通信差错对需求响应控制效果影响的研究

信息物理能源系统（CPES）是未来电力系统发展的趋势，能源系统中的网络安全问题也越来越受到人们的关注。针对通信过程中丢包、误码等通信差错对信息物理系统中需求响应控制策略的不良影响进行了评估。首先讨论了典型电热泵设备的热力学参数建模机理、最优温度设定调节算法（OTR）控制原理以及基于OTR的电热泵负荷需求响应控制策略对风电渗透引起的功率波动、电压波动的平抑效果。在此基础上，评估不同丢包率、误码率对控制效果的影响，并提出丢包、误码补偿策略以削弱通信差错对需求响应控制策略的不良影响。最后，通过典型算例仿真结果验证策略的有效性。

卫文婷　王荣亮　胡泉伟　周　瑜/国家电网天津市电力公司检修公司

卫文婷/助理工程师

关键词/Keywords
通信差错·
信息物理能量系统·
需求响应·
风电·
分布式电热泵设备·

0　引言

智能电网中基础设施集成、高速的双向通信网络使得需求侧资源管理[1]得以实现，需求响应（DR）[2]通过价格信号和激励机制来加强需求侧资源在电力市场中的作用，对需求侧资源进行综合规划与整合，已成为解决电力供应紧张这一经济社会中主要矛盾的有效手段，符合电力市场发展趋势的必然要求。

作为清洁可再生能源，风能、太阳能等越来越得到重视和发展。随着其装机容量的不断扩大，风电、光伏发电功率注入的随机性、间歇性等特点[3]对电力系统的不良影响也显著增大。目前，针对这一问题，多通过设置储能系统来对可再生能源注入引起的功率波动进行平抑，但由于储能系统的成本较高，利用家居温控负荷平抑网络节点功率波动的策略显得十分必要。电热泵设备作为一种典型的家居温控负荷[4]，具有快速切换、储能和负荷比重大等优良特性，可以作为一种需求响应负荷控制资源，为电网提供削峰填谷、能量储存和负荷跟踪等多种辅助服务[5]。电网可通过多种需求响应控制措施的实施来调用电热泵设备的响应能力解决诸如平抑由分布式可再生能源注入引起的功率波动等问题。

然而，低成本通信技术在配电网中的广泛应用致使某些通信差错，如丢包、误码和延时等现象频发，在电力系统负荷调度、电能供需优化等方面造成不良影响。需求响应技术依赖于可靠、高速和集成的双向通信网络，依赖于所有电热泵运行状态与用户室内温度等大量精确信息。非理想通信环境中丢包、误码等通信差错更是对需求响应控制效果具有显著的不良影响。文献[6]指出通信网络时延现象造成用户不能通过实时有效电价信息进行调控，而信号传输丢包现象导致用户无法接收当前电价信息，两者都将致使用户用电成本升高，需求响应控制效果无法达到最优水平。文献[7]通过构建1 000台空调设备需求响应控制场景，认为在非理想通信环境中，如果一组空调用户的集中分布控制中断，动态需求响应控制性能将受到严重影响。文献[8]从减少需求响应中数据传输量的角度，采用分层分布式控制及模型预测算法削弱通信差错对控制效果的影响。本文从另一角度对通信差错的影响进行研究，并提出通信差错发生时的补偿策略，以削弱其不良影响。

为了研究电热泵负荷平抑风电等可再生能源注入波动的有效性与控制

效果，以及通信差错对控制效果的影响，本文首先对电热泵设备基本工作原理及建模技术进行讨论，研究实现基于温度优化控制算法的电热泵直接负荷控制策略，根据电热泵负荷与电力系统特点，构建算例，基于自调节配电系统（SRDS）测试平台[9]，仿真分析控制结果，进而对通信过程中信号丢包、误码现象对控制效果的影响进行仿真分析与评估。进而提出通信差错补偿策略，削弱不良影响。

1 电热泵设备需求响应控制策略

1.1 最优温度设定调节（OTR）控制策略[10-11]

本文在电热泵设备进行热电耦合建模过程中，采用二阶微分方程形式的ETP模型[12]，并构建多个电热泵设备聚合而成的电热泵负荷需求模型。本节介绍所采用的最优温度设定调节策略OTR基本原理。

电热泵作为典型的家居型温控设备，温度是其主要的工作性能指标，利用ETP模型中电热泵设备在不同的温度状态与不同的功率消耗一一对应关系的特性，将这种对应关系分布在横轴为温度、纵轴为功率的平面内，得到如图1所示的离散分布图。

