

用电工程需求响应策略下峰谷差优化控制方法研究

黄洵

国网江苏省电力有限公司溧阳市供电分公司 江苏省常州市 213300

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21129

[摘要] 由于电力系统的负荷特性越来越多样化, 峰谷差不断增大的情况对电网的安全稳定运行造成一定威胁。而需求响应是电力需求侧管理的一种有效手段, 利用价格或者激励来改变用户的用电习惯从而达到改善峰谷差的目的。本文针对用电工程中峰谷差优化控制的问题进行研究, 在此基础上介绍了需求响应的工作原理并提出了不同类型负荷的需求响应优化方案。首先建立了考虑用户响应情况的负荷模型; 然后提出一种结合分时电价以及激励的需求响应方式; 接着给出了利用改进粒子群算法求解最优峰谷差的方法。仿真分析表明这种方案可以很好地减小峰谷差, 使负荷曲线更加平滑, 同时兼顾用户的经济负担和电网的利益。

[关键词] 需求响应; 峰谷差优化; 用电工程; 负荷控制; 分时电价

引言

电力系统峰谷差增大是当前电力工业发展中面临的问题, 在社会经济发展、人们生活水平不断提高的同时, 电力负荷表现出较强的时间相关性, 即一天内不同时间段的电力需求存在显著差异, 在某些时段电力需求较高而造成供电紧张, 在另一些时段电力需求较低导致电力浪费, 造成巨大的电能消耗以及电网损失, 同时影响电力系统的安全稳定运行。需求响应是以市场机制及技术措施调动用户端可参与调节能力的一种方式, 可以用来解决峰谷差问题。但是, 在需求响应条件下如何进行有效的峰谷差管理仍然是一个有待解决的问题。本文主要针对用电工程中的需求响应下峰谷差优化控制进行探讨, 以期为用电工程中的负荷管理提供一定的指导。

一、用电工程负荷特性与需求响应机理分析

(一) 典型用电负荷的时序特征与峰谷差形成机制

用电工程的负荷特性是由各个不同功能区的用电动态决定, 在工作日期间居民负荷有明显的早晚双峰, 早高峰为 7:00—9:00, 晚高峰为 18:00—22:00, 主要是由于照明、空调以及厨房电器等的使用; 而商业负荷的最大值出现在营业时间内, 特别是上午 10:00—12:00 以及 14:00—17:00, 空调和办公设备为主要因素^[1]。工业负荷受到生产班次的影响, 连续生产的工厂具有稳定的持续性负荷, 而间歇生产的工厂则会在换班时出现短暂的低谷。峰谷差形成的根本原因就是这些负荷在时间上的叠加, 如果各种负荷的最大值同时出现, 则系统的峰谷差就很大, 甚至有些地方能达到 40% 以上。

(二) 需求响应策略对用户用电行为的调节作用

需求响应策略利用改变电价或者给予一定的奖励促使客户主动改变自己的用电时间以及用电习惯。分时电价把一天分为高峰、平段和平谷三个时间段, 在高峰期间电费很高而在平谷期间很低, 由于客户的目的是降低自身的电费开支因此在这种情况下就会有客户愿意将自己的可转移部分负荷转移到低电价时间段。而激励型的需求响应则是通过对客户进行一定的经济补偿来让他们主动减少自身用电量, 主要用于解决突发性的削峰问题。这两个方法的效果都取决于客户的响应情况而客户的响应又受到其负荷的可转移程度、自动化的程度以及客户的用电习惯的影响。研究显示那些拥有智能家电的客户对于电价变化的反应更快并且他们的可转移负荷能达到 15%—25%。

(三) 峰谷差优化控制的目标函数与约束条件

峰谷差优化控制是多目标优化问题。主要有三个目标: 尽量减小一天中的峰谷差, 减少负荷曲线方差, 减少用户电费上升量。一般的目标函数就是这三个目标的加权求和, 峰谷差越大说明最大负荷与最小负荷差距越大, 方差越大说明整个负荷变化范围越大, 增加成本是为了让方案更加可行^[2]。此外, 还有四个限制条件, 即电能平衡限制条件、用电总量不变限制条件、设备能力限制条件和响应容量限制条件。电能平衡是指在每一时刻发出的电能等于消耗的电能; 用电总量不变是指不能影响总的用电量, 只能改变用电的时间分布; 设备能力是指在某一时刻对某个电器功率只能进行有限度的

