

双楼宇专变供电充电站负荷的时空双维调控建模

张勇军¹,周星月¹,唐 渊¹,杨景旭²,姚蓝霓¹,李其霖¹

(1. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640;

2. 南方电网数字电网研究院有限公司,广东 广州 510670)

摘要:在碳达峰和环境保护需求的推动下,电动汽车的普及速度加快,同时从时间和空间维度挖掘充电负荷的调控潜力可以有效地缓解配电网的扩容压力,基于此提出了双楼宇专变供电充电站负荷的时空特性双重调控方法。介绍了双楼宇专变供电充电站负荷时空特性的双重调控机理,利用双楼宇专变冗余容量和储能系统对充电站进行供电;结合储能充放电调控、充电桩和储能的双电源切换开关切换、充电桩功率实时调度3种调控方法,提出了充电站负荷的时空双维调控策略;提出了结合日前和实时2种时间尺度的充电站优化模型,以电动汽车服务率为优化目标建立储能充放电的日前优化模型,以变压器负荷标准差为目标建立双电源切换开关切换的实时优化模型,以各时段调度成本为目标建立充电桩功率的实时调度模型,通过多样化的调控手段提升充电站的经济性和安全性。通过算例仿真验证了所建模型的有效性。

关键词:电动汽车;充电站;双电源;储能系统;实时调度;时空双维调控

中图分类号:TM732;U469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202210014

0 引言

在碳中和和碳达峰战略目标下,为了实现节能减排,电动汽车(electric vehicle, EV)的普及速度不断加快,配电网的扩容压力随之增大,现有的负荷调控手段不足以消纳未来规模日益增大的充电负荷,未来电网可能需要承受巨大的扩容成本,因此充分挖掘充电负荷的调控潜力、增强配电网消纳充电负荷的能力具有巨大的工程意义^[1]。

现有对充电负荷调控的研究主要集中在时间维度上,例如:对于慢充站而言, EV 的停留时间较长,可以通过分时电价、激励补偿等机制改变用户的充电时间^[2-3];对于快充站而言,可以直接采用充电桩功率控制方法来改善充电负荷的时间特性。但通过改变 EV 的充电时间来实现充电负荷的调控,对用户出行的影响较大^[4-5],而 EV 在快充站的停留时间较短,紧急调度潜力有限。且上述有序充电和需求响应策略往往是在日前单个时间尺度下进行优化决策的,用户行为的不确定性^[6]会导致实际响应后的负荷具有较大的随机性和波动性,很难保证用户的响应量与电网的需求相匹配^[7]。

同时,关于充电负荷空间维度的调控研究也逐渐涌现。文献[8]基于实时群智感知技术为 EV 规划行驶路径,在减少 EV 行驶时间和总充电成本的同

时,实现 EV 负荷空间特性的调控;文献[9-10]利用不同充电站之间的充电电价和充电时间成本差异来引导用户错站充电。但这类错站充电的负荷空间特性调控方式,需要结合交通网络的实时运行状态,确定用户在转移过程中的耗时、耗电,这在目前电网和路网信息交互深度不够的情况下有一定的难度。文献[11]在双电源供电下将充电站的各充电桩固定接入某台变压器,通过 EV 对充电桩的选择改善充电负荷的空间特性,但由于各充电桩接入的变压器固定,充电负荷的可调控容量受限。

此外,从时间或者空间单个维度对 EV 负荷进行调度难以充分挖掘充电负荷的调控潜力,因此有必要结合时间和空间2个维度的调控手段来充分挖掘 EV 充电负荷的调控潜力。为了减少新建变压器投资,已有利用商场、写字楼等楼宇专变为充电站供电的方式^[12]。文献[13]提出了“专变共享”模式,通过调节电价实现单一专变供电充电站负荷时序特性的调控。通常某些楼宇的专变距离较近,且专变为楼宇负荷供电后仍有较大的剩余容量,在该场景下,为充电桩配置低压双电源切换开关(dual power switching switch, DPSS),可实现由相邻的双专变为充电站供电,且通过 DPSS 切换可实现充电桩层级的充电负荷空间转移^[14]。在此基础上,通过配置储能系统(energy storage system, ESS)^[15]、实时优化充电功率等手段可实现充电负荷时序特性的优化,从而实现充电站负荷的时空双维调控。

基于此,为了充分挖掘充电站负荷的时空双重调控潜力,本文提出利用双楼宇专变为充电站供电,通过多种策略实现充电站负荷的时空双维调控。首先,介绍了双楼宇专变供电充电站的负荷调控机理,

收稿日期:2022-07-28;修回日期:2022-09-22

在线出版日期:2022-10-21

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

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52177085) and China Postdoctoral Science Foundation(2020M682704)

基于ESS充放电调控、DPSS切换以及充电桩功率实时调度3种调控方法,提出了充电站负荷时空双维调控策略;然后,基于3种调控方法,提出了充电站的日前-实时优化模型,其中ESS充放电调控的日前优化以EV服务率为目标,DPSS接入位置和充电桩功率的实时优化分别以变压器负荷标准差和调度成本为目标,兼顾了充电站、楼宇、EV用户多方的利益;最后,通过算例仿真验证了本文所提模型的有效性。

1 双楼宇专变供电充电站的调控机理

在本文的研究场景中,充电站通过租借邻近双楼宇专变的冗余容量为充电桩供电,无需投运新的变压器,大幅减小了建设成本。同时充电站投建ESS,控制ESS在专变冗余容量较大的时段充电,在专变容量不足的时段放电为充电站供电,从而充分利用双楼宇的专变容量,保证充电站的连续稳定供电。双楼宇专变供电充电站的接线方式如图1所示。ESS和各充电桩均配置了DPSS,通过对DPSS的操作,各充电桩和ESS可选择切换接入容量充足的变压器下充电,ESS可选择切换接入容量不足的变压器放电为充电站供电,从而在空间维度上实现负荷调控。当专变冗余容量和ESS放电容量无法满足站内EV的充电需求时,充电站可以通过对各充电桩功率的实时调控改善负荷的时序特性,实现EV之间充电功率的合理分配,从而为更多的EV提供充电服务。

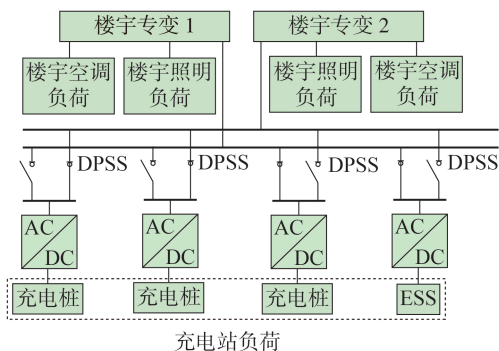


图1 双楼宇专变供电充电站的接线方式

Fig.1 Connection mode of charging station powered by bi-building transformers

楼宇用户通过收取专变容量租费以获利。充电站向楼宇支付的专变租费包括固定的基础租费以及时变的实时租费,固定的基础租费根据专变的额定容量按天支付,使楼宇有义务为充电站提供充足的专变容量,时变的实时租费根据充电站各时段租借的实际容量按时段支付。楼宇专变以供应楼宇负荷为首要任务,但由于楼宇有为充电站提供充足专变容量的义务,故当楼宇负荷较大而无法提供充电站

