

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230668

基于电动汽车的极端场景多微电网韧性提升策略研究

孙科, 陈文钢, 陈佳佳, 尹文良

(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要: 极端场景下微电网与主网断开形成多个孤岛时, 微电网内重要负荷的持续可靠供电面临极大挑战。微电网群内的电动汽车储能参与负荷支撑是提高系统韧性的有效技术手段。针对微电网孤岛供电问题, 提出了一种基于电动汽车储能的多微电网两阶段韧性提升策略。首先, 建立正常运行时多微电网能量管理模型, 通过协调系统内各类发电资源进行能量互济, 实现运行成本最小化。然后, 针对台风极端事件引起的孤岛微电网持续可靠供电问题, 通过多微电网各类发电资源和电动汽车储能进行能量互济, 构建了多微电网两阶段韧性提升模型, 最大限度地减少切负荷量, 使系统运行成本最优。最后, 采用 Shapley 值对涌现收益进行合理分配, 并通过与传统多微电网能量管理方法进行对比, 验证了所提韧性提升策略的有效性。

关键词: 极端场景; 多微电网; 电动汽车; 韧性提升; Shapley 值

A resilience enhancement strategy for multi-microgrid in extreme scenarios based on electric vehicles

SUN Ke, CHEN Wengang, CHEN Jiajia, YIN Wenliang

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: An island microgrid is formed when the microgrids are disconnected from the grid in an extreme scenario. Thus the sustainability and reliability of power supply for critical loads in microgrids faces great challenges. The participation of electric vehicle (EV) energy storage in load support within the microgrid cluster is an effective technical means to enhance system resilience. Therefore, addressing the issue of power supply for island microgrids, a two-stage resilience enhancement strategy based on EV energy storage is proposed. First, an energy management model is established for normal operation, aiming to minimize operating costs by coordinating various power generation resources within the system for energy exchange. Second, in response to the issue of sustained and reliable power supply for isolated microgrids caused by extreme typhoon events, a two-stage resilience improvement model for a multi-microgrid is constructed by using various power generation resources and electric vehicle energy storage to achieve energy exchange. This model minimizes load shedding and optimizes system operating costs. Finally, the Shapley value is used to allocate the emerging benefits reasonably, and the effectiveness of the proposed resilience improvement strategy is verified by comparing it with traditional multi-microgrid energy management methods.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377110).

Key words: extreme scenario; multi-microgrid; electric vehicle; resilience enhancement; Shapley value

0 引言

近年来, 随着全球气候变化, 台风等极端自然灾害导致电网停电事故频发, 如 2019 年 8 月, 超强台风“利奇马”登陆江苏省、浙江省等沿海地区, 造成超过 4000 条线路发生故障和 676.95 万用户停

电^[1-6]。在受到台风影响的区域内, 往往会导致输电线路和杆塔遭到严重破坏, 引发大面积停电事故, 从而造成巨大的经济损失和政治社会影响。为此, 国内外业界学者共同提出了电力系统“韧性”的概念^[7]。电力系统韧性是指电力系统在遭受极端灾害后, 抵御灾害冲击并快速恢复到正常供电状态的能力^[8]。

微电网是一种将分布式电源、负荷、储能装置、

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377110)

变流器以及监控保护装置有机整合在一起的小型发电系统^[9-10], 存在并网运行和孤岛运行两种状态^[11]。微电网在极端事件下可以通过对内部可用资源的优化调度来维持重要负荷的供应或黑启动的功能^[12], 从而提高微电网的韧性。由于微电网不需要远距离发电机组和长距离输电线路, 减少由于集中发电、长距离输电导致的配电网脆弱性^[13]。在发生极端事件时, 个别微电网内部设备可能遭到破坏、或内部储能无法供应所有负载的情况, 而由多个微电网形成的多微电网系统可以通过之间的能量互济互供, 提升应对灾害的能力^[14]。随着微电网技术的不断发展, 在极端场景下如何提高多微电网系统的韧性, 是当前一个研究热点^[15]。文献[16]提出了一种基于 SOS 架构下的多微电网两阶段能量管理调度方法, 并通过新的韧性指标证明所提方法的有效性。文献[17]提出一种新的韧性指标和在极端事件下多微电网系统的能量调度方法。文献[18]提出了一种应对台风影响的海岛微电网群韧性提升策略, 并通过所提的韧性指标评估不同韧性提升策略对海岛微电网群韧性的影响。

随着近几年电动汽车(electric vehicle, EV)的飞速发展, EV 作为典型的灵活性资源, 由于响应速度快、电能双向流动(vehicle to grid, V2G)的特点广泛关注^[19-21]。大量电动汽车的进入为电网提供了灵活可用的资源, 利用车辆与电网互动的 V2G 技术, 为电网在灾后供电的恢复提供了新的手段。文献[22]提出了一种将电池安装在卡车上用于韧性提升的方法, 当发生极端事件时, 卡车移动到停电区域, 以保证对重要负荷的供电, 但因为过高的经济成本限制了其在韧性提升中的应用。文献[23]提出了在不同的负载曲线和季节因素下利用 EV 来提高住宅用户的韧性, 结果表明电动汽车可以用作经济的应急电源提供停电期间的电力供应。文献[24]提出了一种插电式电动汽车作为移动电源的优化调度方法, 在极端场景下由并网微电网内盈余的电动汽车储能向孤岛微电网供电。文献[25]提出了一种台风灾害下基于 V2G 的城市配电网韧性提升策略, 并从系统失电量、响应速度、重要负荷恢复程度等方面体现 V2G 在韧性提升过程中的优劣性。然而, 大多数文献都未考虑在极端场景下, 如何充分利用多微电网系统内的各类发电资源和电动汽车储能参与系统的韧性提升及对收益进行合理分配的方法。

本文首先建立正常模式下多微电网能量管理模型, 通过协调系统内的各类发电资源进行能量互济, 实现运行成本最小化。其次, 在极端事件下, 针对

台风引起的极端自然灾害下多微电网系统韧性提升问题, 提出了一种基于电动汽车的两阶段多微电网韧性提升方法。通过充分利用多微电网系统内的各类发电资源和电动汽车储能进行能量互济, 最大限度地减少切负荷量, 使系统运行成本最低, 并采用 Shapley 值对涌现收益进行合理分配。最后, 通过算例对比、分析, 验证了本文提出的能量管理方法相较于传统能量管理方法在极端场景下具有更强的韧性。

1 多微电网系统运行结构与韧性指标描述

1.1 微电网基本框架

本文考虑由 N_R 个微电网构成的多微电网系统, 每个微电网由可再生分布式电源、分布式电源、储能和负荷组成, 并配有多微电网能量管理系统(energy management system, EMS), 用于汇总各子微电网提交的余电和缺电信息, 作为全局调度的依据。子微电网配有子微电网控制中心(microgrid control center, MGCC), 用于调度自身的资源, 并与 EMS 进行交互。微电网基本框架如图 1 所示。

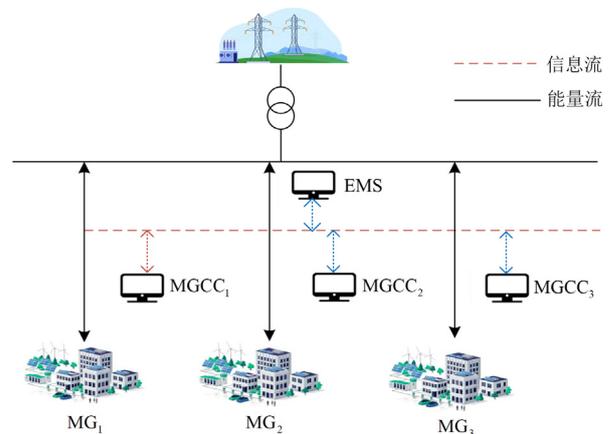


图 1 典型多微电网结构

Fig. 1 System model for a typical multi-microgrid network

1.2 正常模式

在正常运行状态下, 多微电网系统中的所有子微电网均处于并网模式, 由子微电网控制中心根据日前调度预测的风机、光伏与负荷功率, 制定各时段的调度决策, 再由 EMS 收集各子微电网 MGCC 上传的功率盈余量等信息制定各微电网之间的功率交互方案, 实现多微电网的联合运行, 使系统的运行成本最优。

