

多代理系统下的主动配电网故障恢复博弈策略

杨丽君¹, 曹玉洁^{1†}, 何新², 王伟浩¹, 王晨¹

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

2. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054)

摘要: 在保障主动配电网可靠恢复前提下, 为实现供电侧与用户侧利益均衡, 本文提出了多代理系统(multiagent system, MAS)下的主动配电网故障恢复博弈策略. 为充分考虑电网和电力用户对故障恢复的决策影响, 设计了由电网代理、用户总代理和协调代理构成的MAS, 建立了MAS信息传输模型. 然后, 构建了供电侧和用户侧在故障恢复中的利益函数、恢复策略空间, 以及以电网代理和用户总代理作为参与人的合作博弈恢复模型. 电网代理和用户总代理分别以改进的蚁群算法和统计方法进行分布并行计算, 协调代理以双方共同的利益函数作为寻优目标通过迭代算法求得满足纳什均衡的恢复策略. 本文以IEEE69节点模型为例, 分别对单故障和连锁故障恢复情景求解, 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; 多代理系统; 博弈论; 利益均衡

引用格式: 杨丽君, 曹玉洁, 何新, 等. 多代理系统下的主动配电网故障恢复博弈策略. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 699 – 708

中图分类号: TM73

文献标识码: A

Active distribution network service restoration using multiagent systems and game theory

YANG Li-jun¹, CAO Yu-jie^{1†}, HE Xin², WANG Wei-hao¹, WANG Chen¹

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

2. State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100054, China)

Abstract: On the premise of ensuring the reliable service restoration of the active distribution network and in order to realize the interest balance between the power supply side and the user side, a game strategy for active distribution network service restoration using multiagent systems (MAS) is proposed. In order to consider the influence of the power grid and power consumers to service restoration, an MAS composed of the power grid agent, the user general agent and the coordination agent is designed, and an information transmission model of MAS is built. Then, the interest functions of the power supply side and the user side in the recovery processes, the space of recovery strategies, and a cooperative game recovery model taking the power grid agent and the user general agent as participants are established. The power grid agent and the user general agent are performed by distributed parallel computing with improved ant colony algorithm and the statistical method respectively. The coordination agent takes the common interest function of both sides as the optimization objective, and the recovery scheme satisfying the Nash equilibrium is obtained by iteration algorithm. This paper takes IEEE69 node model as an example to solve single fault and cascading failures, and the effectiveness of the proposed strategy is verified.

Key words: active distribution network; service restoration; multiagent systems; game theory; interest balance

Citation: YANG Lijun, CAO Yujie, HE Xin, et al. Active distribution network service restoration using multiagent systems and game theory. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(5): 699 – 708

1 引言(Introduction)

传统配电网故障恢复指的是在满足一定约束条件下, 仅仅通过改变相关开关的组合状态恢复非故障停

电区域负荷^[1]; 然而主动配电网(active distribution network, ADN)具有大量可调控的分布式资源(distributed energy resource, DER)(如分布式发电、储能、电

收稿日期: 2017-09-25; 录用日期: 2018-02-26.

[†]通信作者. E-mail: 1172171755@qq.com; Tel.: +86 18233585610.

本文责任编辑: 魏巍.

国家自然科学基金项目(61573302)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61573302).

动汽车、柔性负荷等)和可靠的通信、测量和储能等技术,这些优化调控的物理条件和技术基础改变了传统配电网故障恢复的求解思路^[2-4]。不得不以一种新的视角来重新审视ADN故障恢复这个新的问题。如何在ADN故障恢复中充分考虑用户侧对故障恢复的影响,并充分利用分布式资源和先进的技术,在保证ADN可靠恢复的前提下实现电网侧和用户侧的利益均衡是亟待解决的问题。

目前,有大量文献开展对ADN故障重构的研究^[5-7]。文献[5]考虑电力资源出力的有限性和分布式发电(distributed generation, DG)出力的波动性,提出一种利用微电网恢复重要负荷的弹性配电网故障恢复方法,算例表明,考虑DG波动性分析多故障恢复场景更加有效、可行;文献[6]提出了一种基于启发式图论的配电网故障恢复方法,通过对开关操作成本系数赋值,利用改进的最小生成树算法进行恢复路径的求解,可减少负荷断电损失和降低故障恢复成本;文献[7]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)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人。以上文献都说明了一个问题,DER和电力用户对ADN故障恢复有重大作用,但是如何在ADN故障恢复中均衡供电侧和用户侧利益却未给出答案。

为了满足电网和用户在ADN故障恢复中的利益需求并均衡两者之间的利益,本文在故障恢复多代理系统研究的基础上,运用博弈论重新求解该问题。博弈论(game theory)也称“对策论”,是现代数学的一个分支,是解决决策主体的行为存在利益相关或发生冲突时的有效方法^[8-9],在电力系统控制与调度方面有着广泛的应用,但是在故障恢复方面还很鲜见。文献[10]将船舶电力系统不同区域代理作为博弈参与人,将船舶的故障重构转换为各个代理之间的合作—竞争问题,通过列举所有可能的组合方案,进行利益博弈,求得纳什均衡解;文献[11]提出一种基于博弈思想的主动配电网故障灵活分层恢复策略,在恢复过程中考虑负荷、DG、开关等参与主体的利益,运用分层多代理技术实现不同场景不同恢复策略的简化处理。在ADN故障恢复中,电网在实现自身利益最大化的同时,用户侧也更加注重自身利益的实现,因此本文设置电网和用户总代理作为博弈参与人,来探索二者之间的利益均衡关系。

本文提出了多代理系统(multiagent systems, MAS)下的主动配电网故障恢复博弈策略。在前人设计的多代理恢复系统基础上^[12],建立了以电网代理和用户总代理为博弈参与人的合作博弈恢复模型,利用嵌入蚁群算法和统计方法的分布式MAS进行求解。最后,采用IEEE69节点算例验证本文所提策略的有效性。