租借需求时,楼宇需要为充电站提供调度补贴以激励充电站对EV充电负荷进行调控,从而保证楼宇负荷的正常供应。因此,充电站的运行成本包括楼宇专变容量租费、购电费用、对EV充电功率进行调控的经济补偿成本,收入包括为EV提供充电服务的电费收入、服务费收入和专变冗余容量不足时段实施实时调度获得的专变调度补贴。在该调控模式下,充电站可为更多的EV提供服务,充电站和楼宇均能获得更多的收益,楼宇、充电站、EV用户多方的利益得到兼顾。

各主体的权利及义务见附录A,各主体间的关系示意图如附录A图A1所示。

2 充电站负荷时空双重调控优化策略

双楼宇专变供电模式下充电站有以下3种调控策略:策略1通过合理安排ESS的充放电时段,使ESS在变压器容量不足时放电为充电站供电,从而使充电站为更多的EV提供充电服务;策略2通过操作DPSS实现充电桩负荷和ESS负荷在不同变压器之间的切换,实现变压器负荷均衡;策略3对充电桩功率进行实时调度,合理分配各EV的充电功率,提高充电站运行的经济性。

策略1中ESS充放电状态的优化不受用户侧约束,充电站可自主实施,可作为充电站的常规调控措施,以满足充电站负荷的日前调度需求。策略2中充电桩和ESS的DPSS接入位置需要根据各充电桩的实时功率进行优化。策略3中的充电桩功率则需要根据EV的实时充电需求进行优化。相较于策略1根据充电站的整体负荷调控ESS充放电状态,策略2和策略3均是对单台充电桩进行控制,调控精度更高,特别是策略3对用户的充电活动具有较大的影响,需要用户密切配合,实施难度较大,因此需要在实时时间尺度下实施,可将其作为紧急调度需求下充电站的辅助调控策略。

充电站的运行调控流程图如图2所示,在每个时段充电站需要综合多方面的信息进行决策,确定充电桩、ESS的DPSS接入位置和充放电功率,具体步骤见附录A。

3 双楼宇专变供电充电站的优化模型

为了保证充电站的利益,ESS调控策略以EV服务率为目标,使充电站能够为更多的EV提供服务从而获取更多的服务费;充电桩和ESS的DPSS接入位置优化以专变负荷均衡率为目标,在提高专变冗余容量利用率的同时兼顾安全性;充电桩功率实时调度则以调度成本最小为优化目标,以提高充电站的经济性。

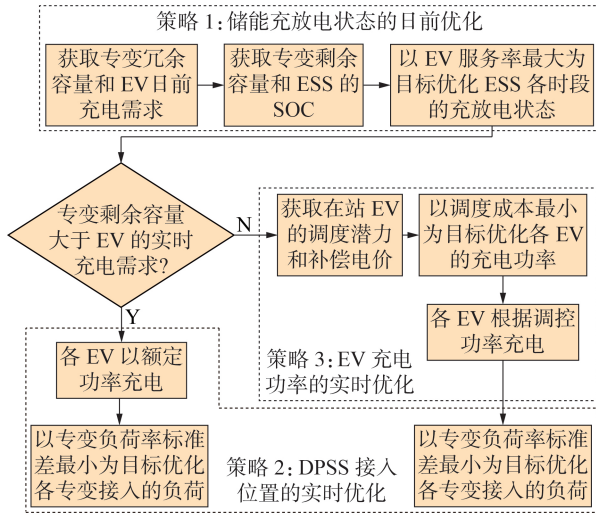


图2 充电站的运行调控流程图

Fig.2 Flowchart of operation regulation of charging station

3.1 ESS 日前优化模型

在日前优化部分,根据专变冗余容量和EV计划充电需求,对充电站ESS的充放电状态进行优化,使充电站在各时段都能为尽可能多的EV充电。

3.1.1 ESS 模型

ESS的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} E_{ES}(t) = E_{ES}(t-1) + P_{ES}(t)\Delta t \\ S_{ES}(t) = \frac{E_{ES}(t)}{E_{ESN}} \\ S_{ES, \min} \leq S_{ES}(t) \leq S_{ES, \max} \\ -P_{ESN} \leq P_{ES}(t) \leq P_{ESN} \end{cases} \quad t \in [t_1, t_e] \quad (1)$$

式中: $E_{ES}(t)$ 、 $P_{ES}(t)$ 分别为 t 时段 ESS 的电量、充放电功率; Δt 为时段间隔; $S_{ES}(t)$ 为 t 时段 ESS 的荷电状态 (state of charge, SOC); E_{ESN} 为 ESS 的额定容量; $S_{ES, \max}$ 、 $S_{ES, \min}$ 分别为 ESS 的 SOC 上、下限; P_{ESN} 为 ESS 的额定充放电功率; t_1 、 t_e 分别为每天的初始时段和结束时段。

特别地,考虑到 ESS 在每天完成充放电后的剩余电量需要与当天初始时段开始充电前的电量保持一致,因此 ESS 模型需满足如下约束:

$$E_{ES}(t_1) = E_{ES}(t_e) + P_{ES}(t_1)\Delta t \quad (2)$$

3.1.2 ESS 优化目标

在日前阶段,以充电站全天的 EV 服务率最大为目标优化 ESS 各时段的充放电状态,目标函数可表示为:

$$\max \eta_s = \frac{D_{ev-r}}{D_{ev-p}} \times 100\% \quad (3)$$

$$D_{ev-r} = \sum_{t=t_1}^{t_e} P_{ev-o}(t)\Delta t \quad (4)$$

$$P_{ev-o}(t) = S_r(t) - P_{ES}(t) \quad (5)$$

式中: η_s 为充电站全天的 EV 服务率; D_{ev-p} 为 EV 的总计划充电需求; D_{ev-r} 为充电站全天可为 EV 提供的实际充电电量; $P_{ev-o}(t)$ 为 t 时段充电站的供电功率; $S_r(t)$ 为 t 时段双楼宇专变冗余容量之和。

3.1.3 ESS 的优化变量及方法

日前阶段以充电站全天的 EV 服务率最大为优化目标,对 ESS 各时段的充放电状态进行优化,求解变量为离散变量,采用改进的离散粒子群优化算法^[16]对其进行求解,粒子位置为 ESS 各时段的充放电状态,即:

$$P_{ES}(t) = \alpha_{ES}(t)P_{ESN} \quad \alpha_{ES}(t) \in \{-1, 0, 1\} \quad (6)$$

式中: $\alpha_{ES}(t)$ 为 t 时段 ESS 的充放电状态,放电时取值为 -1, 不充不放时取值为 0, 充电时取值为 1。

3.2 充电桩和 ESS 的 DPSS 接入位置实时优化

对 ESS 的充放电状态进行优化之后,在实时阶段根据 EV 的充电需求对各充电桩和 ESS 的 DPSS 接入位置进行优化,使 2 台专变的负荷不均衡程度最小。

3.2.1 双专变负荷的优化目标及约束条件

本文采用专变负荷率标准差评估双专变负荷的均衡程度,负荷率标准差越小,则负荷均衡程度越高。 t 时段 2 台专变的负荷率标准差 $\sigma(t)$ 可表示为:

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{p_0} \sum_{p=1}^{p_0} \left(\lambda(p, t) - \frac{1}{p_0} \sum_{p=1}^{p_0} \lambda(p, t) \right)^2} \quad (7)$$

$$\lambda(p, t) = \frac{P_b(p, t) + P_{st}(p, t)}{S(p)} \quad (8)$$

$$P_{st}(p, t) = \beta_{ES}(p, t)P_{ES}(t) + P_{EV}(p, t) \quad (9)$$

$$P_{EV}(p, t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_{EV}(t)} \beta_{EV}(i, p, t)P_{EVN} & S_r(t) \geq 0 \\ \sum_{i=1}^{N_{EV}(t)} \beta_{EV}(i, p, t)P_{sd}(i, t) & S_r(t) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$S_r(t) = S_r(t) - P_{ES}(t) - P_{EVN}N_{EV}(t) \quad (11)$$