1.3 韧性提升模式

当极端事件发生后, 多微电网系统与主网断开连接, 系统进入韧性提升模式。各子微电网充分调

度本地资源并最大限度减少切负荷量。一旦子微电网出现电力不足的情况, 可由 EMS 安排系统内的电动汽车储能进行功率补偿, 以增强系统的韧性。

在第 1 阶段, 当子微电网出现功率不足时, 各微电网通过 MGCC 对本地资源进行充分调度, 最大限度地减少切负荷量。基于调度结果, 将下一时段各微电网的多余或不足功率数据发送给 EMS。

在第 2 阶段, EMS 根据各微电网电量的盈余情况和距离信息, 对全局进行调度安排, 各子微电网 MGCC 根据 EMS 下达的调度指令, 选择最高效的电动汽车储能向缺电微电网供电。EMS 在发出每一次指令后, 都需要检查极端事件是否结束, 以便进行下一时段的调度安排, 在极端事件结束之前, 系统将不断循环以上过程, 能量管理方案如图 2 所示。

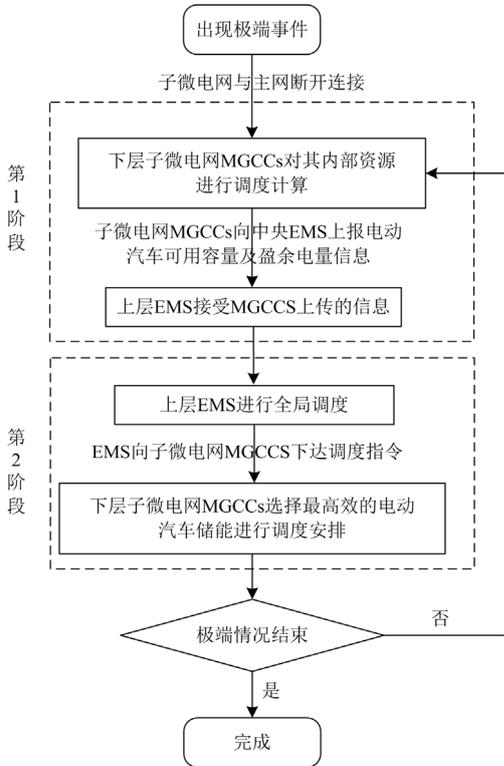


图 2 极端事件下多微电网管理流程
Fig. 2 Multi-microgrid management process under extreme events

1.4 多微电网韧性提升指标

电力系统韧性是指在应对极端灾害等大型扰动事件的抵抗能力与恢复能力, 其典型演化曲线如图 3 所示。可以看出, $[t_0, t_1)$ 表示电力系统在正常运行的时段; $[t_1, t_2)$ 表示电力系统开始遭受灾害到系统性能最低的时段; $[t_2, t_3)$ 表示电力系统在遭受灾害后的反应时段; $[t_3, t_5)$ 表示灾害后电力系统利用自身

可用资源及外部可获取资源的恢复时段; $[t_5, t_6)$ 表示电力系统经过人为抢修以及黑启动等手段恢复到正常水平的时段。

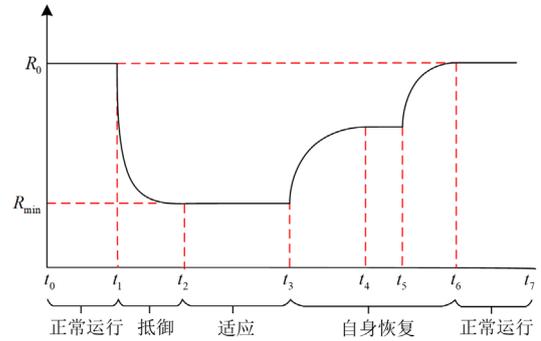


图 3 典型系统性能演化曲线

Fig. 3 Typical system performance evolution curve

在极端情况下, 已有文献对系统性能韧性指标 R 做出定义, 通常有以下 3 种。

1) 以面积定义的韧性指标 R 是最为常见的定义方式, R 为系统功能损害与时间的积分^[26], 即

$$R = \int_{t_1}^{t_4} [100 - Q(t)] dt \quad (1)$$

式中, $Q(t)$ 为微电网在极端场景下的缺失面积。

2) 以系统利用自身资源可恢复的供电量为韧性指标, 即

$$R = \int_{t_3}^{t_4} F(t) dt \quad (2)$$

式中, $F(t)$ 为系统性能的函数。

3) 以系统在极端场景下的生存能力为韧性指标, 即

$$R = \frac{R_0 - R_{\min}}{R_{\min}} \quad (3)$$

式中: R_0 为系统初始功率; R_{\min} 为系统最小功率。

因为对于系统韧性的评估指标具有多样性, 本文定义系统韧性指标为系统最大性能与发生极端场景时系统切负荷的面积之差, 其表达式为

$$R = \frac{\int_{t_1}^{t_4} (R_0 - R_s) dt}{t_4 - t_1} \quad (4)$$

式中, R_s 为系统在该时段内的切负荷量。该公式描述微电网在极端场景下的供电能力, R 值越大, 韧性越强。

2 多微电网系统能量管理模型

2.1 子微电网系统能量管理模型

1) 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机在运行中需要满足的约束如式(5)

所示, 主要包括最小、最大出力约束以及向上、向下爬坡功率约束。

$$\begin{cases} P_{MT,\min} \leq P_{MT,i,t} \leq P_{MT,\max} \\ P_{MT,i,t} - P_{MT,i,t-1} \leq U_r \\ P_{MT,i,t-1} - P_{MT,i,t} \leq D_r \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{MT,\max}$ 和 $P_{MT,\min}$ 分别为微型燃气轮机的最大、最小功率; $P_{MT,i,t}$ 为子微电网 i 内燃气轮机在 t 时段的发电功率; U_r 和 D_r 分别为微型燃气轮机的向上、向下最大爬坡功率。

2) 储能模型

储能装置在运行过程中需满足的约束如式(6)所示, 包括储能容量变化、储能上、下限约束以及调度周期始末时刻储能容量约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ch,i,t} \leq \delta_{i,t} P_{ch,i,\max} \\ 0 \leq P_{dch,i,t} \leq (1 - \delta_{i,t}) P_{dch,i,\max} \\ E_{b,\min} \leq E_{b,i,t} \leq E_{b,\max} \\ E_{b,i,t+1} \leq E_{b,i,t} + (P_{ch,i,t} \eta_{ch} \Delta t - \frac{P_{dch,i,t} \Delta t}{\eta_{dch}}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{ch,i,t}$ 和 $P_{dch,i,t}$ 分别为子微电网 i 内储能装置在 t 时段的充、放电功率; $P_{ch,i,\max}$ 和 $P_{dch,i,\max}$ 分别为子微电网 i 内储能装置的充、放电功率的最大值; $\delta_{i,t}$ 为子微电网 i 内储能装置的二进制变量, 值为 1 表示处于充电状态, 值为 0 表示处于放电状态; $E_{b,i,t}$ 为子微电网 i 内储能装置在 t 时段的剩余容量; $E_{b,\max}$ 和 $E_{b,\min}$ 分别为储能装置的容量上、下限; η_{ch} 和 η_{dch} 分别为储能装置的充、放电效率; Δt 为调度间隔。

3) 电动汽车参与 V2G 响应能力的约束条件

首先, 电动汽车储能与常规储能不同, 电动汽车仅在接入充电桩时才能作为储能系统与主网参与互动, 是否接入将直接影响可用储能容量。其次, 电动汽车作为交通工具, 首先需要满足电动汽车车主的出行要求, 并非在任何时候都可以作为储能系统, 只有部分容量可用于响应。综上所述, 电动汽车需满足以下两个约束条件。

