

# 储能式充电桩参与电网需求侧响应联合运行优化

徐睿<sup>1</sup>, 肖监<sup>1</sup>, 范伟<sup>1</sup>, 慈松<sup>2</sup>, 丛中笑<sup>1</sup>, 李鹏程<sup>1</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司, 贵州 贵阳 550002;

2. 清华大学, 北京 100084)

**摘要:** 储能式充电桩参与电网的联合运行, 不但能够减小电网扩容成本, 还可以获得参与电网需求侧响应辅助管理服务收益, 从而降低充电桩运营成本。为探究需求侧响应中实时定价激励对储能式充电桩经济效益的影响, 本文进行储能式充电桩参与电网需求侧响应的联合运行优化能量调度研究。通过考虑电网需求响应实时电价, 建立以储能式充电桩参与需求侧响应的经济效益函数模型; 以实现经济效益函数最大化为目标, 建立以储能式充电桩电量和容量约束的充电桩的电网联合运行优化模型; 为应用对偶分解方法, 将优化模型转化为典型凸优化问题, 从而求得储能式充电桩最优能量调度。基于储能式充电桩实际运行电量、容量和经济性参数进行仿真, 仿真结果表明所提出的方法能够实现较快收敛, 并且能够获得收益。

**关键词:** 储能式充电桩; 储能系统; 经济性模型分析; 凸优化

**文章编号:** 2096-4633(2019)08-0008-06 **中图分类号:** TM7 **文献标志码:** B

近几年, 我国电动汽车快速发展, 《节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020年)》提出到2020年我国电动汽车产销量累计达200万辆<sup>[1]</sup>。发展电动汽车需投入建设包括充电桩在内的配套充电基础设施, 因此大力推进电动汽车充电基础设施建设, 是加快电动汽车推广应用的紧迫任务<sup>[2]</sup>。在充电桩及其附近配套安装移动/分布式储能系统, 能够缓解电动汽车随机式充电方式给电网带来的冲击, 充储一体化充电桩系统将在未来充电桩设计中发挥重要作用。

储能技术具有平滑间歇性电动汽车充电功率波动的能力, 能够增强电网调频、调峰能力, 降低负荷峰谷差, 提高系统效率和设备利用率<sup>[3]</sup>。为充电桩配置分布/移动式储能能够增加备用容量, 可以减小对电源功率的要求, 使其不受电网容量的限制, 通过配置不同的储能容量, 可以满足不同电动汽车的充电的要求, 降低对充电桩的电力投入<sup>[4]</sup>。储能设备抑制了充电谐波注入, 能够提高电网安全性和提高供电质量<sup>[5,6]</sup>。因此, 对储能式充电桩与电网的优化运行, 具有非常大的实用和经济效益。

针对储能系统和充电桩配合的优化运行问题, 一些研究主要关注如何利用储能系统降低电动汽车充电波动, 采用的方法主要包括: 低通滤波、异步控制算法设计、电力电子设计、模型优化等, 充电谐波抑制的研究保障了配电网运行的稳定性<sup>[7]</sup>。然而, 随着大量电动汽车在没有调节和控制的情况下接入电网, 可能导致配电网负荷曲线出现峰峰叠加, 导致峰谷差进一步扩大, 导致线路变压器负荷风险加大, 充电谐波抑制的研究对储能式充电桩与电网优化运行的作用和经济性均不够显著<sup>[8-9]</sup>。

此外, 通过储能式充电桩功率的控制来调节充电桩与电网的联合配置, 可提高储能式充电桩的收益或降低功率预测偏差导致的惩罚。文献[10]提出了V2G(vehicle-to-grid, V2G)场景下双向功率控制模型, 建立了充电桩与电网双向互动的优化控制策略。文献[11]基于分层控制系统的架构, 提出了多层控制架构的多智能体优化电动汽车充电功率控制策略。文献[12]针对V2G技术与需求侧响应(demand response, DR)环境下的电动汽车充电功率控制, 以电网与电动汽车同步

