

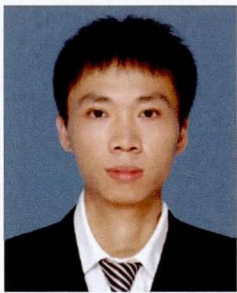
基于用户舒适度约束的中央空调冷负荷需求响应策略研究

讨论了在需求响应控制下,中央空调系统不同的负荷率(实际运行功率占额定功率的比例)的运行时间。基于用户温度为舒适约束的室温控制模型,对中央空调负荷进行了动态建模。然后讨论了3种不同的控制策略:①提前降低室内设定温度控制策略。②在高峰时段升高室内设定温度的控制策略。③改进后的控制策略。探讨了在电力高峰负荷段,控制策略对用户舒适度和中央空调系统高负荷率运行时间的影响,以中央空调系统在假定的高峰用电时刻高负荷率运行时间最短为目标,得出了最优的控制策略。该运行策略不仅减少了高峰时段的电力消耗,提高了电网的安全性,而且将供应侧与用户侧很好地结合起来,改善其经济性,因此具有广泛的工程应用前景。

唐升卫 周伊琳 刘 菲/广东电网有限责任公司电力科学研究院南方电网“电网自动化实验室”

王 惠/中低温热能高效利用教育部重点实验室(天津大学机械工程学院)

王 丹/智能电网教育部重点实验室(天津大学电气与自动化工程学院)



唐升卫/硕士研究生

关键词/Keywords

需求响应·
控制策略·
中央空调·
用户舒适度·
负荷率·

随着社会的不断发展,电力在工业生产和人们生活中已不可或缺。然而夏季和冬季的用电高峰时段不但造成了电网运行的极大不稳定,还产生了巨大的电量损失^[1]。目前,环境资源问题日益凸显,节能减排迫在眉睫,所以智能电网的发展为电网的削峰填谷和节能减排提供了重要保障。据统计,我国电网空调系统负荷已占电网高峰负荷的30%左右,在经济比较发达的城市中央空调系统的普及率已经达到了60%~70%^[2-3]。因此,在电力高峰负荷时段有效控制中央空调系统高负荷率运行时间即减少中央空调系统的用电负荷,对电网平稳运行和节能减排有重要意义。

中国南方电网电网自动化重点实验室支持项目(K-GD2013-036);中国博士后科学基金项目(2013M540207)。

行和节能减排有重要意义。

美国加州电力市场失败的教训就是因为缺乏需求侧的实时响应,只有把需求侧和供应侧同等对待,才能形成一个真正良性运行的电力市场^[4-5]。如今,高级测量、现代控制和无线通信等技术的发展为需求响应技术在供应侧对需求侧的控制上奠定了基础^[6-7]。需求响应在国内外已有大量应用和研究,美国加州、新英格兰ISO和宾夕法尼亚-新泽西-马里兰州RTO等7个ISO/RTO,以及太平洋天然气与电气和南加州爱迪生等众多电力公司都已陆续建立了基于市场运作的的需求响应项目,然而各国的需求响应模式也还在摸索当中。对于空调热泵系统的需求响应技术,为了实现空调热泵系统与电网的有机互动,Ning Lu^[8-10]提出了家用空调器的简化等效热力模型,并给出了电力系统中根据温度高低控制空调器起停的控制策略;K. P. Schneider等人^[11]给出了单体热泵的时变多状态模型,给出了HVAC系统不同运行状态(关闭、制冷、制热及紧急加热)下室温、功耗的模拟。Ji. Hoon Yoon^[12-13]提出了根据实时电价改变温度设定值的控制策略。以上学者较多针对家用空调器和末端用电设备控制调度,而对中央空调设备的运行调度及分布式能源系统研究较少。东南大学杜小瑾^[14]给出了中央空调系统轮停技术在夏季缺电形势下的应用,分析中央空调系统轮停技术的实施对南京市2005年夏季负荷的影响程度。上海交通大学辛洁晴^[15]提出了利用高级计量体系

实施商务楼中央空调系统远程周期性暂停控制的优化模型。

目前,依托高级计量体系实现对楼宇、家庭中用电设备的远程控制,其远程负荷控制方式有3种:

1) 中断控制。即在系统需要时远程关闭用户空调设备。

2) 轮停控制。指对空调器制冷机实施周期性开断,即占空比控制。

3) 温度控制。即远程调节用户侧温控器温度设定值,实现对空调器负荷的控制。

后两种更注重用户舒适度的要求,是未来发展的方向。

本文采用第3种温度控制方法,基于用户舒适约束控制算法和需求响应技术,通过无线技术对用户侧的电气设备进行负荷控制。主要完成了两方面的工作:

1) 对中央空调系统进行建模,中央空调系统建模包括两部分,以冷水机组+冷却塔系统为例,主要耗电部件为冷水机组、循环水泵和冷却塔系统等。

2) 在建立中央空调系统模型的基础上,首先对夏季中央空调系统无控制策略时的电负荷消耗情况进行分析,然后针对无控制策略的电力负荷高峰时段,以用户舒适度为约束,采用3种不同的控制策略进行对比分析,得出对用户舒适度影响较小,高负荷率运行时间最短的最优控制策略。

中央空调系统工作原理和建模

中央空调系统的工作原理为:制冷(热)机组对冷(热)媒水进行制冷降温(或加热升温),然后由循环水泵将降温后的冷媒(热)水输送到安装在各房间的风机盘管机组中,风机盘管机组采取就地回风的方式与各房间空气进行热交换实现对室内空气处理的目的。中央空调系统中冷水机组和循环水泵的压缩机耗电占整个中央空调系统的90%左右,因此本文以冷水机组和循环水泵的负荷模型代替中央空调系统的负荷模型。当室内温度需要升高(降低)时,则同时降低

(增加)冷水机组和循环水泵运行的负荷率即中央空调系统的负荷率。

冷水机组功耗数学模型为

$$P = \left(\frac{Q_{\max}}{\text{COP}} \right) (\text{ChillerEIRFT})(\text{ChillerEIRFPLR}) \quad (1)$$

式中, $Q_{\max}$ 为制冷机最大制冷量; Q_{eq} 为额定工况下制冷量; ChillerCapFT为制冷能力曲线,表示制冷机的最大制冷量随冷却水与冷冻水出水温度变化的关系; COP为性能系数,指制冷量或制热量与输入功率的比值; EIR为COP的倒数; ChillerCapEIRFT为EIR与运行状态关系曲线,表示在最大负荷下EIR随冷却水与冷冻水出水温度变化关系; ChillerEIRFPLR为EIR与负荷率关系曲线,表示为EIR值随着不同负荷率变化而变化的关系曲线。冷水机组的性能影响关系如图1所示。

循环水泵功耗数学模型:在额定转速下,水泵的扬程 H 与水流量的关系表达为

$$H = H_1 + SV^2 \quad (2)$$

式中, S 为系数; H_1 为开式管路系统中基础扬程,闭式管路系统中,如冷冻水管路系统, $H_1 = 0$ 。

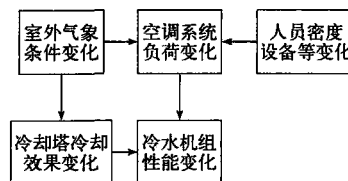


图1 冷水机组性能影响图

水泵的轴功率与水流量的关系式为

$$N = a + bV + cV^2 \quad (3)$$

式中, a 、 b 和 c 为拟合所得系数。

基于需求响应的中央空调负荷和温度控制的微分模型,数学表达式为

$$\hat{T} = AT + BU \quad (4)$$

$$\hat{T} = \begin{pmatrix} \hat{T}_{air} \\ \hat{T}_{mass} \end{pmatrix} T = \begin{pmatrix} T_{air} \\ T_{mass} \end{pmatrix} U = \begin{pmatrix} T_{out} \\ Q \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, T 为当前时刻温度; $\hat{T}$ 为下一时刻温度;

$$Q = Q_{solar} + Q_{rtx} + Q_{rtq} + Q_{zm} + Q_{sb} + Q_{hvac} \quad (6)$$

式中, Q_{solar} 为太阳辐射得热; Q_{rtx} 为人体显热得热; Q_{rtq} 为人体潜热得热; Q_{zm} 为照明得热; Q_{sb} 为

设备得热； Q_{hvac} 为空调系统负荷，当空调开启时
 $Q_{hvac} = Q_{hvac}$ ，当空调关闭时 $Q_{hvac} = 0$ 。

制冷模式时

$$A = \begin{pmatrix} -(\frac{1}{R_{eq}C_{air}} + \frac{1}{R_{mass}C_{air}}) & \frac{1}{R_{mass}C_{air}} \\ \frac{1}{R_{mass}C_{mass}} & -\frac{1}{R_{mass}C_{mass}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_{eq}C_{air}} & \frac{1}{2C_{air}} \\ 0 & \frac{1}{2C_{mass}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中， R_{eq} 、 C_{air} 、 R_{mass} 和 C_{mass} 分别为围护结构等效热阻、空气热容、室内换热物质热阻和物质热容。