(1) 时间约束条件: 电动汽车接入和离开的时间由电动汽车车主决定, 如果没有接入充电桩, 电动汽车的储能为 0。

(2) 能量约束条件: 为了不影响电动汽车车主的正常出行, 要保证电动汽车在接入充电桩时电量都要大于最低出行要求。

电动汽车储能在参与 V2G 时须满足式(7)的约束, 包括电动汽车储能容量变化、充放电功率上、下限约束以及调度周期始末容量约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ch,ev,i,t} \leq \sigma_{ev,i,t} P_{ch,ev,i,\max} \\ 0 \leq P_{dch,ev,i,t} \leq (1 - \sigma_{ev,i,t}) P_{dch,ev,i,\max} \\ E_{ev,\min} \leq E_{ev,i,t} \leq E_{ev,\max} \\ E_{ev,i,t+1} = E_{ev,i,t} + \left(P_{ch,ev,i,t} \eta_{ch,ev,i,t} \Delta t - \frac{P_{dch,ev,i,t} \Delta t}{\eta_{dch,ev,i,t}} \right) \\ E_{ev,i,t} \geq E_{ev,\min} + E_{res,ev,i,t} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{ch,ev,i,t}$ 和 $P_{dch,ev,i,t}$ 分别为子微电网 i 内电动汽车在 t 时段的充、放电功率; $P_{ch,ev,i,\max}$ 和 $P_{dch,ev,i,\max}$ 分别为子微电网 i 内电动汽车的充、放电功率的最大值; $\sigma_{ev,i,t}$ 为子微电网 i 内电动汽车的二进制变量, 值为 1 表示处于充电状态, 值为 0 表示处于放电状态; $E_{ev,i,t}$ 为子微电网 i 中电动汽车在 t 时段剩余可用容量; $E_{ev,\max}$ 和 $E_{ev,\min}$ 分别为电动汽车储能剩余容量上、下限; $\eta_{ch,ev,i,t}$ 和 $\eta_{dch,ev,i,t}$ 分别为微电网 i 内电动汽车在 t 时段的充、放电效率; $E_{res,ev,i,t}$ 为微电网 i 内电动汽车在 t 时段储存的可用容量。

4) 可再生能源和负荷模型

可再生能源及负荷的约束条件如式(8)所示, 主要包括可再生能源的发电功率的上、下限约束及切负荷量的上、下限约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{r,i,t} \leq P_{r,i,t,\max} \\ 0 \leq L_{s,i,t} \leq P_{load,i,t} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{r,i,t}$ 为子微电网 i 内可再生能源在 t 时段的发电功率; $P_{r,i,t,\max}$ 为子微电网 i 在 t 时段内可再生能源的预测值; $L_{s,i,t}$ 为子微电网 i 在 t 时段的切负荷量; $P_{load,i,t}$ 表示在子微电网的每个调度时间段内系统的总负荷, 包括微型燃气轮机的发电功率、可再生能源的发电功率、储能装置的充放、电功率、电动汽车参与 V2G 的充、放电功率、配电网的购售电功率和微电网间的购售电功率。

5) 功率交互模型

微电网与配电网间的交互功率不得超过输电线路输送功率约束, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{buy,i,t} \leq r_{i,t} P_{line,i,\max} \\ 0 \leq P_{sell,i,t} \leq (1 - r_{i,t}) P_{line,i,\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{buy,i,t}$ 、 $P_{sell,i,t}$ 分别为子微电网 i 在 t 时段与配电网的购、售电功率; $r_{i,t}$ 为 0-1 变量, 值为 1 表示购电状态, 值为 0 表示售电状态; $P_{line,i,\max}$ 为子微电网 i 联络线允许输送的最大功率。

微电网间交互功率不得超过输电线路输送功率约束, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{buy},ij,t} \leq f_{ij,t} \min\{P_{\text{line},i,\max}, P_{\text{line},j,\max}\} \\ 0 \leq P_{\text{sell},ij,t} \leq (1-f_{ij,t}) \min\{P_{\text{line},i,\max}, P_{\text{line},j,\max}\} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{buy},ij,t}$ 、 $P_{\text{sell},ij,t}$ 分别为子微电网 i 、 j 间的购、售电功率, 且 $i \neq j$; $f_{ij,t}$ 为 0-1 变量, 值为 1 表示购电状态, 值为 0 表示售电状态; $P_{\text{line},j,\max}$ 为子微电网 j 联络线允许输送的最大传输功率。

2.2 多微电网系统功率平衡约束条件

在正常运行时, 各微电网根据式(5)一式(10)进行优化, 使得该时段多微电网系统的功率平衡, 如式(11)所示。

$$\begin{aligned} P_{\text{MT},i,t} + P_{r,i,t} + \sum_{v=1}^V (P_{\text{dch},ev,i,t} - P_{\text{ch},ev,i,t}) + (P_{\text{dch},i,t} - P_{\text{ch},i,t}) + \\ P_{\text{buy},i,t} - P_{\text{sell},i,t} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_R} (P_{\text{buy},ij,t} - P_{\text{sell},ij,t}) = P_{\text{load},i,t} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, V 为微电网 i 内共有电动汽车数。

2.3 多微电网系统能量管理目标函数

EMS 根据子微电网能量管理中心 MGCC 提交的各个子微电网内的余电和缺电信息, 进行全局优化, 使得多微电网系统的运行总成本最小, 其目标函数为

$$\begin{aligned} \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_R} c_{\text{mt},i} P_{\text{MT},i,t} + c_{\text{es},i} (P_{\text{ch},i,t} + P_{\text{dch},i,t}) + c_{\text{re}} P_{r,i,t} + \\ \sum_{v=1}^V c_{\text{b},t} (P_{\text{ch},ev,i,t} + P_{\text{dch},ev,i,t}) + c_{\text{buy},i,t} P_{\text{buy},i,t} + c_{\text{sell},i,t} P_{\text{sell},i,t} + \\ \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=i+1}^{N_R} c_{\text{loss},i} (P_{\text{buy},ij,t} + P_{\text{sell},ij,t}) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $c_{\text{mt},i}$ 为子微电网 i 内微型燃气轮机单位发电成本; $c_{\text{es},i}$ 为子微电网 i 内储能装置的充放电功率的成本系数; c_{re} 为子微电网 i 内可再生能源发电的成本系数; $c_{\text{b},t}$ 为 t 时段电动汽车的充放电成本; $c_{\text{buy},i,t}$ 和 $c_{\text{sell},i,t}$ 分别为在 t 时段多微电网与主网间的购、售电价格; $c_{\text{loss},i}$ 为子微电网 i 的联络线损耗成本系数。

3 基于电动汽车的多微电网韧性提升方法

在此模式下, 提出了一种基于电动汽车的两阶段多微电网韧性提升方法。在发生极端事件时, 各子微电网 MGCC 在充分调度本地资源后, 一旦有子微电网出现电力供应不足的情况, 可通过 EMS 安排系统内含有盈余电量的微电网内的电动汽车向缺电微电网进行功率补偿, 提高系统的韧性。

3.1 子微电网系统功率约束条件(第 1 阶段)

在该模式的第 1 阶段, 当发生极端事件时, 各微电网通过式(5)一式(11)进行重新优化, 使得该时段功率平衡, 如式(13)所示。

$$\begin{aligned} P_{\text{MT},i,t} + P_{r,i,t} + \sum_{v=1}^V (P_{\text{dch},ev,i,t} - P_{\text{ch},ev,i,t}) + \\ (P_{\text{dch},i,t} - P_{\text{ch},i,t}) = P_{\text{load},i,t} - L_{s,i,t} \end{aligned} \quad (13)$$

3.2 子微电网能量管理目标函数(第 1 阶段)

子微电网 MGCC 在充分调度系统本地资源后, 进行全局优化, 使得各微电网内的切负荷量最小, 其目标函数为

$$\begin{aligned} \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_R} (c_{\text{mt},i} P_{\text{MT},i,t} + c_{\text{es},i} (P_{\text{ch},i,t} + P_{\text{dch},i,t}) + \\ c_{\text{re}} P_{r,i,t} + \sum_{v=1}^V c_{\text{b},t} (P_{\text{ch},ev,i,t} + P_{\text{dch},ev,i,t}) + c_{\text{cl},i} L_{s,i,t}) \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $c_{\text{cl},i}$ 为子微电网 i 内可中断负荷的切负荷成本系数。

3.3 多微电网系统功率平衡约束条件(第 2 阶段)

