

不确定性的激励型需求响应对配电网可靠性的影响

范宏, 邓剑

(上海电力大学, 上海市 杨浦区 200090)

Reliability Analysis of Uncertain Incentive Demand Response Distribution Network

FAN Hong, DENG Jian

(Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

摘要: 随着激励型需求响应逐渐参与到电网运行中, 其在改善负荷分布以及提升配电网可靠性具有影响。在现有激励型需求响应特点的基础上, 依据消费者心理学原理分别建立了不可调度(可中断负荷、紧急需求响应)和可调度(直接负荷控制)的响应模型。以不同时间尺度为基础通过模糊 C 均值聚类算法将激励型需求响应资源进行分类, 在此基础上考虑不可调度和可调度响应资源在不同时间尺度下的响应能力和不确定性等响应特性, 建立了灵活配置的激励型需求响应参与两阶段响应调度模型, 最后通过序贯蒙特卡洛模拟法对改进 RBTS Bus6 系统进行可靠性计算。算例验证了所提方法的有效性。

关键词: Logistic 函数; 模糊 C 均值聚类; 激励型需求响应; 不确定性; 配电网可靠性

Abstract: Along with the participating of incentive demand response into power grid operation gradually, it plays significant role in improving load distribution and takes an important part in raising the reliability of distribution network. Based on the features of existing incentive demand response and according to the principles of consumer psychology, the non-schedulable response model for interruptible load and emergency demand response, and the schedulable model for direct load control, were respectively established. On the basis of different time scales and by means of fuzzy C-means clustering algorithm the incentive demand response resources were classified, and on this basis the response features such as the response capabilities and uncertainties of non-schedulable and schedulable resources under different time scales were considered, and then a flexibly configurable two stage response scheduling model with the participation of incentive demand response was established. At last, the reliability calculation for an

improved RBTS system was performed by use of sequential Monte Carlo simulation. The effectiveness of the proposed method is verified by simulation results.

Keywords: logistic function; fuzzy C-means clustering; Incentive demand response; uncertainty; distribution network reliability

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0175

0 引言

随着智能电网的逐步建设, 需求响应(demand response, DR)在改善负荷分布以及提升供电可靠性的影响逐渐得到重视。需求响应^[1-3]主要有以下两种形式: 一是基于价格型需求响应, 通过灵活的电价政策引导用户调整用电行为^[4-6]。二是基于激励型需求响应, 依据签订合同采用经济补偿或电价的方式来激励用户参与负荷削减^[7]。

作为智能电网建设的重要环节, DR 对配电网运行的优化作用获得国内外学者的广泛重视。当前 DR 的研究主要集中在用户参与 DR 项目的用电行为机理^[8-9]、DR 项目参与电网的削峰填谷作用^[10]; 消纳具有间歇性、波动性等特性的分布式电源的 DR 行为建模^[11-12]、DR 效益^[13]的研究等方面。对提升配电网系统可靠性方面研究较少。文献^[14]对光伏、风电、储能等分布式电源构成的微电网进行建模, 研究分析了不同运行策略对改善孤岛微网供电可靠性的影响; 文献^[15]在激励型响应和分时电价模型基础上通过负荷曲线聚类算法计算配电网可靠性, 验证不同类型 DR 提升配电网可靠性的积极作用; 文献^[16]在用户响

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0905105)
National Key R&D Program of China(2018YFB0905105)

应积极性因素基础上建立用户侧激励型响应模型，结合储能提出一种有效的微电网负荷削减策略。从响应预测确定性的角度考虑，响应资源可视为调度响应；文献 [17-18] 考虑配电网和电力市场基本约束条件，探讨确立分时电价优化模型以改善负荷曲线、降低网架投资，提高电网可靠性指标。

由于电力用户在参与 DR 项目时存在一定的不确定性，这也导致调度不能够准确的预测用户的实际响应量 [19-21]。相较于传统确定性调度 DR 模型，不确定性调度 DR 能够更好地反映电力用户参与响应的随机性。

综上所述，关于激励型 DR 对配电网可靠性的影响研究上大多是建立在传统确定性调度 DR 基础上的单一响应模型，且未考虑电力用户参与响应的有效时间段。在以上研究基础上，本文基于不同时间尺度下响应资源的响应特性构建了多种激励型 DR 参与两阶段响应调度模型。通过灵活的两阶段响应调度模型充分利用响应资源，达到减少电力用户停电率以及停电时间的目的，从而进一步提升配电网可靠性，随后考虑响应调度的不确定性对各响应资源的所需容量的影响分析。最后通过序贯蒙特卡洛模拟法对改进的 RBTS BUS 6 系统节点系统的进行算例分析，验证了所提方法的有效性。

1 激励型需求响应

根据用户响应控制方式，激励型 DR 项目分两类：第一类可调度响应，即调度中心通过远程控制装置参与 DR 项目的直接负荷控制（direct load control, DLC）、第二类不可调度响应，即用户自己决定是否参与 DR 项目的可中断负荷（interruptible load, IL）和紧急需求响应（emergency demand response, EDR）等。

DLC 响应一般调度中心依据申报容量以及配电网系统运行状态通过远程控制装置直接调用。对电动汽车、储能设备等具有双向互动能力的负荷，DLC 在满足用户自身约束前提下实现电量的增减，获得相应的电量补偿和容量补偿。电量补偿为阶梯形上升曲线，如图 1 所示。对于空调、热水器等大功率电器设备，只能进行设备负荷切除获取响应的电量补偿。