中央空调控制策略研究

随着智能电网的发展，电网可采用的需求响应控制措施有很多，主要分为给予激励的需求响应和基于电价的需求响应。本节将通过对比分析，采用直接负荷控制的方法对中央空调系统的运行负荷率进行控制，研究中央空调系统为电网提供削峰服务的控制策略。典型仿真参数如表1所示。

表1 中央空调系统典型仿真参数

参数	描述	典型值
$R_{air}/(K/W)$	围护结构等效热阻	0.001 98
$C_{air}/(kJ/K)$	空气热容	203
$R_{mass}/(K/W)$	室内物质热阻	0.002 7
$C_{mass}/(kJ/K)$	室内物质热容	203
$\Delta t/s$	采样时间间隔	60
$T_d/^{\circ}C$	室内舒适温度设定范围	22~28
$T_0/^{\circ}C$	室内初始设定温度	26
deadband	允许室温波动范围	8

以广州地区一宾馆为模型，室外温度 T_{out} 采用负荷模拟计算软件Dest软件库中广州地区的气象数据，如图2所示。太阳辐射得热、人体显热得热、人体潜热得热、照明得热和设备得热计算参考GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》；冷水机组和循环水泵模型参数选取文献[18]数据；其余参数根据该宾馆面积和墙体材料等计算选取（见表1）。

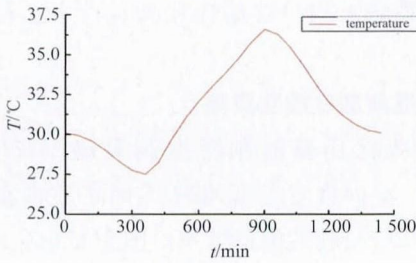


图2 室外温度变化曲线

该模型末端房间类型一样，不考虑不同时间段的人为活动的影响，当房间室内设定温度为 $T_0 = 26^{\circ}C$ 时，室内温度和中央空调负荷变化模拟结果如图3所示。

图3中， T 表示室内温度变化，可以看出，室内温度在 $26^{\circ}C$ 上下波动，符合舒适性要求； P 为中央空调系统总耗电， P_1 和 P_2 分别为中央空调系统中冷水机组和循环水泵的耗电，因为调控室温时同时改变冷水机组和循环水泵的负荷率，因此， P_1 、 P_2 和 P 的变化趋势是一致的。定义负荷率大于70%的时间为高负荷率时间，图3中全天高负荷率时间为153 min，而其中在14:00~20:00时段，高负荷率时间为107 min，占据了全天高负荷率时间的70%左右。因此14:00~20:00时段为高峰负荷时段，这也与图2中的室外高温时段一致。

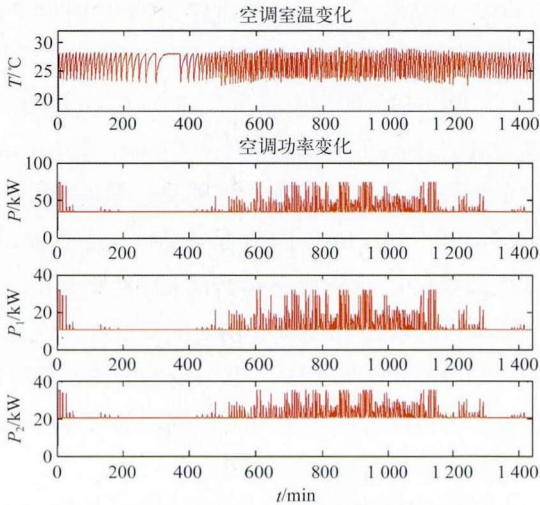


图3 无策略时室内温度和空调负荷模拟结果

采用3种不同的控制策略：①提前降低室内设定温度控制策略；②在高峰时段升高室内设定温度的控制策略；③改进后的控制策略。对比研究3

种控制策略对用户舒适性和高负荷率运行时间的影响。

1. 提前制冷控制策略

图4为采用提前制冷控制策略,在12:00~14:00,室内设定温度为24℃时的室内温度和中央空调系统负荷的模拟结果。图中显示在12:00~14:00时间段,室内温度在24℃左右波动;计算得高峰时段内的高负荷率时间为82 min,较107 min高峰时段电力负荷削减明显。

