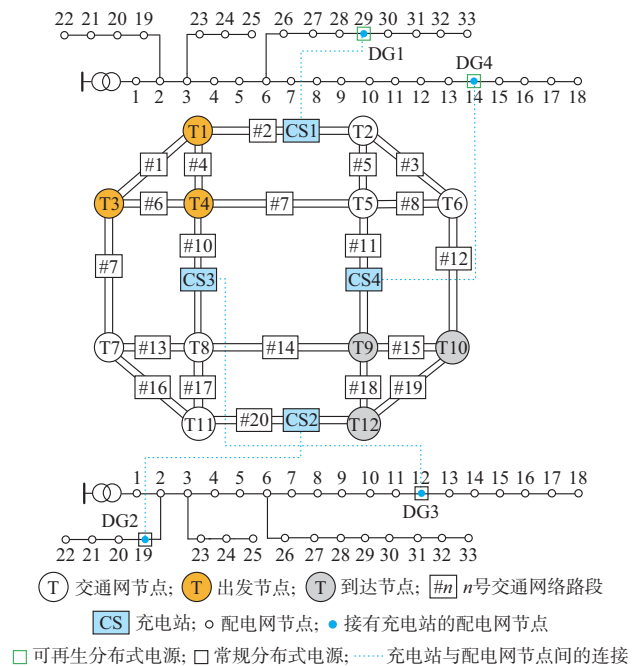


图3 电力-交通耦合系统
Fig. 3 Coupled power-transportation system

考虑到EV充电负荷和可再生能源出力具有较强的随机性和波动性, 本文根据二者不同的匹配程度构建以下3个典型场景:

场景1(源荷匹配): 清洁能源满发(0.02 p.u.), 单车EV充电需求为10 kW·h;

场景2(清洁能源过剩): 清洁能源满发(0.02 p.u.), 单车EV充电需求为5 kW·h;

场景3(清洁能源不足): 清洁能源出力较低(0.005 p.u.), 单车EV充电需求为10 kW·h。

4.2 多目标优化调度结果分析

4.2.1 低碳目标-经济目标

图4所示为不同场景下低碳调度-经济调度的帕累托前沿。由于同一目标函数在不同场景下的数

值存在较大差异,此处统一对其进行了归一化处理(下文同)。

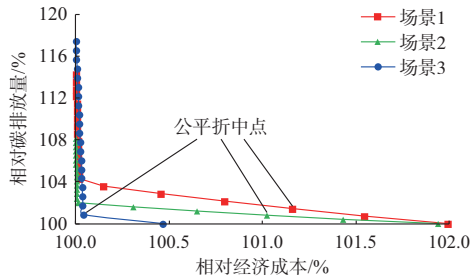


图4 不同场景下的帕累托前沿及公平折中解(低碳调度-经济调度)

Fig. 4 Pareto frontier and fair compromise solution in different scenarios (emission dispatch-economic dispatch)

由图4可知,不同场景下低碳目标-经济目标的冲突性有显著差异,该冲突性可以由总相对偏移量来刻画,即帕累托前沿两端相对于理想点的偏移量之和。本算例3个场景中的总相对偏移量分别为16.3%、10.1%和17.9%。由此可见,清洁能源出力及其与EV充电负荷的匹配程度是影响低碳目标-经济目标冲突性的关键因素。进一步,图5、图6分别展示了不同调度目标下的EV分布和分布式电源出力情况。此外,图5还展示了在系统主体不进行价格干预时的EV分布情况,其对应于各出行用户根据路网状况和充电站排队情况自行选择路径所达到的UE状态。

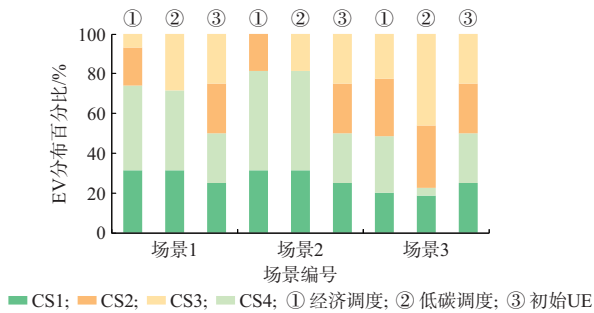


图5 不同场景下的EV分布(低碳调度-经济调度)
Fig. 5 Distribution of EV in different scenarios (emission dispatch-economic dispatch)