式中: p_0 为专变数量,本文中取值为 2 台; $\lambda(p, t)$ 为 t 时段专变 p 的负荷率; $P_b(p, t)$ 、 $P_{st}(p, t)$ 分别为 t 时段专变 p 的楼宇负荷、充电站负荷; $S(p)$ 为专变 p 的额定容量; $\beta_{ES}(p, t)$ 为 ESS 的接入位置变量,取值为 1 表示 t 时段 ESS 接入专变 p , 取值为 0 表示不接入专变 p ; $P_{EV}(p, t)$ 为 t 时段专变 p 下的 EV 负荷; $N_{EV}(t)$ 为 t 时段充电站中的 EV 数量; $\beta_{EV}(i, p, t)$ 为 EV 所在充电桩 DPSS 的接入位置变量,取值为 1 表示 t 时段第 i 辆 EV 所在充电桩的 DPSS 接入专变 p , 取值为 0 表示不接入专变 p ; P_{EVN} 为 EV 的额定充电功率; $P_{sd}(i, t)$ 为 t 时段第 i 辆 EV 调控后的充电功率; $S_r(t)$ 为 t 时段专变按 EV 原充电需求为充电站供电后的虚拟剩余容量。

则双专变负荷的优化目标可表示为:

$$\min \sigma(t) \quad (12)$$

当通过 DPSS 将充电站负荷和 ESS 切换到其他专变时,需要保证双专变不过载,即需满足:

$$\lambda(p, t) \leq 1 \quad t \in [t_1, t_e] \quad (13)$$

3.2.2 双专变负荷优化变量和求解方法

双专变负荷优化变量为各充电桩和 ESS 的 DPSS 接入 2 台专变的位置,为离散变量,采用改进的离散粒子群优化算法^[16]分时段进行优化求解,粒子位置为各 DPSS 的接入位置,粒子维度为相应时段充电站需投入的 DPSS 数量。以变压器负荷率标准差最小为目标进行迭代优化,寻找最优的充电桩、ESS 的 DPSS 接入位置方案。充电站根据最优方案调整各 DPSS 的接入位置,实现专变负荷均衡。

3.3 充电桩功率实时调度优化模型

3.3.1 EV 充电负荷模型

以锂电池为对象,在建模过程中忽略电池的自放电过程,并近似认为每个优化时段内的充电功率恒定,可得到单辆 EV 的充电模型为:

$$\begin{cases} S_{ne}(i) = C_0(S_{ex}(i) - S_0(i)) \\ S_{ev}(i, t+1) = S_{ev}(i, t) + \frac{\eta P_{ev}(i, t) \Delta t}{C_0} \\ \eta \sum_{t=t_{ar}(i)}^{t_{le}(i)} \frac{P_{ev}(i, t) \Delta t}{C_0} = S_{ne}(i) \\ 0 \leq P_{ev}(i, t) \leq P_{EVN} \quad t \in [t_{ar}(i), t_{le}(i)] \end{cases} \quad (14)$$

式中: C_0 为 EV 电池的容量; $S_{ex}(i)$ 、 $S_0(i)$ 分别为第 i 辆 EV 的期望 SOC、到站 SOC; $S_{ne}(i)$ 为第 i 辆 EV 的充电需求; η 为 EV 的充电效率; $S_{ev}(i, t)$ 为 t 时段第 i 辆 EV 的 SOC; $P_{ev}(i, t)$ 为 t 时段第 i 辆 EV 的充电功率; $t_{ar}(i)$ 、 $t_{le}(i)$ 分别为第 i 辆 EV 的到站时段、预计离开时段。

3.3.2 EV 实时调控潜力

根据用户的出行需求,并结合 EV 当前时段的 SOC 可以计算得到其客观调控能力,即:

$$P_o(i, t) = P_{EVN} - P_m(i, t) \quad (15)$$

$$P_m(i, t) = \min \{ P_{m1}(i, t), P_{EVN} \} \quad (16)$$

$$P_{m1}(i, t) = \frac{C_0(S_{ex}(i) - S_{ev}(i, t)) - \eta P_{EVN} T_{re}(i, t)}{\eta \Delta t} \quad (17)$$

$$T_{re}(i, t) = t_{le}(i) - t \quad (18)$$

式中: $P_o(i, t)$ 为 t 时段第 i 辆 EV 的客观调控能力; $P_m(i, t)$ 为 t 时段第 i 辆 EV 的最小充电功率; $P_{m1}(i, t)$ 为保证第 i 辆 EV 在剩余驻留时间 $T_{re}(i, t)$ 内达到期望 SOC $S_{ex}(i)$ 的最小充电功率。

对于用户而言, EV 充电功率的调控意味着充电时间的延长,充电站需要为参与调控的用户提供一定的经济补偿。按照消费者心理学模型,调度功率越大,充电站需要支付的补偿电价越高,才能保证用

户的满意度。建立 EV 用户调度意愿(调度功率占调度潜力的比例)和补偿电价的关系模型,如附录 A 图 A2 所示。图中: c 为充电站对 EV 用户单位响应电量的补偿电价; f 为用户的调度意愿,计算公式如式(19)所示。

$$f(i, t) = \begin{cases} 0 & c(i, t) < c_1 \\ \frac{c(i, t) - c_1}{c_m - c_1} f_m & c_1 \leq c(i, t) < c_m \\ f_m & c(i, t) \geq c_m \end{cases} \quad (19)$$

式中: $f(i, t)$ 为 t 时段第 i 辆 EV 用户的调度意愿; $c(i, t)$ 为 t 时段第 i 辆 EV 用户的补偿电价; f_m 为用户的最高调度意愿; c_1 为临界补偿电价,当补偿电价低于临界补偿电价时,用户不接受调度; c_m 为饱和补偿电价,当补偿电价不低于饱和补偿电价时,用户调度意愿总保持为 f_m 。

为了保证用户的出行需求和充电满意度,结合其客观调控能力和主观调度意愿计算调控潜力,如式(20)所示。

$$P_{cap}(i, t) = f(i, t) P_o(i, t) \quad (20)$$

式中: $P_{cap}(i, t)$ 为 t 时段第 i 辆 EV 的调控潜力。

3.3.3 实时调度优化模型及求解方法

以充电站总调度成本最小为目标对在站 EV 的充电功率进行调控,实时调度的目标函数可表示为:

$$\min F_{sd}(t) = \sum_{i=1}^{N_{sd}(t)} (P_{EVN} - P_{sd}(i, t)) c(i, t) \Delta t \quad (21)$$

