

基于博弈思想的需求响应视角下的 主动配电网故障恢复

杨丽君, 曹玉洁, 梁景志, 杨 博, 安立明

(电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 燕山大学, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:为实现主动配电网故障后失电负荷的最大限度恢复,并考虑供电侧与用户侧利益均衡,本文基于博弈的思想,提出需求响应视角下的主动配电网故障恢复策略。在需求响应视角下,供电侧和用户侧建立非合作动态博弈模型优化故障时的峰谷分时电价,抑制高峰负荷需求,减少用电高峰时故障恢复的压力。在主动配电网故障恢复中,基于优化后的负荷曲线,供电侧和用户侧建立合作博弈模型,双方以共同的收益函数作为目标,利用馈线、电动汽车、分布式电源和可控负荷进行协同恢复。分别采用逆向回归算法和改进的蚁群算法求解以上两个博弈模型。本文以 IEEE33 节点模型和某实际配电网为例,分别对小面积失电和大面积失电情况进行故障恢复求解,验证了本文所提策略的有效性。

关键词:主动配电网;故障恢复;博弈思想;逆向回归算法;改进的蚁群算法

DOI: 10.12067/ATEEE1705089 **文章编号:** 1003-3076(2018)07-0051-10 **中图分类号:** TM732

1 引言

配电网恢复重构是保障配电网可靠、高效运行的核心能力和有效手段,也是主动配电网自愈功能的主要任务。配电网恢复重构指在满足一定约束条件下,通过改变相关开关的组合状态得到优秀的恢复方案,从而最大限度恢复非故障停电区域负荷^[1,2]。

主动配电网(Active Distribution Network, ADN)的概念由 2008 年国际大电网会议 C6.11 项目组提出,其最显著的特征是具有一定可调控的分布式资源(Distributed Energy Resource, DER)(如分布式发电、储能、电动汽车、柔性负荷等)^[3,4]。如何通过主动控制和主动管理来增强配电网故障恢复的能力,以保证电网安全、经济和高效运行是目前主动配电网研究的重要内容。已有文献开展了对主动配电网故障重构的研究^[5-8]。文献[7]利用场景分析法分割新能源和电动汽车(Electrical Vehical, EV)出力的波动,通过改进的生物地理学优化算法解决新能源和电动汽车接入的配电网重构问题;文献[8]建

立了一种基于 IEC61850 的主动配电网自恢复系统。电力用户通过参与需求响应(Demand Response, DR)正逐步由被动向主动方向发展,成为维持电网安全、稳定及优质运行的重要参与者。峰谷分时电价是一种有效的需求响应方式,其行之有效的削峰填谷作用有利于配电网的重构。文献[9]考虑峰谷分时电价对用电负荷的影响,建立了综合考虑各种 DG 出力不确定性的配电网重构模型,利用量子进化算法分时段求解,该文献为研究故障时的分时电价影响下的配电网故障恢复提供了思路。

目前,分时电价的制定模型可归纳为两大类:基于用户价格响应的模型^[10,11]和基于发电侧和供电侧联动的模型^[12]。前者从需求侧的角度出发,对电价进行调整、优化;后者主要以发电侧和供电侧为主,没有体现需求侧管理的作用。文献[10]采用需求弹性来分析用户的用电量随电价的变化情况,以峰谷差最小为目标,建立峰谷分时电价的有约束非线性规划模型;文献[11]结合分类用户不同程度的需求价格响应,构建了一套基于模糊需求和用户分

收稿日期: 2017-05-31
基金项目: 国家自然科学基金项目(61573302)
作者简介: 杨丽君(1972-),女,吉林籍,教授,博士,研究方向为电力系统恢复控制;
曹玉洁(1991-),女,河北籍,硕士研究生,研究方向为主动配电网故障恢复(通讯作者)。

类响应程度下的最优峰谷分时电价设计模型。文献[10,11]的定价方法都主要针对电价对用户的影响作用,忽略供电侧(电网)的利益,不利于调动电网的积极性。因此一种可以均衡用户侧与供电侧利益的故障下峰谷分时电价制定方法值得研究。

博弈论应用背景宽泛,在电价和故障恢复方面都有应用。文献[13]建立了微电网中用户侧和供电侧的博弈分时电价模型,严格证明了分时电价模型的 Nash 均衡存在,可为本文研究配电网的分时电价模型提供借鉴;文献[14]将博弈论和多代理系统应用于船舶的电力系统恢复,将船舶电力系统不同区域代理作为博弈参与者,将船舶的故障重构转换为各个代理之间的合作-竞争问题。文献[13,14]为本文研究配电网分时电价和故障恢复提供了新的求解思路。

基于博弈思想,本文提出了需求响应视角下的主动配电网故障恢复策略,设计了基于博弈思想的故障时峰谷分时电价模型和基于博弈思想的主动配电网故障恢复模型。倘若在负荷高峰时配电网发生故障,需求侧积极响应故障时的电价,减少负荷高峰时的用电需求,降低高峰时供电恢复的压力。基于优化后的负荷曲线,供电侧和用户侧之间开展合作博弈,将双方总收益函数作为故障恢复的目标,运用改进蚁群算法求解。最后经过小面积失电和大面积失电恢复算例验证,基于博弈思想的需求响应视角下的主动配电网故障恢复策略可在实现失电负荷最大化恢复的同时,确保用户侧和电网侧利益均衡。

2 基于博弈思想的故障下分时电价模型

为便于叙述,下文称故障时的分时电价为优化后的电价。

2.1 优化电价前后供电侧和用户侧利益分析

将一天分为 24h,每天的峰、平、谷时段可能不相邻,高峰时段在平时段电价的基础上上浮比例 Q ,低谷时段在平时段电价的基础上下调比例 Q ,平时段价格为 a_0 ,峰谷电价表示为:

$$a_i = \begin{cases} a_0(1+Q) & i=1 \\ a_0 & i=2 \\ a_0(1-Q) & i=3 \end{cases} \quad (1)$$

