

柔性负荷虚拟电厂下冰蓄冷空调的优化控制策略

米增强, 张文彦, 贾雨龙

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:在构建安全稳定、经济低碳的智能电网的过程中,利用柔性负荷主动参与电网的协同控制受到高度重视。为挖掘和利用柔性负荷响应电网需求的调控潜力,提出一种专门针对柔性负荷的虚拟电厂构架;选取冰蓄冷空调作为典型受控对象,给出一种优先保障用户用电体验和经济性并计及电力系统供需关系的优化用电控制策略;结合空调系统的实际运行特性和用户用电期望,以设备运行费用最低、电网负荷波动最优为目标构建双层优化模型。通过算例在不同冷负荷需求下对冰蓄冷空调的控制结果进行仿真对比,验证了所提控制策略的可行性和有效性。

关键词:柔性负荷;虚拟电厂;冰蓄冷空调;控制策略

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.003

0 引言

随着供给侧间歇性能源的大规模接入和需求侧柔性负荷的快速发展,供需两侧的强随机性增加了电网功率平衡和运行调度的难度^[1]。在这一背景下,虚拟电厂 VPP (Virtual Power Plant)^[2-3]的概念被提出,其以通信和控制为核心,聚合管理分布式电源、柔性负荷及储能等,具有与传统发电厂相似运行特性的发电单元。在国外,VPP 项目已被用于功率平衡、减小可再生能源发电不确定性和转移、削减负荷需求等方面^[4-6];在国内,VPP 的发展尚处于理论阶段,研究主要集中于分布式电源的优化调度^[7]以及“源-储-荷”的协同控制^[8]。为进一步挖掘和利用 VPP 内柔性负荷类资源的调控潜力,本文提出了柔性负荷虚拟电厂 FLVPP (Flexible Load Virtual Power Plant)的构架,作为用户与电网间的专门交互平台与系统,以促进“网-荷”共赢的优化互动,挖掘用户侧调控潜力响应电网需求,从而为需求侧资源常态化地纳入电力系统运行调度提供新思路。

冰蓄冷空调是一类在电网低谷时段储存冷量、高峰时段融冰释冷,满足负荷需求的设备,具有良好的负荷转移特性,可作为一种典型柔性负荷用于 FLVPP 的研究。若能合理调控该类设备的用电行为,就能有效削减空调负荷在部分城市高达 50% 的夏季峰荷比重^[9],进而优化电网负荷特性,还可避免因增建尖峰负荷调峰电厂所面临的长期低负荷运行

的情况。在国外发达国家,蓄冷技术已被应用于 60% 以上的建筑物中^[10];在国内,蓄冷项目也由 2006 年的 448 项^[11]发展至 2015 年的 1 133 项,其中冰蓄冷项目占到 88%,具有 26 GW 的总容量以及 1.6 GW 的移峰量^[12]。综上所述,冰蓄冷空调类负荷具有巨大的发展空间和需求响应利用价值。

目前,在冰蓄冷空调的控制策略方面,文献 [13] 研究了通过实时跟踪冷负荷变化,随动修正系统运行参数,以提高空调系统供冷的精确性;文献 [14] 提出了一种动态冰蓄冷空调的经济最优控制策略,通过对各受控时段的融冰需求进行优先排序,实现冷负荷动态分配下的最低运行费用;文献 [15] 以非线性多目标模型的求解,有效兼顾了减少运行费用和削减制冷机组能耗的需求;文献 [16] 则给出定比例运行策略下,蓄冷空调与普通空调共同参与日前削峰的研究。上述所提的控制策略主要涉及了空调系统的自优化,在研究用户与电网间的互动与协调方面存在不足。

本文提出了一种 FLVPP 下的冰蓄冷空调优化用电控制策略,该策略考虑了设备的运行特性和用户的用电期望;构建了以设备运行经济性、电网负荷平滑性调整为目标的双层优化模型;在不同冷负荷需求下对冰蓄冷空调的多种控制方式进行仿真对比,验证了所提控制策略的可行性和有效性。

1 FLVPP

电力终端设备的用电多由用户自主控制完成,由于缺乏对设备运行特性、电网运行状态及电价和激励信号的感知,用户无法做出科学合理的用电决策,尤其是柔性用电设备在浪费一定运行费用的同时也失去了负荷调控潜力的利用价值,致使电力系统的负荷弹性水平一般较低,难以达到需求响应的最低水平^[17],目前,电力系统的调控既无法精细至各终端设备,也无法对这类碎片化资源进行单独管

收稿日期:2017-12-11;修回日期:2018-07-14

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAA01B01);国家电网公司科技项目(KJGW2018-014);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018QN075)

