

[微电网]

计及价格型需求响应的微电网优化调度

文/福州大学土木工程学院电气工程与自动化学院 吴翰韬

福州大学电气工程与自动化学院 温步瀛

为分析价格型需求响应对微网经济运行的影响，根据价格型需求响应的特点，建立价格型需求响应的数学模型。在此基础上，以最小化微电网运行费用为目标，建立了计及价格型需求响应的微电网优化调度模型。最后以一个独立型微电网为例进行仿真分析。算例分析表明，在微电网中引入价格型需求响应，能够提高微电网整体的经济性。

微电网是由微电源、清洁能源和储能系统构成的相对独立运行的小型系统。近年来，风电因其清洁、可再生等特点得到了大力发展，但存在出力波动性和不确定性的不足，大规模风电接入电网会给电网的稳定性产生不良的影响。微电网因其能够协调网络中各类电源之间的互补以及保障系统可靠性的特性，已成为连接清洁能源与大电网之间的桥梁。

价格型需求响应（Demand Response，DR）是指引导用户根据电力价格信号主动改变用电需求的措施。在微电网中引入价格型 DR，可以鼓励负荷侧用户参与 DR，不仅能缓解微电网在负荷峰时段时电源侧出力不足，还能在一定程度上提高微电网的经济性和稳定性。

本文为分析价格型 DR 对微电网经济运行的影响，以微电网运行费用最小为目标，建立了计及价格型 DR 的微电网优化调度模型。最后以一个包含微电源、风电以及电化学储能的独立型微电网为例

进行算例仿真。结果表明在微电网中实施价格型 DR，能够提高微电网的经济性。

价格型需求响应模型

价格型 DR 是以电力价格为信号，引导用户改变固有的用电习惯，参与 DR 的措施。一般采用弹性系数表示电价变化量对用户参与 DR 的响应量的影响，其数学表达式为

$$e = \frac{\Delta\alpha/\alpha}{\Delta\beta/\beta} \quad (1)$$

式中， e 为弹性系数； $\Delta\alpha$ 为负荷 α 的相对变化量； $\Delta\beta$ 为电价 β 的相对变化量。

弹性系可以分为两种，分别是自弹性系数和交叉弹性系数。自弹性系数表示用户对于目前时段电力价格的响应程度；而交叉弹性系数表示用户对于其余时段电力价格的响应程度。综上所述，两者的数学表达式为

$$e_{ii} = \frac{\Delta\alpha_i/\alpha_i}{\Delta\beta_i/\beta_i} \quad (2)$$

$$e_{ij} = \frac{\Delta\alpha_i/\alpha_i}{\Delta\beta_j/\beta_j} \quad (3)$$

式中, 下标 i, j 分别表示决策周期内的时段序号; e_{ii} 为自弹性系数; e_{ij} 为交叉弹性系数。

T 时段的用户对于电力价格的响应率的数学表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta\alpha_1/\alpha_1 \\ \Delta\alpha_2/\alpha_2 \\ \vdots \\ \Delta\alpha_T/\alpha_T \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \Delta\beta_1/\beta_1 \\ \Delta\beta_2/\beta_2 \\ \vdots \\ \Delta\beta_T/\beta_T \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, E 为弹性矩阵, 其数学表达式为

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1T} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2T} \\ M & M & & M \\ e_{T1} & e_{T2} & \cdots & e_{TT} \end{bmatrix} \quad (5)$$