在该模式的第 2 阶段, EMS 通过收集各子微电网上报的信息, 安排各子微电网的电动汽车储能进行能量互济, 使系统切负荷量进一步减少; 各微电网通过式(5)一式(11)及式(16)一式(19)进行重新优化, 使得该时段功率平衡, 如式(15)所示。

$$\begin{aligned} P_{g,i,t} + P_{r,i,t} + \sum_{v=1}^V (P_{\text{dch},ev,i,t} - P_{\text{ch},ev,i,t}) + (P_{\text{dch},i,t} - P_{\text{ch},i,t}) = \\ P_{\text{load},i,t} - \sum_{i=1, i \neq j}^{N_R} P_{\text{sup},ev,ij,t} - L_{\text{sd},i,t} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{sup},ev,ij,t}$ 为在 t 时段子微电网 j 内电动汽车储能可向子微电网 i 传递的功率; $L_{\text{sd},i,t}$ 为微电网 i 在第 2 阶段的切负荷量。

在极端场景下, 其各子微电网需要递交该时段的电动汽车最大可用容量及约束条件为

$$E_{\text{ev},ij,t} = \sum_{v=1}^V \sum_{i=1, i \neq j}^{N_R} E_{\text{res},ev,i,t}^* - (I_{\text{Dis},ij,t} E_{\text{ffev},t}) \quad (16)$$

$$P_{\text{sup},ev,ij,t,\max} = \sum_{v=1}^V \sum_{i=1, i \neq j}^{N_R} \min(E_{\text{ev},ij,t} \cdot \eta_{\text{ch}}, (P_{\text{dch},ev,i,\max} - P_{\text{dch},ev,i,t})) \quad (17)$$

$$0 \leq P_{\text{sup},ev,ij,t} \leq P_{\text{sup},ev,ij,t,\max} \quad (18)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{N_R} \sum_{v=1}^V P_{\text{sup},ev,ij,t} \leq P_{\text{req},i,t} \quad (19)$$

式中: $E_{\text{ev},ij,t}$ 为在 t 时段子微电网 j 内电动汽车储能可向子微电网 i 传递的可用容量; $E_{\text{res},ev,i,t}^*$ 为第 1 阶

段优化调度后的结果； $I_{Dis,ij,t}$ 为子微电网 i 、 j 之间的距离关系； $E_{ffev,t}$ 为电动汽车每公里能量消耗系数； $P_{sup,ev,ij,t,max}$ 为在 t 时段微电网 j 向子微电网 i 传递的电动汽车储能的最大可用功率； $P_{req,i,t}$ 为子微电网 i 在 t 时段的缺额功率。

3.4 多微电网系统能量管理目标函数(第 2 阶段)

经过第 2 阶段的调度, EMS 安排电动汽车进行能量互济, 在保证经济性的前提下使得切负荷量进一步减少, 其目标函数如式(20)所示。

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_R} \left[c_{mt,i} P_{MT,i,t} + c_{es,i} (P_{ch,i,t} + P_{dch,i,t}) + c_{re} P_{r,i,t} + \sum_{v=1}^V c_{b,t} (P_{ch,ev,i,t} + P_{dch,ev,i,t}) + c_{cl,i} L_{s,i,t} + c_{sup} \sum_{v=1}^V P_{sup,ev,ij,t} \right] \quad (20)$$

式中, c_{sup} 为电动汽车的单位调度成本。

4 基于 Shapley 值法的收益分配方法

多微电网联合运行所获得的涌现收益需要公平分配给各个子微电网, 使得各微电网的运行成本更为贴合实际情况。Shapley(沙普利)值法^[27]简单有效地实现了联盟利益在各企业成员间的合理分配。基于 Shapley 值进行联盟成员的收益分配体现了各盟员对联盟总目标的贡献程度, 避免了分配中的平均主义, 比任何一种单纯的资源价值投入、资源配置效率的分配方式都更合理、更公平, 也体现了盟员之间的博弈过程^[28]。对于子微电网 i , 其分配得到的收益为

$$\Delta C_i = \sum_{S \in S_i} \omega_i(|S|) (\Delta C_S - \Delta C_{S \setminus \{i\}}), \forall i \in M \quad (21)$$

$$\omega_i(|S|) = \frac{(N_R - |S|)! (|S| - 1)!}{N_R!} \quad (22)$$

式中: ΔC_i 为子微电网 i 分配到的涌现收益; $M = \{1, 2, \dots, N\}$ 为子微电网集合; S_i 为包含子微电网的 i 所有子集; $|S|$ 为子集 S 中的子微电网个数; $\omega_i(|S|)$ 为加权因子; ΔC_S 为子集 S 的涌现收益; $\Delta C_{S \setminus \{i\}}$ 为子集 S 中除去子微电网 i 的涌现收益。

通过 Shapley 值法进行收益分配可以得到多微电网系统中各微电网的真实运行成本 C_i , 如式(23)所示。

$$C_i = C_{o,i} - \Delta C_i \quad (23)$$

式中, $C_{o,i}$ 为微电网 i 单独运行的成本。

5 算例分析

5.1 算例描述

本文通过 Matlab 2018b 调用 Cplex 求解器进行

模型求解。本文以 MG_1 、 MG_2 、 MG_3 构成的多微电网为例, 假设 3 个子微电网内均有燃气轮机、储能、光伏、风机、电动汽车以及负荷。其中, MG_1 为住宅区, MG_2 为商业区, MG_3 为工业区, 选择 3 个不同的园区, 可以保证一天内各个时段都有电动汽车储能可以调度。3 个子微电网具有不同的分布式能源配置容量以及不同的负荷特性。各子微电网内的风机、光伏及负荷功率通过预测得知。其中 MG_1 到 MG_2 的距离为 8 km, MG_2 到 MG_3 的距离为 5 km, MG_1 到 MG_3 的距离为 10 km。本文调度间隔 Δt 为 1 h。其传输线功率限制为 300 kW, 成本系数为 0.05 元/kWh; 假设各电动汽车在到达时 SOC 随机为最大容量的 40%~60%, 并随机选取了 10 辆不同容量配置的电动汽车。各项设备的基本参数信息如表 1 所示。配电网分时电价和上网电价如表 2 所示。电动汽车输入参数如表 3 所示。电动汽车到达/离开时间数据信息如表 4 所示。负荷功率、风机和光伏出力数据如图 4 所示。

本文所提能量管理模型可以在正常模式和韧性提升模式下相互转换, 在初始阶段, 系统运行在正常模式下, 一旦发生极端事件, 可切换为韧性提升模式。

表 1 各项设备的基本参数

Table 1 Basic parameters of the devices

设备名称	参数	MG_1	MG_2	MG_3
储能	最大容量/kW	150	180	200
	最大充放电功率/kW	50	60	70
	初始功率/kW	90	80	100
	单位运行维护费用/(元/kWh)	0.15	0.15	0.15
微型燃气轮机	功率区间/kW	220	200	250
	爬坡功率/kW	70	60	80
	单位运行费用/(元/kWh)	0.7	0.8	0.6
负荷	切负荷成本系数/(元/kWh)	5	5	5
可再生能源	成本系数/(元/kWh)	0.1	0.1	0.1

表 2 配电网分时电价和上网电价

Table 2 Time-of-use pricing and feed-in tariff of distribution network

峰谷时段	分时电价/(元/kWh)	上网电价/(元/kWh)	时段
峰时段	1.241	0.90	09:00—12:00; 16:00—20:00
平时段	0.779	0.50	08:00—09:00; 12:00—16:00; 20:00—23:00
谷时段	0.488	0.30	00:00—08:00; 23:00—24:00

