

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211441

## 双电源供电充电站的需求响应优化模型

林楷东, 杨景旭, 张勇军, 姚蓝霓, 李其霖, 唐渊

(智慧能源工程技术研究中心, 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 双电源供电的充电站如何从空间和时间两个维度进行需求响应, 关系到系统运行的安全性和经济性。为此提出了一种面向需求响应和可靠性提升的站内充电桩负荷智能切换的调控方法和需求响应优化控制模型。首先, 分析了充电站桩的双电源供电模式和充电桩负荷智能切换的原理。其次, 为改善双电源回路负载均衡度, 建立了充电站的负载优化目标函数。然后, 建立了考虑馈线转供潜力和充电站充电桩切换能力的充电站削峰潜力评估模型及其削峰任务的计算方法。提出计及各削峰时段任务完成情况的削峰补贴计算方法, 以此作为充电站参与需求响应的优化目标, 从而建立充电负荷智能切换策略的需求响应应用模型。最后, 仿真算例证明所提方法能有效增强充电站的负荷调控能力, 实现馈线削峰, 为充电站参与需求响应获得更高利润提供了新的思路。

**关键词:** 负载优化; 充电站; 充电桩; 需求响应; 智能切换

### A demand response optimization model for charging stations with dual power supply

LIN Kaidong, YANG Jingxu, ZHANG Yongjun, YAO Lanni, LI Qilin, TANG Yuan

(Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power Engineering,  
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** How to perform demand response from space and time aspects for charging stations with dual power supply is related to the safety and economy of power system operation. To this end, a regulation method and demand response optimization control model for intelligent switching of charging pile loads in stations are proposed. These are oriented to demand response and reliability improvement. First, the dual power supply mode of charging piles of a charging station and the principle of intelligent switching of charging pile loads are analyzed. Secondly, in order to improve the load balance of the dual power circuit, the optimization objective function of the charging station load is established. Then, a model for evaluating the peak-shaving potential of a charging station and a calculation method for its peak-shaving tasks are established. These take into account the feeder transfer potential and the charging pile switching capability of the charging station. The calculation method of peak-shaving subsidy considering the completion of the task in each peak-shaving period is put forward. This is used as the optimization goal for charging stations to participate in demand response, so as to establish the demand response application model of the intelligent switching strategy of the charging load. Finally, a simulation example proves that the method in this paper can effectively enhance the load regulation ability of charging stations and achieve peak load shaving for feeders, providing a new way for charging stations to participate in demand response for higher profits.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177085).

**Key words:** load optimization; charging station; charging pile; demand response; intelligent switching

## 0 引言

近年来, 在碳减排和环境保护需求的驱动下,

电动汽车(Electric Vehicle, EV)迅猛发展, 中大型充电站接入单馈线造成的过载问题频现<sup>[1-4]</sup>。如何衔接充电设施规划建设和运行管理, 以提高充电负荷的调控潜力和改善含充电负荷配电网的安全性, 成为当前亟待解决的难题<sup>[5-8]</sup>。

目前, 在负荷控制方面, 充电站主要采用电价

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177085); 中国博士后科学基金项目资助(2020M682704)

引导的有序充电<sup>[9-11]</sup>、激励补偿的需求响应<sup>[12-15]</sup>等措施,本质是改变EV用户充电行为和充电桩功率,对EV用户侧的充电和出行需求影响较大<sup>[16-18]</sup>;电网通过馈线之间的联络开关的倒闸操作实现某支路整体负荷转供<sup>[19]</sup>,不涉及用户侧,但对备用馈线的负荷接纳能力要求较高,转供条件不容易满足。改变充电负荷时序特性往往需要EV用户调整充电时间或功率<sup>[20-21]</sup>,而通过负荷转供则一般不需要改变用户充电行为,实施需求响应的成本低<sup>[22-23]</sup>。因此,充电负荷转供可作为负荷调控和实施需求响应的选择。

但目前充电站内的充电桩都是固定接入某条馈线,在充电桩层级不具备负荷转供条件。根据负荷定位,充电负荷在特殊场景下可视为二级负荷,采取双电源供电<sup>[24-25]</sup>,部分中大型充电站采用双馈线供电。在双电源供电方式下,充电站通过两台及两台以上专变接入两条10 kV馈线,但各充电桩分别固定接在其中一台专变的低压母线上,对应于其中一条馈线,无法根据馈线负荷的实时变化来调整充电桩接入的馈线。若通过增设切换开关将各台充电桩分别接入不同馈线的专变下,则能实现充电桩负荷在不同馈线之间的切换,在充电桩层级即可完成充电负荷转供。

