

基于启动时间延迟的家庭负荷管理优化策略

孙毅¹, 周晋宇¹, 李彬¹, 苏运², 郑爱霞³

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437;
3. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 针对家庭中典型温控负荷会给用户带来高峰负荷需求, 提出了一种基于启动时间延迟的家庭负荷管理优化策略。首先, 给出了一种智能家电负荷控制架构, 以支撑负荷优化控制算法在智能家电中的应用; 然后, 建立了基于启动时间延迟的负荷优化控制模型, 并提出了一种启发式的启动时间延迟调整算法, 该算法能够在负荷高峰时刻对各个负荷的运行周期施加一个最优的相位延迟, 达到均衡负荷的目标; 最后, 通过仿真实验对比了多种场景下的优化效果, 验证了所提策略能够降低短时负荷高峰、减小峰谷差。

关键词: 需求响应; 负荷管理; 家庭能源管理; 启动时间延迟; 负荷均衡; 启发式方法; 优化

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.013

0 引言

信息和通信技术正在能源领域扮演着至关重要的角色, 未来将深入电网和用电环节, 为必需的基础设施提供能源管理和负荷控制等服务^[1]。智能用电是智能电网的基本环节, 充分开发需求侧资源、提高用户能效成为人们关注的重点^[2]。如果能通过精细的算法对智能化用电设备进行控制, 将实现可观的能量节约, 并保证用户用电更加安全可靠。

目前在家庭负荷控制领域, 国内外学者主要从智能家居负荷控制实施手段及控制架构、智能家居负荷分类及其可控制能力分析、智能家居负荷的优化控制算法等方面进行研究。在智能家居负荷控制实施手段上, 目前的研究大多是基于电力需求响应(DR)下的用电负荷控制。文献[3]对家庭用户智能家居的可控负荷以用户可控负荷的电能消耗费用最小化为目标函数建立用户在分时电价下的用电策略模型。文献[4]提出了一种基于模糊逻辑理论的家庭负荷管理模型, 考虑了舒适度、成本和需求响应 3 种优化参数。文献[5-6]提出以空调负荷资源为虚拟储能能源解决电力系统的不平衡问题, 在保证电网安全稳定运行的前提下, 提升系统运行效率。文献[7-8]则以电动汽车为研究对象, 分别提出了考虑

电动汽车的家庭需求侧管理优化模型和一种基于峰谷电价的家用电动汽车有序充电控制方法。文献[9-10]考虑多能协调互补特性, 提出考虑柔性负荷和分布式能源协调调度的“源-荷”协调互补策略, 针对当前电力系统双侧随机问题, 提出计及需求侧资源、储能设备和可再生能源的“源-网-荷-储”协调调度策略。文献[11]采用了一种基于启发式的进化算法来求解最小化问题, 用于制定次日需求响应策略。文献[12]提出了连续控制和阈值控制 2 种控制策略, 能够通过对智能柔性设备的二进制开关控制来实现能量管理。文献[13-14]研究了在分时电价下对家庭内多种智能用电设备的优化控制策略, 以实现用户花费最小和电网负荷的均衡。

本文在一种应用于智能化家庭用电设备的控制架构的基础上, 对文献[15]中所测量的 3 种呈现周期性负荷特性的典型温控负荷建立了周期性负荷模型, 并在其算法的基础上, 对启动时间延迟的调整算法进行了改进, 提出了一种基于启动时间延迟的智能家电优化控制算法, 能够以对用户透明的方式, 在智能用电设备的工作周期中施以小的相位延迟。主要的目标是减少小区或楼宇中周期性负载的重叠和最小化周期性脉冲波的最大叠加值, 实现对小区或楼宇中短时出现的负荷高峰进行转移。最后, 通过仿真实验验证了该算法在多种场景下不仅可以降低短时负荷高峰, 也可以实现整体负荷曲线的均衡化。

1 现有家庭负荷控制架构分析

1.1 控制结构

家庭负荷控制的通用架构如图 1 所示, 智能电网包含调控中心的控制器和负荷代理。每一个控制器在其管理域中都有一组智能化用电设备, 负荷聚

收稿日期: 2016-01-12; 修回日期: 2016-11-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901104); 国家自然科学基金资助项目(51307051); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014ZP03, 2015ZD01); 国家电网公司科技项目(智能电网用户行为理论与互动化模式研究)

Project supported by the National Key Research and Development Program(2016YFB0901104), the National Natural Science Foundation of China(51307051), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014ZP03, 2015-ZD01) and the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(The User Behavior Theory and Interactive Mode in Smart Grid)