稳定为目标,考虑电动汽车充电行为的动态模型,实现基于电动汽车移动性与电网稳定的系统功率控制。

目前,储能系统的成本较高,充放一体式储能充电桩单独进行价格套利的方式难以收回对储能的投资成本<sup>[13-14]</sup>。而储能式充电桩参与电网需求侧响应服务既可以发挥储能系统功率快速调节的优势,又能够获得可观的收益,同时,通过有序充放电的管理能够降低对储能系统的经济性花销。文献[15-16]提出基于能量优化和辅助电网服务的V2G算法,该算法以最大化经济性收益和系统“削峰填谷”效益为目标,考虑不同储能首先建立了基于充电花销最小的充电模型,然后结合充电功率和电池荷电状态(state-of-charge, SOC)提出基于启发式的优化求解方法。S. Shao在文献<sup>[15-18]</sup>中考虑电动汽车大范围接入电网参与需求侧响应,以避免电力高峰与基础设施投资浪费,提出了需求侧响应策略以平滑电力负荷和提高变电站系统容量。

本文根据需求侧响应管理的运行情况,研究综合考虑储能系统减小充电桩配置的经济性花销。结合实时电价激励的RTP(real-time-price, RTP)储能调节空间参与需求侧服务,并考虑储能系统性能表现对需求侧管理补偿的影响,建立储能式充电桩充放储一体化与电网需求侧响应联合运行的优化模型,提高充电桩的收益,并充分发挥储能系统在参与配电网削峰填谷的作用。

$$P(Q_i^t, C_i^t) = \sum_i^N \sum_t^T Dr_i^t(Q_i^t) + Co_i^t(C_i^t), \forall t, \forall i \quad (1)$$

其中,  $Dr_i^t(Q_i^t)$  表示储能式充电桩  $i$  在  $t$  时段内参与电网需求响应电量  $Q_i^t$  所获得的收益,  $Q_i^t$  表示储能式充电桩  $i$  在  $t$  时段内参与电网需求侧响应的电量。  $Co_i^t(C_i^t)$  表示储能系统的经济性花销, 主要由充/放电电流  $C_{ii}$  决定。在V2G技术条件下, 电流能够双向地在储能式充电桩和电网之间流动, 储能式充电桩能够从电网购得电量用于实时电动汽车充电需求和储能系统重放电需求, 即储能式充电桩参与电网需求响应的电量  $Q_i^t$  由电动汽车实时充电需求  $D_i^t$  和储能式充电桩充放电调度  $C_i^t$  组成:

$$Q_i^t = C_i^t + D_i^t, \forall i, \forall t \quad (2)$$

### 1.2.1 储能式充电桩参与需求侧响应效益

储能式充电桩在参与电网需求侧响应联合运行时会根据电网侧需求价格的变化, 调节储能式充电

## 1 储能式充电桩参与电网需求响应的优化模型

### 1.1 参与需求响应管理机制

依照传统电网的需求响应方式划分, 大致可以分为两种, 即: 基于价格的需求响应和基于奖励的需求响应。每种需求响应方式包括众多定价机制, 比如: TOU(time-of-use, TOU)定价, RTP定价等<sup>[13-18]</sup>。本文采用的定价模型适用于以上多种类型的动态定价。电价每单位时段将会发生变化, 反映了效用发生成本的变化或者电力批发商价格的变化<sup>[19-20]</sup>。实时价格以小时或者分钟为基准提供给充电桩运营商用户, 让充电桩运营商根据能源市场做出用电计划。

考虑储能式充电桩参与电网需求侧响应问题, 目的在于根据电网实时电价变化获得较高储能式充电桩参与电网需求侧响应收益, 获得较低储能式充电桩经济性消耗。本文采用社会福利最大化类型模型将以上两个目的建模为效益函数模型, 并以效益函数最大化为目标, 优化地匹配调度储能式充电桩参与电网需求侧响应的电流电量  $Q_{ii}$ 、储能式充电桩充/放电流  $C_{ii}$ 。