表 3 电动汽车输入参数

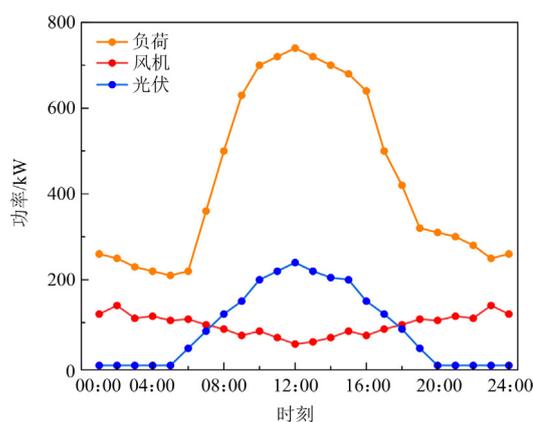
Table 3 EVs input parameters

电动汽车编号	容量/kW	效率/(W/km)	电动汽车在各微电网内的编号		
			MG ₁	MG ₂	MG ₃
1	38.3	153	1	9	—
2	47.5	153	2	10	1
3	28.9	256	3	1	—
4	37.9	161	4	2	10
5	39.2	170	5	3	5
6	56	172	6	4	6
7	52	193	7	—	7
8	88	215	8	—	8
9	64.7	231	9	—	9
10	84.7	232	10	7	—
11	83.7	209	—	8	3
12	74	206	—	—	2
13	28.5	168	—	5	—
14	38	168	—	6	—

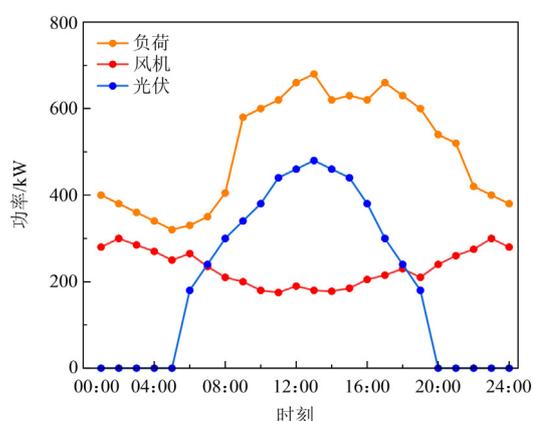
表 4 电动汽车到达/离开时间数据信息

Table 4 EVs arrival/departure time data information

电动汽车编号	电动汽车到达/离开时间		
	MG ₁	MG ₂	MG ₃
1	18:00/8:00	07:00/17:00	10:00/20:00
2	20:00/10:00	08:00/17:00	09:00/22:00
3	21:00/09:00	06:00/16:00	08:00/21:00
4	19:00/08:00	08:00/19:00	08:00/19:00
5	21:00/06:00	09:00/18:00	08:00/22:00
6	17:00/08:00	07:00/20:00	09:00/23:00
7	19:00/08:00	09:00/18:00	08:00/20:00
8	16:00/09:00	10:00/17:00	09:00/21:00
9	19:00/12:00	09:00/18:00	11:00/21:00
10	20:00/09:00	07:00/18:00	09:00/19:00



(b) MG₂



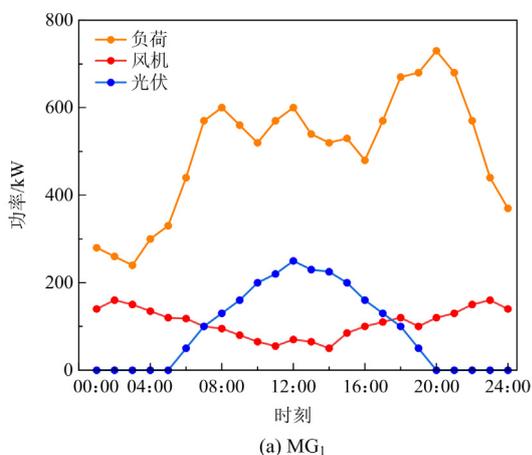
(c) MG₃

图 4 多微电网风光荷预测曲线

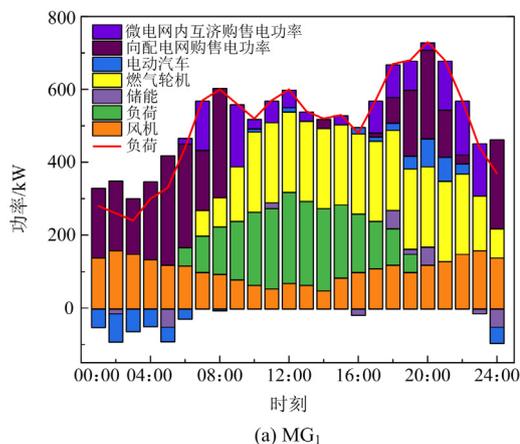
Fig. 4 Wind-solar load forecast curve of multi-microgrid

5.2 正常模式

在正常情况下, 多个子微电网正常工作, 并且与主网相连接, 微电网可以与配电网进行电力交易, 各微电网间也可进行能量互济, 其各时段的功率平衡如图 5 所示。



(a) MG₁



(a) MG₁

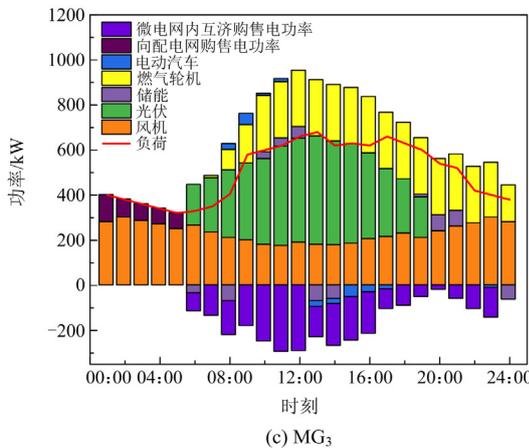
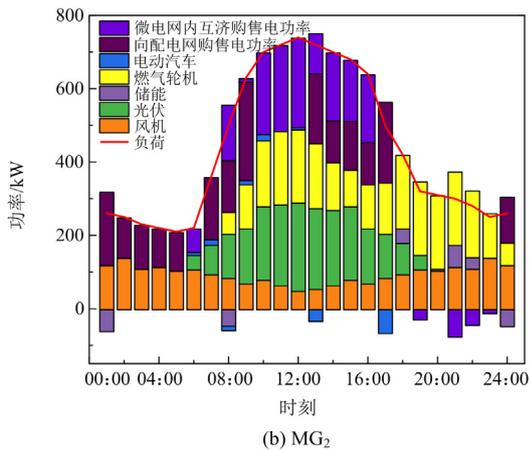


图 5 各微电网能源出力及负荷分布

Fig. 5 Energy output and load distribution in microgrids

图 5(a)显示了 MG_1 在各时段的优化结果，在 00:00—07:00 时段，由于分时电价较低， MG_1 主要从配电网购电补偿所缺电量；在 07:00—24:00 时段，由于微型燃气轮机运行成本低于分时电价，微型燃气轮机投入运行；在 00:00—06:00 时段，由于分时电价较低，所以储能设备和电动汽车主要从配电网购电进行充电，并在用电高峰的 18:00—22:00 时段进行放电；当 MG_1 功率不足时，需要同配电网或其他微电网进行电力交易以补偿缺额。

图 5(b)显示了 MG_2 在各时段的优化结果，储能装置和电动汽车主要在分时电价较低时进行充电，并在负荷用电高峰时进行放电；在 00:00—09:00 时段，由于分时电价较低， MG_2 主要从配电网购电补偿所缺电量；而在 18:00—24:00 时段，由于负荷功率较低，基本不需要从外部购电，主要依靠微型燃气轮机出力补偿所缺电量，当微型燃气轮机所发出的功率高于系统自身所缺功率时，向配电网或其他微电网出售电量。若在用电高峰时期功率出现不足时，需要同配电网或其他微电网进行电力交易以补偿缺额。

图 5(c)显示了 MG_3 在各时段的优化结果，由于该微电网内可再生能源较为丰富，大多数时刻都存在盈余电量；储能设备和电动汽车主要在可再生能源出力较多时进行充电，并在分时电价较高的 13:00—17:00 时段进行放电；在 06:00—24:00 时段，由于 MG_3 内盈余电量较多，可向配电网和其他微电网提供电力。

本算例中，当 3 个子微电网之间不进行功率交换时称为 MG_1 、 MG_2 、 MG_3 独立运行；当 3 个子微电网之间进行功率交互时称 MG_1 、 MG_2 、 MG_3 联合运行，多微电网独立运行和联合运行成本分别如表 5、表 6 所示。

