

考虑多类型储能协同的重要负荷恢复方法

王颖,祝士焱,许寅,和敬涵
(北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

摘要:针对含多类型储能配电网大停电后利用分布式储能和电源进行重要负荷恢复的问题,考虑能量型和功率型储能的运行和功能特点,提出两阶段协同恢复方法,实现多类型储能协同互补,达到更优的恢复效果。第一阶段建立考虑能量型储能运行特性的多时段恢复混合整数二阶锥规划模型,确定各时段负荷恢复集合和各源计划功率曲线,即确定能量在时间维度的优化配置方案;第二阶段在第一阶段给出的能量分配方案基础上,考虑功率型储能的快速功率支撑,确定负荷因恢复突增时段各源功率曲线,即确定功率的精细化配置方案。采用改进的IEEE 33节点配电网进行验证,结果验证了所提两阶段协同恢复方法的有效性。

关键词:配电网;储能;负荷恢复;分布式电源;优化决策

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110043

0 引言

近年来,国际上发生多起因极端事件引发的大停电事故,造成了巨大损失,电网韧性受到广泛关注^[1-2]。为实现“双碳”战略目标,构建以新能源为主体的新型电力系统是必由之路。然而,新能源大规模接入为电网安全及韧性提升带来了巨大挑战。储能是支撑新型电力系统的重要技术和基础装备,对推动能源绿色转型、提升极端事件应对能力、保障能源安全、支撑应对气候变化目标实现具有重要意义。我国国家发改委和能源局于2021年7月正式发布了《关于加快推动新型储能发展的指导意见》^[3],提出到2025年实现新型储能从商业化初期向规模化发展转变,积极推动电网侧和用户侧储能多元化发展,探索储能融合发展新场景,并围绕重要负荷用户需求,建设一批移动式或固定式储能,提升应急供电保障能力。极端事件导致大停电后,利用配电网内多种类型储能和分布式电源快速恢复网内重要负荷,有助于减小停电损失,提升电网韧性^[4]。

目前,已有相关研究考虑利用配电网内的储能、微电网和分布式电源等实现极端事件后网内重要负荷恢复,并取得了一定进展。文献[5]提出多源协同的恢复思路,充分利用配电网内多种资源进行恢复,形成尽可能大的孤岛,实现多源在时空维度的协同;文献[6]考虑到极端事件导致的停电时间较长,提出了含分布式电源和储能的配电网负荷恢复多时段决策模型;文献[7]提出了含分布式储能系统交直流混合配电网负荷恢复策略,考虑了储能系统的功率限制约束和荷电状态SOC(State Of Charge)约束;文献

[8]提出了考虑微能源网支撑作用的配电网韧性提升策略,包括滚动停电管理方案和故障恢复方案,考虑了储能装置剩余能量的影响。上述研究在对储能建模时均进行了一定的简化处理,仅考虑了储能系统的功率约束和荷电状态约束,并未具体考虑不同类型储能装置的运行特点和功能特点。

实际上,极端事件后利用本地资源恢复负荷形成的电气孤岛系统需要持续运行一段时间,在整个过程中涉及多个负荷接入的操作,会造成较大的频率波动,为临时孤岛的平稳运行带来挑战^[9]。此外,在以往的负荷恢复研究中,通常假设配电网内各类分布式电源和储能的爬坡能力极强,并忽略功率变化的爬坡时间。然而实际上,各类电源或储能的负荷跟随能力均有所差异^[10],在这种假设下得到的恢复策略在实际应用时可能难以适用。

面对上述挑战,充分发挥和利用各类新型储能设备快速灵活的反应能力和双向功率吞吐特性,可提升配电网负荷恢复安全水平和运行效果。按照不同类型储能装置的主要功能,可分为以蓄电池和压缩空气储能为代表的能量型储能和以超级电容装置为代表的功率型储能^[11]。在负荷恢复接入操作瞬间利用功率型储能快速平抑系统功率波动,其他能量型储能和分布式电源按照决策的计划进行爬坡,后续为功率型储能充电并为系统提供能量支撑,不同功能类型的储能协同互补,实现更优的恢复效果。

本文针对含压缩空气储能、蓄电池储能和超级电容3种储能设备的配电网,研究考虑多类型储能协同的配电网多时段重要负荷恢复方法,实现不同类型的储能在恢复过程中的协调配合,确保功率、能量在时空维度的最优配置,提升负荷恢复效果。

1 问题描述

本文针对极端事件导致的大停电后,大电网在

收稿日期:2021-08-02;修回日期:2021-09-10

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2020M680328)

Project supported by China Postdoctoral Science Foundation (2020M680328)

短时间内无法为配电网及时送电的场景^[5],以含压缩空气储能、蓄电池储能和超级电容等储能设备和柴油机等分布式电源的配电网为研究对象,沿用“多源协同”恢复思路^[4],考虑多类型储能与分布式电源功能特点、出力响应特性,研究多类型储能与电源协同配合的重要负荷恢复方法,实时决策当前停电场景下利用本地资源能够恢复负荷的情况及相应电源出力的策略,为实际配电网的自愈恢复决策提供支撑。

由于极端事件导致的大停电事件一般停电时间较长,储能、柴油机等电源在灾害情况下一般无法及时得到外界的电量或燃料供给,因此制定恢复策略时应考虑有限的能量在时间维度的优化配置^[5]。此外,恢复过程中涉及接入负荷操作,突增负荷可能导致系统暂态频率越限^[9],使无主网支撑的孤岛配电网发生崩溃。而功率型储能响应速度快、循环寿命长,可快速平衡突增负荷。另外,应考虑能量型储能和柴油机等电源的功率爬坡问题,避免因乐观估计其功率响应速度导致的功率或能量分配不合理问题。

综上所述,恢复策略的制定应以负荷恢复效果最大化为目标,考虑各类储能和分布式电源有限的能量约束、功率响应速度约束和运行约束,以及配电网潮流约束等,决策各时段负荷恢复集合、各类型储能及分布式电源功率曲线,通过功率型和能量型储能协同互补,实现有限的功率和能量在时空维度的优化配置。

然而,实现多类型储能协同的负荷恢复决策需要解决以下挑战:物理层面上,各类型储能和分布式电源的响应速度各异,在恢复中涉及多个时间尺度的协调配合问题,难以统筹兼顾;方法层面上,恢复决策问题须解决能量和功率在时间维度的优化分配,涉及诸多难以在统一时间尺度下建立的约束条件,因此难以建立统一的优化决策模型求解。

