基于台区负荷平衡和优化的电动汽车有序充电策略研究

分析了电动汽车用户充电需求，并在此基础上研究了电动汽车充电负荷调度方式和有序充电优化方法，提出了基于台区负荷平衡的有序充电优化控制策略，在满足用户充电需求的前提下，实现了电动汽车充电功率的合理分配，减少对电网的负荷冲击，保障了配电网的安全、可靠和经济运行。

王海燕[1,2]　邓　烽[1,2]/1.国电南瑞科技股份有限公司　2.南瑞集团（国网电力科学研究院）有限公司



王海燕/工程师

关键词/Keywords

配电网·
电动汽车·
有序充电·
负荷平衡·

0　引言

电动汽车产业已进入加速发展期[1-3]，但是，规模化电动汽车无序充电会对电网安全、经济及可靠运行带来巨大挑战[4-7]，并会导致电动汽车充电需求无法及时满足。以某个台区为例，一台500 kV·A的变压器，全年的最大负荷时刻是20:00~22:00，而此时正是家用电动汽车进入停车位准备充电的时段，未经引导，配电变压器必然超载。而在0:00~6:00时段内，负荷低于200 kV·A，可供40多辆汽车充电。因此，有必要对电动汽车充电策略进行研究，对充电行为进行有效引导或控制，将电动汽车充电负荷合理地引导到非电网负荷高峰时段充电，解决电动汽车充电负荷与配电网供电能力相匹配问题，合理地分散电动汽车的充电功率，一方面降低电动汽车规模化随机无序充电对电网的影响，另一方面有效提高电网接入充电设施的能力，满足更多的电动汽车充电需求。

国家电网公司科技项目“智慧能源服务系统关键技术研究及应用”

1　用户充电需求研究

基于某电力公司充电桩充电数据，分析用户充电习惯。结合实际情况，分别选取10台典型的公共充电桩、出租车充电桩、私人充电桩以及企业内部充电桩，采用2017年充电数据（充电量、充电起止时段和充电费用）进行分析。基于公共充电桩、企业内部充电桩和私人充电桩的充电数据，分析普通电动汽车用户的充电行为习惯；基于出租车充电桩的充电数据，分析出租车司机的充电行为习惯。其中，充电同时率是指在某时间段正在执行充电任务的充电桩占比。

1.1　公共充电桩特性研究

公共充电桩在一天中均有使用，日充电起始高峰发生在15:00~16:00、21:00~22:00区间范围内，日充电结束高峰发生在16:00~17:00、22:00~23:00区间范围内，日充电同时率最高点发生在16:00~17:00区间范围内；1:00~7:00区间范围是公共充电桩使用频率较低的时段，即在该时段充电桩处于空闲的概率较大。

公共充电桩处的日充电行为在一天当中呈波动变化趋势，其中在下午和晚上为日充电高峰期，半夜为充电低谷期。充电时长多为2 h。图1为公共充电桩日充电行为分布。

1.2　企业内部充电桩特性研究

企业内部充电桩多在白天使用，日

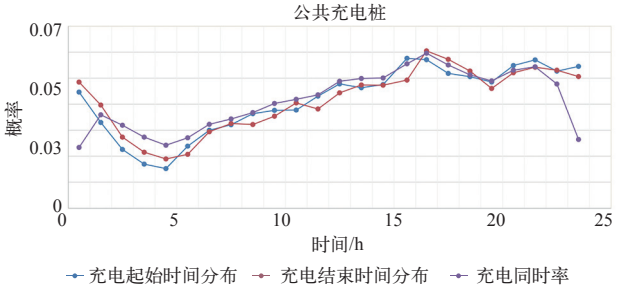


图1 公共充电桩日充电行为分布

充电行为发生在6:00~24:00区间范围内，在该区间范围内充电行为呈波动变化趋势。日充电起始高峰发生在7:00~8:00，在15:00~16:00发生日充电高峰；在0:00~6:00区间范围内充电桩基本处于空闲时段。