2 多代理恢复系统设计(Design of multiagent recovery systems)

2.1 多代理恢复系统结构 (Multiagent recovery systems architecture)

为了均衡电网侧和用户侧在配电网故障恢复中的利益,并且实现主动配电网中可控负荷、DG和电动车(electric vehicle, EV)等DER的有序紧急调度,具有良好自治性、适应性和协调性的多代理系统可以在合理管理和可靠通信等技术要求下,实现故障恢复中各个代理的协调优化。多代理系统的目标是将系统集中处理的复杂问题划分成由分布式系统处理的简单问题,并按照约定的协议通过通信和协调来完成目标任务^[12]。多代理系统由四大主体代理构成,分别是信息采集代理、均衡代理、电网代理和用户总代理。电网代理包括馈线代理、DG代理和开关代理;用户总代理包括可控负荷代理、不可控负荷代理和EV代理。多代理恢复系统结构如图1所示。

电网代理			协调代理		用户总代理		
任务求解模块	潮流计算模块	知识库A模块	任务求解模块	知识库C模块	任务求解模块	满意度测试模块	知识库B模块
馈线代理	DG模块	开关代理	基于博弈论的恢复策略		可控负荷代理	不可控负荷代理	电动汽车代理
信息采集代理					信息采集代理		

图1 多代理恢复系统结构

Fig. 1 Multiagent recovery systems architecture

1) 信息采集代理 (information collection agent, ICA): 当主动配电网发生故障时, ICA负责采集馈线、DG、开关、负荷和EV等信息以及故障信息,并对全部信息进行整合,分别发送到电网代理和用户总代理。

2) 分布式发电代理 (distributed generation agent, DGA): 依据ICA采集到的信息判断自身运行状态和大电网故障情况,决策DG处在并网模式还是孤岛模式。

3) 开关代理 (switch agent, SA): 包括联络开关和分段开关,主要通过开关的开断与闭合来实现故障的隔离和失电区域的网络重构。

4) 馈线代理 (feeder agent, FA): 本文指由一级支持馈线和二级支持馈线构成的恢复路径,根据馈线的实际容量和最大容量判断负荷是否均衡,从而改进开关代理的决策。

5) 负荷代理 (load agent, LA): 分为可中断负荷代理 (interruptible load agent, ILA) 和不可中断负荷代理 (uninterrupted load agent, ULA) 两种,负责向用户总代理提供两类负荷的实时用电量和预测电量,以及提供故障恢复期间可以中断的负荷量。

6) 电动汽车代理 (electric vehicle agent, EVA): ADN故障时, EVA负责向用户总代理上报参与紧急调度的EV数量和可持续放电量及持续放电时间。

7) 电网代理(power grid agent, PGA): 包含任务求解模块、潮流计算模块和知识库A模块, 以及FA, DG-A, SA和ICA4个子代理. ICA采集信息上传到FA, DG-A和SA, FA, DGA和SA将各自的决策上传至任务求解模块, PGA调用改进的蚁群算法对这些决策加以协调处理. 将得到的策略再反馈给子代理, 进行修正, 经多次迭代和潮流验证后, 将满足约束的策略存储到知识库A, 作为电网代理的恢复策略集.

8) 用户总代理(user general agent, UGA): 包含任务求解模块、知识库B模块和满意度测试模块, 以及ILA, ULA, EVA和ICA4个子代理. 在分时电价和一些政策激励措施影响下, UGA的任务求解模块统计归纳ILA, ULA和EVA上传的可参与放电辅助服务的一些电量指标, 将得到的策略再反馈给子代理, 进行修正, 经多次迭代和满意度验证后, 用户侧策略集存储到知识库B.

9) 协调代理(coordination agent, CA): 包含任务求解模块和知识库C模块. 整合电网代理和用户总代理的恢复策略集, 任务求解模块以共同利益函数为目标, 求解满足纳什均衡的博弈恢复方案, 存储到知识库C中, 以备下次遇到同样的故障直接调用.

2.2 MAS信息传输模型(Information transmission model of MAS)

为了使得故障区快速恢复供电, 并且保障可靠性, 配电网中的DG, EV, 保护装置、负荷等之间的数据和信息交换必须进行协调统一管理. 国际电工委员会(IEC)对电力系统的通信和信息技术(CIT)制定了两项重要标准: IEC61400-25和IEC61850, 其实现了不同厂家设备的智能化、互操作、可配置, 为MAS系统提供强有力的保障和技术支持^[11-13].

本文建立具有分布式分层结构的多代理系统信息传输模型, 主要由信息层、协调层、执行层和设备层构成, MAS信息传输模型如图2所示.

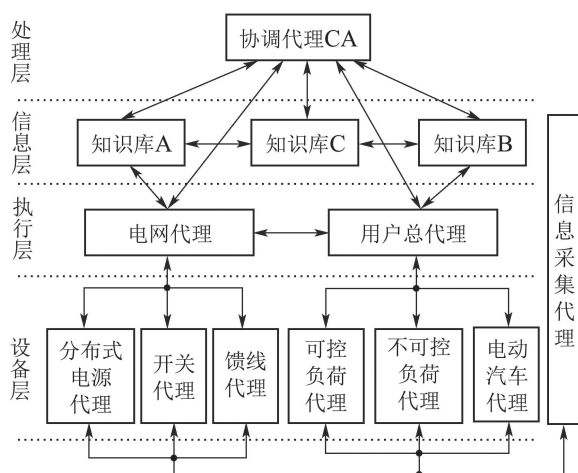


图2 多代理信息传输模型

Fig. 2 Information transmission model of MAS

3 子代理恢复模型(Service restoration model of subagents)

3.1 目标函数(Objective functions)

1) 电网代理及其子代理目标函数.