Project supported by the National Key Technology R&D Program of China(2015BAA01B01), the Science and Technology Project of SGCC(KJGW2018-014) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2018QN075)

理^[18]。在智能电网的建设中,有必要也具技术可行性通过柔性负荷的聚合管理使其在个性化的控制策略下,以一种易实现易调控的模式作为市场主体参与电力市场博弈和系统协同优化。在已提出的 VPP 中,柔性负荷的研究多集中于分布式电源及储能的协同调控,而源荷储在运行特性、控制方式等方面的差异性,既增加了 VPP 运行管理和调控机制建立的难度,也不利于柔性负荷的精细化、个性化控制。为此,本文提出将柔性负荷类资源单列聚合,建立相应的 FLVPP。

FLVPP 作为广域范围内的虚拟发电与需求侧响应单元,可在各供电公司体制内建立,也可引入负荷集成商建设。FLVPP 具有自己的调控平台、电价与激励机制以及柔性负荷管理系统,向上对电网调度实施需求侧响应,向下对柔性负荷用户进行互动和增值服务。相较于传统电厂,FLVPP 以柔性负荷聚合控制单元等效的“发电机组”,具有功率双向流动、聚合容量大、可拓展性强、调节灵活快速等特点。FLVPP 的调控架构如图 1 所示,大量的终端用户直接接入 FLVPP,按照负荷类型聚类为被控单元,根据 FLVPP 的控制和电价激励信号调整自身用电行为。此时,FLVPP 作为用户与电网间的交互平台,在为柔性负荷提供参与系统运行管理入口的同时,丰富了系统调控的选择。总体而言,这一控制架构简单直接,具有良好的整体协调能力。

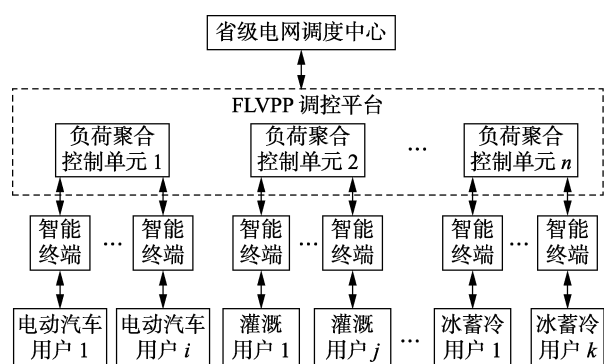


图 1 FLVPP 调控架构示意图

Fig.1 Schematic diagram of control framework of FLVPP

FLVPP 对用户的调控管理按照实现手段的不同可分为基于价格和基于合同^[19]2 类:前者属于间接控制,FLVPP 以电价和激励信号与用户需求弹性间的关系作为调控基础,引导用户转移或削减用电量;后者属于直接控制,FLVPP 通过与用户签订线上合同获取设备的基本参数和用电特性,以个性化控制策略和用电服务作为调控基础,控制设备用电行为响应电网需求,此时,经用户委托移交了控制权限的各受控设备,在 FLVPP 内处于托管状态。

以下以 FLVPP 基于合同的控制模式为例,选取冰蓄冷空调类负荷作为典型受控对象,自下而上在

分析独立用户末端用电模型的基础上,结合实际价格信号和电网供需变化,制定反映用户用电期望、设备运行特性以及经济性的控制策略,从而在 FLVPP 调整冰蓄冷空调类负荷用电的过程中,给出用户响应行为的定量分析,保障精细化控制切合设备实际运行状态,最终实现用户主动削峰填谷、优化电网负荷特性的用电目标。

2 冰蓄冷空调

2.1 运行特性

冰蓄冷空调的运行按照冷负荷需求可划分为蓄冷和供冷 2 个时段。在蓄冷时段内,空调系统工作在机组蓄冷模式下,此时制冷机组的逐时蓄冷量为 Q_x ;在供冷时段内,空调系统的工作模式分为机组供冷、融冰供冷以及机组融冰联合供冷 3 种,其中制冷机组的逐时供冷量为 Q_j ,融冰的逐时供冷量为 Q_r 。

冰蓄冷空调蓄存和取用系统冰量的行为受到蓄冷设备蓄冰和融冰特性的影响。对于同一蓄冷设备而言,其蓄冰速率随系统冰量的增加而下降,融冰速率随系统冰量的减少而下降。因此,以动态蓄冰和融冰速率作为 Q_x 和 Q_r 的约束条件,能够更好地反映冰蓄冷空调的真实运行特性,提高优化模型的准确度。

$$\begin{cases} Q_{x,t} \leq Q_{x,t}^{\max} \\ Q_{r,t} \leq Q_{r,t}^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $Q_{x,t}^{\max}$ 为蓄冷设备 t 时刻蓄冰速率对应的最大蓄冷量; $Q_{r,t}^{\max}$ 为蓄冷设备 t 时刻融冰速率对应的最大供冷量。

