

基于合作博弈的多微电网系统灾后恢复决策模型

姚维强¹, 周 健¹, 时珊珊¹, 高仕林², 陈 颖²

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437;

2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要:配电网由于灾害等原因停电时,处于该配电网中的多个微电网之间可以进行合作,实现合作区域内储能等资源的优化利用,提升关键负荷的供电可靠性。本文提出一种基于合作博弈的多微电网系统灾后恢复决策模型。建立了多微电网的合作博弈模型,研究了各微电网合作的条件,并根据 Shapley 值对合作联盟的收益进行分配。实际多微电网系统的测试结果,验证了本文所建立的基于合作博弈的多微电网系统灾后恢复决策模型的正确性。

关键词:合作博弈;多微电网系统;灾后恢复;合作条件;收益分配

DOI: 10.12067/ATEEE2007040

文章编号: 1003-3076(2021)03-0032-07

中图分类号: TM73

1 引言

微电网不仅能够实现对分布式新能源的有效利用和灵活管控,解决边远地区的供电难题,还能在配电网停电情况下保证内部及周边重要负荷的持续供电,提升配电网应对极端自然灾害的能力^[1]。随着微电网技术的发展,在一个配电网区域,有可能会多个临近的微电网,而这些微电网相互连接,即可构成一个多微电网系统^[2]。以广西省猫儿山多微电网系统示范工程为例,其各微电网运行时可以相互合作,提升系统运行的安全性和可靠性^[1,2]。尤其在上级配电网停电时,多微电网之间的合作能够显著提升配电网的韧性^[3-5],各微电网之间的主动合作可以实现合作区域内储能等资源的优化利用,保障重要负荷供电^[6]。各微电网在灾后恢复阶段的合作可以提升多微网系统灾后运行的经济性和安全性。多微电网之间的合作也会间接影响其所在配电网的规划管理等。对灾后期间的多微网系统之间的合作条件、收益分配等研究具有重要意义。

文献[7,8]研究了极端灾害导致大范围停电后,微电网的恢复步骤,并讨论了其控制算法,减少了灾后的恢复时间。但是,微电网中盈余的电能没有被有效地用于恢复配电网中其他关键负载。若一

个微电网在完成内部自身恢复后还有盈余的电能,该微电网可为其余受灾停电的负载提供电能。这使得微网的资源得到充分利用,提升了配电网的韧性^[9-11]。文献[12]提出了一种让微电网之间分享发电和蓄电容量的互补方法,降低了微电网的总投资和运营成本,显著增强了整个配电网的韧性。为了加快电力系统的恢复,文献[13]设计了一种微电网群的结构,微电网之间的电力传输由配电网进行调控,配电网定期收集和整合网络微电网所提供的信息,并确定最佳的电力传输协调运作方式。综上所述,目前鲜见关于灾后恢复期间各微电网进行合作的条件和合作后产生收益的分配机制的研究。多个微电网相互配合能够充分利用各个微电网的资源,并进行资源的集中优化配置,具有更大的经济效益。合作博弈是一种研究多主体之间合作的常用方法,适用于研究灾后恢复期间微电网进行合作的条件和合作后产生收益的分配问题。

已有不少文献研究了合作博弈在微电网中的应用。由于微电网与电网之间进行电能交易产生的损耗往往要高于微电网之间直接电能传输的损耗,文献[14]研究了同一变电站下微电网群的联盟划分和合作联盟内微电网的利益分配。文献[15]提出了一种多微电网系统中微电网最优联盟形成的机

收稿日期: 2020-06-15

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目(B30940190008)

作者简介: 姚维强(1969-),男,上海籍,高级工程师,硕士,研究方向为智能配电网技术;