由于MAS具有分布并行的特点, 各子代理分别进行独立决策, 其目标函数和约束条件分别作用于自身和环境. FA的目标是尽量使ADN负荷均衡, 在本文中馈线指的是恢复路径. 其目标函数如式(1)所示; DGA的目标是具备并网条件的DG尽可能地并网, 以减少网络损耗, 如式(2)所示; SA的目标是在使得联络开关和分段开关的动作次数满足约束范围的前提下, 尽可能地减少开关动作次数, 如式(3)和式(11)所示:

$$\min f_1 = \max\left(\frac{S_j}{S_{\max j}}\right) - \min\left(\frac{S_c}{S_{\max c}}\right), \quad (1)$$

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

$$\min f_3 = N_{swi}. \quad (3)$$

式中: S_j , S_c 分别为馈线 j , c 的实际容量; $S_{\max j}$, $S_{\max c}$ 分别为馈线 j , c 的最大容量; I_i 为支路 i 的电流; R_i 为支路 i 的电阻; N 为所有支路集合; a 为网损费用折算因子.

2) 用户总代理及其子代理目标函数.

失电负荷量越小对供电侧和用户侧造成的损失越小, 即利益越大. 因此, UGA子代理围绕减少失电负荷价值定义目标函数, 且需要满足用户满意度约束, 如约束条件(8)所示.

ILA的目标函数为最小化可控负荷失电价值

$$\min f_4 = \sum_{i \in M} L_{IL-i} \cdot \lambda_i, \quad (4)$$

ULA的目标函数为最小化不可控负荷失电价值

$$\min f_5 = \sum_{i \in N} L_{UL-i} \cdot \lambda_i, \quad (5)$$

EVA的目标函数为最大化EV放电电量

$$\min f_6 = \sum_{i \in O} P_{EV} \cdot N_{EV}, \quad (6)$$

式中: L_{IL-i} 为可中断负荷 i 的负荷中断量(kW); L_{UL-i} 为不可中断负荷 i 的负荷失电量(kW); λ_i 为负荷的权重, 一级、二级、三级负荷分别取1, 10, 100; N_{EV} 为参与放电辅助服务的EV数量; P_{EV} 为故障期间单辆EV向电网反向供电的功率(kW); M , N , O 分别为可中断负荷节点数、不可中断负荷节点数和参与紧急调度的EV数量.

3.2 约束条件(Constraints)

在对故障后的配电网进行寻优时需满足以下约束条件:

1) 重构前后, 配电网拓扑结构满足辐射状

$$g_k \in G_k, \quad (7)$$

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) 功率平衡约束

$$P_{MN} + \sum P_{i-DG} + \sum P_{j-EV} = \sum P_{k-L} + S, \quad (8)$$

式中: P_{MN} 为主网供电量; $\sum P_{i-DG}$ 为所有并网 DG 供电量; $\sum P_{j-EV}$ 为所有并网 EV 放电量; $\sum P_{k-L}$ 为所有并网负荷用电需求量; 式中 S 表示网络总的线路损耗。

3) 电压质量约束

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

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) 配电网各线路电流约束

$$I_l \leq I_{l \max}, l = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

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。

5) 开关操作约束

$$N_{swi} \leq N_{total}, \quad (11)$$

式中: N_{swi} 为 ADN 故障恢复开关动作次数; N_{total} 为开关操作次数的上限值。

6) 分布式电源出力约束

$$P_{DG}^{\min} \leq P_{DG} \leq P_{DG}^{\max}, \quad (12)$$

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。

7) EV 充放电约束

a) EV 充放电电池约束

$$S_{chmin} \leq S_{ch}(t) \leq S_{chmax}, \quad (13)$$

$$S_{mastermin} \leq S_{master}, \quad (14)$$

式中: S_{chmin} 和 S_{chmax} 为保证电池寿命的最小和最大充放电约束, 防止过分充放电; S_{master} 为 EV 的放电功率; $S_{mastermin}$ 为车主可接受的最低放电状态。

b) 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^[15]。

$$0 \leq P_{ch}(t) \leq P_{chmax}, \quad (15)$$

$$0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dismax}, \quad (16)$$

$$P_{ch}(t) \cdot P_{dis}(t) = 0, \quad (17)$$

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

8) 用户满意度约束

本文定义用户满意度约束 S , 分母表示所有负荷价

值量; 分子表示得到恢复的所有负荷价值量:

$$S = \frac{\lambda_i \cdot \sum_{i \in P} L_i - \sum_{i \in P} L_{i-loss} \cdot \lambda_i}{\lambda_i \cdot \sum_{i \in P} L_i}. \quad (18)$$

S 应该满足的约束条件为

$$S \geq S_{\min}, \quad (19)$$

式中: $S_{\min}$ 表示满意度的下限值; λ_i 为节点 i 的权重; L_i 为节点 i 的负荷值; L_{i-loss} 为节点 i 的失电负荷量。

4 ADN 故障恢复博弈模型 (Service restoration model of ADN using game theory)

4.1 博弈参与人 (Players)

基于 ADN 的各种技术支持, 电力用户通过参与需求响应由被动转向主动, 为 ADN 故障恢复提供新的求解思路, 同时, 电网侧和用户侧既存在利益相关又存在利益冲突, 为了实现双方利益的均衡, 本文设置电网代理和用户总代理作为博弈参与人, 开展合作博弈。

4.2 博弈策略 (Game strategy)

