

基于需求响应的负荷特性建模和优化控制方法研究

研究了基于需求响应的负荷特性模型和三种不同场景下的负荷优化控制方法。首先, 通过将刚性负荷和柔性负荷解耦, 根据柔性负荷参与需求响应程度不同, 考虑不同控制变量的影响构建了电价负荷、直接控制负荷和可中断负荷三类负荷特性模型; 其次, 基于所建立负荷特性模型提出了在不同实际的供电缺口约束条件下合理的负荷控制策略优化控制方法; 最后通过三个场景的案例, 探讨了控制变量为直接控制负荷和可中断负荷控制, 目标函数为实际负荷削减量与供电缺口的偏差最小, 约束条件考虑需求响应合同, 验证了所构建模型和优化方法的可行性, 为我国用户侧需求响应的推广提供借鉴。

李 威 李庚银/新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)
葛磊蛟/天津大学电气与自动化工程学院 屈 博/中国电力科学研究院



李 威/博士研究生

关键词/Keywords

需求响应·
负荷建模·
直接控制负荷·
可中断负荷·

智能电网建设为需求响应的实施提供了良好的环境和技术支撑, 特别是实时电价、直接负荷控制和可中断负荷控制等技术手段提高了电力系统调峰能力。智能电网条件下负荷模型的涵义也更为广泛, 不仅需要考虑双向互动和需求响应的因素, 还涉及电力系统运行中的实时控制变量。再者, 已有负荷模型一般表示为负荷与电压、频率之间的函数关系, 无法体现需求响应的影响, 并且国内外对已有负荷模型的研究相对比较成熟, 如文献[1]在负荷建模中考虑了负荷的时变性; 文献[2]针对电力负荷的时变性和变结构性, 提出了新的负荷建模方法; 也有一些学者将负荷作为虚拟

发电厂, 或者考虑家庭用户的舒适度, 以参与双向互动为主要目标进行负荷建模。但是, 已有的国内外负荷模型大多不适宜或者不积极参与负荷调节的刚性负荷模型, 难以适用智能电网环境下对负荷弹性、需求响应的描述。

随着新能源技术的成熟, 需求响应技术的不断发展, 电力终端用户的角色正在发生变化, 传统的刚性负荷用户逐步呈现出一定的弹性^[3-4], 即电力用户承担着用电方和能源提供方的双重作用^[5], 负荷侧的电源、虚拟发电厂等资源可以看作发电侧资源的替代品; 在系统用电高峰时段可以不采用传统拉闸限电的方法, 而选用需求响应技术缓解电力供需矛盾, 降低高峰时段的电力消耗, 与为满足高峰电力而投资的发电装机容量成本相比, 具有显著的成本效益^[6]。因此, 通过将“刚性负荷”和“柔性负荷”解耦表示, 其中, “柔性负荷”是指通过一定的技术手段可以转移或削减的负荷, 且在转移或削减的过程中具有一定的成本效益和时间跨度要求; 建立了考虑需求响应的负荷特性模型, 并针对电力系统的实际供电缺口情况下负荷特性模型的优化控制方法进行详细研究。

基于需求响应的建模

与表示负荷与电压、频率之间函数关系的非时变已有负荷模型相比, 智能电网条件下的负荷特性模型不仅负荷随时间而变化, 而且负荷受气象条件、需求响应指令等因素影响, 即

国家自然科学基金资助项目(51361135704, 51377115), 国家高技术研究发展计划(863)研究项目(2014AA052003)。

$$\begin{cases} L = F(t, W, O) \\ W = f_1(t) \\ O = f_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, L 为负荷; t 为时间; W 为气象因素, 是随时间变化的变量, 包括温度、湿度和降雨量等; O 为需求响应指令, 也是随时间变化的变量, 如电价或激励等变量。