式(2)给出空调系统的逐时冰量变化。

$$W_{t+1} = \begin{cases} W_t - S_t \Delta t + Q_{x,t} \Delta t & \text{蓄冷时段} \\ W_t - S_t \Delta t - Q_{r,t} \Delta t & \text{供冷时段} \end{cases} \quad (2)$$

其中, W_t 为 t 时刻冰蓄冷空调系统的剩余冰量; S_t 为冰蓄冷空调系统的逐时冷量损失; Δt 为蓄冷空调调度的时间间隔。

能效比 EER(Energy Efficiency Ratio)^[20]作为衡量冰蓄冷空调运行特性的又一重要指标,由制冷机组输出冷量和输入电力的比值衡量,反映了系统能量转换的效率,其计算公式可通过制冷机组运行参数拟合得到:

$$r_{EERt} = r_{EERN} (c \delta_{PLRt}^2 + b \delta_{PLRt} + a) \quad (3)$$

$$\delta_{PLRt} = \frac{Q_{ch,t}}{Q_{ch}^{\max}} \quad (4)$$

$$Q_{ch,t} = \begin{cases} Q_{x,t} & \text{机组工作在蓄冷状况下} \\ Q_{j,t} & \text{机组工作在供冷状况下} \end{cases} \quad (5)$$

其中, r_{EERN} 为额定能效比; c 、 b 、 a 为拟合系数; δ_{PLRt} 为机组负载率; $Q_{ch,t}$ 为制冷机组逐时输出的冷量; $Q_{ch}^{\max}$

为制冷机组输出冷量的最大值。

动态能效比计算下的制冷机组用电功率 $P_{ch,t}$ 为:

$$P_{ch,t} = f(Q_{ch,t}) = \frac{Q_{ch,t}}{r_{EERt}} = \frac{Q_{ch,t}}{r_{EERN}(c\delta_{PLRt}^2 + b\delta_{PLRt} + a)} = \frac{Q_{ch,t}}{r_{EERN} \left[c \left(\frac{Q_{ch,t}}{Q_{ch}^{\max}} \right)^2 + b \frac{Q_{ch,t}}{Q_{ch}^{\max}} + a \right]} \quad (6)$$

图 2 为不同负载率下的机组用电功率,如图中阴影部分所示,动态和额定能效比对应的机组用电功率在不同负载率下显示出明显的差异性。因此,采用动态能效比有利于优化模型对设备真实耗电量的反映。

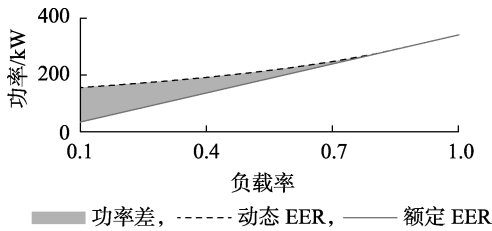


图 2 不同负载率下的机组用电功率

Fig.2 Unit power consumption under different load rates

冰蓄冷空调系统的日耗电量 A_{sys} 主要由制冷机组用电量 A_z 和系统辅助设备用电量 A_a 两部分组成^[21],其表达式如式(7)所示。

$$A_{sys} = A_z + A_a = \sum_{t=0}^{23} P_{ch,t} \Delta t + \sum_{t=0}^{23} P_{a,t} \Delta t \quad (7)$$

其中, $P_{a,t}$ 为系统辅助设备的用电功率。

2.2 控制策略

冰蓄冷空调的控制策略作为保障其高效运行的重要手段,主要解决了各受控时刻冷负荷需求在制冷机组和蓄冷设备之间合理分配的问题。其中,主机优先作为一种广泛应用于实际蓄冷项目中的控制策略^[12],以保障制冷机组优先供冷为目标,蓄冷设备只用于补充冷负荷超出机组供冷上限的部分,该控制方式简单且运行可靠,但在冷负荷需求较低时,蓄冰得不到有效利用,系统的运行费用较高。

为使冰蓄冷空调的控制做到既“利己”又充分计及电网供需关系,以下基于冰蓄冷空调的需求响应能力,提出一种 FLVPP 控制模式下的优化用电控制策略。该控制策略的目标是在满足用户供冷需求的基础上,通过空调用电行为的优化,提高用户用电经济性,平滑其所处区域电网的负荷曲线。其中,经济性优化以最低运行费用的求解得到保障,平滑性优化以对电网负荷曲线变化趋势进行跟踪,精细化再调整各受控时段的蓄冰和融冰冷量来实现,而为了使所构建的优化模型具有广泛的适用性,以下建模应充分计及上述有关设备运行特性和用户用电期望