式中, i 为时段, $i=1,2,3$ 分别表示峰、平、谷3个时段; a_i 为 i 时段的费率标准(元/(kW·h)); a_0 为基础价(元/(kW·h)); Q 为各个时段相对于基础价上下浮动的费率,是一个百分数。

(1)优化电价前,供电侧与用户侧获利
供电侧购电支出:

$$E_{\text{net}0} = bN \quad (2)$$

供电侧售电收入:

$$I_{\text{net}0} = a_1L_1 + a_2L_2 + a_3L_3 \quad (3)$$

供电侧盈利:

$$M = I_{\text{net}0} - E_{\text{net}0} \quad (4)$$

用户侧购电支出:

$$E_{\text{load}0} = a_1L_1 + a_2L_2 + a_3L_3 = I_{\text{net}0} \quad (5)$$

式中, b 为优化电价前的供电侧购电电价(元/(kW·h)); N 为优化电价前供电侧购电量(kW·h); a_1 、 a_2 、 a_3 为优化电价前峰、平、谷时段的售电电价(元/(kW·h)); L_1 、 L_2 、 L_3 为优化电价前,供电侧在峰、平、谷时相应的售电量(kW·h)。

(2)优化电价后,供电侧与用户侧获利

供电侧购电支出:

$$EE_{\text{net}0} = bN^* \quad (6)$$

供电侧售电收入:

$$II_{\text{net}0} = a_1^*L_1^* + a_2^*L_2^* + a_3^*L_3^* \quad (7)$$

供电侧盈利:

$$MM = II_{\text{net}0} - EE_{\text{net}0} \quad (8)$$

用户侧购电支出:

$$EE_{\text{load}0} = a_1^*L_1^* + a_2^*L_2^* + a_3^*L_3^* = II_{\text{net}0} \quad (9)$$

式中,带有“*”的变量和式(2)~式(5)的变量代表相同的含义,只是带有“*”的变量表示优化电价后的相应变量。

(3)用户侧利益函数与策略集

据需求侧管理的要求,实行优化分时电价机制后尽量减少用户平均购电价。用户侧利益函数为:

$$\min \frac{EE_{\text{load}0}}{L_1^* + L_2^* + L_3^*} \quad (10)$$

用户侧的策略集 $X\{L_1^*, L_2^*, L_3^*\}$ 表示优化后的负荷曲线。

(4)供电侧利益函数与策略集

为了激励供电侧参与电价优化的积极性,尽可能增大供电侧利益,供电侧利益函数为:

$$\max MM \quad (11)$$

供电侧的策略集 $Y\{a_1^*, a_2^*, a_3^*\}$ 表示优化后的电网售电峰谷价。

2.2 优化的峰谷分时电价数学模型

2.2.1 目标函数

若以优化后的负荷曲线为发电部门的调度目标,减少发电侧备用容量,提高机组使用效率,进而

达到节能的目的。则优化目标设定为负荷曲线最大峰负荷最小化,峰谷差值最小化,即

$$\min[\max_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}^*(a_1^*, a_2^*, a_3^*, t)] \quad (12)$$

$$\min\{\lceil \max_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}^*(a_1^*, a_2^*, a_3^*, t) \rceil - \lfloor \min_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}^*(a_1^*, a_2^*, a_3^*, t) \rfloor\} \quad (13)$$

式中, $p_{fi}^*(a_1^*, a_2^*, a_3^*, t)$ 为优化电价后负荷曲线在 t 时刻的负荷值; $\max_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}^*(a_1^*, a_2^*, a_3^*, t)$ 为优化电价后负荷曲线的峰值; $\min_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}^*(a_1^*, a_2^*, a_3^*, t)$ 为优化电价后负荷曲线的谷值。

2.2.2 约束条件

(1)实行峰谷分时电价后,需要保证优化后的负荷曲线峰值低于优化前的负荷曲线峰值,如式(14)所示;优化后的负荷曲线峰谷差小于优化前的负荷曲线峰谷差,如式(15)所示。

$$\max_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}(a_1, a_2, a_3, t) \geq \max_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}^*(a_1^*, a_2^*, a_3^*, t) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \max_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}(a_1, a_2, a_3, t) - \min_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}(a_1, a_2, a_3, t) &\geq \\ \max_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}^*(a_1^*, a_2^*, a_3^*, t) - \min_{0 \leq t \leq 24} p_{fi}^*(a_1^*, a_2^*, a_3^*, t) & \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $p_{fi}(a_1, a_2, a_3, t)$ 为优化电价前负荷曲线在 t 时刻的负荷值。

(2)实行峰谷分时电价优化后,用户的用电方式没有太大的变化,不会因为反应过度导致峰谷漂移、峰谷倒错等现象,即整个博弈行为是理性的,根据文献[15]得到负荷变化范围的合理约束为:

$$0.8L \leq L^* \leq 1.2L \quad (16)$$

(3)以平均购电价来衡量用户满意度,保证平均购电价不上涨,即

$$\frac{EE_{load0}}{L_1^* + L_2^* + L_3^*} \leq \frac{E_{load0}}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (17)$$

(4)为了提高供电侧实施这项措施的积极性,应保证其利益不受损,即

$$M \leq MM \quad (18)$$

2.3 用户响应模型

2.3.1 除EV之外的用户响应模型

在需求侧管理下,实施优化峰谷电价前后除拥有EV用户之外的用户的用电量变化如下:

$$\begin{bmatrix} L_1^* \\ L_2^* \\ L_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 \end{bmatrix} E \begin{bmatrix} \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, $\Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ 为优化电价前后峰、平、谷时段电价的变化; E 为电量电价弹性需求矩阵,充分考虑除EV外的可控负荷和非可控负荷对电价响应。

2.3.2 拥有EV的用户响应

含有EV的用户积极响应需求侧管理,在负荷高峰时期积极参与放电,在负荷低谷时期,进行充电。参考文献[16]EV充放电功率需求模型,得到单辆EV在1天内的充放电功率需求期望曲线,如图1所示。