周 健(1974-),男,上海籍,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统自动化技术。

制,通过联盟电能的转移,最大限度地减少微电网联盟的购电需求,从而减小微电网系统对配电网的依赖。文献[16]提出含光伏的微电网群的合作博弈模型,促进余电微电网与缺电微电网之间的能量互动,以提高联盟的整体效益。文献[17]研究了多个临近微电网之间的联盟合作来应对配电网停电风险。文献[18]提出一种基于合作博弈联盟核心的成本分摊方法,以保证微电网联盟成员之间成本的公平分摊和联盟的经济稳定性。总的来说,合作博弈在微电网的相关研究中,已经有较为广泛的应用,取得良好的效果。考虑到灾后恢复期间多微电网之间存在合作的可能性,可以建立基于合作博弈的多微电网系统灾后恢复决策模型,提升多微网系统运行的经济性和安全性,保障关键负荷的供电可靠性。

基于这一考虑,本文对灾后恢复阶段,多微电网之间的合作进行研究,建立基于合作博弈的多微电网系统灾后恢复决策模型。首先建立了多微电网灾后恢复期间的合作博弈模型,然后分析了多微电网形成联盟的条件,最后研究了合作后取得收益的分配,并在多个算例上对建立的模型进行了验证。

2 多微电网系统合作博弈建模

2.1 多微电网系统模型

正常情况下,连接在同一条馈线末端的多微电网系统并网运行。上级配电网发生故障停电时,上级配电网不能再为多微电网系统提供电能。此时,微电网可以离网运行。微电网中的储能和分布式电源继续为负荷供电。本文考虑台风等恶劣灾后情形的恢复决策,在这种情况下,各微网的光伏等分布式电源有大概率会因为恶劣天气而不能正常工作。故本文假设电网内部分布式电源出力为0,微电网仅依靠储能为微电网供电。需要说明的是,这里的储能是指一种泛化的储能的概念。由于本文关注的是灾后备用电源的可持续放电容量,故本文所提的储能不仅包含传统的储能电池等,也包含油发电机等备用电源。下面对微电网中的储能、负荷等进行建模。本文旨在对多微电网系统灾后合作恢复的运行模式进行探讨,故在后面的建模中未对微电网动态过程、潮流约束等进行考虑。

在台风等恶劣灾害来临时,各微电网将根据天气预报,提前了解和配置自身的储能或根据微电网监控系统实时了解储能的状态^[19-21]。由于无论何种形式的储能本质上都可以用可持续放电容量和最

大出力两个指标进行建模,为此下面仅针对这两个指标进行建模。微电网 i 中全部储能的可持续放电容量可以定义为 E_{si} ,其最大出力可以定义为 P_{si} 。

对微电网 i 的负荷,根据负荷重要程度可以将其划分为 M_i 级。微电网 i 中,最重要负荷的功率定义为 P_{i1} , P_{i1} 的单位电量折合停电损失定义为 γ_{i1} ;第二级重要负荷功率为 P_{i2} ,其单位电量折合停电损失 γ_{i2} ;第 k 级负荷功率 P_{ik} 的单位电量折合停电损失 γ_{ik} ;微网 i 中最不重要的负荷的功率为 P_{iM_i} ,单位电量折合停电损失为 γ_{iM_i} 。其中, $P_{ik} \geq 0$, $\gamma_{ik} > \gamma_{i(k+1)} > 0$, $\forall k \in \{1, 2, \dots, M_i-1\}$ 。配电网单次停电的持续时间记为 T , T_{ik} 为微电网 i 中第 k 级负荷得到的供电时间, $0 \leq T_{ik} \leq T$, $\forall k \in \{1, 2, \dots, M_i\}$ 。停电后,各级负荷得到的供电功率定义为变量 P'_{ik} 。当微电网的储能不能满足微电网内全体负荷的供电需求时,优先保障各微电网中最为重要负荷的供电,这里的重要性由 γ_{ik} 表征。

