

DOI: 10.7667/PSPC170745

基于微电网的需求响应优化策略

陈冉¹, 杨超², 沈冰¹, 任波³, 陆伟³

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 国网上海浦东供电公司, 上海 200122;
3. 武汉中元华电科技股份有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘要: 新能源微电网的广泛接入对电网的需求响应提出了更高的要求。在需求响应系统中引入微电网作为参与因素, 设计了基于微电网的需求响应系统的原理架构, 提出了基于微电网的需求响应建模原则与方法。在此基础上, 分别建立了基于微电网的分时电价和实时电价两种模式下需求响应优化策略。以上海某地电力需求响应系统为例, 针对包含微电网的需求响应特性, 仿真验证了分时电价和实时电价两种模式的需求响应优化效果。

关键词: 需求响应; 微电网; 实时电价; 分时电价; 优化策略

Micro-grid based demand response optimization policy

CHEN Ran¹, YANG Chao², SHEN Bing¹, REN Bo³, LU Wei³

(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China;
2. State Grid Shanghai Pudong Electric Power Supply Company, Shanghai 200122, China;
3. Wuhan Zhongyuan Huadian Science and Technology Co., Ltd, Wuhan 430223, China)

Abstract: The grid-connected micro-grid with large scale has proposed higher requirements for grid Demand Response (DR). This paper introduces factors of micro-grid into the DR system and designs the structure of micro-grid based DR system, together with the modeling principle and method of micro-grid based DR policy. On this basis, this paper proposes a micro-grid based demand response optimization policy under both conditions of time-of-use price and real-time price. According to the characteristics of micro-grid based DR system, situational evaluation is conducted by taking the DR system in someone area of Shanghai as an example. Simulation results show great efficiency of demand-response optimization policy proposed with both of the time-of-use price and the real-time price.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094015001A).

Key words: demand response; micro grid; real-time price; time-of-use price; optimization policy

0 引言

随着能源互联网的兴起和“坚强智能电网”建设的稳步推进, 新能源微电网的广泛接入对电网需求响应(Demand Response, DR)提出了更高要求^[1-3]。需求响应能够实现用电优化、降低峰谷差、加大新能源消纳, 并且能够积极参与电网间的有效互动, 是“坚强智能电网”建设的核心与关键^[4-6]。需求响应是电力需求侧管理在电力市场中的最新发展^[2]。按照需求的市场参与行为, 需求响应项目可以分为以实时电价、峰谷电价等为引导的基于价格和根据

系统需要或电力紧张时减少电力需求以此获得直接补偿或其他时段的优惠电价的基于激励两类^[2-5]。目前针对需求响应的研究主要以激励用户参与电网调峰和引导用户科学、合理用电为目的。

微电网的兴起给需求响应带来了新的挑战与机遇。已有相关研究将微电网项目引入需求响应^[7-10]。文献[7]提出了基于光伏和储能的微电网调度模型; 文献[8]建立了微电网优化调度模型, 通过对光伏和风电的日前调度优化实现了微电网的经济运行。需求侧资源通过参与配电网运行, 充分发挥微电网的灵活可控特性, 可有效促进电网提高电能利用率和加强供电可靠性^[9]。文献[10]对于微电网在电力市场价格和电网运行成本方面的影响进行了分析, 通过微电网资源配置, 有效优化配电网运行的成本和收

益。然而上述研究较少考虑需求侧的影响或需求侧模型较简单,没有将微电网与需求响应紧密结合,没有充分考虑微电网对需求响应项目的积极影响以及经济效益。

本文在上述研究的基础上,引入了微电网对需求响应的影响,研究基于微电网电力需求响应优化策略。首先分析了微电网与电力需求响应关系,接着提出了基于微电网的电力需求响应优化建模条件。其次,重点研究基于微电网的电网需求响应优化策略,分别建立基于微电网的分时电价需求响应模型和实时电价需求响应模型。实证分析以上海某地电力需求响应系统为例,针对包含微电网的需求响应特性,仿真验证分时电价和实时电价两种模式的需求响应效果。