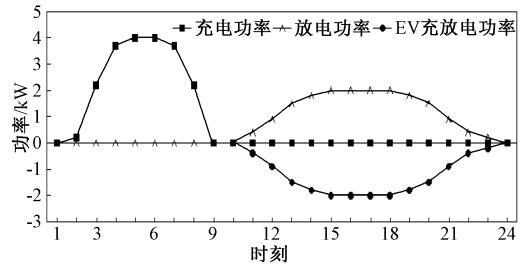


图1 EV在一天内充放电功率需求的期望
Fig.1 Expection of charging and discharging power demand of single EV for one day

2.4 基于博弈思想的故障分时电价均衡求解

该博弈属于非合作动态博弈类型,通常采用逆向回归算法求解。基于博弈论的优化峰谷分时电价制定流程如图2所示。

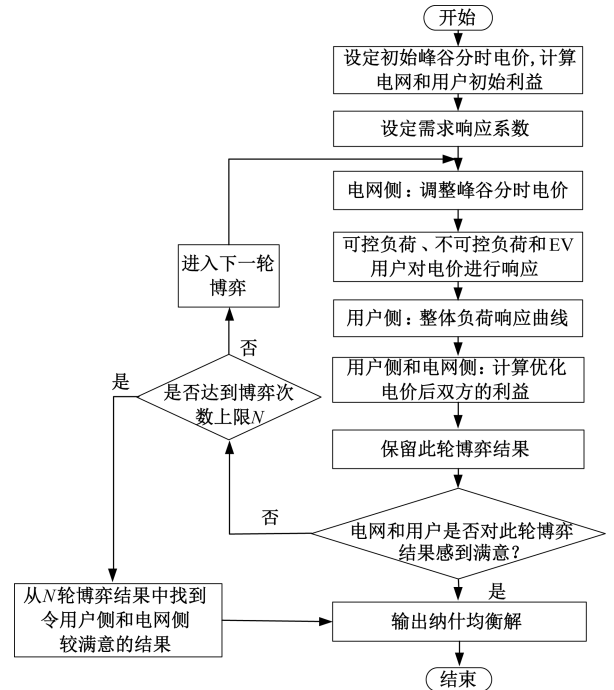


图2 优化的峰谷电价流程图

Fig.2 Flow chart of optimized peak-valley time price

根据逆向回归算法,非合作动态博弈流程如下:

(1) 计算电网和用户在初始电价模式下的利益大小。

(2) 展开第一轮博弈,电网根据式(1)优化峰谷电价,根据2.3节中建立的需求侧响应模型计算用户响应后的负荷值,并绘制负荷响应曲线。

(3) 基于负荷响应结果,电网和用户根据式(2)~式(11)分别计算各自的利益。并与电价优化前的利益进行对比,判断双方是否都对此轮博弈结果感到满意。如果满意,此轮博弈结果即为纳什均衡解;如果不满意,则保留此轮结果,调整策略,进行下一轮博弈。

(4) 下一轮博弈流程同第一轮,为了防止博弈无休止地进行,设置博弈次数上限 N 。倘若在 N 轮博弈后,依然没有使得用户和电网满意的结果,则将前 N 轮博弈结果进行对比,找到令用户和电网比较满意的结果,即为纳什均衡解。

(5) 根据纳什均衡的定义,任何参与者都不能独立改变策略而获得更多收益,则可认为在该电价下达到了纳什均衡^[17,18]。最终输出的均衡策略集即故障下的峰谷电价和考虑 DR 的优化负荷曲线。

3 基于博弈思想的 ADN 故障恢复模型

3.1 博弈参与者和策略

为了实现电网侧和用户侧的利益均衡,本文设置电网和用户总代理作为博弈参与者。

恢复策略由开关操作组合构成,一种恢复策略表示为 $X_i = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$, 其中 k_i 为 0 或 1, 代表开关的开或合的状态。所有不同的恢复方案集合为 $\{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ 。恢复方案之间的关系如图 3 所示,以图 3 为例说明各种恢复方案之间的关系。假设针对某一故障点,有两个恢复方案,方案 A 和方案 B 在 α 平面内的投影区域为相应的策略集,投影重合区代表部分相同的开关操作,投影不重合的区域表示部分不同的开关操作。为此,需对电网和用户进行合作博弈,以共同的利益函数为目标进行方案的优选,从而求得纳什均衡解。

3.2 供电侧和用户侧的利益

如何从供、需双方进行考虑,并在恢复中实现双方利益的均衡,是本文研究的重点。

3.2.1 供电侧利益函数

在配电网恢复重构过程中,供电侧的利益是实现运行费用最小化,即包括网损最小、开关损耗最

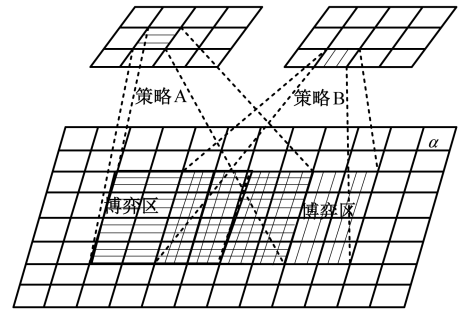


图3 恢复方案之间的关系示意图

Fig. 3 Sketch of relationship between restoration schemes

低。因此,供电侧对应的利益函数为:

$$\begin{aligned} E_{\text{power}} &= -E_{\text{SS}} - E_{\text{KK}} - E_{\text{PC}} \\ &= -a \sum_{i \in N} I_i^2 R_i - b N_{\text{swi}} - \delta \sum_{i \in P} L_{i-\text{loss}} \end{aligned} \quad (20)$$