2 两阶段协同恢复方法框架

针对多类型储能协同的负荷恢复决策面临的挑战,本文提出的两阶段协同恢复方法框架见图 1。

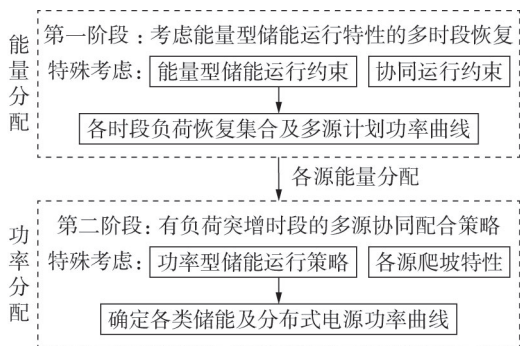


图 1 两阶段协同恢复方法框架

Fig.1 Two-stage coordinated restoration framework

本文假设停电后至大电网恢复送电的停电时间

为 T ,将 T 划分为 n 个时段,每个时段的时长为几分钟至十几分钟。第一阶段考虑能量型储能和分布式发电机,同时考虑与第二阶段的协同约束,建立优化决策模型,确定各时段负荷恢复集合及多源计划功率曲线,相当于确定能量的优化配置;第二阶段为有负荷突增时段的多源协同配合策略,需要考虑各能量型储能和电源第一阶段的能量分配、功率型储能运行策略和各源的爬坡特性,确定各类储能及分布式电源功率曲线,相当于确定功率的配置策略。

两阶段协同恢复框架下的多储能协同示意图如图 2 所示。由图可见,两阶段协同恢复方法根据多类型储能协同的特点对整个恢复问题进行解耦处理,先从整体能量最优分配的角度,主要考虑能量型储能和分布式电源的能量支撑,确定较大的时间细粒度下能量的优化配置,同时可大致确定各个能量型储能和电源的计划功率;再针对有负荷突增的时段,考虑功率型储能的快速功率支撑,以弥补负荷突增和能量型储能及分布式电源的爬坡过程,同时确定为功率型储能充电恢复至正常状态的协同策略,从而确定较小时间细粒度下功率的优化配置。

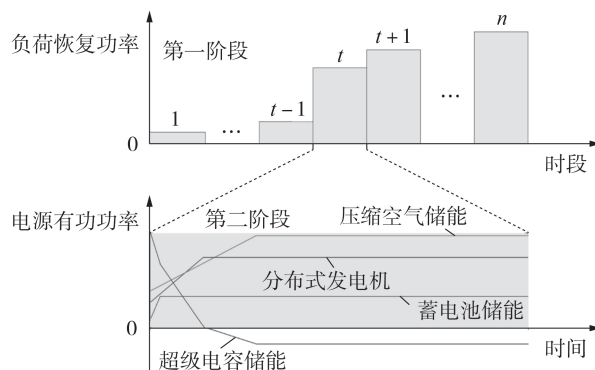


图 2 两阶段协同恢复框架下的多类型储能协同示意图

Fig.2 Coordination among multiple types of energy storage under two-stage coordinated restoration framework

3 考虑能量型储能运行特性的多时段恢复

第一阶段的任务是建立考虑包括压缩空气储能和蓄电池在内的运行特性的多时段恢复模型,确定各个能量型储能和分布式电源有限能量的优化配置方案。下面分别对优化决策模型的目标函数和约束条件进行阐述。

3.1 目标函数

以最大化为加权负荷持续供电的时间为恢复目标,将能量型储能和分布式发电机的能量进行优化分配,在等待大电网恢复供电期间,先一步恢复关键负荷并对其提供更长时间的支撑。

$$\max f = \sum_{i \in L} \sum_{t=1}^n w_i \gamma_i T_{im} \quad (1)$$

$$\gamma_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in L \quad (2)$$

式中: L 为全部负荷节点构成的集合; w_i 为负荷的权重系数; γ_i 为 0-1 变量, 取值为 1、0 分别表示负荷恢复和未恢复; T_{int} 为单个恢复时段的持续时间。

3.2 约束条件

3.2.1 配电系统运行约束

配电系统运行约束包括潮流约束、辐射状拓扑约束、节点电压约束、线路电流约束以及分布式发电机出力和有限能量约束等, 具体说明详见文献[5], 本文不再赘述。

3.2.2 蓄电池储能运行约束

蓄电池储能具备较高的能量密度与功率密度, 且响应时间在秒级。同时, 蓄电池储能的循环效率可达到 90%, 远高于压缩空气储能, 是目前最成熟、应用最为广泛的储能方式^[11]。在恢复问题中蓄电池储能为重要负荷恢复提供能量支撑, 采用荷电状态描述蓄电池储能的可用容量状态, 相关约束包括:

$$p_{\text{bs}}^t = p_{\text{bs}, \text{d}}^t - p_{\text{bs}, \text{c}}^t \quad (3)$$

$$S_{\text{SOC}, \text{bs}}^t = S_{\text{SOC}, \text{bs}}^{t-1} - \lambda_{\text{bs}} p_{\text{bs}}^t T_{\text{int}} \quad (4)$$

$$S_{\text{SOC}, \text{bs}, \text{min}} \leq S_{\text{SOC}, \text{bs}}^t \leq S_{\text{SOC}, \text{bs}, \text{max}} \quad (5)$$

$$b_{\text{bs}, \text{d}}^t P_{\text{bs}, \text{d}, \text{min}} \leq p_{\text{bs}, \text{d}}^t \leq b_{\text{bs}, \text{d}}^t P_{\text{bs}, \text{d}, \text{max}} \quad (6)$$

$$b_{\text{bs}, \text{c}}^t P_{\text{bs}, \text{c}, \text{min}} \leq p_{\text{bs}, \text{c}}^t \leq b_{\text{bs}, \text{c}}^t P_{\text{bs}, \text{c}, \text{max}} \quad (7)$$

$$b_{\text{bs}, \text{c}}^t + b_{\text{bs}, \text{d}}^t \leq 1 \quad (8)$$

$$b_{\text{bs}, \text{c}}^t, b_{\text{bs}, \text{d}}^t \in \{0, 1\} \quad (9)$$

式中: p_{bs}^t 为蓄电池储能系统在时段 t 注入电网的功率; $p_{\text{bs}, \text{c}}^t$ 、 $p_{\text{bs}, \text{d}}^t$ 分别为蓄电池储能系统在时段 t 的充电和放电功率; $P_{\text{bs}, \text{c}, \text{max}}$ 、 $P_{\text{bs}, \text{c}, \text{min}}$ 和 $P_{\text{bs}, \text{d}, \text{max}}$ 、 $P_{\text{bs}, \text{d}, \text{min}}$ 分别为充电和放电功率的上、下限; $S_{\text{SOC}, \text{bs}}^t$ 为蓄电池储能系统在时段 t 的荷电状态; $S_{\text{SOC}, \text{bs}, \text{max}}$ 、 $S_{\text{SOC}, \text{bs}, \text{min}}$ 分别为荷电状态的上、下限; λ_{bs} 为能量转换为蓄电池储能系统的荷电状态的转换系数; $b_{\text{bs}, \text{c}}^t$ 、 $b_{\text{bs}, \text{d}}^t$ 均为 0-1 变量, 分别表征蓄电池储能系统在时段 t 的充、放电状态。