1 基于微电网的需求响应特性分析

1.1 微电网典型结构与特点分析

微电网是通过本地分布式微型电源或中、小型传统发电方式的优化配置,向附近负荷提供电能的特殊电网,是一种基于传统电源的较大规模的独立系统^[7]。典型微电网结构是微网参与需求响应,优化电价与负荷曲线的基础,微电网的典型结构如图1所示。

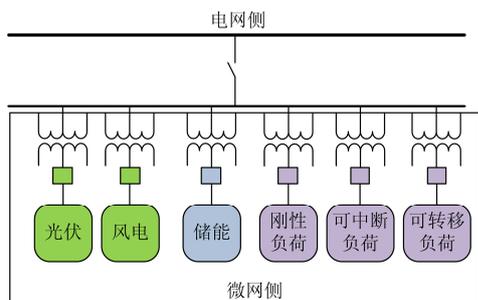


图1 微电网的典型结构

Fig. 1 Typical architecture of micro-grid

微电网结构可以支持接入网架的负荷存在多个回路,并且兼容多种类型的电源提供电能。微电网的典型结构主要由光伏发电、风力发电、中小型可控发电机组以及负荷组成。其中,负荷可由光伏发电(PV)、风力发电(WD)以及可控发电机组(MT)和公共电网联合对其供电。当大电网发生故障或电能质量恶劣时,开关断开,微网进入孤岛运行状态。在电源发电能力充足的情况下,可满足对负荷的持续供电;若微电网的电源发电功率小于负荷总需求量时,则依次切除不同等级的负荷,并使用大电网与微电网联合供电模式,以满足负荷需求。

微电网通过内部电源和负荷的可控性,在充分

满足用户对电能质量和供电安全要求的基础上,实现微电网的并网运行或独立自治运行;微电网对外表现为一个整体单元,并且可以并网运行^[11-12]。因此,微电网具有以下特点。

1) 微电网主要由分布式电源和多种类型负荷构成,在调度性方面与大电网相比具有高度灵活的特点。

2) 微电网中电源设备具有丰富的多样性,既有传统的发电机组,也有分布式新能源发电设备;而微电网中的负荷类型多种多样,主要分为刚性负荷、可中断负荷和可转移负荷等。

3) 微电网中大部分的电源和负荷资源都具有可控性,可以根据不同工况调整运行方式。通过完善微电网的运行策略,保证微电网运行的可靠性和安全性,优化微电网运行的经济性。

4) 微电网可以不与大电网并网,独立运行就能在很大程度上满足用户的负荷需求。

1.2 基于微电网的需求响应系统构成

基于微电网的需求响应作为跨领域的电力业务,主要涉及电网侧、微电网侧和用户侧。基于微电网的需求响应系统架构框图如图2所示,主要包括需求响应服务器、需求响应运行管理系统、需求响应节点和微电网运行控制节点等^[13-14]。