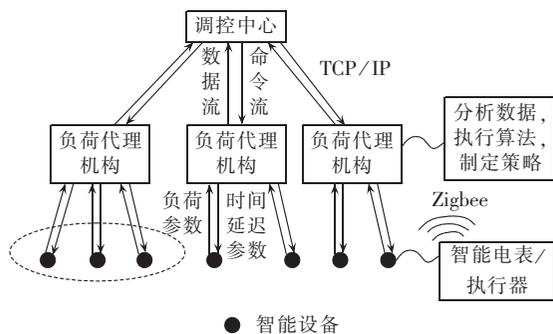


图 1 智能楼宇负荷控制系统通用结构

Fig.1 General structure of load control system for smart building

商作为协调大量中小规模柔性负荷和电网控制中心的中间机构,即代理。智能化用电设备与智能电表/执行器相连接,它们形成了一个家庭局域网(HAN)。每一个智能电表可以实时监控重要的数据,比如实时的电力负荷、环境信息以及与代理之间的传输数据。代理的功能是汇集数据并将数据传送给控制器,通常是使用一个双向的 TCP/IP 通信链路,其目的是在网络中提供命令流并根据给定的目标来控制用电设备。

1.2 控制策略

本节将给出集中式和分布式 2 种控制策略:集中式控制假定网络中所有设备都在智能电网控制器的管理区域中,这就意味着,控制器可以单独地控制网络中的每一个设备;分布式控制策略中每一个智能楼宇负责协调网络中部署在其管理区域中的一小部分智能设备。对于集中式控制策略而言,图 1 所示的下行链路负责传送控制信号(即相位延迟 δ_i),而上行链路负责传送与设备运行有关的信号(占空比、周期等)。对于分布式控制策略而言,下行链路仅传输一条二进制的指令,这一指令负责向每一个代理(负荷聚合商)发起实施控制算法。因为控制器不负责计算参数 δ_i ,所以上行链路不携带任何与控制策略相关的数据。在分布式控制策略中,分布式方法减少了网络中的数据传输。

1.3 控制成本分析

居民家庭和商务楼宇作为用电环节的重要组成部分,其能耗不可忽略,对其中的用电设备进行控制,具有节能和降低高峰负荷等现实意义。但统筹考虑多种负荷需要付出一定代价,主要包括以下 3 个方面。

1.3.1 建设成本

建设成本主要包括以下 4 个方面:(1)先进的网络解决方案在智能设备和调控中心之间搭建可靠的通信链路为用户与电网的交互提供数据流和命令流的支持;(2)智能用电服务管理平台为一定规模的设

备进行数据聚合分析、算法执行和策略制定;(3)智能用电设备的推广和部署;(4)智能传感器/执行器网络以及相关标准将应用在智能电网和智能设备之间的通信基础设施上,并且将支撑智能电网中最基本的操作,即负荷控制和需求响应。

1.3.2 舒适度成本

用户在优化过程中,为了实现整体利益的最大化,不可避免地使得自身用电需求受到一定影响,造成用电舒适度降低,形成舒适度成本。

1.3.3 补贴成本

负荷聚合商可以根据一定的用户补贴机制以及用户参与度、设备累计启动时间延迟量和用户信誉程度等用户自身的响应情况来决定,针对不同用户制定相应的规则来给予补贴,形成补贴成本。

2 智能家电优化控制方案数学模型

2.1 负荷模型

本文的研究对象为居民家庭负荷中的空调、冰箱等具有一定调整能力的温控负荷。文献[15]通过对 5 种传统用电负荷的测量发现,空调、冰箱和烤箱这 3 种温控负荷的负荷曲线呈现出了周期性的特征。文献[16]也利用了空调负荷中制冷机的周期性启停特性,提出了一种改进的周期性暂停分档控制策略。

本文在上述研究的基础上,建立了周期性负荷的具体模型,如式(1)所示。

$$f_i(t) = \begin{cases} A_i & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \tau < t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f_i(t)$ 为设备 i 在 t 时刻的瞬时功率; A_i 为设备 i 的功率幅值; τ 为设备的启动时间; T 为设备的运行周期。

2.2 基于启动时间延迟的家庭负荷优化模型

所有参与家庭负荷管理的用电设备总功率的叠加值可表示为:

$$F(t) = \sum_{i \in I} f_i(t + \delta_i) \quad (2)$$

其中, $I = \{1, 2, \dots, N\}$ 为一个负荷代理机构所管理的设备的集合, N 为设备的最大个数; δ_i 为一个特殊的时间间隔,用来调整设备 i 的开启时间; $f_i(t + \delta_i)$ 为负荷的功率调整方程。

