

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.001

分布式弹性配电网异构分区动态协同方法

蒋玮¹, 江宇¹, 林加顺¹, 邓一帆¹, 袁晓冬², 张宸宇²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:近年来,极端自然灾害与潜在地缘冲突严重威胁配电网的稳定可靠运行。传统动态恢复区(dynamic recovery area, DRA)忽视了海量跟网型资源的恢复潜力,也未明晰多逆变器协同运行的多动作阶段,为此,文中提出一种异构 DRA 分区动态协同运行框架。首先,定义构网支撑型、跟网补充型和构跟混合型 DRA,并提出包含分区建立、形态切换与并网同步的故障恢复多关键动作阶段。然后,根据各阶段的运行需求,设计分布式变流器与智能软开关的动态协同控制方法,在二次控制中引入电压/频率无差恢复及功率均分变量以实现区内稳定运行,引入智能开关(smart switch, SSW)及并网开关无缝动作变量以实现跨区间平稳交互。最后,在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型,验证所提框架与所设计控制器的可行性和有效性。结果表明,所提方法可实现 DRA 电压频率建立及内部资源功率均分,灵活响应 SSW 与并网开关的动作指令,充分挖掘异构资源协同恢复潜力,增强配电网运行弹性。

关键词:动态恢复区(DRA);跟网型资源;多关键动作阶段;分布式变流器;智能软开关;动态协同控制

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)04-0002-12

0 引言

近年来,自然灾害与地缘冲突等极端事件频发,严重威胁配电网的安全可靠运行^[1-3]。主动孤岛恢复技术作为故障场景下配电网恢复的技术手段之一,被证实能够有效提升配电网弹性^[4-8]。该技术利用智能开关(smart switch, SSW)因地制宜地形成多个孤岛区域,在区域内就近调用分布式电源(distributed generation, DG)实现配电网供电的快速恢复^[9-11]。

目前,已有相关文献针对主动孤岛恢复技术展开研究。文献[12-13]中多个独立的孤岛分区运行在预先定义的电边界中,并配合内部 DG 恢复失电负荷,形成多个静态恢复区。文献[14-15]针对静态恢复结构中不同分区仅在静态公共耦合点上通过固定线路进行功率交换的局限性,提出了动态电边界的概念。动态电边界是指灾后所划分的多个孤岛分区独立运行在具有明确意义的电边界中,边界可以根据重构指令灵活变化,从而形成可伸缩、可扩展的动态恢复区(dynamic recovery area, DRA),以实时响应所制定的配电网最优分区方案;文献[16]在分布式二次控制中增加边界调节变量以实现动态电边界的无缝切换,从而确保 DRA 在合并与分隔的过程中能够稳定运行;文献[17-18]在动态电边界的控制中考虑了通信延迟和通信网络拓扑

变化的影响。

然而,上述研究方法均基于以 SSW 为主导的硬连接 DRA 结构,并未考虑以智能软开关(soft open point, SOP)为代表的新型柔性互联设备接入形成的柔性连接 DRA 结构。SSW 仅可实现 0-1 控制,自身无法对流过功率以及连接点的电压进行调节;而 SOP 可以对输出的有功和无功功率进行连续快速控制,且某一端口可作为构网型资源(grid-forming source, GFMS)与互联分区的 DG 协同运行,参与故障恢复^[19-23],避免了硬连接 DRA 结构中对 SSW 状态的调节。SOP 参与 DRA 运行的协同控制机制尚未在现有研究中得到充分讨论。此外, SOP 的出现也为区域内跟网型资源(grid-following source, GFLS)在故障后快速启动参与配电网恢复过程提供了可能。现有的 DRA 研究中多以 GFMS 为主,仅将 GFLS 当作不可调节的负荷^[24],而根据标准 IEEE 1547^[25]和夏威夷电力公司的研究^[26], GFLS 参与配电网的电压/频率调节可以提供一定的效益,增强配电网弹性。配电网故障恢复过程中 GFLS 与 GFMS 的协同恢复潜力有待挖掘。