式中, E_{power} 为供电侧利益函数; E_{SS} 为网损构成的运行费用; E_{KK} 为开关动作构成的运行费用; E_{PC} 为电网因负荷失电做出的赔偿损失; I_i 为第 i 条支路流过的电流(有效值); R_i 为第 i 条支路的电阻; N_{swi} 为分段开关和联络开关的总动作次数; $L_{i-\text{loss}}$ 为第 i 个节点负荷的失电量; a, b, δ 分别为网损费用折算因子(系数大小同电网的购电电价(元/(kW·h)))、开关动作损失的折算因子(元/次)、单位失电负荷的赔偿金折算因子(元/kW); N 为所有支路集合; P 为所有负荷节点集合。

3.2.2 用户侧利益函数

每一个用户的利益函数为 EV 向电网反向供电的利益加上因故障造成的停电而所得的电网赔偿费用,即

$$E_{i-\text{benefit}} = (c_x - a_x) P_{i-\text{out}} + \delta L_{i-\text{loss}} \quad (21)$$

式中, $E_{i-\text{benefit}}$ 为单个用户的利益; c_x 为 EV 发电售电价(元/kW); a_x 为 EV 充电购电价(元/kW); $P_{i-\text{out}}$ 为第 i 个电动汽车对电网的放电功率(kW)。

在故障恢复中,一个用户与电网没有博弈的权利,但可以通过用户总代理与电网进行博弈,用户总代理的利益为:

$$E_{\text{load}} = \sum_{i \in N} E_{i-\text{benefit}} \quad (22)$$

式中, E_{load} 为用户侧总利益。

3.3 ADN 故障恢复均衡求解模型

3.3.1 目标函数

(1) 目标函数 1

首先将双方共同的利益诉求放在首位,即以失电负荷最小为目标函数 1:

$$\max f_1 = \sum_{i \in R} P_i \lambda_i \quad (23)$$

式中, R 为得电负荷集合; P_i 为节点 i 的负荷; λ_i 为负荷的权重, 一级负荷取 100, 二级负荷取 10, 三级负荷取 1。

(2) 目标函数 2

分析用户侧通过 EV 回馈电网获得的利益, 其取决于 EV 的数量和单价, EV 数量的上限受实际电网安全约束以及 EV 保有量限制, 数量的最大弹性需求和单价都受 DR 优化分时电价影响。该目标函数只需考虑网损费用最低即可, 如下:

$$\min f_2 = a \sum_{i \in N} I_i^2 R_i \quad (24)$$

式中, R_i 为支路 i 的电阻。

3.3.2 共同收益函数

将开关的操作次数作为共同收益的一部分, 不作为目标单独求解, 便于提高算法的求解效率。同时, 共同收益函数还应该包括网损和节点最低电压值。对各个指标进行归一化处理, 再经过电网和用户共同确定的综合收益进行合作博弈决策。共同收益函数为:

$$W = w_1 \frac{S}{S_{\max}} + w_2 \frac{U_{\min}}{U_{\min-\max}} + w_3 \frac{N_{\text{swi}}}{N_{\text{swi}-\max}} \quad (25)$$

式中, S 为网损; S_{\max} 为网损最大值; U_{\min} 为节点最低电压; $U_{\min-\max}$ 为节点最低电压的最大值; N_{swi} 为开关操作次数; $N_{\text{swi}-\max}$ 为开关操作次数最大值; w_1 、 w_2 、 w_3 分别为网损、节点最低电压和开关操作次数的权重系数。

3.3.3 约束条件

配电网络进行寻优时需满足以下约束条件。

(1) 辐射状结构

$$g_k \in G_k \quad (26)$$

式中, g_k 为已恢复的供电区域; G_k 为保证配电网辐射状的所有拓扑结构集合。

(2) 配电网各线路电流约束

$$I_l \leq I_{l\max} \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

式中, I_l 为流过线路 l 的电流; $I_{l\max}$ 为流过线路 l 的最大电流; n 为配电网支路数量。

(3) 节点电压约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (28)$$

式中, $U_{i\min}$ 为节点 i 电压的下限; $U_{i\max}$ 为节点 i 电压的上限; m 为配电网节点数量。

(4) 分布式电源出力约束

$$P_{\text{DG}}^{\min} \leq P_{\text{DG}} \leq P_{\text{DG}}^{\max} \quad (29)$$

式中, P_{DG} 为 DG 的实际出力; P_{DG}^{\min} 为 DG 出力的下限; P_{DG}^{\max} 为 DG 出力的上限。

(5) EV 充放电约束

1) EV 充放电电池约束

$$W_{\text{chmin}} \leq W_{\text{ch}}(t) \leq W_{\text{chmax}} \quad (30)$$

$$W_{\text{mastermin}} \leq W_{\text{master}}(t) \quad (31)$$

式中, W_{ch} 为电池充电功率; W_{chmin} 和 W_{chmax} 分别为保证电池寿命的最小和最大充放电限值, 以防止过分充放电; W_{master} 为 EV 的放电功率; $W_{\text{mastermin}}$ 为车主可接受的最低放电功率。

2) EV 充放电约束

EV 除了满足电池约束外, 还需要满足自身的功率约束, 且不能同时处于充放电状态。

$$0 \leq P_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{chmax}} \quad (32)$$

$$0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{dismax}} \quad (33)$$

$$P_{\text{ch}}(t) \cdot P_{\text{dis}}(t) = 0 \quad (34)$$

式中, P_{ch} 和 P_{dis} 分别为 EV 的充电和放电功率; P_{chmax} 和 P_{dismax} 分别为 EV 最大充电和放电功率约束。

3.4 基于博弈思想的 ADN 故障恢复均衡求解

本文优先考虑联络开关的状态组合, 形成初始方案集 $\{J_1, J_2, \dots, J_m\}$, 假设共有 m 种初始方案, 则在 CPU 中创建 m 条线程, 然后在每条线程调用改进的蚁群算法, 进行分段开关的并行寻优, 大大缩减搜索范围和搜索时间。然后通过潮流计算加以验证, 得到所有可行方案。最后以综合收益为目标进行合作博弈决策, 求得纳什均衡解。基于博弈思想的 ADN 故障恢复的具体求解流程如下:

(1) 简化配电网, 得到无向图, 设置蚁群算法的基本参数, 其中并网的 DG 和 EV 按照 P/Q 接入方式处理。

(2) 假设网络中有联络开关 p 条, 列举联络开关的所有状态组合 $(C_p^0 + C_p^1 + \dots + C_p^{p-1} + C_p^p = q)$, 共 q 种初始方案, 在 CPU 中创建 q 个线程, 每个线程调用蚁群算法进行并行计算。

(3) m 只蚂蚁对生成树进行并行搜索, 记录每只蚂蚁的支路选取, 形成支路集合 $Nzhl_k$ 。

(4) 对 $Nzhl_k$ 进行拓扑分析, 用前推回代进行潮流计算, 求解基本电气参数。

(5) 根据电网的最大供电能力, 判断是否需要进行切负荷操作。倘若需要, 先切除可控负荷的可控部分, 再按照负荷等级由低到高切除。

(6) 对满足约束的恢复方案进行目标函数的计算得到 s^{ibest} , 并更新信息素。

(7)判断迭代次数是否达到上限,若没有,则继续从步骤(5)开始迭代计算,若达到最大,则退出运行,输出最优解,结束一种方案的搜索。

(8)输出所有线程的可行解,作为博弈的初始方案集合 $\{X_1, X_2, \cdots, X_m\}$ 。

(9)电网和用户以总收益函数为目标进行合作博弈,总收益最大的恢复方案满足双方的共同利益,即纳什均衡解。

4 算例分析

4.1 基于博弈思想的故障下峰谷分时电价算例

采用 2.4 节所述的纳什均衡求解方法,经过 3 轮博弈后,得到基于博弈论的优化电价,并将其和优化电价前的结果进行对比分析。设电网从发电侧的购电电价是 $a = 0.3 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 优化峰谷电价前后的基础价分别为 $a_0 = 0.48 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $a_0^* = 0.49 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 优化峰谷电价前后的费率 $Q = 10\%$ 、 $Q^* = 35\%$,运用多元线性回归计算用户电量电价弹性矩阵为:

$$E = \begin{bmatrix} -0.493 & 0.100 & 0.395 \\ 0.100 & -0.493 & 0.395 \\ 0.395 & 0.1 & -0.493 \end{bmatrix}$$

本文对峰谷时段的划分情况为:峰时段 $[10:00, 14:00)$;谷时段 $[01:00, 07:00)$;平时段 $[07:00, 10:00)$ 、 $[14:00, \text{次日 } 01:00)$ 。电网典型日负荷数据如表 1 所示。

表 1 电网典型日负荷数据

Tab. 1 Typical daily load of power grid					
时刻	负荷/kW	时刻	负荷/kW	时刻	负荷/kW
01:00	2200	09:00	2650	17:00	2788
02:00	2140	10:00	2980	18:00	2900
03:00	2050	11:00	3246	19:00	2900
04:00	1990	12:00	3565	20:00	2850
05:00	1930	13:00	3853	21:00	2940
06:00	1990	14:00	3560	22:00	2770
07:00	2030	15:00	3199	23:00	2389
08:00	2340	16:00	2690	24:00	2390

本文通过负荷曲线和双方(供电侧和用户侧)利益变化来反映基于博弈思想的故障下峰谷分时电价的优化。优化峰谷电价前后的负荷曲线如图 4 所示,优化峰谷电价前后双方的利益大小如表 2 所示。

由图 4 可见,电价优化前负荷曲线的最大峰值为 3853kW,最低谷负荷值为 1930kW,峰谷差率为 49.9%;最终的优化曲线的最大峰值为 3220kW,最

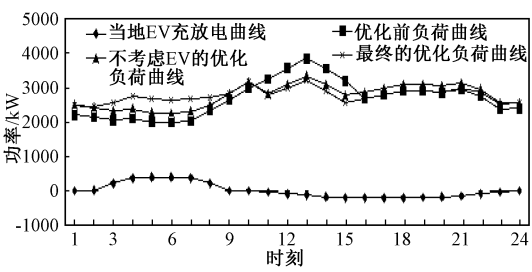


图 4 不同情况下的负荷曲线

Fig. 4 Load curves of different scenes

表 2 电价优化前后双方利益比较

Tab. 2 Benefits comparison of both parties before and after price optimization

	用户平均购电价 /(元/(kW·h))	供电侧 获利/万元	售电量 /(MW·h)/天)
优化前	0.4824	1.1735	64.34
优化后	0.4787	1.1869	66.42

低谷负荷值为 2445kW,峰谷差率为 24.1%。基于博弈论的峰谷分时电价下的负荷曲线变得更加平坦,峰谷差率减小,电网重载运行的概率降低,提高了电网运行的可靠性;如果高峰时发生故障,降低了恢复的压力。

由表 2 可见,电价优化后,售电量稍有增加,原因是由于用户平均购电价的降低,有些工厂为了增加产量或居民为了增加舒适度等导致,这种现象符合用户的购电心理和经济学原理。基于博弈论的峰谷分时电价相比于优化前的电价,供电侧和用户侧的利益都有所提高,可以实现双方利益的均衡;同时,基于博弈论的峰谷分时电价考虑电网侧的利益,有助于提高电网的积极性,使其主动进行电价改革。

4.2 基于博弈思想的 ADN 故障恢复算例

采用 IEEE33 节点配电网为算例验证策略的有效性,采用 MATLAB 编程进行算例分析。配电网结构如图 5 所示。该配电网共有 33 个节点,负荷高峰期,各个节点数据如附表 1 所示;共 37 条馈线,其中有 5 条联络开关如虚线所示(处于常开状态),32 条分段开关如实线所示(处于常闭状态),额定电压为 12.66kV。DG1、DG2 和 DG3 分别连接在节点 16、24 和 22 处,其稳定输出功率分别为 200kW、300kW 和 200kW;EV 充电桩安装在节点 29 处,形成虚拟 DG。调用改进的蚁群算法进行网络优化,设置蚂蚁个数为 33,初始化信息素浓度 $\tau = 1$,挥发系数 $\rho' = 0.9$,信息素权重因子 $\beta = 2$,最大进化