表 5 子微电网独立运行时的运行成本

Table 5 Operation costs when sub-microgrid operates independently

类型	MG_1 成本	MG_2 成本	MG_3 成本	合计
储能	72.09	57.49	96.13	225.71
燃气轮机	2373	2046	1686	6105
可再生能源	482.3	436.1	1041.8	1960.2
电动汽车充放电	126.27	51.57	54.52	232.36
购电	2967.9	2699.3	238.2	5905.4
售电	0	-38.7	-1180.6	-1219.3
传输线损耗	0	0	0	0
总费用	6021.56	5251.76	1936.05	13 209.37

表 6 多微电网联合运行的运行成本

Table 6 Costs of multi-microgrids joint operation

类型	MG_1 成本	MG_2 成本	MG_3 成本	合计
储能	41.07	43.26	85.19	169.52
燃气轮机	2373	2072	2355	6800
可再生能源	482.3	436.1	1041.8	1960.2
电动汽车充放电	126.27	51.57	54.52	232.36
购电	1828.7	1335.8	202.52	3367.02
售电	0	0	0	0
传输线损耗	0	7.86	131.26	139.12
真实运行费用	4851.34	3946.59	3870.29	12 668.2

由表 5 和表 6 可以看出，多微电网联合运行时的总费用为 12 668.2 元，与各微电网单独运行的总费用相比减少了 541.17 元，成本下降了 4.09%，验证了本文所提出的方法的有效性。

算例中，采用 Shapley 值分配法对涌现收益进行分配，涌现收益分配与各子微电网的真实运行成本如表 7 所示。

由表 7 可以看出，各微电网的涌现收益分别为 94.56 元、155.92 元和 290.69 元，分配更具合理性。

表 7 涌现收益分配与子微电网真实运行成本

Table 7 Emerging income distribution and real operation cost of sub-microgrid

类型	MG ₁ 成本	MG ₂ 成本	MG ₃ 成本
独立运行	6021.56	5251.76	1936.05
涌现收益	94.56	155.92	290.69
真实运行成本	5927	5095.84	1645.84

元

5.3 韧性提升模式

考虑台风自然灾害对我国电力系统的安全稳定运行带来了严重影响, 受到台风影响的区域内, 强风往往会造成杆塔倒塌和配电线路断裂导致停电等后果, 雷击可能会损坏风机叶片、造成光伏组件等设备损坏。由于台风对配电线路影响严重, 超过 60% 的用户停电是由于配电线路故障所引起的^[29]。本文假设发生台风极端自然灾害时, 各微电网与主网断开, 并且各微电网之间联络线被中断, 只保持信息连接, 系统内各设备均能正常工作。在此模式的第 1 阶段, 各子微电网 MGCC 通过已知信息及预测数据求解一个调度周期内的调度信息, 最大限度地减少切负荷量。在第 2 阶段, EMS 通过收集各子微电网上报的信息, 得出下一个调度周期内的电动汽车储能的传递功率、切负荷量和调度总成本, 减少切负荷量。若极端事件尚未结束, 则不断重复上述过程直至极端事件结束。若调度周期结束, 则根据式 (4) 计算调度周期内多微电网系统的韧性指标, 用于比较在不同能量管理方法下对极端事件的应对能力。

微电网各时刻电动汽车的可用容量如图 6 所示。其中, MG₁ 的大量电动汽车在 09:00 左右驶离, 18:00 后, 大量电动汽车驶回居民区。负荷用电高峰在 17:00—22:00 时段, 而 MG₂ 和 MG₃ 的停车规律与 MG₁ 基本互补, 其用电高峰在 10:00—18:00 时段。

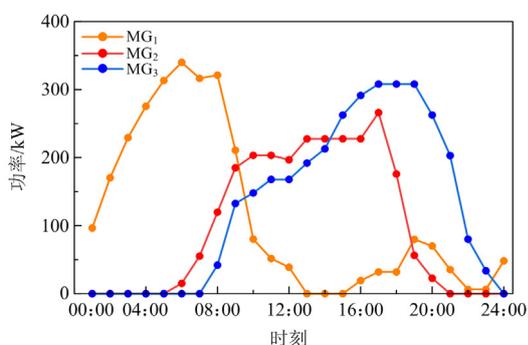


图 6 各微电网电动汽车储能的可用容量

Fig. 6 Maximum available capacity of EV storage in microgrids

以 19:00 时刻发生极端事件为例, 在第 1 阶段, 多微电网系统在与主网断开连接后, 各子微电网的 MGCC 在充分调度本地资源后, 求得在该时段 MG₂ 缺少的功率为 202.9 kWh, 该时段内各微电网内电动汽车所能提供的最大功率如图 7 所示。

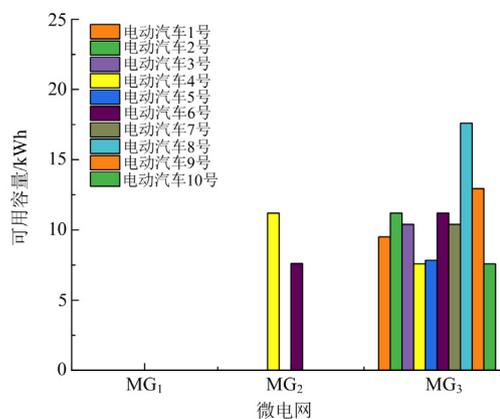


图 7 各微电网电动汽车最大可用容量

Fig. 7 Maximum available capacity of EV in microgrids

在完成上述步骤后, 在第 2 阶段 EMS 进行全局优化调度, 安排微电网 MG₂ 和 MG₃ 内的电动汽车储能向缺电微电网 MG₁ 提供功率, 由于微电网 MG₂ 距离微电网 MG₁ 最近, 率先由微电网 MG₂ 内的电动汽车储能向微电网 MG₁ 输送其全部的功率 (18.5 kWh), 然后再由 MG₃ 提供其盈余的功率 (106.24 kWh), 其功率出力如图 8 所示。

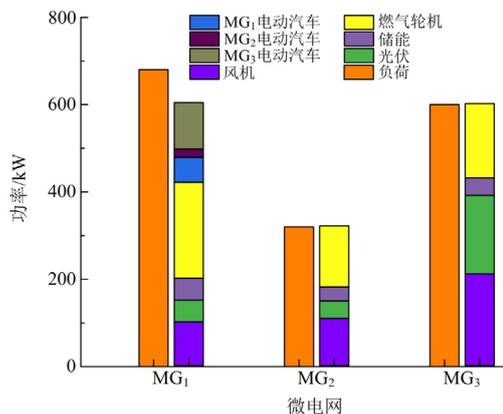


图 8 各微电网分布式电源出力及电动汽车能量交互

Fig. 8 Output of distributed power and energy interaction of EV in microgrids

由图 8 可以看出, 运用本文所提的能量管理方法与各微电网独立运行方法相对比, 韧性指标提升了 6.7%, 证明了本文所提方法的有效性。

5.4 多微电网韧性评估方法

为了验证本文所提方法的有效性, 分别使用本

文所提能量管理方案与传统方法从韧性指标和运行成本进行对比。

假设每次故障 1 h，本文分别对一天 24 h 发生故障进行计算，得到本文所提的能量管理方法、各微电网独立运行方法和无电动汽车参与的能量管理方法的韧性指标以及故障持续时间内的总成本，其结果如图 9、图 10 所示。

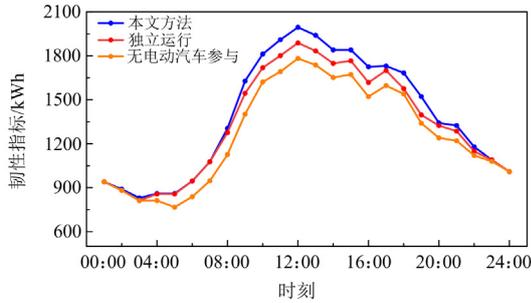


图 9 韧性指标对比

Fig. 9 Comparison of resilience of indices

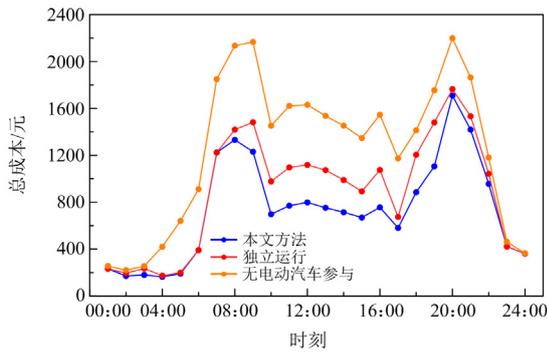


图 10 各微电网故障时间的调度成本对比

Fig. 10 Comparison of scheduling costs of various microgrids at fault

由图 9、图 10 可以看出，在发生极端事件时，本文所提能量管理方法在所有发生故障时刻均可在保证系统成本最小的同时提高系统的韧性指标，使多微电网系统在即使没有电力连接的情况下，本文所提方法也可以有效提升系统的韧性。相较于另外两种方案，本文所提能量管理方法具有更强的灾害抵抗能力。