基于启动时间延迟的家庭负荷优化模型的目标是找到各个设备最优的 δ_i , 在 k 次迭代中,找到使所有设备 $i \in I$ 在 $0 \leq t \leq T_w$ 时间内的功率分布叠加后的峰值最小值,即目标函数为:

$$S(\delta_{i,k}) = \min_k \left\{ \max_t [F(t)] \right\} \quad 0 \leq t \leq T_w \quad (3)$$

由于设备的功率分布函数为周期性函数,所以 δ_i 的调整范围应在设备 i 的正负周期 T_i 之内,即 δ_i

应满足约束:

$$-T_i \leq \delta_i \leq T_i \quad (4)$$

2.3 基于启动时间延迟的家庭负荷优化控制算法

本文在上述模型的基础上提出了一种启发式的家庭用电设备启动时间调整算法。

算法过程以优化理论中的梯度下降法的基本原理为基础,假设每个设备的功率分布函数 f_i 由 n 个离散值构成,时间步长为 $dt (T_w = ndt)$ 。算法原理见图 2,针对脉冲波形函数不可微分的情况(如①所示),假设当 $0 < t < \tau/2$ 时, $df/dt = 1$; 当 $\tau/2 \leq t < \tau$ 时, $df/dt = -1$, 如②所示。

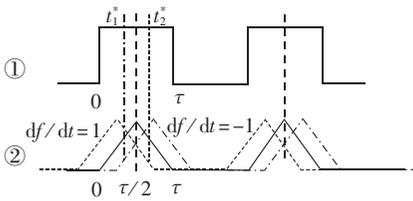


图 2 基于启动时间延迟的家庭负荷优化控制算法原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of optimal domestic load control based on start-time delay

该算法启发式地以时间窗口 T_w 内总功率分布中的最高点的时刻为起始点,判断设备 i 的功率分布函数在 t^* 时刻下的相位,如式(5)所示,并根据其所在相位的梯度,对负荷的启动时间进行调整。如图 2 中点划线所示,当 $0 < t_1^* < \tau/2$ 时,负荷启动时间向后调整,负荷曲线向右平移;如图 2 中虚线所示,当 $\tau/2 < t_2^* < \tau$ 时,负荷启动时间向前调整,负荷曲线向左平移,即能够更快地使负荷曲线移动到非启动状态的方向;当 $\tau/2 < t < \tau$ 时,负荷处于非启动状态,不进行调整。

$$t^* = \arg \max_t F(t) \quad (5)$$

本文对每个设备定义了一个时间延迟调整系数 λ_i , 作为每次迭代时对 δ_i 调整步长的系数。 λ_i 的大小与设备的运行周期成正比,用以对不同的设备设定不同的调整步长。 λ_i 的正负与负荷高峰期所在相位的梯度相关,用以定义设备的调整方向为梯度下降的方向,如式(6)所示。

$$\lambda_i = \text{sign} \left(\left. \frac{df_i}{dt} \right|_{t=t^*} \right) \lambda \quad (6)$$

则迭代过程为:

$$\delta_{i,u+1} = \delta_{i,u} + \lambda_i dt \quad (7)$$

其中, λ_i 为设备 i 的时间延迟调整系数; λ 为将固定步长变为可变步长的系数; $\delta_{i,u}$ 为设备 i 第 u 次迭代的启动时间延迟。

为了达到式(3)所示的目标,算法对上述过程进行 k 次迭代,最终找出这 k 次迭代中功率峰值的最

小值。并要求功率峰值小于某一阈值,即当满足 $S(\delta_{i,k}) < P_{\text{threshold}}$ 时,则认为该方案为成功的智能用电方案。算法流程如图 3 所示。