代数为 30。考虑各辆 EV 和其电池的充放电约束后,可参与故障恢复的每辆 EV 的保守放电功率为 4kW, EV 在谷时充电电价折算因子 $\alpha_x = 0.32$ 元 /kW ;设开关的动作损失为 $b = 10$ 元 /次,设单位失电负荷赔偿金折算因子 $\delta = 0.6$ 元 /kW,在峰时放电电价折算因子 $c_x = 0.66$ 元 /kW,所有负荷的重要度等级和可控、非可控性质如表 3 所示。

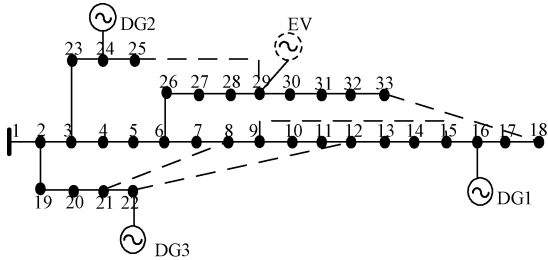


图 5 IEEE 33 节点配电系统
Fig.5 IEEE 33 node distribution network

表 3 失电负荷的负荷等级

Tab.3 Load level of lost load		
负荷类型	负荷等级	负荷节点号
不可控负荷	1	2,3,5,6,7,9,10,11,16,17,26,27
	2	4,8,12,15,20,21,22,25,31
	3	13,18,23,28,29,32,33
可控负荷 (30%可控)	3	14,19,24,30

在 13:00 恰值用电高峰,负荷总有功功率为 3853kW,系统供电总有功为 3700kW(系统无功功率可通过功率因数得到,在此不作具体分析)。假设节点 14-15 间线路发生永久性故障,假设每个情景都有 50 辆 EV 参与高峰时的故障恢复,划分如下情景调用不同恢复策略进行求解:①情景 1:调用传统的蚁群算法进行求解;②情景 2:调用基于博弈思想的 ADN 故障恢复策略。

(1)情景 1 的恢复结果

调用传统的蚁群算法进行恢复,EV 在政府的激励下,积极加入故障恢复,向电网提供放电辅助服务,EV 的放电总功率为 200kW,在节点 29 形成虚拟 DG,此时系统总供电有功功率为 3900kW。由于系统供电能力不够,需切除 39kW 才能满足要求,首先考虑三级负荷中的可控部分,因此节点 18 和节点 28 的可控负荷被切除,共切除 45kW,具体的恢复结果如表 4 所示。

(2)情景 2 的恢复结果

调用基于博弈思想的 ADN 故障恢复策略,利用

表 4 情景 1 的恢复结果

Tab.4 Restoration result of scene 1					
恢复策略集	失电负荷 /kW	网损 /kW	EV 总放电功率 /kW	最低电压 (pu)	开关动作次数
6-7、10-11、14-15、15-16、28-29 开关状态为 0,其他开关状态为 1	45	85.58	200	0.952	10

改进的蚁群算法求解。由于网损值的降低,需要切除 36kW 负荷值,首先考虑三级负荷中的可控部分,因此切除三级负荷中节点 33 和节点 28 的可控部分。共得到 28 种初始恢复方案,以电网和用户的总收益函数最大为目标进行合作博弈决策,求得的纳什均衡解如表 5 所示。

表 5 情景 2 的恢复结果

Tab.5 Restoration result of scene 2					
恢复策略集	失电负荷 /kW	网损 /kW	EV 总放电功率 /kW	最低电压 (pu)	开关动作次数
7-8、9-10、14-15、28-29、31-32 开关状态为 0,其他开关状态为 1	36	81.98	200	0.953	10

由表 4 和表 5 的恢复结果对比可见,调用基于博弈思想的 ADN 故障恢复策略对于失电负荷值、网损和最低电压值都有所改善,可见,基于博弈思想的 ADN 故障恢复策略优于传统蚁群算法。

4.3 基于博弈思想的 DR 视角下的 ADN 故障恢复算例

设置情景 3:调用基于博弈思想的需求响应视角下的 ADN 故障恢复策略,50 辆 EV 响应恢复;实行优化电价后的节点负荷值如附表 2 所示。

基于博弈思想,实行优化的峰谷分时电价后,负荷曲线得到优化,如图 4 所示。负荷有功功率为 3220kW,低于系统总的有功功率,不需要进行切负荷操作;调用基于博弈思想的 ADN 恢复策略进行求解,共得到 30 种初始可行恢复方案。电网和用户进行合作博弈,令 $w_1 = 0.4$ 、 $w_2 = 0.4$ 、 $w_3 = 0.2$ 确定共同的收益函数,经计算可知方案一为纳什均衡解。本文对各个初始恢复方案依网损升序排列,得到不同恢复方案的网损和最低电压曲线,分别如图 6 和图 7 所示,具体的恢复结果如表 6 所示。

比较情景 3 和情景 1 的恢复结果可知,采用考虑基于博弈思想的 ADN 故障恢复策略后,由于负荷

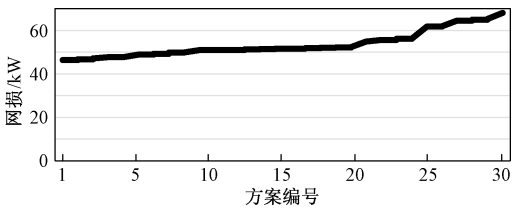


图6 网损曲线图
Fig. 6 Curve of line loss

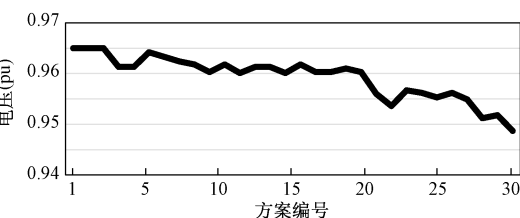


图7 电压曲线图
Fig. 7 Curve of voltage

表6 情景3的恢复结果

Tab.6 Restoration result of scene 3

恢复策略集	失电 负荷 /kW	网损 /kW	EV 总放 电功率 /kW	最低 电压 (pu)	开关 动作 次数
7-8、9-10、 14-15、16-17、 25-29 开关状态为 0， 其他开关状态为 1	0	46.36	200	0.965	8