此外, 蓄电池循环寿命受充放电次数限制, 因此蓄电池储能系统不适合承担频繁的功率波动。考虑到蓄电池储能响应速度较快, 本文通过蓄电池储能的控制装置设置爬坡率 κ_{bs} 来限制其响应速度, 其值根据具体设备的寿命要求确定^[10]。

$$|p_{\text{bs}}^t - p_{\text{bs}}^{t-1}| \leq \kappa_{\text{bs}} T_{\text{int}} \quad (10)$$

3.2.3 压缩空气储能运行约束

压缩空气储能可以进行较大容量的电能储存, 属于典型的能量型储能, 其响应时间通常在分钟级^[12]。压缩空气储能循环寿命长、无污染, 是极具前景的储能方式^[13]。本文建模采用先进绝热压缩空气储能(AA_CAES), 简化的 AA_CAES 系统可分为电气和热力 2 个部分^[14], 恢复中需要考虑其运行特性。

1) 电气部分, 即:

$$p_{\text{ca}}^t = p_{\text{ca}, \text{d}}^t - p_{\text{ca}, \text{c}}^t \quad (11)$$

$$p_{\text{ca}, \text{c}}^t = \frac{1}{\eta_{\text{m}} \eta_{\text{c}}} \frac{k R_{\text{m}} \dot{m}_{\text{c}}^t}{k-1} \left[\sum_{n_{\text{c}}=1}^{N_{\text{c}}} T_{\text{c}, n_{\text{c}}}^{\text{in}} \left(\beta_{\text{c}, n_{\text{c}}}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \quad (12)$$

$$p_{\text{ca}, \text{d}}^t = \frac{\eta_{\text{g}} \eta_{\text{d}} k R_{\text{m}} \dot{m}_{\text{d}}^t}{k-1} \left[\sum_{n_{\text{d}}=1}^{N_{\text{d}}} T_{\text{d}, n_{\text{d}}}^{\text{in}} \left(\beta_{\text{d}, n_{\text{d}}}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \quad (13)$$

$$b_{\text{ca}, \text{c}}^t P_{\text{ca}, \text{c}, \text{min}} \leq p_{\text{ca}, \text{c}}^t \leq b_{\text{ca}, \text{c}}^t P_{\text{ca}, \text{c}, \text{max}} \quad (14)$$

$$b_{\text{ca}, \text{d}}^t P_{\text{ca}, \text{d}, \text{min}} \leq p_{\text{ca}, \text{d}}^t \leq b_{\text{ca}, \text{d}}^t P_{\text{ca}, \text{d}, \text{max}} \quad (15)$$

$$b_{\text{ca}, \text{d}}^t Q_{\text{ca}, \text{d}, \text{min}} \leq q_{\text{ca}, \text{d}}^t \leq b_{\text{ca}, \text{d}}^t Q_{\text{ca}, \text{d}, \text{max}} \quad (16)$$

$$(p_{\text{ca}, \text{d}}^t)^2 + (q_{\text{ca}, \text{d}}^t)^2 \leq S_{\text{max}}^2 \quad (17)$$

$$|p_{\text{ca}}^t - p_{\text{ca}}^{t-1}| \leq \kappa_{\text{ca}} T_{\text{int}} \quad (18)$$

$$b_{\text{ca}, \text{c}}^t + b_{\text{ca}, \text{d}}^t \leq 1 \quad (19)$$

$$b_{\text{ca}, \text{c}}^t, b_{\text{ca}, \text{d}}^t \in \{0, 1\} \quad (20)$$

式中: p_{ca}^t 为 AA_CAES 系统在时段 t 注入电网的功率; $p_{\text{ca}, \text{c}}^t$ 和 $p_{\text{ca}, \text{d}}^t$ 、 $q_{\text{ca}, \text{d}}^t$ 分别为时段 t 压缩侧的充电有功功率和透平侧的放电有功、无功功率, $P_{\text{ca}, \text{c}, \text{max}}$ 、 $P_{\text{ca}, \text{c}, \text{min}}$ 分别为压缩侧的有功出力上、下限; $P_{\text{ca}, \text{d}, \text{max}}$ 、 $P_{\text{ca}, \text{d}, \text{min}}$ 和 $Q_{\text{ca}, \text{d}, \text{max}}$ 、 $Q_{\text{ca}, \text{d}, \text{min}}$ 分别为透平侧的有功和无功出力上、下限; \dot{m}_{c}^t 和 \dot{m}_{d}^t 分别为时段 t 流入压缩机与流出透平机的质量流量; κ_{ca} 为系统爬坡率, 反映系统承担出力指令的情况; $b_{\text{ca}, \text{c}}^t$ 、 $b_{\text{ca}, \text{d}}^t$ 均为 0-1 变量, 分别表示 AA_CAES 系统在时段 t 的充电与放电状态; 其他参数定义见附录 A 表 A1。式(11)—(13)表示 AA_CAES 系统的充、放电功率与系统各参数的关系; 式(14)—(18)表示 AA_CAES 系统充、放电功率的运行限制; 式(19)、(20)表示在同一时段内 AA_CAES 系统只能保持为充电状态和放电状态中的一种。