针对故障后配电网的 SOP 与 DG 的协同控制机制,文献[27]提出了可即插即用的 GFLS 与 GFMS 协同控制方案,实现了静态恢复区下不同类型恢复资源的协同运行;文献[28-29]提出了集中-分布式混合的分层分布式协同控制架构,实时计算调整 SOP 传输功率,实现了全局有功均分;文献[30]针对偏远和敏感的负荷在多孤岛分区运行场

收稿日期:2025-01-04;修回日期:2025-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52277172)

景下电压水平下降的问题,提出了一种包含选定负荷运行状态的分布式控制策略;文献[31]以分布式能源高度集成化所形成的直流微电网集群系统为研究对象,设计了一种基于分散集群的分布式二次控制策略,实现了集群电压恢复和功率均分,但上述文献仅考虑了恢复过程中单个动作阶段控制的有效性。文献[32]指出由于恢复目标差异性与拓扑变化等因素,配电网灾后恢复应是一个多阶段的动作过程,但现有研究缺乏从多逆变器的协同动作角度明晰故障恢复多阶段的动作过程与相应的协同控制目标。

针对上述问题,文中创新性地提出面向配电网灾后恢复的异构 DRA 动态协同运行框架。首先根据 GFLS、GFMS 以及 SOP 的空间分布对区域进行异构定义,进而提出面向异构 DRA 的故障恢复多关键动作阶段,并设计对应阶段的多类型资源协同控制器,从而挖掘多类型资源在配电网故障下的协同恢复潜力。最后通过算例仿真验证所提动态协同运行框架下多类型资源协同控制器的有效性和可行性。

1 异构 DRA 动态协同运行框架

1.1 异构 DRA 的分类

为充分挖掘区域内多类型资源的协同恢复潜力,文中提出图 1 所示异构 DRA 概念,根据网架结构和 DG 配置对不同区域进行差异化分类,具体如下。

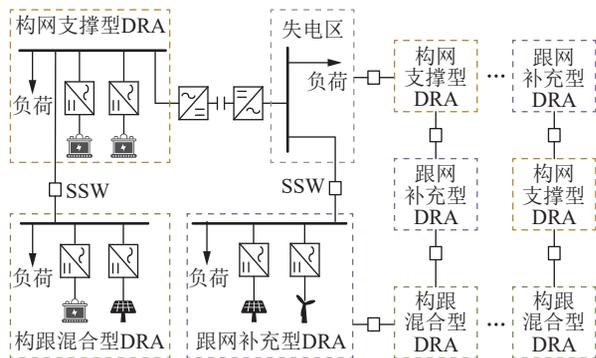


图 1 异构 DRA 示意

Fig.1 Schematic diagram of heterogeneous DRA

(1) 构网支撑型 DRA: 区域内仅存在 GFMS,可黑启动恢复负荷,支撑电网电压频率。

(2) 跟网补充型 DRA: 区域内仅存在 GFLS,需要通过 SOP 与具有 GFMS 的分区连接,从而传输功率带动 GFLS 启动。

(3) 构跟混合型 DRA: 区域内同时存在 GFMS 与 GFLS,其中 GFMS 黑启动,恢复负荷的同时带

动 GFLS 启动。

(4) 失电区: 区域内不存在 DG 或仅存在 GFLS,不具备黑启动恢复负荷的能力,可当作不可调度的负荷。

在异构 DRA 分区中,GFMS 具备自主建立并维持电网电压频率的能力,是孤岛分区黑启动与电边界动态变化的核心资源,其典型种类为储能系统。GFLS 依赖于孤岛运行时 GFMS 建立的运行电压和频率参数,通常作为功率跟随单元运行,其典型种类为光伏发电系统和风力发电系统。

上述异构 DRA 分区中,跟网补充型 DRA 通过 SOP 与具有 GFMS 的 DRA 连接,可通过调节传输功率实现动态软伸缩;其余 DRA 间通过 SSW 连接,利用 SSW 的 0-1 动作实现动态硬伸缩。