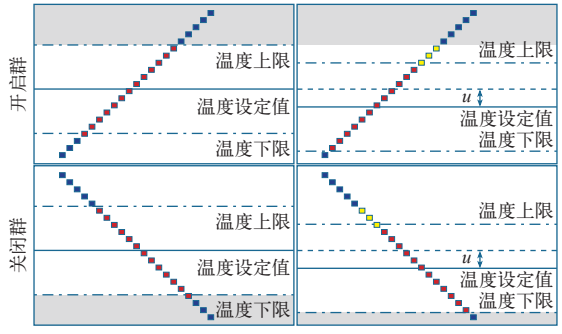


图1 离散的温度－功率分布图

本文采用的仿真时步为1 min[13]。在当前时步，开启群所有电热泵设备功率总和即为此时设备群的总功率消耗，下一时步到来时对设备的温度状态进行预测，处于温度上边界的开启设备转换为关闭状态，处于温度下边界的关闭设备转换为开启状态，则在下一时步中，图1a中开启群中阴影部分的电热泵将被关闭，图1b中关闭群中阴影部分电热泵将被打开，即发生“状态转换”现象。则此时总功率的变化量即为图1a中处于电热泵设备开启群和关闭群中阴影部分功率总和之差。

如图1所示，若此时将工作温度设定点升高，则温度上下边界也随之向升高方向移动，引起电热泵设备开启群和关闭群中阴影部分功率总和之差的改变，即出现“状态转换增加”和“状态保持”现象，从而改变了负荷聚合的消耗功率值。最优温度设定调节策略OTR的关键是建立了合理的函数模型求解最佳温度设定值调节量u，以实现给定的响应负荷消耗目标值。

为了直观地描述各时步功率消耗总值以及功率变化量，用以下积分形式表示图1a中第k时步与$k+1$时步的离散功率变化量，即两阴影部分面积的代数和为

$$\Delta y_{k+1}=\int_{-\infty}^{T_{-,k}}\varphi_{0,k}(T_x)\mathrm{d}T_x-\int_{T_{+,k}}^{+\infty}\varphi_{1,k}(T_x)\mathrm{d}T_x \quad (1)$$

其中，为了描述处于同一温度状态的电热泵群体功率消耗，定义两个温度－功率因子，即

$$\varphi_{1,k}(T_x)=\sum^{N}y_{i,k}CS_{i,k}n(T_{\mathrm{a},i,k},T_x) \quad (2)$$

$$\varphi_{0,k}(T_x)=\sum^{N}y_{i,k}(1-CS_{i,k})n(T_{\mathrm{a},i,k},T_x) \quad (3)$$

式中，$y_{i,k}$为第k个步长内第i个负荷设备的有功功率值；$T_x\in[-\infty,+\infty]$；N为作为需求响应的负荷设备数目；$T_{\mathrm{a},i,k}$为当前室内温度。

如果已知下一步长的负荷功率变化量目标Δy^*_{k+1}，唯一的最优温度设定点变化量u^*_k可以由以下方法得到，即

$$\min F=[\Delta y^*_{k+1}-\Delta y_{k+1}(u^*_k)]^2 \quad (4)$$

满足

$$\Delta y_{k+1}(u^*_k)=\int_{-\infty}^{T_{-,k}+u_k}\varphi_{0,k}(T_x)\mathrm{d}T_x-\int_{T_{+,k}+u_k}^{+\infty}\varphi_{1,k}(T_x)\mathrm{d}T_x \quad (5)$$

$$T_{+,k}-u^*_k\leqslant T_{\max} \quad (6)$$

$$T_{-,k}-u^*_k\geqslant T_{\min} \quad (7)$$

式中，u^*_k为温度设定点的最优解；$T_{\max}$、$T_{\min}$为用户要求的舒适度限制的上下界。

由于式（4）为凸函数，保证了最优解u^*_k的唯

一性。需要注意的是，u_k^*是有界的，$\Delta y_{k+1}(u_k^*)$也是有界的，可行解是在时变条件下由$T_{s,k}$、$\phi_{1,k}$和$\phi_{0,k}$决定的。当上下转换边界T_+/T_-与用户舒适的限制上下边界$T_{\max}/T_{\min}$十分接近时，聚合负荷将失去调节能力。

1.2 配电网风机注入波动平抑算法[14]

