

考虑需求响应的交直流配网调度研究

蒋贤强¹,徐青山²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司,南京 211106;2. 东南大学 电气工程学院,南京 210096)

Research on AC/DC distribution network dispatching considering demand response

JIANG Xianqiang¹, XU Qingshan²

(1. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘要:随着需求响应与交直流配网不断发展,未来的配电网将出现电源侧分布式电源大量接入、电网侧直流配电方式兴起以及用户侧电力市场竞争性放开的发展态势。结合未来交直流配网中可能存在的可控元件和需求响应负荷,提出一种考虑需求响应的调度策略,其中可控元件包括:传统发电机、分布式电源和可控换流器等,充分挖掘交直配网的灵活性与需求响应相结合的潜力。以10节点交直流配网为算例,研究所提调度策略的经济性和消纳分布式电源(distributed generation, DG)的能力。

关键词:交直流配网;需求响应;分布式电源;调度

Abstract: With the development of demand response and AC/DC distribution network, there will be plenty of distributed generators at the power supply side, a rise of DC power supply mode and opening of the electric market at the user side. A power dispatch strategy is proposed which takes into account the demand response and controllable elements in AC/DC distribution network such as traditional generator, distributed generator, converter, and so on. Taking 10-node AC/DC distribution network for case study, the economics and ability to absorb distributed generator of proposed strategy is studied.

Key words: AC/DC distribution network; demand response; distributed generator; power dispatch

中图分类号:TK018;TM715 文献标志码:A

0 引言

由于传统能源日益枯竭以及环境污染等问题,人们开始重视分布式可再生能源及其发电技术。分布式电源的并网大多以直流方式接入,传统交流配电网在享受分布式电源带来的好处的同时,也增加了分布式电源与交流母线连接处的换流环节,提高了系统运行成本。若采用交直流配电网,可以提高系统运行经济性,实现分布式电源大规模接入。传统的交直流配电网通过对系统中可控换流器、分布式电源、储能及传统发电机的控制实现系统的优化调度,并未考虑需求响应带来的影响,因此本文结合需求响应与交直流配网中的可控元件,提出一种二者结合的调度方式,进一步实现交直流配网能量精细化管理。

目前国内外已有部分学者研究交直流配网的调度问题。文献[1]将直流配网加入到交流配网传统的调度方式中,提出一种含多端柔性直流的配电网调度模型。文献[2]提出一种考虑可控换流器与储能协调控制的交直流配网经济调度模型,通过优化可控换流器的无功和储能的功率,实现稳定运行的同时优化配网的购电成本。文献[3]以设备维护成

本、储能及换流损耗成本和购售电费构成的日运行费用最小为目标,提出了一种交直流混合微网经济优化模型。然而上述文献只考虑了直流配网中储能、可控换流器等元件对调度的影响,并未考虑负荷侧需求响应参与下,系统调度模型的变化。

本文结合交直流配网可控元件与需求响应,提出一种需求响应参与下的交直流配网调度方法,以实现未来电力市场开放和交直流配网快速发展态势下的系统经济调度。

1 交直流配网模型

1.1 母线结构

交直流配网中母线可以分为交流母线与直流母线,两者之间通过电压源型换流器(voltage source converter, VSC)连接^[4]。交流或直流母线根据元件用电或供电特性,通过DC/DC换流器、AC/DC换流器、AC/AC变压器或直接与元件相连。

1.2 VSC换流站模型

VSC是交直流配网灵活控制的核心元件^[5-6],其作用是实现交流侧与直流侧之间的电能转换,并且拥有双向功率流动的能力,会对交直流配网的潮流分布产生巨大的影响。VSC的等效电路可以看成是理想换流站、虚拟节点与等效电阻的组合^[7],如图1所示。

收稿日期:2018-04-03;修回日期:2018-12-26

基金项目:国家自然科学基金(51577028)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.51577028)

