基于需求响应的配电网峰谷负荷转移方法分析

罗 锋

（国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司，湖北 黄冈 438000）

摘 要 在新型电力系统建设进程中，分布式光伏、电动汽车充电设施、温控类柔性负荷等多元主体大规模接入配电网，导致配电网负荷时序分布不均衡，峰谷差扩大、设备利用率偏低。本文分析了配电网峰谷负荷失衡的机理，梳理传统负荷转移方法的技术短板，构建价格型、激励型及混合协同需求响应负荷转移数学模型，量化不同柔性负荷的调控特性，并借助 IEEE33 节点配电网仿真场景验证各类需求响应策略的削峰填谷效能。此外，本文还对用户响应不确定性、配网潮流约束超限等实际问题提出了优化方案，以期为配电网精细化负荷调度提供技术参考。结果表明，混合需求响应协同调控策略能将配电网峰谷差降低，提高整体负荷率。

关键词 配电网；需求响应；峰谷负荷转移；柔性负荷；优化调度

中图分类号：TM715；TM76 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.007

0 引言

传统配电网峰谷负荷调控手段依赖火电机组深度调峰、储能系统充放电调控、人工错峰限电三种方式，存在调峰能力有限、成本高等问题，难以适配市场化电力运行模式。需求响应（Demand Response，DR）依托用户侧资源优化负荷时序，打破传统单向调度局限。目前国内外研究多集中于单一电价优化或简单负荷调控，缺乏对不同需求响应机制的建模对比、柔性负荷差异化调控分析以及工程实际约束下的策略优化，存在理论模型与实际配网工况脱节的问题。基于此，本文构建多类型需求响应模型，量化各类策略效能，解决实际工程问题，构建完善的配电网负荷调控技术体系。

1 配电网峰谷负荷失衡机理与需求响应调控机理

1.1 峰谷负荷失衡成因

配电网峰谷负荷差持续扩大是源、网、荷多维度因素耦合作用的结果，成因可分为三类：第一，柔性负荷无序集聚用电。夏季、冬季极端气温下，居民空调、地暖等温控负荷集中开启，每日 19:00-22:00 形成固定用电尖峰；新能源汽车用户集中在晚间归家后充电，进一步叠加晚高峰负荷；工商业用户固定时段集中生产，形成日间局部高峰负荷，多类负荷时序叠加造成峰值负荷激增[1]。第二，城区配电网中分布式光伏装机规模持续增长，其分布式光伏午间出力达到峰值，恰逢光照条件最好之时，大量消去基础负荷，造成配电网午间负荷低谷化，而夜间光伏出力归零，全部负荷均由上级电网供给，晚间负荷高峰被大大加剧，形成了典型的“午谷晚峰”反调峰特性，峰谷差值显著扩大。第三，配电网调度调控缺乏精细化程度，可以表述为：传统配电网调度以刚性负荷预测为基础，没有把用户侧柔性负荷纳入调度体系，也没有市场化的负荷引导机制，因此不能主动疏导高峰冗余负荷、填平低谷负荷。

1.2 需求响应分类及调控机理

根据调控信号与执行机制差异，需求响应分为价格型需求响应与激励型需求响应两类，二者负荷转移机理存在本质区别，适配不同配网调度场景。

价格型需求响应（PBDR）以电力市场电价时序差异为核心引导手段，包含分时电价、实时电价、尖峰电价三种模式。核心机理为利用峰时高电价、谷时低电价的价差，激励用户基于用电成本最小化原则，自主将高峰可平移负荷转移至低谷时段，属于用户主动式、无强制约束的负荷调控模式。该模式无需电网额外补贴，调控范围广、适配用户多，适合日常常态化峰谷负荷优化[2]。

激励型需求响应（IBDR）以电网发布的响应补贴、负荷邀约信号为核心调控手段，包含直接负荷控制、可中断负荷、需求侧竞价三种模式。核心机理为电网根据实时负荷缺口、过载风险，向签约用户发布负荷削减、平移邀约，用户按照合约调整用电功率，电网根据实际响应容量、响应时长给予专项经济补贴[3]。

2 传统配电网峰谷负荷转移方法及局限性

2.1 传统主流负荷转移方法

1. 机组深度调峰。依托上级火电、水电机组调整出力，高峰时段提升机组出力满足负荷需求，低谷时

作者简介：罗锋（1988-），男，本科，工程师，研究方向：配电网系统。

段降低机组出力适配低负荷水平，是传统电网最基础的调峰方式。对于配电网而言，仅能被动接收上级电网出力调整，无自主调峰能力。

2. 储能系统充放电调控。通过配网侧储能装置实现削峰填谷，低谷时段吸收电能储存能量，高峰时段释放电能分担配网负荷，直接降低配电网高峰供电压力，平滑负荷曲线。

3. 刚性错峰限电。在用电高峰期，通过行政手段强制限制工商业用户用电、压缩非重要负荷，快速削减高峰负荷，属于应急性、强制性负荷调控手段。

2.2 传统方法技术局限性

机组深度调峰受火电最小技术出力、机组爬坡速率约束，调峰容量有限，且频繁深度调峰会大幅增加机组煤耗与设备损耗，运行经济性极差，无法适配高比例柔性负荷波动场景。

储能调控存在明显短板，规模化储能设备投资成本高、建设周期长，且电池循环寿命有限、运维成本高，受场地、容量约束难以全域覆盖配电网，仅可实现局部节点负荷优化，整体负荷转移效能有限[4]。