1.2 异构 DRA 下的故障恢复关键动作阶段

在一个完全失电的配电系统自下而上的恢复过程中,系统会被划分成多个孤岛区域,这些区域通过内部 DG 实现自主恢复。在恢复过程中,孤岛会根据重构指令动态调整,实现灵活的资源调度和负荷恢复^[33-34]。最终,随着多个孤岛同步运行,配电网需要与大电网实现无缝对接。因此,文中基于动态电边界的运行理念,从多逆变器的协同动作角度提出了灾后配电网故障恢复的 3 个关键动作阶段,如图 2 所示,包括混合 DRA 电压频率建立、动态 DRA 形态切换和并网同步,从而预定义配电网故障恢复过程中多逆变器的一系列关键协同步骤,确保恢复过程平稳进行。

(1) 混合 DRA 电压频率建立: 构网支撑型 DRA 可在故障后快速恢复失电负荷,并通过 SOP 互济连接区域。跟网补充型 DRA 通过 SOP 传输功率带动内部的 GFLS 启动,从而恢复负荷。构跟混合型 DRA 内的 GFMS 同样在故障后迅速黑启动,并带动区域内 GFLS 启动,协同恢复负荷。

(2) 动态 DRA 形态切换: 在不同属性的分区建立稳定电压频率后,根据下发的 SSW 动作指令实现分区的合并或隔离。该阶段中系统最优拓扑与 SSW 动作序列的优化求解已得到广泛讨论。文献[35]建立了考虑分区可靠性约束的动态分区备用优化模型,文献[36]提出了一种考虑恢复顺序的多区域-多阶段动态恢复区域规划与运行协同方法,均可通过现有技术优化求解。在动态边界调整过程中,SSW 的开关必须满足特定条件,以确保过渡的平滑性和运行的稳定性。异构 DRA 内的恢复资源协同调节 SSW 状态,以充分发挥内部资源调节能力,这也是文中所提控制策略的关键。