在含有分布式风力发电系统以及可控电热泵用户的配电网中，假设通过合理激励手段，用户积极参与需求响应控制方案，采用OTR控制策略对用户电热泵设备群进行负荷调节，实现平抑配电网联络线处功率波动的目的。系统控制逻辑方案如图2所示。

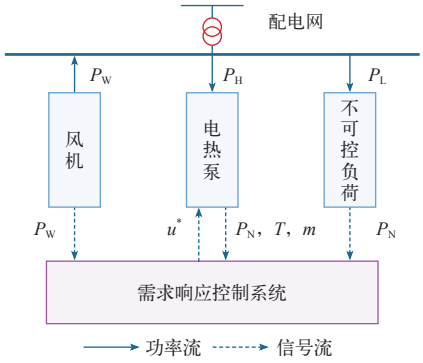


图2 系统控制逻辑方案图

图2中，定义不可控负荷为P_N（类似于电灯、可插拔式负荷等），电热泵负荷为P_H，风电功率注入为P_W。如忽略配电网有功损耗，其网络净负荷为

$$P_L(k)=P_N(k)+P_H(k)-P_W(k) \tag{8}$$

为了达到波动平抑效果，定义波动平缓因子$\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}P_{L,j}(k-j+1)$，则带有波动平缓因子的电热泵目标功率计算如式（9）所示。

$$P_{T,j}^*(k+1)=P_{W,j}(k+1)-P_{N,j}(k+1)+\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}P_{L,j}(k-j+1) \tag{9}$$

式中，下标$i=1,2,\cdots,n$，代表n个独立的电热泵群。

随着M值改变，控制效果发生改变，将不同M取值的控制算法称为“M平均”控制算法。

1.3 丢包、误码补偿策略

目前，低成本通信手段仍普遍应用在电力用户甚至是智能电网中。在需求响应控制信号传输过程中，丢包、误码等通信差错经常出现。本节提出丢包、误码补偿算法，以削弱其不良影响。

为削弱数据丢包的影响，当k时步发生丢包现象，采用k时步前P_W的平均值取代$P_W(k)$，则电热泵目标功率由式（9）改变为

$$P_{T,j}^*(k)=\frac{1}{k-1}\sum_{j=1}^{k-1}P_{W,j}(j)-P_{N,j}(k)+\frac{1}{2}[P_{L,j}(k-1)+P_{L,j}(k-2)] \tag{10}$$

同时，考虑风机出力为正值，当k时步发生风机处理功率数据传输误码时，采用k时步误码数值绝对值参与补偿策略，则电热泵目标功率由式（9）改变为

$$P_{T,j}^*(k+1)=\left|P_{W,j}(k+1)\right|-P_{N,j}(k+1)+\frac{1}{2}[P_{L,j}(k)+P_{L,j}(k-1)] \tag{11}$$

2 通信差错对需求响应控制效果影响评估

2.1 算例说明

针对以上控制策略，采用IEEE 13节点系统，并如图3所示构建算例。基于Self－Regulating Distribution System（SRDS）仿真平台，假设额定负载、温度和风速可以从非恒温控制负载模型和气候参数文件中得到。系统中675节点有风电注

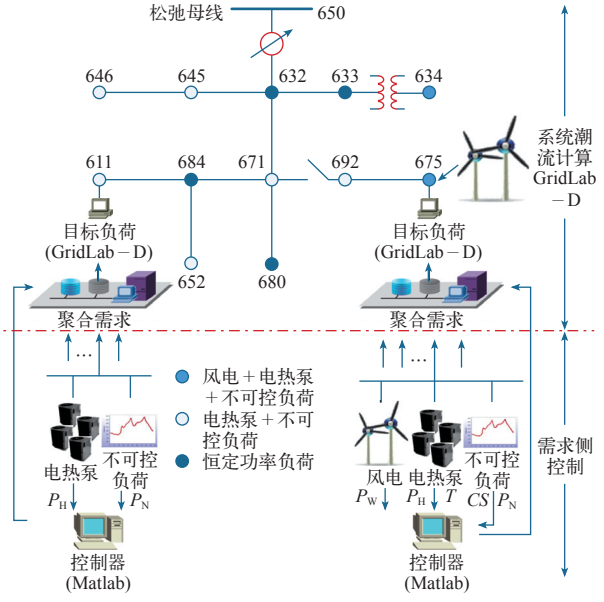


图3 接入风机和电热泵负荷群的IEEE 13节点测试系统

入，通过对电热泵设备进行需求响应控制以达到平抑节点功率及电压波动的目的。本算例中以“2平均”算法进行仿真分析，即

$$P_{T,i}^{*}(k+1)=P_{W,i}(k+1)-P_{N,i}(k+1)+\frac{1}{2}[P_{L,i}(k)+P_{L,i}(k-1)] \tag{12}$$