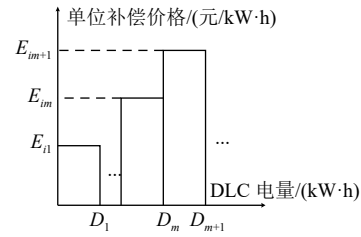


图 1 直接负荷控制 DLC 报价曲线

Fig. 1 The DLC bidding curve of direct load control

DLC 的调度成本：

$$B_{DLC} = \sum_{i \in DLC, i=1}^{N_D} B * D_i^{DLC} + \left(\sum_{i \in DLC, i=1}^{N_D} \sum_{m=1}^{N_m} E_{im}^+ d_{im}^+ + \sum_{i \in DLC, i=1}^{N_D} \sum_{m=1}^{N_m} E_{im}^- d_{im}^- \right) \quad (1)$$

式中： B_{DLC} 为 DLC 的调度成本； B 为用户的单位响应容量成本； D_i^{DLC} 为 DLC 用户 i 的响应上报容量； E_{im}^+ 、 E_{im}^- 分别为用户第 m 分段的增减电量单位成本； d_{im}^+ 、 d_{im}^- 分别为用户第 m 分段的增减电量； N_D 、 N_m 分别为 DLC 用户数、分段报价曲线的分段数。

IL 与 EDR 采用电量补偿机制激励用户参与响应，用户根据自身的用电习惯及经济利益等因素决定是否参与响应，这导致响应具有一定的不确定性。IL 设有相应的惩罚机制，对未按时履行负荷削减或中断的用户进行相应的经济惩罚。EDR 是用户自愿参与的响应，没有惩罚机制。在同等电量补偿机制下 IL 与 EDR 相比，IL 用户有更高的响应率。

传统的用户响应模型中，负荷的削减量为一种确定性量，忽略了人的行为本身具有不确定性因素。根据消费者心理学原理 [22]，激励水平的高低直接影响负荷响应预测误差值，随着激励水平的提高，负荷响应量的预测误差随之降低，即激励水平越高，负荷响应预测的不确定性越小。因此，在 IL 与 EDR 响应模型中，本文引入 Logistic 函数 [23] 描述用户需求响应的不确定性。基于 Logistic 函数的不确定性需求响应机理如图 2。

Logistic 函数形式：

$$\lambda(x) = \frac{c}{1 + e^{-(x-d)/u}} + b \quad (2)$$

式中： $\lambda(x)$ 为电力用户的削负荷率； x 为响应的激励水平； c 表示函数阈值跨度范围； d 为响应区激励水平中点； b 为可变参数。

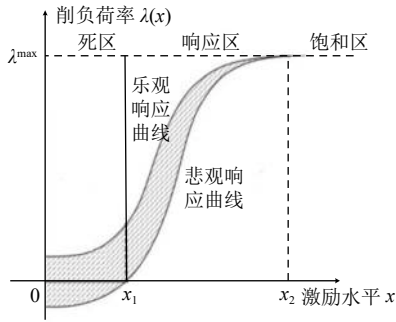


图2 不确定性需求响应机理

Fig. 2 The response mechanism of uncertainty demand

图2中,当激励水平太低时,不足以调动用户参与响应的积极性,即此部分为响应死区。当激励水平足够大时,用户往往受到利益的驱使积极参与到响应中,即为响应区。 $\lambda^{up}(x)$ 对应乐观响应曲线, $\lambda^{down}(x)$ 对应悲观响应曲线,本文中实际响应曲线取二者的平均值。

2 基于模糊C均值聚类的需求响应资源聚类模型

激励型DR的核心是通过激励机制促使电力用户积极响应调度需求。电力部门通常是与电力用户相签订的合同分配电力用户的负荷削减及时间。对于电力大用户而言,削减负荷造成的经济损失可能会导致用户不能完成合同规定的负荷削减量。对于小型电力用户,由于用电量较少且用电时间具有随机性,履行需求响应合同具有一定困难。其违约行为对激励型需求响应的实施造成影响。

本文采用模糊C均值聚类(fuzzy C-means clustering, FCM)方法以需求响应资源样本自身各种特点分量构建向量空间,通过距离计算实现样本聚类^[24]。通过聚类实现需求响应资源样本在不同时间段响应积极性的划分。

需求响应资源的向量表现形式:

$$X = (C_i, C_j, C_k, S, \Gamma, F_{a1}, F_{b1}, F_{a2}, F_{b2}) \quad (3)$$

式中: C_i 为用户的降负荷能力; C_j 为用户的升负荷能力; C_k 为用户申报响应容量; S 为用户参与响应的速度; Γ 为电力公司向用户提前通知的时长; F 为用户的负荷曲线特征; 负荷曲线特征 F 是由用户的负荷曲线进行离散傅里叶变换获得公式(4)如下:

$$\begin{cases} p(n) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2kn\pi}{N}\right) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin\left(\frac{2kn\pi}{N}\right) \\ a_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(n) \cos\left(\frac{2kn\pi}{N}\right) \quad k \geq 0 \\ b_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(n) \sin\left(\frac{2kn\pi}{N}\right) \quad k \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

基于模糊C均值聚类的需求响应资源聚类过程主要分为以下4个步骤:

1) 初始化数据集。依据时间节点,将资源进行初步分类。本文考虑不同时间对响应资源的要求,将资源分为6个部分,多时段易响应用户、早峰易响应用户、午高峰易响应用户、晚高峰易响应用户、惰性响应用户、储能响应设备。参与DLC用户(如空调、热水器单向切负荷)为可调度负荷由调度中心直接控制,这一类响应负荷可划分为多时段易响应用户。

2) 初始化隶属度数组。在确定 n 类响应资源分类数为 c 的情况下,隶属度数组矩阵 $U = [\mu_{ij}]$ 的阶数为 $c \times n$, μ_{ij} 表示为响应资源 x_j 属于分类 c_i 的隶属度。在初始化过程中, μ 的值为1或0。 $\mu_{ij} = 1$ 时,响应资源 x_j 与分类 c_i 相关,否则为不相关。切初始化隶属度数值 μ_{ij} 满足:

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

3) 更新聚类中心 $\bar{c}_i$ 以及隶属度数组:

$$\bar{c}_i = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j \mu_{ij}^2)}{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^2} \quad (6)$$

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|x_j - \bar{c}_i\|}{\|x_j - \bar{c}_k\|} \right)^2} \quad (7)$$

4) 判断是否满足精度:

$$\|U^k - U^{k-1}\|^2 = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n [\mu_{ij}^k - \mu_{ij}^{k-1}]^2 \leq \varepsilon \quad (8)$$

考虑用户在不同时间段响应积极程度的影响,电网调度依据配电网故障发生及修复时间节点的不同,选取响应积极度较高的用户确保响应资源的高效利用。响应资源调度优先级:第一级储能响应设备;第二级早峰易响应用户、午高峰易响应用户、晚高峰易响应用户;第三级多时段易响

应用户；第四级惰性响应用户。

3 激励型 DR 参与两阶段响应调度的配电网可靠性评估方法

3.1 激励型 DR 参与的两阶段响应调度策略

配电网故障状态下，必要的负荷削减或中断响应策略确保负荷转供时电力传输线路功率不越线，含储能、风电的孤岛微网可以持续稳定为电力用户供电。

在满足孤岛运行方式下，使响应资源得到灵活、充分的利用。本文结合日内、实时两阶段调度特性以风电机组出力不确定性，考虑采用基于不同时间尺度激励型 DR 参与的两阶段优化调度策略，包含故障期间 IL、EDR 储能资源参与的第一阶段响应调度，实时 DLC（不包含储能）参与的第二阶段平衡响应调度。假设微网处于孤岛运行状态，故障期间通过第一阶段响应资源储能协同消纳概率较大的风电出力，在第一阶段调度基础上灵活修正增减负荷（第二阶段平衡响应调度）用于平衡 IL、EDR 响应以及风电出力的不确定性。

3.2 激励型 DR 参与两阶段响应调度模型

本文在激励型需求响应调度分配中，以发电成本与激励型需求响应成本之和最小为目标函数。

1) 目标函数：

$$\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{n_1} B_i P_{Gi} + \sum_{i=1}^{n_2} B_{ILi} \Delta P_{ILi} + \sum_{i=1}^{n_3} B_{EDRi} \Delta P_{EDRi} + B_{DLC} \right) \quad (9)$$

式中： B_i 为各类电源的发电成本； B_{ILi} 为 IL 调度响应成本； B_{EDRi} 为 EDR 调度响应成本； B_{DLC} 为 DLC 调度响应成本； n_1, n_2, n_3 分别表示 IL 资源用户总数、EDR 用户数量、参与需求响应的用户数； P_G 为各电源的有功出力； ΔP 参与响应的电力用户负荷有功功率削减量； T 为故障预计修复时长。

2) 等式约束条件：

$$P_{Gi} - (P_{Li} - \Delta P_{ILi} - \Delta P_{EDRi} - \Delta P_{DLCi} - \Delta P_{LOSSi}) = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

$$P_{Di} = P_{Li} - \Delta P_{ILi} - \Delta P_{EDRi} - \Delta P_{DLCi} - \Delta P_{LOSSi} \quad (11)$$

式中：

$$\Delta P_{DLCi} = \sum_{d \in DLC, i=1}^{N_D} \sum_{m=1}^{N_m} E_{dm}^+ d_{dm,t}^+ + \sum_{d \in DLC, i=1}^{N_D} \sum_{m=1}^{N_m} E_{dm}^- d_{dm,t}^- \quad (12)$$

$$\Delta P_{ILi} = A \lambda_{ILi} P_{Li} \quad (13)$$

$$\Delta P_{EDRi} = A \lambda_{EDRi} P_{Li} \quad (14)$$

P_{Li} 为用户原负荷； P_{Di} 为用户参与响应的用户负荷； A 为用户选择本质由 0-1 构成的矩阵，表征用户在故障期间的特定时间段是否可以参与需求响应，用户参与响应时数值为 1，否则为 0。