### 1.2 效益函数模型

储能式充电桩效益函数模型由加权的需求侧相应收益和储能式充电桩经济型消耗模型组成, 储能式充电桩运营商根据电网运营商需求响应电价的变化, 确定储能式充电桩参与电网需求响应的电力调度  $Q_{ii}$  和储能式充电桩充放电调度  $C_{ii}$ , 如下式所示:

桩参与电网需求电量  $Q_i^t$ , 并获得的需求响应效益。按照储能系统在参与需求侧响应的效益, 储能式充电桩参与电网需求侧响应的效益一般包括: 基于参与需求响应电量的激励奖励和基于系统效益的激励奖励。电网运营商分别此两项需求响应激励给与  $P_i$  和  $\mu_i$  的单位电量奖励, 即充电桩运营商获得的需求响应收益如下式所示:

$$Dr_i^t(Q_i^t) = p_i \cdot Q_i^t + \mu_i \cdot (Q_i^t - \bar{Q}_i)^2, \forall i, \forall t \quad (3)$$

式中,  $\bar{Q}_i$  表示充电桩  $T$  时间内平均电量需求, 表示为:

$$\bar{Q}_i = \frac{1}{T} \sum_t^T Q_i^t, \forall i, \forall t \quad (4)$$

### 1.2.2 储能式充电桩储能经济性损耗模型

考虑储能式充电桩在运营过程中充放电操作对

荷电状态(State of charge, Soc)的动态变化,其 Soc 动态模型可以表示为:

$$Soc_i^t = Soc_i^{t_0} + \sum_{t=1}^T C_i^t \cdot t, t \in T \quad (5)$$

式中,  $Soc_i^t$  表示电池的  $t$  时刻充电桩  $i$  的 Soc 状态,  $Soc_i^{t_0}$  表示电池的初始 Soc 状态,其单位为

$$Co_i^t(C_i^t) = \alpha_i \cdot C_i^{t^2} + \gamma_i \min(Soc_i^t - \delta_i Soc_i^{\max}, 0), \forall i, \forall t \quad (6)$$

式中,  $\delta_i, \alpha_i$  和  $\gamma_i$  均是正常数权重值表征不同的充/放电行为对电池经济性损耗的影响,  $Soc_i^{\max}$  表示储能系统最大容量。

### 1.3 约束条件

优化模型中的约束条件主要包括储能式充电桩充放电电量约束、储能系统容量约束和需求响应功率约束。

#### 2.3.1 储能式充电桩充放电电量约束

在任意单位时隙内储能式充电桩充放电电量的约束条件表示充电桩充/放电过程中电量限值约束,如下式所示:

$$-C_i^{t,\max} \leq C_i^t \leq C_i^{t,\max}, \forall i, \forall t \quad (7)$$

任意储能式充电桩在任意时隙内的充/放电量  $C_i^t$  满足最大充/放电量限制,并限定在额定充/放电量范围内。

#### 2.3.2 储能式充电桩容量约束

由于储能式充电桩具有一定容量的限制,储能系统 Soc 的初值过高或者过低都将会影响充电桩正常的运行要求,比如,储能系统 Soc 严重偏离中间值,可能导致储能因为电量过高或过低无法响应充电桩系统的指令,Soc 为一个连续的动态模型,其约束条件:

$$Soc_{\min i} \leq Soc_i^t \leq Soc_i^{\max}, \forall i, \forall t \quad (8)$$

根据上式,储能系统的容量约束将会对充电桩充/放电  $C_i^t$  产生间接影响。

#### 2.3.3 需求响应电量约束

在任意单位时隙内储能式充电桩参与电网需求响

$$L(Q_i^t, C_i^t, \lambda, v) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T Dr_i^t(Q_i^t) + Co_i^t(C_i^t) + \lambda_i^t(C_i^t - C_i^{t,\max}) + v_i^t(Q_i^t - Q_i^{t,\max}) \quad (11)$$

