

基于空调负荷的虚拟储能参与调频的控制策略

屠聪为,曹 军,于东立,门向阳

(华北电力大学 新能源国家重点实验室,北京 102206)

Control strategy of virtual energy storage system participating in frequency modulation based on air conditioning loads

TU Congwei, CAO Jun, YU Dongli, MEN Xiangyang

(The State Key Laboratory of Alternate Electric Power Systems with New Energy Resources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要:随着风电场装机规模增大,风电并网对电力系统的频率冲击愈发不容忽视。建立了由电池储能系统(BESS)和空调负荷群(ACLs)构成的虚拟储能系统(VESS),并提出了一种适用于 VESS 的内部协调控制策略来提高电力系统频率稳定性,通过 MATLAB/SIMULINK 仿真验证了本文提出方案的正确性。

关键词:虚拟储能系统;需求响应;模糊控制;调频;空调负荷

Abstract: With the increase of wind power penetration, the frequency impact of wind power integration on power systems can not be ignored. A coordinated control strategy applied to virtual energy storage system (VESS) which contained battery energy storage system (BESS) and air-conditioning loads (ACLs) is proposed. The conclusions by simulating on MATLAB/SIMULINK are verified.

Key words: VESS; demand response; fuzzy control; frequency regulation; air-conditioning loads

中图分类号:F407.61;TM714;TK018 文献标志码:A

0 引言

随着风电渗透率的升高,风力波动对电力系统的安全运行带来了很大挑战。单纯依赖常规机组自动调节系统来维持新能源电力系统频率稳定运行有一定困难。装设储能系统(energy storage system, ESS)是解决频率问题的一种方案^[1]。近年来,许多学者研究了由空调系统、电热水器、电冰箱等组成的负荷控制技术^[2],通过控制其设定温度或开关状态抵消部分电网功率波动,减小 ESS 需求量,从而降低辅助设备的成本。这些温控负荷可以依靠热惯性^[3]短暂存储能量,在短时间内改变运行状态,对用户的舒适度影响较小。

国内经济的发展促进了空调的普及。2017年,北京市在高温天气下,空调等降温负荷占比约占全网负荷的52%^[4],ACLs成为一种极具潜力的需求响应手段^[5]。由于频繁开关空调会缩短空调的寿命,文献[6]提出了一种通过调节空调的设定温度来使 ACLs 参与频率响应的方法;文献[7]在文献[6]的基础上提出了 ACLs 的完整特性模型,但其提出的 ACLs 模型仅用于削峰填谷,没有考虑 ACLs 参与电

网实时功率调节;文献[8]验证了 ACLs 可以为微电网提供调频备用,但只证明了该方法在负荷突变情况下的有效性,缺乏普适性。

以上文献均仅考虑 ACLs 参与系统频率响应,但 ACLs 的大小易受气温、设定温度、用户开关状态等因素影响,具有不稳定性^[9],无法持续、可靠地为电网提供频率响应,因此,ACLs 需要和现有的 ESS 装置配合作用。文献[10]提出了 DR 与 ESS 协调控制的方法,但没有建立具体的负荷模型,并且没有考虑温度调节范围的影响,缺乏实际意义。

本文从电网运行需求的全局角度,兼顾辅助设备经济性,提出一种 VESS 内部协调控制策略。第一部分建立由 ACLs 和 BESS 构成的 VESS 模型,并提出一种模糊控制策略;第二部分通过 MATLAB/SIMULINK 仿真验证该协调控制策略的有效性:一是可以改进 VESS 提供连续的频率响应的能力,更稳定地抑制持续性电网波动;二是能提高 ACLs 用户的舒适性,以及避免 BESS 过度充放电;三是降低电网辅助设备成本。

1 VESS 模型

BESS 的容量易受成本限制,而空调负荷易受气温、设定温度、用户开关状态等因素影响,具有不确定性。由 BESS 和 ACLs 共同构成的 VESS 可以在降

收稿日期:2018-08-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407070)