3) 不等式约束条件：

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (15)$$

$$-P_{in,max} \leq P_{Ci} \leq P_{out,max} \quad (16)$$

$$Q_0 S_{SOC,min} \leq Q \leq Q_0 S_{SOC,max} \quad (17)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (18)$$

$$|S_{ij}| \leq S_{ij}^{\max} \quad (19)$$

$$\Delta P_{ILi} \leq \lambda_{ILi} P_{Li} \quad (20)$$

$$\Delta P_{EDRi} \leq \lambda_{EDRi} P_{Li} \quad (21)$$

$$D_{DLCi}^- \leq \Delta P_{DLCi} \leq D_{DLCi}^+ \quad (22)$$

$$\sum_{i=1} \Delta P_{ILi} + \sum_{i=1} \Delta P_{DLCi} \leq D_{DR}^{\max} \quad (23)$$

$$0 \leq \Delta P_{LOSSi} \leq P_{Li} \quad (24)$$

式中： $P_{out,max}$ ， $P_{in,max}$ 分别为储能的最大充放电功率； P_{Ci} 为储能实际出力； Q_0 为储能额定容量； S_{SOC} 为储能的荷电状态； U 为节点电压幅值； S_{ij} 为线路的传输容量。 D_{DLCi}^- 与 D_{DLCi}^+ 为 DLC 用户申报的削负荷、增负荷容量； $D_{DR}^{\max}$ 为所有用户的激励性需求响应总申报容量。

3.3 计及激励性 DR 不确定性的响应调度

3.2 节表述的响应调度模型，将 IL、EDR 两类响应资源看作确定性量处理，实际上 IL、EDR 是基于用户自愿的原则参与响应，因此这两类资源的响应量存在响应的不确定性。本节着重分析 IL、EDR 的不确定性影响，将受调度控制的 DLC 作为平衡 IL、EDR 不确定性的主要手段。IL、EDR 用户对负荷削减率预测响应不确定性范围：

$$\lambda_{Li}^{up} \geq \lambda'_{Li} = \lambda_{Li} + \xi_1 \geq \lambda_{Li}^{down} \quad (25)$$

$$\lambda_{EDRi}^{up} \geq \lambda'_{EDRi} = \lambda_{EDRi} + \xi_2 \geq \lambda_{EDRi}^{down} \quad (26)$$

式中： λ' 为用户实际的响应负荷削减率； ξ_1, ξ_2 为不确定性影响因素的随机数，且 ξ 的取值满足式(25)和式(26)的不等式约束； $\lambda^{up}, \lambda^{down}$ 分别表示不同响应资源在特定激励水平下用户响应负荷削减率的上下限。

不同响应资源实际负荷削减量如式(27) - (28)所示：

$$\lambda_{ILi}^{up} P_{Li} \geq \Delta P'_{ILi} = (\lambda_{ILi} + \xi_1) P_{Li} \geq \lambda_{ILi}^{down} P_{Li} \quad (27)$$

$$\lambda_{EDRi}^{up} P_{Li} \geq \Delta P'_{EDRi} = (\lambda_{EDRi} + \xi_2) P_{Li} \geq \lambda_{EDRi}^{down} P_{Li} \quad (28)$$

将 IL、EDR 的不确定性影响融入到 3.2 章节建立的激励型 DR 参与两阶段优化调度模型中，其中目标函数仍然以发电成本与激励型需求响应成本之和最小。同时需要在约束条件中加入 IL、EDR 的不确定性区间约束如式(27) - (28)，以确保实际的用户响应量处于响应区间内。

DLC 由调度直接控制，作为消纳调度不确定性资源的后备手段。DLC 资源响应量相对较少，本文暂不考虑 DLC 资源投入响应的最大限度，只考虑 IL、EDR 资源极端响应偏差下，DLC 满足自身约束来平衡 IL、EDR 响应及风电出力的不确定性。以 IL、EDR 响应位于不确定区间下限为例（位于上限时与下限类似，只需要变化相应的约束条件）。式(11) IL、EDR 响应量处于不确定性区间下限的极端情况，其表达式为：

$$\Delta P_{ILi} = A \lambda_{ILi}^{down} (x_{ILi}) P_{Li} \quad (29)$$

$$\Delta P_{EDRi} = A \lambda_{EDRi}^{down} (x_{EDRi}) P_{Li} \quad (30)$$

式(20)与式(21)加入相应的不确定性区间下限，其表达式为：

$$\Delta P_{ILi} \leq \lambda_{ILi}^{down} P_{Li} \quad (31)$$

$$\Delta P_{EDRi} \leq \lambda_{EDRi}^{down} P_{Li} \quad (32)$$

3.4 配电网可靠性分析过程

本文基于序贯蒙特卡洛模拟法对改进 RBTS Bus6 系统进行可靠性计算[16-18]，将所有元件的时序随机运行状态时间序列进行合并可得系统运行状态。为提高配电网可靠性指标，在不同的时间段、不同的系统运行状态考虑激励型 DR 不确定因素参与的两阶段响应优化调度，进一步减少切负荷量的目的。评估激励型 DR 引起的负荷水平变化对配电网可靠性影响的流程图见图3：