式中,  $\lambda, v$  为大于 0 的 Lagrange 乘子。

#### 1.4.2 构建 Lagrange Dual 函数

$$g(\lambda, v) = \inf_{Q_i^t, C_i^t} L(Q_i^t, C_i^t, \lambda, v) \leq \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T Dr_i^t(Q_i^t) + Co_i^t(C_i^t) + \lambda_i^t(C_i^t - C_i^{t,\max}) + v_i^t(Q_i^t - Q_i^{t,\max}) \leq P^* \quad (12)$$

从 lower bound property<sup>[21]</sup> 我们可得到在  $\lambda$  和  $v$  的可行域上,  $g(\lambda, v) \leq P^*$ ,  $P^*$  为问题(10)在约束限制条件内约束的最优解。

电池储能容量(Ah),  $T$  表示储能系统与充电桩联合运行的时间周期。由于储能系统的不同充/放电操作将会对储能式充电桩产生不同程度的经济性花销,其花销主要有两种充放电操作产生,即充/放电深度和充/放电频率。其数学模型可以表示为:

应的电量应满足最大电量限制,其响应电量约束为:

$$0 \leq Q_i^t \leq Q_i^{t,\max}, \forall i, \forall t \quad (9)$$

式中,  $Q_i^{t,\max}$  表示储能式充电桩  $i$  在  $t$  单位时隙内参与需求响应的最大电量限制。

### 1.4 联合调度优化模型

储能式充电桩运营商在参与电网需求侧响应联合运行以最大化效益函数为目标,并以储能式充电桩实时充/放电量和储能系统容量为约束条件,建立优化模型:

$$\begin{aligned} \max_{(Q_i^t, C_i^t)} : & P(Q_i^t, C_i^t) \\ \text{s. t.} : & (7), (8), (9) \end{aligned} \quad (10)$$

通过分析,该问题的目标函数为凸函数,约束条件组成的可行解为凸集,可以通过电网运营商采用集中式求解方法求得最优解。然而,采用集中式求解的方法,电网运营商需要获得充电桩的运营状态信息,在实际系统运行中不利于充电桩信息保护。因此,本文提出了基于 prime-dual 分解的分布式能量联合优化的求解方法,通过采用分布式求解的方式获得每个充电桩运行调度决策。

#### 1.4 模型求解

下文中介绍 prime-dual 分解的方法,求得每个充电桩能量管理的运营函数,然后应用 KKT 条件实现问题的分解,使得每个充电桩可以参照自己的运营状态信息进行迭代更新,并最终求得最优解。本方法共分为以下一个步骤。

##### 1.4.1 构建 Lagrange 函数

##### 1.4.3 应用 KKT 条件

在满足求解原问题的可行域时,对偶问题的可行域为:

$$\lambda > 0, v > 0 \quad (13)$$

互补松弛量为:

$$\begin{aligned} \lambda_i^t (C_i^t - C_i^{t,\max}) &= 0, \forall i, \forall t \\ v_i^t (Q_i^t - Q_i^{t,\max}) &= 0, \forall i, \forall t \end{aligned} \quad (14)$$

由于优化问题模型为凸函数,可行解为凸集,应用 KKT 条件所求得解即为原问题的解,为充分必

$$C_i^t(k+1) = C_i^t(k) + \lambda_i^t(k+1) \nabla L_{C_i^t}(Q_i^t, C_i^t, \lambda, v) \quad (15)$$

$$Q_i^t(k+1) = Q_i^t(k) + v_i^t(k+1) \nabla L_{Q_i^t}(Q_i^t, C_i^t, \lambda, v) \quad (16)$$

$$(\lambda_i^t(k+1), v(k+1)) = \nabla g_{(\lambda_i^t, v_i^t)}(\lambda, v) \quad (17)$$

式中,  $\nabla L$  表示函数 1 的梯度。通过问题求解模型分析可知,求解过程中充电桩之间没有参数相耦合,因此可以进行拆分求解。算法的复杂度主要取决于适用场景的规模,与参与联合优化运行的充电桩总数  $N$  相关,同时还与每一次算法运算过程中迭代次数  $k$  相关,参考算法的复杂度为  $O(kN)$ 。