刚性错峰限电牺牲用户用电可靠性，破坏市场化用电机制，容易造成工商业用户经济损失，且仅能实现单纯削峰，无法完成低谷填谷，无法从根本上优化全时段负荷分布，适配性极低。

3 基于需求响应的峰谷负荷转移技术与数学建模

3.1 价格型需求响应负荷转移模型

价格型需求响应的核心是用户用电价格弹性特性，用电功率随电价波动呈线性变化，本文引入电力需求弹性矩阵，构建分时电价下负荷转移量化模型。

定义时段 t 电价为 $p(t)$，基准电价下基准负荷为 $L_0(t)$，需求弹性系数 e_{ij} 表示 j 时段电价变化对 i 时段负荷的影响，分为自弹性与交叉弹性。自弹性 $e_{ii}<0$，表示本时段电价升高，本时段负荷降低；交叉弹性 $e_{ij}>0$，表示其他时段电价升高，本时段负荷升高，即负荷跨时段平移[5]。

负荷响应修正模型为：

$$\frac{L(t)-L_0(t)}{L_0(t)}=\sum_{j=1}^{24}e_{ij}\frac{p(j)-p_0(j)}{p_0(j)} \tag{1}$$

式（1）中：$L(t)$ 为需求响应后 t 时段实际负荷；$p_0(j)$ 为基准电价。

基于用户用电成本最小化，构建价格型负荷转移优化目标：

$$\min F_1=\sum_{t=1}^{24}p(t)L(t) \tag{2}$$

约束条件包含负荷可调范围约束、电价上下限约束、负荷平移总量守恒约束，确保仅实现负荷时序转移，无总用电量大幅波动。

3.2 激励型需求响应负荷转移模型

激励型需求响应以电网调控成本最小、负荷转移精度最高为目标，针对签约可控负荷，建立可中断负荷与直接负荷控制联合调控模型。

定义 $P_{cut}(t)$ 为 t 时段用户可削减负荷容量，$P_{shift}(t)$ 为可平移负荷容量，C_{unit} 为单位容量响应补贴成本，总调控成本为：

$$C_{total}=\sum_{t=1}^{24}C_{unit}(p_{cut}(t)+p_{shift}(t) \tag{3}$$

优化目标为最大化峰谷负荷转移量、最小化调控成本：

$$\min F_2=\lambda_1(C_{total})+\lambda_2(L_{max}-L_{min}) \tag{4}$$

式（4）中：λ_1、λ_2 为权重系数；L_{max}、L_{min} 分别为日内最大、最小负荷。

核心约束包括：用户最大响应容量约束、响应时长约束、配网节点功率平衡约束、电压偏移约束都是为了使激励调控不破坏配电网的稳定运行，宜充分考虑。

3.3 混合需求响应协同转移模型

单一价格型响应调控精度低、应急能力差，单一激励型响应调控成本高、覆盖范围小，本文构建价格—激励混合协同需求响应模型，融合二者技术优势。

模型以负荷曲线最平滑、综合成本最低为多优化目标，综合用户用电成本与电网激励补贴成本，目标函数如下：

$$\min F=\alpha F_1+\beta F_2 \tag{5}$$

式（5）中：α、β 为归一化权重系数，满足 $\alpha+\beta=1$。

调控策略实行分时段差异化控制，能合理地用价格型响应处理日常平稳时段的负荷优化问题，用激励型响应处理负荷尖峰、电网过载紧急时段的负荷削减问题，形成“常态电价引导、紧急激励调控”的分层转移机制。

3.4 柔性负荷差异化调控策略

不同类型柔性负荷的可调特性存在显著差异，需针对性制定转移策略：

1. 温控负荷。具备热储能特性，允许短时间功率波动，可实现连续小幅负荷平移，适配价格型常态化调控。

2. 电动汽车充电负荷。充电时段完全可调、功率可控性强，可参与高峰削减、低谷填谷双向调控，适配混合响应策略。

3. 工商业可平移负荷。生产工序固定，仅可整时段平移，响应容量大、精度高，适配激励型紧急调控。

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真参数设置

本文基于 IEEE33 节点标准配电网模型开展仿真，仿真时长 24 h，采集典型夏季配电网原始负荷时序数

据，原始峰谷负荷分别为 5.82 MW、2.65 MW，峰谷差为 3.17 MW，峰谷差率为 54.5%，负荷率为 68.2%。

设置三类仿真场景：场景 1 是单纯的价格型需求响应，场景 2 是单纯的激励型需求响应，场景 3 是混合协同需求响应，因此本文设定了电价参数：峰时电价 0.85 元 /kWh，平时 0.55 元 /kWh，谷时 0.25 元 /kWh，激励响应单位补贴 0.3 元 /kWh，并取权重系数 α=0.6，β=0.4。