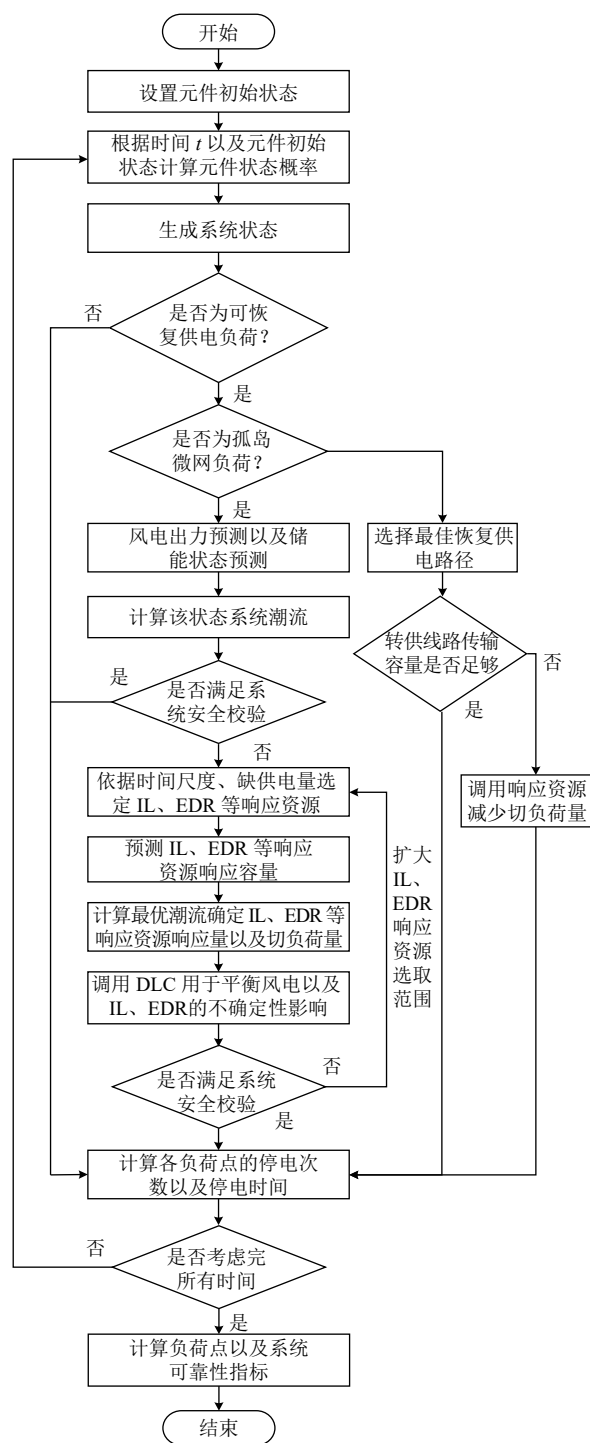


图3 考虑不确定性的 DR 的配电网可靠性评估流程图

Fig. 3 The flow chart of reliability evaluation of DR distribution network with uncertainty considered

4 算例分析

4.1 算例参数

算例分析采用改进 RBTS Bus6 系统，系统中

包含连接在 33 kV 和 11 kV 母线上的 4 条主馈线 $F_1 \cdots F_4$ ，64 条馈线以及 38 台变压器。在该系统馈线 49 上接入储能和风电，并馈线 49 下游区域构成微电网。本文元件的可靠性参数如表 1 所示，不考虑断路器、隔离开关、联络开关（N/O）故障影响，默认其 100% 可靠动作。风电预测 [25] 场景见图 4 所示，其中系列表示不同场景下风力发电预测出力功率。负荷参数参考文献 [14]。

表 1 元件可靠性参数

Table 1 Reliability parameters of components

元件	故障率	修复率	修复时间
线路	0.065	0.2	5
变压器	0.015	0.005	200
风电机组	0.25	0.05	20
储能系统	0.025	0.1	10

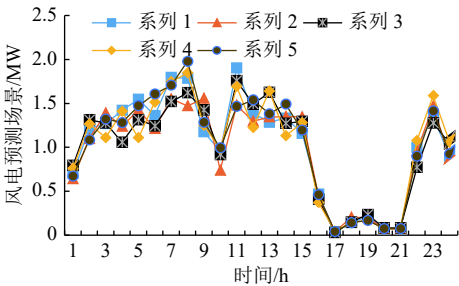


图 4 风电预测场景

Fig. 4 Scene of forecasted wind power generation

4.2 结果分析

4.2.1 需求响应资源聚类

本文设置用户负荷参与激励性 DR 响应的类别如表 2 所示。各种响应方式下报价有所不同，DLC 采用分段报价方式，一般负荷不考虑容量成本，IL 与 EDR 采用固定报价方式。

表 2 参与激励性 DR 负荷分类

Table 2 Classification of incentive loads participating DR

激励型DR	负荷点编号
DLC	LP1.LP10.LP12.LP30.LP31.LP36.LP38
IL	LP5.LP9.LP16.LP28.LP33
EDR	LP6.LP13.LP35.LP37.LP40

根据 C_i 、 C_j 、 C_k 、 S 、 Γ 、 F 等参数采用文中第 2 节的聚类算法，依据早中晚三个时间段不同的调度需求，将需求响应资源分为早峰易响应用户、午高峰易响应用户、晚高峰易响应用户、多

时段易响应用户、惰性响应用户等种类型如表 3 所示。为了提高用户响应完成率，在故障发生的不同时间段，依据上文提到的调度优先级，依次对用户发出响应信号。

表 3 响应资源的聚类

Table 3 Clustering of response resources

	负荷点编号
早高峰易响应用户	LP16.LP35
午高峰易响应用户	LP1.LP5.LP9.LP10.LP12.LP40
晚高峰易响应用户	LP6.LP30.LP31
多时段易响应用户	LP13.LP33.LP36.LP38
惰性响应用户	LP28.L37