实际上,低压双电源切换开关(Dual Power Switching Switch, DPSS)可以满足在充电桩层级进行充电负荷切换的需求。一方面,DPSS可以将负荷电路从一个(常用)电源切换至另一个(备用)电源,具有负荷切换的能力<sup>[26]</sup>,同时该类开关切换方便,电流承受能力强,适用范围广,能够满足各类快充桩的实时智能切换需求。另一方面,以60 kW直流快充桩为例,计及充电桩的价格<sup>[27]</sup>、相应配套设施投资和征地费用<sup>[28]</sup>,建设一个快充桩的成本一般在10万元以上,而配置一台低压DPSS成本大约为3000元,因此相对于充电桩建设成本,DPSS的建设成本较低。而配置双电源切换开关后,充电站具备较强的充电负荷调控能力,可参与需求响应来实现电网负载优化和负荷削峰,改善电网运行的安全性<sup>[29-30]</sup>,同时可获得相应的补贴,缩短充电站投资回收期 and 增大利润。因此,将双电源切换开关应用于各类快充桩的负荷切换在技术和经济层面具有可行性和推广价值。在这过程中,如何在充电桩配置DPSS场景下,建立完善的需求响应机制,充分调动充电站的充电桩调控资源,显得至关重要。

为此,本文进行了充电桩配置DPSS的可行性研究,阐述了充电桩的双电源切换供电方式和充电负荷智能切换原理;从改善馈线负载均衡度的角度,

建立了充电负荷智能切换策略的优化目标;建立了考虑馈线转供潜力和充电站充电桩切换能力的充电站削峰潜力评估模型,以及充电负荷智能切换策略的需求响应应用模型。最后,通过仿真分析验证了本文方法和模型的有效性。

## 1 基于双电源的充电负荷智能切换原理

在双电源供电方式下,充电站通过两台及以上专变接入两条10 kV馈线,各充电桩通过低压DPSS分别引接在不同馈线的专变下,则能实现充电桩负荷在两条馈线之间的切换。如图1所示,设专变1和专变2为分别接入两条10 kV馈线的两台10 kV/400 V专变,充电桩通过低压DPSS同时引接在两台专变的低压母线上。正常运行方式下,充电桩接入两台专变的两个开关(开关1和开关2)一个闭合、一个断开,充电桩由其中一台专变供电。如此,在正常运行情况下,充电桩由某馈线主要供电,称为该充电桩的常用馈线,紧急调度情况下可通过DPSS将充电桩转移到另一条馈线上,称该馈线为该充电桩的备用馈线。充电桩负荷接入到哪条馈线由该充电桩的DPSS的状态决定。通过改变各充电桩的DPSS的状态,即可将充电桩负荷转移到另一条馈线上,以实现充电负荷在馈线之间的切换。

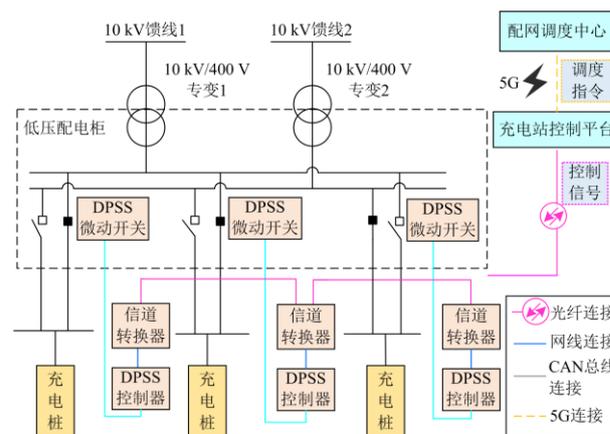


图1 充电负荷智能切换

Fig. 1 Intelligent switching of charging load

当一条馈线的负载出现重/过载而另一条馈线负载较轻时,将接入前者的部分充电桩切换到后者,可以减轻前者的负载压力,改善电网安全性。配网调度中心根据监测的负荷数据计算两条馈线的实时负载率,给充电站下发建议接入不同馈线下在充充电桩数的调度指令,充电站根据调度指令通过向DPSS的控制器传输控制信号来控制DPSS的微动开关,改变DPSS的开关状态,从而调整各充电桩

接入的馈线。每次调整时充电站不需要调整所有充电桩的 DPSS，只需保证调整后接入不同馈线在充电站数满足要求即可。因此，为了降低对开关设备使用寿命的损害，一般遵循需调整的 DPSS 越少越好的原则。

## 2 充电智能切换策略的负载均衡优化模型

提高双馈线负荷的均衡程度，有利于降低损耗，避免馈线过载，从而保证配电网的经济和安全运行。为研究充电负荷智能切换策略的有效性以及该策略在充电负荷调控方面的潜力，本文以改善双馈线负载均衡度为目标来进行充电负荷智能切换优化。