企业内部充电桩较多在白天使用，日充电高峰发生在早上上班期间，0:00~6:00基本处于空闲阶段。日充电时长多为3 h。图2为企业内部充电桩日充电行为分布。

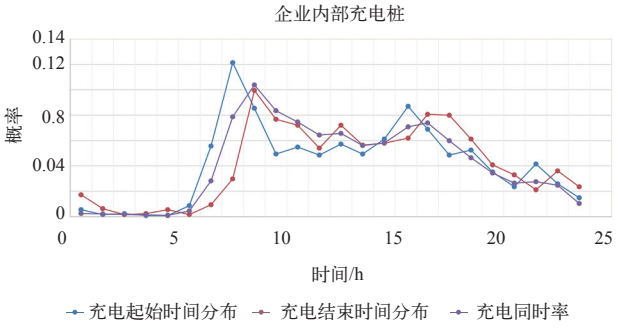


图2 企业内部充电桩日充电行为分布

1.3 私人充电桩特性研究

私人充电桩的充电行为多在当天下班后至次日上班前的这段时间发生，在白天充电趋势缓慢上升，在20:00~21:00区间范围发生日充电高峰，日充电结束高峰发生在0:00~1:00、7:00~8:00；私人充电桩在0:00~7:00区间范围的同时率较低，该时段为私人充电桩使用的低频时段。

私人充电桩的日充电时长较长，多为4~5 h完成充电。图3为私人充电桩日充电行为分布。

2 负荷均衡有序充电优化控制策略研究

2.1 电动汽车充电负荷调度方式研究

从电动汽车负荷类型用电规律及负荷特性进行分析，为降低居民台区总负荷峰值，可以采用调节电动汽车充电时段（调时段充电）和降低电动汽车充电功率（降功率充电）两种方式来调度充电负荷，从时间和空间上错开负荷峰值，既满足用户的行驶需求又要避免电动汽车充电叠加原有负荷峰值。

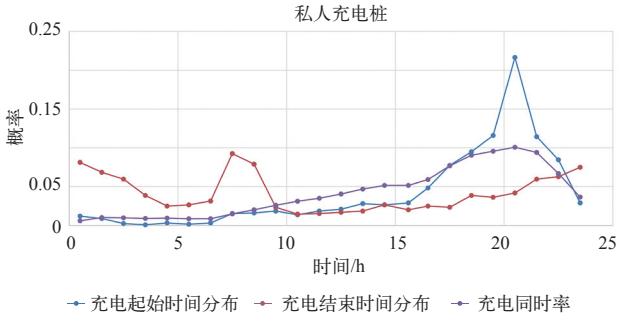


图3 私人充电桩日充电行为分布

（1）“调时段充电”调度方式

假设电动汽车充电功率为5 kW，充电时长为4 h，“调时段充电”调度方式如图4所示。在台区配电变压器可用功率限制下，在0:00~4:00只能安排六辆电动汽车充电，在4:00~8:00再安排另外六辆电动汽车充电。

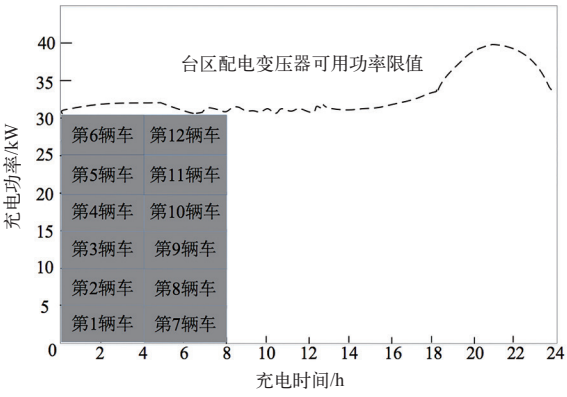


图4 “调时段充电”调度方式

（2）“降功率充电”调度方式

“降功率充电”调度方式如图5所示。将电动汽车充电功率由5 kW降为2.5 kW，充电时长由4 h延长为8 h。在台区配电变压器可用功率限制下，在0:00~8:00，可以安排12辆电动汽车充电。