2) 热力部分, 即:

$$p_{\text{r}}^t = p_{\text{r}}^{t-1} + \frac{R_{\text{m}} T_{\text{a}} T_{\text{int}}}{V} (\dot{m}_{\text{c}}^t - \dot{m}_{\text{d}}^t) \quad (21)$$

$$H^t = H^{t-1} + h_{\text{c}}^t \eta_{\text{ex}} T_{\text{int}} - \frac{h_{\text{d}}^t T_{\text{int}}}{\eta_{\text{ex}}} \quad (22)$$

$$h_{\text{c}}^t = \sum_{n_{\text{c}}=1}^{N_{\text{c}}} c_{\text{a}} \dot{m}_{\text{c}}^t (T_{\text{c}, n_{\text{c}}}^{\text{out}} - T_{\text{c}, n_{\text{c}}+1}^{\text{in}}) \quad (23)$$

$$h_{\text{d}}^t = \sum_{n_{\text{d}}=1}^{N_{\text{d}}} c_{\text{a}} \dot{m}_{\text{d}}^t (T_{\text{d}, n_{\text{d}}}^{\text{in}} - T_{\text{d}, n_{\text{d}}+1}^{\text{out}}) \quad (24)$$

$$T_{\text{c}, n_{\text{c}}}^{\text{out}} = T_{\text{c}, n_{\text{c}}}^{\text{in}} \left(\beta_{\text{c}, n_{\text{c}}}^{\frac{k-1}{k}} / \eta_{\text{c}} - 1 \right) \quad (25)$$

$$T_{\text{d}, n_{\text{d}}}^{\text{out}} = T_{\text{d}, n_{\text{d}}}^{\text{in}} \left(\eta_{\text{e}} \beta_{\text{d}, n_{\text{d}}}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (26)$$

$$p_{\text{rmin}} \leq p_{\text{r}}^t \leq p_{\text{rmax}} \quad (27)$$

$$H_{\text{min}} \leq H^t \leq H_{\text{max}} \quad (28)$$

式中: p_{r}^t 为时段 t 储气罐中的压力; H^t 为时段 t AA_CAES 系统的储热量; h_{c}^t 和 h_{d}^t 分别为时段 t 压缩侧和透平侧换热器的换热率; $T_{\text{c}, n_{\text{c}}}^{\text{out}}$ 和 $T_{\text{d}, n_{\text{d}}}^{\text{out}}$ 分别为压缩侧和透平侧的出口空气温度; 其他参数定义见附录 A 表 A1。式(21)、(22)分别为 AA_CAES 系统储气罐的压力方程、储热系统的储热方程; 式(23)—(26)为

AA_CAES系统换热器换热率与温度的关系方程;式(27)、(28)分别表示压力、储热量的运行限制。

3.2.4 协同运行约束

第二阶段的多源协同配合需要考虑能量型储能和分布式电源的爬坡过程,为了确保第二阶段为超级电容充电时新增功率部分(详见下文)不会超出发电机出力上限,则第一阶段决策的计划功率应留有向上调节的空间,即:

$$p_{gen,i}^t \leq (1-\sigma)P_{gen,i,max} \quad (29)$$

式中: $p_{gen,i}^t$ 为能量型储能或分布式电源 i 在时段 t 的有功出力; $P_{gen,i,max}$ 为能量型储能或分布式电源 i 的出力上限; σ 为预留功率的系数,可取值为 5% 等。

综上所述,将第一阶段考虑能量型储能运行特性的多时段恢复问题建立为混合整数二阶锥规划(MISOCP)模型,可利用商业求解器(如 MOSEK^[15])有效求解。

4 有负荷突增时段的多源协同配合策略

超级电容储能功率密度大、循环寿命长,具有极快的功率响应速度,其响应时间通常为毫秒级^[14],在恢复过程中可认为超级电容储能的功率是随控制指令瞬间完成的^[16],特别适合承担负荷恢复操作过程中的快速功率波动。对于有负荷突增的时段,在初期负荷接入后,由超级电容储能提供快速功率支撑,同时能量型储能及分布式电源进行爬坡;爬坡结束后,需协同能量型储能及电源为超级电容储能充电,使其回复至最佳状态,以便后续继续提供功率支撑。

基于以上分析,本文提出了镜像电容的概念,通过将超级电容储能整体划分为多个虚拟子电容,每个虚拟子电容响应 1 个能量型储能或分布式电源的出力特性,使两者之和满足能量型储能或分布式电源的第一阶段的出力指令,本文定义这种与能量型储能或分布式电源一一对应的虚拟电容为其镜像电容。

4.1 基于镜像电容概念的能量型储能功率曲线修正

基于前述定义,本文提出的针对每个能量型储能和分布式电源的镜像电容满足:

$$\dot{p}_{sc}^i(\tau) = \sum_{i \in G} \dot{p}_{vc,i}^i(\tau) \quad (30)$$

式中: $\dot{p}_{sc}^i(\tau)$ 为第二阶段需要确定的超级电容储能整体在时段 t 中时刻 τ 的实时出力指令; G 为全部能量型储能和分布式电源节点的集合; $\dot{p}_{vc,i}^i(\tau)$ 为与能量型储能或分布式电源 i 相对应的镜像电容的实时出力。

4.1.1 镜像电容出力策略

能量型储能或电源及其镜像电容出力曲线如图 3 所示。

以时段 t 为例,按照第一阶段能量分配结果,能量型储能或分布式电源 i 的实时出力 $\dot{p}_{gen,i}^t(\tau)$ 需要从

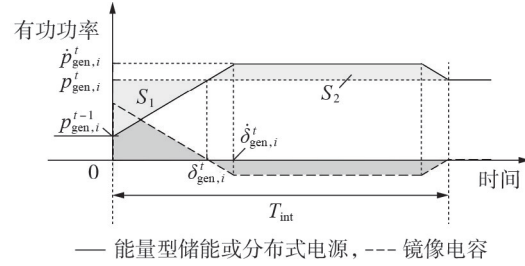


图3 能量型储能或分布式电源及其镜像电容出力曲线

Fig.3 Power curves of energy type energy storage or DG and its mirror capacitance

$p_{gen,i}^{t-1}$ 爬升到 $p_{gen,i}^t$, 爬坡时间 $\delta_{gen,i}^t$ 为:

$$\delta_{gen,i}^t = (p_{gen,i}^t - p_{gen,i}^{t-1}) / \kappa_{gen,i} \quad (31)$$

式中: $p_{gen,i}^t$ 为第一阶段确定的能量型储能或分布式电源 i 在时段 t 的出力指令; $\kappa_{gen,i}$ 为能量型储能或分布式电源 i 的爬坡率。