策略是对参与人如何进行博弈的一个完整描述, 是指每个参与人在博弈中可以采取的行动方案, 每个参与人都有可供其选择的多种策略。电网对馈线、DG 和开关代理具有主动控制的权利, 其给出的策略集是馈线、DG 和开关的运行状态, 可以表示为

$$PGA_p = \{FA_1, \dots, FA_i; DG_1, \dots, DG_j; SA_1, \dots, SA_k\};$$

用户总代理可以主动协调可控负荷、不可控负荷和 EV 的并网情况, 其给出的策略集是可控负荷、不可控负荷和 EV 并网的状态, 可以表示为

$$UGA_q = \{IL_1, \dots, IL_x; UL_1, \dots, UL_y; EV_1, \dots, EV_z\}.$$

综上, 一种恢复策略表示为 $X_i = PGA_i \cup UGA_i$, 恢复策略空间表示为 $X_i = X_1 \times \dots \times X_n = \prod_{i \in N} X_i$. 其中所有变量解释同第 2.1 节所述。

根据网络拓扑分析可知, 负荷节点、支路开关和馈线分布都会影响网络重构后的结构, 且 EV 的并网、负荷开断量大小和 DG 的并网情况会影响网络潮流, 改变电压质量和网损值大小等。电网和用户总代理给出的恢复策略具有彼此关联又相互冲突的关系。以图 3 为例说明恢复策略空间的生成过程, 假设针对某一故障点, 电网代理和用户总代理分别给出了两种不同的策略, 可以随机组成 4 种恢复方案, 该 4 种恢复方案既有相同的操作又有不同的操作, 其所代表的含义是: 电网和用户的利益既有关联又有冲突, 因此, 需要分别对电网和用户的利益进行分析, 基于合作博弈理论求得满足纳什均衡的恢复策略。

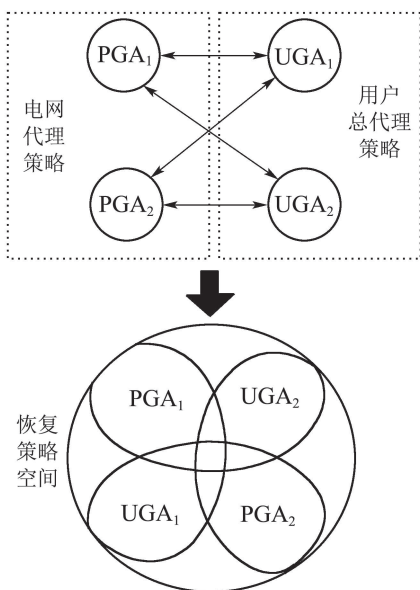


图3 恢复策略空间生成示意图

Fig. 3 Formation sketch of restoration strategies space

4.3 电网代理、用户总代理的利益函数 (Interest functions of PGA and UGA)

1) 电网代理利益函数.

在配电网恢复重构过程中, 电网代理代表供电侧的利益, 其利益是实现运行费用最小化, 即包括网损最小, 开关损耗最低, 对用户停电赔偿最少. 因此, 电网代理的利益函数为

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

式中: E_{power} 代表电网代理利益函数; E_{SS} 是网损构成的运行费用; E_{KK} 是开关动作构成的运行费用; E_{PC} 是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, 表示有效值; 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; $L_{i-\text{loss}}$ 代表第 i 个节点负荷的失电量; N 为所有支路集合; P 为所有负荷节点集合; a, b, c 分别为网损费用折算因子 (元/kW), 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). 由于本文主要研究故障期间负荷的紧急调度, 不涉及合同的签订, 因此设赔偿金及下文式(21)的损失成本为定值, 文献[14]对负荷中断成本和补偿价格进行了深入的研究.

2) 用户总代理利益函数.

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不可中断负荷停电而所得的电网赔偿费用. 用户总代理期望其利益最大化.

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

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} 代表用户侧总利益; $E_{i-\text{benefit}}$ 代表单个用户的利益; c_x 为EV向电网反向供电售电价 (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); ξ 为单位中断量固定损失成本 (元/kW), $\xi > \delta$. 其他变量同式(20).

4.4 协调代理求解 (Coordination agent calculation)

在协调代理中, 以电网和用户的共同利益函数来指导电网代理和用户总代理的合作博弈, 从恢复策略空间优选出满足纳什均衡的恢复方案. 综合考虑不可控负荷的失电量、网损、电压质量和开关操作次数4个指标来评价恢复方案的优劣, 通过归一化处理, 定义协调代理的目标函数如式(23)所示:

$$W = \omega_1 \frac{L_{\text{loss-max}} - L_{\text{loss}}}{L_{\text{loss-max}} - L_{\text{loss-min}}} + \omega_2 \frac{S_{\text{max}} - S}{S_{\text{max}} - S_{\text{min}}} + \omega_3 \frac{U - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} + \omega_4 \frac{N_{\text{swi-max}} - N_{\text{swi}}}{N_{\text{swi-max}} - N_{\text{swi-min}}}, \quad (23)$$

式中: L_{loss} 为负荷失电量 (kW); S 为网损值 (kW); U 为节点最低电压, 标幺值; N_{swi} 为所有开关动作次数; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为不可控失电负荷量、网损、节点最低电压和开关操作次数的权重系数, 该系数考虑配电网故障的严重情况, 采用模糊层次分析法求解.

5 多代理系统下的ADN故障恢复博弈策略 (Service restoration strategy using MAS and game theory)

改进的蚁群算法是一种寻找优化路径的机率型算法, 具有正反馈、并行计算、寻优能力强等的特征, 适用于高维、多目标、多约束的非线性故障恢复问题的求解. 因此, 在电网代理的求解计算模块中嵌入改进的蚁群算法进行恢复路径寻优和前推回代算法进行潮流验证^[11]; 应用统计学方法确定配电网电力负荷是一种简捷有效的方法, 可指导配电网运行管理、规划分析、紧急调度等. 因此, 在用户总代理的求解计算模块中嵌入统计学方法^[16]; 模糊-层次分析法是一种根据模糊数学隶属度理论进行定性和定量分析的决策方法^[17]. 具有结构严谨性, 求解简洁性的特点. 因此, 在协调代理的求解模块中嵌入模糊层次分析算法. 具体的博弈求解步骤如下:

1) 故障发生, 启动多代理系统.