曲线的优化,失电负荷得到全部恢复,网损值进一步降低,最低电压值进一步提高,开关动作次数也得到减少。网络结构得到极大的优化。

综合情景 1~情景 3 的恢复情况,不同情景下恢复方案的利益对比结果如表 7 所示。

表7 不同恢复方案的利益对比

Tab.7 Benefits comparison of different strategies

故障点	情景	供电侧利益 /元	用户侧利益 /元	总利益 /元
14-15	情景 1	-152.7	95.0	-57.7
	情景 2	-146.2	89.6	-56.6
	情景 3	-93.9	68.0	-25.9

由表 7 可见,从供电侧利益和总收益来看,情景 3 的恢复策略最优,其次为情景 2 的恢复策略。但用户侧利益却呈相反的趋势,因为用户利益是由失电负荷获得的赔偿和 EV 向电网放电获得的回报组成,实际上,用户因故障停电造成的损失远大于供电侧的赔偿。因此,用户从电网得到的赔偿越小,反而说明用户因停电造成的损失越小。综上可知,基于

博弈思想的 ADN 故障恢复策略优于传统蚁群算法,而基于博弈思想的 DR 视角下的 ADN 故障恢复策略又进一步优化,在确保电网和用户双方利益均衡的前提下,实现失电负荷的最大恢复。

4.4 实际配电网算例分析

以如图 8 所示的某个典型实际配电网为例^[19]进一步验证本文所提恢复策略的有效性。其中括号内为馈线段供出的负荷,节点旁的数字为该开关的序号,实心代表合闸,空心代表分闸。各条母线的电气极限均为 1400A,每条线路和开关的额定容量为 400A。配电网正常运行时,系统总负荷为 2992A。其中,三级负荷节点包含 40% 的可控负荷。

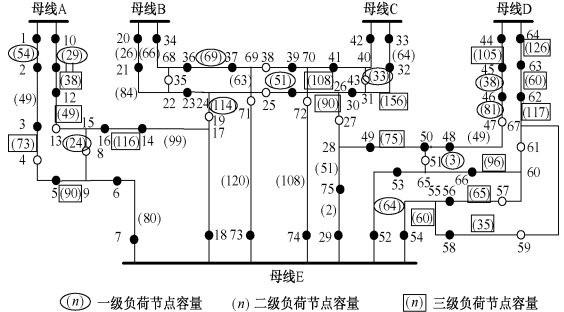


图8 典型的实际配电网

Fig. 8 Typical actual distribution network

假设母线 E 故障,导致该配电网发生大面积停电。开关 7、18、73、74、29、52 和 54 立即断开并闭锁。在故障安全隔离后,调用本文所提策略求得的恢复结果为:闭合开关 4、13、27、51、59、71、72,打开开关 49,开关动作 8 次,部分三级负荷的可控部分被切除,切除的负荷节点有 1-2、3-4、44-45、49-50、58-59、61-62、63-64、65-66,反映完成供电负荷量的电流值为 2749.6A。采用文献[19]所提恢复策略得到的恢复结果为:闭合开关 4、13、27、47、51、61、71、72,打开开关 6、49、53、66,开关动作 12 次,反映完成供电负荷量的电流值为 2688A。

由以上分析可知,基于博弈思想的需求响应视角下的 ADN 故障恢复策略可以实现失电负荷的最大化恢复,且减少开关的动作次数,更有利于提高电网侧和用户侧的利益。

5 结论

本文在已有故障恢复重构研究的基础上,充分考虑用户侧和供电侧的双方利益,提出了基于博弈思想的 DR 视角下的 ADN 故障恢复策略。基于博弈思想的故障下低谷分时电价的实行可以优化负荷

曲线,减少供电恢复的压力;在故障恢复中,分别分析电网和用户的利益,建立合作博弈模型进行求解,可在双方利益均衡的前提下改善网络重构效果,提高失电负荷的恢复率;基于博弈思想的 DR 视角下的 ADN 故障恢复策略还可应用于大面积失电的情况,提高电网侧和用户侧在负荷高峰时恢复的利益,实现双方利益的均衡。

附录

附表 1 优化电价前负荷高峰时各个节点负荷值

Attached Tab.1 Value of each load before
optimizing electricity price

节点	负荷/kW	节点	负荷/kW	节点	负荷/kW
1	0	12	60	23	90
2	100	13	68	24	420
3	90	14	120	25	470
4	120	15	60	26	60
5	60	16	60	27	60
6	60	17	90	28	60
7	200	18	90	29	120
8	200	19	90	30	200
9	60	20	90	31	200
10	60	21	90	32	210
11	45	22	90	33	60

附表 2 优化电价后负荷高峰时各个节点负荷值

Attached Tab.2 Value of each load after optimizing
electricity price

节点	负荷/kW	节点	负荷/kW	节点	负荷/kW
1	0	12	45	23	75
2	85	13	45	24	405
3	75	14	105	25	405
4	105	15	45	26	45
5	45	16	45	27	45
6	45	17	45	28	45
7	185	18	75	29	105
8	185	19	75	30	185
9	45	20	75	31	135
10	45	21	75	32	180
11	30	22	75	33	45

参考文献 (References):

[1] Rao R S, Ravindra K, Satish K, et al. Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28 (1): 317-325.

[2] 丛鹏伟,唐巍,张璐,等 (Cong Pengwei, Tang Wei, Zhang Lu, et al.). 基于机会约束规划考虑 DG 与负荷

多状态的配电网重构 (Chance-constrained programming based distribution network reconfiguration considering multi-states of distributed generation and load) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (9): 2573-2579.