2.2 多微电网的合作博弈模型

多微电网系统中,将全体微电网的集合定义为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。对 N 中的每一个非空子集 C (又称联盟 C)。当配电网停电时,联盟 C 中的微电网可以进行合作,统筹优化多微电网系统内的储能为各级负荷供电的时间,使得联盟 C 的停电损失最小。在停电时间持续 T 下,联盟 C 的收益特征函数可以定义为:

$$\begin{aligned} V(C) &= \max \sum_{i \in C} \sum_{k=1}^{M_i} \gamma_{ik} P'_{ik} T_{ik} \\ \text{s.t. } \sum_{i \in C} E_i - \sum_{i \in C} \sum_{k=1}^{M_i} P'_{ik} T_{ik} &\geq 0 \\ \sum_{i \in C} P_{si} - \sum_{i \in C} \sum_{k=1}^{M_i} P'_{ik} &\geq 0 \\ 0 \leq P'_{ik} &\leq P_{ik}, 0 \leq T_{ik} \leq T \end{aligned} \quad (1)$$

并定义 $V(\emptyset) = 0$ 。

综上,所建立的合作博弈模型 G 可以表示为如下形式:

$$G = \langle C, V \rangle \quad (2)$$

3 合作产生额外收益的条件

设有两个联盟分别为 C_1 和 C_2 ,其对应的特征函数式(1)的最优解分别记为 T_{C1} 和 T_{C2} 。容易发现, $T_{C1} \cup T_{C2}$ 是联盟 $\{C_1, C_2\}$ 的特征函数式(1)的一组可行解,其值小于等于其最优解。所以,联盟型博弈 G 具有超可加性,即各微电网形成合作后不会出

现收益下降。但这并不能保证多微电网一定能形成大联盟。灾后恢复期间,多微电网系统的初始状态为各微电网之间不存在合作。如果微电网形成合作的收益与微电网完全不合作对应的收益和相等,那么,各微电网显然没有足够的驱动力主动形成合作。因此,需要研究微电网合作能够产生额外收益的条件。

(1) 当各微电网的储能和储能最大出力都能够满足自身需求时,各微电网显然不会合作。即任意两个微电网 i 和 j , $i \neq j$, $\forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 的参数满足式(3)所示条件时,进行合作不会产生额外收益,它们不会合作。

$$P_{si} \geq \sum_{k=1}^{M_i} P_{ik}, P_{si} \geq \sum_{k=1}^{M_i} P_{ik} \quad (3)$$

$$\frac{E_{sj}}{T} \geq \sum_{k=1}^{M_j} P_{jk}, \frac{E_{sj}}{T} \geq \sum_{k=1}^{M_j} P_{jk} \quad (4)$$

(2) 当各微电网中储能的最大出力大于所有负荷之和,但储能的持续放电容量不足以提供给所有负荷时。容易发现当微电网 i 和 j 的参数满足式(5)时,两个停电后的微电网不会合作。

$$\gamma_{im_i} = \gamma_{jm_j} \quad (5)$$

式中, γ_{im_i} 是微电网 i 中第 m_i 阶负荷的单位电量折合停电损失; γ_{jm_j} 是微电网 j 中第 m_j 阶负荷的单位电量折合停电损失。 m_i 和 m_j 由式(6)和式(7)计算得到。

$$m_i = m_{i0} + 1 \quad (6)$$

$$m_j = m_{j0} + 1 \quad (7)$$

其中, m_{i0} 和 m_{j0} 由式(8)和式(9)决定:

$$\begin{aligned} \max m_{i0} \\ \text{s.t. } P_{soi} \geq \sum_{k=0}^{m_{i0}} P_{ik} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} m_{i0} \leq M_i - 1 \\ \max m_{j0} \\ \text{s.t. } P_{soj} \geq \sum_{k=0}^{m_{j0}} P_{jk} \end{aligned} \quad (9)$$

$$m_{j0} \leq M_j - 1$$

式中

$$P_{i0} = P_{j0} = 0 \quad (10)$$

$$P_{soi} = \frac{E_{si}}{T}, P_{soj} = \frac{E_{sj}}{T} \quad (11)$$

(3) 当储能的最大出力不能满足全部负荷需求,但微电网的持续放电容量能够满足需求时,若要两微电网不合作,微电网的参数同样需要满足式

(5)~式(7)。但其中的 m_{i0} 和 m_{j0} 由式(12)和式(13)计算得到。

$$\begin{aligned} \max m_{i0} \\ \text{s.t. } P_{si} \geq \sum_{k=0}^{m_{i0}} P_{ik} \end{aligned} \quad (12)$$