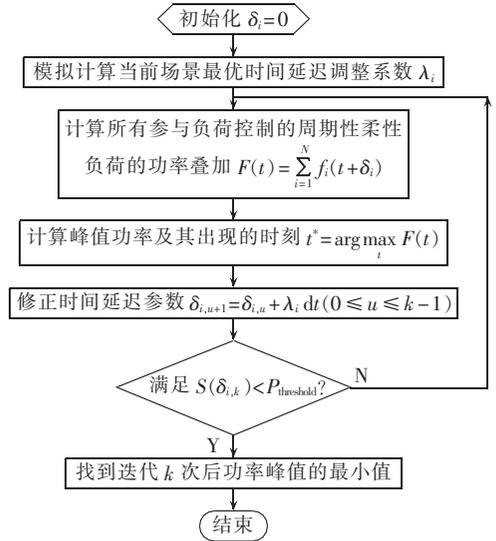


图 3 基于启动时间延迟的家庭负荷优化控制算法流程图

Fig.3 Flowchart of optimal domestic load control based on start-time delay

3 实例分析与验证

3.1 模型基本参数设定

在第 2 节中负荷模型被设定为恒定占空比和周期。但由于外部原因,比如在运行过程中打开电冰箱的门,或者调节空调的温度,设备的运行特性都可能会发生改变。这种不确定性将会影响算法的性能,所以在算例中首先根据蒙特卡洛分析产生大量的随机情境。在每个情境中,通过随机模型能够得到居民用户中每个智能设备的数量和特性参数。这样,仿真结果就可以从整体上体现算法的性能。由文献[1]中对 5 类负荷进行的负荷数据测量可知,烤箱、冰箱和空调的负荷曲线呈现周期性特性,具体参数如表 1 所示。

表 1 典型负荷数据的测量值
Table 1 Measurements of typical loads

负荷类型	是否呈现周期性	幅值 A_i/W	周期 T/min	占空比/%
烤箱	是	900	9.75	37
电炉	否	700	—	—
冰箱	是	140	89.7	34
洗衣机	否	1800	—	—
空调	是	1100	9.1	39

每个智能设备具有以下特征参数:功率幅值 A_i 、启动时间 τ_i 与周期 T_i (占空比为 τ_i/T_i)和初始启动时间延迟 δ_0 。冰箱用集合 F 来表示,烤箱用集合 O 来表示,空调用集合 A_c 来表示。为了获取不同类型的电器设备,参数数据由文献[1]给出的测量值以及正

态分布或均匀分布来定义。每种设备的功率幅值为 $A_i = N_R[160, 30] (i \in F)$ 、 $A_i = N_R[1000, 100] (i \in O)$ 、 $A_i = N_R[1100, 100] (i \in A_C)$ 、 $N_R[\mu, \sigma^2]$ 为正态分布的随机数发生器, μ 为均值, σ^2 为方差; 每种设备的启动时间 $\tau_i = N_R[30, 10] (i \in F)$ 、 $\tau_i = N_R[3.5, 1] (i \in O)$ 、 $\tau_i = N_R[3.5, 1] (i \in A_C)$; 每种设备的周期 $T_i = N_R[90, 20] (i \in F)$ 、 $T_i = N_R[9.75, 2] (i \in O)$ 、 $T_i = N_R[9, 2] (i \in A_C)$; 设备的初始启动时间延迟 $\delta_0 = U_R[0, T/2]$ 、 $U_R[\delta_{\min}, \delta_{\max}]$ 为基于均匀分布的随机数发生器, δ_{\min} 为最小延迟, δ_{\max} 为最大延迟。

3.2 时间延迟调整系数选取

时间延迟调整系数 λ_i 可以使时间延迟 δ_i 的调整更加灵活, 不同的 λ_i 值也可以使算法的性能发生很大的变化, 包括实施算法后的最大峰荷削减量和达到该最大削减量所需要的迭代次数。为了找到合适的 λ_i 使得算法性能更优, 下面分别对 4 种典型的 λ_i 值 (其中 T 为负荷运行的周期) 进行实验。场景假设有 14 台烤箱、15 台空调和 16 台冰箱, 设置迭代次数为 500 次, 进行 50 次实验, 分别取得不同典型 λ_i 值下最大峰荷削减量和达到最大削减时的迭代次数的平均值, 如图 4 所示。

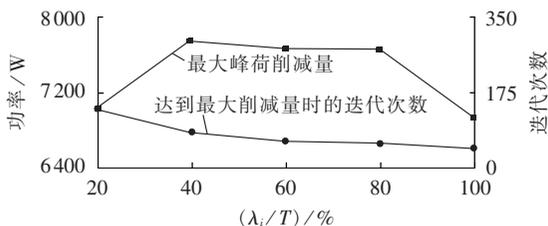


图 4 时间调整系数对算法性能的影响
Fig.4 Effect of time adjustment factor on algorithm performance