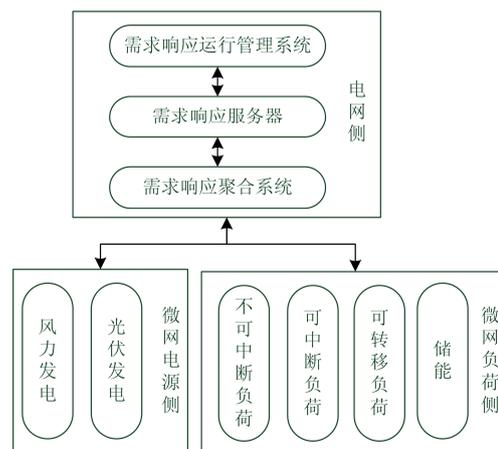


图2 基于微电网的需求响应系统框图

Fig. 2 Micro-grid based demand response system

基于微电网的需求响应系统中,主要设备和功能描述如下。

1) 需求响应服务器:发布动态电价和负荷需求、需求响应事件的通知。

2) 需求响应运行管理系统:计算所有负荷的总体需求,并将需求发给自动需求响应服务器;监视需求响应系统的运行和监测需求响应的实施效果。

3) 需求响应聚合系统:对大量用户聚合后进行

需求响应调度；聚合系统连接需求响应客户端与需求响应服务器，对需求响应系统发布的削减负荷进行分配。

4) 需求响应节点：向下连接和控制需求响应用户的负荷设备，主要包括固定负荷、可中断负荷和可转移负荷。

5) 微电网控制节点：向下连接和控制微电网的电源设备，包括光伏发电(PV)、风力发电机(WD)以及可控发电机组(MT)等^[15-17]。

在计及微电网的需求响应系统中，需求响应聚合系统将刚性负荷、可中断负荷和可转移负荷三类负荷分别聚合为三个整体进行调整，并尽可能地优先消纳新能源微网所产生的电能，再根据各类负荷特性进行负荷侧的调度。在满足对新能源微电网电源的充分消纳条件下，需求响应聚合系统根据总负荷量的峰谷状况，首先考虑处理可中断负荷，然后统计需要调整的负荷比例，对可转移负荷按相应比例进行调度，以进一步优化削峰填谷的效果。

2 基于微电网的需求响应约束条件

在基于微电网的需求响应建模过程中，由于微电网的特殊性，需要充分考虑微电网本身的约束条件来建立模型。

1) 系统约束条件

基于微电网的需求响应系统中负荷侧、微网侧和电网侧之间必须符合功率平衡约束条件。

$$\begin{cases} D_{\text{Load}}(t) + D_{\text{Store}}(t) = F_{\text{GRID}}(t) + F_{\text{MG}}(t) \\ F_{\text{MG}}(t) = F_{\text{PV}}(t) + F_{\text{WD}}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $D_{\text{Load}}(t)$ 为系统在 t 时刻的总负荷； $F_{\text{GRID}}(t)$ 为电网在 t 时刻的供电功率； $F_{\text{PV}}(t)$ 为光伏机组在 t 时刻出力的总功率； $F_{\text{WD}}(t)$ 为风电机组在 t 时刻出力的总功率； $F_{\text{MT}}(t)$ 为可控电机在 t 时刻的发电总功率。上述的光伏、风电和可动电机三类新能源的出力的总功率分别由式(2)统计得出。

$$\begin{cases} F_{\text{PV}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} F_{\text{PV},i}(t) \\ F_{\text{WD}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{WD}}} F_{\text{WD},i}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $F_{\text{PV},i}(t)$ 、 $F_{\text{WD},i}(t)$ 分别表示光伏电机、风力电机的单机出力瞬时功率。

2) 微网电源约束条件

本文中微网的电源主要考虑光伏发电(PV)、风力发电机(WD)两大类。不同类型的电源出力均有其功率上限。

$$\begin{cases} F_{\text{PV},i}(t) \leq F_{\text{PV},\text{MAX}} \\ F_{\text{WD},i}(t) \leq F_{\text{WD},\text{MAX}} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $F_{\text{PV},\text{MAX}}$ 、 $F_{\text{WD},\text{MAX}}$ 分别表示这两种微网电源出力的功率最大值限制。

3) 储能约束条件

在基于微网的需求响应中，由于储能的运行会给需求响应带来一定的影响，故需要考虑引入储能因素。本文将储能视为类似负荷的资源，但又有其充放电的特殊性，故其约束条件如式(4)所示。

$$E_{\text{Store}}(t + \Delta t) = E_{\text{Store}}(t) + \alpha D_{\text{Store}}(t) \Delta t \quad (4)$$

式中： $E_{\text{Store}}(t)$ 为储能电池在 t 时刻所储存的电能； $D_{\text{Store}}(t)$ 为储能的输入或输出功率值。而 $\alpha \in \{-1, 0, 1\}$ 为储能是否充放电的系数，当储能充电时， α 值为1；储能对负荷供电时， α 值为-1；储能既不充电也不放电时， α 值为0。

4) 运行策略约束条件

由于本文重点在于需求响应，引入微电网主要考虑其对需求响应系统运行的优化效果，故暂不考虑微电网向大电网送电售电的情况，只考虑微电网在需求响应系统中对用户侧直接供电的情况，研究基于微电网的需求响应对于负荷曲线和市场电价的优化效果。