式中: $F_{sd}(t)$ 为 t 时段的实时调度成本; $N_{sd}(t)$ 为 t 时段实时调控的 EV 数量。

在实时调度中需要保证总调度功率在调度需求裕度内,各 EV 的充电功率需要满足最小充电功率和额定充电功率限制,其补偿电价也需要处于充电站提供的补偿电价范围之内,调度的 EV 数量和站内 EV 总数量还需要满足充电桩和停车位数量限制,即实时调度优化模型需满足的约束条件如下:

$$\delta_0 S_{tr}(t) \leq \sum_{i=1}^{N_{sd}(t)} (P_{EVN} - P_{sd}(i, t)) \leq \delta_m S_{tr}(t) \quad (22)$$

$$P_m(i, t) \leq P_{sd}(i, t) \leq P_{EVN} \quad (23)$$

$$0 \leq c(i, t) \leq c_m \quad (24)$$

$$N_{sd}(t) \leq N_{pi} \quad (25)$$

$$N_{EV}(t) \leq N_{pi} + N_{pa} \quad (26)$$

式中: δ_m 、 δ_0 分别为调度需求的上、下裕度; c_m 为充电站的最高补偿电价; N_{pi} 、 N_{pa} 分别为充电站内的充电桩、停车位数量。

假设智能充电桩的功率可由控制器实现连续调节,则式(21)为连续非线性优化问题,在各时段采用粒子群优化算法^[17]对 EV 调度功率进行优化,粒子位置为各 EV 的充电功率,粒子维度为相应时段调度的 EV 数量。以充电站调度成本最小为目标进行迭

代优化,寻找最优的调度方案,充电站基于此调整各EV所在充电桩的功率。

3.4 充电站净收益模型

充电站的净收益模型可表示为:

$$B=B_{ev}+B_{zb}-F_{zb}-F_{buy}-F_{sd} \quad (27)$$

$$B_{ev}=\sum_{t=t_1}^{t_e}(B_{ev-g}(t)+B_{ev-ser}(t)) \quad (28)$$

$$B_{ev-g}(t)=\sum_{i=1}^{N_{EV}(t)}c_g(t)P_{ev}(i,t)\Delta t \quad (29)$$

$$B_{ev-ser}(t)=\sum_{i=1}^{N_{EV}(t)}c_{ser}(t)P_{ev}(i,t)\Delta t \quad (30)$$

$$B_{zb}=\sum_{t=t_1}^{t_e}\sum_{i=1}^{N_{EV}(t)}(P_{EVN}-P_{sd}(i,t))c_{zb}\Delta t \quad (31)$$

$$F_{zb}=F_{zb0}+\sum_{t=t_1}^{t_e}F_{zbs}(t) \quad (32)$$

$$F_{zb0}=\omega_0\sum_{p=1}^{p_0}S(p) \quad (33)$$

$$F_{zbs}(t)=\omega_{zb}P_{zb}(t)\Delta t \quad (34)$$

$$F_{buy}=\sum_{t=t_1}^{t_e}\left(P_{ES}(t)+\sum_{i=1}^{N_{EV}(t)}P_{ev}(i,t)\right)c_g(t)\Delta t \quad (35)$$

式中: B 为充电站的单日净收益; B_{ev} 为充电站为EV提供充电服务的收入,包括各时段的电费收入 $B_{ev-g}(t)$ 和服务费收入 $B_{ev-ser}(t)$; $c_g(t)$ 、 $c_{ser}(t)$ 分别为 t 时段的充电电价、服务电价; B_{zb} 为专变对充电站实时调度的补贴; c_{zb} 为专变对充电站实时调度的补贴单价; F_{zb} 为充电站租借楼宇专变的总费用,包括单日基础租费 F_{zb0} 和各时段的实时租费 $F_{zbs}(t)$; ω_0 为专变单位容量的基础租费; $P_{zb}(t)$ 为 t 时段向专变租借的实际功率; ω_{zb} 为专变容量实时租借单价; F_{buy} 为充电站的总购电费用。

4 算例分析

4.1 仿真参数设置

本文设定充电站向2栋楼宇专变(专变1、专变2)租借容量,2台专变的容量分别为1250、2000 kV·A,其楼宇负荷曲线如附录B图B1所示。本文在4.2 GHz处理器和16 GB内存的计算机上进行仿真。设计划到充电站充电的EV数量为600辆。充电站的ESS额定容量为500 kW·h,额定充放电功率为180 kW, $S_{ES,max}$ 、 $S_{ES,min}$ 分别为0.9、0.2,时段间隔 Δt 取15 min。分时电价如附录B表B1所示。智能充电桩的额定充电功率为60 kW,充电桩数量 $N_{pi}=50$ 台,停车位个数 $N_{pa}=20$ 。EV参数如附录B表B2所示,EV的充电和出行规律参考文献[18],生成EV日前充电需求如附录B图B2所示。EV用户的临界补偿电价 c_l 和饱和补偿电价 c_m 分别为2、3元/(kW·h);充电站的最高补偿电价 $c_{cm}=3.5$ 元/(kW·h)。专变每日单位容量

的基础租费 $\omega_0=1$ 元/(kW·h),专变每小时的租借单价 $\omega_{zb}=0.1$ 元/(kW·h),专变对充电站的补贴单价 $c_{zb}=0.5$ 元/(kW·h)。

4.2 双重调控策略的有效性分析

为了分析充电站双重调控策略的优化效果,将本文所提策略与无序充电策略(充电站既不配置ESS,也不对EV进行实时调度)进行对比。优化充电前、后充电站的充电负荷曲线如图3所示,相关指标如表1所示。

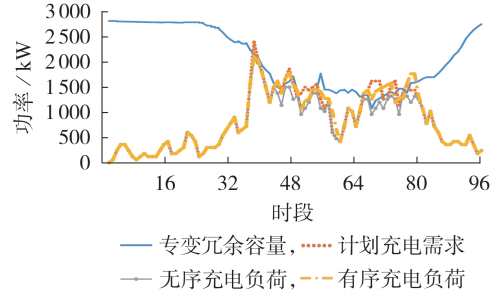


图3 优化充电前、后充电负荷曲线

Fig.3 Charging load curves before and after optimization charging

表1 优化充电前、后的指标结果对比

Table 1 Comparison of index results before and after optimization charging

指标	结果		指标	结果	
	优化前	优化后		优化前	优化后
服务EV数量/辆	461	504	总专变租费/元	5083	5253
EV服务率/%	76.8	84.0	实时调度成本/元	0	967
净收益/元	22412	24754	总购电费用/元	13315	14541
服务费收入/元	27495	30072	专变补贴/元	0	768
电费收入/元	13315	14654			

由图3可知,当专变冗余容量无法满足计划充电需求时(时段65—80),受专变冗余容量的限制,无序充电策略下的EV负荷小于计划充电需求,部分EV无法在该充电站完成充电。而在本文所提调控策略下,由于配置了ESS,当专变冗余容量不足时,通过控制ESS放电,充电站可为EV提供更大的充电功率,且由于对EV进行了实时调度,专变冗余容量不足时部分充电负荷转移到后续时段,总体上满足了更多EV的充电需求。

由表1可知,在本文所提调控策略下,充电站可以为更多的EV充电,相较于无序充电策略,服务EV数量由461辆提高到504辆,EV服务率和服务费收入分别提高到84.0%和30072元,充电站的净收益因此得到提升,从22412元提高到24754元,增加了2342元。此时楼宇专变冗余容量得到充分利用,相

比于不出租专变,楼宇能获得更大的收益,充电站可服务EV数量也增加,社会整体效益得到提升,验证了本文所提调控策略的有效性。

此外,在本文的仿真中,利用粒子群优化算法实现每个时段实时策略的优化只需要2 s,可以满足实时优化的计算需求。

4.3 双重调控策略的时间维度调控有效性分析

4.3.1 配置ESS的有效性分析

为了分析充电站配置ESS的有效性,对比分析有、无ESS时充电站的运营情况。有、无ESS时的充电负荷曲线和ESS的SOC曲线分别如附录C图C1和图C2所示,充电站收益和相关指标结果如表2所示。