2) 电网子代理DGA, SA, FA分别上报各自的策略到电网代理, 电网代理调用蚁群算法对策略进行整合, 并反馈给子代理, 经子代理和潮流计算校验后得到的策略集存储到知识库A; 用户子代理ILA, ULA和EVA分别上报策略到用户总代理, 用户总代理整合策略后

再反馈给子代理,经子代理和满意度校验后得到的策略集存储到知识库B.

3) 将迭代后的电网总代理和用户总代理策略进行整合,得到博弈参与人(电网代理和用户总代理)的初始策略集合为 $\prod_{i \in N} S_i^l$.

4) 在博弈参与人之间开展有限次博弈.开展第一轮博弈,在用户总代理策略不变的前提下,逐轮优化电网代理的策略使得电网和用户总代理的共同利益函数最大化.

5) 开展第二轮博弈,在电网总代理策略不变的前提下,逐轮优化用户总代理的策略使得电网和用户总代理的共同利益函数最大化.

6) 当优化到第 m 轮博弈时,得到的策略组合 $\prod_{i \in N} S_i^m$ 和第 $m+1$ 轮博弈中得到的策略组合 $\prod_{i \in N} S_i^{m+1}$ 相同,则表明在该策略下,任何参与者都不可能通过独立改变策略而获得更多的收益.根据纳什均衡的定义可以认为该策略组合下的博弈达到了纳什均衡点.

多代理系统下的ADN故障恢复博弈策略具体流程如图4所示.

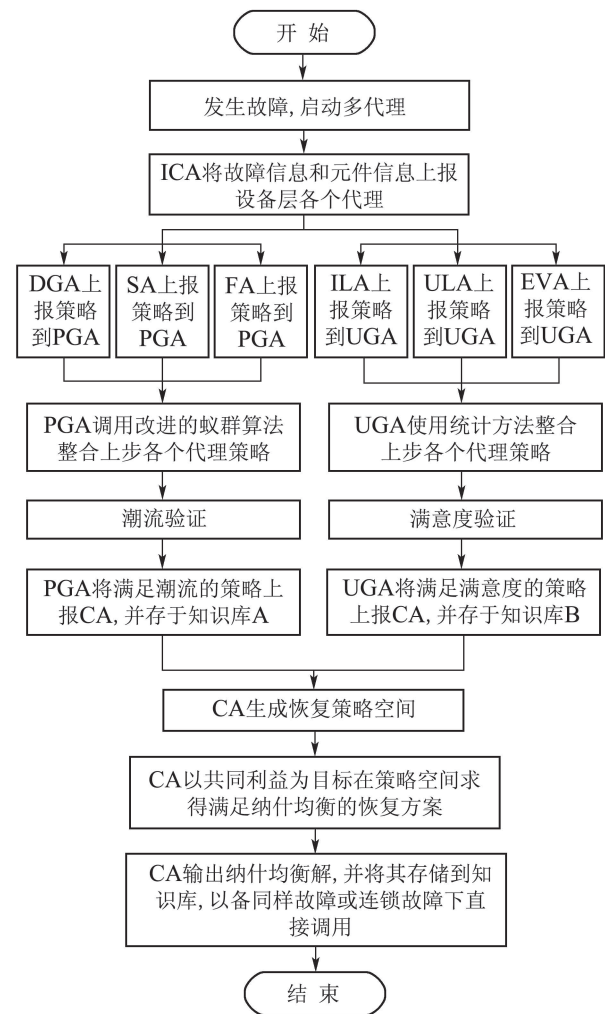


图 4 多代理系统下的ADN故障博弈恢复流程图

Fig. 4 Flowchart of service restoration using MAS and game theory in ADN

6 算例分析(Case study)

采用改进的IEEE69节点配电网为例验证策略的有效性,用MATLAB进行仿真分析,配电网结构如图5所示,系统总的容量为 $3802.19+j2694.60$ kVA.该配电网共有69个节点,有4条联络开关支路如虚线所示(处于常开状态);68条分段开关支路如实线所示(处于常闭状态),额定电压为12.66 kV.均含有储能装置的DG1, DG2和DG3分别连接在10节点、69节点和25节点处,它们的稳定输出功率分别为200 kW, 300 kW 和 200 kW; EV充电站安装在38节点处,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4 kW,网损费用折算因子 $a = 0.32$ 元/次; EV充电电价折算因子 $a_x = 0.5$ 元/kW, EV放电电价折算因子 $c_x = 1.0$ 元/kW.设开关的动作损失为 $b = 10$ 元/次;设单位中断量负荷固定损失成本为 $\delta = 2.0$ 元/kW,单位失电负荷赔偿金折算因子 $\delta = 1.0$ 元/kW;本文取开关操作上限值 $N_{\text{total}} = 8$;用户最低满意度为 $S_{\text{min}} = 95\%$;调用改进的蚁群算法进行网络优化,设置蚂蚁个数为69个,初始化信息素浓度 $\tau = 1$,取挥发系数 $\rho = 0.9$,信息素权重因子 $\beta = 2$,最大进化代数30.所有负荷的重要度等级和可控、不可控性质如表1所示.