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51407070)

低成本的同时提供稳定的频率响应。下面分别介绍 BESS 和空调负荷建模。

1.1 BESS

BESS 采用一阶低通滤波器来抑制电网中有功功率的波动

$$P_{LPF} = \frac{1}{1 + sT_{delay}} \cdot \Delta P \quad (1)$$

式中: P_{LPF} 为低通滤波器的输出; ΔP 为电网中的不平衡功率。通过控制时间常数 T_{delay} 的大小来调节 BESS 的出力, T_{delay} 值越大, BESS 功率变化越快。电池的功率可以表示为不平衡功率与滤波器输出之差

$$P_{battery} = \Delta P - P_{LPF} \quad (2)$$

BESS 的荷电状态为

$$SOC = SOC_0 \left(1 - e^{-\frac{\int P_{battery} dt}{Q}} \right) \quad (3)$$

式中: SOC 为 BESS 的荷电状态; SOC_0 为 BESS 的初始荷电水平; e 为 BESS 的效率; Q 为 BESS 的容量。

1.2 ACL

ACL 模型^[11]是建立集群空调负荷 (ACLs) 模型的基础, 通过调节设定温度的高低可以短时间内改变空调的功率。结合房屋热交换情况, 建立单台空调-建筑系统的等效热力学参数模型

$$\frac{dT_{room}}{dt} = \frac{1}{M_{air} \cdot c} \left(\frac{dQ_{AC}}{dt} - \frac{dQ_{losses}}{dt} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dQ_{losses}}{dt} = \frac{T_{room} - T_{out}}{R_{eq}} \quad (5)$$

式中: T_{room} 为室温; M_{air} 为室内空气质量; c 为标准大气压下空气热容; Q_{AC} 为空调制冷量; Q_{losses} 为建筑热量损失; T_{out} 为室外温度; R_{eq} 为房间的等效热阻。

空调的电功率与制冷量的关系为

$$P_{AC}(t) = \frac{Q_{AC}(t)}{b} \quad (6)$$

式中: b 为空调热电转换系数。

空调的实时功率

$$P_{ACL}(t) = P_{AC}(t) \cdot s(t) \quad (7)$$

根据空调间歇工作的特点, 若设定温度 T_{set} 不变, 经过一段时间, 室内温度将稳定在 $T_{set} \pm \Delta T$ 范围内, 其运行状态 s 取决于室内温度^[12], 可以表示为

$$s(t) = \begin{cases} 0 & T_{room}(t) < T_{set}(t) - \Delta T \\ 1 & T_{room}(t) > T_{set}(t) + \Delta T \\ s(t-1) & T_{set}(t) - \Delta T < T_{room}(t) < T_{set}(t) + \Delta T \end{cases} \quad (8)$$

式中: ΔT 为空调阈值温度的二分之一。

若 T_{set} 改变, 经过一段时间, 室内温度将稳定在新的温度设定值 T'_{set} 附近。在 T_{set} 改变的時刻, 空调的运行状态取决于新的温度设定值 T'_{set} 及上一时刻的运行状态, 此时 s 表示为

$$s(t-1)=0 \text{ 时, } s(t) = \begin{cases} 0 & T'_{set}(t) < T_{room}(t) - \Delta T \\ 1 & T'_{set}(t) > T_{room}(t) - \Delta T \end{cases} \quad (9)$$

$$s(t-1)=1 \text{ 时, } s(t) = \begin{cases} 0 & T'_{set}(t) < T_{room}(t) + \Delta T \\ 1 & T'_{set}(t) > T_{room}(t) + \Delta T \end{cases}$$