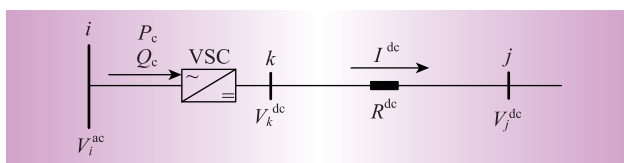


图1 VSC等效电路

Fig. 1 VSC equivalent circuit

由图1可得,节点*i*和虚拟节点*k*间的电压幅值关系为

$$V_i^{\text{ac}} = K_c M V_k^{\text{dc}} \quad (1)$$

式中: V_i^{ac} 、 V_k^{dc} 分别为交流母线和虚拟母线的电压幅值; K_c 为VSC变比; M 为VSC调制系数。

1.3 分布式电源模型

交直流配网中的分布式电源主要包括风电和光伏。风力发电系统的输出特性受风速的影响很大,一般来说风速可以认为服从威布尔分布^[8]。风速与风机出力的关系为^[9]

$$P(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_c \\ a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 & v_c \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_c 、 v_N 分别为风机的切入和切出风速; P_N 为额定功率; a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为风机的参数。

光伏系统的输出特性受光照强度的影响很大,一般来说光照强度可以认为服从Beta分布^[10],光伏的出力特性为^[11]

$$P(S) = \eta S \quad (3)$$

式中: S 为光照强度; η 为光伏系统转化效率。

2 需求响应模型

在需求响应资源中,除了化工、冶金等行业大用户外,还存在大量可控的商业、居民用户,广泛分布在配网的各个位置。由于它们数量庞大,用电特性各异,调度中心若单个进行调控,势必会形成维数灾。因此本文采用负荷聚合商(load aggregator, LA)模型对分散的中小型需求响应进行集中控制^[12]。

对于所管辖的需求响应,LA通过专业技术,挖掘潜在的电力用户,使其参与到电网调控当中,并提供相应的补贴和辅助服务^[13-14]。LA最关键的功能是将调度中心下发的负荷调控指令,通过LA内部决策系统分解,下发至管辖范围内的负荷,其控制量包括:动作时间、削减容量和持续时间等。

3 考虑需求响应的交直流配网调度模型

本节以电源与LA总成本最小为目标函数,其中,电源成本考虑其运行成本,需求响应成本考虑其补偿费用。

3.1 目标函数

$$\min C_f = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_g} C(P_{G,i}(t)) + \sum_{j=1}^{N_{LA}} C_{LA,j}(P_{LA,j}(t)) \right) \quad (4)$$

式中: C_f 为交直流配网总成本; T 为调控的时段数; N_g 为系统中分布式电源的总数; N_{LA} 为参与调控的LA数目; $P_{LA,j}(t)$ 为*t*时段第*j*个LA的调节功率; $C_{LA,j}(P_{LA,j}(t))$ 为调度中心向第*j*个LA支付的补偿费用。

3.2 约束条件

(1) 直流侧支路功率双向约束

$$S_{ij}^{\text{DC}} \leq S_{\max}^{\text{DC}} \quad (5)$$

$$S_{ji}^{\text{DC}} \leq S_{\max}^{\text{DC}} \quad (6)$$

式中: S_{ij}^{DC} 、 S_{ji}^{DC} 分别为直流侧支路*ij*的正向和反向视在功率; $S_{\max}^{\text{DC}}$ 为直流侧支路功率容量极限。

(2) 交流侧支路功率双向约束

$$S_{ij}^{\text{AC}} \leq S_{\max}^{\text{AC}} \quad (7)$$

$$S_{ji}^{\text{AC}} \leq S_{\max}^{\text{AC}} \quad (8)$$

式中: S_{ij}^{AC} 、 S_{ji}^{AC} 分别为交流侧支路*ij*的正向和反向视在功率; $S_{\max}^{\text{AC}}$ 为交流侧支路功率容量极限。

(3) 换流器运行约束

$$\sqrt{P_{\text{VSC}}^2 + Q_{\text{VSC}}^2} \leq S_{\max}^{\text{VSC}} \quad (9)$$