在功率方面,镜像电容的出力策略为调整出力与相应电源的出力之和等于第一阶段的电源出力指令:

$$\dot{p}_{gen,i}^t(\tau) + \dot{p}_{vc,i}^t(\tau) = p_{gen,i}^t \quad (32)$$

式中: $\dot{p}_{gen,i}^t(\tau)$ 为第二阶段需要确定的能量型储能或分布式电源 i 在时段 t 中时刻 τ 的实际出力。

4.1.2 镜像电容充电策略

在能量方面,相较于第一阶段而言,能量型储能或分布式电源 i 在时段 t 未能消耗的能量如图 3 中的 S_1 所示,该部分能量与其镜像电容所消耗的能量相等。考虑到该镜像电容还需在后续恢复时段保持式(32)成立,所以需要在时段 t 中相应能量型储能或分布式电源爬坡结束后由此能量型储能或分布式电源对镜像电容充电,因此第二阶段的能量型储能或分布式电源出力指令 $\dot{p}_{gen,i}^t$ 需大于第一阶段的能量型储能或分布式电源出力指令,两者的差值即为镜像电容充电的功率,如图 3 中的 S_2 所示。由于第一阶段能量分配时已为功率型储能预留充电功率,可以保证在增加镜像电容充电功率时其他电源出力不会越限。因此在一个时段中,镜像电容的消耗能量等于充电能量($S_1=S_2$),即有:

$$\frac{1}{2} \Delta p_{gen,i}^t \delta_{gen,i}^t = (T_{int} - \delta_{gen,i}^t) \Delta h_{gen,i}^t \quad (33)$$

$$\Delta p_{gen,i}^t = p_{gen,i}^t - p_{gen,i}^{t-1} \quad (34)$$

$$\delta_{gen,i}^t = (p_{gen,i}^t - p_{gen,i}^{t-1}) / \kappa_{gen,i} \quad (35)$$

$$\Delta h_{gen,i}^t = \dot{p}_{gen,i}^t - p_{gen,i}^t \quad (36)$$

式中: $\dot{p}_{gen,i}^t$ 为第二阶段需要确定的能量型储能或分布式电源在时段 t 的出力指令, $\delta_{gen,i}^t$ 为该指令对应的爬坡时间。

4.1.3 超级电容整体功率曲线与能量型储能功率曲线

基于上述分析,最终可以确定的各能量型储能

或分布式电源的第二阶段的出力指令为:

$$\dot{p}_{\text{gen},i}^t(\tau) = \begin{cases} \dot{p}_{\text{gen},i}^t & \tau \in [0, T_{\text{int}}^-] \\ p_{\text{gen},i}^t & \tau \in (T_{\text{int}}^-, T_{\text{int}}] \end{cases} \quad (37)$$

$$T_{\text{int}}^- = T_{\text{int}} - \frac{\dot{p}_{\text{gen},i,\text{max}}^t - p_{\text{gen},i}^t}{\kappa_{\text{gen},i}}$$

受爬坡率限制,各能量型储能或分布式电源的实际出力曲线为:

$$\dot{p}_{\text{gen},i}^t(\tau) = \begin{cases} p_{\text{gen},i}^{t-1} + \kappa_{\text{gen},i}\tau & \tau \in [0, \delta_{\text{gen},i}^t] \\ \dot{p}_{\text{gen},i}^t & \tau \in (\delta_{\text{gen},i}^t, T_{\text{int}}^-] \\ p_{\text{gen},i}^t - \kappa_{\text{gen},i}(\tau - T_{\text{int}}^-) & \tau \in [T_{\text{int}}^-, T_{\text{int}}] \end{cases} \quad (38)$$

将式(38)代入式(30)、(32),可以得到超级电容储能的整体功率曲线。

4.2 多个超级电容储能的功率曲线确定

在得到的超级电容整体功率曲线基础上,对于含有多个超级电容储能的情况,可按照超级电容储能的初始荷电状态对应的容量,采用下垂控制^[10]分配每个超级电容储能的功率,则第 k 个超级电容储能在时段 t 中时刻 τ 的功率指令为:

$$\dot{p}_{\text{sc},k}^t(\tau) = \frac{S_{\text{sc},k,0}^{\text{SOC}} / \lambda_{\text{sc},k}}{\sum_{k \in S_{\text{sc}}} (S_{\text{sc},k,0}^{\text{SOC}} / \lambda_{\text{sc},k})} \sum_{i \in G} \dot{p}_{\text{ve},i}^t(\tau) \quad (39)$$

式中: S_{sc} 为全部超级电容储能构成的集合; $S_{\text{sc},k,0}^{\text{SOC}}$ 为第 k 个超级电容储能的初始荷电状态; $\lambda_{\text{sc},k}$ 为转换系数,将能量转换为超级电容储能的荷电状态。

4.3 两阶段协同恢复方法流程

综上所述,本文建立了考虑多类型储能协同的两阶段负荷恢复方法,其流程如图4所示。

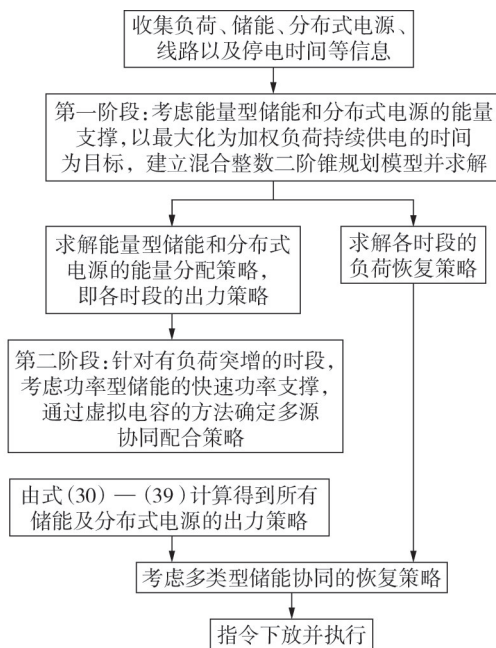


图4 两阶段协同恢复方法流程图

Fig.4 Flowchart of two-stage coordinated restoration method

5 算例分析

基于MATLAB平台进行两阶段恢复方法程序编写,并采用图5所示的改进的IEEE 33节点配电测试系统验证方法有效性。根据文献[17],将负荷按照重要等级分为3级,一级、二级和普通负荷权重分别为100、10和0.2。AA_CAES系统^[18]、蓄电池储能^[10]、超级电容储能^[11]和分布式发电机^[10]参数配置见附录A表A1—A4。假设极端事件后配电网与主网断开,线路15-16、27-28发生故障并隔离,预计停电时间为2h。同时,配电系统已完成恢复前的准备工作,各电源已处于热备用状态,线路、负荷开关已处于可控状态。