基于 Shapley 值分配法，其涌现收益分配与子微电网真实运行成本如表 8 所示。

由表 8 可以看出，通过本文所提方法和各微电网独立运行方法相比较，本文所提方法使各微电网间的涌现收益分配更具合理性。

表 8 涌现收益分配与子微电网真实运行成本

Table 8 Emerging income distribution and real operation cost of sub-microgrid

类型	MG ₁ 成本	MG ₂ 成本	MG ₃ 成本
独立运行	9992.25	8468.9	2420.55
涌现收益	945.4	196.49	1999.42
真实运行成本	9046.85	8272.41	421.13

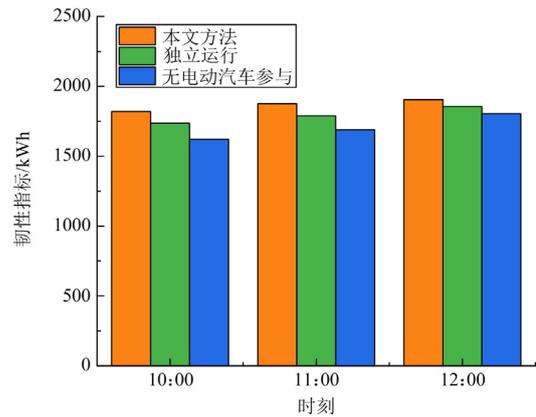
5.5 不同故障时间尺度下电动汽车对系统韧性提升的影响

为了进一步分析随着故障时间的增加对系统韧性的影响，选取在负荷高峰时刻发生持续故障的情况，其故障场景划分如表 9 所示。仿真结果如图 11 所示，其描述了不同场景下韧性指标和成本对比。

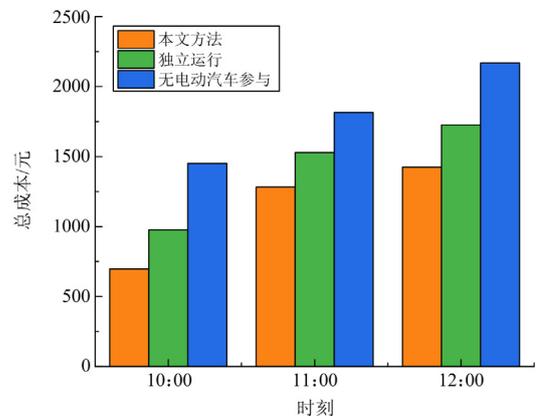
表 9 故障场景划分

Table 9 Fault scenario division

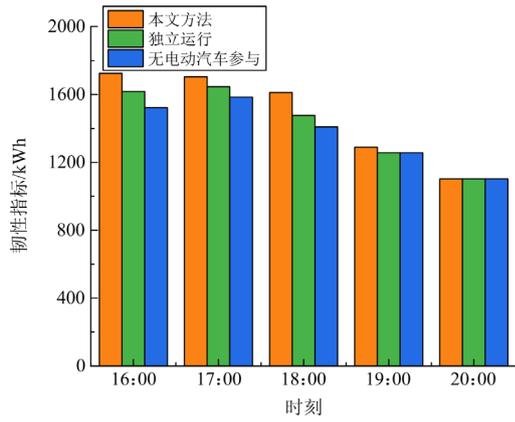
场景	故障发生时刻	故障持续时间/h
1	10:00	3
2	16:00	5



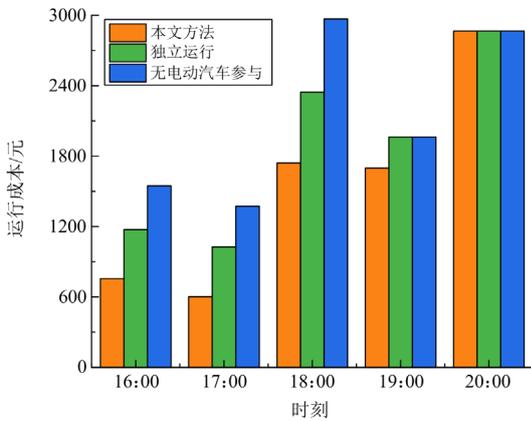
(a) 场景1韧性指标对比



(b) 场景1运行成本对比



(c) 场景2韧性指标对比



(d) 场景2运行成本对比

图 11 不同场景下韧性指标和成本对比

Fig. 11 Comparison of resilience indices and cost under different scenarios

在图 11(a)所示的场景 1 中, 由于在该时段内大多数电动汽车刚刚到达, 通过电动汽车储能进行能量互济的能量相对较少; 在 10:00—11:00 时段, 本文所提能量管理方案的韧性指标提升较明显, 而在 12:00 时刻多微电网系统内各电动汽车可参与能量互济的功率相对较低, 导致该时段 3 种方法得到的韧性指标相差较小。

在图 11(c)所示的场景 2 中, 由于在负荷用电高峰时分布式电源基本处于满额工作状态, 并在该故障时刻各微电网内的电动汽车和储能设备的剩余可用容量相对较多。在 16:00—18:00 时段, 本文所提能量管理方案与其他两种能量管理方案相比较, 韧性指标提升效果较明显; 而在 18:00—20:00 时段, 由于通过电动汽车进行能量互济的能量逐渐消耗殆尽, 本文所提能量管理方案与其他两种能量管理方案相比较, 系统韧性提升效果不明显。

在图 11(b)、11 图(d)所示的场景中, 通过对不同

持续故障时间的韧性提升成本进行分析, 可以得出如下结论: 随着故障事件的不断增加, 电动汽车储能可用剩余容量逐渐消耗, 切负荷量不断增加, 运行成本逐渐升高, 由此说明本文所提能量方法能在 3 h 左右的持续故障中保持较高的韧性指标。

5.6 内部故障

在发生极端事件时, 多微电网内部可能会出现内部故障, 为了进一步研究系统内部故障对韧性的影响, 假设 5.3.1 节的算例中燃气供应出现中断, 在其他条件不变的情况下, 观察系统在一天 24 h 内系统韧性指标的变化, 其仿真结果如图 12 所示。

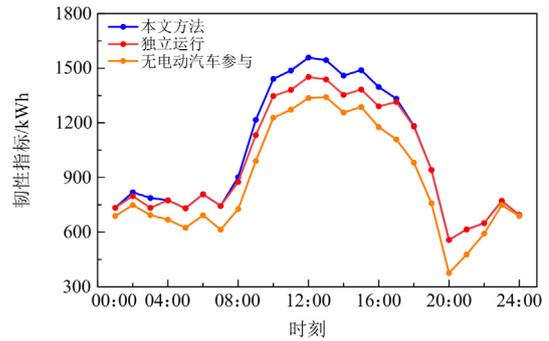


图 12 内部故障情况下的韧性指标对比

Fig. 12 Comparison of resiliency indices when internal fault

由图 12 可以看出, 若系统与主网脱网并且在燃气供应中断的情况下, 系统韧性在全天大多数时刻都会出现明显下降; 在 17:00—21:00 时段, 由于光伏出力的减小和负荷用电高峰的来临, 系统韧性下降尤为明显。但在发生故障期间, 本文所提韧性提升方法在保证供电能力上仍优于其他传统调度方法。

6 结论

本文基于电动汽车储能的多微电网联合运行架构, 提出了一种基于电动汽车储能的多微电网两阶段多微电网韧性提升策略, 并对所提出的能量管理方法进行韧性指标对比分析, 结论如下所述。