的约束条件。

2.3 优化模型

根据优化用电控制策略的控制目标,以下构建一个双层优化模型。

2.3.1 经济性优化

在用户侧,以冰蓄冷空调运行费用最小为目标,式(8)给出第一层优化的目标函数。

$$\min C = \sum_{t=0}^{23} \sum_f e_t (P_{ch,t} + P_{a,t}) \Delta t \quad (8)$$

其中, e_t 为 t 时刻的电价; C 为受控蓄冷空调的总运行费用; f 为受控用户数量。

冰蓄冷空调的调控潜力受各自设备运行约束和用户用电期望的制约,应满足以下约束条件。

(1) 蓄冷时段约束。

$$Q_{x,t} \Delta t \leq W^{\max} - W_t + S_t \Delta t \quad (9)$$

其中, $W^{\max}$ 为蓄冰罐容量上限。除此以外,机组的逐时蓄冷量还受式(1)中蓄冰速率的约束。

(2) 供冷时段约束。

a. 供冷需求约束:

$$Q_{j,t} + Q_{r,t} = Q_{k,t} \quad (10)$$

其中, $Q_{k,t}$ 为系统的逐时冷负荷需求。

b. 融冰供冷量约束:

$$0 \leq Q_{r,t} \leq Q_{k,t} \quad (11)$$

$$Q_{r,t} \Delta t \leq W_t - S_t \Delta t \quad (12)$$

除上述约束外,融冰的逐时供冷量还受式(1)中融冰速率的制约。

c. 制冷机组供冷量约束:

$$0 \leq Q_{j,t} \leq \min(Q_j^{\max}, Q_{k,t}) \quad (13)$$

$$\begin{cases} Q_{j,t} = 0 & \text{制冷机组关闭} \\ Q_{j,t} \geq Q_j^{\max} m & \text{制冷机组开启} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $Q_j^{\max}$ 为制冷机组逐时最大供冷量。为避免机组低载运行^[15],式(14)设置了最低负载率 m ,从而以停运机组或削减融冰供冷量调节机组出力。

2.3.2 平滑性优化

在电网侧,为避免经济性优化在引导空调系统用电量由高电价时段向低电价时段转移的过程中,由于多受控用户动作的一致性而可能引起的新峰谷趋势恶化等不利影响。以下以平滑电网负荷曲线、减小蓄冷空调接入电网后的负荷波动为目标,引入波动平缓因子^[22-23] P_D ,通过式(15)给出的第二层优化模型重新调整各用户的冷量分配。

$$\min F = \frac{1}{T} \sum_{t=t_s}^{t_e} \left[\sum_f (P_{M,t} + P_{ch,t} + P_{a,t}) - P_D \right]^2 \quad (15)$$

$$P_D = \sum_{t=t_s}^{t_e} \sum_f (P_{M,t} + P_{ch,t} + P_{a,t}) / T \quad (16)$$

其中, t_s 、 t_e 分别为待优化时段的起始、终止时间; T 为优化时段总数; $P_{M,t}$ 为不计冰蓄冷空调用电时的电网负荷。

用户经济用电是引导其参与电网协同优化的重要保证。以下考虑将第一层优化模型求解得到的最低运行费用 $C^{\min}$ 作为用户用电的经济性约束, 表示在式(17)中。

$$\sum_{t=0}^{23} \sum_f e_t (P_{ch,t} + P_{a,t}) \Delta t = C^{\min} \quad (17)$$

其余蓄冷和供冷时段的约束设定与第一层优化模型相同, 这里不再阐述。

3 仿真算例

选取含有冰蓄冷空调用户的区域电网作为算例, 通过 FLVPP 的建立统一控制其中的冰蓄冷柔性负荷类资源。FLVPP 感知到的电网日负荷曲线如图 3 所示, 分时电价数据见表 1。以下以 3 个冰蓄冷空调用户接受 FLVPP 调控为例进行分析, 其主要参数表示在表 2 中, 根据蓄冷设备的实际融冰特性, 选取 13% 作为尖峰融冰速率计算各用户的逐时最大融冰供冷量。

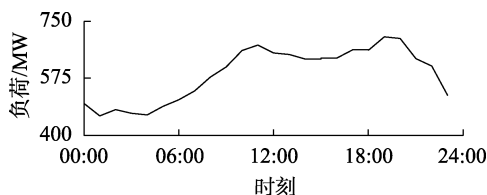


图 3 日负荷曲线

Fig. 3 Daily load curve

表 1 分时电价

Table 1 TOU price

时段	电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]
峰时段 10:00—14:00, 18:00—22:00	1.228 2
平时段 07:00—10:00, 14:00—18:00, 22:00—23:00	0.849 5
谷时段 23:00 至次日 07:00	0.351 8