微电网优化调度模型

1. 目标函数

目标函数为微电网在一个决策周期内的运行费用最少。微电网的运行费用由微电网中各设备的维护费用、微电源的燃料费用以及启动成本组成, 具体如下

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k=1}^K (a_k (P_{t,k}^{\text{MS}})^2 + b_k P_{t,k}^{\text{MS}} + c_k) + \right. \\ & \sum_{k=1}^K \mu_{t,k}^{\text{MS}} (1 - \mu_{t-1,k}^{\text{MS}}) S_k^{\text{MS}} + \sum_{k=1}^K \lambda_k^{\text{MS}} P_{t,k}^{\text{MS}} \left. \right] + \\ & \sum_{t=1}^T \lambda^{\text{W}} P_t^{\text{W}} + \sum_{t=1}^T \lambda^{\text{B}} (P_t^{\text{B,cha}} + P_t^{\text{B,dis}}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, T 为决策周期; K 为微电源机组个数; $P_{t,k}^{\text{MS}}$ 为微电源 k 的功率; a_k 、 b_k 和 c_k 分别为微电源 k 的燃料成本函数参数; $\mu_{t,k}^{\text{MS}}$ 表示微电源 k 的运行状态; S_k^{MS} 为微电源 k 的启动成本; λ_k^{MS} 、 λ^{W} 和 λ^{B} 分别为为微电源 k 、风电以及电化学储能的维护成本系数; $P_t^{\text{B,cha}}$ 、 $P_t^{\text{B,dis}}$ 分别为电化学储能的充/放电出力。

2. 约束条件

(1) 微电源出力约束

$$\mu_{t,k}^{\text{MS}} P_{\min,k}^{\text{MS}} \leq P_{t,k}^{\text{MS}} \leq \mu_{t,k}^{\text{MS}} P_{\max,k}^{\text{MS}} \quad (7)$$

式中, $P_{\max,k}^{\text{MS}}$ 、 $P_{\min,k}^{\text{MS}}$ 分别为微电源 k 功率的上下限。

(2) 微电源爬坡率约束

$$P_{t,k}^{\text{MS}} - P_{t-1,k}^{\text{MS}} \leq R_{\text{up},k}^{\text{MS}} \quad (8)$$

$$P_{t-1,k}^{\text{MS}} - P_{t,k}^{\text{MS}} \leq R_{\text{down},k}^{\text{MS}} \quad (9)$$

式中, $R_{\text{up},k}^{\text{MS}}$ 、 $R_{\text{down},k}^{\text{MS}}$ 分别为微电源 k 的向上爬坡率和向下爬坡率。

(3) 微电源最小运行和停运时间约束

$$(T_{t,k}^{\text{open}} - T_{t-1,k}^{\text{open}})(\mu_{t-1,k}^{\text{MS}} - \mu_{t,k}^{\text{MS}}) \geq 0 \quad (10)$$

$$(T_{t,k}^{\text{close}} - T_{t-1,k}^{\text{close}})(\mu_{t,k}^{\text{MS}} - \mu_{t-1,k}^{\text{MS}}) \geq 0 \quad (11)$$

式中, $T_{t,k}^{\text{open}}$ 、 $T_{t,k}^{\text{close}}$ 分别为微电源 k 的持续运行和停运时间; $T_{\min,k}^{\text{open}}$ 、 $T_{\min,k}^{\text{close}}$ 分别为微电源 k 的最小开机运行和停机时间。

(4) 风电出力约束

$$0 \leq P_t^{\text{W}} \leq P_t^{\text{W,pre}} \quad (12)$$

式中, $P_t^{\text{W,pre}}$ 为风电预测出力。

(5) 电化学储能出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{\text{B,cha}} \leq \mu_t^{\text{B,cha}} P_{\max}^{\text{B,cha}} \\ 0 \leq P_t^{\text{B,dis}} \leq \mu_t^{\text{B,dis}} P_{\max}^{\text{B,dis}} \\ \mu_t^{\text{B,cha}} + \mu_t^{\text{B,dis}} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\mu_t^{\text{B,cha}}$ 、 $\mu_t^{\text{B,dis}}$ 分别表示电化学储能的充电和放电决策变量; $P_{\max}^{\text{B,cha}}$ 、 $P_{\max}^{\text{B,dis}}$ 分别为电化学储能充放电功率的上限值。

(6) 电化学储能荷电状态约束

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_t \leq \text{SOC}_{\max} \quad (14)$$

式中, $\text{SOC}_{\max}$ 、 $\text{SOC}_{\min}$ 分别为电化学储能的荷电状态变化区间的上下限值。

(7) 始末时刻电化学储能平衡约束

$$\text{SOC}_0 = \text{SOC}_T \quad (15)$$

式中, SOC_0 、 SOC_T 分别为决策周期初始和末尾时刻电化学储能的荷电状态。

(8) 电价约束

$$\beta_{\min} \leq \beta_t \leq \beta_{\max} \quad (16)$$

式中, $\beta_{\max}$ 、 $\beta_{\min}$ 分别为电价变化区间的上下限值; β_t 为优化后的电价。

(9) 功率平衡约束

$$\sum_{k=1}^K P_{t,k}^{\text{MS}} + P_t^{\text{W}} + P_t^{\text{B,dis}} - P_t^{\text{B,cha}} = P_t^{\text{L}} + \Delta\alpha_t \quad (17)$$