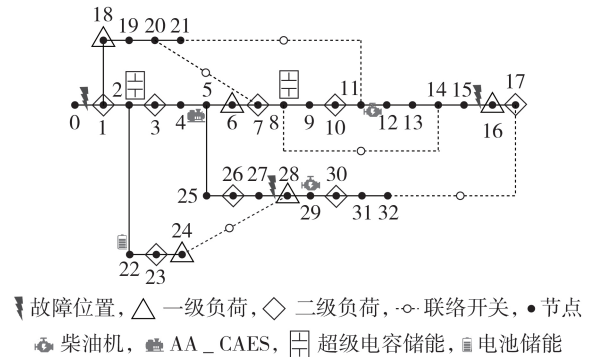


图5 改进的IEEE 33节点配电系统

Fig.5 Modified IEEE 33-bus distribution system

5.1 第一阶段恢复策略

设置15 min为1个时段,共分为8个恢复时段。求解时间为3.7 min,求解后确定系统拓扑为联络线24-28、17-32闭合,联络线7-20、8-14、11-21断开,其他非故障线路闭合。各时段负荷恢复个数及恢复量变化曲线见图6,其中,全部一级负荷均得到恢复,二级负荷得到部分恢复,并且在最后时段新增恢复一个普通负荷,详细负荷恢复结果见附录A表A5。各时段各节点电压幅值均满足要求,见附录A图A1。各电源在各个时段的计划功率如图7所示,能量分配见附录A图A2。

在整个恢复期间,分布式发电机 DG_{29} 、储能 BS_{22} 的能量全部得到利用,最终剩余能量为0。分布式发电机 DG_{11} 最终剩余能量7 kW·h(剩余燃料的化学

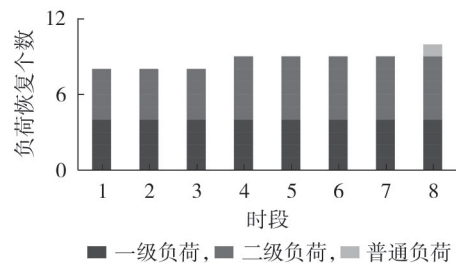


图6 各时段负荷恢复结果

Fig.6 Load restoration results in each period

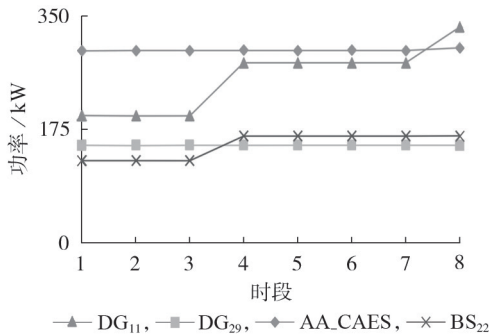


图 7 第一阶段确定的各电源计划功率

Fig.7 Planned power determined in first stage

能所对应的电能),AA_CAES 系统储气室达到最低气压限制,不足以再支撑任何负荷恢复。可见,在大电网恢复送电之前,本文提出的第一阶段多时段恢复策略可以最大限度地利用配电网中剩余的有限发电资源,即恢复更为关键的负荷,实现能量的优化配置,最大化为重要负荷持续供电的时间。

5.2 第二阶段多源协同配合策略

由第一阶段的恢复策略可知,系统计划在时段 4 和时段 8 分别新增恢复 1 个 120 kW 的二级负荷和 1 个 60 kW 的三级负荷。根据本文第二阶段多源协同配合策略,得到需要修正的各电源功率指令及爬坡时间如表 1 所示。表中,括号内、外的值为第一阶段的功率指令和第二阶段确定的能量型储能修正的功率指令。以时段 4 为例,各电源在第二阶段的修正功率曲线如图 8 所示(时段 8 的各电源第二阶段电源功率曲线见附录 A 图 A3)。

表 1 第二阶段确定的能量型储能功率修正策略

Table 1 Power correction strategy of energy type energy storage in second stage

系统	参数	参数值	
		时段 4	时段 8
AA_CAES	功率 / kW	286.3(277.1)	336(332.1)
	爬坡时间 / s	181.7	117.7
BS ₂₂	功率 / kW	165.1(164.2)	—
	爬坡时间 / s	39	—

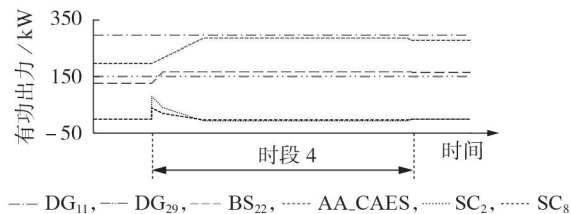


图 8 第二阶段确定的各电源修正功率

Fig.8 Planned power determined in second stage

由上述结果可以看出:包括压缩空气储能和蓄电池在内的能量型储能功率变化对应的爬坡时间难以直接忽略;第二阶段确定的功率指令会略高于第一阶段,以满足第一阶段确定的能量约束以及超级

电容的充电需求。在负荷接入后,超级电容可以快速进行功率支撑,均衡系统功率,与其他需要爬坡的能量型储能协同配合;且压缩空气储能和蓄电池爬坡完成后,为超级电容充电直至其恢复至最佳状态,使其可以在后续恢复中继续发挥能量支撑作用,为重要负荷持续供电。多种类型的储能在整个过程中协同互补,实现功率和能量在时空维度的优化配置。

6 结论

本文针对大停电后含多类型储能配电网利用本地资源进行负荷恢复的问题,考虑功率型和能量型储能的运行特性和功能特点,提出了两阶段协同恢复方法。第一阶段得到各个能量型储能和分布式电源的能量在较大时间细粒度下的优化配置;第二阶段在第一阶段的能量分配基础上,得到负荷突增时段的功率型储能与能量型储能和分布式电源的协同配合方案。算例结果表明,本文所提方法可快速确定负荷恢复策略,通过各源的协同配合提升恢复效果,提升配电网韧性。与已有研究相比,本文考虑了不同类型储能的功率响应特性和功能特性,充分发挥了不同功能类型储能在恢复中的功率或能量支撑作用,优化了恢复效果。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 别朝红,林超凡,李更丰,等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报,2020,40(9):2735-2745.
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.