根据以上参数，采用 MATLAB YALMIP 工具箱和 CPLEX12.1 对需求响应调度模型求解，获得不同用户响应类型的实际响应量，将结果带入配电网可靠性计算中。

4.2.2 不考虑响应资源的不确定性的可靠性评估

不考虑 IL、EDR 不确定的影响，分析本文响应调度模型对配电网可靠性的影响。为说明不同需求响应对配电系统可靠性的影响，选取的运行方案模式定义如表 4 所示，其中方案 4 为本文响应调度方案。

表 4 DR 参与模式

Table 4 DR participation mode

方案	定义
方案1	无微电网及无激励性DR
方案2	仅含微电网
方案3	含微电网及IL、EDR
方案4	含微电网及IL、EDR、DLC

为反映 IL、EDR、DLC 系统故障下具体效用，本文采用系统微电网孤岛运行下的响应调度方案四进行说明，DR 调度方案示意图见图 5。图中柱状为 IL、EDR 负荷增减情况，曲线为不同风电场景下的 DLC 调用情况，DLC-1 为风电场景系列 1 下的 DLC 实际电量调用量，其它曲线以此类推。

结合图 4、5 可以看出微电网孤岛运行时，IL 和 EDR 总响应负荷变化幅度与风电功率输出值存在一定的关联，在 1:00-8:00 时间段负荷处于低谷风电出力比较大，为避免弃风，应适当增加用户负荷。在 13:00-21:00 时间段负荷处于高峰期风电出力比较小，微电网功率输出不足，通过响

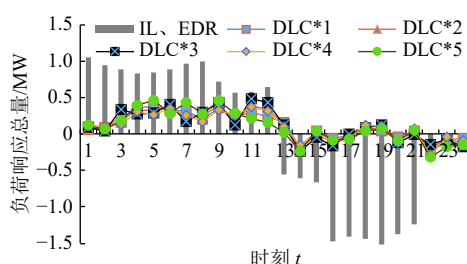


图5 DR调度

Fig. 5 DR scheduling

应削减负荷避免切负荷造成用户停电。风电功率输出值直接影响系统所带负荷值,系统通过响应调度增减负荷避免弃风和切负荷。对于DLC,考虑风电预测不确定性,调用量与风电功率输出值无明显关联,其值取决于风电预测误差值,与图4中不同场景下的风电预测幅度相关。

选取部分典型负荷进行可靠性分析,如负荷LP1、LP11、LP20、LP30、LP40。其中LP1、LP11为转供负荷,LP20为普通负荷,LP30、LP40为微电网负荷。故障率和停电时间指标如图6所示。

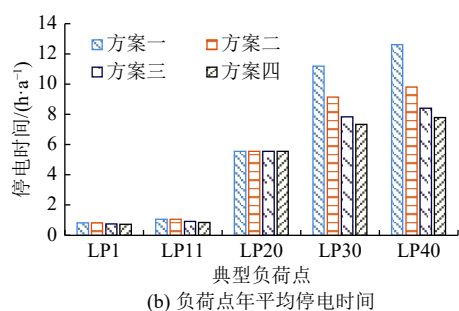
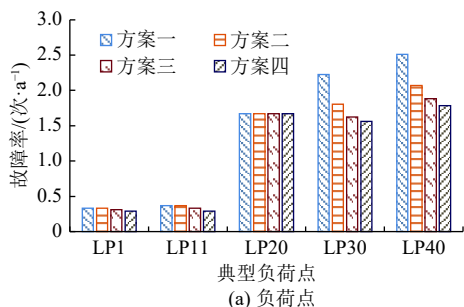


图6 典型负荷点可靠性指标

Fig. 6 Reliability index of typical load point

从图6中可以看出,对比LP1、LP11两个负荷点的故障率和停电时间,LP11的故障率和停电时间下降幅度较大,这是由于LP1、LP11距离联络开关(N/O)的位置不同,LP1在断路器 F_1 处

发生故障时恢复供电,而LP11恢复供电的可能性更高,其次恢复供电的范围与联络开关的传输容量有较大关系,负荷点的故障率和停电时间与联络线路的传输容量关系本文就不再探讨。对于LP22等不能恢复供电的普通负荷,上述4种方案均不能够降低其故障率和停电时间。对于P30、LP40微电网负荷,在有用户参与响应的负荷点故障率和停电时间均有较好的改善。

表5为改进RBTS Bus6系统的可靠性评估结果。由图6和表5计算结果得出以下结论:

表5 配电系统可靠性指标

Table 5 Reliability index of power distribution system

方案	SAIFI	SAIDI	ASAI	EENS
方案1	1.0066	3.9059	99.881	62.707
方案2	0.9857	3.6017	99.915	56.403
方案3	0.9674	3.4616	99.932	55.842
方案四	0.9562	3.4031	99.939	55.536

1) 微电网中采用适当的激励性DR响应策略可以有效提高微电网中负荷点的可靠性指标。其中不可调度(IL、EDR)负荷在提升可靠性指标性能上要优于可调度(DLC)。

2) 通过转供方式恢复供电的负荷,其可靠性指标受转供线路的传输容量影响,传输容量越大,激励性DR响应发挥的功效越小。

3) 方案1和方案2结果对比:采用微电网结构能有效降低负荷点的故障率和停运时间,提升整个配电系统的可靠性水平。

4) 方案2、方案3和方案4:功率出力不变的情况下,实施不可调度(IL、EDR)进行负荷削减策略提升配电系统可靠性的幅度较大。这是由于不可调度(IL、EDR)响应资源的容量大于可调度(DLC)响应资源的容量。