但是, 在实际负荷特性模型的应用过程中, 由于气象因素可通过预测或者天气预报实时数据等获得, 一般可以将其看作负荷特性模型输入量中的确定值。

从需求响应的角度出发, 按照负荷的可控性对用电负荷进行建模, 并将刚性负荷和柔性负荷解耦, 充分考虑需求响应控制变量的影响, 构建负荷特性模型; 总负荷由刚性负荷和柔性负荷两部分组成, 且体现负荷随时间变化以及负荷与需求响应之间的函数关系, 即

$$L_{\text{total}}(t, P, DLC, IL) = L_s(t) + L_f(t, P, DLC, IL) \quad (2)$$

式中, L_{total} 为总负荷; t 为时间; P 为电价; DLC 为直接负荷控制变量; IL 为可中断负荷变量, 三者都属于需求响应指令, 其自身也是时间的函数, 即不同时刻点有不同的需求响应指令; $L_s(t)$ 为刚性负荷, 是时间的函数; $L_f(t, P, DLC, IL)$ 为柔性负荷, 即参与需求响应的部分用电负荷, 是时间和三种需求响应指令的函数。

关于柔性负荷, 根据其参与需求响应不同分为3类: 电价负荷、直接控制负荷和可中断负荷, 即

$$L_f(t, P, DLC, IL) = L_1(t, P) + L_2(t, DLC) + L_3(t, IL) \quad (3)$$

式中, $L_f(t, P, DLC, IL)$ 为总柔性负荷; $L_1(t, P)$ 为电价负荷; $L_2(t, DLC)$ 为直接控制负荷; $L_3(t, IL)$ 为可中断负荷。

下面将分别对三类负荷进行详细建模。

(1) 电价负荷

电价与电力需求之间的关系, 称为用电需求曲线^[11-12], 电价负荷的用户电力需求一般随电价的变化而变化, 但各类用户的变化趋势和幅度各不相同, 其整体变化规律可用抛物线模型式 (4) 或对数模型式 (5) 进行表示, 即

$$L_1(t, P) = a + bP(t) + cP^2(t) \quad (4)$$

$$L_1(t, P) = a + b \ln[P(t)] \quad (5)$$

式中, a 、 b 和 c 为参数; $P(t)$ 为用户的负荷线性曲线。

(2) 直接控制负荷

直接控制负荷是指利用实施机构 (电操开关) 可通过远程关闭或循环控制的用户用电设备负荷^[13], 控制过程中受用户满意度、用户许可时间等条件约束, 且设备接受的控制变量为0-1决策变量 (1表示中断、0表示开启)^[14], 即

$$\begin{aligned} L_2(t, DLC) &= \sum_{i=1}^N \{ [1 - \alpha_i(t)] L_{\text{origin}, i}(t) \} \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) &\leq \alpha_{i_max} \\ t_{\text{on}, i} &\geq T_{\text{on}, i_min} \\ t_{\text{off}, i} &\leq T_{\text{off}, i_max} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, i 为参与直接负荷控制项目的用户编号, 一共有 N 组用户; $\alpha_i(t)$ 为第 i 组用户在 t 时段的控制变量, 为0-1决策变量; $L_{\text{origin}, i}$ 为第 i 组用户实施直接负荷控制之前的负荷大小; α_{i_max} 为第 i 组用户合同中规定的每天调用次数上限; n 为一天的时段划分总数; $t_{\text{on}, i}$ 、 T_{on, i_min} 分别为第 i 组用户的持续运行时间、最小持续运行时间; $t_{\text{off}, i}$ 、 T_{off, i_max} 分别为第 i 组用户的持续中断时间、最大持续中断时间。

(3) 可中断负荷

可中断负荷是指用户合约的需求响应负荷, 与直接控制负荷相比, 主要不同点是负荷的中断由用户根据请求信号而实行, 而不是直接由实施机构远程控制中断, 因此需要考虑用户违约率的问题^[15-16], 其模型为

$$\begin{aligned} L_3(t, IL) &= L_{\text{origin}}(t) - \sum_{j=1}^M \beta_j(t) L_{\text{IL}, j}(t) [1 - \delta_j(t)] \\ \text{s.t. } L_{\text{IL}, j}(t) &\geq L_{\text{IL}, j_min} \end{aligned} \quad (7)$$