[2] 阮前途,谢伟,许寅,等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报,2020,40(21):6773-6784.
RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6784.

[3] 国家发展和改革委员会,国家能源局. 发改能源规[2021]1051号-国家能源局网站关于加快推动新型储能发展的指导意见[EB/OL]. (2021-07-15)[2021-08-01]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-07/15/c_1310079331.htm.

[4] WANG Ying, XU Yin, HE Jinghan, et al. Coordinating multiple sources for service restoration to enhance resilience of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5781-5793.

[5] 许寅,王颖,和敬涵,等. 多源协同的配电网多时段负荷恢复优化决策方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 123-131.
XU Yin, WANG Ying, HE Jinghan, et al. Optimal decision-making method for multi-period load restoration in distribution network with coordination of multiple sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 123-131.

[6] CHEN Bo, CHEN Chen, WANG Jianhui, et al. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6793-6805.

[7] 尹航,刘友波,高红均,等. 含分布式储能系统的交直流混合配

- 电网负荷恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 25-32.
- YIN Hang, LIU Youbo, GAO Hongjun, et al. Load recovery strategy of AC/DC hybrid distribution network with distributed energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 25-32.
- [8] 葛少云, 张成昊, 刘洪, 等. 考虑微能源网支撑作用的配电网弹性提升策略[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2306-2317.
- GE Shaoyun, ZHANG Chenghao, LIU Hong, et al. Resilience enhancement strategy for distribution network considering supporting role of micro energy grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2306-2317.
- [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] 毕锐, 吴建锋, 丁明, 等. 孤立微网多元储能与柴油发电机协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 73-79, 97.
- BI Rui, WU Jianfeng, DING Ming, et al. A cooperative control strategy for standalone microgrid consisting of multi-storage and diesel generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 73-79, 97.
- [11] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18, 369.
- LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18, 369.
- [12] BOCKLISCH T. Hybrid energy storage approach for renewable energy applications[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 8: 311-319.
- [13] 梅生伟, 李瑞, 陈来军, 等. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2893-2907, 3140.
- MEI Shengwei, LI Rui, CHEN Laijun, et al. An overview and outlook on advanced adiabatic compressed air energy storage technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2893-2907, 3140.
- [14] GUO Zhongjie, WEI Wei, CHEN Laijun, et al. Operation of distribution network considering compressed air energy storage unit and its reactive power support capability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2954-2965.
- [15] MOSEK ApS. MOSEK optimization toolbox for matlab 9.1.13. [EB/OL]. (2018-12-28) [2021-08-01]. <https://docs.mosek.com/9.1/toolbox/index.html>.
- [16] 沈阳武, 彭晓涛, 杨军, 等. 超级电容器储能系统的功率实时控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 28-32, 37.
- SHEN Yangwu, PENG Xiaotao, YANG Jun, et al. Real-time power control of ultracapacitor energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 28-32, 37.
- [17] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 重要电力用户供电电源及自备应急电源配置技术规范: GB/T 29328—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [18] 李姚旺, 苗世洪, 尹斌鑫, 等. 考虑先进绝热压缩空气储能电站备用特性的电力系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5392-5404.
- LI Yaowang, MIAO Shihong, YIN Binxin, et al. Power system optimal scheduling strategy considering reserve characteristics of advanced adiabatic compressed air energy storage plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5392-5404.

作者简介:



王颖

王颖(1992—),女,河北保定人,讲师,博士,主要研究方向为韧性电网、电力交通融合等(E-mail:yingwang1992@bjtu.edu.cn);

祝士焱(1993—),男,山东五莲人,博士研究生,主要研究方向为韧性电网、电力交通融合等(E-mail:shiyan@bjtu.edu.cn);

许寅(1986—),男,福建宁德人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为韧性电网、以新能源为主体的新型电力系统、电力交通融合等(E-mail:xuyin@bjtu.edu.cn)。

和敬涵(1964—),女,河北保定人,教授,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制等(E-mail:jhhe@bjtu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Critical load restoration method considering coordination of multiple types of energy storage

WANG Ying, ZHU Shiyan, XU Yin, HE Jinghan

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Aiming at the critical load restoration using distributed energy storages and generators in distribution networks with multiple types of energy storage after blackouts, considering the operational and functional characteristics of energy type and power type energy storage, a two-stage coordinated restoration method is proposed to realize the coordination and complementary among multiple types of energy storage and achieve better restoration effect. In the first stage, a mixed-integer second-order cone programming for multi-period restoration problems considering operation characteristic of energy type energy storage is built, which can decide load restoration sets in each period and planned power curves for sources, i.e. the optimal allocation scheme of energy in the time dimension is determined. In the second stage, based on the energy allocation scheme given in the first stage, considering fast power support of the power type energy storage, the actual power curves for all sources during the periods of load pick-up are determined, i.e. the refined allocation scheme of power is determined. A modified IEEE 33-bus distribution system is used to verify the effectiveness of the proposed two-stage coordinated restoration method.

Key words: distribution network; energy storage; load restoration; distributed generator; optimal decision-making

附录 A

表 A1 AA_CAES 系统参数

Table A1 Parameters of AA_CAES system

电动机效率 η_m	0.92	储气室体积 V	1000 m ³
压缩机的等熵效率 η_c	0.84	储气室初始压力 p_{r0}	50bar
压缩机级数 N_c	2	储气室最小压力 p_{rmin}	40bar
压缩机进口的温度 T_{c,n_c}^{in}	298K	储气室最大压力 p_{rmax}	55bar
压缩机压缩比 β_{c,n_c}	3.24	蓄热器初始蓄热量 H_0	5000MJ
发电机效率 η_g	0.95	蓄热器最小蓄热量 H_{min}	100MJ
透平机的等熵效率 η_d	0.88	蓄热器最大蓄热量 H_{max}	10000MJ
透平机级数 N_d	2	最小充电功率 $P_{ca,c,min}$	300kW
透平机进口的温度 T_{d,n_d}^{in}	363	最大充电功率 $P_{ca,c,max}$	900kW
透平机膨胀比 β_{d,n_d}	2.81	最小放电功率 $P_{ca,c,max}$	150kW
空气的理想气体常数 R_m	287	最大放电功率 $P_{ca,d,max}$	450kW
空气的绝热指数 k	1.4	最小无功支撑 $Q_{ca,d,min}$	-400kVar
换热器效率 η_{ex}	287	最大无功支撑 $Q_{ca,d,min}$	400kVar
空气定压比热 c_a	1.003	最大输出视在功率 S_{max}	600kVA
储气室温度 T_a	298K	爬坡率 K_{ca}	30kW/min