表 2 蓄冷用户参数

Table 2 Parameters of cold storage users

蓄冷 空调	机组 数量/ 台	总蓄 冷量/ (kW·h)	机组功率/kW		冷负荷/kW		供冷 时段
			蓄冷	供冷	蓄冷	供冷	
用户 1	3	29 112	341	341	1 213	1 758	09:00— 17:00
用户 2	2	24 144	441	449	1 509	2 218	08:00— 18:00
用户 3	2	24 880	410	410	1 530	2 061	07:00— 22:00

根据实际供冷经验, 全年供冷时段内存在以典型设计日冷负荷为基础的 100%、75%、50% 和 25% 这 4 种冷负荷需求状态^[24]。以 25% 和 75% 冷负荷

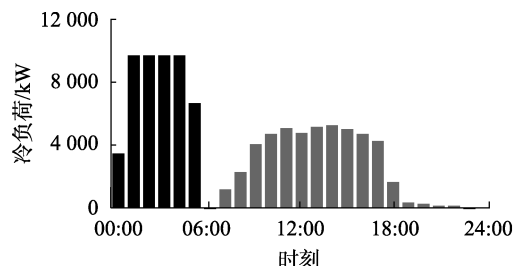
需求为例, 分析冰蓄冷空调在供冷需求较低和较高时的控制特性, 另外 2 种需求下的调控与 75% 时相似, 这里不再详细分析。

图 4 给出冰蓄冷空调在 FLVPP 优化控制下的冷量分配, 由图可见:

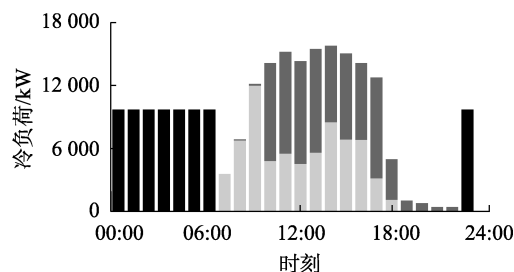
a. 冷负荷需求较低时, 系统冷量由融冰完全承担, 此时空调系统的冰量未达蓄冰罐容量上限, 调控潜力主要体现在蓄冷时段蓄冰量的灵活分配上;

b. 随着冷负荷需求的增加, 系统冷量由蓄冷设备和制冷机组共同承担, 此时空调系统在夜间全力蓄冰, 调控潜力主要体现在供冷时段融冰量的灵活分配上;

c. 空调系统在各受控时段的调度潜力一方面受设备实际状态和运行约束的影响, 随蓄冷和供冷冷量向限值的逼近而下降, 另一方面受用户供冷期望的影响, 在不同冷负荷需求下显示出较为明显的差异性。



(a) 25% 冷负荷需求



(b) 75% 冷负荷需求

■ 机组供冷, ■ 融冰供冷, ■ 蓄冷

图 4 优化用电控制策略下的冷量分配

Fig. 4 Cooling capacity allocation under optimal control strategy for power consumption

图 5 对比了冰蓄冷空调优化用电控制策略的两层优化结果。空调的蓄冷行为均集中于谷值电价时段, 且优先于峰值电价时段融冰供冷。第二层的平滑性优化, 通过跟踪电网负荷曲线的波动, 实现了图中非重叠部分所示的用电量转移, 在 25% 和 75% 冷负荷需求下对应削减了第一层优化后蓄冷和供冷时段 9.25% 和 2.76% 的曲线方差。