2.2 理想通信环境控制效果

本节分析在以上“2平均”控制策略实施下控制与不控制情况的671节点潮流变化情况。并采用概率密度函数对波动平缓效果进行分析。

假设k时步671节点的功率为$P_L(k)$，上一时步为$P_L(k-1)$，定义功率变化率为

$$\Delta P_k=\left.\frac{\mathrm{d}P_L}{\mathrm{d}t}\right|_{(k)}=\frac{P_L(k)-P_L(k-1)}{\Delta t} \tag{13}$$

将得到的功率变化率进行概率密度分析，本文取$\Delta t=1$ min。

671节点功率波动及功率变化率概率密度分析结果如图4所示。从图4中可以看出，在671节点有较大的负荷波动，采用OTR控制策略后，功率波动得到显著平抑。

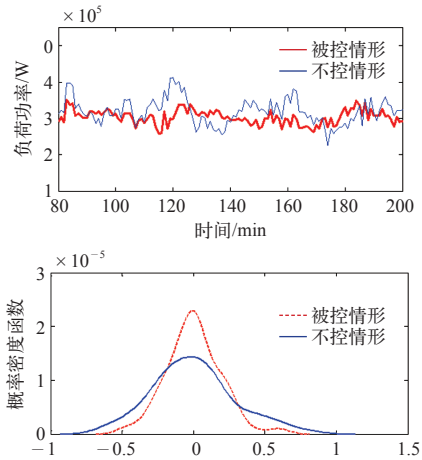


图4　100%电热泵群体仿真结果

此外，风机输出功率的波动也是引起电压波动的主要原因，控制策略的实施通过对功率波动进行平抑，使得节点电压的波动情况也产生明显好转。图5为671节点三相在控制与不控情况下的电压波动仿真波形。

运用与功率波动相似的方法对电压幅值波动进行变化率分析，即

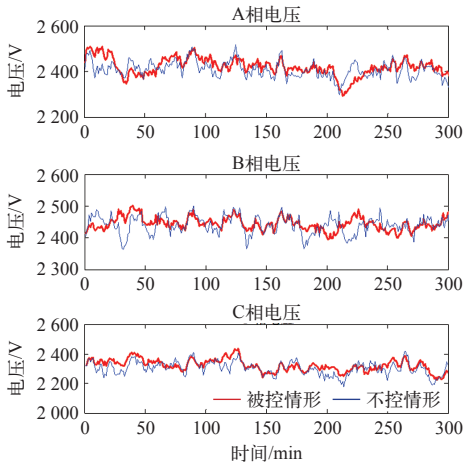
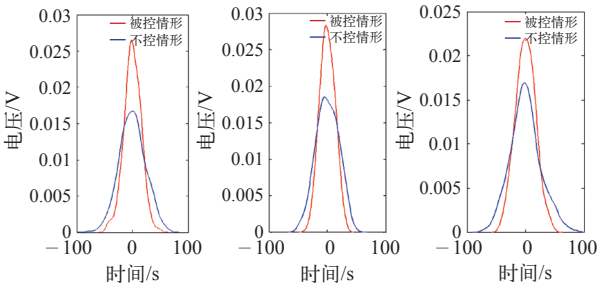


图5　671节点三相电压波动仿真结果

$$\Delta U_k=\left.\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}\right|_{(k)}=\frac{U(k)-U(k-1)}{\Delta t} \tag{14}$$

进而对ΔU进行概率密度分析，所得结果如图6所示。



（a）相电压分析结果　（b）相电压分析结果　（c）相电压分析结果

图6　三相电压波动情况概率密度分析结果

由以上仿真结果可见，通过最优温度设定调节控制策略的自动调节，典型的家居型温控设备电热泵对智能电网中风电等分布式能源注入引起的节点功率以及节点电压波动的平抑效果明显。

2.3 不同丢包率对控制效果的影响

考虑通信系统在信号传输过程中存在不同程度的丢包现象，电热泵设备控制信号丢包会对负荷潮流的特性以及总线级需求响应控制器的能力产生显著影响。本文假设该时步发生数据丢包时，控制信号仍保持上步数值，以下分别对无丢包现象、丢包率为4%、丢包率为8%[15]以及采用1.3节丢包补偿策略的不同情况中，671节点同一相功率波动平抑效果的影响进行仿真分析。