4.2.3 考虑响应资源的不确定性的可靠性评估

本节主要考虑一定激励水平下IL和EDR的响应负荷预测不确定性的可靠性分析,通过可调度负荷DLC参与响应的方式平衡负荷预测不确定性的影响。设定 $\lambda = (\lambda^{up} - \lambda^{down})/2$ 为IL和EDR总负荷响应的不确定性水平,总响应不确定区间以负荷预测值 λ 倍的幅度围绕响应负荷预测值波动,即 $[-\lambda P_{Li}, \lambda P_{Li}]$ 。图7为不同响应不确定性水平下的DLC响应调度所需容量分析。

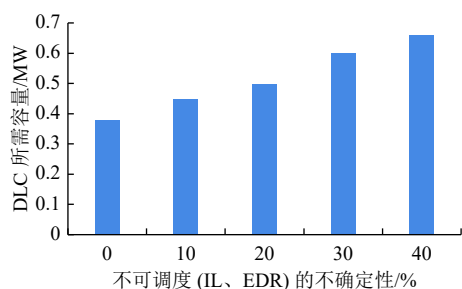


图 7 响应的的不确定性水平对 DLC 的调用容量影响

Fig. 7 The influence of response's uncertainty level on call capacity of DLC

由图 7 可以看出, 随着 IL 和 EDR 总负荷响应不确定性水平的增加, DLC 响应调度所需容量也随之增加, 综合整体调度结果发现, 在满足 DLC 响应调度容量充足的条件下, 未增加额外切负荷量。通过确保 DLC 足够的容量应对 IL 和 EDR 参与响应的随机波动, 说明可调度负荷 DLC 可以有效降低不可调度响应负荷的负荷预测不确定性的影响。在 $\lambda = 0$ 时, DLC 响应的调用容量不为零, 此调用容量是为了满足平衡风电预测不确定性。

5 结论

通过算例分析, 配电网引入激励型 DR 参与响应可以有效减低部分负荷点的故障率及停电时间, 结合微电网激励型 DR 参与的两阶段响应调度策略能有效平衡风电功率预测误差及不可调度 (IL、EDR) 的不确定性, 减少功率出力不足导致切负荷量, 提升了配电网系统的可靠性水平, 验证了本文模型的有效性。本文只研究了激励型 DR, 没有涉及价格型 DR 的研究, 下一步需要结合多种响应类型的协调调度策略开展研究, 进一步提升配电系统的可靠性。

参考文献

- [1] 张晶, 孙万珺, 王婷. 自动需求响应系统的需求及架构研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4070 - 4076.
ZHANG Jing, SUN Wanjun, WANG Ting. Research on the demand and architecture of automatic demand response system [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015, 35(16): 4070 - 4076 (in Chinese).
- [2] 赵鸿图, 朱治中, 于尔铿. 电力市场中用户基本负荷计算方法与需求响应性能评价 [J]. 电网技术, 2009,

33(19): 72 - 78.

ZHAO Hongtu, ZHU Zhizhong, YU Erkeng. Calculation method of user basic load and evaluation of demand response performance in power market [J]. Grid technology, 2009, 33(19): 72 - 78 (in Chinese).

- [3] Wang J, Biviji M, Wang W M. Case studies of smart grid demand response programs in North America [C]//2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Hilton Anaheim, CA: IEEE, 2011: 1-5.
- [4] Chen Yizhong, Li Jing, He Li. Tradeoffs in cost competitiveness and emission reduction within microgrid sustainable development considering price-based demand response [J]. The Science of the total environment, 2019.
- [5] Houman Jamshidi Monfared, Ahmad Ghasemi, Abdollah Loni, et al. A hybrid price-based demand response program for the residential micro-grid [J]. Energy, 2019: 185.
- [6] 吴亚伟. 参与需求响应的智慧家庭能量优化管理策略研究 [D]. 北京交通大学, 2019.
WU Yawei. Research on energy management strategies for smart homes participating in demand response [D]. Beijing Jiaotong University, 2019(in Chinese).
- [7] 彭文昊, 陆俊, 冯勇军, 王星星, 祁兵, 崔高颖. 计及用户参与不确定性的需求响应策略优化方法 [J]. 电网技术, 2018, 42(05): 1588 - 1594.
PENG Wenhao, LU Jun, FENG Yongjun, WANG Xingxing, QI Bing, CUI Gaoying. Demand response strategy optimization method considering user participation uncertainty [J]. Grid Technology, 2018, 42(05): 1588 - 1594 (in Chinese).
- [8] 张智晟, 于道林. 考虑需求响应综合影响因素的RBF-NN短期负荷预测模型 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(06): 1631 - 1638+1899.
ZHANG Zhisheng, YU Daolin. RBF-NN short-term load forecasting model considering the comprehensive influencing factors of demand response [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 38(06): 1631 - 1638+1899 (in Chinese).
- [9] Per-Anders Langendahl, Helen Roby, Stephen Potter, Matthew Cook. Smoothing peaks and troughs: Intermediary practices to promote demand side response in smart grids [J]. Energy Research & Social Science, 2019, 58.
- [10] Madaeni S H, Sioshansi R. Using demand response to improve the emission benefits of wind [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1385 - 1394.
- [11] 南思博, 李庚银, 周明, 夏勇. 智能小区可削减柔性负荷实时需求响应策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 42 - 50.
NAN Sibao, LI Gengyin, ZHOU Ming, XIA Yong. Real-time demand response strategy for smart communities