为了充分利用和消纳新能源，需求响应系统优先使用和消纳微电网所产生的电能。假设微电网的供电能力有限，无法完全满足负荷需求，故将微电网视为需求响应系统中对于大电网供电模式的有力补充。负荷侧在使用微电网的同时仍需要向电网公司购电。

从电价方面考虑，由于电价在不同时段的波动性，在电价高于微电网运行成本的区间，负荷侧充分优先地使用和消纳微电网产生的电能；否则，当电价低于微电网运行成本，则负荷侧完全使用电网公司的电能。其约束条件可表示为式(5)。

$$D_{\text{Load}}(t) + D_{\text{Store}}(t) = \begin{cases} F_{\text{GRID}}(t) + F_{\text{MG}}(t) & [F_{\text{PV},\text{MAX}}(t) + F_{\text{WD},\text{MAX}} < D_{\text{Load}}(t) + D_{\text{Store}}(t)] \\ F_{\text{MG}}(t) & [F_{\text{PV},\text{MAX}}(t) + F_{\text{WD},\text{MAX}} \geq D_{\text{Load}}(t) + D_{\text{Store}}(t)] \end{cases} \quad (5)$$

式中， $F_{\text{MG}}(t)$ 为微电网在 t 时刻瞬时出力的总功率。

5) 激励因素约束条件

在引入微电网情况下的需求响应中，激励报酬 $A(t)$ 主要体现为用户使用微电网所节省的购电费用。则基于微电网的需求响应激励报酬函数 $A(t)$ 如式(6)所示。

$$A(t) = A_0 + A_{\text{MG}}(t) \quad (6)$$

式中: A_0 为需求响应的基本激励报酬, 可设置为常数; $A_{MG}(t)$ 为使用微电网的激励报酬, 可根据式(7)从用户所节省的购电费用换算而来。

$$A_{MG}(t) = \frac{P(t) \cdot [D_{Load}(t) + D_{Store}(t) - F_{GRID}(t)]}{F_{MG}(t)} \quad (7)$$

式中, $P(t)$ 为市场电价, 可为分时电价或为实时电价。

6) 目标函数

微电网参与需求响应, 首先直接从负荷和激励两方面对需求响应效果产生影响, 既要最大程度上消纳微电网的风电光伏电能, 又要实现负荷曲线峰谷差值的最优化。其目标函数可用式(8)表示。

$$\begin{cases} \text{MAX}(R_{MG}) \\ \text{MIN}(D_{MAX} - D_{MIN}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: R_{MG} 为微电网的光伏风电日消纳率; D_{MAX} 和 D_{MIN} 分别为负荷曲线的最高峰值和最低谷值; E_D 为用户负荷所消纳的微网电能; E_S 为储能所消纳的微网电能, 则 R_{MG} 为式(9)所示。

$$R_{MG} = \frac{E_D + E_S}{\sum_{t=1}^{24} F_{MG}(t)} \times 100\% \quad (9)$$

3 基于微电网的需求响应优化

引入微电网参与电力需求响应, 必然给电价模式带来新的影响。在基于微电网的情况下, 本文采用粒子群算法建立需求响应策略优化模型, 以保证在平均电价不变的情况下最大程度地促进用户积极参与需求响应并充分消纳微电网能源。

3.1 分时电价模式的需求响应优化策略

基于微电网参与负荷响应的情况下, 负荷侧需求响应节点的分时电价响应策略流程如图3所示。

在分时电价模式下, 需求响应主要根据电网公司发布的分时电价信息、用户负荷需求以及微电网运行数据来进行需求响应业务, 并周期性地需求响应策略调整。需求响应策略可以按小时或峰平谷时段来设置周期, 每个周期首先从负荷侧、电网侧和微网侧读取所需数据信息: 1) 从负荷侧统计用电负荷需求量; 2) 从电网侧获取电网公司发布的分时电价信息; 3) 从微网侧读取微网的运行数据(如风电、光伏以及储能设备放电的输出功率)。