## 2 算例分析

### 2.1 算例设置

算例采用国内储能式充电桩某 1 天内输出电流数据,储能式充电桩的容量峰值为 3.35 kWh,储能系统的寿命经济性折损相关参数  $\alpha, \gamma, \beta$ ,参照储能系统的经济性能指标参数进行归一化,从(0,1)中取出。

### 2.2 仿真结果分析

#### 2.2.1 收敛性分析

参考文献[21],满足一定精度的前提下,其全局一致性收敛率为  $O(1/\epsilon)$ ,其中,  $\epsilon$  为系统所要求精度,本文中系统所要求的精度  $\epsilon$  设置为 0.001。经过仿真分析,算法收敛性能满足理论值,运算迭代次数在 10 次左右,如图 1 所示。由此证明,该算法理论和实际具有较快的收敛率,并能够实现全局一致性收敛。

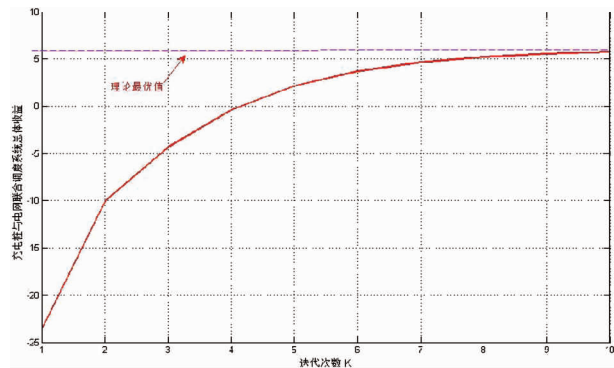


图 1 算法收敛性

Fig. 1 Convergence rate of algorithm

要条件。因此可以应用问题分解方法求得每个充电桩需求解更新的算子。

#### 1.4.4 Prime-dual 分解

每一个储能充电桩根据收集到  $P_i, \mu_i$  信号后,根据自身限制条件(7)(8)(9)分布式更新储能式充电桩运营调度,更新算子如下:

### 2.2.2 经济性分析

由上述分析可以发现,分布式储能时充电桩的作用是参与电网需求响应,其取决于电价激励信号  $p_i$  和储能参与需求响应因子  $\mu_i$  的相对关系。通过设置不同的电价激励信号和需求响应因子,可得到不同的运行策略和优化结果。为进一步考察电价激励信号和需求响应因子的变化趋势,对系统总体增益的影响,下面分析了  $p_i \in [0.2, 0.4], \mu_i \in [0.3, 0.5]$ ,储能式充电桩总收益、参与需求响应收益,以及储能系统收益。图 2 中可知,随着时间的增长,需求响应收益和系统总体收益将会增大,储能系统损耗将会降低。

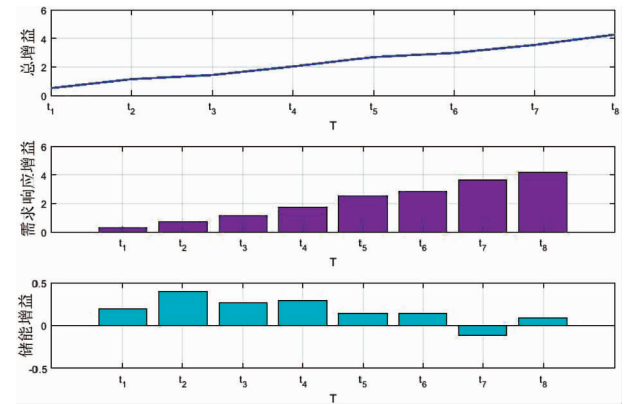


图 2 储能式充电桩效益

Fig. 2 Total utility profits of energy-storage type charging point

#### 2.2.3 储能式充电桩充/放电调度

对于储能式充电桩参与电网需求响应联合调度,利用其充放电获取最大效益函数。在满足储能系统电量、容量等限制条件下获得更多更小储能成本开销和更多收益,图 3 中给出了六个储能式充电桩容量为 3.75 kW·h 的容量动态变化曲线。可以看出储能式充电桩容量在 3.05 ~ 3.30 kW·h 之间变化,也即在总体容量的 80% ~