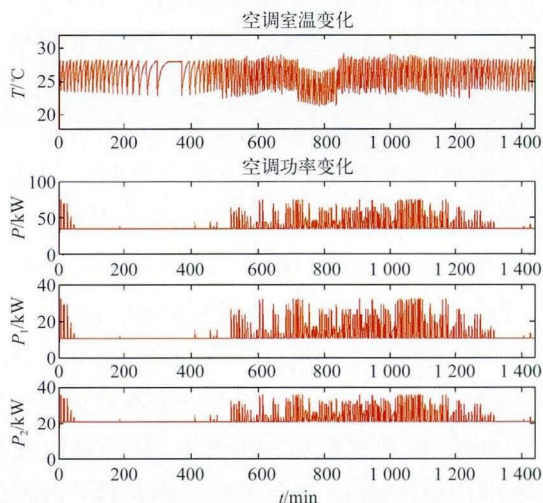


图4 12:00~14:00提前制冷策略模拟结果

图5和图6分别为在11:00~14:00和在13:00~14:00提前制冷,室内温度设定为24℃时的室内温度和空调系统负荷的模拟结果。从图5中可以看出在11:00~14:00室内温度在24℃左右波动,计算得高峰时段高负荷率时间为100 min,较107 min有一定削峰效果,但是效果不明显。从图6中可以看出13:00~14:00室内温度在24℃左右波动,计算得高峰时段高负荷率运行时间为122 min,高负荷率运行时间没有得到削减,反而增加,这是因为提前制冷开始时间太晚,不但没有削减高峰时段的高负荷率运行时间,反而由于制冷温度的降低等原因增加了高负荷率运行时间。

从图4、图5和图6的分析中可以得出,在12:00~14:00时间段采用提前制冷策略,高负荷率运行时间最短,削峰效果最为理想,因此接下来研究在12:00~14:00时间段采用提前制冷控制策略,不同的室内设定温度对高负荷率运行时间的影响。

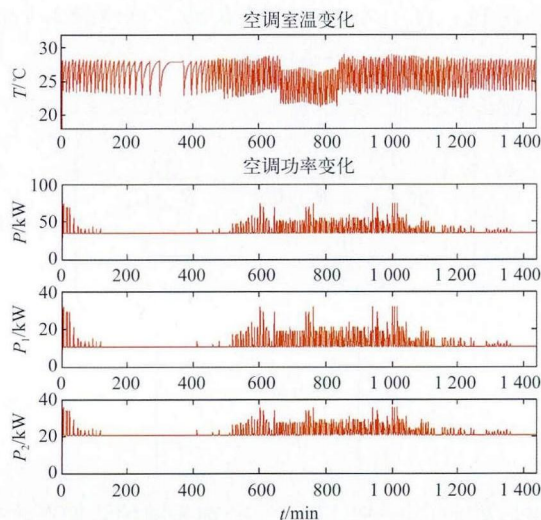


图5 11:00~14:00提前制冷策略模拟结果

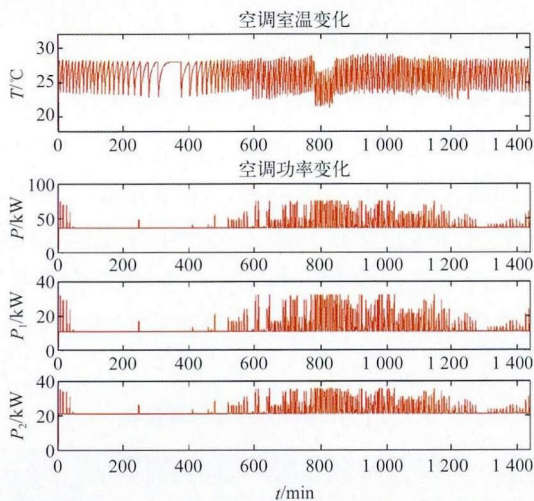


图6 13:00~14:00提前制冷策略模拟结果

图7和图8分别为12:00~14:00提前制冷策略室内设定温度分别为25℃和23℃时的室内温度和空调系统负荷的模拟结果。从图7中可以看出,12:00~14:00室内温度在25℃左右波动,计算得高峰时段高负荷率运行时间为103 min,较107 min有一定的削峰效果;从图8可以看出12:00~14:00室内温度在23℃左右波动,计算得高峰时段高负荷率运行时间为91 min,较107 min有一定的削峰效果。