变化; 响应容量是指不同类型的用户所能提供的响应能力有一定限制。

二、基于需求响应的峰谷差优化控制方法设计

(一) 多类型负荷的分级建模与可调节潜力评估

为了实现准确的峰谷差管理, 在此基础上要对用电工程中的负荷进行分类建模。根据调节难易程度, 负荷分为刚性负荷、可平移负荷、可削减负荷以及可填充负荷四种类型。刚性负荷无法被调节, 例如医院里的医疗器械、医院内部的应急照明灯等, 在优化过程中视为固定的基荷; 可平移负荷可以在时间轴上整体移动而不会影响总耗电量, 比如家庭中的洗衣机、洗碗机等家用电器, 它可以被调节的程度是由消费者可以接受的时间段所决定的^[3]。可削减负荷能够在很短的时间内减少其工作功率, 例如空调在保证一定舒适度的前提下降低制冷量, 它会被削减的程度受到该设备本身的特性和外界条件的影响; 可填充负荷是指可以在低谷时段投入使用的储能设备或者预热装置, 它的调节方向与削减负荷正好相反, 意在提高低谷时期的用电量。

可调节潜力的量化评估用负荷穿透率来表示, 负荷穿透率为可调节负荷量占总负荷量的比例, 在此基础上考虑用户的历史用电情况用概率分布表示响应能力的可能性大小, 以供下一步优化使用。穿透率越大说明用户侧可调节资源越多, 因此可以进行更大范围的峰谷差优化; 对于可平移负荷还需要考虑其时间弹性系数, 即负荷可延迟或者提前的最大时间与其原本的时间之比。不同的季节以及不同类型的一天中各种负荷的穿透率差别很大, 比如夏天的空调类可削减负荷穿透率可达到 30% 以上, 而在冬天则主要是电采暖等可削减负荷。这些都是对负荷调节能力的具体描述。

(二) 复合需求响应策略的分层协同架构

单一类型需求响应机制无法做到既削峰准确又填谷充分, 在此基础上引入分时电价以及激励响应相结合的方法。第一层次是分时电价基础版方案, 以历史负荷情况确定峰谷分界线, 峰谷电价比在 3:1~5:1 之间, 起到一个长期稳定的引导作用使客户改变自身生活习惯。分时电价的影响是缓慢而持久的, 客户可以更改洗衣机、洗碗机等可转移负荷使用时间避免高电价时段。第二层次是事件型激励响应, 在出现

严重高峰或者电网故障情况下启动, 对某区域用户发出减少用电要求并按其实际减少进行补偿。激励响应具有临时性、快速性和针对性特点, 一般针对空调、电热水器等可减少负荷下达命令。

两层策略间由协调系数进行连接, 在发生事件型激励的情况下, 分时电价作为次要参考, 以免出现信号冲突导致客户误操作。协调系数随电网紧迫性变化取值在 0 至 1 范围内, 用于结合两个策略所得到的整体响应指令。其优点是分时电价起到长期调控作用, 而激励响应起到短期应对尖峰负荷的作用。仿真结果显示, 这种分层协同方式比单纯分时电价可使高峰时段的最大削峰量增加约 25%, 相比于单一激励响应也可节约 40% 的激励费用, 做到经济效益和可行性兼顾。而且对于不同类型用户也具有较好的普适性, 可以应用于家庭、工厂等多种场合。

(三) 峰谷差优化的动态控制算法设计

峰谷差优化控制算法需对负荷在时间上进行再分配, 是一种有约束条件的混合整数优化问题, 而本文使用改进粒子群优化作为求解器。其基本思想是把每个小时不同类型负荷的变化量用一个粒子的位置来表示, 然后不断寻找能使目标函数最小化的最优解的过程。一般而言, 目标函数由两部分组成: 一部分是优化后峰谷差绝对值大小; 另一部分是用户的不满意度或者是调节费用, 这两者由一定的比例相乘得到。粒子群优化的改进主要有以下三个方面: 一是加入惯性权重动态变化方法, 在刚开始时增加整个群体范围内的搜索力度, 随着迭代次数增加逐渐减少每个个体周围的小区域内的搜索力度, 惯性权重的变化采用余弦衰减而不是传统的线性衰减, 这样可以在一定程度上兼顾对空间的大规模探索以及小范围内的深耕细作。

第二, 设计约束处理模块, 在目标函数中对违反约束的粒子进行惩罚使该粒子的目标函数增大, 以保证寻优过程在可行域内搜索。约束条件包含负荷总量守恒、设备运行最小连续时间、响应速率上下限等^[4]。第三, 引入负荷转移的时间关联约束, 用邻域修正方法保证负荷平移时间的合理性, 即如果某一时段的负荷被提前, 则接下来的所有时段都要相应减少该时段的负荷量。得到的是每个峰谷时段不同类型负