$$m_{i0} \leq M_i - 1$$

$$\begin{aligned} \max m_{j0} \\ \text{s.t. } P_{sj} \geq \sum_{k=0}^{m_{j0}} P_{jk} \end{aligned} \quad (13)$$

$$m_{j0} \leq M_j - 1$$

(4) 当储能的最大出力和可持续放电容量都不能满足负荷需求时,若要两微电网不合作,微电网的参数同样需要满足式(5)~式(7),但其中的 m_{i0} 和 m_{j0} 由式(14)和式(15)计算得到。

$$\begin{aligned} \max m_{i0} \\ \text{s.t. } P_{sei} \geq \sum_{k=0}^{m_{i0}} P_{ik} \end{aligned} \quad (14)$$

$$m_{i0} \leq M_i - 1$$

$$\begin{aligned} \max m_{j0} \\ \text{s.t. } P_{sej} \geq \sum_{k=0}^{m_{j0}} P_{jk} \end{aligned} \quad (15)$$

$$m_{j0} \leq M_j - 1$$

其中

$$P_{sei} = \min\{P_{soi}, P_{si}\} \quad (16)$$

$$P_{sej} = \min\{P_{soj}, P_{sj}\} \quad (17)$$

事实上,对第二种情况来说, $P_{soi} < P_{si}$, 所以式(8)和式(9)中选择的参数是 P_{soi} ; 对第三种情况来说, $P_{si} < P_{soi}$, 所以式(12)和式(13)中选择的参数是 P_{si} 。综上所述,第二、三、四种情况的不合作条件可以统一表示成一种形式,即联立式(5)~式(7),式(14)~式(17)的方程组。这表示如果两个微电网没有合作之前,各微电网能够满足的最后一级负荷的单位电量折合停电损失相等时,二者就不会合作。

4 收益的分配

4.1 分配的公平性

为了保证对产生的额外收益分配的公平性,可根据平均边际效应进行分配,即利用 Shapley 值进行分配。博弈 G 为超可加性博弈,微电网 i 根据 Shapley 值计算得到的收益 $\varphi_i(G)$ 可以由式(18)计算^[22]:

$$\varphi_i(G) = \frac{1}{n!} \sum_{C \subseteq N, i \in C} [(|C| - 1)! (n - |C|)! \cdot (V(C) - V(C \setminus \{i\}))] \quad (18)$$

式中, $|C|$ 为联盟 C 所含参与者的个数; $C \setminus \{i\}$ 为从集合 C 中删除元素 i 后的集合。

该分配方式表明, 某个微电网的“负”损失将根据 Shapley 值分配给微电网系统中所有参与合作的微电网, 使得每个微电网的收益较不合作时有所增加。

4.2 联盟的稳定性

利用 Shapley 值得到的分配保证了分配的公平性, 但却未必能保证分配的稳定性, 即联盟有可能瓦解。为了保证每个成员能够获得不少于它自身采取其他各种联盟方式所能获得的收益, 在计算完分配后, 利用式 (19) 对 Shapley 值进行验证。

$$\sum_{i \in C} \varphi_i \geq v(C), \forall C \subseteq N \quad (19)$$

如果分配 $\varphi_i(G)$ 满足式 (19), 说明该分配稳定。若不满足, 则说明该分配不稳定。此时, 则先求该合作博弈的核, 即求式 (19) 可行域, 然后求核中离 Shapley 值距离最近的一个点, 以该点作为合作博弈的分配。