由式(9)得: 若某空调的前一时刻的运行状态为 0, 并且新的温度设定值满足 $T'_{set}(t) > T_{room}(t) - \Delta T$, 则该空调的实时功率由 0 突然增大为 P_{ACL} ; 若其前一时刻的运行状态为 1, 并且 T'_{set} 满足 $T'_{set}(t) < T_{room}(t) + \Delta T$, 则该空调的实时功率由 P_{ACL} 突然减小为 0。此时, 若电网负荷突然受到扰动 ΔP , 可以通过调度调节该空调的设定温度, 使空调参与频率响应, 以抵消部分电网有功功率波动。

忽略在短时间内室外温度的变化, 利用滑模控制方案^[10], 温度设定值的变化量 ΔT 可以表示为

$$\Delta T(t) = -\int_0^t k \frac{\Delta P(t)}{|\Delta P(t)|} dt \quad (10)$$

式中: k 为增益值。

记空调温度设定值上下限分别为 T_{max} 、 T_{min} , 即当空调设定温度超过 T_{max} 时, 空调设定温度维持在 T_{max} ; 反之, 当空调设定温度低于 T_{min} 时, 则维持在 T_{min} 。ACL 的虚拟荷电状态可以表示为

$$SOC_{ACLs}(t) = \frac{T_{max} - T_{room}(t)}{T_{max} - T_{min}} \times 100\% \quad (11)$$

1.3 ACLs

单台空调的出力具有随机性, 空调负荷若要参与系统调频, 容量至少需要达到 2 MW^[13]。因此, 需要把大量空调聚合, 形成在各个时段稳定可控的总负负荷资源。

ACLs 的功率为所有空调负荷的总和

$$P_{ACLs_sum}(t) = \sum_{n=1}^N P_{ACL_n}(t) \cdot s_n(t) \quad (12)$$

式中: $P_{ACLs_sum}(t)$ 为 ACLs 在 t 时刻的总功率; N 为 ACLs 的数量; $P_{ACL_n}(t)$ 、 $s_n(t)$ 分别为第 n 台空调在 t 时刻的功率和运行状态。

为方便控制, 将建筑环境相似、空调型号相近条件下的空调负荷进行聚合。此时, 可以选用蒙特卡洛模拟方法^[6]对该聚合模型进行研究, 利用具有对数正态分布的典型参数来表征 ACLs 内部的个体参数。接着, 构建一个优先控制模块, 来筛选电网受到扰动时优先参与频率响应的空调负荷, 如图 1 所示。该模块实时监测电网频率 f 。当电网频率 f 高于 50 Hz 时, 为每台空调引入标识点 C_1 ; 当电网频率 f 低于 50 Hz 时, 引入标识点 C_2 。

C_1 、 C_2 的取值与 T_{room} 呈线性关系。在确定 C_1 时, 允许的频率偏移最大值与最低室温对应, 频率额定值与最高室温对应, 这样可以充分利用空调可参与频率响应的容量。在确定 C_2 时, 频率额定值与最低

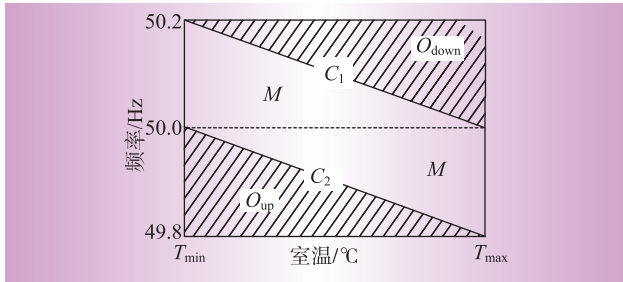


图1 优先控制模块原则

Fig. 1 Principle of priority control module

室温对应,允许的频率偏移最小值与最高室温对应

$$\begin{cases} C_1(t) - f_N = \frac{f_{\max} - f_N}{T_{\min} - T_{\max}} [T_{\text{room}}(t) - T_{\max}] \\ C_2(t) - f_N = \frac{f_N - f_{\min}}{T_{\min} - T_{\max}} [T_{\text{room}}(t) - T_{\min}] \end{cases} \quad (13)$$