为了在进行负荷响应的同时兼顾对微电网新能源的充分消纳, 首先直接根据微电网出力的功率和运行成本选择供电方式。之后对各类用电负荷进行需求响应优化调整(比如可转移负荷和终端负荷)。

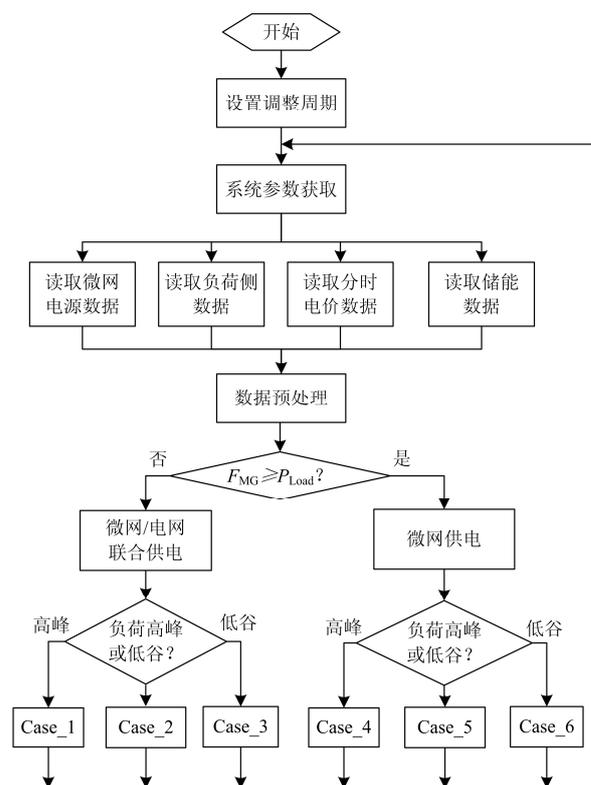


图3 分时电价模式的需求响应优化策略

Fig. 3 Demand response optimization policy under time-of-use price

1) 微电网出力小于负荷需求, 则采用微网/公网联合供电模式。Case_1: 负荷高峰时段, 微网电源、储能和公网共同对负荷供电; Case_2: 负荷平时段, 微电网和公网共同对负荷供电, 储能无充放; Case_3: 负荷低谷时段, 微电网和公网共同对负荷供电, 并对储能充电。

2) 微电网出力大于负荷需求, 则采用微网独立供电模式。Case_4: 负荷高峰时段, 微网和储能共同对负荷供电; Case_5: 负荷平时段, 微电网对负荷供电, 储能无充放; Case_6: 负荷低谷时段, 微电网对负荷供电, 并对储能充电。

微电网参与需求响应, 首先直接从负荷和激励两方面对需求响应效果产生影响。一方面, 微电网向负荷侧供电, 从电网侧可视为所降低的负荷功率值。另一方面, 用户通过充分消纳微电网的电能, 一定程度上降低了从电网公司的购电量和购电成本, 则可换算为激励函数 $A(i)$, 以促进用户积极利用微电网新能源。

本文采用粒子群算法建立分时电价模式下基于微电网的需求响应策略优化数学模型:

$$D_{Load}(i) = \left\{ \begin{aligned} & D_0(i) + \sum_{j=0}^{23} E_0(i,j) \times \frac{D_0(i)}{P_0(j)} \times \\ & \left[\frac{P(i) \times (D_0(i) + D_{Store}(i) - F_{MG}(i)) - P_0(j) + A(j)}{D_0(i)} - P_0(j) + A(j) \right] \times \\ & \left\{ 1 + \frac{E(i) \times [P(i) - P_0(i) + A(i)]}{P_0(i)} \right\} \end{aligned} \right\} \times \quad (10)$$

3.2 实时电价模式的需求响应优化策略

在实时电价机制下，基于微电网的需求响应节点优化策略如图 4 所示。

对于储能资源的工作模式，当市场的实时电价低于平均电价，储能设备进行充电；否则，若市场电价高于平均电价，则储能设备对负荷供电。通过对微电网的电能消纳进行激励，促使负荷侧更倾向于优先使用微电网电能，在此基础上再进行第二次需求响应优化。