式中: P_{VSC} 、 Q_{VSC} 分别为换流器的有功功率和无功功率; $S_{\max}^{\text{VSC}}$ 为换流器的最大容量。

(4) 节点电压约束

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (10)$$

式中: $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$ 分别为电网正常状态下节点电压的允许下限和上限; V_i 为节点*i*的电压。

(5) 功率平衡约束

交流部分功率平衡方程

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点*i*的注入有功与无功功率; U_i 、 U_j 分别为节点*i*、*j*的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为系统导纳矩阵的实部和虚部; θ_{ij} 为节点*i*、*j*的电压相角差。

直流部分功率平衡方程

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j G_{ij} \quad (12)$$

(6) 发电机功率约束

$$\begin{cases} P_{\min}^{G,i} \leq P_{G,i} \leq P_{\max}^{G,i} \\ P_{\min}^{\text{DG},k} \leq P_{\text{DG},k} \leq P_{\max}^{\text{DG},k} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{\min}^{G,i}$ 、 $P_{\max}^{G,i}$ 分别为常规机组*i*的出力下限和上限; $P_{\min}^{\text{DG},k}$ 、 $P_{\max}^{\text{DG},k}$ 分别为分布式电源*k*的预测出力下限和上限。

(7) LA可调节容量约束

$$P_{\min}^{LA,j} \leq P_{LA,j} \leq P_{\max}^{LA,j} \quad (14)$$

式中: $P_{\min}^{LA,j}$ 、 $P_{\max}^{LA,j}$ 分别为第 j 个 LA 的可调节容量的下限和上限。

(8) 负荷中断允许时间约束

$$T_{Ld,n,\min} \leq T_{Ld,n} \leq T_{Ld,n,\max} \quad (15)$$

式中: $T_{Ld,n}$ 为第 n 个负荷的中断允许时间; $T_{Ld,n,\min}$ 为第 n 个负荷最小中断允许时间; $T_{Ld,n,\max}$ 为第 n 个负荷最大中断允许时间。

4 算例分析

本文采取如图2所示的10节点交直流系统为算例,其中实线表示交流母线,虚线表示直流母线。系统中包含2台风机、1台光伏,分布式电源的详细参数见表1。负荷、风机和光伏的日小时功率标幺值如图3—图5所示。节点1为平衡节点,通过直接或VSC换流的形式对该交直流配网进行供电。系统中存在2个负荷聚合商,分别管控节点3、4和节点5、6的可中断负荷,对应的可控容量与控制成本如表2所示。系统潮流计算的部分结果(节点电压标幺值)如图6所示。

