

9-14-2020

Study on the regulation strategy of intelligent electrical equipment group based on load resource reservation

Boyi WANG

Beijing Guodiantong Network Technology Co,Ltd , Beijing 100070 , China

Bin ZHUANG

Beijing Guodiantong Network Technology Co,Ltd , Beijing 100070 , China

Di LIU

School of Electrical and Electronics Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206 , China

Di LI

Beijing Guodiantong Network Technology Co,Ltd , Beijing 100070 , China

Zhiyuan YU

Beijing Guodiantong Network Technology Co,Ltd , Beijing 100070 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

WANG, Boyi; ZHUANG, Bin; LIU, Di; LI, Di; and YU, Zhiyuan (2020) "Study on the regulation strategy of intelligent electrical equipment group based on load resource reservation," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 3, Article 12.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.012

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/12>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

基于负荷资源预留的智能用电设备 群调控策略

王伯伊¹, 庄 斌¹, 刘 迪², 李 迪¹, 于志远¹

(1. 北京国电通网络技术有限公司, 北京 100070; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘 要:在电力市场化改革的背景下,针对新的电力供需与服务模式,提出基于负荷资源预留的智能用电设备群调控策略。为满足风电等新能源的消纳需求,在对负荷群进行调控时,预留部分负荷资源。当有新能源消纳需求时,调用预留资源对新能源进行消纳,从而提高新能源的利用率。在用户预约用电的模式之下,提出基于遗传算法的负荷群调控策略。仿真结果表明,算法能够在保证用户用电的前提下有效促进消纳新能源,并对负荷曲线进行优化。

关 键 词:智能用电;负荷资源预留;新能源消纳;联合优化调度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.012 中图分类号:TM93 文章编号:1673-9140(2020)03-0092-07

Study on the regulation strategy of intelligent electrical equipment group based on load resource reservation

WANG Boyi¹, ZHUANG Bin¹, LIU Di², LI Di¹, YU Zhiyuan¹

(1. Beijing Guodiantong Network Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China; 2. School of Electrical and Electronics Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract:In the background of power market reformation, the new power supply and demand service mode are emerging. A dispatching strategy of the intelligent electricity equipment group is proposed on the basis of the load resource reservation under those new modes. In order to meet the energy consumption demand of the renewable energy generation, such as the wind power, the main idea of regulating load is to reserve a part of the demand. The reserved resources are applied when there is demand for renewable energy consumption. Besides, under the mode of user's demand reservation, the load group control strategy is proposed based on genetic algorithm which guarantees the normal power consumption as the priority. Finally, a situation is included for verification. It is shown that the proposed algorithm effectively consumes the renewable energy generation while guaranteeing the user's electricity consumption demand, and the load curve is optimized at the same time.

Key words:Intelligent power consumption; load resource reservation; new energy consumption; joint optimal scheduling

收稿日期:2017-10-02;修回日期:2018-04-21

基金项目:国家电网有限公司科技项目(9920156338)

通信作者:刘 迪(1990-),男,硕士研究生,主要从事电力系统信息通信技术研究;E-mail:kfliudi@163.com

随着电力市场改革的进行以及电力市场相关理论不断发展,智能用电也有了多样化的发展^[1-2]。现阶段,对于用户用电的引导大多基于需求响应,但用户的响应速度偏慢以及因激励不足导致的用户响应率偏低的问题一直难以解决^[3]。而在电力市场化的新环境下,对于用户负荷的管理逐渐下沉至负荷层级,出现聚合商这一角色。依托先进数据采集和负荷控制模块,聚合商能够对用户的单个电器进行调节,通过对大量的同类单个用电设备的调控,能够在不影响用户对于电器的使用体验的前提下,更好地实现消纳新能源,改善负荷曲线的目标^[4-5]。