表2 有、无ESS时的指标结果对比

Table 2 Comparison of index results between with and without ESS

指标	结果	
	无ESS	有ESS (额定容量为500 kW·h)
服务EV数量/辆	461	471
EV服务率/%	76.8	78.6
净收益/元	22 412	23 191
服务费收入/元	27 495	28 125
电费收入/元	13 315	13 684
总专变租费/元	5 083	5 111
总购电费用/元	13 315	13 507

由图C1和图C2可知:ESS会在专变容量充足时段进行充电,并在专变容量不足时段放电;时段19之前ESS的SOC稳步增长,ESS快速完成充电并保持较高电量;而在时段38—55,充电负荷出现第1个高峰,专变容量出现短缺,ESS放电为充电站提供更大的供电功率,其SOC因此降低;在时段56—66,专变容量充足,ESS再次充电;在第2个负荷高峰时段67—80,专变容量不足,ESS放电为充电站供电,ESS的SOC降低。可见,ESS主要在充电需求高峰时段前充电并保持较高的电量,在专变容量无法满足EV充电需求的时段放电,增加充电站的服务EV数量,提高其服务能力。

由表2可知,当充电站不配置ESS时,有139辆EV无法完成充电,充电站配置容量为500 kW·h的ESS后,无法完成充电的EV数减少到129辆。此时充电站可在专变容量不足时段通过控制ESS放电为更多的EV提供充电服务,其净收益因服务费收入的提高而增加,相比不配置ESS时充电站的净收益提高了779元。上述结果表明充电站配置ESS可提高经济性。

4.3.2 不同容量配置下ESS的成本分析

为了分析充电站配置不同容量ESS的成本,设定3种不同的ESS配置方案:方案1的额定功率为

180 kW,额定容量为500 kW·h;方案2的额定功率为360 kW,额定容量为1 000 kW·h;方案3的额定功率为540 kW,额定容量为1 500 kW·h。不同ESS容量配置下的SOC曲线如附录C图C3所示,充电站的运行调控结果如表3所示。

表3 不同ESS容量配置下的指标结果对比

Table 3 Comparison of index results under different ESS capacities

评估对象	指标	结果		
		方案1	方案2	方案3
ESS	单日运行成本/元	440	880	1 320
充电站服务能力	服务EV数量/辆	471	476	473
	EV服务率/%	78.6	79.4	78.8
充电站收益	净收益/元	23 191	23 445	23 363
	考虑ESS成本后的净收益/元	779	1 033	951
	服务费收入/元	28 125	28 192	27 900
	电费收入/元	13 684	13 685	13 529
	总专变租费/元	5 111	5 102	5 069
	总购电费用/元	13 507	13 330	12 997

由图C3可以看出,不同的容量配置下ESS的SOC曲线较为一致,均随着EV充电需求不满足电量的变化而变化,ESS在专变容量短缺前完成充电并保持较高的电量,在专变容量短缺时段放电为充电站供电。目前ESS常用的磷酸铁锂电池的成本大约为1 320元/(kW·h)^[19],电池的循环次数约为3 000次。由图C3可知,不同容量配置下ESS每天的循环次数均为2次,由此可计算得到ESS的单日运行成本,结果如表3所示。

由表3可知,充电站在配置容量为500 kW·h的ESS后净收益为23 191元,而不配置ESS时净收益为22 412元,两者的差额为779元,且配置方案1下ESS的单日运行成本为440元,考虑ESS运行成本后充电站仍有盈利,且相较于其他容量配置方案,该配置方案下充电站的盈利最大,因此该充电站配置的ESS最佳额定容量为500 kW·h。

4.3.3 实时调度的有效性分析

为了验证实时调度的有效性,对比分析实施实时调度前、后的优化效果。实时调度前、后的充电负荷如附录C图C4所示,充电站相关指标结果如表4所示。

由图C4可知,在全天96个时段中,共有21个时段专变容量短缺,若不实施实时调度,则部分EV无法完成充电,实际的充电负荷低于计划充电需求。实施实时调度优化后,有261辆EV的充电功率受到调控,这些EV在调度时段的平均功率为55 kW。可见,实时调度可以在专变冗余容量不足的时段对在站EV的充电功率进行合理调控,从而转移充电负荷,使EV在后续专变容量充足的时段完成充电,从

表4 实时调度前、后的指标结果对比

Table 4 Comparison of index results before and after real-time scheduling

指标	结果	
	只配置额定容量为500 kW·h的ESS	配置额定容量为500 kW·h的ESS+实时调度
服务EV数量/辆	471	504
EV服务率/%	78.6	84.0
净收益/元	23 191	24 754
服务费收入/元	28 125	30 072
电费收入/元	13 684	14 654
总专变租费/元	5 111	5 253
调度成本/元	0	967
总购电费用/元	13 507	14 541
专变补贴/元	0	768

而使充电站可以为更多的EV提供充电服务。

由表4可知,相较于实施实时调度前,实施实时调度后,服务EV数量从471辆提高为504辆,EV服务率提高为84.0%,充电站净收益提高为24 754元,增加了1 563元。可见,虽然实施实时调度时充电站需要对接受调度的EV用户给予一定的补偿,专变租费也因为租借容量的增加而有所提高,但由于充电站服务费收入增加更多,且楼宇对充电站的实时调度进行了补贴,因此充电站的净收益得到提升,实时调度的有效性得到验证。

4.4 双重调控策略的空间维度调控有效性分析

为了验证本文所提调控策略对负荷空间特性的优化效果,对比分析本文进行DPSS接入位置优化(情景a)和不切换DPSS(情景b,ESS固定接入专变1,EV负荷均衡接入双专变)这2种情景。不同情景下的专变负荷率和负荷率标准差分别如附录C图C5和图4所示,专变负荷指标结果如表5所示。

由图C5、图4和表5可知,在情景b下,专变的负荷波动较大,且2台专变的负荷率相差较大,平均负荷率标准差达到0.09。由于此时无法合理分配充电负荷,专变容易出现重过载情况,例如专变2在情景b下的负荷合格率仅为0.73,严重超出变压器的承载

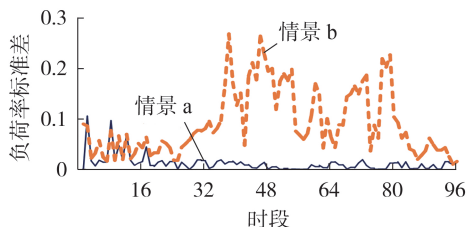


图4 不同情景下的专变负荷率标准差

Fig.4 Standard deviation of transformers' load rate under different scenarios

表5 不同情景下的专变负荷指标结果

Table 5 Load index results of transformers under different scenarios

情景	双专变负荷率标准差平均值	负荷合格率($\lambda < 100\%$)	
		专变1	专变2
a	0.01	1	1
b	0.09	0.95	0.73

能力,这会损害变压器的寿命。而相较于情景b,通过合理优化各充电桩和ESS的DPSS接入位置(情景a),专变2的负荷合格率由0.73提高为1,2台专变负荷率标准差平均值也由0.09降为0.01,各时段的负荷率标准差始终保持较低的水平,EV负荷的空间特性得到明显的改善。可见,有必要通过DPSS切换对充电站负荷的空间特性进行调控,在为更多EV提供充电服务的同时,可以避免变压器过载,并实现专变负荷均衡。