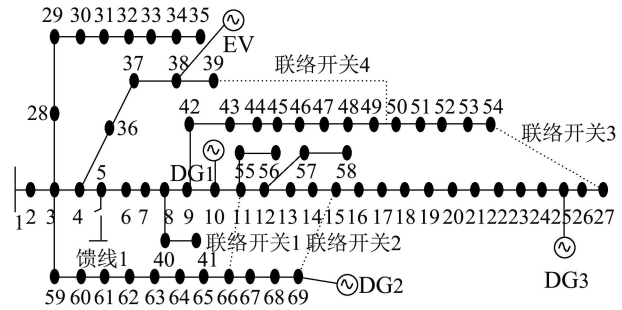


图 5 改进的IEEE 69节点配电系统

Fig. 5 Improved IEEE 69 node distribution network

表 1 失电负荷的负荷等级
Table 1 Load level of lost load

负荷类型	负荷等级	负荷节点号
不可控负荷	—	3,4,5,16,17,18,24,25,26,29,30,31,32,36,37,44,45,46,53,54,61,62,63
	二	2,9,10,11,15,19,22,23,27,28,33,38,40,43,47,52,57,60,66,67
	三	6,8,13,14,20,34,42,49,51,55,59,64,65,68
可控负荷 (30%可控)	三	7,12,21,35,39,41,48,50,56,58,69

6.1 单故障恢复重构(Reconfiguration of single failure)

假设支路14-15发生故障,缺电的有功功率为1300 kW.信息采集代理感知周围环境,将故障信息和电流、电压等信息上传到设备层各个子代理.设备层子代理分别作出各自的决策,并将其决策上传到电网代理和用户总代理.

1) 电网代理恢复策略集的生成.

分布式电源代理的决策:由于DG并网可以改善网络潮流,且弥补供电缺额,因此DG1和DG2都并网运行;由于DG3处于故障失电区,根据文献[11]可知,DG3不带负荷孤岛运行.

开关代理:由于支路14-15上某处发生故障,位于支路14-15上的分段开关必须立即断开;由于联络开关2与失电区域直接相连,属于一级支持馈线,应该处于闭合状态,而其他3条联络开关的状态可通过与分段开关的状态相配合再定.

馈线代理的决策:根据恢复方案,对每条供电路径的负荷量进行计算,根据负荷均衡目标实时调整供电路径.

电网代理:调用改进的蚁群算法和前推回代算法进行潮流验证,对以上策略进行整合,给出电网代理的恢复策略集如表2所示,并将其上报到协调代理.

表2 电网代理的恢复策略集

Table 2 The restoration strategies set of PGA

恢复策略集	网损/ kW	最低电压/ p.u.	开关动作 次数
分段开关14-15, 45-46, 50-51断开, 联络开关2, 3, 4闭合	88.3410	0.9443	6
分段开关8-9, 10-11, 14-15断开, 联络开关1, 2, 4闭合	105.8434	0.9321	6
分段开关10-11, 14-15, 50-51断开, 联络开关1, 2, 3闭合	129.8256	0.9370	6

2) 用户总代理恢复策略集的生成.

电动汽车代理:由于故障后的配电网失电有功功率为1300 kW,而DG的可并网容量为500 kW,因此,EV代理仍需要充分启动电动汽车充电桩为电网供电.电动汽车代理通过支付一定补偿费用将分散的电动汽车储能资源进行有效调度.共有50辆EV用户积极参与故障放电辅助服务.

可控负荷代理:EV和DG的可并网容量为700 kW,仍有600 kW的电力缺口需要满足,因此,至少需要削减600 kW的可控负荷.并且,不同负荷节点的不同削减量会影响网络潮流,因此需要统计可控负荷削减量

不小于600 kW的所有可削减负荷组合方案,倘若削减可控负荷过多,会增加失电损失,因此取前3种负荷削减容量最小的方案即可.

不可控负荷代理:通过与其他代理之间的协商,得知电网整体的供电裕度满足要求,不需要再切除不可控负荷.

用户总代理:通过统计电动汽车代理、负荷代理的上报数据,整合为3种恢复策略,如表3所示.分别对每种策略进行满意度分析,该3种恢复策略的满意度分别为99.211%, 99.223%, 99.221%,符合要求,因此,用户总代理将该恢复策略集上报协调代理.

表3 用户总代理的恢复策略集

Table 3 The restoration strategies set of UGA

恢复策略集	可控负荷 失电量/ kW	不可控负 荷失电量/ p.u.	EV总放 电功率/ kW
削减节点7, 12, 21, 39, 48, 50的可控部分, 剩余节点全额供电	608.43	0	200
削减节点7, 12, 35, 39, 48, 50, 56, 58, 69的可控部 分, 剩余节点全额供电	599.31	0	200
削减节点7, 12, 21, 39, 50, 56, 58, 69的可控部 分, 剩余节点全额供电	600.63	0	200

3) 协调代理恢复策略生成.

协调代理整合电网代理和用户总代理的恢复方案,得到的恢复策略空间共包含9种不同的恢复方案,具体如表4所示.协调代理以式(23)最大化为目标,采用模糊层次分析法进行最终的合作博弈决策,取 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为0.21, 0.35, 0.32和0.12,最终求得方案4为纳什均衡解.采用从线路末端切负荷的传统方式进行切负荷操作,并采用文献[18]提及的恢复策略对该配电网进行重构,得到的恢复方案同样列于表4.

由表4可知,恢复空间中的9种恢复方案都满足电网和用户双方的利益追求,但是观察以上指标可知,方案4更能实现电网和用户利益的最大化.且针对恢复方案4,没有一个参与人能够通过改变策略来使所有参与人的利益函数都变优,因此,该恢复方案即为纳什均衡解;将方案4和文献[18]的恢复方案相比较,由于文献[18]所提恢复策略没有充分考虑负荷侧利益,因此负荷满意度极低,即使其他指标再优秀,也不是一个使电网和用户都满意的解,不能均衡用户和电网之间的利益.将本文所提恢复策略与文献[18]所提恢复策略得到的最终恢复方案进行利益分析,对比结果如表5所示.