5 基于合作博弈的多微网系统灾后恢复决策流程

根据上述模型, 可以得出基于合作博弈的多微电网系统灾后恢复决策流程, 如图 1 所示。首先, 根据合作条件判断多微电网系统是否合作, 以及合作的方式。然后, 根据联盟形成的方式, 计算联盟的收益。最后, 按照 Shapley 值计算各微电网分配到的收益, 并检验该分配是否满足稳定分配的条件, 如果满足, 决策结束; 若不满足, 求稳定分配中离 Shapley 值最近的一个点。

6 算例分析

本文针对广西省猫儿山多微电网系统设计了三个算例, 对所建立的模型进行验证。该多微电网系统示意图如图 2 所示。由图 2 可知, 该系统接入配电网末端, 包含 3 个微电网 ($N=3$), 依次编号为 MG1, MG2, MG3。灾害后, 系统中新能源出力为 0, 仅靠储能供电。

6.1 算例 1

3 个微电网的各参数如下:

MG1: $M_1 = 1, P_{11} = 180 \text{ kW}, \gamma_{11} = 1.8 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot$

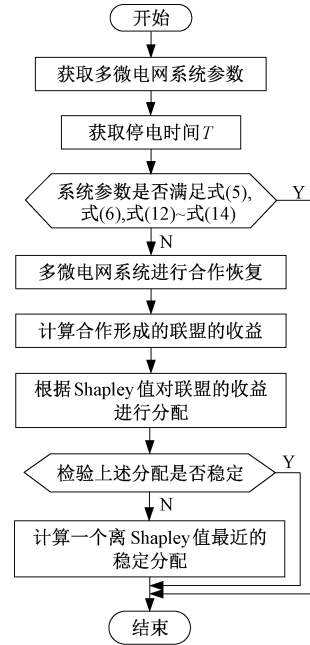


图 1 基于合作博弈的多微电网系统灾后恢复决策流程

Fig.1 Flowchart of recovery of multi-microgrid systems after disaster based on cooperative game

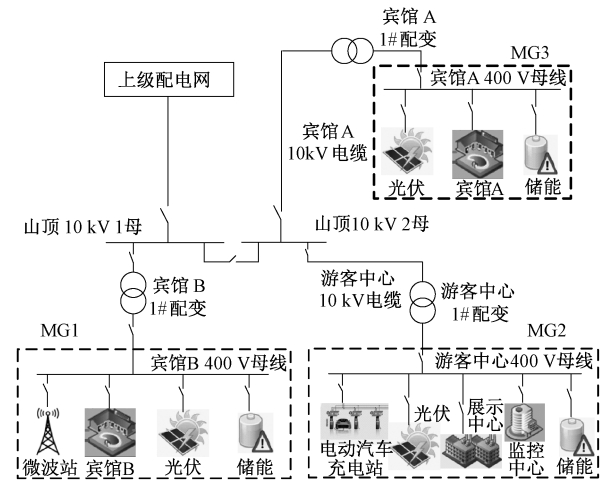


图 2 含三个微电网的多微电网系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of a multi-microgrid system with three microgrids

$h), E_1 = 40 \text{ kW} \cdot h, P_{s1} = 100 \text{ kW};$

MG2: $M_2 = 2, P_{21} = 30 \text{ kW}, \gamma_{21} = 2 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot h), P_{22} = 40 \text{ kW}, \gamma_{22} = 0.75 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot h), E_2 = 90 \text{ kW} \cdot h, P_{s2} = 150 \text{ kW};$

MG3: $M_3 = 2, P_{31} = 75 \text{ kW}, \gamma_{31} = 1.5 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot h), P_{32} = 110 \text{ kW}, \gamma_{32} = 0.7 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot h), E_3 = 80 \text{ kW} \cdot h, P_{s3} = 150 \text{ kW}.$

假设停电的时间为 0.75 h 。根据合作条件式

(5)~式(7)、式(14)~式(17)可知,三个微电网会进行合作。合作后产生的收益及收益的分配如表1所示。同时,表1中还给出了其他不同合作方式下,多微电网系统的总收益和各微电网基于 Shapley 值分配的收益。表1中,MG1、MG2、MG3 的收益都是基于 Shapley 值分配后的结果。可以发现,微电网之间的合作以及合理的分配能够显著提升各微电网的收益。以大联盟合作方式为例,相较于完全不合作,3 个微电网的收益分别提升了 139.18%、128.64%和 52.90%。该分配满足稳定性条件,是一个稳定公平的分配。若分配不合理,可能导致联盟