近年来,中国风电发展迅速。风电新增装机和累计装机均位居世界前列,无论是新增装机还是累计装机,均有较大幅度的增长。但风电的弃风现象却越来越严重。随着风电规模的不断增大,风电出力的波动范围也随之增加,甚至会出现从接近零出力到额定出力之间变化的情况^[6-7]。通过智能用电相关手段对风电进行消纳能够有效缓解弃风现象的发生,因此,如何通过设计调控策略使智能用电最大化地消纳风电,同时兼顾传统的削峰填谷需求,是一个亟待解决的问题^[6,8]。

1 电动汽车群充电模型

智能家电的负荷种类很多,但并非所有的智能家电都适合参与调控。对于家用电器的调控,要以尽可能少的影响用户的使用舒适度为前提。因此,参与调控的智能用电设备应具有一定的时延特性,即在一定时间范围内适度改变设备的使用计划对用户的舒适度不造成影响或影响较小^[9]。目前对于智能家电建模的研究已有许多成果,多集中于温控负荷(如空调、热泵等)、电热水器以及新兴的电动汽车等^[10-12]。

全世界许多国家和地区陆续宣布逐渐停止燃油车的销售^[13],未来电动汽车的保有量势必快速增长。近年来,中国新能源汽车发展迅速,电动汽车保有量连年上涨,以北京市为例,2013年电动汽车保有量仅为2211辆,而2015年已涨至27875辆^[14]。考虑到电动汽车的快速发展以及其可调节潜力,面向电动汽车充电调节的研究也已成为热点。

文献[15]对电动汽车大量接入电网以后,充电负荷对电网运行产生的影响进行了研究;文献[16]则就电动汽车有序充电问题开展研究,从时间维度对电动汽车充电进行建模,进而设计响应的优化充电策略;文献[17]采用蒙特卡洛的方法对电动汽车的充电行为进行模拟,提出电动汽车有序充电策略,并分析分时电价下有序充电和无序充电用户的舒适度损失以及对电网峰谷差的影响;文献[18]则是关注用户电动汽车充电行为的不确定性,同样在分时电价下提出电动汽车分层优化策略,实现电动汽车充电的优化调节;文献[19]则考虑电动车充放电的双向调节,将电动汽车优化问题转化为混合整数规划问题,并采用CPLEX求解器进行求解。

在上述电动汽车建模中,多是针对电动汽车本身的充放电特性构建的物理模型,但不同电动汽车由于设计、工况等有所差异,其模型参数也各有不同。因此,在实际环境中,对电动汽车群进行建模时,难以准确地获取每辆电动汽车的参数,而基于经验对电动汽车的参数进行赋值,有可能在调节过程中产生较大的误差。同时,在电动汽车充电调节业务中,用户的行为(如接入充电桩时间、充电时长、可调节时间等)会对电动汽车调节产生较大的影响,而基于物理模型对电动汽车进行建模,难以准确反映用户行为在调节过程中造成的影响,因此,需要基于用户行为对电动汽车的充电过程进行建模。

在电动汽车充电与调节过程中,用户以及聚合商关注的主要是其外在表现,而非物理特性,即用户关心的是电动汽车的充电时间能否满足自身需求,而聚合商关心的是电动汽车的可调节潜力及调节效果。因此,在对电动汽车充电行为进行行为模型构建时,可以将电动汽车本身当做黑盒模型,而只关注其输入输出的特点。

电动汽车充电电量与时间的分布特点,很大程度上受其使用时间以及出行里程的影响,用户不同的使用特点直接决定了电动汽车的充电需求^[20-21]。

该文以私家车充电为例研究电动汽车充电的行为特性以及调节策略。私家车的充电特性很大程度上取决于用户每日的出行行为,从《2016北京交通发展年报》^[14]中能够看出,私家车的出行行为表现出了周期性的规律。根据数据统计,私家车上班出

行高峰集中在 8:00 左右,到达高峰则集中于 8:30 左右,下班出行高峰集中在 18:00 左右,到达高峰集中于 18:30 左右。考虑到私家车多数为私人充电桩,因此大多数私家车主会选择下班到家后给电动车充电,即接入电网的充电高峰在 18:00~19:00 之间。用户的出行特性如图 1、2 所示。