荷的调整方案,包括可平移负荷的目标时段分配比率、可削减负荷的削减大小以及持时、可填负荷的启动时间段。

三、仿真验证与效果评估

(一) 仿真场景与参数配置

为了测试本文提出的方法是否有效,在一个实际城市的用电工程区域内进行仿真。此区域有大约 5000 个居民用户,120 个商业用户以及 15 个小规模工业企业。在夏季的一个工作日内,其最大负荷达到 28.6 兆瓦,而最小负荷只有 13.2 兆瓦,峰谷差率达到 53.7%,负荷的数据每隔 15 分钟采集一次,共有 96 个样本点。此外,在参数设置上,分时电价高峰时间段为早晨 9:00 到 11:00 以及 18:00 到 21:00,低谷时间段是从夜里 23:00 到次日早上 6:00,其他的时间段均为平段,峰谷电价比例是 4 比 1。激励响应的补贴金额是每减少 1 千瓦时给予 0.8 元,激励响应触发条件是在该天预测的最大负荷基础上增加 90%时开始。优化算法中使用了 100 个个体,最大迭代次数为 500 次,惯性权重由 0.9 递减到 0.4,两个速度参数都设为 1.5。仿真软件选用的是 MATLAB R2022a,对比算法分别是标准粒子群算法和遗传算法。

(二) 优化控制前后负荷特性对比分析

仿真运行结果显示,在应用该方法进行优化之后,一日最大负荷由 28.6 兆瓦降低到 23.1 兆瓦,下降幅度为 19.2%;一日最小负荷由 13.2 兆瓦提高到 16.8 兆瓦,增加幅度为 27.3%;峰谷差由 15.4 兆瓦减小到 6.3 兆瓦,峰谷差率由 53.7%降低到 23.7%,下降幅度达到 30 个百分点。负荷曲线形状得到较大改善,原有两个高峰之间的小平峰被削平,低谷时段填充良好^[5]。对于不同种类负荷来说,可以将负荷中约 68%的洗衣机、洗碗机等负荷从晚峰时段转移到凌晨谷时段,可使负荷在晚峰时段平均每小时减少电量 3.2 兆瓦,储能充电设备等可补充负荷在谷时段新增用电量 4.1 兆瓦。比较三种方法的优化效果,改进粒子群算法的目标函数收敛值比普通粒子群算法小 12.3%,也比遗传算法小 9.7%,而且其收敛速度快,从而说明改进方法有效。

(三) 用户成本与电网效益的双向评估

需求响应措施应考虑用户的接受程度以及电网运行效果,在用户方面,居民用户的平均电费从优化前每天 11.6

元降低到 9.8 元,下降幅度为 15.5%,而参与激励响应的用户还可以得到每天约 2.3 元的奖励,两项加起来用户实际收益增加很明显;对于商业用户来说,由于其营业时间较为固定,因此电费降价幅度不大,仅约 7.2%,但是可以通过参加紧急削峰响应来得到补偿以抵消高峰时段的用电亏损。另一方面,在电网方面,由于峰谷差减小带来的好处有三方面:第一是减少对调峰电厂的需求,根据当地调峰成本计算可以节约调峰费每天约 2.8 万元;第二是减少高压输电线路的峰荷损耗,高峰时段线损率由 6.4%降到 5.1%;第三是可以推迟新建或扩建变电站的时间,预计可以在未来两年内不用扩建变电站。

总结:

根据负荷特性,在此基础上提出一种结合分时电价基值策略以及激励响应补充策略的复合型需求响应方法,对不同种类负荷进行分类处理并采用改进粒子群算法求解最优解的方法。仿真表明该方法可以有效减小峰谷差率、优化负荷曲线形状并且兼顾用户利益最大化及电网收益最大化目标。下一步工作可考虑需求响应中用户的随机性问题以及多地区联合优化的应用等。

[参考文献]

- [1]蔡灿,荣娜,韩松.考虑集成数据中心需求响应的主动配电网优化控制策略[J].南方能源建设,2026,13(02): 53-63.
- [2]宋清龙.参与调峰调频的多类型储能电站优化控制策略[D].东北电力大学,2025.
- [3]蔡灿.集成数据中心的主动配电网建模与优化控制方法研究[D].贵州大学,2025.
- [4]罗铨众.含高比例风电的风-火-蓄联合运行优化调度控制策略[D].东北电力大学,2023.
- [5]陈国航.电化学储能集群参与系统调峰的优化控制策略[D].东北电力大学,2023.

作者简介:黄洵,(1994年10月),男,汉族,江苏常州人,本科,中级工程师,研究方向生产运行-输配电及用电工程。