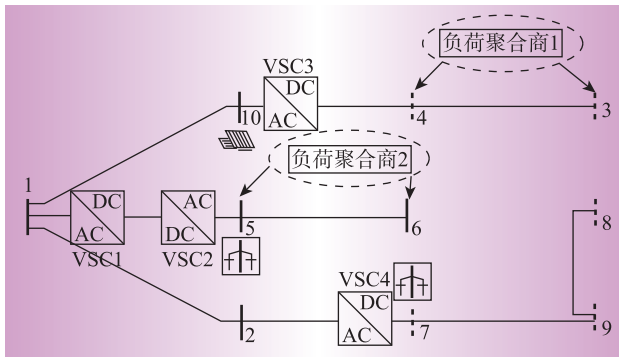


图2 含LA的交直流配网

Fig. 2 AC/DC distribution network containing LA

表1 分布式电源参数

Tab. 1 Parameters of DGs

编号	种类	接入节点	额定功率/MW	功率限制/MW
1	光伏1	7	25	30
2	光伏2	10	25	30
3	风机1	5	50	60

表2 LA参数

Tab. 2 Parameters of LA

负荷聚合商	负荷总容量/MW	可控负荷容量占比/%	控制成本/(元·kW ⁻¹)
1	161.955	30	1.0
2	244.111	30	0.9

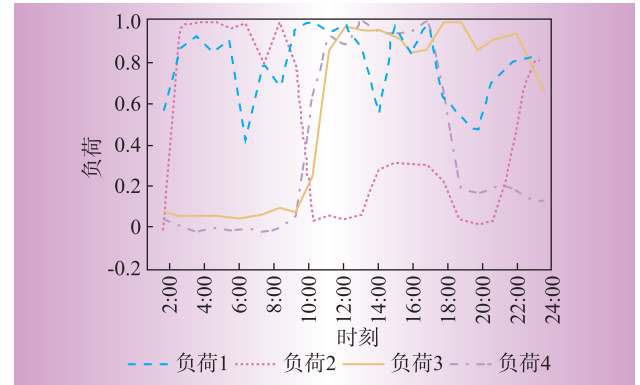


图3 负荷小时数据

Fig. 3 Load data

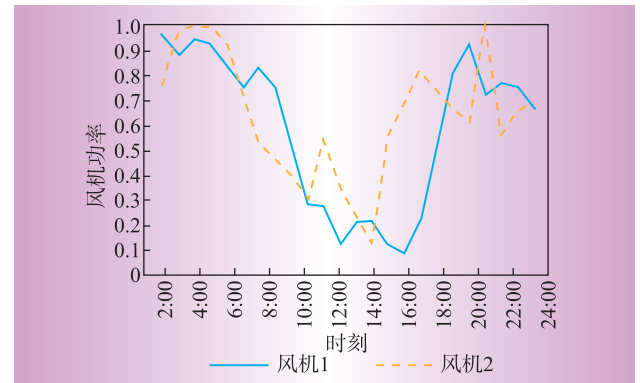


图4 风机数据日变化

Fig. 4 Wind power data in a day

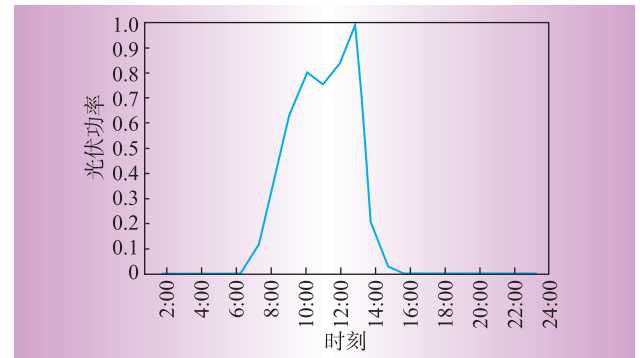


图5 光伏数据日变化

Fig. 5 PV data in a day

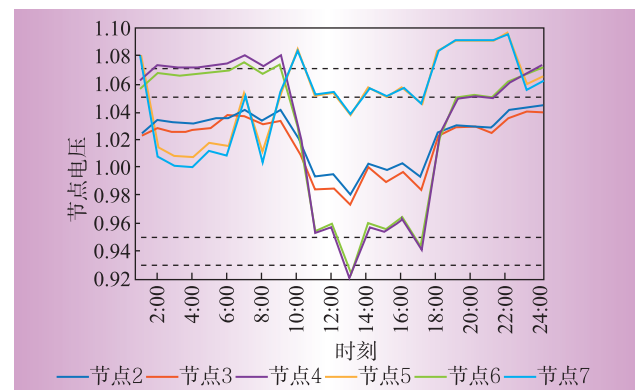


图6 部分节点电压日变化

Fig. 6 Partial node voltage in a day

(1) 运行经济性研究

为验证本文所提调度策略的经济性,现设定3种模式进行对比,分别是:模式1为不采用任何调度方案;模式2为采用调度方案,但不考虑LA的参与;模式3为采用本文所提考虑LA的调度方案。3种模式下,系统24 h调度成本如表3所示。

表3 3种模式系统日调度成本对比

Tab. 3 Comparison of dispatch cost in a day among 3 modes

成本类型	模式1	模式2	模式3
总成本	845 275.500	756 023.200	742 243.738
发电运行成本	835 460	749 300	707 640
机组启动成本	9 005.500	6 723.200	4 433.466
可中断备用成本	0	0	30 230.272
可中断备用容量	0	0	140
发电机备用容量	810	400	260