图 6 对比了冰蓄冷空调在主机优先和优化用电控制策略下的用电行为。结合表 3 数据, 可分析用户接受 FLVPP 调控前后的用电经济性和负荷平滑效果。

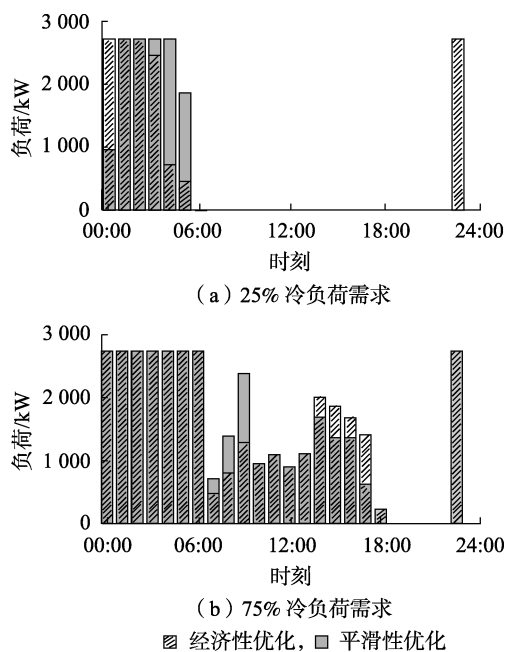


图 5 两层优化下空调系统的用电行为

Fig.5 Power consumption behavior of air conditioning with two-level optimization

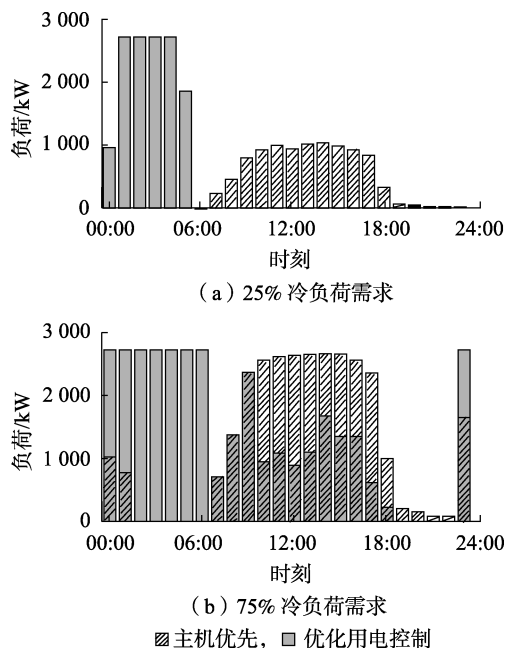


图 6 优化前、后空调系统的用电行为

Fig.6 Power consumption behavior of air conditioning before and after optimization

a. 优化用电控制策略下的空调系统蓄冰利用率高,蓄冰和融冰行为受分时电价价格差的引导,对应 25% 和 75% 冷负荷需求,分别削减了用户主机优先控制策略下 51% 和 26% 的运行费用。

b. FLVPP 控制下,用户将白天的用电需求转移至夜间,对应 25% 和 75% 冷负荷需求,增加的冷负荷转移量分别达到了 49 014 kW·h 和 65 433 kW·h。如图中非重叠部分所示,优化用电控制策略显示出良好的削峰填谷效果。

表 3 不同控制策略的结果对比

Table 3 Results comparison between different control strategies

参数	主机优先		优化用电	
	25% 冷负荷需求	75% 冷负荷需求	25% 冷负荷需求	75% 冷负荷需求
用户支出/元	9 902.5	28 418	4 830.5	20 927
峰谷差/MW	242.5	242.2	239.8	239.8
避峰负荷/(MW·h)	—	—	7.361	7.673
供冷时段方差	2.204×10^8	2.350×10^8	2.151×10^8	2.254×10^8
蓄冷时段方差	4.592×10^8	4.728×10^8	4.138×10^8	4.593×10^8
蓄冰利用率/%	0	15.83	63.05	100

c. 对比 FLVPP 感知到的日负荷曲线波动,25% 冷负荷需求下,用户减少了 00:00、23:00 的蓄冷量;75% 冷负荷需求下,用户将 07:00—09:00 的融冰量分配至其余时段供冷,上述调节行为相较于主机优先控制策略对应削减了蓄冷和供冷时段曲线方差的 9.88% 和 4.08%,由此证明了优化用电控制策略具有一定的曲线平滑作用。

综上所述,本文所提的优化用电控制策略具有在保障各独立受控用户用电舒适性和经济性需求的基础上,聚合调控该类资源削峰填谷、平滑电网负荷曲线的可行性和有效性,可在 FLVPP 内的众多冰蓄冷空调用户间推广应用。

4 结论

为聚合调控柔性负荷参与电网的互动和协调平衡,本文首先提出了 FLVPP,在介绍其控制架构和控制模式的基础上,以冰蓄冷空调作为研究对象,给出了一种 FLVPP 场景下的优化用电控制策略,构建了提高用户用电经济性并计及电网供需关系的双层优化模型。经仿真算例验证:冰蓄冷空调的柔性调控潜力与设备自身物理特性、用户用电意愿及外界环境等因素密切相关;本文所提的优化用电控制策略,实现了空调蓄冷和供冷冷量的个性化控制及精细化分配。其聚合调控有效削减了设备运行费用,起到了明显的削峰填谷效果,并通过对电网运行状态的跟踪,减小了用户接入系统后的负荷波动;相较于传统控制方式,FLVPP 在提高冰蓄冷空调用电科学性、控制该类资源参与电网协同优化方面具有可行性。