表 4 恢复策略空间
Table 4 Space of service restoration strategies

方案	恢复策略	网损/ kW	失电负 荷有功 功率/kW	最低 电压/V	开关 操作 次数	负荷满 意度/%	EV放电 有功功 率/kW
方案1	分段开关14-15, 45-46, 50-51断开, 联络开关2, 3, 4闭合, 削减节点7, 12, 21, 39, 48, 50的可控部分, 剩余节点全额供电	50.2142	608.43	0.9601	6	99.211	200
方案2	分段开关8-9, 10-11, 14-15断开, 联络开关1, 2, 4闭合, 削减节点7, 12, 21, 39, 48, 50的可控部分, 剩余节点全额供电	59.4541	608.43	0.9496	6	99.211	200
方案3	分段开关10-11, 14-15, 50-51断开, 联络开关1, 2, 3闭合, 削减节点7, 12, 21, 39, 48, 50的可控部分, 剩余节点全额供电	70.9992	608.43	0.9567	6	99.211	200
方案4	分段开关14-15, 45-46, 51-52断开, 联络 开关2, 3, 4闭合, 削减节点7, 12, 35, 39, 48, 50, 56, 58, 69的可控部分, 剩余节点全额供电	51.0603	599.31	0.9601	6	99.223	200
方案5	分段开关8-9, 10-11, 14-15断开, 联络 开关1, 2, 4闭合, 削减节点7, 12, 35, 39, 48, 50, 56, 58, 69的可控部分, 剩余节点全额供电	59.7041	599.31	0.9496	6	99.223	200
方案6	分段开关10-11, 14-15, 50-51断开, 联络 开关1, 2, 3闭合, 削减节点7, 12, 35, 39, 48, 50, 56, 58, 69的可控部分, 剩余节点全额供电	71.8102	599.31	0.8567	6	99.223	200
方案7	分段开关14-15, 46-47, 53-54断开, 联络 开关2, 3, 4闭合, 削减节点7, 12, 21, 39, 50, 56, 58, 69的可控部分, 剩余节点全额供电	61.9094	600.63	0.9481	6	99.221	200
方案8	分段开关8-9, 10-11, 14-15断开, 联络 开关1, 2, 4闭合, 削减节点7, 12, 21, 39, 50, 56, 58, 69 的可控部分, 剩余节点全额供电	60.8858	600.63	0.9486	6	99.221	200
方案9	分段开关10-11, 14-15, 50-51断开, 联络 开关1, 2, 3闭合, 削减节点7, 12, 21, 39, 50, 56, 58, 69的可控部分, 剩余节点全额供电	72.9272	600.63	0.9555	6	99.221	200
文献[18]	分段开关8-9, 10-11, 14-15和23-24断开, 联络开关1, 2, 3和4闭合, 削减节点24, 25, 27, 52, 53, 54的不可控负荷和节点50的 可控部分, 剩余节点全额供电	38.4784	701.2	0.9631	8	58.633	100

表 5 不同恢复方案的利益对比
Table 5 Benefits comparison of different strategies

故障点	策略	供电侧利益/元	用户侧利益/元	总利益/元	计算时间/s
14-15	重新生成 恢复空间	-706.87	-530.63	-1237.5	107.80
43-44	直接调用	-709.77	-533.50	-1243.27	3.88

由表5可以看出, 本文所提恢复策略得到的恢复方案, 无论是对于电网侧还是用户侧亦或双方总利益, 其损失都比文献[18]的恢复方案损失小. 本文所提恢复策略不仅可以充分实现各方利益追求, 更能在恢复

中均衡双方利益.
6.2 连锁故障恢复重构(Reconfiguration of cascading failures)
假设14-15支路发生故障, 在恢复的过程中, 43-44

支路突发新的故障,即连锁故障发生. 缺失电量的有功功率为1330 kW. 由于该连锁故障是在原来的单故障基础上发展而来,失电负荷量相近,故直接从知识库调用单故障下的均衡解作为本次故障恢复的参考结果,然后经过电网代理和用户总代理的修正后,即得到该连锁故障的恢复方案.

用户总代理在满足满意度约束的前提下,给出的策略是“在原有的被削减负荷基础上增加削减节点21的可控部分”;而电网代理在潮流约束的前提下将“断开分段开关45-46”的操作修改为“断开分段开关43-44”. 最终的恢复方案是“断开分段开关14-15, 43-44, 51-52”, 闭合联络开关2, 3, 4, 削减7, 12, 21, 35, 39, 48, 50, 56, 58, 69节点的可控部分, 剩余节点全额供电.

倘若采用常规的多代理求解思路,需要重新生成恢复策略空间,所有代理都需要重新启动,重新进行计算,计算过程类似6.1单故障恢复重构. 最终得到的恢复结果是“断开分段开关14-15, 43-44, 52-53, 闭合联络开关2, 3, 4, 削减7, 12, 21, 39, 48, 50, 56, 58, 69节点的可控部分, 剩余节点全额供电”.

最后,将本文直接调用并修正的恢复方案与重新生成恢复空间得到的恢复方案进行对比,如表6所示.

表6 连锁故障的不同恢复结果

Table 6 Different recovery results of cascading failures

方案	用户满意度/%	失电负荷/kW	网损/kW	最低电压/p.u.
直接调用	99.220	633.50	50.8314	0.9593
重新生成恢复空间	99.223	630.63	50.7369	0.9595

由表6可知,直接调用结果的各项恢复指标和重新生成恢复空间的各项指标相比,用户满意度都符合约束. 失电负荷指标稍差,网损、最低电压指标几乎无差别. 可见对单故障的恢复方案进行修正后,得到的连锁故障恢复策略有效可行.

然后,对以上两种恢复结果进行利益分析和计算速度比较,结果如表7所示.