$D_{j_min} \leq \sum_{t=1}^{24} \beta_j(t) \leq D_{j_max}$

式中, $L_{\text{origin}}(t)$ 为总的签订合约的初始用户负荷; j 为可中断合同编号, 合同总数为 M ; $\beta_j(t)$ 为第 j 个中断合同在 t 时段的状态, 为0-1决策变量; $L_{\text{IL}, j}(t)$ 为第 j 个中断合同在 t 时段的中断容量; $\delta_j(t)$ 为第 j 个中断合同在 t 时段的违约率, $\delta_j(t) \in [0\%, 100\%]$; L_{IL, j_min}

为第 j 个中断合同的最小切除容量； D_{j_min} 、 D_{j_max} 分别为第 j 个中断合同的中断持续时间下限和上限。

基于需求响应的优化控制方法

基于上述三种负荷特性模型，为达到电能实时供用平衡，填补运行过程中实际的供电缺口，需要制定合理的负荷控制策略。同时，在电力系统实际运行中，负荷控制策略的制定实施过程等同于确定上述负荷特性模型中的控制变量值的过程；由于电价因素不可人为调节，所以通常作为不可控变量；其可控变量为直接控制负荷变量 $\alpha_i(t)$ 和可中断负荷控制变量 $\beta_j(t)$ ；同时，可中断负荷的调用频率一般较小，调用持续时间较长，一般需要提前一段时间通知用户，下面进行详细阐述。

假设供电缺口最大值为 P_{max} ，直接控制负荷所能提供的最大削减负荷为 DLC_{max} ，可中断负荷所能提供的最大削减负荷为 IL_{max} ，且终端设备的响应时间^[17]符合电网调度的要求。分别研究以下三种情况下的优化控制模型。

第一种情况，即

$$P_{max} \geq DLC_{max} + IL_{max} \quad (8)$$

这种情况下，同时考虑直接控制负荷和可中断负荷满额控制情况，提前通知参与可中断负荷用户按时中断负荷，并跟踪缺口情况实时调整参与直接负荷控制的用户负荷。

$$\begin{aligned} \min & |P(t) - IL_{max}(t)| = \\ & \left| P(t) - \sum_{j=1}^M \beta_j(t) L_{IL,j}(t) [1 - \delta_j(t)] - \sum_{i=1}^N [\alpha_i(t) L_{origin,i}(t)] \right| \\ \text{s.t.} & \sum_{t=1}^{24} \beta_j(t) = \min\{D_{j_max}, T_{max}\} \\ & L_{IL,j}(t) \geq L_{IL,j_min} \\ & \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) \leq \alpha_{i_max} \\ & t_{on,i} \geq T_{on,i_min} \\ & t_{off,i} \leq T_{off,i_max} \end{aligned} \quad (9)$$

式中， T_{max} 为供电缺口最大持续时间。

第二种情况，即

$$DLC_{max} \leq P_{max} < DLC_{max} + IL_{max} \quad (10)$$

此种情况下，根据实际最大供电缺口，考虑

可中断负荷提供部分负荷削减，而直接控制负荷用于实时调整。

$$\begin{aligned} \min & |P(t) - IL(t) - DLC(t)| \\ = & \left| P(t) - \sum_{j=1}^x \beta_j(t) L_{IL,j}(t) [1 - \delta_j(t)] - \sum_{i=1}^N [\alpha_i(t) L_{origin,i}(t)] \right| \\ \text{s.t.} & \sum_{t=1}^{24} \beta_j(t) = \min\{D_{j_max}, T_{max}\} \\ & \sum_{j=1}^x L_{IL,j}(t_{max}) = P_{max} - DLC_{max} \\ & L_{IL,j}(t) \geq L_{IL,j_min} \\ & \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) \leq \alpha_{i_max} \\ & t_{on,i} \geq T_{on,i_min} \\ & t_{off,i} \leq T_{off,i_max} \end{aligned} \quad (11)$$

式中， t_{max} 为最大供电缺口发生时刻；当 $\sum_{t=1}^{24} \beta_j(t) = \min\{D_{j_max}, T_{max}\}$ 不满足等式约束时，进行罚函数处理，惩罚项选用 $(\sum_{t=1}^{24} \beta_j(t) - \min\{D_{j_max}, T_{max}\})^2$ 。