表 A2 蓄电池储能参数

Table A2 Parameters of battery energy storage

编号	$P_{bs,d,max}, P_{bs,c,max}$ /kW	$Q_{bs,c,min}, Q_{bs,c,max}$ /kW	$S_{SOC,0}$	$S_{SOC,bs}, S_{SOC,bs}$	$\lambda_{sc} / (kW \cdot h^{-1})$	$\kappa_{bs} / (kW \cdot min^{-1})$
BS22	200, 200	-200, 200	0.2	0.9/0.1	$\frac{1}{1000}$	60

注： $S_{SOC,0}$ 、 $S_{SOC,bs}$ 、 $S_{SOC,bs}$ 均为标么值。

表 A3 超级电容储能参数

Table A3 Parameters of super capacitor energy storage

编号	$P_{sc,d,max}$, $P_{sc,d,max}/kW$	$Q_{sc,c,min}$, $Q_{sc,c,max}/kW$	$S_{SOC,sc,ref}$	$S_{SOC,sc,min}$, $S_{SOC,sc,max}$	$\lambda_{sc} / (kW \cdot h^{-1})$
SC2	10000/10000	-10000/10000	0.9	0.9/0.1	$\frac{1}{10}$
SC8	5000/5000	-5000/5000	0.9	0.9/0.1	$\frac{1}{5}$

注: $S_{SOC,sc,ref}$ 、 $S_{SOC,bs}$ 、 $S_{SOC,bs}$ 均为标么值。

表 A4 分布式发电机参数

Table A4 Parameters of distributed generators

编号	$P_{dg,min}$, $P_{dg,max}/kW$	$Q_{dg,min}$, $Q_{dg,max}/kVar$	E_{dg}^0 /(kW h)	κ_{dg} /kW/min
DG11	180/300	-120/120	600	30
DG29	120/200	-80/80	300	15

注: $P_{dg,min}$ 、 $P_{dg,max}$ 和 $Q_{dg,min}$ 、 $Q_{dg,max}$ 分别为有功和无功出力的上下限; E_{dg}^0 为剩余燃料的化学能所对应的电能; κ_{dg} 为爬坡率。

表 A5 第一阶段恢复结果

Table A5 Restoration results of first stage

时段	恢复负荷编号	恢复负荷 /kW	网损/kW
1~3	6、16、18、28 (一级)	765	2.34
	1、10、17、26 (二级)		
4~7	6、16、18、28 (一级)	885	2.44
	1、3、10、17、26 (二级)		
8	6、16、18、28 (一级)	945	1.9
	1、3、10、17、26 (二级)		
	11 (三级)		

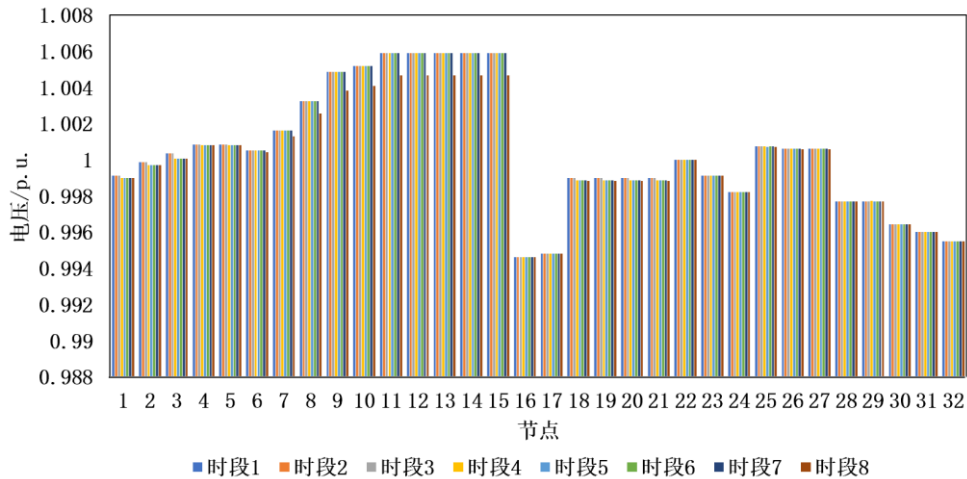


图 A1 各时段中各个节点电压幅值

Fig.A1 Voltage profiles in multiple periods

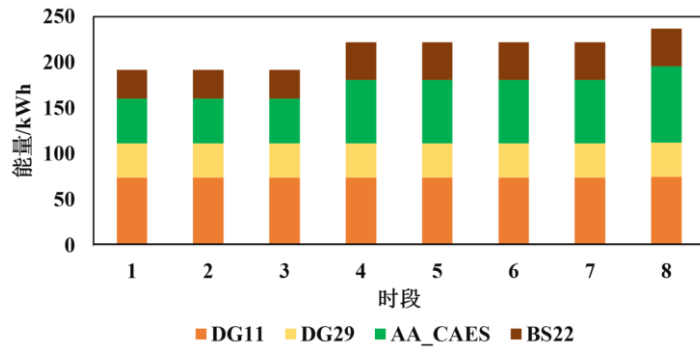


图 A2 第一阶段确定各电源能量分配
Fig.A2 Energy distribution determined in first stage

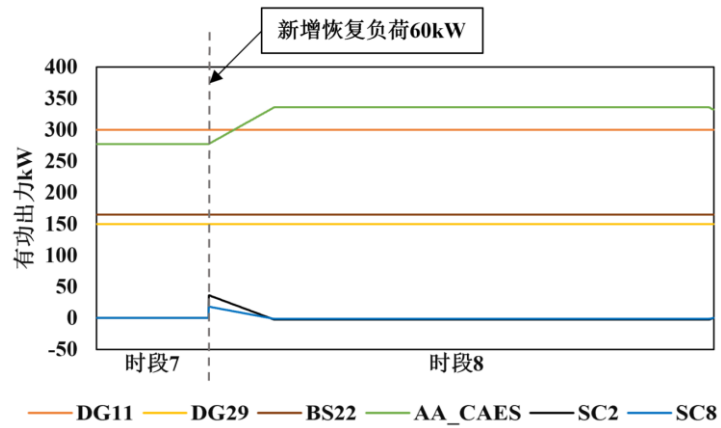


图 A3 第二阶段确定的各电源修正功率
Fig.A3 Planned power determined in second stage