可知,初始UE状态难以满足两系统的经济运行和碳减排要求,因此,两系统均通过价格干预来调控EV用户的充电选择。在充分利用清洁能源的基础上,充电站CS3(CS2)凭借相应机组较低的单位碳排放强度(单位发电成本)在低碳(经济)调度中接纳了更多的充电负荷。值得注意的是,场景2中过剩的清洁能源未被充分利用,因为调度更多EV前往充电站CS1和CS4充电会加重相应路段的阻塞程度和延长站内排队时长,进而造成更大的经

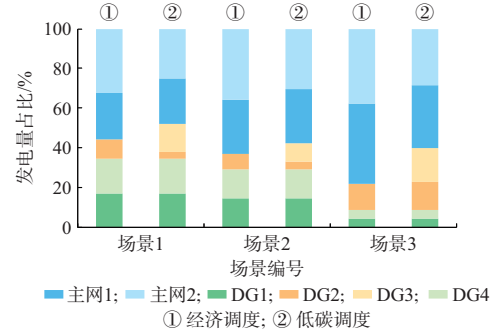


图6 不同场景下的分布式电源出力 and 主网购电占比(低碳调度-经济调度)

Fig. 6 Percentage of DG output and purchased power from main grid in different scenarios (emission dispatch-economic dispatch)

济损失和更多的交通侧碳排放量。在场景3的低碳调度中,分布式电源DG4满发的清洁能源由常规用电负荷消纳,而相应EV被调度至CS3充电,进而避免像经济调度一样由主网直接向CS4所在馈线的常规负荷供电,此举有效降低了碳排放量,也体现了EV的空间灵活性对碳减排的作用。在折中解处,考虑到两目标的公平性,相应调度结果位于上述两种调度模式之间,且与低碳调度结果更为接近。

4.2.2 电网运行成本-交通网运行成本

在当前耦合关系下,各场景中两网的运行成本均同时达到了最优,两目标具有较强的一致性。为了探求影响两目标冲突性的因素,将CS1和CS3在电网中的连接位置互换,以分析清洁能源电站的地理位置对两网运行冲突性的影响。附录B图B1所示为新耦合场景下由两网运行成本构成的帕累托前沿,相应的EV分布情况如图7所示。

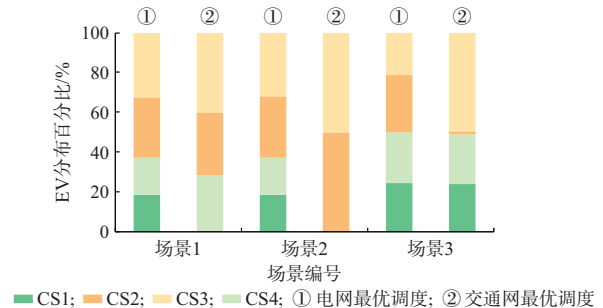


图7 不同场景下的EV分布(交通系统最优调度与电力系统最优调度)
Fig. 7 Distribution of EV in different scenarios (optimal dispatch of transportation system and optimal dispatch of power system)

显然,新耦合场景下两目标具有显著的冲突,且与清洁能源出力及其和EV负荷的匹配程度呈正相关。以场景2为例,在初始UE状态,大部分GV会选择路段容量较大的外环行驶。因此,在仅考虑交

电网运行成本时,会调度62.5%的EV前往内环充电站充电,进而缓解外环交通网的阻塞情况,降低外环GV因交通阻塞而产生的额外碳排放量和时间成本;在仅考虑电网运行成本时,会尽量调度EV前往由清洁能源供电的充电站充电,而此举加剧了CS3和CS4站内和相应路段的阻塞程度,增加了交通网的运行成本。由此可见,电网运行成本的改善主要源于EV与清洁能源的最佳匹配,而交通网运行成本的改善主要源于对车辆行驶路径的引导,通过降低路段阻塞程度来减少GV的碳排放量、提高通行效率。EV最优行驶路径与最优充电地点的不匹配会造成两目标的冲突。当清洁能源充足时,由上述不匹配所造成的两网运行目标的冲突会显著加深(各场景下的总相对偏移量分别为7.5%、12.6%、3.5%)。