（3）两种调度方式对比

两种调度方式均是在不超过台区配电变压器可用功率限值的情况，尽可能满足客户充电需

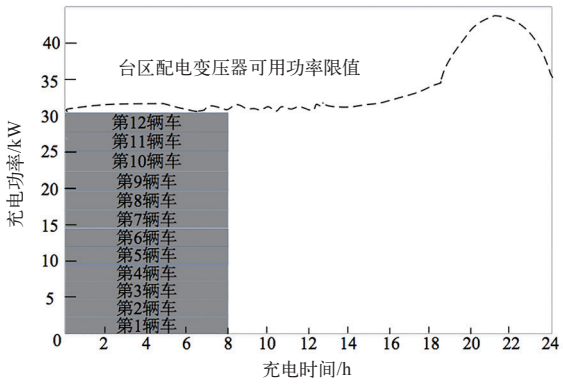


图5 “降功率充电”调度方式

求，两者累积的充电负荷相同，对台区配电变压器负荷的影响效果相同。但经过试验验证，存在如下区别。

1）调度方式不同。“调时段充电”调度方式需要根据客户充电行为特性、充电桩及台区配电变压器负荷预测等情况，提前分配充电时段，并及时优化修正，同时要求充电汽车支持充电实时唤醒；“降功率充电”调度方式不要求充电汽车支持充电实时唤醒，但需要跟踪台区负荷变化情况频繁调节充电功率，与车、充电桩通信频繁。

2）充电效率不同。在“调时段充电”调度方式下，充电功率大，充电时间短，充电过程中充电桩、车载充电机的能量损耗小；在“降功率充电”调度方式下，充电功率小，充电时间长，充电过程中充电桩、车载充电机的能量损耗大。

3）客户充电体验不同。“调时段充电”调度方式可实现客户先到先充，充电时间短；“降功率充电”调度方式可实现更多的客户同时充电，但延长了充电时间，客户等待时间长。

2.2 电动汽车有序充电优化控制策略研究

电动汽车有序充电控制调度策略[8-11]以实际调度结果与充电功率规划偏差的绝对值最小为目标，充分考虑用户有序充电需求，得到每辆电动汽车的最优充电时序。

（1）充电负荷优化策略

充电负荷优化策略是基于台区日前配电变压器负荷预测，满足台区电动汽车充电需求、台区配电变压器功率限制，基于负荷优化需求，得到台区日前充电负荷规划。

1）负荷优化需求。配电变压器台区负荷优化需求包括错时、填谷、平稳、安全和经济几个方面。 错时：将个人充电桩的充电时间与居民生活用电高峰时段错开，将企业内部充电桩的充电时段与企业生产高峰负荷错开，避免充电高峰负荷与生活、生产高峰负荷叠加；填谷：居民电动乘用车的晚间停车时间很长，可充分利用晚间低谷时段充电，提高电网低谷负荷；平稳：电网负荷低谷时段是弃风原因之一，在晚间低谷时段的台区平稳负荷有利于清洁能源的消纳；安全：在负荷高峰时段，防止因不接受有序充电的负荷过大造成配电变压器重载，保障居民生活用电；经济：合理安排充电负荷，尽量使配电变压器运行在经济运行区间，节能降损。

2）负荷优化策略。台区配电变压器负荷优化策略的主导思想是，根据电动汽车需求的总能量和电网基础负荷曲线的高低变化，在时间维度上把电动汽车所需求的总能量分配到负载曲线上，使台区内电动汽车充电后的总负荷曲线相对平直稳定。同时，根据用户电动汽车SOC状态结合电网日负荷特征，给出推荐充电日及推荐充电区域。

图6为一个城区居民典型台区负荷在夏季用电高峰期间的24 h负荷曲线。根据日常生活习惯，从居民18:30~19:30陆续到家、停车开始充电，充电时段为18:30~23:30，与台区晚高峰生活负荷完全重叠，在21:30导致配电变压器过载。