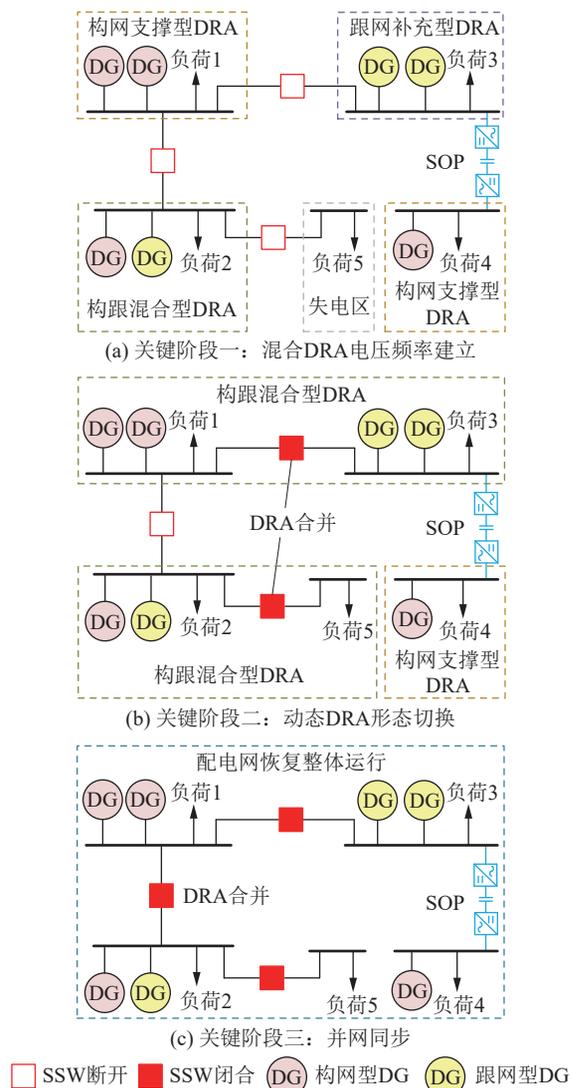


图2 配电网故障恢复关键动作阶段示意

Fig.2 Schematic diagram of distribution network fault recovery key action stage

(3) 并网同步: 在配电网恢复供电后, 需要与大电网重新无缝连接, 网内的恢复资源协同作用, 以调节配电网与大电网同步运行。一旦并网开关满足条件闭合后, 网内的恢复资源将切换到并网模式, 系统恢复正常运行。

配电网的总体故障恢复过程涵盖上述3个关键动作阶段, 各关键动作阶段在恢复过程中是依次推进的。关键阶段一中各DRA通过内部恢复资源实现自愈, 在关键阶段二中各自愈后的DRA依据重构指令进行动态调整, 最后在关键阶段三中完整恢复的配电网无缝与大电网连接, 重新进入并网运行状态。

2 面向异构DRA关键动作阶段的多类型资源区内与跨区协同控制

在所提出的灾后配电网故障恢复的3个关键

动作阶段中, 混合DRA电压频率建立阶段的目标是保证区域内稳定运行, 动态DRA形态切换与并网同步的目标是保证区域内稳定运行以及跨区间平稳交互, 因此在故障恢复过程中多类型资源的协同控制目标包括区域内稳定运行和跨区间平稳交互, 如图3所示。通过设计不同关键阶段对应的二次控制变量实现不同的控制目标, 详细内容如下。

2.1 异构DRA多类型资源整体控制策略设计

GFMS具备自主支撑电网电压频率的能力, 孤岛下采用下垂控制^[37]组网, 并附加分布式二次控制, 设计如下:

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_i^{\text{ref}} - m_i P_i + \Delta u_i \\ V_i = V_i^{\text{ref}} - n_i Q_i + \Delta v_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_i 、 ω_i^{ref} 和 V_i 、 V_i^{ref} 分别为第 i 个 DG 的运行频率实际值、参考值和电压实际值、参考值; m_i 、 n_i 分别为第 i 个 DG 的有功-频率和无功-电压下垂系数; P_i 、 Q_i 分别为第 i 个 DG 输出的有功和无功功率; Δu_i 、 Δv_i 为第 i 个 GFMS 的总二次控制变量。

GFLS采用传统PQ控制难以及时响应GFMS输出功率变化与不同阶段的控制目标, 为最大化其调节能力, 实现与GFMS的协同运行, 采用倒下垂控制^[38]使GFLS表现出功率下垂特性, 并附加分布式二次控制响应阶段目标, 设计如下:

$$\begin{cases} P_i = w_i(\omega_i^{\text{ref}} - \omega_i) + \Delta p_i \\ Q_i = h_i(V_i^{\text{ref}} - V_i) + \Delta q_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: w_i 、 h_i 分别为第 i 个 DG 的频率-有功和电压-无功倒下垂系数; Δp_i 、 Δq_i 为第 i 个 GFLS 的总二次控制变量。

由于GFMS与GFLS均属于恢复过程中的可控DG, 为方便表述, 统一用字母 i 表示。

SOP一端接入构网支撑型DRA, 采用 $U_{dc}Q$ 控制^[39]以维持直流电容电压稳定。

SOP另一端负责充当GFMS参与负荷恢复, 采用下垂控制与分布式二次控制, 设计如下:

$$\begin{cases} \omega_{\text{sop}} = \omega_{\text{sop}}^{\text{ref}} - m_{\text{sop}} P_{\text{sop}} + \Delta u_{\text{sop}} \\ V_{\text{sop}} = V_{\text{sop}}^{\text{ref}} - n_{\text{sop}} Q_{\text{sop}} + \Delta v_{\text{sop}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω_{sop} 、 $\omega_{\text{sop}}^{\text{ref}}$ 和 V_{sop} 、 $V_{\text{sop}}^{\text{ref}}$ 分别为充当GFMS的SOP端口运行频率实际值、参考值和电压实际值、参考值; m_{sop} 、 n_{sop} 分别为该端口的有功-频率和无功-电压下垂系数; P_{sop} 、 Q_{sop} 分别为该端口输出的有功和无功功率; Δu_{sop} 、 Δv_{sop} 为该端口的总二次控制变量。