5 结论

本文提出了一种双楼宇专变供电充电站负荷的时空双维调控策略。通过仿真分析可以得到以下结论。

1)采用本文所提调控策略后,楼宇专变用户可获得的净收益为4 286元,充电站的净收益和服务EV数量分别提高了10.4%和7.2%,社会整体效益得到提升,所提调控策略的经济性得到验证。

2)充电站在配置ESS后,能够在专变容量不足时段通过ESS放电增加充电站服务的EV数量,缓解楼宇专变的压力;采取实时调度可以在负荷高峰时段转移部分充电负荷,总体上可使充电站为更多的EV提供充电服务,从而提高充电站的经济收益。

3)对各时段充电桩和ESS的DPSS接入位置进行优化后,2台专变的负荷率标准差平均值降低了88.9%,专变负荷合格率提升了27%,实现了双楼宇专变负荷均衡,避免了变压器过载,同时更充分地利用了变压器容量为充电站供电。

后续将进一步考虑楼宇负荷的响应,通过调节楼宇用电负荷来改变各时段的专变冗余容量,方便EV用户充电的同时提高楼宇用户的收益。另外,如何实现充电站有功功率和无功功率的协同优化以及如何解决充电桩运行带来的谐波污染和电能质量责任的分配问题,是笔者下一步要深入研究的内容。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

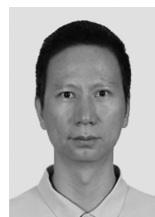
参考文献:

- [1] 范苏纯,黄向敏,张勇军,等. 计及有序充电的配电变压器扩展规划建模[J]. 电力系统自动化,2021,45(7):62-70.

FAN Suchun, HUANG Xiangmin, ZHANG Yongjun, et al. Mo-

- deling of expansion planning for distribution transformer considering orderly charging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 62-70.
- [2] 董运昌,刘世民,曲朝阳,等. 计及用户响应电价关联与多主体共赢的电动汽车充放电定价优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 134-142.
- DONG Yunchang, LIU Shimin, QU Zhaoyang, et al. Charging and discharging pricing optimization of electric vehicles considering correlation of user response to electricity price and win-win results of multi-stakeholder[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 134-142.
- [3] 王敏,吕林,向月. 计及V2G价格激励的电动汽车削峰协同调度策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 27-33, 85.
- WANG Min, LÜ Lin, XIANG Yue. Coordinated scheduling strategy of electric vehicles for peak shaving considering V2G price incentive[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 27-33, 85.
- [4] 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.
- [5] CAI H, CHEN Q, GUAN Z, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection & Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 93-107.
- [6] 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.
- [7] 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 Qinhao, 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.
- [8] YANG H M, DENG Y J, QIU J, et al. Electric vehicle route selection and charging navigation strategy based on crowd sensing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2214-2226.
- [9] ZHANG Yongjun, YANG Jingxu, LI Qinhao, et al. Special transformer sharing mode: Utilizing special transformers of buildings to supply power for charging stations[J/OL]. IET Generation, Transmission & Distribution. [2022-04-01]. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12464>.
- [10] 王鹤,冷贤达,潘禹含,等. 考虑时空特性及时间成本的电动汽车有序充放电策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 86-91, 133.
- WANG He, LENG Xianda, PAN Yuhan, et al. Orderly charging and discharging strategy of electric vehicle considering spatio-temporal characteristic and time cost[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 86-91, 133.
- [11] 李欣,杨景旭,刘艳萍,等. 基于充电桩选择策略的双馈线负荷优化和削峰潜力分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 34-40.
- LI Xin, YANG Jingxu, LIU Yanping, et al. Dual feeder load optimization and peak shaving potential analysis based on charging pile selection strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 34-40.
- [12] 杨景旭,李钦豪,张勇军,等. 联合专变共享模式下的电动汽车有序充电联合调节方法: CN112757954A[P]. 2021-05-07.
- [13] 杨景旭,周来,张勇军,等. “专变共享”模式下考虑时变电价和转移概率的EV有序充电[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 173-180, 193.
- YANG Jingxu, ZHOU Lai, ZHANG Yongjun, et al. Ordered charging of EVs considering time-varying electricity price and transition probability under “dedicated transformer sharing” mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 173-180, 193.
- [14] 万正伟. 一种基于双电源投切的应急充电桩: CN108382238A[P]. 2018-08-10.
- [15] AFFONSO C D M, KEZUNOVIC M. Technical and economic impact of PV-BESS charging station on transformer life: a case study[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4683-4692.
- [16] 徐泽,杨伟,张文强,等. 基于连锁环网与改进离散粒子群算法的多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 114-123.
- XU Ze, YANG Wei, ZHANG Wenqiang, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on chain loops and improved binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 114-123.
- [17] 唐佳,王丹,贾宏杰,等. 基于元模型辅助粒子群算法的主动配电网最优经济运行[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 95-103.
- TANG Jia, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Optimal economic operation of active distribution networks based on hybrid algorithm of surrogate model and particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 95-103.
- [18] 王浩林,张勇军,毛海鹏. 基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 207-213.
- WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 207-213.
- [19] 许强,王维,吉同舟,等. 考虑负荷优化的光储充电站储能经济性配置研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2021, 21(2): 15-21.
- XU Qiang, WANG Wei, JI Tongzhou, et al. Research on energy storage economic allocation of photovoltaic and energy-storage integrated charging station considering load optimization[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2021, 21(2): 15-21.

作者简介:



张勇军

张勇军(1973—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统无功规划与控制、能源互联网的运行优化等(E-mail: zhangjun@scut.edu.cn);

周星月(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充电调度(E-mail: 971982462@qq.com);

唐渊(1990—),男,博士后,博士,通信作者,主要研究方向为新能源并网调度运行、虚拟电厂等(E-mail: tangyuan@scut.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Time-space two-dimensional regulation modeling of charging station load powered by bi-building special transformers

ZHANG Yongjun¹, ZHOU Xingyue¹, TANG Yuan¹, YANG Jingxu², YAO Lanni¹, LI Qilin¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Digital Grid Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510670, China)

Abstract: Driven by the demand of carbon emission reduction and environmental protection, the popularization of electric vehicles has been accelerated. Meanwhile, exploring the regulation potential of charging load from time and space dimensions can effectively alleviate the expansion pressure of distribution network. Based on this, a two-dimensional regulation method of time-space characteristics for charging station load powered by bi-building special transformers is proposed. The two-dimensional regulation mechanism of charging station load time-space characteristics is introduced. The charging station is powered by the redundant capacity of the bi-building special transformers and the energy storage system. Combining three regulation methods, namely the energy storage charging and discharging regulation, the switching of dual power switching switch (DPSS) of charging piles and energy storages, and the real-time power scheduling of charging piles, a time-space two-dimensional regulation strategy of charging station load is proposed. The optimization model of charging station combining day-ahead and real-time time scales is proposed. The day-ahead optimization model of energy storage system charging and discharging is established with electric vehicle service rate as the optimization objective, the real-time optimization model of DPSS switching is established with the standard deviation of transformer load as the objective, and the real-time scheduling model of charging pile power is established with the scheduling cost in each period as the objective, so as to improve the economy and safety of the charging station through various regulation means. The effectiveness of the proposed model is verified by example simulation.