从表3可以看出,本文所提协调控制策略能够在一定程度上减少调度成本,尤其是存在LA的情况下,成本优势更大。在该算例前提下,模式3总成本比模式1、模式2分别低10.56%和12.19%,表明LA参与调度,能够在一定程度上减少发电机运行成本。模式3比模式2增加了可中断备用成本和可中断备用容量,但是降低了总成本,原因为:在用电高峰期,为满足负荷需求和备用容量约束,需增加发电机的启停,从而增加了运行成本。此时,若采用电价或者激励的形式削减或者转移部分柔性负荷,能够缓解发电机压力,进而减少运行成本,提高系统的经济性。

(2) DG 消纳能力研究

本文以最大DG渗透率作为DG消纳能力的指标。最大DG渗透率主要取决于电网的节点电压,当节点电压越上限会导致弃风弃光,而节点电压的大小与网络拓扑和DG、负荷的大小有关。本文通过计算3种模式下不同DG渗透率水平下全网最高节点电压,得到3种模式下各自的最高DG渗透率,最大节点电压标么值如图7所示。

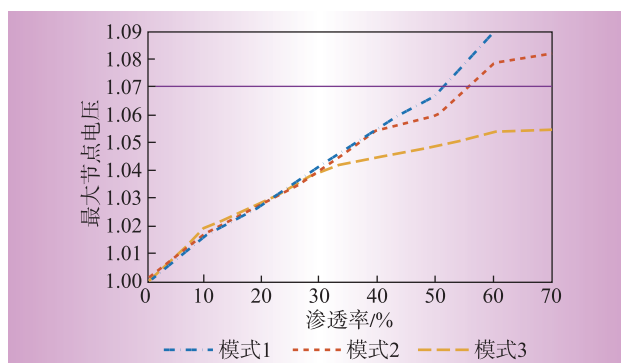


图7 不同模式、不同渗透率下全网最高节点电压

Fig. 7 The highest node voltage in different penetrances and modes

从图7中可以看出,以1.07为电压越限标准,模式1最大DG渗透率约为49%;模式2最大DG渗透率约为54%;模式3最大DG渗透率约为70%。当渗透率超过70%时,尽管VSC仍具备功率调节能力,但线路支路功率已达到上限,因此当前假设情况下的系统最大DG渗透率为70%。

6 结束语

在需求响应与交直流配网同步发展的背景下,本文提出了一种结合中小型可中断负荷与可控电源的交直流配网调度技术。本文所做工作可总结为以下3点:①分析了交直流配网组成元件,包括母线、换流器和分布式电源的模型及特性,为后续调度模型的建立做基础。②中小型需求响应以LA的形式加入交直流配网调度模型,LA向电网传送需求响应的可控容量与可控成本,作为调度中心制定控制策略的依据。LA得到控制指令后,按照自身利益最大化来分摊负荷。③以LA补偿成本与可控电源运行成本等总成本最小化为目标函数,提出一种考虑可中断负荷的交直流配网调度模型。以10节点交直流系统为算例,分析本文所提控制策略对系统运行成本和分布式电源消纳的影响,结果表明本文所提调度策略能够在一定程度上降低系统运行成本并提高系统消纳分布式电源的能力。

参考文献:

- [1] 许丹,姜曼,郑晓雨,等. 含多端柔性直流电网的调度计划优化建模[J]. 电力系统自动化,2017,41(23):22-28.
XU Dan, JIANG Man, ZHENG Xiaoyu, et al. Optimal modeling of dispatch scheduling for power grid with VSC-MT-DC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23):22-28.
- [2] 王守相,陈思佳,谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017,41(11):85-91.
WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11):85-91.
- [3] 邱海峰,赵波,林达,等. 计及储能损耗和换流成本的两直流混合微网区域协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017,41(23):29-37.
QIU Haifeng, ZHAO Bo, LIN Da, et al. Regional coordinated dispatch in AC/DC hybrid microgrids considering energy storage loss and converter cost [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23):29-37.