图7与图8显示每种丢包率情况，通过需求响应控制策略对电热泵设备的控制，节点功率波动都有一定程度的平抑。以上概率密度分析结果显示，随着丢包率不断增大，波动平抑效果逐渐减弱，丢包现象对需求响应控制策略的控制效果有明显影响。从图9中可以看出，在丢包现象发生时，所提出的丢包补偿策略可在一定程度上削减其对控制效果的不良影响。

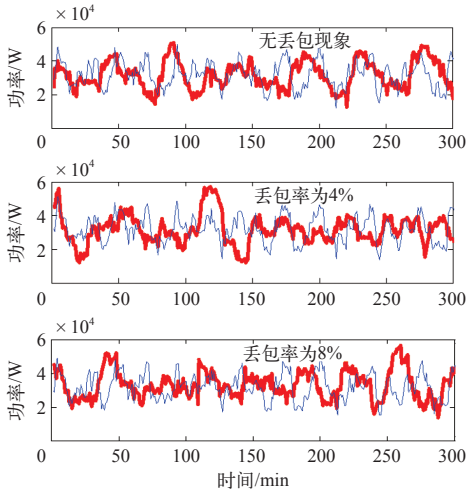


图7　不同丢包率对控制效果的影响

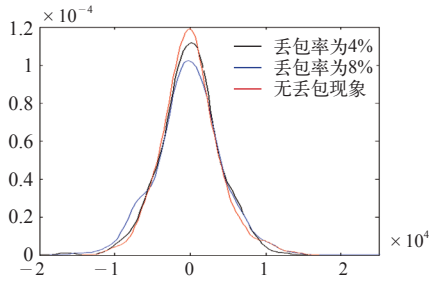


图8　不同丢包率情况下控制效果概率密度分析对比

2.4　不同误码率对控制效果的影响

通信系统在信号传输过程中除了存在丢包现象外，数据传输误码也是常见现象之一。假设信号传输误码时，该时步的控制信号反转。以下对无误码现象、误码率为4%、误码率为8%以及采用2.3节误码补偿策略的不同情况中，671节点同一相波动平抑控制效果的影响进行仿真分析，如图10所示。