[3] D' Adamo C. Global survey on planning and operation of active distribution networks - Update of CIGRE C6.11 Working Group Activities [A]. International Conference and Exhibition on Electricity Distribution [C]. 2009. 1-4.

[4] 范明天,张祖平,苏傲雪,等 (Fan Mingtian, Zhang Zuping, Su Aoxue, et al.). 主动配电系统可行技术的研究 (Enabling technologies for active distribution systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceeding of the CSEE), 2013, 33 (22): 12-18.

[5] 杨丽君,魏玲玲,卢志刚,等 (Yang Lijun, Wei Lingling, Lu Zhigang, et al.). 考虑可中断负荷的配电网分区动态故障恢复 (Fault partition dynamic recovery strategy for distribution network considering interruptible loads) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 73-80.

[6] 卢志刚,刘照拯,张晶,等 (Lu Zhigang, Liu Zhaozheng, Zhang Jing, et al.). 含分布式电源的配电网灾后分阶段抢修策略 (Staged rush repair strategy of distribution networks with distributed generators after disaster) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (1): 69-74.

[7] 朱正,廖清芬,刘涤尘,等 (Zhu Zheng, Liao Qingfen, Liu Dichen, et al.). 考虑新能源与电动汽车接入下的主动配电网重构策略 (Strategy of distribution network reconfiguration considering wind power and electric vehicle integration) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (14): 82-88, 96.

[8] 刘丹丹,段斌,王俊,等 (Liu Dandan, Duan Bin, Wang Jun, et al.). 基于 IEC 61850 的主动配电网故障自恢复多代理系统 (A multi-agent system for fault self-recovery of distribution systems in active distribution network based on IEC 61850) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (9): 119-126.

[9] 卞栋,卫志农,孙国强,等 (Bian Dong, Wei Zhinong, Sun Guoqiang, et al.). 需求响应视角下的配电网不确定性重构模型 (Distribution network uncertainty reconfiguration model in demand response perspective) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2013, 37 (24): 31-36.

[10] 李春燕,许中,马智远 (Li Chunyan, Xu Zhong, Ma

- Zhiyuan). 计及用户需求响应的分时电价优化模型 (Optimal time-of-use electricity price model considering customer demand response) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSC), 2015, 27 (3): 11-16.
- [11] 郭联哲, 李莉, 谭忠富, 等 (Guo Lianzhe, Li Li, Tan Zhongfu, et al.). 基于模糊需求和用户分类响应程度的分时电价设计模型 (Time-of-use price design models based on fuzzy demand and users' diverse response) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2007, 35 (5): 11-15.
- [12] 谭忠富, 王绵斌, 张蓉, 等 (Tan Zhongfu, Wang Mianbin, Zhang Rong, et al.). 发电侧与供电侧峰谷分时电价联动的分级优化模型 (Classification linkage optimization model of time of use power price between generating side and retail side) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2007, 31 (21): 26-29.
- [13] 梅生伟, 刘锋, 魏韡, 等 (Mei Shengwei, Liu Feng, Wei Wei, et al.). 工程博弈论基础及电力系统应用 (Engineering game theory and application of power system) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 2016.
- [14] 余岳, 粟梅, 孙尧, 等 (Yu Yue, Su Mei, Sun Yao, et al.). V2M 系统分时电价博弈研究 (Time-of-use electricity price game via V2M) [J]. 仪器仪表学报 (Chinese Journal of Scientific Instrument), 2016, 37 (1): 200-207.
- [15] 崔强, 王秀丽, 刘祖永 (Cui Qiang, Wang Xiuli, Liu Zuyong). 市场环境下计及储能电站运行的联动电价研究及其效益分析 (Study on linkage electricity price and benefit analysis considering energy storage station operation in market environment) [J]. 中国电机工程学报 (Proceeding of the CSEE), 2013, 33 (13): 62-68.
- [16] 李海娟, 黄学良, 陈中, 等 (Li Haijuan, Huang Xueliang, Chen Zhong, et al.). 含电动汽车无线充电的配电网可靠性评估 (With electric vehicle wireless charging distribution network reliability evaluation) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (S1): 244-250.
- [17] 王冠群, 张雪敏, 刘锋, 等 (Wang Guanqun, Zhang Xuemin, Liu Feng, et al.). 船舶电力系统重构的博弈算法 (Game theory algorithm of reconfiguration for ship-board power system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (13): 69-76, 193.
- [18] 王晶, 陈骏宇, 金华锋 (Wang Jing, Chen Junyu, Jin Huafeng). 含分布式电源的配电网动态孤岛划分博弈模型 (A game model of dynamic island partition for distribution network with DGs) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (14): 14-24.
- [19] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等 (Liu Jian, Dong Xinzhou, Chen Xinying, et al.). 配电网故障定位与供电恢复 (Fault location and power supply restoration in distribution network) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2012. 150-155.

Active distribution network fault restoration based on game theory in demand response perspective

YANG Li-jun, CAO Yu-jie, LIANG Jing-zhi, YANG Bo, AN Li-ming

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to maximize the recovery of the load loss after the failure of the active distribution network and coordinate the common interests of supply side and user side, based on game theory, a fault recovery strategy in demand response perspective is proposed. In the perspective of demand response, non-cooperation dynamic game is built between supply side and user side to optimize the peak-valley time-of-use price in the fault period, restrain load demand and reduce the pressure of the fault recovery in the peak period. In the restoration of active distributed network, based on the optimized load curve, cooperation dynamic game is built between supply side and user side, with the object of both common benefits of collaborated restoration scheme of feeder, electric vehicle, distributed generation and controllable load. The inverse regression algorithm and improved ant algorithm are used to solve both games above. This paper takes IEEE33 node model and actual distribution network as examples to carry out service restoration in both small and large outage area, and the effectiveness of the proposed strategy is verified.

Key words: active distribution network; fault restoration; game theory; inverse regression algorithm; improved ant algorithm