通过对图4、图7和图8对比分析可以看出,采用提前制冷控制策略,在10:00~12:00时间段,室内设定温度为24℃时,高负荷率运行时间最短,电力负荷削峰效果最为理想。

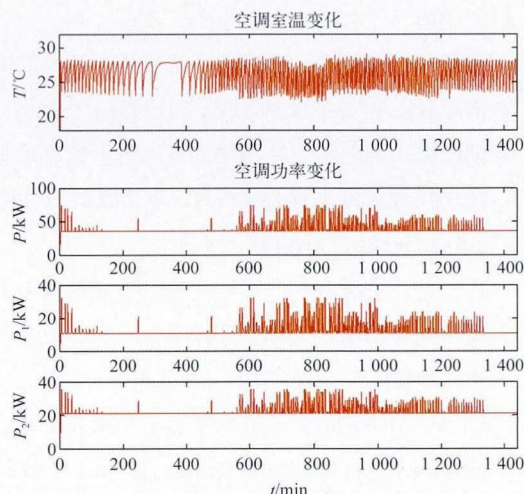


图7 12:00~14:00提前制冷策略模拟结果

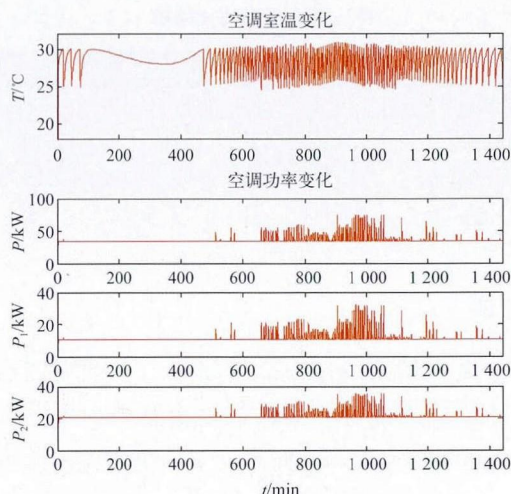


图9 提高室内设定温度策略模拟结果

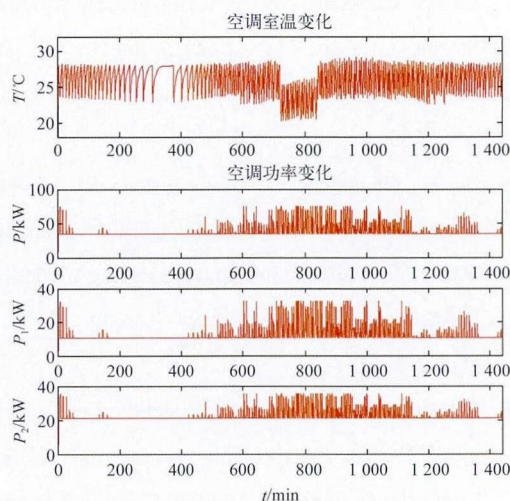


图8 12:00~14:00提前制冷策略模拟结果

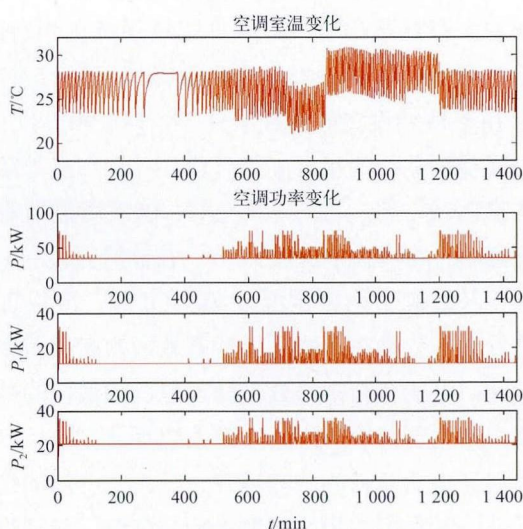


图10 改进后的控制策略模拟结果

2. 提高设定温度控制策略

图9为在高峰负荷时段提高室内设定温度为28℃时,室内温度和空调系统负荷的模拟结果,从图中可以看出室内温度在28℃周围波动,计算得高峰时段高负荷率运行时间为71 min,高峰时段有一定削峰效果,但是全天室内温度在28℃周围波动,舒适性不理想。