无法形成。另外,实际中,多微电网之间进行合作时,往往需要投入一定的人力物力成本,实际电网中的收益,其实是合作后产生的收益减去合作过程中需要另外投入的人力物力成本。当达成合作需要另外投入的成本已知时,可根据表1中合作带来的收益,估算各微电网合作的投资是否划算。

实际上,算例1代表的多微电网系统的初始状态是:各微电网储能的可持续放电容量不能满足自身的所有负荷,并且能供给的最后一级负荷的单位电量折合停电损失也不相等。在这种情况下,各微电网会形成合作。

表 1 算例 1 各种合作方式下系统和各微电网收益

Tab.1 Payoffs of microgrids under different cooperation approach in test system I

| 合作方式 | 多微网系统 整体收益/元 | MG1 收益 /元 | MG2 收益 /元 | MG3 收益 /元 | MG1 收益提 升百分比(%) | MG2 收益 提升百分比(%) | MG3 收益提升 百分比(%) |
|-------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| {1,2,3} | 489.00 | 172.21 | 154.33 | 162.46 | 139.18 | 128.64 | 52.90 |
| {1,2},{3} | 344.75 | 121.5 | 117 | 106.25 | 68.75 | 73.33 | 0 |
| {2,3},{1} | 256.75 | 72.00 | 73 | 111.75 | 0 | 8.15 | 5.18 |
| {1,3},{2} | 283.5 | 90.87 | 67.50 | 125.13 | 26.21 | 0 | 15.09 |
| {1},{2},{3} | 248.75 | 72.00 | 67.50 | 106.25 | 0 | 0 | 0 |

6.2 算例 2

3 个微电网的各参数如下:

MG1: $M_1 = 1, P_{11} = 180 \text{ kW}, \gamma_{11} = 1.8 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h}), E_1 = 40 \text{ kW} \cdot \text{h}, P_{s1} = 50 \text{ kW};$

MG2: $M_2 = 2, P_{21} = 30 \text{ kW}, \gamma_{21} = 2 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h}), P_{22} = 40 \text{ kW}, \gamma_{22} = 0.75 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h}), E_2 = 90 \text{ kW} \cdot \text{h}, P_{s2} = 100 \text{ kW};$

MG3: $M_3 = 2, P_{31} = 75 \text{ kW}, \gamma_{31} = 1.5 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h}), P_{32} = 110 \text{ kW}, \gamma_{32} = 0.7 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h}), E_3 = 80 \text{ kW} \cdot \text{h}, P_{s3} = 100 \text{ kW}.$

假设停电的时间为 0.75 h。根据合作条件式(5)~式(7)、式(14)~式(17)可知,三个微电网会

进行合作。合作后产生的收益及收益的分配如表2所示。与算例1类似,大联盟合作以及合理的分配能够显著提升各微电网的收益。算例2收益较算例1低的原因是:算例2中微电网储能的出力受限,储能中的能量没有得到完全利用。

算例2代表的多微电网系统的初始状态是:各微电网储能的可持续放电容量不能满足自身的所有负荷,并且能供给的最后一级负荷的单位电量折合停电损失也不相等,此时各微电网会形成合作,但由于部分微电网储能的出力受到约束,储能中的能量没有得到完全利用,合作后各微电网的收益提升较第一种情况小。