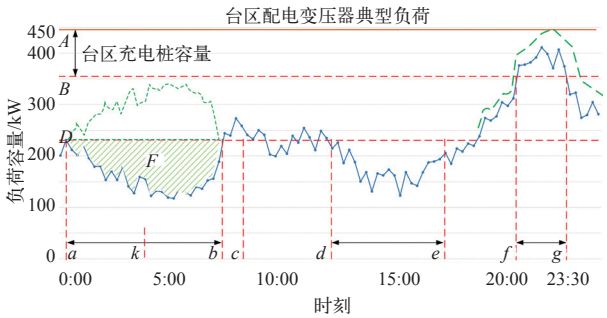


图6 台区负荷特征及调度策略

负荷调度策略如下。

a.基于台区负荷特性，考虑季节、节假日等负荷影响因素，建立低压配电网负荷预测模型。预测当日台区负荷和同时性充电负荷，计算是否出现时段*f*~*g*，如果有，则将时段*f*~*g*参数下发到集中

器和所有充电桩，所有可调度的充电需求，应避免在时间段*f*~*g*期间有充电负荷。

b.对申请充电用户，判断其充电时段。若充电时段与*f*~*g*重叠，则给予提示，可能出现充电暂停情况；若充电时段中配电变压器负荷超出经济运行上限，则给予提示，建议用户更改充电需求参数。

c.预测当日台区下接收调度的总充电量需求，计算理想充电时段*a*~*b*。为了尽可能地使得低谷充电时段配电变压器负荷平滑，求阴影*F*的面积等于预约充电用户所需充电量，可得理想充电*a*~*b*时段以及台区平滑负荷*D*。

d.根据得到的台区平滑负荷*D*，与配电变压器负荷预测值做差，得到台区日前充电负荷规划值。

3）策略修正。为降低预测误差对充电计划的影响，当发生以下情况时，应进行有序充电计划修正。

a.每日到达图6中时刻*a*或者零点之前，对准备执行的充电方案重新审视，重新计算*a*~*b*段充电负荷，发现配电变压器负载率超出经济运行上限时。

b.配电变压器基础用电负荷预测、充电负荷预测与实际偏差较大，导致配电变压器实际负荷与计划负荷偏差超过阈值时。

（2）因配电变压器超载而需要降低充电负荷的策略

对配电变压器进行实时负荷监测，当监测到配电变压器出现超载情况，按以下策略暂停部分充电负荷。

1）首先，将用户的充电负荷调整到最低。计算每个充电桩用户的时间裕度（剩余充电时间/剩余充电电量），优先暂停时间裕度大的用户。

2）其次，暂停晚接入用户充电桩。按照电动汽车接入时间，优先暂停接入时间晚的用户。对于不响应暂停指令的充电桩，通过电能表费控指令直接中断。

3）配电变压器超载情况消除后，按照暂停充电负荷相反的顺序依次恢复充电负荷。

3 试点应用效果

根据电动汽车使用场景，选取停车时间长、充电调节空间大的居住区和办公场所开展有序充电试点，完成三个试点单位16个充电桩的安装调试，服务电动汽车17辆。通过单桩和多桩组合测试，获取基础样本数据，并根据充电服务和电气运行特性开展有序充电仿真测算，计算有序充电服务效果。

根据分析，居民小区负荷特性如图7所示，日负荷用电高峰一般出现在晚上下班后的21:00~23:00，负荷峰谷率大。经仿真，如实现无序充电，会出现“峰上加峰”，晚间仅可服务电动汽车40辆次，充电电量为1 000 kW·h左右；采用有序充电策略后，将充电负荷移至夜间低谷时段，服务能力提升最为明显，可充电128辆次，充电电量超过3 246 kW·h，服务能力和服务量提升超过220%。