式中: f_N 为电网额定频率 50 Hz; $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ 分别为电网频率允许波动范围的最大值和最小值,即 50.2 Hz 和 49.8 Hz;

通过将频率 $f(t)$ 与第 i 台空调的标识点 $C_{1i}(t)$ 、 $C_{2i}(t)$ 比较,来确定第 i 台空调属于上调群 $O_{\text{up}}(t)$ 、下调群 $O_{\text{down}}(t)$ 还是正常运行群 $M(t)$ 。

在上调群 $O_{\text{up}}(t)$ 中,将各空调按温度升序排列,温度低的优先参与电网频率响应;在下调群 $O_{\text{down}}(t)$ 中,将各空调按温度降序排列,温度高的优先参与响应。通过该优先控制模块,可以使室内温度偏离设定温度较少的空调优先参与电网频率调整,减少参与排序的空调数量,从而提高筛选速度。

1.4 VESS 内部控制策略

不同的频率波动情况可由具备对应性能的设备进行调节。BESS 和 ACLs 的响应时间不同,BESS 的响应时间为分钟级到小时级,ACLs 的响应时间一般小于 15 min^[7]。为了充分利用 VESS,有效调节 ACLs 以及 BESS 参与电网调频的比例,提出了一种模糊控制策略,如图 2 所示。

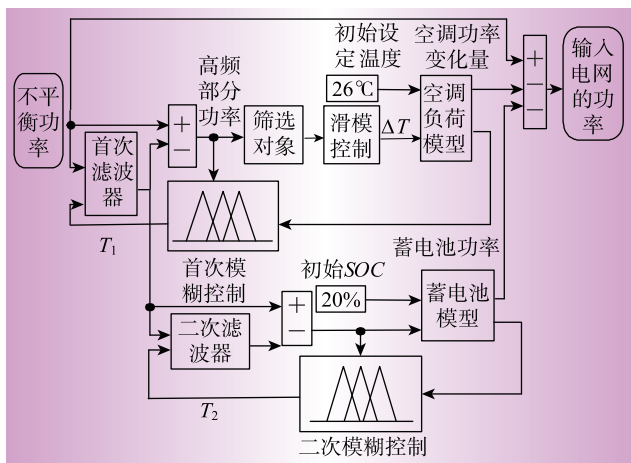


图2 模糊控制策略

Fig. 2 Fuzzy control strategy

利用 2 个不同时间常数的滤波器,提取高频段和中频段频率,并使 ACLs 平抑高频段频率 ($f \geq f_H$),BESS 平抑中频段频率 ($f_L \leq f \leq f_H$)。将 VESS 的 SOC 水平分为正常状态和警戒状态。

2 个模糊控制器分别根据 ACLs 和 BESS 的充电水平及速度,自适应地调整对应滤波器的截止频率,即通过改变过滤器的时间常数,来控制空调设定温度改变量的大小和 BESS 输出功率。过滤器的时间常数越大,参与调频的空调数量及 BESS 的输出功率越大,抑制电网波动的作用越明显。时间常数算法原则如表 1 所示。

表 1 模糊控制算法原则

Tab. 1 Principle of fuzzy control

时间常数 T	充放电速度		
	快速放电	正常	快速充电
SOC 低	小	小	大
SOC 正常	大	小	大
SOC 高	大	小	小

2 算例分析

将 VESS 连接到图 3 所示的频率响应模型中进行仿真分析,来评估该系统提高电网频率稳定性的能力。常规发电机组选用电机组,其特性用调速器、涡轮机转换函数表示,系统惯量用等效惯量 H 表示,频率敏感负荷的阻尼效应用等效阻尼 D 表示。其中 $T_1=0.2$; $T_2=0.5$; $h=2H=10$; $D=0.6$; $B=10$; $R=0.08$; $K=0.003$ 。