4.2.3 系统成本-用户成本

附录B图B2所示为由系统成本和用户成本构成的帕累托前沿。3个场景中的总相对偏移量分别为1.8%、3.4%和1.1%,说明两目标之间的冲突随着清洁能源出力及其与EV负荷匹配程度的增加而增强。进一步,图8、图9分别展示了不同调度目标下的EV分布和用户出行成本。

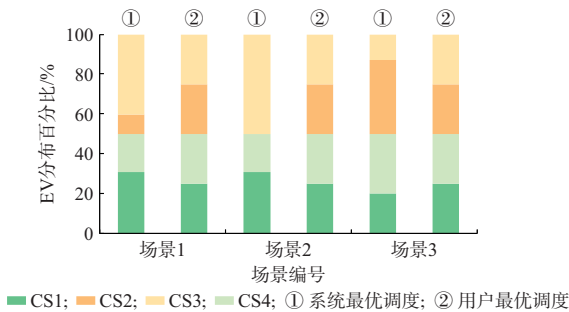


图8 不同场景下的EV分布 (系统最优调度与用户最优调度)

Fig. 8 Distribution of EV in different scenarios (optimal dispatch of system and optimal dispatch of users)

可以发现,在考虑系统运行成本时,仅有50%左右的EV被调度至清洁能源电站CS1和CS4充电,这也侧面证实了经济成本与碳排放量的冲突性。另一方面,系统运营商通过价格激励来调控用户的行驶/充电行为,使得各个OD对间EV用户的出行成本均高于用户最优调度状态的成本,其差值也与两目标的冲突性呈正相关。相比之下,GV用户的个体目标与系统主体目标的冲突相对较小。为了确保系统运行成本最低,出行用户的总体成本在各场景中分别增加了近136、295、206美元,但系统成本仅下降44、33、10美元。显然,此举不利于促进用户积极响应系统运营商的价格调控,且有损整体

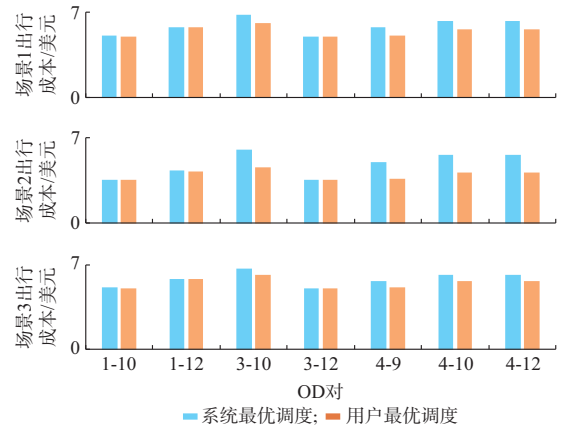


图9 各场景下不同OD对的EV用户出行成本 (系统最优调度与用户最优调度)

Fig. 9 EV user travel costs from different OD pairs in each scenario (optimal dispatch of system and optimal dispatch of users)

社会效益和公平性。因此,3个场景中的公平折中解均与用户最优调度的结果更为接近。

4.3 增强epsilon约束法效果分析

本节以低碳调度-经济调度(模型M1)为例来说明增强epsilon约束法相较于传统epsilon约束法^[26]的优越性。附录B图B3所示为场景1中采用不同方法得到的帕累托解集。可以发现,传统epsilon约束法得到的解集中包含了一组受支配解(弱有效解),相比于非支配解,其在相似经济成本下的碳排放量更高,因此不属于帕累托前沿,该结果也验证了增强epsilon约束法在获取有效解上的优势。进一步,附录B图B4展示了不同 N^{eps} 取值下增强epsilon约束法所获取的帕累托解的数量和分布,其相应的计算时间分别为16、25、33、39 min。显然,帕累托解的数量和求解时间均与次要目标函数的分段数成正比,更细致的分段有利于更准确地拟合帕累托前沿的形态,进而便于决策者根据不同工况做出非劣决策。

5 结语

本文综合考虑电力-交通耦合系统的多主体特性和多目标调度需求,提出了电力-交通系统多目标优化调度模型。算例测试结果验证了低碳与经济、系统主体与用户主体、电力系统与交通系统之间调度目标的冲突性。其中,低碳目标与经济目标的冲突主要源于电力系统中发电机组经济参数与碳排放量的不匹配,以及由低碳机组供电的充电站位置与交通系统路段容量的不匹配,后者同样引发了电力系统与交通系统运行目标的冲突;系统成本与用户成本的冲突主要源于个体目标(个体经济性最优)与