- to reduce flexible loads [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(10): 42–50 (in Chinese).
- [12] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 王珂. 计及需求侧资源的大规模风电消纳随机机组组合模型 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3714–3723.
LIU Xiacong, WANG Beibei, LI Yang, WANG Ke. Large-scale wind power consumption stochastic unit combination model considering demand-side resources [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2015, 35(14): 3714–3723 (in Chinese).
- [13] KIRAN P. B. S, PINDORIYA N.M.. Study of consumer benefit functions for demand response algorithm [R]. 2016 National Power Systems Conference (NPSC), Bhubaneswar, 2016: 1-6.
- [14] 王玉梅, 吴志明. 基于储能运行策略的孤岛型微网可靠性分析 [J]. 电源学, 2018, 16(01): 112–118.
WANG Yumei, WU Zhiming. Reliability analysis of islanding microgrid based on energy storage operation strategy [J]. *Power science*, 2018, 16(01): 112–118 (in Chinese).
- [15] 雷敏, 魏务卿, 曾进辉, 莫霜叶. 考虑需求响应的负荷控制对供电可靠性影响分析 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(10): 53–59.
LEI Min, WEI Wuqing, ZENG Jinhui, MO Shuangye. Analysis of the influence of load control on power supply reliability considering demand response [J]. *Power System Automation*, 2018, 42(10): 53–59 (in Chinese).
- [16] 周保荣, 黄廷城, 张勇军. 计及激励型需求响应的微电网可靠性分析 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 70–78.
ZHOU Baorong, HUANG Tingcheng, ZHANG Yongjun. Reliability analysis of microgrid considering incentive demand response [J]. *Power System Automation*, 2017, 41(13): 70–78 (in Chinese).
- [17] VIDYAMANI T, K, SWARUP S. Demand response based on utility function maximization considering time-of-use price [R]. 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Bucharest, Romania, 2019: 1-5.
- [18] 赵洪山, 王莹莹, 陈松. 需求响应对配电网供电可靠性的影响 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(17): 49–55.
ZHAO Hongshan, WANG Yingying, CHEN Song. The effect of demand response on the reliability of distribution network power supply [J]. *Power System Automation*, 2015, 39(17): 49–55 (in Chinese).
- [19] 张凯恒, 徐青山, 杨斌, 等. 基于多面体不确定集的需求响应不确定性研究 [J]. *电力需求侧管理*, 2019, 21(05): 52–56.
ZHANG Kaiheng, XU Qingshan, YANG Bin, *et al.* Demand response uncertainty research based on polyhedron uncertain set [J]. *Electricity Demand Side Management*, 2019, 21(05): 52–56 (in Chinese).
- [20] TALARI S, SHAFIE-KHAH M, WANG F, *et al.* Coordinated scheduling of demand response aggregators and customers in an uncertain environment [R]. 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), Dublin, 2018: 1-7.
- [21] 周丹, 任志伟, 黄弘扬, 等. 计及需求响应不确定性的主动配电网调度优化模型 [J]. 储能科学与技术, 2019, 8(04): 637–644.
ZHOU Dan, REN Zhiwei, HUANG Hongyang, *et al.* An active distribution network dispatch optimization model considering the demand response uncertainty [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(04): 637–644 (in Chinese).
- [22] 孙宇军, 李扬, 王蓓蓓, 等. 计及不确定性需求响应的日前调度计划模型 [J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2708–2714.
SUN Yujun, LI Yang, WANG Beibei, *et al.* Day-scheduling planning model considering uncertain demand response [J]. *Power Grid Technology*, 2014, 38(10): 2708–2714 (in Chinese).
- [23] Peng Li, Siben Li, Tingting Bi, *et al.* Telecom customer churn prediction method based on cluster stratified sampling logistic regression [R]. International Conference on Software Intelligence Technologies and Applications & International Conference on Frontiers of Internet of Things 2014, Hsinchu, 2014: 282-287.
- [24] 王冬, 王拓, 王旗, 等. 一种面向需求响应资源的模糊聚类算法 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4056–4063+4311.
WANG Dong, WANG Tuo, WANG Qi, *et al.* A fuzzy clustering algorithm for demand response resources [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2018, 38(14): 4056–4063+4311 (in Chinese).
- [25] 颜拥, 文福拴, 杨首晖, Iain MACGILL. 考虑风电出力波动性的发电调度(英文) [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(06): 79–88.
YAN Yong, WEN Fushuan, YANG Shouhui, Iain MACGILL. Power generation scheduling considering wind power output volatility (English) [J]. *Power System Automation*, 2010, 34(06): 79–88 (in Chinese).

收稿日期: 2020-03-15

作者简介:

范宏(1978), 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为电网规划、无功优化、智能电网、电力系统仿真的研究, E-mail: 304187145@qq.com;

邓剑(1992), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网不停电作业以及配电网可靠性评估的研究, E-mail: dengjian1992@icloud.com。