根据所提多动作阶段的不同控制目标, 分别设计GFMS、GFLS、SOP在不同阶段下的二次控制变量:

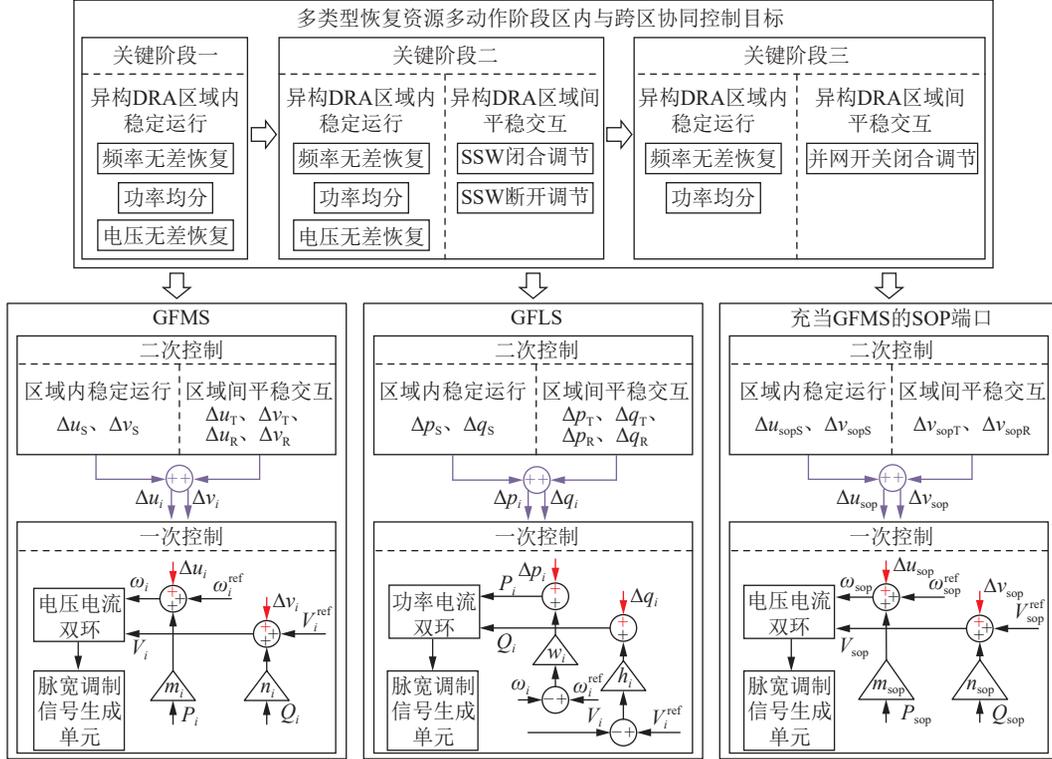


图3 多异构 DRA 协同控制

Fig.3 Multi-heterogeneous DRA collaborative control

$$\begin{cases} \Delta \dot{u}_i = -\Delta u_S - \Delta u_T - \Delta u_R \\ \Delta \dot{v}_i = -\Delta v_S - \Delta v_T - \Delta v_R \\ \Delta \dot{p}_i = -\Delta p_S - \Delta p_T - \Delta p_R \\ \Delta \dot{q}_i = -\Delta q_S - \Delta q_T - \Delta q_R \\ \Delta \dot{u}_{sop} = -\Delta u_{sopS} \\ \Delta \dot{v}_{sop} = -\Delta v_{sopS} - \Delta v_{sopT} - \Delta v_{sopR} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta \dot{u}_i$ 、 $\Delta \dot{v}_i$ 、 $\Delta \dot{p}_i$ 、 $\Delta \dot{q}_i$ 、 $\Delta \dot{u}_{sop}$ 、 $\Delta \dot{v}_{sop}$ 分别为 Δu_i 、 Δv_i 、 Δp_i 、 Δq_i 、 Δu_{sop} 、 Δv_{sop} 在经过比例积分环节前的变量; Δu_S 、 Δv_S 和 Δp_S 、 Δq_S 以及 Δu_{sopS} 、 Δv_{sopS} 分别为 GFMS、GFLS、SOP 针对区域内稳定运行的二次控制变量; Δu_T 、 Δv_T 和 Δp_T 、 Δq_T 以及 Δv_{sopT} 分别为 GFMS、GFLS、SOP 针对 SSW 调节的二次控制变量; Δu_R 、 Δv_R 和 Δp_R 、 Δq_R 以及 Δv_{sopR} 分别为 GFMS、GFLS、SOP 针对并网开关调节的二次控制变量。

2.2 异构 DRA 区域内稳定运行下的协同控制器设计

异构 DRA 区域内稳定运行的协同控制目标具体可分解为电压/频率无差恢复和功率均分。 Δu_S 和 Δv_S 设计如下:

$$\begin{cases} \Delta u_S = c_f \Delta \omega_i + c_p \sum_j a_{ij} \Delta P'_{ij} \\ \Delta v_S = \alpha_i c_v \Delta V_i + c_q \sum_j a_{ij} \Delta Q'_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta \omega_i = \omega_i - \omega_i^{\text{ref}}$ 、 $\Delta V_i = V_i - V_i^{\text{ref}}$ 分别为第 i 个 DG 运行频率、电压与参考值的偏差; a_{ij} 表示第 i 个 DG

与第 j 个 DG 之间是否存在通信链路, 若存在则值为 1, 反之为 0; $\Delta P'_{ij} = P'_i - P'_j$ 、 $\Delta Q'_{ij} = Q'_i - Q'_j$ 分别为第 i 个 DG 和第 j 个 DG 输出单位有功和无功功率偏差, 其中 $P'_i = P_i / E_i^{\text{rate}}$ 、 $Q'_i = Q_i / E_i^{\text{rate}}$, E_i^{rate} 为第 i 个 DG 的额定容量; α_i 表示第 i 个 DG 是否启用电压调节; c_f 、 c_p 、 c_v 、 c_q 分别为 Δu_S 和 Δv_S 中所设计各调节变量 $\Delta \omega_i$ 、 $\Delta P'_{ij}$ 、 ΔV_i 、 $\Delta Q'_{ij}$ 对应的增益。

相较于有功和无功功率偏差, 单位功率偏差添加到二次控制中可以实现 DG 输出功率按容量均分, 避免了一次控制权重系数的复杂设计环节。

Δp_S 和 Δq_S 设计如下:

$$\begin{cases} \Delta p_S = c_{fg} E_i^{\text{rate}} \Delta \omega_i + c_{pg} \sum_j a_{ij} \Delta P_{ij} \\ \Delta q_S = \alpha_i c_{vg} E_i^{\text{rate}} \Delta V_i + c_{qg} \sum_j a_{ij} \Delta Q_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta P_{ij} = P_i - P_j$ 、 $\Delta Q_{ij} = Q_i - Q_j$ 分别为第 i 个 DG 和第 j 个 DG 输出有功和无功功率偏差; c_{fg} 、 c_{pg} 、 c_{vg} 、 c_{qg} 分别为 Δp_S 和 Δq_S 中所设计各调节变量 $\Delta \omega_i$ 、 ΔP_{ij} 、 ΔV_i 、 ΔQ_{ij} 对应的增益。