整体目标(整体经济和碳排放最优)的不一致。上述不匹配所造成的各组目标的冲突程度均与清洁能源出力与EV负荷的匹配程度相关。基于公平性的折中解获取机制能够有效缓解各目标的冲突。此外,上述冲突也强调了从规划层面(路段容量、充电站位置、清洁能源匹配等)来缓解各主体之间运行目标冲突的必要性。

后续工作将以本文模型和框架为基础,进一步考虑交通流的动态特性、用户行为和分布式电源出力的随机性,以及EV电池容量对充电需求的影响等,以增强模型的实用性和结论的可靠性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

- [1] 侯金鸣,孙蔚,肖晋宇,等.电力系统关键技术进步与低碳转型的协同优化[J].电力系统自动化:1-12[2022-04-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211130.2354.007.html>.
- HOU Jinming, SUN Wei, XIAO Jinyu, et al. Collaborative optimization of key technology progress and low carbon transition of power system[J]. Automation of Electric Power Systems: 1-12[2022-04-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211130.2354.007.html>.
- [2] 崔岩,胡泽春,段小宇.考虑充电需求空间灵活性的电动汽车运行优化研究综述[J].电网技术,2022,46(3):981-994.
- CUI Yan, HU Zechun, DUAN Xiaoyu. Review on the electric vehicles operation optimization considering the spatial flexibility of electric vehicles charging demands [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 981-994.
- [3] 何正友,向悦萍,廖凯,等.能源-交通-信息三网融合发展的需求、形态及关键技术[J].电力系统自动化,2021,45(16):73-86.
- HE Zhengyou, XIANG Yueping, LIAO Kai, et al. Demand, form and key technologies of integrated development of energy-transport-information networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 73-86.
- [4] 杨天宇,郭庆来,盛裕杰,等.系统互联视角下的城域电力-交通融合网络协同[J].电力系统自动化,2020,44(11):1-9.
- YANG Tianyu, GUO Qinglai, SHENG Yujie, et al. Coordination of urban integrated electric power and traffic network from perspective of system interconnection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 1-9.
- [5] WEI W, WU L, WANG J H, et al. Network equilibrium of coupled transportation and power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6764-6779.
- [6] QIAN T, SHAO C C, LI X L, et al. Enhanced coordinated operations of electric power and transportation networks via EV charging services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3019-3030.
- [7] HE F, YIN Y F, WANG J H, et al. Sustainability SI: optimal prices of electricity at public charging stations for plug-in electric vehicles[J]. Networks and Spatial Economics, 2016, 16(1): 131-154.
- [8] ZHOU Z, ZHANG X, GUO Q L, et al. Integrated pricing framework for optimal power and semi-dynamic traffic flow problem [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(18): 3636-3643.
- [9] SHENG Y J, GUO Q L, CHEN F, et al. Coordinated pricing of coupled urban power-traffic networks: the value of information sharing[J]. Applied Energy, 2021, 301: 117428.
- [10] LV S, WEI Z N, CHEN S, et al. Integrated demand response for congestion alleviation in coupled power and transportation networks[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116206.
- [11] 谢仕炜,胡志坚,王珏莹.考虑时-空耦合的城市电力-交通网络动态流量均衡[J].中国电机工程学报,2021,41(24):8408-8424.
- XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying. Dynamic flow equilibrium of urban power and transportation networks considering the coupling in time and space [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8408-8424.
- [12] 谢仕炜,林伟伟,张亚超.基于变分不等式理论的电力-交通耦合网络均衡状态研究[J/OL].中国电机工程学报:1-19[2022-04-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211105.1110.010.html>.
- XIE Shiwei, LIN Weiwei, ZHANG Yachao. Research on coupled power-transportation network equilibrium state based on a unified variational inequality theory [J]. Proceedings of the CSEE: 1-19 [2022-04-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211105.1110.010.html>.
- [13] HUBER J, LOHMANN K, SCHMIDT M, et al. Carbon efficient smart charging using forecasts of marginal emission factors[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284: 124766.
- [14] ZHANG H C, HU Z C, SONG Y H. Power and transport nexus: routing electric vehicles to promote renewable power integration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3291-3301.
- [15] SUN G Z, LI G Y, LI P P, et al. Coordinated operation of hydrogen-integrated urban transportation and power distribution networks considering fuel cell electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2652-2665.
- [16] LV S, CHEN S, WEI Z N, et al. Power-transportation coordination: toward a hybrid economic-emission dispatch model [J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems[2022-04-27]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9628048/>.
- [17] 陈聪,沈欣炜,夏天,等.计及烟效率的综合能源系统多目标优化调度方法[J].电力系统自动化,2019,43(12):60-67.
- CHEN Cong, SHEN Xinwei, XIA Tian, et al. Multi-objective optimal dispatch method for integrated energy system considering exergy efficiency [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 60-67.
- [18] MAVROTAS G. Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems [J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 213(2): 455-465.
- [19] 王珂,王芑,许苑,等.考虑风电消纳能力的电-气集成系统多目