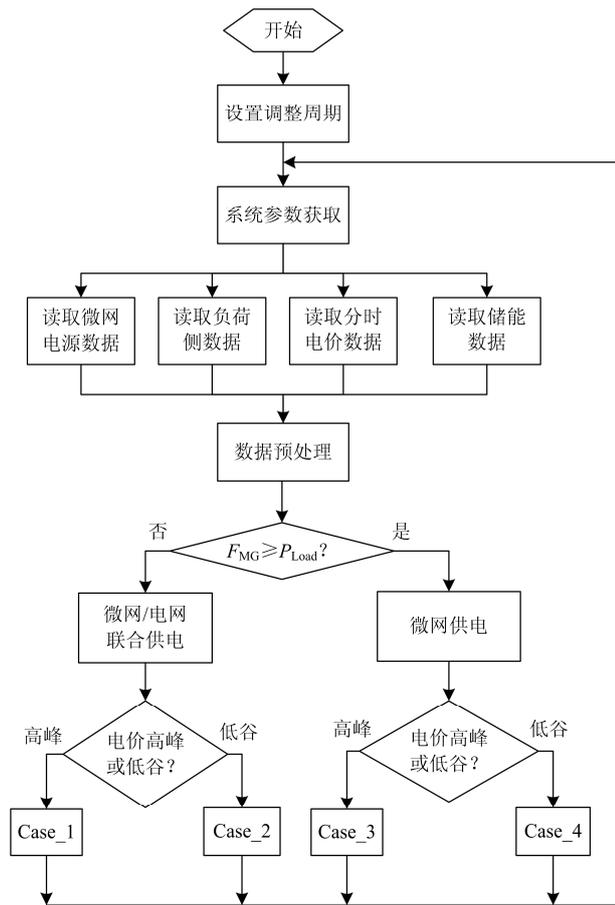


图 4 实时电价模式的需求响应优化策略

Fig. 4 Demand response optimization policy under real-time price

1) 微电网出力小于负荷需求，则采用微网/公网联合供电模式。Case_1: 电价高于平均价格时，微网电源、储能和公网共同对负荷供电；Case_2: 低

于平均价格的时段，微电网和公网共同对负荷供电，并对储能充电。

2) 微电网出力大于负荷需求，则采用微网独立供电模式。Case_3: 电价高于平均价格时段，微网和储能共同对负荷供电；Case_4: 电价低于平均价格时段，微电网对负荷供电，并对储能充电。

由于实时电价的波动性和多变性，基于微电网的需求响应节点要实时跟踪比较实时电价与微电网运行成本。因此，实时电价模式下需求响应节点对响应策略的调整周期间隔较短，以 15 min 到 1 h 为一个周期进行设置。实时电价下的需求响节点也采用双层响应的策略。首先实时跟踪计算微网运行成本，并与电网公司发布的实时电价进行比较，当市场的实时电价低于微网供电成本，则优先考虑使用公网供电；否则，若市场电价高于微网供电成本，就优先使用消纳微电网电能。通常情况下，市场电价在大部分时间里高于微网供电成本。这使得用电方更倾向于优先使用微电网电能，在微电网功能不足时再使用公网供电。根据上述的实时电价模式下需求响应策略，建立实时电价模式下基于微电网的需求响应优化数学模型，则其需求响应的数学模型表示为式(11)。

$$D_{SUM}(i) = \left\{ \begin{aligned} & D_0(i) + \int_{j=0}^{23} E_0(i,j) \times \frac{D_0(i)}{P_0(j)} \times \\ & \left[\frac{P(i) \times (D_0(i) - F_{MG}(i)) + C_{MG}(i) \times F_{MG}(i)}{D_0(i)} - \right. \\ & \left. P_0(j) + A(j) \right] dj \times \\ & \left\{ 1 + \frac{E(i) \times [P(i) - P_0(i) + A(i)]}{P_0(i)} \right\} \end{aligned} \right\} \times \quad (11)$$