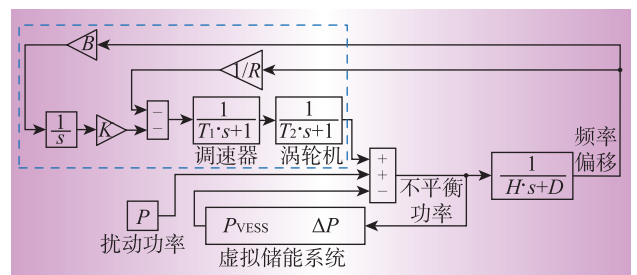


图3 系统频率响应模型

Fig. 3 System frequency response model

该系统中,火机组的容量为 1 GW; VESS 中包含 100 座地理位置接近、建筑外围结构相似、空调性能相似的非空置空调-建筑系统,其中 1 个典型空调-建筑系统的主要系统参数如表 2 所示。下面对以下 3 种方案进行仿真分析。

表2 典型空调-建筑系统参数
Tab. 2 Parameters of an air-house system

参数	取值	参数	取值
等效热容/(kJ·℃)	1 788	空调阈值温度/℃	0.1
等效热阻/(℃·kW)	1.54	设定温度上限/℃	28
制冷量/kW	219	设定温度下限/℃	24
温度初始值/℃	26	室外温度/℃	36
热电转换系数	3		

方案1:电网中仅有 BESS,包含2个储能电厂,每个储能电厂中有4个BESS,规模分别为2个6 MW×6 h和2个4 MW×4 h;

方案2:电网中有 VESS,其中该 VESS 包含100个上述空调-建筑系统以及1个储能电厂,储能电厂中有4个BESS,规模分别为2个6 MW×3 h和2个4 MW×2 h。ACLs与BESS分别单独参与调频。

方案3:电网中有 VESS,且容量配置与方案2相同,但在 ACLs 与 BESS 之间加入1.4节中提出的模糊控制策略,两者协同调频。模糊控制器的参数设置如图4所示。

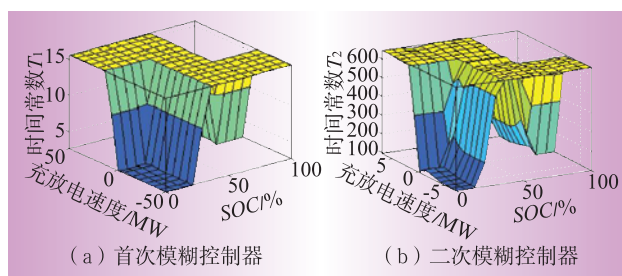


图4 模糊控制器参数设置曲面图
Fig. 4 Parameter settings of fuzzy controllers

2.1 频率响应能力分析

2.1.1 电网受到阶跃扰动

在5 s时,若一个500 MW的发电机组退出运行,频率偏移量改善程度并不是很大。3种方案下电网频率的仿真结果如图5所示。方案2和方案3相比方案1,频率最低点均有提高,但2者差别不大,并且方案3的频率恢复速度略高于方案2。

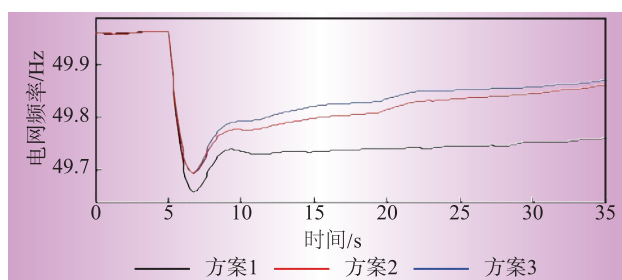


图5 电网频率仿真结果
Fig. 5 Simulate results of grid frequency

2.1.2 电网受到连续扰动

若电网扰动为一个100 MW的风电场,该风电

场一天的出力情况如图6所示。3种方案的电网频率仿真结果如图7所示,图7(a)为方案1和方案2对比,方案2在20 000 s内频率响应效果较好,30 000 s后方案2和方案1的频率响应效果差别不大。图7(b)为方案1和方案3对比,大多数时间方案3的频率响应效果要优于方案1。对比图7(a)、图7(b),在电网受到连续扰动时,本文提出的模糊控制策略能在更长时间内提供稳定的频率响应,提高频率稳定性。