第三种情况，即

$$P_{max} < DLC_{max} \quad (12)$$

这种情况下，只考虑直接控制负荷的实时调整。

$$\begin{aligned} \min & |P(t) - DLC(t)| = \left| P(t) - \sum_{i=1}^N [\alpha_i(t) L_{origin,i}(t)] \right| \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) \leq \alpha_{i_max} \\ & t_{on,i} \geq T_{on,i_min} \\ & t_{off,i} \leq T_{off,i_max} \end{aligned} \quad (13)$$

针对以上三种情况，需求响应的负荷优化控制方法具体流程图如图1所示。

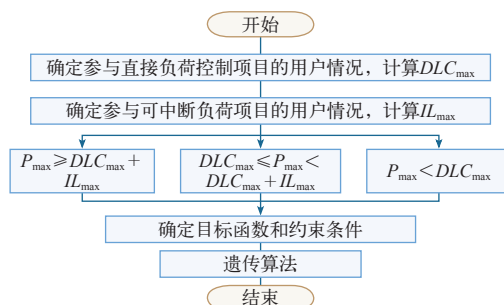


图1 柔性负荷优化控制的流程图

算例分析

某地区2013年夏季7月份，因持续高温导致电力供应短缺，为保证电力系统的稳定运行，根据电力供应的缺口大小，采用直接控制负荷和可中断负荷协同动作优化控制策略的需求侧解决方案。例如，2013年7月20日12:00~13:00，每10 min为一个时间段，根据不同的电力缺口情况，制定合理的负荷优化控制策略。

1. 需求响应负荷

参与直接控制负荷的电力用户共有10家，直接控制负荷的合同采用文献[18]中的算例，如表1所示。

表1 直接负荷控制项目的合同

编号	1	2	3	4	5
容量/kW	2 000	2 000	2 500	2 500	3 000
$T_{on,min}/h$	3	3	3	3	3
$T_{off,max}/h$	1	1	1	1	1

编号	6	7	8	9	10
容量/kW	3 000	3 500	3 500	4 000	4 000
$T_{on,min}/h$	3	3	3	3	3
$T_{off,max}/h$	1	1	1	1	1

参与可中断负荷的电力用户共有10家，可中断负荷的合同采用文献[16]中的算例，如表2所示。

表2 可中断负荷项目的合同

编号	允许中断总次数	每次持续时间/h	容量/kW
1	2	8	3 300
2	3	4	2 200
3	4	4	4 600
4	2	4	2 300
5	2	4	1 800
6	4	8	800
7	2	4	1 200
8	2	4	3 100
9	2	4	600
10	2	8	2 600
总计			22 500

由表1、表2可知， $DLC_{max}=30\text{ MW}$ ， $IL_{max}=22.5\text{ MW}$ ， $DLC_{max}+IL_{max}=52.5\text{ MW}$ 。

2. 负荷优化控制策略

根据上文中的优化控制模型，分别研究以下

三种情况下的优化控制方法。

场景一：电力供应缺口情况如图2所示。

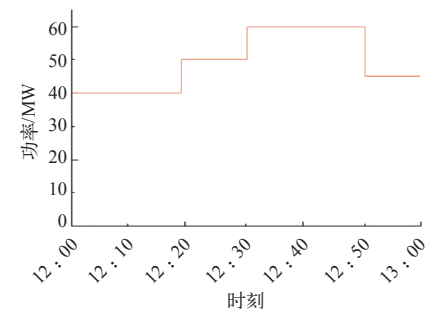


图2 电力供应缺口情况

由图2可知， $P_{max}=60\text{ MW}$ ， $P_{max}\geq DLC_{max}+IL_{max}$ 。这种情况下，直接控制负荷和可中断负荷通常采用满额控制，一般提前通知参与可中断负荷项目的用户按时中断负荷，而参与直接控制负荷的用户根据各个时段的实际缺口情况进行实时调整，优化控制效果和直接负荷控制变量结果分别如图3、表3所示。