4 仿真算例

为了验证分时电价和实时电价模式下基于微电网的需求响应优化效果，本节仍然采用图 4 所示的需求响应系统简化结构进行仿真验证。其中，需求响应仿真条件中采用了风力发电、光伏发电以及可控发电机组作为间歇性波动功率的输出电源，但暂时不考虑储能因素的影响。仿真条件设定风力发电额定功率为 30 MW，光伏发电额定功率为 50 MW，负荷侧的负荷总需求量为 50~140 MW。优化周期设置为 30 min，24 h 内共计 N=48 个优化周期。

分时电价模式下的需求响应优化结果如图 5 和

图6所示;实时电价模式下的需求响应策略优化结果如图7和图8所示。

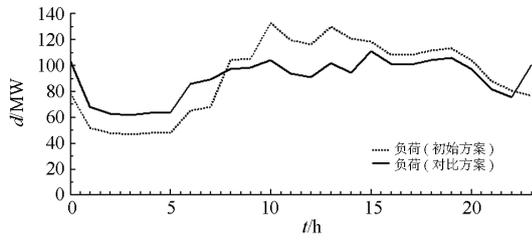


图5 分时电价模式的负荷优化效果

Fig. 5 Load optimization result under time-of-use price

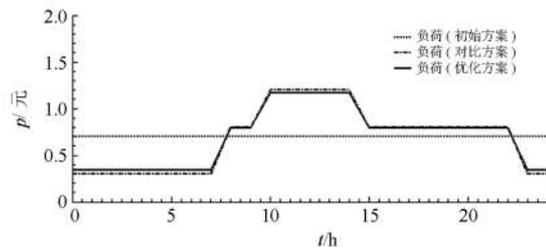


图6 分时电价优化效果

Fig. 6 Optimization result of time-of-use price

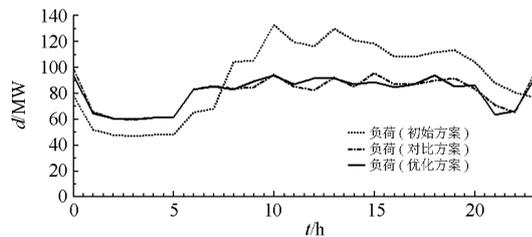


图7 实时电价模式的负荷优化效果

Fig. 7 Load optimization result under real-time price

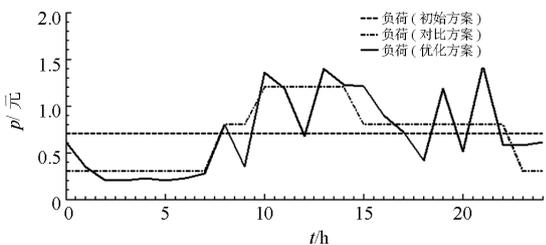


图8 实时电价优化效果

Fig. 8 Optimization result of real-time price

从图5中可以看出,实施分时电价模式下基于微电网的需求响应优化,可以实现良好的负荷转移效果。结合图5和图6,可见本文提出的优化方案能够很好地实现分时电价的优化,优化得到的三段价格的平均价格和实施响应前的平均价格保持一致,且需求响应后的电力负荷峰谷差有明显改善。

图7中实线对应的实时电价模式可以实现良好的负荷转移,峰谷差得到了优化,说明本文提出的实时电价模式下基于微电网的需求响应优化可以实现良好的负荷转移效果。图7和图8中电价策略和相应的电力负荷波动情况都有明显改善,进而验证了基于微电网的需求响应优化方法在调节实时电价方面的有效性。在需求响应中,储能资源的充分运用起到了突出的作用:1) 负荷低谷时段,储能进行充电,相当于起到增加负荷的作用;2) 负荷高峰时段,储能放电则相当于降低了负荷峰值。在此基础上进行需求响应,可进一步优化总体负荷曲线。

5 结论

本文在需求响应系统中引入了微电网作为参与因素,设计了基于微电网的需求响应系统的原理架构,并提出了基于微电网的需求响应建模原则与方法。在此基础上,分别建立了基于微电网的分时电价和实时电价两种模式下需求响应优化策略,利用仿真算例验证了所提出的需求响应优化模型的合理性和有效性。仿真计算结果表明,分时电价和实时电价两种模式中,微电网参与需求响应都能进一步优化系统负荷曲线和市场电价曲线并促进微电网能源的充分消纳。