### 2.1 馈线负载优化目标及约束

本文以馈线负载率标准差来评估双馈线负载的均衡程度，负载率标准差越小，负载均衡程度越高。 $t$  时段两条馈线的负载率标准差  $\sigma_w(t)$  为

$$\sigma_w(t) = \sqrt{\frac{1}{p_0} \sum_{p=1}^{p_0} (\lambda_w(p,t) - \frac{1}{p_0} \sum_{p=1}^{p_0} \lambda_w(p,t))^2} \quad (1)$$

式中： $p_0$  为馈线数，数值为 2； $\lambda_w(p,t)$  为  $t$  时段馈线  $p$  的负载率。

则馈线负载率标准差均值  $\sigma_{w0}$  为

$$\sigma_{w0} = \frac{1}{M_s} \sum_{t=1}^{M_s} \sigma_w(t) \quad (2)$$

式中， $M_s$  为一天的时段数。

则充电负荷智能切换优化目标为

$$\min \sigma_{w0} \quad (3)$$

当通过 DPSS 将充电桩负荷切换到其他专变下时，需要保证所有专变都不超过安全区上限，即

$$\lambda_{zbmax} \leq \lambda_{zb0} \quad (4)$$

式中： $\lambda_{zbmax}$  为各专变的最大负载率； $\lambda_{zb0}$  为变压器负载安全区上限。

### 2.2 馈线负载优化效果评估指标

为研究馈线负载优化效果，本文定义馈线负载率小于等于安全区上限或重载限值时负载率为合格，否则负载率为不合格。为此定义馈线一天中负载率合格的时段数比例为馈线负载合格率  $\eta_{hg}$ ，即

$$\eta_{hg} = \frac{n_{hg}}{M_s} \quad (5)$$

式中， $\eta_{hg}$  为馈线一天中负载合格的时段数。

### 2.3 充电负荷智能切换策略的求解方法

为避免频繁切换 DPSS 带来的功率损耗和对开关设备的损害，以 15 min 为一个时段，将一天 24 个小时平均划分为 96 个时段，每隔一个时段调整一次 DPSS 的状态。

据此，本文选取粒子群算法<sup>[31]</sup>对各个时段在充

电站分别接入两条馈线的数量进行优化。粒子位置为各时段接入两条馈线的在充充电桩数，粒子位置的维度应为  $2 \times 96$ 。以两条馈线的馈线负载率标准差均值最小为目标进行迭代优化，以寻找最优的各个时段接入两条馈线的在充充电桩数方案。根据优化方案，充电站调整各充电桩的 DPSS 状态。

## 3 充电负荷优化的需求响应应用模型

通过增设 DPSS 来进行充电负荷智能切换，能够极大地增强充电站的充电负荷调控能力，利用该资源参与需求响应是充电站赚取更高利润的手段。另外，电网调度充电站的调控资源需要完善的需求响应机制。基于此，本文建立了充电站通过充电负荷智能切换参与削峰需求响应的应用模型，为该方法的应用推广提供参考。

### 3.1 电网削峰需求量的计算方法

当接入充电站的馈线出现重载时，电网可通过激励手段引导充电站通过充电负荷智能切换来参与削峰。将需要削峰的馈线记为需转供馈线，另一条馈线记为可转供馈线。当某时段出现重载时，配电调度中心给充电站发布削峰任务，充电站根据削峰任务调整该时段接入两条馈线的充电桩数量。配电网削峰需求量根据配电网负载情况确定，可按削峰后馈线最大负载率处于安全区上限来确定，即

$$\Delta P_w(t) = \begin{cases} \beta S_0 (\lambda_{wz}(t) - \lambda_{w0}) & \lambda_{wz}(t) > \lambda_{w0} \\ 0 & \lambda_{wz}(t) \leq \lambda_{w0} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\lambda_{wz}(t)$  和  $\Delta P_w(t)$  分别为需转供馈线  $t$  时段的负载率和削峰需求量； $S_0$  为需转供馈线的容量； $\beta$  为负荷功率因数； $\lambda_{w0}$  为馈线安全区上限。

### 3.2 充电站削峰潜力的评估模型

充电站的削峰潜力受可转供馈线转供潜力和充电站充电桩切换能力的影响。 $t$  时段可转供馈线转供潜力  $\Delta P_{wb}(t)$  为

$$\Delta P_{wb}(t) = \begin{cases} \beta S_{b0} (\lambda_{w0} - \lambda_{wb}(t)) & \lambda_{wb}(t) < \lambda_{w0} \\ 0 & \lambda_{wb}(t) \geq \lambda_{w0} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\lambda_{wb}(t)$  为可转供馈线  $t$  时段的负载率； $S_{b0}$  为可转供馈线的容量。

充电站转供潜力受需转供馈线充电负荷大小以及该充电站接入可转供馈线的专变容量限制， $t$  时段充电站转供潜力  $\Delta P_{cd}(t)$  为

$$\Delta P_{cd}(t) = \min\{P_{cz}(t), \beta \lambda_{w0} S_{zb0} - P_{cb}(t)\} \quad (8)$$