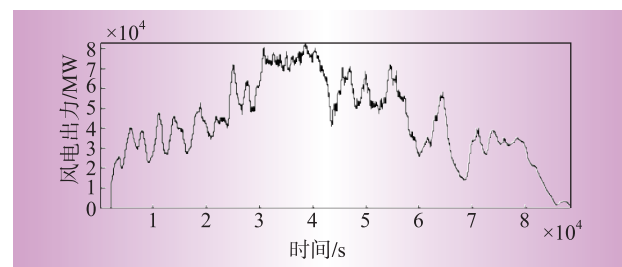


图6 某风电场一天出力情况
Fig. 6 A day output of a wind farm

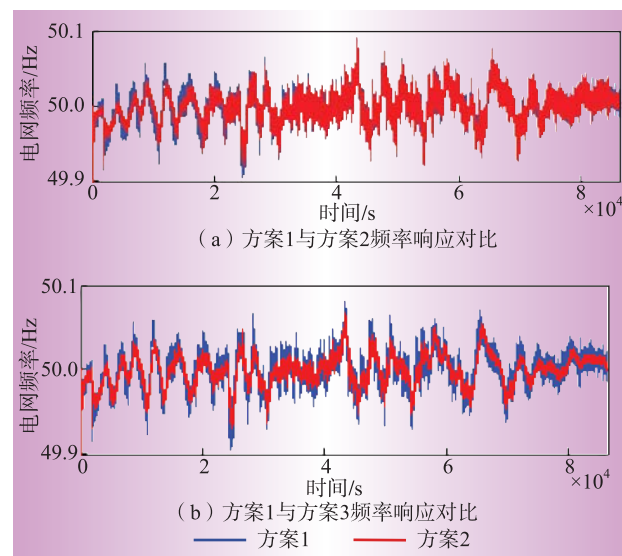


图7 电网频率仿真结果
Fig. 7 Simulate results of grid frequency

2.2 用户舒适度及BESS充放电分析

下面对3种方案在电网受到2.1.2中风电场持续扰动的情况进行分析。

空调建筑的室内温度变化情况如图8所示。从图8(a)中可以看出方案2中室温为28℃的时间超过总仿真时长的3/4,较大程度上影响用户舒适性体验。从图8(b)中可以看出,在BESS和ACLs之间加入模糊控制策略后,室内温度最高仅达27℃左右,最低仅为25℃左右,用户舒适度得到了提升。

BESS部分的充放电情况如图9所示,从图9可以看出,方案2在约38 600 s时能量全部放完,无法继续参与频率响应。图9显示,方案3的SOC水平能基本保持在20%以上。因此,本文提出的模糊控