Key words: electric vehicles; charging station; dual power supply; energy storage system; real-time scheduling; time-space two-dimensional regulation

(上接第17页 continued from page 17)

Flexible peak shaving strategy of power system based on wind power-carbon capture

CUI Yang¹, ZHANG Cong¹, ZHANG Lu², ZHAO Yuting¹, SHI Haobo³, LIU Xinyuan⁴

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

4. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030012, China)

Abstract: The high proportion of grid-connected wind power increases the burden of peak shaving in the power system. Therefore, it is urgent to improve the flexibility of peak shaving in the power system and assist the low-carbon and zero-carbon development in the new power system. The excellent peak shaving performance of carbon capture power plant and the necessity of using it for peak shaving auxiliary services are analyzed, and the positive role of low-carbon characteristics of carbon capture power plant in carbon trading is demonstrated. Therefore, the flexible peak shaving operation strategy of carbon capture power plant is put forward, and the low-carbon and economy of the proposed strategy are expounded. The wind power-carbon capture dispatching model aiming at the optimal comprehensive cost of power system is constructed, and based on this model, the low-carbon performance and economic benefits of carbon capture power plants under different flexible operation modes are compared. Finally, the simulative results of the improved IEEE 39-bus system verify that the proposed model can effectively coordinate the peak shaving resources, satisfy the peak shaving demand of the power system, and meanwhile reduce the carbon emission level and operation cost of system.

Key words: carbon capture power plant; wind power; peak shaving; flexibility; economic dispatching; low-carbon

附录 A

充电站作为双重调控的主体,需要根据专变冗余容量合理安排充电桩及 ESS 接入位置和充放电功率,因此有向楼宇支付专变租借费用的义务和向 EV 收取充电费及服务费的权利。在实时调度时段,充电站有对 EV 用户进行调度和补贴的义务,以及获得楼宇补贴的权利。楼宇主体需要在保证楼宇负荷正常供电的前提下出租专变冗余容量为充电站供电,因此有向充电站收取专变租费的权利。在专变容量不足时,为避免变压器过载,楼宇有通过补贴方式激励充电站削减负荷的义务。EV 用户能够在充电站内享受充电服务,因此有义务向充电站支付相应充电费和服务费的义务,在专变容量不足时段还有接受充电站对其充电功率调控的义务,以及获得相应补贴的权利。各主体关系如图 A1 所示。

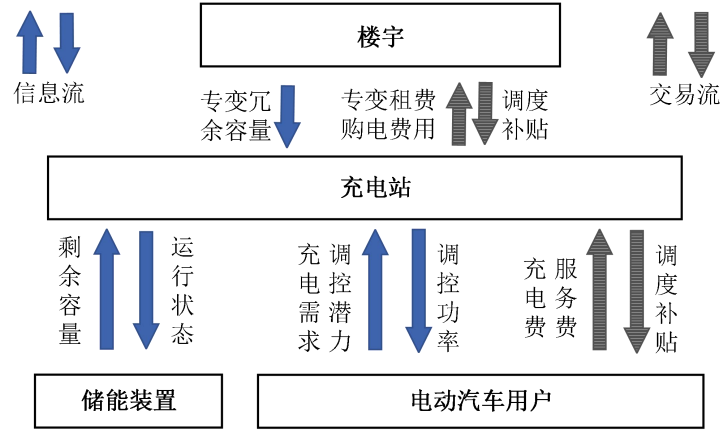


图 A1 各主体关系示意图

Fig.A1 Schematic diagram of each subject relationship

图 2 中充电站调控的具体步骤如下。

1) 在日前阶段,根据专变冗余容量和 EV 计划充电需求,合理安排 ESS 的充放电时段。当专变容量可以满足站内 EV 的充电需求时,根据专变冗余容量和 ESSSOC 考虑为 ESS 充电。而当专变容量无法满足站内 EV 的充电需求,根据 ESSSOC 考虑为其放电。

2) 经过日前阶段 ESS 的充放电优化后,在实时阶段,充电站根据站内 EV 的实时充电需求、双楼宇专变的冗余容量和 ESS 充放电容量,合理安排各充电桩和 ESS 的 DPSS 的开关位置,使每台专变接入合适的负荷,保证变压器负载均衡,实现充电负荷的空间特性调控。

3) 当专变冗余容量无法满足站内 EV 的充电需求时,充电站在优化各 DPSS 接入位置之前需要先根据各 EV 充电需求和调度成本的差异性,对充电桩功率进行实时调控,合理分配 EV 间充电功率以尽量降低充电站调度成本,在改善负荷时序特性的同时提升充电站经济性。

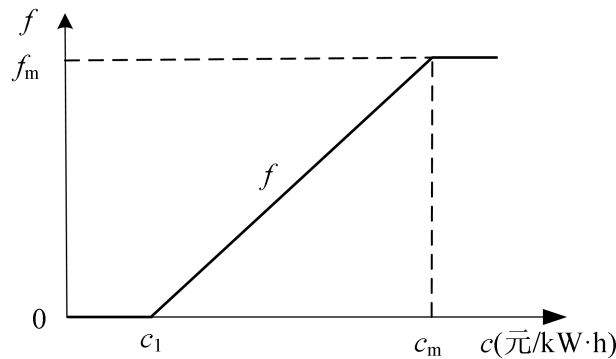


图 A2 EV 用户调度意愿模型

Fig.A2 Model of EV user willingness to dispatch

附录 B

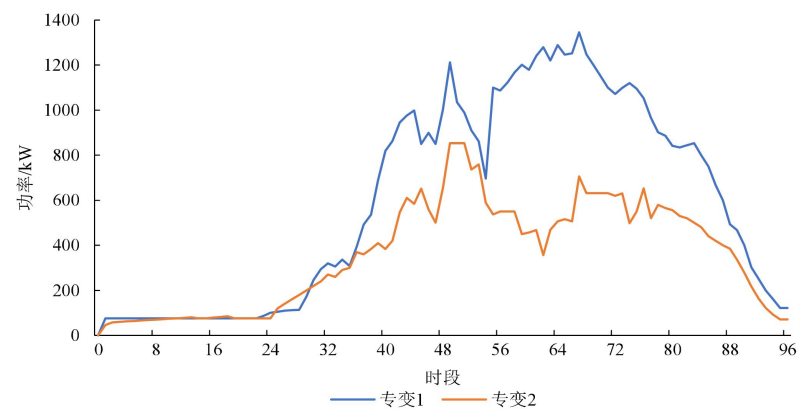


图 B1 专变用户楼宇负荷曲线
Fig.B1 Building load curves of special transformer users

表 B1 充电站的分时电价		
Table B1 Time-of-use price of charging station		
时段		电网电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
谷时段	00:00—08:00	0.25
平时段	08:00—14:00, 17:00—19:00, 22:00—24:00	0.31
峰时段	14:00—17:00, 19:00—22:00	0.43

表 B2 EV 参数			
Table B2 Parameters of EVs			
电池容量/(kW·h)	续航里程/km	充电功率/kW	充电效率
40	300	60	0.9