Δu_{sopS} 和 Δv_{sopS} 设计如下:

$$\begin{cases} \Delta u_{sopS} = c_f \Delta \omega_{sop} \\ \Delta v_{sopS} = \sigma c_v \Delta V_{sop} + c_q \sum_j a_{ij} \Delta Q'_{sop,j} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\Delta \omega_{sop} = \omega_{sop} - \omega_{sop}^{\text{ref}}$ 、 $\Delta V_{sop} = V_{sop} - V_{sop}^{\text{ref}}$ 分别为充当 GFMS 的 SOP 端口运行频率、电压与参考值

的偏差; $\Delta Q'_{sop,j} = Q'_{sop} - Q'_j$ 为该端口与跟网补充型 DRA 内第 j 个 DG 输出单位无功功率偏差; σ 表示充当 GFMS 的 SOP 端口是否启用电压调节。

2.3 异构 DRA 跨区间平稳交互下的协同控制器设计

异构 DRA 跨区间交互实质是对 SSW 与并网开关状态的调节。SSW 闭合需要满足两端电压幅值和相位差接近于 0, 并网开关闭合同理; SSW 断开需要满足流过的有功和无功功率接近于 0。

Δu_T 和 Δv_T 设计如下:

$$\begin{cases} \Delta u_T = c_t \beta_i \Delta \theta_{SSW,k} + c_{sp} \gamma_i \Delta P'_{SSW,k} \\ \Delta v_T = c_o \beta_i \Delta V_{SSW,k} + c_{sq} \gamma_i \Delta Q'_{SSW,k} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta \theta_{SSW,k}$ 、 $\Delta V_{SSW,k}$ 分别为第 k 个 SSW 两端电压相位和幅值偏差; $\Delta P'_{SSW,k}$ 、 $\Delta Q'_{SSW,k}$ 分别为第 k 个 SSW 上流过的单位有功和无功功率; β_i 、 γ_i 分别表示第 i 个 DG 是否需要参与调节 SSW 状态以满足闭合或断开条件, 当要求 SSW 由断开转为闭合时, $\beta_i = 1$ 、 $\gamma_i = 0$, 当要求 SSW 由闭合转为断开时, $\beta_i = 0$ 、 $\gamma_i = 1$, 当 SSW 不动作时, $\beta_i = 0$ 、 $\gamma_i = 0$; c_t 、 c_{sp} 、 c_o 、 c_{sq} 分别为 Δu_T 和 Δv_T 中所设计各调节变量 $\Delta \theta_{SSW,k}$ 、 $\Delta P'_{SSW,k}$ 、 $\Delta V_{SSW,k}$ 、 $\Delta Q'_{SSW,k}$ 对应的增益。

Δp_T 和 Δq_T 设计如下:

$$\begin{cases} \Delta p_T = c_{tg} \beta_i \Delta \theta_{SSW,k} + c_{spg} \gamma_i \Delta P'_{SSW,k} \\ \Delta q_T = c_{og} \beta_i \Delta V_{SSW,k} + c_{sqg} \gamma_i \Delta Q'_{SSW,k} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta P'_{SSW,k}$ 、 $\Delta Q'_{SSW,k}$ 分别为第 k 个 SSW 上流过的有功和无功功率; c_{tg} 、 c_{spg} 、 c_{og} 、 c_{sqg} 分别为 Δp_T 和 Δq_T 中所设计各调节变量 $\Delta \theta_{SSW,k}$ 、 $\Delta P'_{SSW,k}$ 、 $\Delta V_{SSW,k}$ 、 $\Delta Q'_{SSW,k}$ 对应的增益。

Δv_{sopT} 设计如下:

$$\Delta v_{sopT} = c_o \eta \Delta V_{SSW,k} + c_{sq} \mu \Delta Q'_{SSW,k} \quad (10)$$

式中: η 、 μ 分别表示充当 GFMS 的 SOP 端口是否需要参与调节 SSW 闭合和 SSW 断开, 若需要则值为 1, 否则为 0。SOP 充当 GFMS 运行的端口, 在二次控制中采用与 GFMS 一样的调节变量增益。