制策略可以有效改善 BESS 的 SOC 水平,延长 BESS 的寿命。

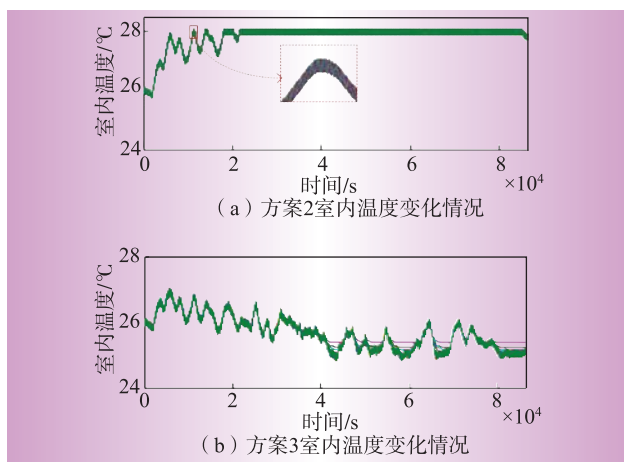


图8 室内温度变化情况

Fig. 8 Changes of room

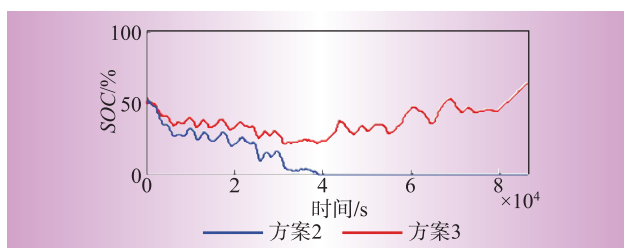


图9 BESS的SOC变化情况

Fig. 9 Changes of SOC of BESS

图10(a)为首次滤波器的时间常数变化图,当室内温度偏高且需要继续升高室内温度或者当室内温度偏低且需要继续降低室内温度时,模糊控制器能减小输入首次滤波器的时间常数,从而将室内温度控制在正常水平。图10(b)为二次滤波器的时间常数变化图,当SOC处于警戒水平,且有继续恶化趋势时,模糊控制器输出的时间常数变小,从而维持BESS的SOC在正常水平。

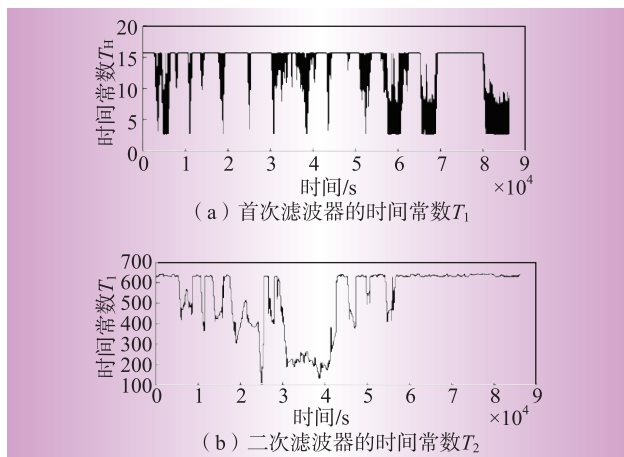


图10 方案3中滤波器时间常数

Fig. 10 Time constant of filters in scheme3

3 结论

本文提出了一种虚拟储能系统内部协调控制策略。首先,针对 ACLs 提出了优先控制模块,能根据室内温度水平筛选出优先参与频率响应的空调负荷;在此基础上,提出了一种模糊控制策略,能协调控制 ACLs 和 BESS;最后,通过仿真实验,验证了与规模相同但不含模糊控制策略的 VESS 相比,含有本文提出的模糊控制策略的 VESS 可以在电网受到阶跃扰动时提供更快速的频率响应。在电网受到持续性扰动时,模糊控制器会控制滤波器的时间常数变化,从而使 VESS 提供更长时间的稳定频率响应,并且含有本文提出的模糊控制策略的 VESS 可以将室内温度控制在设定温度附近,提高了用户舒适性,也缩短了 BESS 工作在警戒状态的时间,减少了出现过充过放的现象,因此可以延长 BESS 的使用寿命。D

参考文献:

- [1] CHAD A, GZA J. Supercapacitor energy storage for wind energy applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 769-776.
- [2] 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.
- [3] 朱峰. 空调负荷需求响应特性及其调控策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2016. ZHU Feng. Research on demand response characteristic and control strategy of air conditioning load [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [4] 薛之白. 高温之下北京电网负荷创历史新高 空调负荷占比过半 [EB/OL]. <http://www.zaobao.com/realtime/china/story20170713-778728>. XUE Zhibai. Beijing power grid load sets a new historic high under high temperature. Air conditioning load accounts for more than half [EB/OL]. <http://www.zaobao.com/realtime/china/story20170713-778728>.
- [5] 李作锋, 杨斌, 杨永标. 基于日前调度的大规模中央空调调峰方法[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(3): 26-30. LI Zuofeng, YANG Bin, YANG Yongbiao. The peak load shifting method based on day-ahead dispatch with large scale central air-conditioning [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(3): 26-30.
- [6] 蒋林洳, 万伟江, 丁宵寅, 等. 一种基于直接蒙特卡洛法的电动汽车充电负荷模型[J]. 供用电, 2018, 35(4):

20-25, 13.