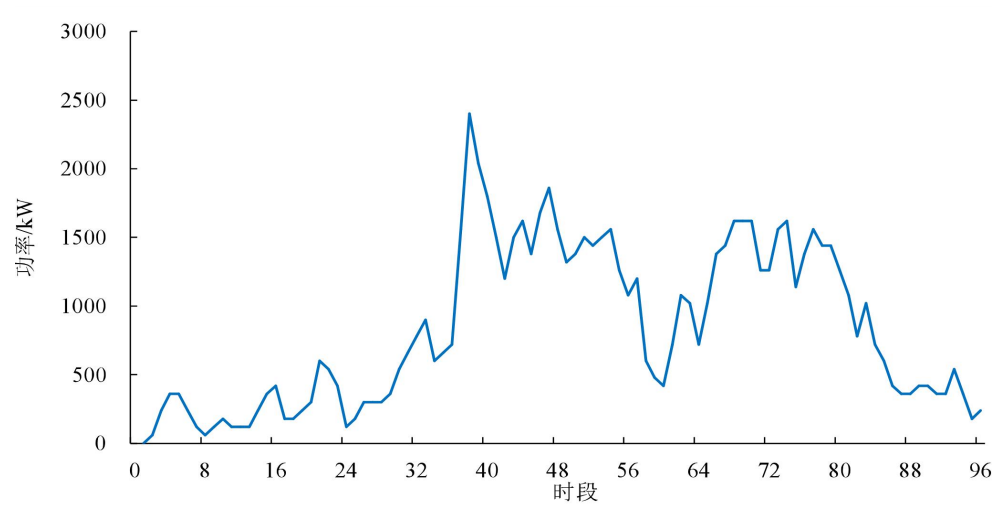


图 B2 EV 日前充电需求
Fig.B2 EV current charging demand

附录 C

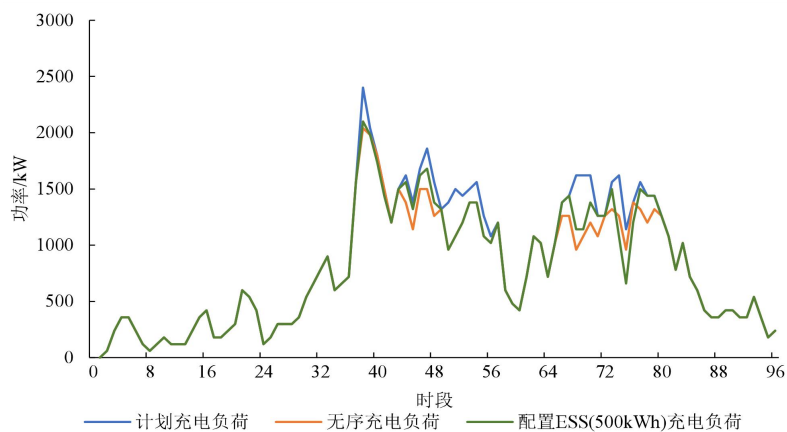


图 C1 有、无 ESS 配置时的充电负荷曲线
Fig.C1 Charging load curves with and without ESS

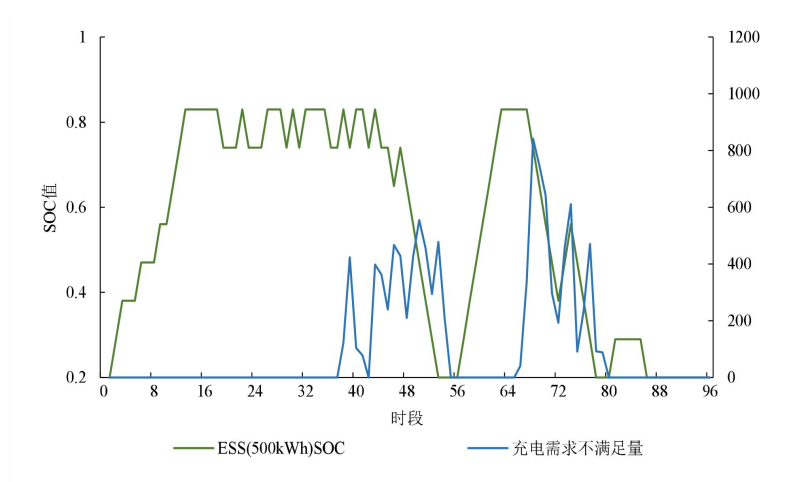


图 C2 优化后 ESS 的 SOC 曲线
Fig.C2 SOC curves of ESS after optimization

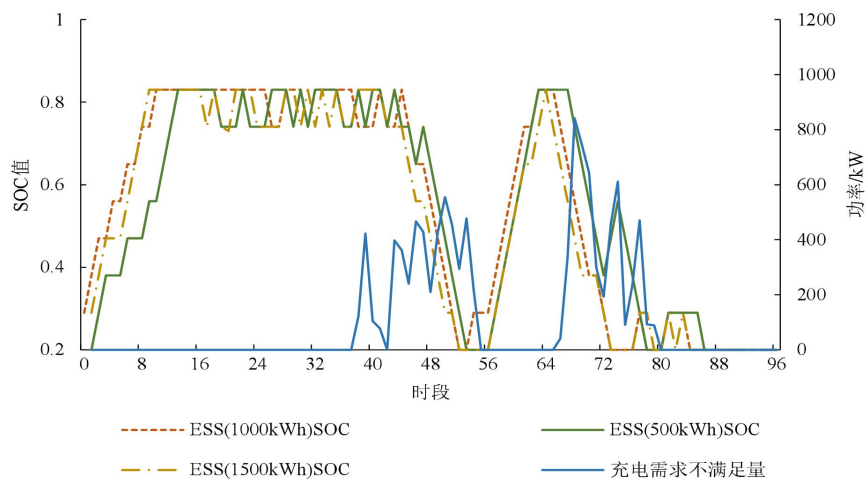


图 C3 不同 ESS 容量配置下的 SOC 曲线
Fig.C3 SOC curves of ESS under different capacities

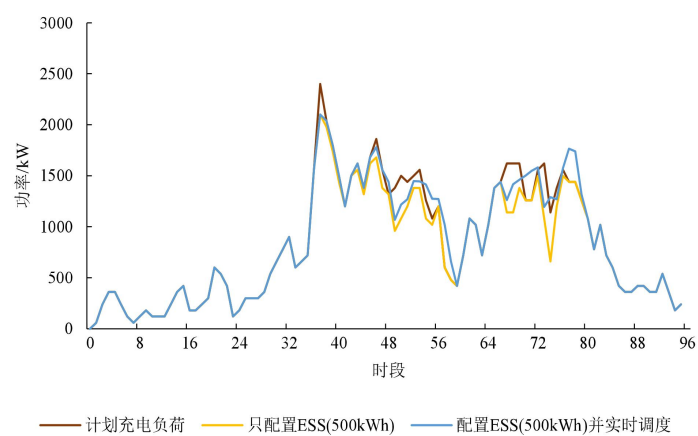


图 C4 实时调度前、后的充电负荷

Fig.C4 Charging load before and after real-time scheduling

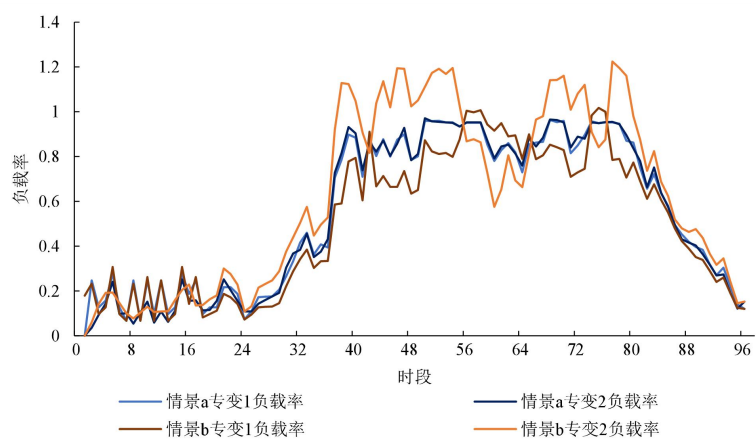


图 C5 不同情景下各专变的负载率

Fig.C5 Load rate of each transformer under different scenarios