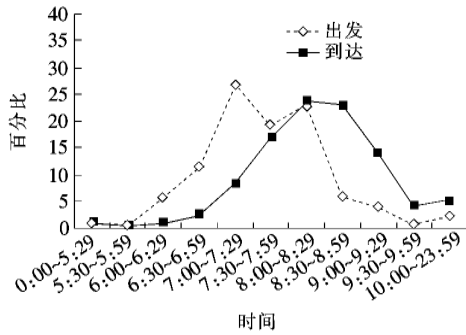


图 1 上班出发、到达时间车辆分布

Figure 1 Departure time, arrival time vehicle distribution figure to work

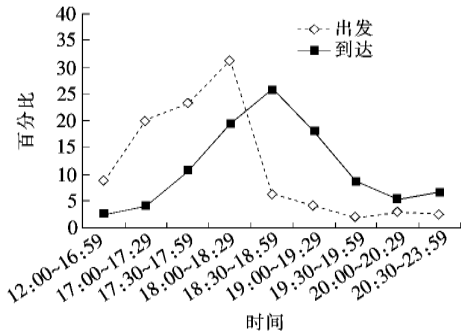


图 2 下班出发、到达时间车辆分布

Figure 2 Departure time, arrival time vehicle distribution figure off work

从图中看出,可以用正态分布近似描述电动汽车出行分布,因此电动汽车出行行为的概率密度函数可以表示为

$$f(t_{\text{arrive}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{arrive}}} \exp\left(-\frac{(t_{\text{arrive}} - \mu_{\text{arrive}})^2}{2\sigma_{\text{arrive}}^2}\right) \quad (1)$$

$$f(t_{\text{leave}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{leave}}} \exp\left(-\frac{(t_{\text{leave}} - \mu_{\text{leave}})^2}{2\sigma_{\text{leave}}^2}\right) \quad (2)$$

式中 $f(t_{\text{arrive}})$ 为电动汽车接入充电桩开始充电的时间概率密度函数; $f(t_{\text{leave}})$ 为电动汽车离开充电桩结束充电时间的概率密度函数; σ_{arrive} 为电动汽车接入充电桩开始充电时间的标准差; μ_{arrive} 为电动汽车接入充电桩开始充电的时间期望; σ_{leave} 为电动汽

车离开充电桩结束充电时间的标准差; μ_{leave} 为电动汽车离开充电桩结束充电时间的期望。

而北京市私家车年平均行驶里程在 1.25 万公里,按私家车百公里耗电约为 15~20 kW·h,可以推算出,私家车每日出行后,所需充电量大致为 10 kW·h。目前私人充电桩大多为慢充桩,根据充电所需电量的波动,充电时间多在 1~3 h 之间,而夜间电动汽车停泊的时间约 8~12 h,均可用来充电。

同时,电动汽车大量接入电网的时间恰逢负荷晚高峰,如果对电动汽车充电不加引导与调节,会造成“峰”上加“峰”的情况,进一步增加电网的峰谷差,不利于电网的安全稳定运行。因此,对于电动汽车的优化调节,不但可行,且很有必要。

由于电动汽车接入充电桩后,才能够参与负荷调节,因此聚合商在每一时刻的可调功率与电动汽车接入数量密切相关。假设有 n 辆电动汽车与聚合商签订了调节合约,则根据电动汽车在每一时段接入充电桩的概率以及离开充电桩的概率可以计算得出聚合商的可调节功率的范围。在每个时刻,所有可调节电动汽车最大的充电功率如下:

$$P_{\text{carmax}} = n \cdot (P_{\text{arrive}} - P_{\text{leave}}) \cdot P_{\text{car}} \quad (3)$$

式中 P_{carmax} 为当前时刻聚合商能够调电动汽车的总功率, kW; P_{arrive} 为当前时刻电动汽车接入充电桩的概率,可由式(1)计算获得; P_{leave} 为当前时刻电动汽车离开的概率,可由式(2)计算获得; P_{car} 为电动汽车的平均充电功率, kW。