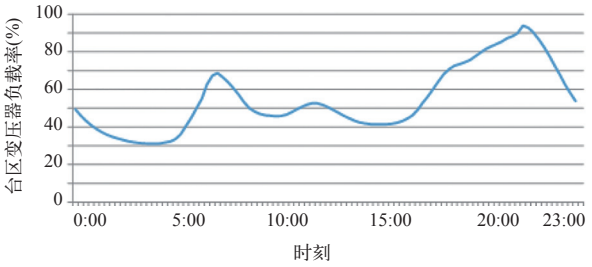


图7 居民负荷特性类型

而办公场所负荷特性如图8所示，用电高峰开始于早9:00，谷电时段相对较少，17:00后用电处于下降态势。经仿真，无序充电时，日间可服务电动汽车63辆次，充电电量为1 669 kW·h左右；采用有序充电策略后，将充电负荷移至中午、下午时段，服务能力提升最为明显，服务能力提升到130辆次，充电电量超过3 370 kW·h，服务能力和

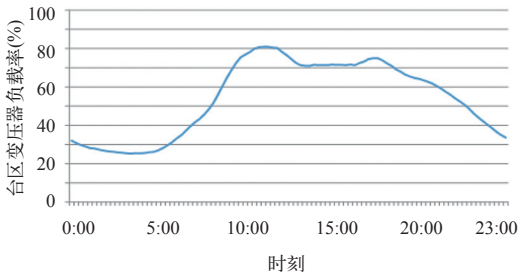


图8 办公场所负荷特性类型

服务量提升超过100%。

总体来看，有序充电以显著提升居民区和办公场所的充电服务能力。

4 结束语

基于台区日前配电变压器负荷预测，以错时、填谷、平稳、安全和经济的配电变压器负荷需求为目标，以台区电动汽车总充电功率为决策变量，提出了基于台区负荷平衡和优化的电动汽车有序充电控制策略，实现了电动汽车有序充电控制，可以将电动汽车用户引导到非电网负荷高峰的“谷价”时段充电，降低用户的充电成本的同时，有效提高了电网接入充电设施的能力。以北京地区为例，现有发输配电能力，谷电可利用电能量为2 694万kW·h，按照日行90 km耗电量18 kW·h计算，夜间低谷时段可为约150万辆电动汽车充满电。将来还可以通过借助电动汽车V2G技术，充分调度电动汽车充放电潜能，合理引导电动汽车用户使用清洁电力能源，实现电动汽车与电网互动。

参考文献

[1] 中华人民共和国国务院．节能与新能源汽车产业发展规划(2012~2020年)[R/OL]．[2012-06-28]．http://www.gov.cn/xwgk/2017-07/09/content_2179032.htm．

[2] 刘振亚．中国电力与能源[M]．北京：中国电力出版社，2012．

[3] 李敏，苏小林，阎晓霞，等．电动汽车有序充放电控制与利用研究新进展[J]．电网与清洁能源，2014，29(6)：70-76．

[4] 涂轶昀，李灿，承林，等．电动汽车接入电网及其对电力系统的影响[J]．华东电力，2011，39(7)：1085-1088．

[5] 胡泽春，宋永华，徐智威，等．电动汽车接入电网的影响与利用[J]．中国电机工程学报，2012，32(4)：1-10．

[6] 孙建龙，李妍，胡国伟，等．电动汽车接入对配电变压器使用寿命的影响[J]．高电压技术，2015，41(11)：3830-3835．

[7] 陈力，苟超．电动汽车接入对配电网的影响[J]．华东科技：学术版，2015(7)：214．

[8] 徐智威，胡泽春，宋永华，等．基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]．中国电机工程学报，2014，34(22)：3638-3646．

[9] 刘星平，李世平，于浩明，等．住宅小区内电动汽车有序充电优化模式[J]．电工技术学报，2015，30(20)：239-245．

[10] 苏海锋，梁志瑞．基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]．电力自动化设备，2015，35(6)：17-22．

[11] 王姝凝，杨少兵．居民小区电动汽车充电负荷有序控制策略[J]．电力系统自动化，2016，40(4)：71-77．

（收稿日期：2018－06－28）EA