FLVPP 是一新生事物,其必须建立适宜的市场运行机制和个性化、精细化的优化调控技术才可能成功。进一步的研究应围绕多类负荷的协同控制展开,通过 FLVPP 运营机制的完善,引导或直接控制需求侧资源以经济、智能、友好的调控特性常态化地纳入电力系统运行管理,提供可调“发电量”及多种形式的辅助服务,从而在“源-网-荷”的良性互动下,实现资源的优化配置和能源的高效利用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 卫志农,余爽,孙国强,等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):1-9.
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [3] 陈春武,李娜,钟朋园,等. 虚拟电厂发展的国际经验及启示[J]. 电网技术,2013,37(8):2258-2263.
CHEN Chunwu, LI Na, ZHONG Pengyuan, et al. Review of virtual power plant technology abroad and enlightenment to China[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2258-2263.
- [4] Twenties project[EB/OL]. (2013-03-10)[2017-03-02]. <http://www.twenties-project.eu/>.
- [5] WILLE-HAUSSMANN B, ERGE T, WITTEW C. Decentralised optimisation of cogeneration in virtual power plants[J]. Solar Energy, 2009, 84(4):604-611.
- [6] Project interim report[R/OL]. (2013-02-20)[2017-03-02]. <http://www.web2energy.com/>.
- [7] 夏榆杭,刘俊勇. 基于分布式发电的虚拟发电厂研究综述[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):100-106,115.
XIA Yuhang, LIU Junyong. Review of virtual power plant based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 100-106, 115.
- [8] 方燕琼,艾芊,范松丽. 虚拟电厂研究综述[J]. 供用电,2016,33(4):8-13.
FANG Yanqiong, AI Qian, FAN Songli. A review on virtual power plant[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(4): 8-13.
- [9] 黎灿兵,尚金成,朱守真,等. 气温影响空调负荷的累积效应导致能耗的分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(20):30-33.
LI Canbing, SHANG Jincheng, ZHU Shouzheng, et al. An analysis of energy consumption caused by air temperature affected accumulative effect of the air conditioning load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 30-33.
- [10] 2016—2022年中国冰蓄冷中央空调市场研究及未来前景预测报告[R/OL]. [2017-03-02]. <http://www.chyxx.com/research/201607/429028.html>.
- [11] 张永栓. 国内外蓄冷技术的现状与展望[C]//中国制冷空调工程节能应用新技术研讨会论文集. [出版地不详]:中国制冷空调工业协会制冷空调工程工作委员会,天津市制冷学会,2006:25-30.
- [12] 徐伟,孙宗宇,李骥,等. 中国蓄冷空调工程应用调查分析研究(2011—2015)[J]. 暖通空调,2016,46(7):75-80.
XU Wei, SUN Zongyu, LI Ji, et al. China cool storage air conditioning engineering application status(2011-2015)[J]. Heating Ventilation & Air Conditioning, 2016, 46(7): 75-80.
- [13] 刘恩海,赵坤正,刘圣勇,等. 基于动态负荷跟踪的水蓄冷空调系统节能研究[J]. 热科学与技术,2016,15(3):215-219.
LIU Enhai, ZHAO Kunzheng, LIU Shengyong, et al. Study on energy saving of chilled water storage air-conditioning system based on dynamic load tracking[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2016, 15(3): 215-219.
- [14] 闫华光,石坤,许高杰,等. 动态冰蓄冷系统的经济最优控制策略研究[J]. 控制工程,2016,23(2):303-308.
YAN Huagang, SHI Kun, XU Gaojie, et al. Research on control strategy of dynamic ice storage system based on economic optimization[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(2): 303-308.
- [15] 王修岩,高冲,李宗帅. 冰蓄冷空调系统的多目标优化控制策略研究[J]. 计算机测量与控制,2015,23(12):4057-4059.
WANG Xiuyan, GAO Chong, LI Zongshuai. Multi objective optimization control strategy research for ice storage air conditioning system[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(12): 4057-4059.
- [16] 徐青山,杨辰星,颜庆国. 计及规模化空调热平衡惯性的电力负荷日前削峰策略[J]. 电网技术,2016,40(1):156-163.
XU Qingshan, YANG Chenxing, YAN Qingguo. Strategy of day ahead power peak load shedding considering thermal equilibrium inertia of large-scale air conditioning loads[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 156-163.
- [17] VALERO S, ORTIZ M, SENABRE C, et al. Methods for custom response policies selection in new electricity markets[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(2):104-110.
- [18] 高赐威,李倩玉,李慧星,等. 基于负荷聚合商业务的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):78-86.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [19] 王珂,姚建国,姚良忠,等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):127-135.
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 127-135.
- [20] ZHANG Mingzhi, GU Yundong. Optimization of ice-storage air conditioning system with ASAGA[C]//Advanced Research and Technology in Industry Applications. [S.l.]:IEEE,2014:1042-1046.
- [21] 国家发展改革委经济运行调节局. 电蓄冷蓄热技术及技术经济评估[M]. 北京:中国电力出版社,2013:50-51.
- [22] SORTOMME E, HINDI M M, MACPHERSON S D J, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1):198-205.
- [23] 杨玉青,牛利勇,田立亭,等. 考虑负荷优化控制的区域配电网储能配置[J]. 电网技术,2015,39(4):1019-1025.
YANG Yuqing, NIU Liyong, TIAN Liting, et al. Configuration of energy storage devices in regional distribution network considering optimal load control[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1019-1025.
- [24] 陈志辉. 冰蓄冷空调系统的优化控制[D]. 太原:太原理工大学,2008.
CHEN Zhihui. Optimization control of ice storage air condition system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.