式中： $P_{cz}(t)$  和  $P_{cb}(t)$  分别为  $t$  时段该充电站接入需转供馈线和可转供馈线的充电负荷； $S_{zb0}$  为该充电站接入可转供馈线的专变总容量。

基于此，充电站  $t$  时段的削峰潜力  $\Delta P_{cx}(t)$  为

$$\Delta P_{cx}(t) = \min\{\Delta P_{wb}(t), \Delta P_{cd}(t)\} \quad (9)$$

### 3.3 充电站削峰任务的计算方法

配调中心根据充电站削峰潜力和电网削峰需求量的大小关系确定充电站的削峰量任务, 即

$$\Delta P_{rw}(t) = \min\{k_{yd}\Delta P_w(t), \Delta P_{cx}(t)\} \quad (10)$$

式中:  $\Delta P_{rw}(t)$  为  $t$  时段充电站的削峰量任务;  $k_{yd}$  为削峰裕度,  $k_{yd} > 1$ , 在充电站削峰潜力足够时能够保证削峰后需转供馈线的负载率在安全区。另外, 由于充电站最小调控单位为单个充电桩, 因此上述削峰任务需要折算为与充电桩单桩功率相适应的数值。

### 3.4 充电站参与削峰需求响应的激励机制

充电站在第  $i$  个削峰时段的削峰量任务为  $\Delta P_{rw}(i)$ , 实际削峰量为  $\Delta P_{xy}(i)$ , 任务完成度  $\varphi(i)$  为

$$\varphi(i) = 1 - \left| \frac{\Delta P_{xy}(i) - \Delta P_{rw}(i)}{\Delta P_{rw}(i)} \right| \quad (11)$$

电网公司根据充电站削峰任务完成度对补贴电价进行调整, 第  $i$  个削峰时段的补贴电价  $d_f(i)$  为

$$d_f(i) = \varphi(i)d_{f0} \quad (12)$$

式中,  $d_{f0}$  为基准削峰补贴电价。

### 3.5 充电站参与电网削峰的优化目标及约束

电网公司对充电站参与削峰的补贴额  $D_{fb}$  根据充电站削峰量和削峰补贴电价来计算, 即

$$D_{fb} = \sum_{i=1}^{n_f} (P'_{wf}(i) - P_{wf}(i))d_f(i)\Delta T \quad (13)$$

式中:  $P'_{wf}(i)$  和  $P_{wf}(i)$  分别为优化前后第  $i$  个削峰时段馈线的负荷;  $n_f$  为馈线需要进行削峰的时段的个数;  $\Delta T$  表示一个时段的长度。

因此, 充电站充电负荷智能切换的优化目标是最大化充电站的补贴额, 即

$$\max D_{fb} \quad (14)$$

充电站通过充电负荷智能切换来实现某馈线削峰, 除了满足式(4)专变负载约束外, 还须保证充电桩切换后可转供馈线的负载不超过安全区上限, 即

$$\lambda_{wbm} \leq \lambda_{w0} \quad (15)$$

式中,  $\lambda_{wbm}$  为可转供馈线的最大负载率。

通过粒子群算法求解该问题时, 以充电站的补贴额最大为目标, 对各削峰时段接入两条馈线的在充充电桩数方案进行优化。

### 3.6 馈线削峰效果评估指标

对于馈线的削峰情况, 本文定义优化前后馈线最大负载率的降低程度为削峰率, 则有

$$\eta_{wf} = \frac{\lambda_{wmq} - \lambda_{wmh}}{\lambda_{wmq}} \quad (16)$$

式中:  $\eta_{wf}$  为需转供馈线削峰率;  $\lambda_{wmq}$  和  $\lambda_{wmh}$  分别为优化前后需转供馈线的最大负载率。

## 4 仿真算例

### 4.1 参数设置

本文以两条 10 kV 馈线(分别记为馈线 1 和馈线 2)作为仿真网架, 进行充电桩负荷在馈线间的转供优化, 不考虑充电负荷在时序上的转移。馈线 1 和馈线 2 的容量分别为 6765 kVA 和 6929 kVA, 两者的常规负荷如图 2 所示; 充电站内含 70 台 60 kW 的直流桩, 一天服务 800 辆 EV, EV 参数和充电行为概率分布参考文献[32]。假设所有充电桩都通过 DPSS 接入两条馈线。DPSS 配置数量与充电桩数量相同, 可选取 ABB 产品 OTM160E3WCM24D 型号, 其在 400 V 电压下额定电流为 200 A, 足以承受充电桩的充电电流, 功率损耗仅 2.4 W。假设不加以控制时, 充电桩平均接入两条馈线, 且 EV 均衡接入两条馈线下的充电桩。 $S_{zb0}$  为 3200 kVA;  $\lambda_{w0}$  取 0.8;  $\lambda_{zb0}$  取 0.8;  $d_{f0}$  设为 4 元/kWh;  $k_{yd}$  取 1.05;  $M_s$  取 96;  $\Delta T$  取 15 min, 即 0.25 h;  $\beta$  为 0.95。