3. 改进后的控制策略

现提出改进后的控制策略,即提前降低室内温度并在高峰时段升高室内设定的温度的控制策略。图10为在12:00~14:00提前制冷,室内设定温度为24℃,并在14:00~20:00提高室内设定温度为28℃时,室内温度变化和空调负荷的模拟结果,从图中可以看出,在12:00~14:00时间段,

室内温度在24℃左右波动,在14:00~17:00时间段,室内温度在26℃左右波动,大约在17:00~20:00时间段,室内温度在28℃左右波动,整体舒适性较好;计算得高峰时段的高,负荷率运行时间为59 min,削峰效果明显。

表2为3种控制策略的削峰效果和室内温度对比,可以看出,提前制冷控制策略可以很好地保证用户舒适性,但只在一定程度上削减了高峰负荷;提高室内设定温度控制策略的削峰效果较提前制冷策略较好,但用户舒适性难以保证;改进后的控制策略不但保证了用户舒适性,也明显地减少了高峰时段高负荷率的运行时间,电力负荷削峰效果最理想,为最优的控制策略。

表2 控制策略对比结果

控制策略	高峰时段高负荷率运行时间/min	室内温度/℃
无策略	107	26
提前制冷	82	26
提高室内温度	71	28
改进后	59	26

结束语

中央空调系统建模比较复杂,中央空调系统中冷水机组和循环水泵的耗电占整个中央空调系统耗电的90%左右,因此本文对中央空调冷水机组和循环水泵的负荷进行详细建模,并建立了夏季制冷模式下其负荷与室内温度的需求响应控制微分模型。在此基础上,对中央空调系统采用3种不同的控制策略的用户舒适度和削峰情况进行对比,得出在本模型设定的前提条件下,14:00~20:00为中央空调系统的用电高峰时段,并且与室外温度的高温时段一致。在12:00~14:00采用提前制冷控制策略,室内设定温度24℃,在高峰时段14:00~20:00提高室内设定温度为28℃时,既保证了用户舒适性,又在高峰时段具有最短的高负荷率运行时间,电力负荷削峰效果最理想,为最佳的控制策略。本文所讨论的中央空调系统提前制冷控制策略实现了电力负荷的削峰填谷,改善了电网的经济性,是一种良好的用户侧需求响应资源,通过恰当的控制能实现多样的系统目标,具有广泛的工程应用前景。

参考文献

[1] 程瑜,安甦.主动负荷互动响应行为分析[J].电力系统自动化,2013,37(20):63-70.

[2] 丁庆,段绍辉,王执中,等.冰蓄冷空调在高峰谷负荷差地区应用的经济性[J].电力系统自动化,2014,26(1):73-77.

[3] 卞栋,卫志农,孙国强,等.需求响应视角下的配电网不确定性重构模型[J].电力系统自动化,2013,37(24):31-36.

[4] 张钦,王锡凡,王建学,等.电力市场下需求响应研究综述[J].电力系统自动化,2008,32(3):

97-106.

[5] 韩跃峻,辛洁晴,高亦凌.基于信息反馈的需求响应[J].电力需求侧管理,2012(5):9-14.

[6] 胡江溢,祝恩国,杜新纲,等.用电信息采集系统应用现状及发展趋势[J].电力系统自动化,2014,38(2):131-135.

[7] 盛万兴,史常凯,孙军平,等.智能用电中自动需求响应的特征及研究框架[J].电力系统自动化,2013,37(23):1-7.

[8] Lu N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.

[9] Lu N, Chassin D P. A state-queueing model of thermostatically controlled appliances[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1666-1673.

[10] Lu N, Chassin D P, Widergren S E. Modeling uncertainties in aggregated thermostatically controlled loads using a state queueing model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 725-733.

[11] Schneider K P, Fuller J C. Detailed end use load modeling for distribution system analysis[C]. proceedings of the IEEE PES General Meeting, 2010.

[12] Yoon J H, Baldick R, Novoselac A. Dynamic demand response controller based on real-time retail price for residential buildings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 121-129.

[13] Yoon J H, Bladick R, Novoselac A. Demand response for residential buildings based on dynamic price of electricity[J]. Energy and Buildings, 2014, 80: 531-541.

[14] 杜小瑾.中央空调轮停技术在夏季缺电形势下的应用[D].南京:东南大学,2006.

[15] 辛洁晴,吴亮.商务楼中央空调周期性暂停分档控制策略[J].电力系统自动化,2013(37):49-54.

(收稿日期:2015-02-21) EA