式中， P_t^L 为微电网的预测负荷需求； $\Delta\alpha_t$ 为 t 时段负荷 P_t^L 参与 DR 的变化量。

3. 模型求解

在本文所建立的模型中，微电源的燃料成本函数是二次函数。为提高计算速度，利用分段线性方法对燃料成本函数进行线性化处理，从而将所建立的计及价格型 DR 的微电网优化调度模型转化为混合整数线性规划问题。最后利用 MATLAB 软件建模，并调用辅助软件 CPLEX 进行求解。

算例分析

1. 算例介绍

本文以一个独立运行的微电网为例进行分析。该微电网包含 3 台微电源（MS）、1 台风电机组和 1 组电化学储能，具体参数见表 1、表 2。一天中各时段的负荷和风电功率预测曲线如图 1 所示。风电的维护费用系数为 0.03 元/（kW·h）。价格型 DR 的自弹性系数为-0.2，交叉弹性系数为 0.033，其变化范围为总负荷的 10%。各时段的初始电价如图 2 所示。

表 1 微电源参数

参数	MS1	MS2	MS3
功率上限/kW	60	80	80
功率下限/kW	3	5	4
开机启动成本/元	2	3	2
维护费用系数/[元/（kW·h）]	0.04	0.08	0.03
向上爬坡率/（kW/h）	100	120	100
向下爬坡率/（kW/h）	80	100	80
最小开机时间/h	2	2	2
最小停机时间/h	2	2	2

表 2 电化学储能参数

参 数	数值
额定功率/kW	60
放电功率上限值/kW	60
充电功率上限值/kW	60
维护成本系数/[元/（kW·h）]	0.045
额定容量/kW·h	240
充/放电效率（%）	92
荷电状态最大值	0.9
荷电状态最小值	0.1

2. 仿真结果及分析

本文模型的优化调度结果如图 3 所示。在谷时

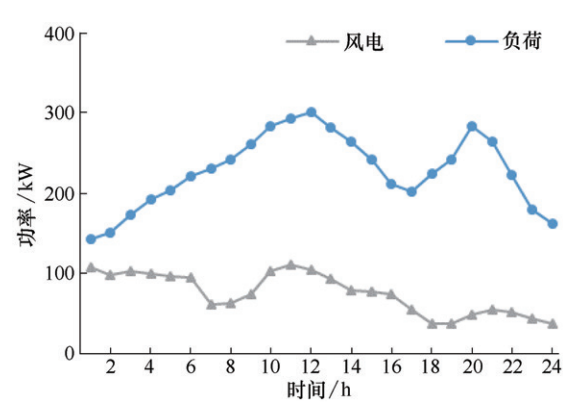


图 1 一天中负荷和风电功率预测曲线

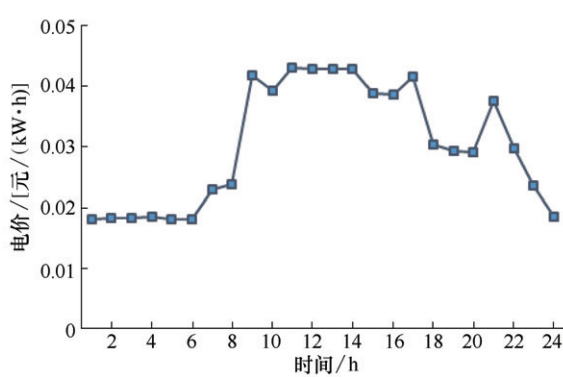


图 2 各时段的初始电价

段，风电出力能够满足大部分用户的负荷需求，在此期间富余的电能由电化学储能存储。由于微电源 1 的发电成本较高，处于停运状态。在峰时段，负荷需求主要由风电和微电源机组提供，在负荷高峰时段（19：00~21：00），电化学储能运行于放电模式，以保证微电网的运行经济性和系统功率平衡。