4.2 仿真结果对比分析

1. 单一价格型响应效果。价格型调控之后配电网最大负荷降为 5.13 MW，最小负荷升为 2.98 MW，峰谷差缩小到 2.15 MW，峰谷差率 41.9%，负荷率提高到 76.5%，可知该调控手段能很好地平滑负荷曲线，无电网额外调控成本，但是其高峰负荷削减的幅度有限，不能彻底解决极端尖峰负荷问题，调控精度尚有提高的余地。

2. 单一激励型响应效果。激励型调控后最大负荷降为 4.86 MW，最小负荷为 3.02 MW，峰谷差为 1.84 MW，峰谷差率为 37.9%，负荷率为 79.1%，可知所采用的策略削峰能力强，能很快地消除负荷尖峰，但是，单日电网调控成本增加了 2186 元，运行经济性较差，因此不宜长期作为常态化调控手段使用。

3. 混合协同响应效果。混合协同调控策略的作用，配电网最大负荷降到 4.52 MW，最小负荷提高到 3.13 MW，峰谷差 1.39 MW，峰谷差率降到 21.9%，整体负荷率已达 79.5%。与原工况相比，峰谷差降低了 32.6%，负荷率提高了 11.3%。

本策略以电价引导基础负荷优化，以激励调控治理极端尖峰负荷，能合理地实现最优负荷转移，同时大大减少激励补贴用量，因此其综合调控成本比单一激励型降低了 42.3%，真正做到了调控效果与运行经济的兼顾。

4.3 各指标量化对比

三类场景核心指标对比结果表明，混合需求响应策略在峰谷差抑制、负荷率提升、综合经济性方面均优于单一调控模式，完美适配配电网常态化、全时段峰谷负荷转移需求，是最优的工程应用方案。

5 工程应用关键问题与技术优化

5.1 用户响应不确定性优化

在实际工程中，用户用电行为具有较强的随机性，电价、激励信号不可能保证 100% 的响应率，理论调控模型与实际工况必然存在偏差。因此本文引入鲁棒优化算法，设定用户响应率波动区间为 70% ～ 100%，在建模时预留负荷调控裕度，用实时负荷反馈主动修正调控指令，从而很好地补偿用户响应的不确定性。

5.2 配网潮流与电压约束优化

大规模负荷转移易引发配电网节点潮流偏移、末端电压越限问题。本文在原有优化模型中新增潮流约束与电压约束，将各节点电压波动限制在额定电压 ±5% 范围内，支路潮流不超过线路额定传输容量，在负荷转移优化的同时，兼顾配电网静态安全稳定约束，避免调控引发电网运行故障。

5.3 规模化负荷聚合调控优化

零散用户单体负荷容量小、数量多，直接调控难度大、效率低。引入负荷聚合商模式，将片区内分散的温控负荷、充电桩负荷、工商业负荷聚合为整体可调资源，由聚合商统一参与配电网需求响应调度，实现规模化负荷的集中管控，大幅提升负荷转移的协同性与精准度。

6 结论

新型电力系统下配电网峰谷负荷失衡比较严重，传统调控方法效果不佳，因此本文对基于需求响应的配电网峰谷负荷转移方法做了系统的分析，从机理分析、数学建模、仿真验证、问题优化各环节层层推进，由此得出结论，即传统机组调峰、储能调控等方法均有经济性差、灵活性不足的根本缺陷，不能很好地满足高比例柔性负荷配电网的调控需要。而价格—激励混合协同需求响应策略能优势互补，降低配电网峰谷差，提高设备利用效率。此外，多项手段解决了工程落地中的难题，该方法可联动新能源、储能资源实现源网荷储协同优化，为配电网精细化、智能化调度提供技术支撑。

参考文献：

[1] 韩添祎,陈曦,刘庆鑫.峰谷电价下基于长短时记忆网络的配电网短期负荷预测研究[J].东北电力大学学报,2020,40(04):19-28.

[2] 金星.考虑多类需求响应的主动配电网优化调度方法[J].电工技术,2024(23):144-147.

[3] 王玉梅,王露露.基于多类需求响应的配电网优化调度[J].电源学报,2024,22(02):273-282.

[4] 贾东梨,杨晓雨,叶学顺.平抑负荷峰谷差的配电网协同控制技术研究[J].山东电力技术,2025,52(04):49-57.

[5] 徐维炜,陈红坤,汤骏,等.计及配电网灵活性的峰谷电价分布鲁棒定价策略[J].电力自动化设备,2024,44(12):178-186.