令各个设备的时间延迟调整系数 λ_i 与各个设备的运行周期建立起相关性, 不仅可以增大算法实施后的最大峰荷削减量, 还可以减小达到该最大峰荷削减量时的迭代次数。其中当时间延迟调整系数 $\lambda_i = 0.4 T$ 时, 算法所实现的最大峰荷削减量最大, 为 7742 W, 并且迭代次数也相对较少。但是当 $\lambda_i = T$ 时, 算法性能也出现了下降。因为调整步长过大, 会出现过度调整以至于无法达到最佳的负荷均衡效果。基于以上实验结果, 本文在每次优化之前, 通过模拟计算得到当前场景下最优时间延迟调整系数 λ_i , 并在随后优化中采用该系数进行计算, 形成一个动态的最优时间延迟调整系数选取策略。

3.3 实验结果分析

3.3.1 单体用户结果分析

在单体用户情境中对单体用户中的智能家电实施优化控制算法。假定该用户拥有 1 台冰箱、1 台烤箱和 3 台空调, 其实施优化控制算法前后的负荷曲线如图 5 所示。

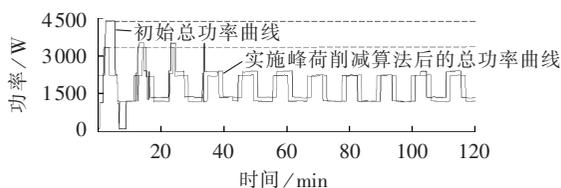


图 5 单体用户实施算法前后的总功率曲线对比
Fig.5 Comparison of total power of single power consumer between with and without optimal load control

由图 5 可知, 未实施优化控制算法时的初始总功率曲线的峰荷约为 4400 W, 实施优化控制算法后, 具有最小峰荷的总功率曲线的峰荷约为 3400 W, 将最初的峰荷削减了约 1000 W。

图 6 则反映了该用户在观测时间窗口内的峰荷随算法迭代次数的改变而变化的趋势, 可见峰荷在大约第 8 次迭代达到了最小值。图 7 为单体用户中各个用电设备的启动时间延迟, 从图 7 中可见对烤箱和空调的启动时间延迟都在 ± 5 min 之内, 冰箱的启动时间延迟也相对较大, 这是由于冰箱本身的运行周期相对较大, 所以基本不会对用户造成太大的影响。其中, 设备编号 1 对应烤箱, 2 对应冰箱, 3—5 对应空调。

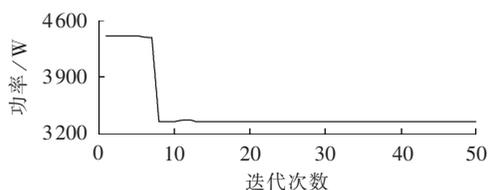


图 6 单体用户的峰荷随迭代次数的变化曲线
Fig.6 Curve of peak load of single power consumer vs. iteration turns

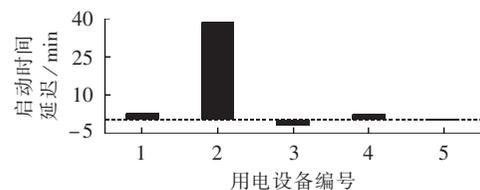


图 7 单体用户中各个用电设备的相位延迟
Fig.7 Phase delays of different household appliances for single power consumer

3.3.2 群体用户结果分析

a. 某小区单层用户负荷控制实例。

在单层多用户情境中模拟对一层用户中的智能家电实施优化控制算法。假定单层用户拥有 16 台冰箱、14 台烤箱和 15 台空调, 其实施优化控制算法前后的负荷曲线如图 8 所示。

同 3.3.1 节中情境, 图 8 反映了实施算法前后的总功率对比, 相比于单用户, 单层多用户负荷数量有所增加, 实现的负荷均衡效果更加明显。在实施优

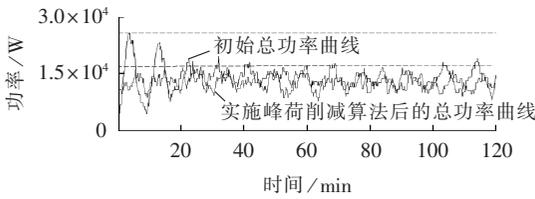


图 8 单层多用户实施算法前后的总功率曲线对比

Fig.8 Comparison of total power of one floor between with and without optimal load control