作者简介:



米增强

米增强(1960—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为需求侧管理、新能源电力系统与智能电网等(E-mail:mizengqiang@sina.com);

张文彦(1992—),女,山西太原人,硕士研究生,主要研究方向为需求侧管理、虚拟电厂、系统调度运行等(E-mail:mrxrlzwy@

163.com);

贾雨龙(1989—),男,山西晋中人,博士研究生,主要研究方向为虚拟电厂以及多能源系统的优化调度等(E-mail:jiayulong1110@126.com)。

(下转第27页 continued on page 27)

248,319.

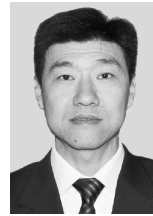
ZHU Chao, MEI Jun, WANG Chunfeng, et al. FIR filter with reduced group delay based a sampling frequency conversion algorithm for differential protection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 241-248, 319.

- [15] 陆金凤, 陆于平, 张冲. 神经网络法设计的差动保护重采样低通滤波器[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 102-106.

LU Jinfeng, LU Yuping, ZHANG Chong. A re-sampling low-pass filter for differential protection designed with artificial neural network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 102-106.

- [16] 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 219.

作者简介:



刘益青

刘益青(1977—),男,山东潍坊人,副教授,高级工程师,博士,通信作者,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: cse_liuyq@ujn.edu.cn);

高伟聪(1977—),女,河北石家庄人,副教授,硕士,研究方向为嵌入式技术在电力系统中的应用;

魏欣(1980—),男,山东济宁人,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护。

Design of short-window low-pass filter considering group delay and transient delay

LIU Yiqing¹, GAO Weicong², WEI Xin³, WANG Xiuguang³

(1. School of Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. Shandong Vocational College of Foreign Affairs Translation, School of Information Engineering, Weihai 264504, China;

3. Integrated Electronic Systems Lab Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: The digital relays in smart substations need the assistance of low-pass digital filters in order to adopt fast algorithms based on sampling values and sine signal models and avoid the frequency aliasing during resampling. A design method of low-pass filter based on Tukey-window function is proposed, which simultaneously considers the amplitude-frequency characteristic, group delay and transient delay. Firstly, the time-domain width T_c and cutoff frequency f_c of window function are determined, then the filter length N is determined to be less than or equal to $2f_s/f_c$ according to the sampling frequency f_s and the fixed f_c , finally the complete filter coefficients can be obtained by N and f_c . The amplitude-frequency characteristics, group delay and transient delay of the designed filter are studied through theoretical analysis, digital simulation and static experiment. The RTDS experiment of a busbar protection adopting the designed filter shows that the designed filter is obviously superior to the filter designed by the traditional window function method in the aspects of group delay and transient delay, and the designed filters can effectively reduce the influence of filters on the speed of protection.

Key words: smart substation; Tukey-window function; low-pass digital filter; group delay; transient delay

(上接第 20 页 continued from page 20)

Optimal control strategy of ice storage air conditioning under flexible load virtual power plant

MI Zengqiang, ZHANG Wenyan, JIA Yulong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In the process of building a safe, stable, economical and low-carbon smart grid, it has attracted high attention to use the flexible loads for active participating in the coordinated control of power grid. In order to exploit and utilize the regulation potential of flexible loads, a framework of virtual power plant specially designed for flexible loads is proposed. The ice storage air conditioning is selected as a typical controlled object, and an optimal control strategy of power consumption is proposed, which gives priority to users' experience and economy, and considers the supply and demand relation of power grid. A two-layer optimal model is built according to the actual operation characteristics of air conditioning system and user expectation of power consumption, which takes the minimum operation cost and optimal load fluctuation as its objectives. The control of ice storage air conditioning under different cold load requirements is simulated and compared by cases, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: flexible load; virtual power plant; ice storage air conditioning; control strategy