90% 容量区间运行。

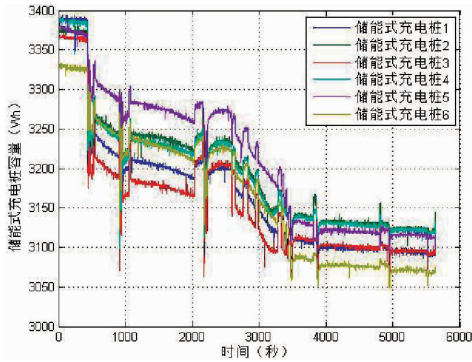


图 3 储能式充电桩参与需求响应联合调度容量

Fig. 3 Joint powerscheduling capacity of energy-storage type charging point participating in demand response programs

### 3 结论

为了提高储能式充电桩的经济性,充分发挥储能式充电桩在电网中参与需求侧响应的优势,本文首先分析了储能式充电桩效益优化函数,考虑其参与电网需求侧响应收益,构建了储能式充电桩运行效益最大化优化模型<sup>[22-23]</sup>。其次,在储能式充电桩运行收益最大化目标下,建立了分布式储能式充电桩调度的优化模型。基于储能式充电桩用电运行状态参数,进行了仿真验证,证明了所提方法可实现储能式充电桩效益最大化。未来的研究将考虑基于电动汽车的移动性对储能式充电桩容量配置和在需求响应下的优化策略。

#### 参考文献:

[1] 马玲玲,杨军,付聪,等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(03):140-148.  
MA Lingling, YANG Jun, FU Cong et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(03): 140-148.

[2] HAGHBIN SAEID, LUNDMARK SONJA, ALAKULA MATS, et al. Grid-connected integrated battery chargers in vehicle applications: review and new solution [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(02): 459-473.

[3] LIU HUI, HU ZECHUN, SONG YONGHUA, et al. Vehicle-to-grid control for supplementary frequency regulation considering charging demands [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(06): 3110-3119.

[4] NAMWOO KANG, FRED M. FEINBERG, PANOS Y. PAPALAMBROS. Integrated decision making in electric vehicle and charging station location network design [J]. Journal of Mechanical Design, 2015,

137(06):1-10.

[5] JIN CHENRUI, XIANG SHENG, AND PRASANTA GHOSH. Optimized electric vehicle charging with intermittent renewable energy sources [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 08(06): 1063-1072.

[6] DONG-HEE KIM, VMIN-JUNG KIM, BYOUNG-KUK LEE, et al. An integrated battery charger with high power density and efficiency for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(06): 4553-4565.

[7] 周念成,蒲松林,王强钢,等. 电动汽车快速充电站的储能缓冲系统控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 127-134.  
ZHOU Niancheng, PU Songlin, WANG Qianggang, et al. Control strategy of energy storage buffer system for fast charging electric vehicle station [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 127-134.

[8] QIAN KEJUN, ZHOU CHENGKE, ALLAN MALCOLM, et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(02): 802-810.

[9] YU RONG, ZHONG WEIFENG, XIE SHENGLI, et al. Balancing power demand through EV mobility in vehicle-to-grid mobile energy networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(01): 79-90.

[10] WANG KUN, GU LIQIU, HE XIAOMING, et al. Distributed energy management for vehicle-to-grid networks [J]. IEEE Network, 2017, 31(02): 22-28.

[11] BISHNU BHATTARAI, MARTIN LÉVESQUE, BIRGITTE BAK-JENSEN, et al. Design and co-simulation of hierarchical architecture for demand response control and coordination [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(04): 1806-1816.

[12] ALBERT LAM, YU JAMES, HOU YUNHE, et al. Coordinated autonomous vehicle parking for vehicle-to-grid services: formulation and distributed algorithm [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 09(05): 4356-4366.