表 2 算例 2 各种合作方式下系统和各微电网收益

Tab.2 Payoffs of microgrids under different cooperation approach in test system II

| 合作方式 | 多微网系统 整体收益/元 | MG1 收益 /元 | MG2 收益 /元 | MG3 收益 /元 | MG1 收益 提升百分比(%) | MG2 收益 提升百分比(%) | MG3 收益 提升百分比(%) |
|-------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| {1,2,3} | 333.00 | 114.00 | 103.13 | 115.87 | 68.89 | 52.79 | 18.84 |
| {1,2},{3} | 304.50 | 103.50 | 103.50 | 97.50 | 53.33 | 53.33 | 0 |
| {2,3},{1} | 248.25 | 67.50 | 75.38 | 105.37 | 0 | 11.67 | 8.07 |
| {1,3},{2} | 270.00 | 86.25 | 67.50 | 116.25 | 27.78 | 0 | 19.23 |
| {1},{2},{3} | 232.5 | 67.50 | 67.50 | 97.5 | 0 | 0 | 0 |

6.3 算例 3

3 个微电网的各参数如下:

MG1: $M_1 = 1, P_{11} = 180 \text{ kW}, \gamma_{11} = 1.2 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h}), E_1 = 40 \text{ kW} \cdot \text{h}, P_{s1} = 50 \text{ kW};$

MG2: $M_2 = 2$, $P_{21} = 30$ kW, $\gamma_{21} = 2$ 元/(kW·h), $P_{22} = 40$ kW, $\gamma_{22} = 1.2$ 元/(kW·h), $E_2 = 50$ kW·h, $P_{s2} = 60$ kW;

MG3: $M_3 = 2$, $P_{31} = 75$ kW, $\gamma_{31} = 1.5$ 元/(kW·h), $P_{32} = 110$ kW, $\gamma_{32} = 1.2$ 元/(kW·h), $E_3 = 80$ kW·h, $P_{s3} = 150$ kW。

假设停电的时间为 0.75 h。根据合作条件式(5)~式(7)、式(14)~式(17)可知,三个微电网之间不会进行合作,因为合作不会产生额外的收益。

算例 3 代表的多微电网系统的初始状态是多微电网系统没有合作之前,各微电网能够满足的最后一级负荷的单位电量折合停电损失相等,各微电网不会合作。

7 结论

本文基于合作博弈理论,研究了多微电网系统灾后恢复决策模型。首先建立多微网之间合作的特征函数;然后,研究多微电网产生合作的条件;最后基于 Shapley 值对产生的收益进行分配,并对分配的稳定性进行了检验。算例结果表明,灾后停电期间,多微电网之间的合作能够显著减小各微电网的损失。但是,由于本文旨在对合作模式进行研究,目前未考虑潮流约束、线路损耗,以及新能源出力波动、停电时间长度的不确定性等,在后续的研究中可进一步考虑。另外,由于不同微电网之间的电能传输的成本不相同,不同联盟在争取供电时会存在竞争博弈,在后续的研究中也值得关注。

参考文献 (References):