参考文献

- [1] 李珣, 马瑞, 罗阳. 基于Stackelberg博弈的微网价格型需求响应及供电定价优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 88-95.
- LI Xuan, MA Rui, LUO Yang. Price-based demand response of micro-grid and optimal pricing strategy based on Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 88-95.
- [2] 胡勇. 主动配电网用户侧能量管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 149-155.
- HU Yong. Design and implementation of user energy management system on active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 149-155.
- [3] 王先齐, 吕智林, 汤泽琦. 基于分时电价机制的并网点微网多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 9-18.
- WANG Xianqi, LÜ Zhilin, TANG Zeqi. Multi-objective dynamic dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 9-18.
- [4] 黄莉, 卫志农, 韦延芳, 等. 智能用电互动体系和运营模式研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2230-2237.

- HUANG Li, WEI Zhinong, WEI Yanfang, et al. A survey on interactive system and operation patterns of intelligent power utilization[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2230-2237.
- [5] 王成山. 微电网分析与仿真实论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [7] HOSSAIN E, KABALCI E, BAYINDIR R, et al. Microgrid testbeds around the world: state of art[J]. Energy Conversion & Management, 2014, 86(10): 132-153.
- [8] 江岳春, 王志刚, 杨春月, 等. 微网中可控负荷的多目标优化策略[J]. 电网技术, 2013, 32(10): 2875-2880.
JIANG Yuechun, WANG Zhigang, YANG Chunyue, et al. Multi-objective optimization strategy of controllable load in microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 32(10): 2875-2880.
- [9] 张谦, 周林, 周维维, 等. 计及电动汽车充放电静态频率特性的负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 74-80.
ZHANG Qian, ZHOU Lin, ZHOU Luowei, et al. Load frequency control considering charging and discharging static frequency characteristics of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 74-80.
- [10] BUI D M, LIEN K Y, CHEN S L. Investigate dynamic and transient characteristics of micro-grid operation and develop a fast-scalable-adaptable algorithm for fault protection system[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 120: 214-233.
- [11] 郭鹏, 文晶, 朱丹丹, 等. 基于源-荷互动的大规模风电消纳协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 1-9.
GUO Peng, WEN Jing, ZHU Dandan, et al. The coordination control strategy for large-scale wind power consumption based on source-load interactive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 1-9.
- [12] 张彬, 毛荀, 彭晓涛. 一种考虑风电出力 and 负荷不确定性的最优调峰方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(12): 106-113.
ZHANG Bin, MAO Xun, PENG Xiaotao. Study on an optimal method of peak-load regulation considering uncertainty of wind power output and load[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(12): 106-113.
- [13] ZHOU Z, ZHAO F, WANG J H. Agent-based electricity market simulation with demand response from commercial buildings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(4): 580-588.
- [14] 刘继东, 韩学山, 韩伟吉, 等. 分时电价下用户响应行为的模型与算法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2973-2978.
LIU Jidong, HAN Xueshan, HAN Weiji, et al. Model and algorithm of customers' responsive behavior under time-of-use price[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2973-2978.
- [15] WANG Y, LI L. Time-of-use based electricity demand response for sustainable manufacturing systems[J]. Energy, 2013, 63: 233-244.
- [16] LI N, CHEN L, LOW S H. Optimal demand response based on utility maximization in power networks[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, Detroit, USA: 1-8.
- [17] Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency. Energy consumption of major household appliances shipped in Canada (trends for 1990 - 2003)[R]. Canada: Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency, 2005.

收稿日期: 2017-05-17; 修回日期: 2017-06-29

作者简介:

陈 冉(1983—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统控制与保护; E-mail: crnjcn@163.com

杨 超(1992—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为继电保护测试; E-mail: yangchao@2008@163.com

沈 冰(1979—), 男, 博士, 高工, 研究方向为电力系统控制与保护。E-mail: ee_shen_bing@hotmail.com

(编辑 周金梅)