JIANG Linru, WAN Weijiang, DING Xiaoyin, et al. Electric vehicle charging load model based on direct Monte-Carlo method [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35 (4):20-25, 13.

- [7] 王怡岚, 童亦斌, 黄梅, 等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2):394-401.
WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(2):394-401.

- [8] 刘萌, 褚晓东, 张文, 等. 基于多样性保持的空调负荷群调度控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (22):3 674-3 682.

LIU Meng, CHU Xiaodong, ZHANG Wen, et al. Dispatch and control strategies for air-conditioning load groups based on maintenance of load diversity [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3 674-3 682.

- [9] CHENG M, SAIF S S, WU J Z. Benefits of using virtual energy storage system for power system frequency response[J]. Applied Energy, 2017(194):376-385.

- [10] WANG D, GE S Y, JIA H J, et al. A demand response and battery storage coordination algorithm for providing microgrid tie-line smoothing services[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2):476-485.

- [11] ZHANG W, LIAN J, CHANG C Y, et al. Aggregated modeling and control of air conditioning loads for demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4):4 655-4 664.

- [12] 李东东, 刘洋, 林顺富, 等. 典型居民温控负荷建模及聚合特性研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(16):56-62.
LI Dongdong, LIU Yang, LIN Shunfu, et al. The study on the modeling and the aggregation characteristics of typical residential thermostatically-controlled load [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54 (16) : 56-62.

- [13] 中国储能网新闻中心. 电力交易系列:调频辅助服务市场概况 [EB/OL]. <http://www.escn.com.cn/news/show-396945.html>.

China Energy Storage Network News Center. Electricity trading series: Overview of frequency regulation ancillary service market [EB/OL]. <http://www.escn.com.cn/news/show-396945.html>.



作者简介:

屠聪为(1993),女,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方向为需求响应;

曹军(1983),男,北京人,副教授,研究方向为电力系统稳定分析与控制。

(上接第15页)

- [7] 刘柏良, 黄学良, 李军, 等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. 电网技术, 2015, 39(2):450-456.

LIU Bailiang, HUANG Xueliang, LI Jun, et al. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging stations [J]. Power System Technology, 2015, 39(2):450-456.

- [8] 初壮, 乔福泉. 考虑风电与负荷时序性的分布式风电源选址定容[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29 (10):85-90.

CHU Zhuang, QIAO Fuquan. Locating and sizing of distributed wind generation considering wind generation and the timing characteristics of load [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(10):85-90.

- [9] 许珊, 李扬. 引导电动汽车有序充放电的峰谷电价时段优化模型[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(5):11-15.

XU Shan, LI Yang. An optimization model of peak-valley price time interval for guiding the orderly charging and discharging of electric vehicles [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(5):11-15.

- [10] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及可入网电动汽车的分布式电源最优选址和定容[J]. 电力系统自动化,

2011, 35(18):11-16.

LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of distributed generators considering plug-in electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18):11-16.

- [11] 黄付顺, 王倩, 何美华. 考虑低碳效益和时序特性的分布式电源优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8):61-68.

HUANG Fushun, WANG Qian, HE Meihua. Optimal allocation of distributed generator based on carbon benefits and time-sequence characteristics [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8):61-68.

- [12] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4 (4) : 1 401-1 407 .

作者简介:

许珊(1994),女,江苏连云港人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划;

李扬(1961),男,江苏泰兴人,教授,主要研究方向为电力系统运行、电力市场、电力需求侧管理等。