化控制算法之前,峰荷约为 26 kW,但通过实施优化控制算法,峰荷下降了 10 kW,实现了有效的负荷削减。

单层多用户情境中,峰荷随算法迭代的变化曲线也与单用户有所不同,如图 9 所示,多用户的峰荷并没有自始至终一直下降,而是会出现峰荷增加和局部最小值,但在迭代过程中,当迭代次数达到 150 次左右时得到了收敛的结果。曲线的整体下降趋势说明了算法的合理性。图 10 为单层多用户中各用电设备的启动时间延迟,其中设备编号 1—14 对应烤箱,15—30 对应冰箱,31—45 对应空调。

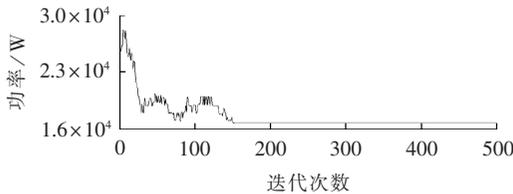


图 9 单层多用户的峰荷随迭代次数的变化曲线

Fig.9 Curve of peak-load of one floor vs. iteration turns

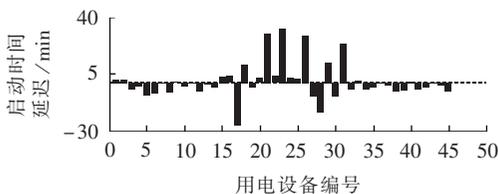


图 10 单层多用户中各个用电设备的相位延迟

Fig.10 Phase delays of different household appliances for one floor

b. 某小区整栋楼宇用户负荷控制实例。

从该小区单层用户实施优化控制算法前后结果分析可以看出,所提算法起到了负荷均衡的效果,但是总体负荷波动性较大,峰荷随迭代次数的变化曲线也具有一定的随机性。为了进一步说明本文方法的有效性,选取该小区整栋楼宇的用户作为实例进行分析。假定该小区整栋楼宇拥有 50 台冰箱、30 台烤箱和 100 台空调,其实施优化控制算法前后的负荷曲线如图 11 所示。

由图 11 可知,在初始总功率曲线中,峰荷达到了 103 943 W,尤其是在初始启动时刻的前 20 min 内,峰谷差甚至达到了 96 290 W;但通过实施优化控

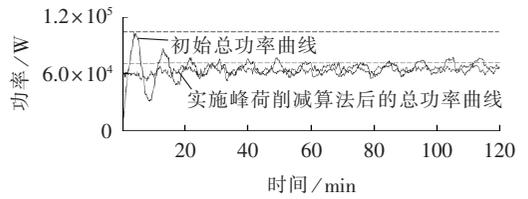


图 11 整栋楼宇实施算法前后的总功率曲线对比

Fig.11 Comparison of total power of whole building between with and without optimal load control

制算法,将峰荷削减为 71 271 W,峰谷差也下降为 18 911 W,不仅实现了峰荷的削减,还起到了负荷曲线均衡化的作用。如图 12 所示,由于负荷数量太多,该楼宇的峰荷最终没有达到收敛,但却实现了相当可观的负荷均衡效果。

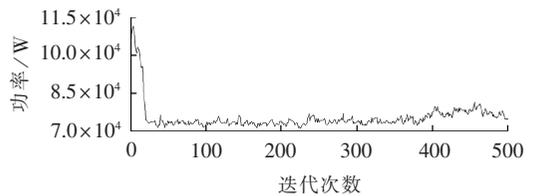


图 12 整栋楼宇的峰荷随迭代次数的变化曲线

Fig.12 Curve of peak-load of whole building vs. iteration turns

3.3.3 参与调节设备的公平性分析

单轮次优化下,各设备延迟时间存在较大的偏差,为了保证参与调节的用电设备之间的相对公平,避免在大范围优化中单个用户的利益受损,本文提出了一个公平性因子 M 来评价多轮次优化后各个设备平均启动时间延迟之间的偏差程度,如式(8)所示。

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N \left(D_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i \right)}{N} \quad (8)$$

$$D_i = \frac{1}{S} \sum_{r=1}^S |\delta_{i,r}| \quad (9)$$

其中, D_i 为设备 i 在 S 轮优化中的平均绝对启动时间延迟;公平性因子 M 为 N 个设备在 S 轮优化中的平均绝对启动时间延迟 D_i 的标准差, M 的值越小,说明设备参与优化的公平性越高。

图 13 给出了包括 15 台空调、16 台冰箱和 14 台烤箱在内的 45 个设备经历 50 轮优化后的平均绝对启动时间延迟量与单轮次优化结果的比较(其中设备编号同图 10),可以看出经过 50 轮次的优化,各个设备的平均绝对启动时间延迟都趋于均衡。另外,3 条折线表示了 3 种设备公平性因子随优化轮次的变化情况,同样可以看出,随着优化轮次的增加,设备之间的公平性也在提高。