- [1] 赵敏,沈沉,刘锋,等 (Zhao Min, Shen Chen, Liu Feng, et al.). 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究 (A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (4): 848-857.
- [2] 赵敏,陈颖,沈沉,等 (Zhao Min, Chen Ying, Shen Chen, et al.). 微电网群特征分析及示范工程设计 (Characteristic analysis of multi-microgrids and a pilot project design) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (6): 1469-1476.
- [3] Chen C, Wang J, Qiu F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (2): 958-966.
- [4] Hussain A, Bui V-H, Kim H-M. Optimal operation of hybrid microgrids for enhancing resiliency considering feasible islanding and survivability [J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11 (6): 846-857.
- [5] Ding T, Lin Y, Li G, et al. A new model for resilient distribution systems by microgrids formation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 (5): 4145-4147.
- [6] Schneider K P, Tuffner F K, Elizondo M A, et al. Evaluating the feasibility to use microgrids as a resiliency resource [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8 (2): 687-696.
- [7] Moreira C L, Resende F O, Lopes J A P. Using low voltage microgrids for service restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (1): 395-403.
- [8] Zare E, Shahabi M. Microgrid restoration after major faults in main grid with automatic and constant time switching [J]. International Journal of Intelligent Systems and Applications, 2013, 5 (10): 50-58.
- [9] Xu Y, Liu C-C, Schneider K P, 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.
- [10] Gao H, Chen Y, Xu Y, et al. Resilience-oriented critical load restoration using microgrids in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (6): 2837-2848.
- [11] Gao H, Chen Y, Mei S, et al. Resilience-oriented pre-hurricane resource allocation in distribution systems considering electric buses [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105 (7): 1214-1233.
- [12] Wu J, Guan X. Coordinated multi-microgrids optimal control algorithm for smart distribution management system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4 (4): 2174-2181.
- [13] Li Z, Shahidepour M, Aminifar F, et al. Networked microgrids for enhancing the power system resilience [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105 (7): 1289-1310.
- [14] Wei C, Fadlullah Z Md, Kato N, et al. GT-CFS: A game theoretic coalition formulation strategy for reducing power loss in micro grids [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25 (9): 2307-2317.
- [15] Chakraborty S, Nakamura S, Okabe T. Scalable and optimal coalition formation of microgrids in a distribution system [A]. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies [C]. Europe, 2014. 1-6.
- [16] 刘念,赵璟,王杰,等 (Liu Nian, Zhao Jing, Wang Jie, et al.). 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型 (A trading model of PV microgrid cluster based on co-

- operative game theory) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (8): 1903-1910.
- [17] 赵敏, 沈沉, 李顺昕, 等 (Zhao Min, Shen Chen, Li Shunxin, et al.). 采用联盟型博弈考虑停电风险的多微电网合作条件研究 (Coalitional game theoretic method to study multi-microgrids cooperation condition considering outage risk) [J]. 控制理论与应用 (Control Theory & Applications), 2018, 35 (5): 688-698.
- [18] Du Y, Li F, Kou X, et al. Coordinating multi-microgrid operation within distribution system: A cooperative game approach [A]. 2017 IEEE Power Energy Society General Meeting [C]. 2017. 1-5.
- [19] 查申森, 窦晓波, 王李东, 等 (Zha Shensen, Dou Xiaobo, Wang Lidong, et al.). 微电网监控与能量管理装置的设计与研发 (Design and research of microgrid monitoring and energy management device) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (9): 232-239.
- [20] 刘振国, 邓应松, 胡亚平 (Liu Zhenguo, Deng Yingsong, Hu Yaping). 交直流混合微电网平台开发及其控制策略研究 (Research on AC/DC hybrid micro-grid platform development and its control strategy) [J]. 广东电力 (Guangdong Electric Power), 2015, 28 (1): 67-71.
- [21] 杜少飞, 谢文超, 朱永强, 等 (Du Shaofei, Xie Wenchao, Zhu Yongqiang, et al.). 并网型直流微电网主动协调控制方法研究 (Research on active coordination control method for grid-connected DC microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (6): 30-38.
- [22] 梅生伟, 刘峰, 魏韡 (Mei Shengwei, Liu Feng, Wei Wei). 工程博弈论基础及电力系统应用 (Game theory and its application in power systems) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 2016.

Decision-making model of restoration of multi-microgrid system after disaster based on cooperative game

YAO Wei-qiang¹, ZHOU Jian¹, SHI Shan-shan¹, GAO Shi-lin², CHEN Ying²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: During the outage of the distribution network due to disasters and other reasons, the microgrids of the system will loss the power support from the distribution network. Microgrids connected at the end of the same feeder can form a cooperation so as to optimize the utilization of energy storage and other resources in the cooperation area and ensure the power supply of important loads. In this paper, a decision-making model of restoration of a multi-microgrid system based on cooperative game is proposed. The cooperative game model of a multi-microgrid system is established. The cooperation criterions of the microgrids are studied. The payoff of the coalition is allocated according to Shapley value. The test results on a real multi-microgrid system verify the correctness of the decision-making model of restoration of the multi-microgrid system based on cooperative game.

Key words: cooperative game; multi-microgrid system; restoration; criterion of cooperation; allocation of payoff