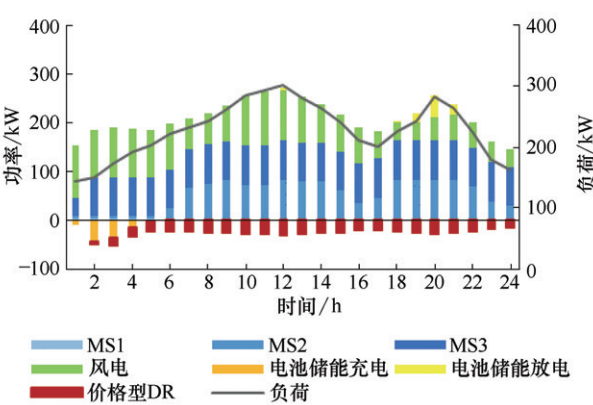


图 3 微电网的优化调度结果

（下转第 48 页）

内,两者采用平键连接;滑块串装在上述导柱上,与丝杠采用螺纹连接;插销安装在滑块侧面,用于支撑操动机构;轴承座Ⅱ安装在上述支板,使用螺钉固定;小齿轮通过圆锥滚子轴承和深沟球轴承固定在轴承座Ⅱ;摇把安装在小齿轮的端部,两者采用平键连接;转动摇把,通过圆锥齿轮传动和丝杠传动,带动滑块升降,实现操动机构的高度调节。

安装小车的使用

经上述结构设计,确定了新型弹簧操动机构装配用安装小车。该安装小车采用镜像分体的机械千斤顶结构,包括两台移动小车,使用操作方法较为简单,具体为:

- 1) 转动摇把,调整插销的高度至刚好插入操动机构的支撑孔。
- 2) 待两台移动小车插销均插入操动机构前后侧板后,顺时针转动摇把,托起操动机构。
- 3) 推动操动机构至安装位置,顺时针转动摇把,调整操动机构至安装高度,紧固机构连接螺钉。
- 4) 机构安装完成后,撤出移动小车。若拆卸操动机构,操动顺序相反。

安装小车使用时的实物照片如图3所示。

结构特征与使用效果

结构特征为:

- 1) 安装小车采用镜像分体的侧面支撑结构,解决了操动机构悬挂高度低,底面无法支撑的难题,保证了安装时的稳定安全。



图3 工装小车的三位模型图

- 2) 安装小车采用圆锥齿轮传动和丝杠传动的组合结构,实现操动机构的高度调节,结构紧凑,操动简单省力,效率高。

- 3) 安装小车采用“工”字形的底座结构,强度可靠,占用空间小。

该安装小车在车间使用取得了良好的效果,不仅解决了新型弹簧操动机构的安装难题,而且提高了装配效率,减轻了劳动强度,保证了安全生产,使操动机构的装配规范化。

结束语

综上所述,通过对新型弹簧操动机构的结构和使用工况进行分析,设计了专用的安装小车,解决了操动机构的安装难题。同时,安装小车的设计思路和方案可以为解决同类安装问题提供参考和借鉴。EA

(收稿日期:2021.06.09)

(上接41页)

3. 价格型DR对运行费用的影响分析

表3给出了两种调度方案,以此分析价格型DR对微电网运行费用的影响,优化结果见表3。

表3 两种调度方案的优化结果

序号	方案	微电网运行费用/元
1	微电网中实施价格型DR	3 605.39
2	微电网中不实施价格型DR	4 337.15

由表3可知,方案1中的微电网运行费用较方案2减少了16.87%。主要得益于方案1将价格型DR措施引入到微电网中,使用户负荷依据价格信号主动响应,改善了负荷侧的需求布局,从而使微

电网的运行费用下降。

结束语

本文建立了计及价格型DR的微电网优化调度模型。通过分析价格型DR的特点,建立了价格型DR的数学模型,并在此基础上建立了微电网优化调度模型。最后,以一个独立型的微电网为例进行仿真分析。结果表明,在微电网中实施价格型DR,能够协调电源侧和负荷侧的资源,从而达到提高微电网的整体经济性的目的。EA

(收稿日期:2021.03.24)