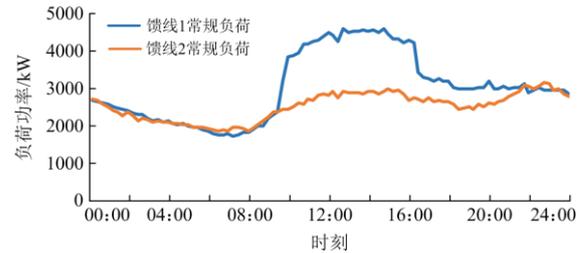


图 2 馈线 1 和馈线 2 的常规负荷

Fig. 2 Conventional loads of feeder 1 and feeder 2

### 4.2 基于负载优化的充电负荷智能切换效果分析

根据本文所提切换策略的负载均衡优化模型, 以馈线负载率标准差均值最小化为目标, 采用粒子群算法对各时段接入两台专变的在充充电桩数进行优化。优化后接入两条馈线的在充充电桩数和充电负荷如图 3 和图 4 所示, 各馈线负载率及其标准差如图 5 和图 6 所示, 负载改善指标如表 1 所示。

由图 3 可知, 由于馈线 1 的常规负荷负载率比馈线 2 的要大, 为了实现馈线负载均衡, 充电桩更偏向于接入馈线 2 下的专变, 特别是在白天馈线 1 的负荷高峰时段, 大部分的在充充电桩都通过 DPSS 切换接入馈线 2 下的专变。由图 4 和图 5 可知, 优化后在白天馈线 2 的负载率与馈线 1 的负载率差距极大地减小了, 两者的负载率曲线甚至基本

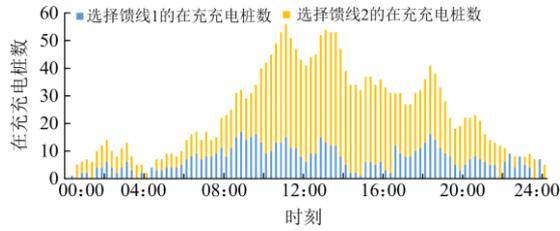


图3 接入各馈线的在充充电桩数

Fig. 3 Number of on-charge charging piles connected to each feeder

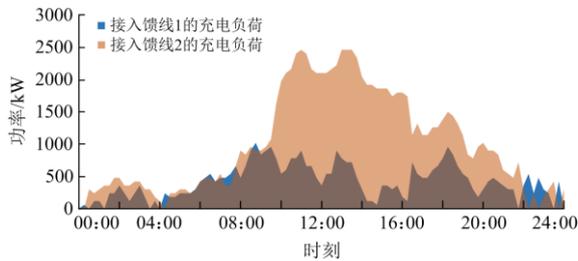


图4 接入各馈线的充电负荷

Fig. 4 Charging load connected to each feeder

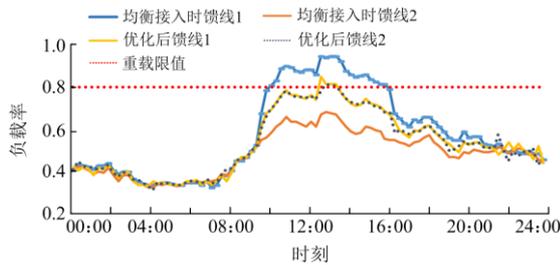


图5 馈线负载率

Fig. 5 Load factor of feeders

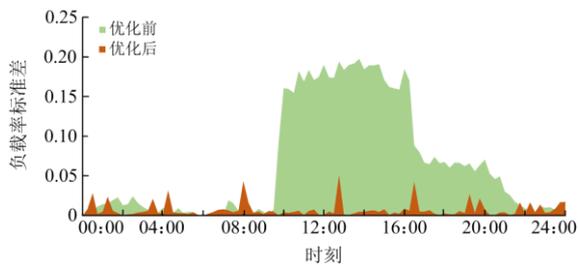


图6 馈线负载率标准差

Fig. 6 Standard deviation of the load factor of feeders

表1 优化前后的指标分析

Table 1 Index analysis before and after optimization

指标	优化前	优化后
馈线负载率标准差均值	0.063	0.007
双馈线最大负载率	0.95	0.82
馈线1 负载合格率/%	75	96

重叠在一起，馈线之间的负载更加均衡。此时，馈线1的最大负载率由0.95下降到0.82，负载合格率

由75%提高到96%，由严重重载状态转化为轻微重载状态。同时，由图6和表1可知，两条馈线负载率的标准差大大减小，由0.063下降到0.007，降低了89%。可见，本文所提智能切换策略能够实现馈线之间负载的均衡分配，减轻了单条馈线的供电压力，其有效性得到了验证。