[13] CAO YIJIA, TANG SHENGWEI, LI CANBING, et al. An optimized EV charging model considering TOU price and SOC curve [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 03(01): 388-393.

[14] ERIC SORTOMME, MOHAMED A. EL-SHARKAWI. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 03(01): 351-359.

[15] EVANGELOSKARFOPOULOS, NIKOS HATZIARGYRIOU. A multi-agent system for controlled charging of a large population of electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(02): 1196-1204.

[16] SHAO SHENGNAN, MANISA PIPATTANASOMPORN, RAHMAN SAIFUR, et al. Demand response as a load shaping tool in an intelligent grid with electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 02(04): 624-631.

- [17] SHAO SHENGNAN, MANISA PIPATTANASOMPORN, RAHMAN SAIFUR, et al. Grid integration of electric vehicles and demand response with customer choice [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 03(01): 543 - 550.
- [18] 顾羽洁. 电动汽车充放储一体化电站对电网影响的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [19] 古庭贇, 牛唯, 孟令雯. 智能电网环境下的需求侧行为的研究 [J]. 电力大数据, 2017, 20(11): 89 - 92.  
GU Tingyun, NIU Wei, MENG Lingwen. Research on demand side behavior in smart grid environment [J]. Power Systems and Big Data, 2017, 20(11): 89 - 92.
- [20] 顾海林, 黄兴, 李曦. 电力需求侧管理模型的研究与应用 [J]. 电力大数据, 2017, 20(08): 15 - 19.  
GU Hailin, HUANG Xing, LI Xi. Research and application of power demand side management model [J]. Power Systems and Big Data, 2017, 20(08): 15 - 19.
- [21] STEPHENBOYD, NEAL PARIKH, ERIC CHU, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers [J]. Foundations & Trends in Machine Learning, 2010, 03(01): 1 - 126.
- [22] 朱金卫, 郑正仙, 苏芳, 等. 储能型电动汽车充电站研究进展 [J]. 浙江电力, 2017, 36(10): 7 - 10.  
ZHU Jinwei, ZHENG Zhengxian, SU fang, et al. Research on the development of electric vehicle charging station with energy storage [J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(10): 7 - 10.
- [23] 马静, 沈玉明, 刘青, 等. 考虑充电次数约束与光伏出力曲线包络线的储能控制策略 [J]. 广东电力, 2018, 31(07): 36 - 41.  
MA Jing, SHEN Yuming, LIU Qing, et al. Energy storage control strategy considering constraint of charging times and envelope curve of photovoltaic output curve [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(07): 36 - 41.

收稿日期: 2019 - 06 - 05

作者简介:



徐睿(1974), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事智能用电技术与电动汽车方向研究工作。

(本文责任编辑: 范斌)

## Joint operation optimization of energy-storage type charging point participating in demand side response of power grid

XU Rui<sup>1</sup>, XIAO Jian<sup>1</sup>, FAN Wei<sup>1</sup>, CI Song<sup>2</sup>, CONG Zhongxiao<sup>1</sup>, LI Pengcheng<sup>1</sup>

(1. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002 Guizhou, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The joint operation of energy-storage type charging point coordinated with power grid, could not only reduce the cost of grid capacity expansion but also obtain the benefit of auxiliary management services participating in power grid demand side response, and thus reduce the economic cost of the operation of charging point. In order to explore the impact of real-time pricing (RTP) incentives on the economic benefits of energy-storage charging points, this paper conducts a joint operation optimization energy scheduling study of energy-storage charging points participating in demand response. By considering RTP of demand response of power grid, the economic benefit function model of demand side response with energy storage charging points is established. In order to apply the dual decomposition method, the optimization model is transformed into a typical convex optimization problem, and the optimal energy dispatch of energy storage charging points is obtained. The simulation results show that the proposed method can achieve fast convergence and gain benefits based on the actual operation power, capacity and economic parameters of the energy storage charging point.

**Key words:** energy-storage type charging point; energy storage system; economic model analysis; convex optimization