为了保证用户在离开前,电动汽车均能够充满电量,需要保证即将离开但还未充满电量的电动汽车保持充电状态,这些电动汽车的充电总功率即为每个时段可调节电动汽车群负荷调节的下限,用 P_{carmin} 表示。用户是否达到强制充电时间,是由用户的离开时间以及电动汽车电量共同决定的。基于用户和聚合商的调节合同,用户需要设定一个离开时间 t_{set} ,在该时间前,用户电动汽车的电量应充值用户的期望电量以上。为了简便起见,该文设置所有用户的期望电量均为 100%。因此,为了保证达到用户离开时间之前用户的电动汽车均为满电状态,需要计算强制充电时间点,到达该时间点后,该电动汽车始终保持充电状态,不再参与调解。强制

充电时间 t_{force} 的计算方式:

$$t_{\text{force}} = t_{\text{set}} - \frac{W_{\text{SOC}}}{P_{\text{car}}} \quad (4)$$

式中 W_{SOC} 为电动汽车剩余待充电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

综上分析,以聚合商为核心的电动汽车可调节功率模型为

$$P_{\Sigma \text{car}} = \sum_{n=1}^m P_{\text{car}}^n$$

s. t. $P_{\text{carmin}} \leq P_{\Sigma \text{car}} \leq P_{\text{carmax}}$ (5)

式中 $P_{\Sigma \text{car}}$ 为当前时刻在充电状态的电动汽车总功率, kW ; P_{car}^n 为单台电动汽车的充电功率, kW 。

2 考虑资源预留的负荷群调控策略

该文的研究一方面为了最大化地消纳风电,提升可再生能源的利用率;另一方面缓解由电动汽车集中充电带来的日负荷曲线峰谷差恶化的问题,平抑日负荷曲线的波动。对于风电消纳而言,由于风电的出力受外界环境因素影响,出力曲线波动性较大,且有一定的反调峰特性,因此,为了尽可能地对风电进行消纳,可以在风电出力较小的时候,将接入充电桩的电动汽车充电时间延后,达到充电资源预留的目的,在风电过剩的时候开始充电,实现风电资源的消纳。同时,在电动汽车充电优化调节的时候,还需要考虑日负荷曲线峰谷差的问题,尽可能优化电网的日负荷曲线。综上分析,可以构建聚合商调节电动车的目标函数:

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^{96} (P_{\Sigma \text{car}} - P_{\text{wind}})^2 \\ \min \sum_{t=1}^{96} (P_0 + P_{\Sigma \text{car}} - P_{\text{wind}} - P_{\text{avg}})^2 \end{cases}$$

s. t. $P_{\text{carmin}} \leq P_{\Sigma \text{car}} \leq P_{\text{carmax}}$ (6)

式中 P_{wind} 为风电功率, kW ; P_0 为区域内的总负荷, kW ; P_{avg} 为预测功率曲线的平均值, kW 。

P_{avg} 为区域内当日预测负荷的总用电量与时间的比值:

$$P_{\text{avg}} = \int_{t=0}^{24} P_t dt / \int_{t=0}^{24} dt \quad (7)$$

由于所求优化问题为多目标优化,采用启发式

算法能够很方便地求得目标的最优解,该文采用遗传算法对目标函数进行求解,算法流程如图 3 所示。

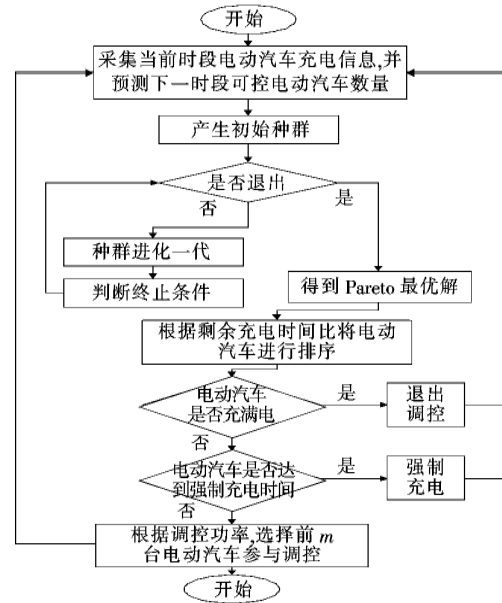


图 3 基于遗传算法的负荷群调控策略流程

Figure 3 Flow chart of load group control strategy based on genetic algorithm

3 算例分析

该文基于用户电力负荷特性,结合其历史用电数据,采用蒙特卡洛方法模拟某区域用户的用电负荷曲线。同样,基于风电场历史出力数据,模拟风电出力的消纳需求。该文假设聚合商合同可调节电动汽车为 500 台,验证该文所提算法的调节效果。