可见，通过充电负荷智能切换，可以实时控制接入每条馈线的充电桩数，馈线负载均衡度优化效果非常好。同时，该策略不涉及EV用户侧，不需要用户参与即可实现充电负荷调控。

### 4.3 充电负荷智能切换策略的需求响应应用分析

进一步地，为了给本文策略的实际应用推广提供参考，根据充电负荷智能切换策略的需求响应应用模型，以充电站获得的补贴额最大为目标，采用粒子群算法对各削峰时段接入两条馈线的在充充电桩数方案进行优化。馈线1为需转供馈线，馈线2为可转供馈线。削峰量任务和实际削峰量如图7所示，优化后接入两条馈线的在充充电桩数如图8所示，各馈线负载率如图9所示。充电站参与需求响应获得的补贴 $D_b$ 为1.26万元。

由图7和图8可知，馈线在10:00—16:00需要进行削峰。为了获得更高的补贴电价，充电站通过DPSS调节接入两条馈线的在充充电桩数，使得实际削峰量接近于削峰量任务，削峰任务完成度为1，充电站能够百分百地完成削峰任务。

由图9可知，在充电站削峰能力充足的时段，馈线1的负载率都削减到安全区上限0.8以下；而

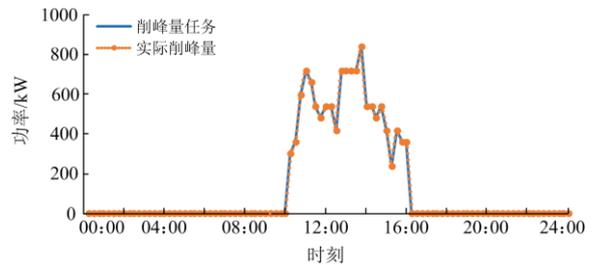


图7 削峰量任务和实际削峰量

Fig. 7 Peak shaving tasks and actual peak shaving volumes

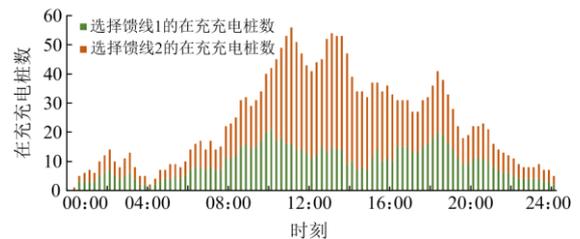


图8 在充充电桩数对比

Fig. 8 Comparison of number of on-charge charging piles

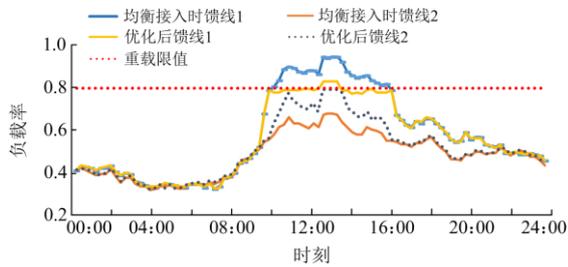


图9 响应前后馈线负载率

Fig. 9 Load factor of feeders before and after response

在充电站削峰能力不够充足的时段, 如在 12:30—13:30, 削峰后馈线 2 的负载率已经接近安全区上限, 但馈线 1 的负载率还大于 0.8, 处于轻微重载状态。因此本文的需求响应方法能够在保证可转供馈线负载安全的基础上充分挖掘其负荷接纳能力, 为需转供馈线提供削峰服务。总体上看, 削峰后馈线 1 的最大负载率由 0.95 降低到 0.83, 削峰率为 12.6%, 馈线 1 由长时严重重载状态转化为短时轻微重载状态, 馈线安全性得到了极大改善。

通过充电负荷智能切换来参与配电网削峰, 充电站可以获得 1.26 万元的补贴, 经济效益良好, 有助于充电站缩短投资成本回收期 and 增大盈利。这说明充电站通过增设 DPSS 进行充电负荷智能切换来增强充电负荷调控能力, 进而利用该资源参与需求响应具有较大的经济价值。

## 5 结论

1) 本文提出一种采用 DPSS 进行充电负荷智能切换的充电负荷调控方法, 从充电桩层面充分挖掘充电负荷的调控潜力, 实时控制接入各馈线的充电桩, 能改善馈线之间的负载均衡度, 为解决充电站接入单馈线造成的过载问题提供新的方法。

2) 本文建立充电负荷智能切换策略的需求响应应用模型。充电站通过充电负荷智能切换来参与配电网削峰, 可获得较高的补贴, 经济效益良好, 有助于缩短投资成本回收期 and 增大盈利。

3) 建议具备条件的中大型充电站采用多台变压器接入两条 10 kV 馈线, 并增设 DPSS 来实现充电负荷智能切换, 以增大充电负荷调控的潜力。

## 参考文献

[1] 杨景旭, 羿应棋, 张勇军, 等. 基于加权分布熵的配电网电动汽车并网运行风险分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 171-179.  
YANG Jingxu, YI Yingqi, ZHANG Yongjun, et al. Operation risk analysis of electric vehicle integrated to grid in distribution network based on weighted distribution

entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 171-179.