由以上概率密度分析结果可以看出，随着误码率的不断变大，波动平抑的效果逐渐减弱，误码现象对需求响应策略的控制效果有明显的不良影响。

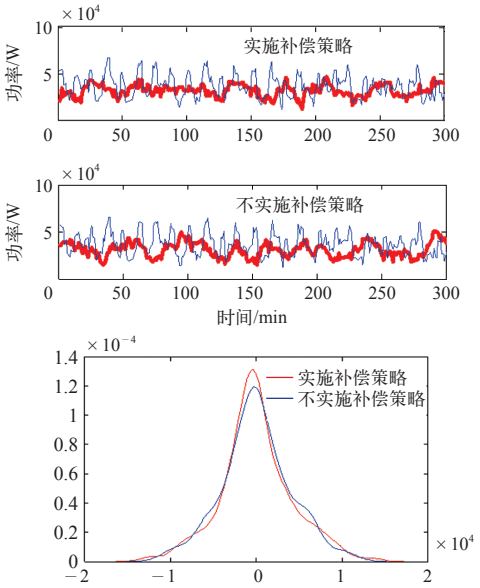


图9　实施与不实施丢包补偿策略控制效果对比

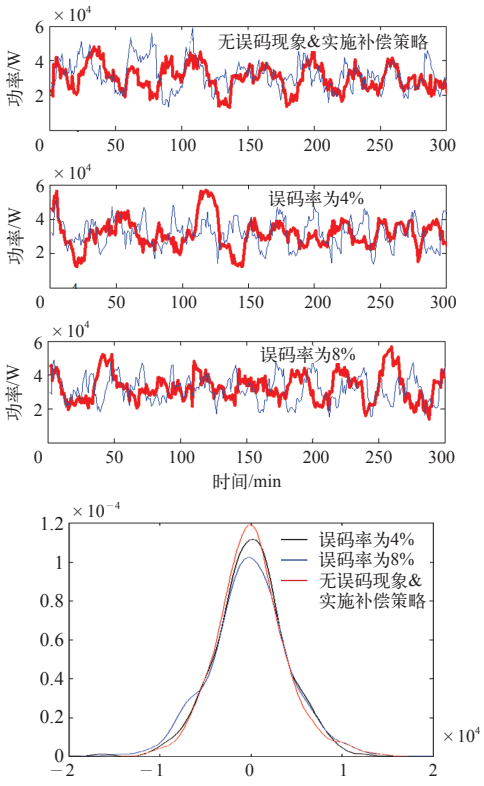


图10　不同误码率对控制效果的影响

当采用本文提出的误码补偿策略时，可得到与无误码现象情况相同的控制效果，本补偿策略可在一定程度上削减其对控制效果的不良影响。

3　结束语

对电热泵负荷进行需求响应控制以达到辅助

电力系统运行、平抑风能等可再生能源功率注入波动的潜在能力进行了研究。仿真结果显示，通过所应用的基于OTR的热泵负荷需求响应控制策略对波动平抑具有明显的控制效果，通过小的电热泵温度设置点改变控制可以达到总线级控制目标，同时满足用户舒适度约束和负荷潮流需求。

另外，通过对通信过程的丢包与误码现象对需求侧响应的负荷控制影响进行仿真分析，可知通信差错对平抑风电注入引起的功率波动效果影响明显，随着丢包率与误码率的提高，控制效果逐渐减弱。提出丢包、误码现象的初步补偿措施，仿真结果表明其具有良好的通信差错不良影响削弱能力，具有较广泛的工程应用前景。

本文模型反应电热泵设备可以有效提供负荷平衡服务作用，为平衡风电等可再生能源注入波动提供新的借鉴思路。此外，通过研究通信质量对控制效果影响的仿真，为提高控制效率提供了新的途径。

参考文献

[1] 周明，李庚银，倪以信．电力市场下电力需求侧管理实施机制初探 [J]．电网技术，2005，29 (5)：6-11．

[2] 张钦，王锡凡，付敏，等．需求响应视角下的智能电网 [J]．电力系统自动化，2009，33 (17)：49-55．

[3] 梁才浩，段献忠．分布式发电及其对电力系统的影响 [J]．电力系统自动化，2001，25 (12)：53-56．

[4] Wang D，Parkinson S，Miao W，et al．Online voltage security assessment considering comfort-constrained demand response control of distributed heat pump systems [J]．Applied Energy，2012，96 (3)：104-114．

[5] Callaway D S，Hiskens I A．Achieving controllability of electric loads [J]．Proceedings of the IEEE，2011，99 (1)：184-199．

[6] Kong P Y．Effects of communication network performance on dynamic pricing in smart power grid [J]．IEEE Systems Journal，2014，8 (2)：533-541．

[7] Zheng L，Lu N，Cai L．Reliable wireless communication networks for demand response control [J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2015，4 (4)：133-140．

[8] 卫文婷，王丹，贾宏杰，等．一种基于模型预测的城市园区分层分布式温控负荷需求响应控制策略 [J]．中国电机工程学报，2016，36 (8)：2049-2056．

[9] Wang Dan，De Wit B，Parkinson S，et al．A test bed for self-regulating distribution systems：modeling integrated renewable energy and demand response in the GridLAB-D/Matlab environment [C]．IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies，2012：1-7．

[10] Miao Weiwei，Jia Hongjie，Wang Dan，et al．Active power regulation of wind power systems through demand response [J]．Science China Technological Sciences，2012，55 (6)：1667-1676．

[11] Parkinson S，Wang D，Crawford C，et al．Comfort-constrained distributed heat pump management [J]．Energy Procedia，2011，12 (39)：849-855．

[12] 李育燕，陈谦，黄文英，等．空调群负荷动态特性分析与建模 [J]．高电压技术，2007，33 (1)：66-69，77．

[13] 王丹，范孟华，贾宏杰．考虑用户舒适约束的家居温控负荷需求响应和能效电厂建模 [J]．中国电机工程学报，2014，34 (13)：2071-2077．

[14] Williams T，Wang D，Crawford C，et al．Integrating renewable energy using a smart distribution system：potential of self-regulating demand response [J]．Renewable Energy，2013，52 (2)：46-56．

[15] Zheng Lei，Parkinson S，Wang Dan，et al．Energy efficient communication networks design for demand response in smart grid [C]．International Conference on Wireless Communications and Signal Processing，2011：1-6．

（收稿日期：2018－06－02）EA