如前文所述,电动汽车日平均行驶 35 km 左右,耗电 6.5 $\text{kW} \cdot \text{h}$,因此以该值为期望中心,按照标准差为 1 的正态分布随机生成每一台电动汽车所需的充电电量。同时,目前市面上慢充桩由于品牌、形式等不同,充电功率也各不相同,一般从 3.5 kW 到 7 kW 不等,因此,该文以电动汽车充电功率为 5.5 kW 为例进行仿真实验。

电动汽车到达和离开的情况以概率密度函数表示,其各项参数取值如表 1 所示。

在遗传算法的优化求解过程中,种群数量大小以及进化的代数会影响算法的计算效率,该文取种群大小 100,进化 200 代后退出迭代并输出结果。

在上述的仿真环境下,该文对所提的考虑资源

预留的负荷群调控策略的效果进行了仿真验证。

聚合商对电动车优化调节前后的负荷曲线如图 4 所示。图中以 15 min 为一个点,由于电动汽车充电时间多集中于夜间,因此以凌晨零点为中心,展示了前一日 12:00 至次日 12:00 的负荷曲线。从图 4 中可以看出,由于电动汽车在 19:00~20:00 直接大量集中接入,在晚负荷高峰处叠加了新的负荷,造成了更高的负荷高峰,拉大了日负荷曲线的峰谷差。而在优化之后,电动汽车的充电负荷适当延后,分布在夜间,最大日负荷也由最高的近 15 000 kW 降至 14 000 kW 左右,有效地改善了因电动汽车接入带来的负荷曲线恶化的问题。

表 1 电动汽车到达与离开概率参数设置
Table 1 Electric vehicle arrival and departure probability parameter setting

参数	σ_{arrive}	σ_{leave}	μ_{arrive}	μ_{leave}
设置值	1.6	1.2	18:30	7:00

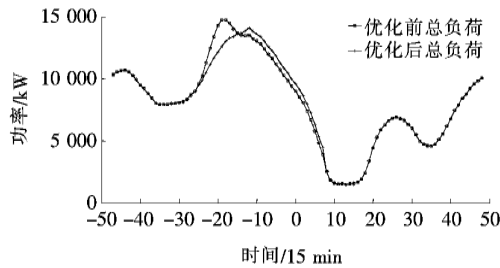


图 4 负荷功率曲线

Figure 4 Load power curve

图 5 展示了该文优化策略对风电负荷的消纳效果,其去除了其他用户负荷,仅展示了电动汽车充电负荷曲线与风电消纳需求曲线之间的关系。从中可以看出,在电动汽车接入充电高峰的晚 7:00—8:00 之间,恰逢风电出力的低谷期,这也反映了风电的反调峰特性。在调节前,风电的出力无法满足电动汽车的充电需求,聚合商需从大电网中购电以满足电动汽车的充电需求;而在调节后,电动汽车的充电功率均匀后移,从电动汽车接入至次日凌晨 1:00 均分配有充电功率,所有电动汽车的充电电量均能够由风电出力提供,极大地增加了风电的消纳。

图 6 所示是随机选取的 6 个电动汽车的电量变化情况。从图中可以看出,电动汽车的充电时间均有一定程度的延后,且其充电过程根据负荷曲线以及风电出力情况分段进行的,但对于不同的电动汽车来说,均能够在其预约使用时间前将电量充满,从而不影响用户对于电动汽车的正常使用。