- [2] 姚颖蓓, 陆建忠, 傅业盛, 等. 华东地区电动汽车发展趋势及用电需求预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 141-145.  
YAO Yingbei, LU Jianzhong, FU Yesheng, et al. Electric vehicle development trends and electricity demand forecast in East China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 141-145.
- [3] AHMADIAN A, MOHAMMADI-IVATLOO B, ELKAMEL A. Review on plug-in electric vehicles: introduction, current status, and load modeling techniques[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(3): 412-425.
- [4] 李振坤, 钱晋, 宋治儒. 考虑电动汽车停泊概率的配电网接纳电动汽车能力评估方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(11): 31-37.  
LI Zhenkun, QIAN Jin, SONG Zhiru. Evaluation method of electric vehicle hosting capacity in distribution network considering electric vehicle parking probability[J]. Smart Power, 2021, 49(11): 31-37.
- [5] 曲大鹏, 范晋衡, 刘琦颖, 等. 考虑配电网综合运行风险的充电桩接纳能力评估与优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 131-139.  
QU Dapeng, FAN Jinheng, LIU Qiying, et al. Assessment and optimization of charging pile acceptance capacity considering the comprehensive operational risk of a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 131-139.
- [6] 袁小溪, 潘鸣宇, 段大鹏, 等. 基于网格划分的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 19-26.  
YUAN Xiaoxi, PAN Mingyu, DUAN Dapeng, et al. Prediction method of electric vehicle charging load based on grid division[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 19-26.
- [7] 冷祥彪, 孙成龙, 袁太平, 等. 电动汽车有序充电的控制与关键问题综述[J]. 广东电力, 2020, 33(11): 34-43.  
LENG Xiangbiao, SUN Chenglong, YUAN Taiping, et al. Review on control strategies and key problems of coordinated charging and discharging of electric vehicles[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(11): 34-43.
- [8] 吴钉捷, 李晓露. 基于实时出行需求和交通路况的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力建设, 2020, 41(8): 57-67.  
WU Dingjie, LI Xiaolu. Charging load prediction of electric vehicle according to real-time travel demand and traffic conditions[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(8): 57-67.

- [9] 程杉, 杨堃, 魏昭彬, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站有序充放电调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 1-8.  
CHENG Shan, YANG Kun, WEI Zhaobin, et al. Orderly charging and discharging scheduling of an electric vehicle charging station considering price optimization and discharge behavior control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 1-8.
- [10] 廖鑫, 李婧, 徐佳, 等. 基于 MDP 及激励需求响应的电动汽车有序充电控制[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(5): 79-86.  
LIAO Xin, LI Jing, XU Jia, et al. Research on coordinated charging control for electric vehicles based on MDP and incentive demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 79-86.
- [11] 周步祥, 何飞宇, 魏金萧, 等. 基于实时最优恒定功率的电动汽车有序充电策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 18-23.  
ZHOU Buxiang, HE Feiyu, WEI Jinxiao, et al. Orderly charging strategy of electric vehicles based on real-time optimal constant power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 18-23.
- [12] 杨晓东, 张有兵, 赵波, 等. 供需两侧协同优化的电动汽车充放电自动需求响应方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 120-130.  
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, ZHAO Bo, et al. Automated demand response method for electric vehicles charging and discharging to achieve supply-demand coordinated optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 120-130.
- [13] 南斌, 徐成司, 董树锋, 等. 考虑多充电模式的充电桩优化控制策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 2-9.  
NAN Bin, XU Chengsi, DONG Shufeng, et al. Optimized control strategy of charging piles considering multiple charging modes[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 2-9.
- [14] 薛溟枫, 毛晓波, 潘湧涛, 等. 基于 LSTM 神经网络的电动汽车充电站需求响应特性封装及配电网优化运行[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 76-85.  
XUE Mingfeng, MAO Xiaobo, PAN Yongtao, et al. Demand response package model of electric vehicle charging station based on LSTM neural network and optimal operation of distribution network[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 76-85.
- [15] 何方波, 赵明, 王楷, 等. 考虑需求响应的源荷协调多目标优化方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(10): 51-58.  
HE Fangbo, ZHAO Ming, WANG Kai, et al. A multi objective optimization method of source load coordination considering demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(10): 51-58.
- [16] MEDIWATHTHE C P, SMITH D B. Game-theoretic electric vehicle charging management resilient to non-ideal user behavior[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(11): 3486-3495.
- [17] CAI H, CHEN Q, GUAN Z, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 93-107.
- [18] 丁坚勇, 王伊宁, 胡志坚, 等. 基于智能代理分布式管理系统的电动汽车充放电策略[J]. 智慧电力, 2021, 49(7): 1-8.  
DING Jianyong, WANG Yining, HU Zhijian, et al. Electric vehicles charging and discharging strategy based on intelligent-agent distributed management system[J]. Smart Power, 2021, 49(7): 1-8.
- [19] 周念成, 谷飞强, 雷超, 等. 考虑合环电流约束的主动配电网转供优化模型[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3281-3291.  
ZHOU Niancheng, GU Feiqiang, LEI Chao, et al. A power transfer optimization model of active distribution networks in consideration of loop closing current constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2020, 35(15): 3281-3291.
- [20] 沈国辉, 陈光, 赵宇, 等. 基于双目标分层优化和 TOPSIS 排序的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 115-123.  
SHEN Guohui, CHEN Guang, ZHAO Yu, et al. Orderly charging optimization strategy of an electric vehicle based on double objective hierarchical optimization and TOPSIS ranking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 115-123.
- [21] 李景丽, 杨旭晨, 张琳娟, 等. 规模化电动汽车有序充电分层控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 168-175.  
LI Jingli, YANG Xuchen, ZHANG Linjuan, et al. Research on hierarchical control strategy of orderly charging of large-scale electric vehicles[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 168-175.
- [22] MARTIRANO L, PARISE G, GRECO G, et al. Aggregation of users in a residential/commercial building managed by a building energy management system (BEMS)[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 26-34.
- [23] WU J, XUE Y, XIE D, et al. Multi-agent modeling and analysis of EV users' travel willingness based on an