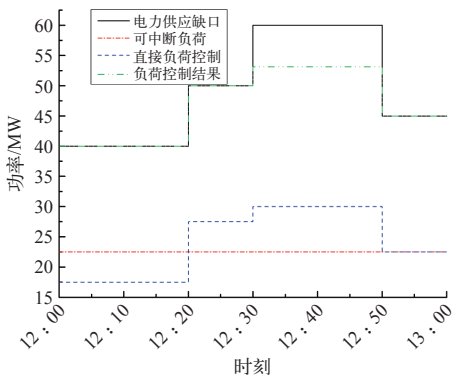


图3 优化控制的结果（场景一）

表3 直接负荷控制变量（场景一）

负荷时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
2	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
5	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

场景二：电力供应缺口情况如图4所示。

由图4可知， $P_{max}=40\text{ MW}$ ， $DLC_{max}\leq P_{max}<DLC_{max}+IL_{max}$ 。这种情况下，考虑可中断负荷提供部分负荷削减，约为 $P_{max}-DLC_{max}=10\text{ MW}$ 。根

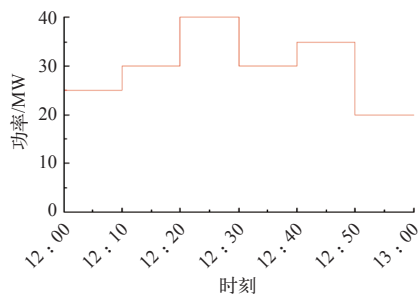


图4 电力供应缺口情况

据报价情况，该算例中选择编号1、3、4和5的用户负荷提供削减，总计12 MW，而直接负荷控制项目用于实时跟踪调整，优化控制效果和直接负荷控制变量结果分别如图5、表4所示，负荷控制的结果与电力供应缺口重合。

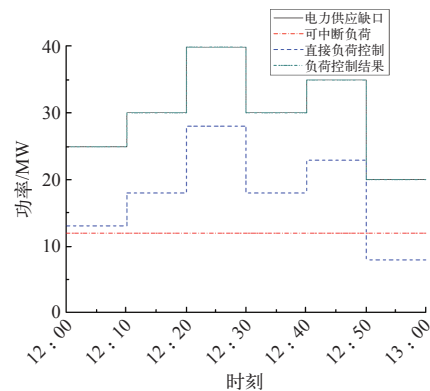


图5 优化控制的结果（场景二）

表4 直接负荷控制变量（场景二）

时段 \ 负荷	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1
2	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1
3	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
6	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0

场景三：电力供应缺口情况如图6所示。

由图6可知， $P_{\max} = 25 \text{ MW}$ ， $P_{\max} < DLC_{\max}$ ，这种情况下，只考虑直接控制负荷的实时调整，优化控制效果曲线与电力供应的缺口重合，而直接负荷控制变量结果如表5所示。

从以上三个场景的结果中不难发现，直接控制负荷是三种应用场景中变化最多的负荷，应该作为需求响应的优先选择。可中断负荷在初始条

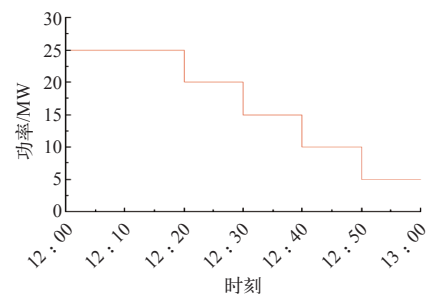


图6 电力供应缺口情况（场景三）

表5 直接负荷控制变量（场景三）

时段 \ 负荷	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
4	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
5	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
6	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0

件进行一次性的中断改变后，在整个过程中基本保持不变；出现此种现象，一方面可中断负荷是用户合约型，涉及用户和电网运营企业双方的利益，在直接控制负荷可调节的情况下，调节可中断负荷可能对于电网企业和用户均不是双方的最大利益；另一方面可中断负荷的实施是从用户侧积极参与需求响应而来，也说明当前的用户参与需求响应的积极性有待政策、电价等方面积极配合，从而将其调动起来。负荷控制结果的确满足了电网供需实时平衡，但是10个用户的实际用电参与，根据不同场景下用户不同的约束可能有不同的选择。