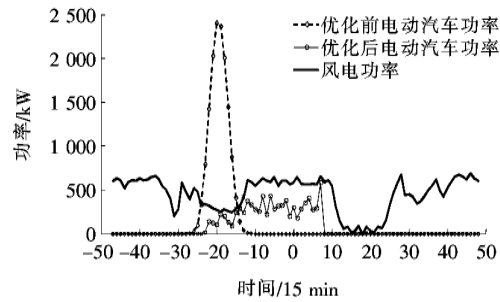


图 5 风电消纳需求及消纳情况

Figure 5 Demand and consumption of wind power

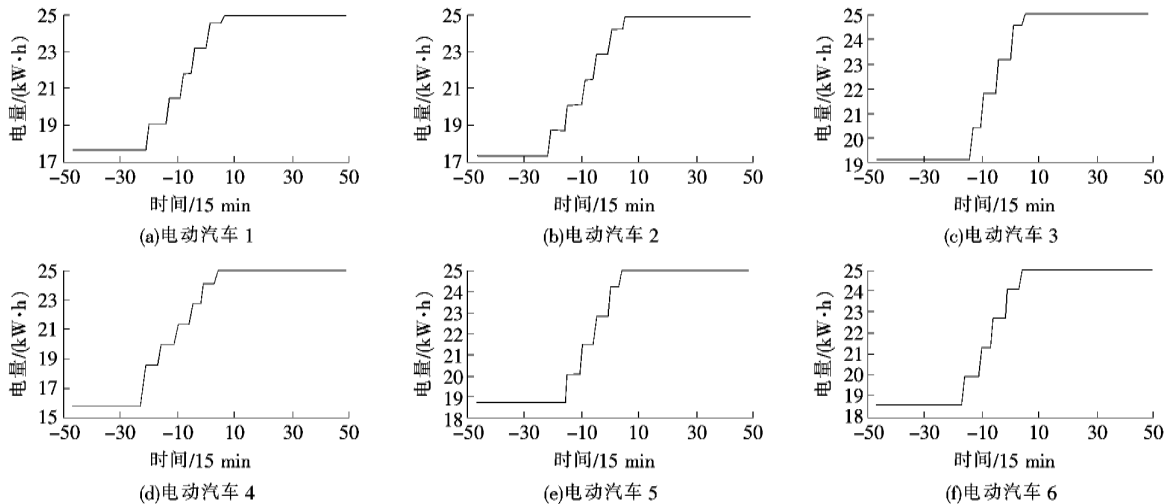


图 6 单个电动汽车充电情况

Figure 6 Single electric vehicle charging situation

4 结语

随着中国电网可再生能源的大量渗透以及电动汽车的大量普及,提升可再生能源利用率同时降低负荷峰谷差在电力系统的运行中越来越迫切。针对这一问题,该文结合中国电力市场化改革的环境,提出了以负荷聚合商为主导的基于资源预留的电动汽车负荷群优化调度算法。通过对电动汽车用户出行情况的分析,构建了电动汽车接入充电桩充电及离开充电桩的概率模型,在此基础上分析了电动汽车群的可调节潜力。进而在聚合商的主导下,以风电消纳最大以及日峰谷差最小为目标,采用启发式算法中的遗传算法对该多目标优化问题优化求解,获得电动汽车最优的充电排布。通过仿真实验,该文验证了所提算法能够有效地改善因电动汽车大量接入带来的峰谷差劣化问题,同时能够有效地根据风电出力分配电动汽车的充电时间,极大地提升了风电的消纳水平。同时,通过对电动汽车充电情况的分析,也说明了该文算法能够保证电动汽车在离开前均能够充满电,保障了用户的正常使用需求。

在未来电力市场的环境下,电价的波动、储能的大量应用等其他因素,均会对电动汽车的调节效果产生影响,如何在更加复杂的环境下设计灵活的调节机制和优化策略,进一步提升电动汽车的调节效果,是未来需要研究的方向之一。

参考文献:

- [1] 马莉,范孟华,郭磊,等. 国外电力市场最新发展动向及其启示[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):1-9.
MA Li, FAN Menghua, GUO Lei, et al. Latest development trends of international electricity markets and their enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 1-9.
- [2] 杜孟珂,任燕峰,刘金涛,等. 电力市场环境下发电组合系统可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(4):21-28.
DU Mengke, REN Yanfeng, LIU Jintao, et al. Reliability evaluation of generation and transmission composite system in power market environment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 21-28.
- [3] 李晓瑞. 深圳市典型家庭负荷特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [4] 张文元,肖宝辉,李姝润. 新电力体制改革下售电公司定价与市场竞争力研究[J]. 智慧电力,2018,46(9):45-52.
ZHANG Wenyuan, XIAO Baohui, LI Shurun. Pricing and market competitiveness of electricity retailers under new strategy of electric power system reform[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 45-52.
- [5] 李亚平,王珂,郭晓蕊,等. 基于多场景评估的区域电网需求响应潜力[J]. 电网与清洁能源,2015,31(7):1-7.
LI Yaping, WANG Ke, GUO Xiaorui, et al. Demand response potential based on multi-scenarios assessment in regional power system[J]. Power Grid and Clean Energy, 2015, 31(7): 1-7.
- [6] 刘文颖,文晶,谢昶,等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(5):1079-1088.
LIU Wenyong, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [7] She X, Huang A Q, Wang F, et al. Wind energy system with integrated functions of active power transfer, reactive power compensation and voltage conversion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4512-4524.
- [8] 孙勇,魏敏,王磊,等. 基于系统调峰约束的电网风电消纳水平研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(19):107-112.
SUN Yong, WEI Min, WANG Lei, et al. Study on wind power consumption based on system peak regulation capability constrain[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 107-112.
- [9] 王蓓蓓,杨雪纯,杨胜春. 基于中长期时间维度的需求响应潜力及效果的系统动力学分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6368-6377.
WANG Beibei, YANG Xuechun, YANG Shengchun. System dynamics analysis of demand response potential and effect based on medium and long time dimension[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(24): 6368-6377.
- [10] Kondoh J, Lu L, Hammerstrom D J. An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service[J]. IEEE Transactions on Power Systems,

- 2011,26(3):1309-1316.
- [11] Du P W, Lu N. Appliance commitment for household load scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011,2(2):411-419.
- [12] Zhang Y, Lu N. Parameter selection for a centralized thermostatically controlled appliances load controller used for intra- hour load balancing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(4):2100-2108.
- [13] 工业和信息化部. 对十三届全国人大二次会议第 7936 号建议的答复[EB/OL]. (2019-07-16)[2020-03-31]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1146592/n3917132/n4545264/c7268161/content.html>.
- [14] 郭继孚,2016 北京交通发展年报[R]. 北京:北京交通发展研究院,2016.
- [15] 钟童科. 大规模电动汽车的充放电行为及其对电网的影响研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [16] 李秋硕. 电动汽车接入电网的电能有序利用模型与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
- [17] 孙晓明,王玮,苏粟,等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):191-195.
- SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(1):191-195.
- [18] 车长明,张华栋,李建祥,等. 需求侧规模化电动汽车的充电负荷优化调控策略[J]. 山东大学学报:工学版, 2017,47(6):108-114+133.
- CHE Changming, ZHANG Huadong, LI Jianxiang, et al. Optimization dispatch control strategy for charging load of large-scale electric vehicle on demand side[J]. Journal of Shandong University: Engineering Edition, 2017,47(6):108-114+133.
- [19] 陈艳,孙振胜,陈超,等. 智能电网下电动汽车直接负荷控制策略研究[J]. 电网与清洁能源,2017,33(10):116-123.
- CHEN Yan, SUN Zhensheng, CHEN Chao, et al. Research on direct load control strategy of electric vehicles in smart grid[J]. Power System and Clean Energy,2017,33(10):116-123.
- [20] Clement-Nyns K, Haesen E, Driesen J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):371-380.
- [21] Shao S N, Pipattanasomporn M, Rahman S. Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network[C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, Canada; IEEE,2009.