- 标运行优化[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 105-116.
- WANG Ke, WANG Peng, XU Yuan, et al. Multi-objective operation optimization for integrated electricity and gas systems considering the accommodation capability of wind power [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(6): 105-116.
- [20] 陈旭, 陆丽丽, 曹祖平, 等. 道路阻抗函数研究综述[J]. 交通运输研究, 2020, 6(2): 30-39.
- CHEN Xu, LU Lili, CAO Zuping, et al. Review of studies on road impedance functions[J]. Transport Research, 2020, 6(2): 30-39.
- [21] LIU Y, WANG Y, LI Y Z, et al. Multi-agent based optimal scheduling and trading for multi-microgrids integrated with urban transportation networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2197-2210.
- [22] YIN Y F, LAWPHONGPANICH S. Internalizing emission externality on road networks[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2006, 11(4): 292-301.
- [23] 刘健辰, 刘山林. 基于二阶锥松弛和 Big-M 法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2604-2611.
- LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal distributed generation allocation in distribution network based on second order conic relaxation and Big-M method [J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2604-2611.
- [24] CUI Y, HU Z C, DUAN X Y. Optimal pricing of public electric vehicle charging stations considering operations of coupled transportation and power systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3278-3288.
- [25] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.
- [26] 郑能, 丁晓群, 郑程拓, 等. 含高比例光伏的配电网有功-无功功率多目标协调优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 33-39.
- ZHENG Neng, DING Xiaoqun, ZHENG Chengtuo, et al. Multi-objective coordinated optimization of active and reactive power for distribution network integrated with high proportion of photovoltaic generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 33-39.

吕 思(1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力-交通系统协同运行。E-mail: woailanjust@163.com

卫志农(1962—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统运行。E-mail: wzn_nj@263.net

马骏超(1989—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 新能源涉网与综合能源调控技术。E-mail: mjc_zju@sina.com

(编辑 章黎)

Analysis on Coordinated Power-Transportation System Operation Based on Multi-objective Optimization

LYU Si¹, WEI Zhinong¹, MA Junchao², CHEN Sheng¹, PENG Yan²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: The increasing penetration of electric vehicles has significantly strengthened the coupling between urban transportation systems and power systems. Comprehensively considering the multi-stakeholder characteristics of the coupled power-transportation system and the optimal dispatch requirements on multiple objectives such as economic costs and carbon emissions, a coordinated operation model of the power-transportation system based on multi-objective optimization is proposed. Firstly, the mixed user equilibrium model and the second-order cone DistFlow model are adopted to describe the distribution of traffic flow and power flow. Secondly, the function models describing economic costs and carbon emissions are established, and three groups of multi-objective optimal dispatch models are established according to different stakeholders and dispatch objectives. Thirdly, the enhanced epsilon-constrained method combined with several linearization methods is adopted to efficiently derive the Pareto frontier of each multi-objective optimization. A method for capturing a fair compromise solution is proposed to balance the interest of each stakeholder. Finally, based on a 12-bus ring transportation network and a modified IEEE 33-bus distribution network, the dispatch results of each group of multi-objective problems are thoroughly analyzed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1966205), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. B220203016) and Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No. KYCX_220603).

Key words: electric vehicle; power system; transportation system; multi-objective optimization; Pareto frontier; enhanced epsilon-constrained method