1) 针对极端场景下多微电网系统韧性提升的问题, EMS 在协调各子微网内部的分布式发电资源的基础上通过调度电动汽车储能资源参与能量互济, 实现系统总体运行成本最小化。

2) 通过对韧性指标和不同故障时间的对比分析, 证明本文所提方法在保证成本最小的同时还具有较高的供电能力, 有效地提高了系统的韧性, 减小了停电时造成的巨大损失。

3) 采用 Shapley 值法对各微电网收益进行分配, 使分配结果更符合实际情况, 有利于激励各微

电网积极加入多微电网系统从而降低用电成本。

本文通过充分利用系统内的各类发电资源, 在发生极端事件时, 能够有效提升系统的韧性。但在极端场景下, 系统可能发生其他内部故障, 下一步工作将考虑在极端场景下, 可再生能源出力的不确定性和系统内不同故障类型对系统韧性的影响及建立极端场景下基于电动汽车的多微电网能量管理模型及韧性评估模型, 使多微电网系统在极端场景下具有更强的韧性。

参考文献

- [1] 凤凰网公益. 两海岛断电 60 小时, 辽宁移动率先登岛保障通信[EB/OL]. [2019-08-16]. <https://www.zggy.org.cn/item/182887983448248320>.
Phoenix Net Public Welfare. After 60 hours of power failure, Liaoning mobile took the lead in landing on the island to ensure communication[EB/OL]. [2019-08-16]. <https://www.zggy.org.cn/item/182887983448248320>.
- [2] 丁卫东, 张丽全, 许剑冰, 等. 电网安全稳定控制系统标准体系研究评述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 58-64.
DING Weidong, ZHANG Liquan, XU Jianbing, et al. Review of standard system of power grid security and stability control system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 58-64.
- [3] 卢赓, 邓婧, 王渝红, 等. 电力系统受极端天气的影响分析及其适应策略[J]. 发电技术, 2021, 42(6): 751-764.
LU Geng, DENG Jing, WANG Yuhong, et al. Analysis of power system affected by extreme weather and its adaptive strategy[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(6): 751-764.
- [4] 高鑫, 唐飞, 张童彦, 等. 配电网防风抗灾加固措施优化决策方法[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 78-85.
GAO Xin, TANG Fei, ZHANG Tongyan, et al. Optimal decision-making method of wind-proof and disaster-resistant reinforcement measures for distribution network[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 78-85.
- [5] 李涛, 王谦, 吴登国, 等. 台风风场下的 1000 kV 输电塔风洞试验与风振响应分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 76-82.
LI Tao, WANG Qian, WU Dengguo, et al. Wind tunnel test and wind-induced response analysis of 1000 kV transmission line under typhoon wind fields[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 76-82.
- [6] 方春华, 陶玉宁, 张威, 等. 实测风速分析模拟及微地形下杆塔风速修正方法[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 146-153.
FANG Chunhua, TAO Yuning, ZHANG Wei, et al. Analysis and simulation of measured wind speed and wind speed correction method of tower under microtopography[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 146-153.
- [7] 梁海平, 石皓岩, 王岩, 等. 基于提升韧性的输电网灾后应急维修策略优化[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 142-151.
LIANG Haiping, SHI Haoyan, WANG Yan, et al. Resilience-improving based optimization of post-disaster emergency maintenance strategy for transmission networks[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 142-151.
- [8] 陈磊, 邓欣怡, 陈红坤, 等. 电力系统韧性评估与提升研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 11-22.
CHEN Lei, DENG Xinyi, CHEN Hongkun, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 11-22.
- [9] 林婷, 高亮. 含电动汽车的微电网规划研究[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(4): 53-58.
LIN Ting, GAO Liang, et al. Planning research of micro-grid with electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 53-58.
- [10] 刘晖, 雷勇, 朱英伟, 等. 微电网运行模式切换下储能变流器双无源控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 196-202.
LIU Hui, LEI Yong, ZHU Yingwei, et al. Dual-passivity-based control strategy for energy storage converter under microgrid operation mode switching[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 196-202.
- [11] 陆永耕, 李建刚, 黄禹铭, 等. 高渗透率分布式电源控制方法[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 103-114.
LU Yonggeng, LI Jiangan, HUANG Yuming, et al. High-permeability distributed power control method[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 103-114.
- [12] 王敏, 李想, 潘永春, 等. 微电网黑启动研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 41-45.
WANG Min, LI Xiang, PAN Yongchun, et al. Overview of research on microgrid black-start[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 41-45.
- [13] 王红斌, 方健, 何嘉兴, 等. 极端灾害下配电网韧性研究综述[J]. 供用电, 2019, 36(7): 20-29.
WANG Hongbin, FANG Jian, HE Jiaying, et al. A review of resilient distribution network under extreme disasters[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 20-29.
- [14] 赵波, 秦如雯. 微电网群体体系架构及能量协同优化运行的 SoS 方法初探[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6):

- 1886-1897.
ZHAO Bo, QIN Ruwen. SoS architecting and operational coordination of microgrid cluster for optimal energy management[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1886-1897.
- [15] HUSSAIN A, BUI V H, KIM H M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience[J]. Applied Energy, 2019, 240: 56-72.
- [16] 陈志杰, 陈民铀, 赵波, 等. SoS 架构下的多微电网极端场景韧性增强策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 29-37.
CHEN Zhijie, CHEN Minyou, ZHAO Bo, et al. Multi-microgrid resilience enhancement strategy for extreme scenarios based on SoS architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 29-37.
- [17] OTT M, ALMUHAINI M, KHALID M. A MILP-based restoration technique for multi-microgrid distribution systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 136801-136811.
- [18] 姜涛, 唐少南, 李雪, 等. 应对台风影响的海岛微电网韧性全过程提升[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6625-6640.
JIANG Tao, TANG Shaonan, LI Xue, et al. Resilience boosting strategy for island microgrid clusters against typhoons[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6625-6640.
- [19] 程杉, 汪业乔, 廖玮霖, 等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 63-71.
CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 63-71.
- [20] 陈天锦, 牛高远, 甘江华, 等. 基于虚拟同步策略的电动汽车 V2G 充放电系统研究及样机实现[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 131-141.
CHEN Tianjin, NIU Gaoyuan, GAN Jianghua, et al. Research and prototype manufacture on electric vehicle V2G systems based on virtual synchronous control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 131-141.
- [21] HUSSAIN A, MUSILEK P. Resilience enhancement strategies for and through electric vehicles[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 80: 103788.
- [22] KIM J, DVORKIN Y. Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(5): 4996-5006.
- [23] RAHIMI K, DAVOUDI M. Electric vehicles for improving resilience of distribution systems[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 36: 246-256.
- [24] AHMADI S E, MARZBAND M, IKPEHAI A, et al. Optimal stochastic scheduling of plug-in electric vehicles as mobile energy storage systems for resilience enhancement of multi-agent multi-energy networked microgrids[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105566.
- [25] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 台风灾害下基于 V2G 的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 130-139.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 130-139.
- [26] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, MIN X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012, 36: 23-31.
- [27] SHAPLEY L S. A value for n-persons games[J]. Annals of Mathematics Studies, 1953, 28: 307-318.
- [28] 刘念, 赵璟, 王杰, 等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1903-1910.
LIU Nian, ZHAO Jing, WANG Jie, et al. A trading model of PV microgrid cluster based on cooperative game theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1903-1910.
- [29] 沈培锋, 王徐延, 张昊亮, 等. 考虑规模化快充负荷的低压互联配电台区风险评估[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 56-64.
SHEN Peifeng, WANG Xuyan, ZHANG Haoliang, et al. Risk assessment of low-voltage interconnected distribution districts considering large-scale fast charging load[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 56-64.

收稿日期: 2023-06-02; 修回日期: 2023-09-27

作者简介:

孙科(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多微电网运行优化; E-mail: sun5885330@163.com

陈文钢(1977—), 男, 通信作者, 博士研究生, 副教授, 研究方向为智能配电网自动化技术及应用。E-mail: baiheshu@163.com

(编辑 张颖)