在优化过程中,为了整体利益的最大化,不可避免地使得自身用电需求受到一定影响。为了协调各个用户利益分配,通常采用 2 种解决方法。第 1 种方

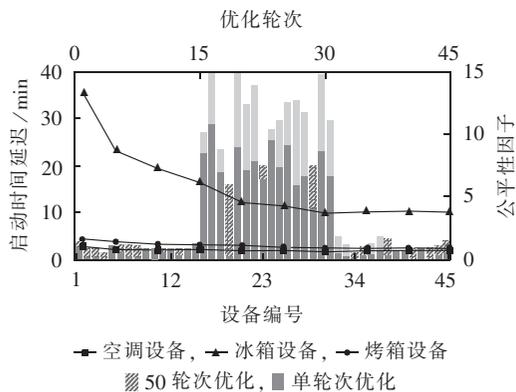


图 13 多轮优化和单轮优化的时间延迟比较以及各设备的公平性因子随优化轮次的变化情况

Fig.13 Comparison of time delay between single and multiple optimization rounds, and curve of fairness index vs. optimization round for different household appliances

法是聚合商可以根据用户的参与度、设备累计启动时间延迟量以及用户信誉程度等表示用户自身的响应情况的指标,针对不同用户制定相应的规则来给予补贴;第 2 种方法是制定可参与调节用电设备的选取策略,即在每轮次优化时尽量避免选取上一轮次优化中做出较大调节量的设备,从而保证一定程度的公平性。

3.3.4 负荷数量对结果的影响

本节设计了仿真实验,通过最大峰荷削减率这一指标分析负荷数量对算法性能的影响。其中,最大峰荷削减率可表示为:

$$\text{最大峰荷削减率} = \frac{\text{初始峰荷} - \text{削减后峰荷}}{\text{初始峰荷}} \times 100\% \quad (10)$$

由于算法中各个设备的初始启动时间为随机量,导致每次仿真实验的结果具有一定的随机性。所以,该实验分别在不同的负荷数量情况下进行了 50 次实验,然后对上述指标取平均值,这样便能从整体上反映算法性能。

图 14 为最大峰荷削减率随负荷数量的变化曲线。当负荷数量为 4 台时,即情境一,峰荷削减率约为 26%,当负荷数量超过 50 台左右时,其最大峰荷削减率基本维持在 30% 左右,即负荷数量的增大不会对算法的性能造成太大影响。

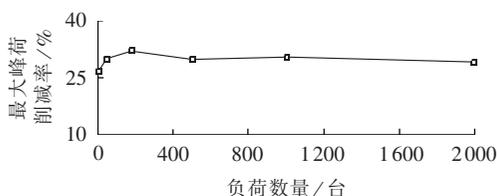


图 14 最大峰荷削减率随负荷数量的变化曲线

Fig.14 Curve of maximum peak-load reduction rate vs. load quantity

4 结论

本文在优化理论中梯度下降法的基础上进行改进,提出了一种基于启动时间延迟的家庭负荷控制算法。该算法适用于不可微分的脉冲方波,对具有周期性运行特性的家庭负荷施以较小的相位延迟,在不影响用户舒适度的情况下,实现小区和楼宇高峰负荷削减及负荷曲线均衡化。仿真实验表明,该算法在多种场景下均能实现 30% 左右的高峰负荷削减,峰谷差也呈逐渐降低的趋势,起到了整体负荷均衡化的作用。在未来的研究中,本文将从以下方面进行改进:

a. 目前仅考虑了相对较少种类的负荷,在此基础上还可以加入更多具有非周期运行特性的负荷类型,研究更加具有适用性的智能家居运行协调优化算法;

b. 如何协调各个用户在用电优化过程中的利益分配也将是未来研究的方向之一。

参考文献:

- [1] GIORGIO A D, PIMPINELLA L, QUARESIMA A, et al. An event driven smart home controller enabling cost effective use of electric energy and automated demand side management [C]// 2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). Corfu, Greece: IEEE, 2011: 358-364.
- [2] 孙盛鹏, 刘凤良, 薛松, 等. 需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度综合评价体系 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 77-83. SUN Shengpeng, LIU Fengliang, XUE Song, et al. Comprehensive evaluation system for contribution degree of demand-side resources to renewable energy source integration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 77-83.
- [3] 陈俊生. 面向智能用电的需求响应技术及家庭用户用电策略研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014. CHEN Junsheng. Research on demand response and electricity consumption strategy of residential consumers with smart power consumption oriented [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [4] RAHMAN M M, HETTIWATTE S, GYAMFI S. An intelligent approach of achieving demand response by fuzzy logic based domestic load management [C]// Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2014. Power Engineering Conference. Perth, Australia: [s.n.], 2014: 1-6.
- [5] 高赐威, 李倩玉, 李扬, 等. 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): 1546-1555. GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang, et al. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555.
- [6] 张志丹, 黄小庆, 曹一家, 等. 电网友好型空调负荷的主动响应策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4207-4218. ZHANG Zhidan, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Research on active response policy for grid friendly air conditioning load [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4207-4218.
- [7] SHERIF H, ZHU Z, LAMBOTHARAN S. An optimization framework

- for home demand side management incorporating electric vehicles [C]//2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA). Kuala Lumpur, Malaysia:IEEE,2014:57-61.
- [8] 苏海峰,梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):17-22.
SU Haifeng,LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak-valley electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(6):17-22.
- [9] WISHART M T,TURNER J,PERERA L B,et al. A novel load transfer scheme for peak load management in rural areas [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(2):1203-1211.
- [10] 曾鸣,杨雍琦,向红伟,等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):102-111.
ZENG Ming,YANG Yongqi,XIANG Hongwei,et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):102-111.
- [11] LOGENTHIRAN T,SRINIVASAN D,SHUN T Z. Demand side management in smart grid using heuristic optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1244-1252.
- [12] KOUTITAS G. Control of flexible smart devices in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1333-1343.
- [13] 周磊,李扬. 分时电价环境下基于家居能量管理系统的家居负荷建模与优化运行[J]. 电网技术,2015,39(2):367-374.
ZHOU Lei,LI Yang. Modeling and optimal dispatch for residential load based on home energy management system under time-of-use pricing[J]. Power System Technology,2015,39(2):367-374.
- [14] 付蔚,敬章浩,罗志勇,等. 基于分时电价的智能家电控制方案[J]. 电网技术,2015,39(3):717-723.
FU Wei,JING Zhanghao,LUO Zhiyong,et al. A time-of-use pricing based control scheme for intelligent household appliances[J]. Power System Technology,2015,39(3):717-723.
- [15] KOUTITAS G,TASSIULAS L. Periodic flexible demand:optimization and phase management in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(4):1305-1313.
- [16] 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(5):49-54.
XIN Jieqing,WU Liang. Hierarchical strategies for duty cycling control of air conditioners in business buildings[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(5):49-54.

作者简介:



孙 毅

孙 毅(1972—),男,北京人,教授,博士,主要从事电力系统通信与智能用电技术的研究工作(**E-mail**:sy@ncepu.edu.cn);

周晋宇(1991—),男,山西万荣人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统通信、智能用电技术(**E-mail**:zhoutt008@126.com);

李 彬(1986—),男,北京人,副教授,博士,主要从事智能用电与需求响应技术的

研究工作(**E-mail**:direfish@163.com);

苏 运(1986—),男,上海人,工程师,硕士,主要从事电力系统仿真与配电网分析的研究工作(**E-mail**:oppenvi@163.com);

郑爱霞(1968—),女,河南温县人,高级工程师,硕士,从事电网设备运维、电能质量、节能降耗、电能计量等方面的研究工作。

Optimization strategy based on start-time delay for domestic load management

SUN Yi¹,ZHOU Jinyu¹,LI Bin¹,SU Yun²,ZHENG Aixia³

(1. School of Electrical and Electronics Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute,Shanghai 200437,China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute,Nanjing 211103,China)

Abstract: Aiming at the peak-load demand by the typical thermostatically-controlled domestic loads,an optimization strategy for domestic load management based on the start-time delay is proposed. A framework of intelligent household appliance control is introduced to support the application of the optimal load control algorithm and an optimal load control model based on the start-time delay is then established,for which,a heuristic start-time delay adjustment algorithm is proposed to execute different optimal phase delays in the operation cycle for different domestic loads in the peak-load period for load balancing. Simulative experiments are carried out to compare the optimization effect among different scenarios,verifying that the proposed strategy may relieve the short-time peak-load and reduce the difference between peak and valley loads.

Key words: demand response; electric load management; home energy management; start-time delay; load balancing; heuristic method; optimization