表7 不同恢复方案的利益对比

Table 7 Benefits comparison of two strategies

故障点	方案	电网侧利益/元	用户侧利益/元	总利益/元
14-15	本文	-675.65	-499.31	-1174.96
	文献[18]	-793.51	-601.2	-1394.71

由表7可见,以上两种恢复方案的利益对比结果并无很大的差异,虽然直接调用单故障的纳什均衡恢复

结果使得电网侧和用户侧的损失稍有增加,但是极大地提高了计算速度,且减少了大量不必要代理的参与.

7 结论(Conclusions)

本文在前人研究多代理故障恢复的基础上,充分考虑供电侧和用户侧双方的利益,提出了多代理系统下的主动配电网故障恢复博弈策略. 通过分析各个子代理的目标函数和约束条件,决定故障恢复中电网和用户的利益,求得的恢复结果更加有利于实现双方的利益. 同时,对电网和用户进行合作博弈,能够有效地整合电网和用户各自的策略,求得满足双方利益的纳什均衡解. 且多代理系统下的ADN故障博弈恢复策略不仅适用于单故障的恢复,更适用于连锁故障的恢复,尤其大大加快了连锁故障问题的求解速度.

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] CHEN X, WU W, ZHANG B. Robust restoration method for active distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(5): 4005 - 4015.
- [3] SHARMA A, SRINIVASAN D, TRIVEDI A. A decentralized multi-agent approach for service restoration in uncertain environment [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, PP(99): 1 - 1.
- [4] SONG I K, JUNG W W, KIM J Y, et al. Operation schemes of smart distribution networks with distributed energy resources for loss reduction and service restoration [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(1): 367 - 374.
- [5] XU Y, LIU C C, SCHNEIDER K, et al. Microgrids for service restoration to critical load in a resilient distribution system [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(1): 426 - 437.
- [6] DIMITRIJEVIC S, RAJAKOVIC N. Service restoration of distribution networks considering switching operation costs and actual status of the switching equipment [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(3): 1227 - 1232.
- [7] LIU Dandan, DUAN Bin, WANG Jun, et al. Multi agent system based on IEC 61850 for active distribution network fault self recovery multi agent system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 119 - 126.
(刘丹丹, 段斌, 王俊, 等. 基于IEC 61850的主动配电网故障自恢复多代理系统 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 119 - 126.)
- [8] MEI Shengwei, LIU Feng, WEI Wei, et al. *Engineering Game Theory and Application of Power System* [M]. Beijing: The Science Publishing House, 2016: 198 - 209.
(梅生伟, 刘锋, 魏巍, 等. *工程博弈论基础及电力系统应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 198 - 209.)
- [9] LUI Bin, CHEN Laijun, WANG Yuchen, et al. Allocating reserve cost for hedging against wind generation uncertainty: a coalitional-game-theoretic approach [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(4): 437 - 445.
(刘斌, 陈来军, 汪雨辰, 等. 应对风电出力不确定性的备用成本分摊: 联盟博弈方法 [J]. *控制理论与应用*, 2016, 33(4): 437 - 445.)
- [10] WANG Guanqun, ZHANG Xuemin, LIU Feng, et al. Game theory algorithm of reconfiguration for shipboard power system [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2012, 32(13): 69 - 76.
(王冠群, 张雪敏, 刘锋, 等. 船舶电力系统重构的博弈算法 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(13): 69 - 76.)

- [11] YANG Lijun, CAO Yujie, ZHANG Zizhen. A game model of dynamic island partition for distribution network with DGs [EB/OL]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(6): 1410 – 1421.
(杨丽君, 曹玉洁, 张子振. 基于博弈思想的主动配电网故障灵活分层恢复策略 [EB/OL]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1410 – 1421.)
- [12] SHARMA A, SRINIVASAN D, TRIVEDI A. A decentralized multi-agent system approach for service restoration using DG islanding [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(6): 2784 – 2793.
- [13] GUAN Yongqiang, JI Zhijian, ZHANG Lin, et al. Recent developments on controllability of multi-agent systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(4): 421 – 431.
(关永强, 纪志坚, 张霖, 等. 多智能体系统能控性研究 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(4): 421 – 431.)
- [14] HUANG Haitao, HU Xueying, LI Xiang, et al. A practicable optimal compensation pricing model for incentive interruptible load contract [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(8): 2149 – 2154.
(黄海涛, 胡学英, 李翔, 等. 实用化的激励性可中断负荷最优补偿定价模型 [J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2149 – 2154.)
- [15] WANG L, SHARKH S, CHIPPERFIELD A, et al. Dispatch of vehicle-to-grid battery storage using an analytic hierarchy process [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(4): 2952 – 2965.
- [16] ZHANG Huixian. *Studies on power system load statistical characteristics* [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007: 31 – 39.
(张会贤. 电力系统负荷统计学特性的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2007: 31 – 39.)
- [17] WANG Zengping, YAO Yuhai, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration based on rank preference optimal and load shedding [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(20): 185 – 192, 209.
(王增平, 姚玉海, 郭昆亚, 等. 基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 185 – 192, 209.)
- [18] YANG Lijun, LU Zhigang, WEN Ying. Fault recovery of distribution network containing asynchronous wind power generation units [J]. *Power System Technology*, 2010, 34(2): 133 – 137.
(杨丽君, 卢志刚, 文莹. 含异步风电机组的配电网故障恢复研究 [J]. 电网技术, 2010, 34(2): 133 – 137.)

作者简介:

杨丽君 (1972–), 女, 硕士生导师, 研究方向为电力系统故障恢复及其控制, E-mail: 195320008@163.com;

曹玉洁 (1991–), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网故障恢复及控制, E-mail: 1172171755@qq.com;

何新 (1983–), 女, 硕士, 主要研究方向为电网经济运行、电力市场, E-mail: h8336@hotmail.com;

王伟浩 (1985–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网故障恢复及控制, E-mail: 1415916999@qq.com;

王晨 (1991–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网故障恢复及控制, E-mail: 919405796@qq.com.