- integrated causal/statistical/behavioral model[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 6(6): 1255-1263.
- [24] 陈恩泽, 张洁琼, 刘刚. 城市居民小区负荷预测方法与接入系统标准[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2016, 28(增刊 1): 25-30.  
CHEN Enze, ZHANG Jieqiong, LIU Gang. Load forecasting method and access standard for urban communities[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2016, 28(S1): 25-30.
- [25] 陈永健. 电动汽车充电站主接线设计和保护配置的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
CHEN Yongjian. Research on electric vehicle charging station main wiring design and protection configuration[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [26] 刘顺炮, 郑建勇, 顾东亮, 等. 基于 IGBT 的混合式自动转换开关研究[J]. *电力自动化设备*, 2006, 26(11): 32-35.  
LIU Shunpao, ZHENG Jianyong, GU Dongliang, et al. Research on hybrid automatic transfer switching based on IGBT[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 26(11): 32-35.
- [27] 胡龙, 王志会, 谭杰仁. 电动汽车充电设施盈利模式及经济效益分析[J]. *电气技术与经济*, 2020(5): 55-59.  
HU Long, WANG Zhihui, TAN Jieren. Profit mode and economic benefit analysis of EV charging facilities[J]. *Electric Techniques and Economy*, 2020(5): 55-59.
- [28] 杨景旭, 张勇军. 考虑需求差异化和配电网运行风险的充电站规划[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(8): 9-20.  
YANG Jingxu, ZHANG Yongjun. Planning of charging stations considering differentiation of demand and operation risk of distribution network[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(8): 9-20.
- [29] SADEGHIAN O, NAZARI-HERIS M, ABAPOUR M, et al. Improving reliability of distribution networks using plug-in electric vehicles and demand response[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 7(5): 1189-1199.
- [30] 黄丽平, 王逸飞, 郭俊韬, 等. 考虑电网负荷均衡度及 N-1 安全约束的防灾经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(13): 56-63.  
HUANG Liping, WANG Yifei, GUO Juntao, et al. Economic dispatch for disaster prevention considering load rate homogeneity of power grid and N-1 security constraints[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(13): 56-63.
- [31] FENG Y, ZHANG W, HAN G, et al. A newborn particle swarm optimization algorithm for charging-scheduling algorithm in industrial rechargeable sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(18): 11014-11027.
- [32] 杨景旭, 李钦豪, 张勇军, 等. 考虑电网需求匹配度的多 EV 聚合商需求响应削峰优化建模[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(8): 125-134.  
YANG Jingxu, LI Qin hao, ZHANG Yongjun, et al. Peak shaving optimization modeling for demand response of multiple EV aggregators considering matching degree of power grid demand[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(8): 125-134.

收稿日期: 2021-10-27; 修回日期: 2022-03-02

作者简介:

林楷东(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为能源互联网优化运行、负荷预测; E-mail: 596875439@qq.com

杨景旭(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车有序控制、智能配网运行与分析; E-mail: 3108043591@qq.com

张勇军(1973—), 男, 教授, 研究方向为电力系统无功规划与电压控制、能源互联网的优化运行等。E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

(编辑 周金梅)