- [4] 谢宁,曾杰,徐琪,等. 交直流混合的分布式可再生能源系统综述[J]. 南方电网技术,2017,11(9):30-35.
XIE Ning, ZENG Jie, XU Qi, et al. Overview of AC&DC hybrid distributed renewable energy system[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(9):30-35.
- [5] 马骏超,江全元,余鹏,等. 直流配电网能量优化控制技术综述[J]. 电力系统自动化,2013,37(24):89-96.
MA Juncao, JIANG Quanyuan, YU Peng, et al. Survey on energy optimized control technology in DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 89-96.
- [6] 刘树,赵宇明,陈莉,等. 柔性直流配电网控制保护系统设计与策略研究[J]. 供用电,2018,35(1):21-27,39.
LIU Shu, ZHAO Yuming, CHEN Li, et al. Research on control and protection strategy and design scheme of VSC-DC distribution network control and protection system[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1):21-27, 39.
- [7] BYEON G, YOON T, OH S, et al. Energy management strategy of the DC distribution system in buildings using the EV service model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(4): 1 544-1 554.
- [8] 王松岩,于继来. 短时风速概率分布的混合威布尔逼近方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(6):89-93.
WANG Songyan, YU Jilai. Approximation of two-peak wind speed probability density function with mixed Weibull distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6):89-93.
- [9] 郑小霞,赵华,刘璐洁,等. 考虑可及性的海上风机综合维护策略[J]. 电网技术,2014,38(11):3 030-3 036.
ZHENG Xiaoxia, ZHAO Hua, LIU Lujie, et al. A combined maintenance strategy for offshore wind turbine considering accessibility[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3 030-3 036.
- [10] 管霖,陈旭,吕耀棠,等. 适用于电网规划的光伏发电概率模型及其应用[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):1-7.
GUAN Lin, CHEN Xu, LV Yaotang, et al. Probability model of PV generation for power system planning and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 1-7.
- [11] 陈旭,杨雨瑶,张勇军,等. 光伏光照概率性对配电网电压的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2015,15(4):112-118.
CHEN Xu, YANG Yuyao, ZHANG Yongjun, et al. Influence of illumination probability of photovoltaic system on voltage of power distribution networks[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 15(4): 112-118.
- [12] 张文彦. 负荷聚合商模式下的冰蓄冷空调弃风消纳研究[J]. 电力需求侧管理,2018,20(3):28-33,39.
ZHANG Wenyan. Curtailed wind consumption considering ice storage air conditioning in load aggregator mode[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(3): 28-33, 39.
- [13] 高赐威,李倩玉,李扬. 基于DLC的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1 546-1 555.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1 546-1 555.
- [14] 刘国辉,赵佳,孙毅. 基于模糊优化集对分析理论的需求响应潜力评估[J]. 电力需求侧管理,2018,20(6):1-5.
LIU Guohui, ZHAO Jia, SUN Yi. Potential evaluation of demand response based on fuzzy optimization of set pair analysis[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6):1-5.

(本栏责任编辑 李雅超)

(上接第18页)

- [8] SAYYAD N, KAZEM Z, BEHNAM I. Optimal stochastic energy management of retailer based on selling price determination under smart grid environment in the presence of demand response program[J]. Applied Energy, 2017, 187(1):449-464.
- [9] 刘连光,潘明明,田世明,等. 考虑源网荷多元主体的售电竞争非合作博弈方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(6):1 618-1 626.
LIU Lianguang, PAN Mingming, TIAN Shiming, et al. A non-cooperative game analysis of a competitive electricity retail considering multiple subjects of source-grid-load[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6):1 618-1 626.
- [10] 张金良,张文文,李德智,等. 基于合作博弈理论的增量配网收益分配策略研究[J]. 电力需求侧管理,2018,20(4):15-21.
ZHANG Jinliang, ZHANG Wenwen, LI Dezhi, et al. Research on income distribution of incremental distribution network based on cooperative game theory[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(4):15-21.
- [11] HAILI S, CHEN-CHING L, JACQUES L. Nash equilibrium bidding strategies in a bilateral electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(1):73-79.