结束语

首先，基于需求响应，将刚性负荷和柔性负荷解耦，构建了电价负荷、直接控制负荷和可中断负荷等三种负荷特性模型，适用于目前智能电网发展和需求响应推广的大背景环境，构建的负荷特性模型符合需求响应的相关特性。

其次，基于所构建的负荷特性模型，研究了实时电力系统运行过程中负荷侧资源优化控制方法，解决电力供需矛盾。通过三个应用场景，针对实际电力供应缺口情况，采用不同的缺口大小

选用不同的优化控制方法,并充分考虑负荷控制中的多个约束条件,在满足用户需求的同时,实现了利用需求侧资源缓解电力供需矛盾;但所讨论的需求响应是针对聚合后的整体终端负荷进行优化控制,而实际应用中还涉及到分布式、多点分散的终端负荷聚合问题,以及具体终端设备控制变量的优化和终端的可靠性、安全性等问题,这些问题还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 石景海,贺仁睦.基于量测的负荷建模——分类算法[J].中国电机工程学报,2004,24(2):78-82.
- [2] 林济铿,刘露,张闻博,等.基于随机模糊聚类的负荷建模与参数辨识[J].电力系统自动化,2013,37(14):50-58.
- [3] Faria P, Vale Z, Soares J, et al. Demand response management in power systems using a particle swarm optimization approach [J]. IEEE Intelligent System, 2013, 28(4):43-51.
- [4] Jussi Ikaheimo, Corentin Evens, Seppo Karkkainen. DER aggregator business: the finish case [EB/OL]. <http://www.ece.hut.fi/enete>.
- [5] 章鹿华,王思彤,易忠林,等.高级计量架构(AMI)对智能电网下供用电关系的影响[J].电测与仪表,2011,48(5):33-36.
- [6] Ramirez-Escobar C, Alvarez-Bel C, Georgantzis N. Controlling market power of vertically integrated firms in electricity networks: demand response of aggregator agents [C]. 2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, 2011: 1-7.
- [7] 黎灿兵,杨朋,刘玮,等.短期负荷预测中考虑夏季气温累积效应的方法[J].电力系统自动化,2009,33(9):96-99.
- [8] 薛禹胜,罗云虎,李碧君,等.关于可中断负荷参与系统备用的评述[J].电力系统自动化,2007,31(10):1-6.
- [9] Ruiz N, Cobelo I, Oyarzabal J. A direct load control model for virtual power plant management [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 959-966.
- [10] Schisler K, Sick T, Brief K. The role of demand response in ancillary services markets [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008: 1-3.
- [11] 康重庆,夏清,胡左浩,等.电力市场中预测问题的新内涵[J].电力系统自动化,2004,28(18):1-6.
- [12] Nyeng P, Ostergaard J. Information and communication systems for control-by-price of distributed energy resources and flexible demand [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2):334-341.
- [13] 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.
- [14] 张钦,王锡凡,别朝红,等.电力市场下直接负荷控制决策模型[J].电力系统自动化,2010,34(9):23-28.
- [15] Le Anh Tuan, Bhattacharya K. Interruptible load management within secondary reserve ancillary service market [C]. IEEE Porto Power Tech Conference, 2001.
- [16] 王建学,王锡凡,王秀丽.电力市场可中断负荷合同模型研究[J].中国电机工程学报,2005,25(9):11-16.
- [17] Koch S, Zima M, Andersson G. Potentials and applications of coordinated groups of thermal household appliances for power system control purposes [C]. 2009 IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE), 2009: 1-8.
- [18] 乐小江.考虑直接负荷控制的机组组合问题研究[D].北京:华北电力大学,2012.
- [19] 牛文娟,李扬,王蓓蓓.考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3630-3637.
- [20] 汤奕,鲁针针,宁佳,等.基于电力需求响应的智能家电管理控制方案[J].电力系统自动化,2014,38(9):93-99.

(收稿日期:2015-06-05) **EA**