Δu_R 和 Δv_R 设计如下:

$$\begin{cases} \Delta u_R = c_o \lambda_i \Delta \theta_C \\ \Delta v_R = c_z \lambda_i \Delta V_C \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\Delta \theta_C$ 、 ΔV_C 分别为并网开关两端的电压相位和幅值偏差; λ_i 表示第 i 个 DG 是否需要参与调节并网开关状态以满足闭合条件, 当下发并网指令时, $\lambda_i = 1$, 否则 $\lambda_i = 0$; c_o 、 c_z 分别为 Δu_R 和 Δv_R 中所设计各调节变量 $\Delta \theta_C$ 、 ΔV_C 对应的增益。

Δp_R 和 Δq_R 设计如下:

$$\begin{cases} \Delta p_R = c_{og} \lambda_i \Delta \theta_C \\ \Delta q_R = c_{zg} \lambda_i \Delta V_C \end{cases} \quad (12)$$

式中: c_{og} 、 c_{zg} 分别为 Δp_R 和 Δq_R 中所设计各调节变量 $\Delta \theta_C$ 、 ΔV_C 对应的增益。

Δv_{sopR} 设计如下:

$$\Delta v_{sopR} = c_z \delta \Delta V_C \quad (13)$$

式中: δ 表示充当 GFMS 的 SOP 端口是否需要参与调节并网开关闭合, 若需要则值为 1, 否则为 0, 式 (7) 中的 $\sigma = 1 - \eta - \mu - \delta$ 。

考虑到各 DG 之间存在必要的通信链路, 采用领导者-跟随者共识 (leader-follower consensus, LFC) 方法传输调度指令, 即可通过分区内 DG 之间的相互通信实现调度指令的传输, 而不需要系统调度人员一一进行传输。第 j 个 DG 的调度指令如下:

$$\begin{cases} \beta_j = \int (\beta_i - \beta_j) dt \\ \gamma_j = \int (\gamma_i - \gamma_j) dt \\ \lambda_j = \int (\lambda_i - \lambda_j) dt \\ \alpha_j = 1 - \beta_j - \gamma_j - \lambda_j \end{cases} \quad (14)$$

值得注意的是, 文中假设将各 DG 之间的通信链路构成无向连通图, 即任意两个 DG 节点间存在双向通信路径, 通信网络整体连通无孤立节点; 并且为支持动态电边界调节过程即配电网重构的稳定进行, 假设通信链路具备拓扑跟随能力, 即 DG 间的通信链路可跟随 DRA 的合并或分隔而理想连接与断开。文献 [18] 针对物理-通信网络的双向重构过程进行了研究与实验验证, 证明了上述假设的合理性。

3 案例分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建图 4 所示的仿真模型, 对每一阶段控制指令的响应进行仿真验证。DG₁、DG₂、DG₃、DG₅ 为构网型电源, DG₄、DG₆ 为跟网型电源; 连接 DG₅ 的 SOP 端口用于维持直流电压稳定, 记为 SOP₁, 另一个端口作为 GFMS 参与负荷恢复, 记为 SOP₂; DRA₁ 与 DRA₄ 为构网支撑型 DRA, DRA₂ 为构跟混合型 DRA, DRA₃ 为跟网补充型 DRA; SSW₁ 为 DRA₁ 与 DRA₂ 之间互联的智能开关, SSW₁₁、SSW₁₂ 分别为 SSW₁ 接入 DRA₁ 侧与接入 DRA₂ 侧的测量点; SSW₂ 为 DRA₂ 与 DRA₄ 之间互联的智能开关, SSW₂₁、SSW₂₂ 分别为 SSW₂ 接入 DRA₂ 侧与接入 DRA₄ 侧的测量点。额定参数如表 1 所示, DG 参数如表 2 所示, 负荷参数如表 3 所示, 调节变量增益如表 4 所示。

3.1 动态 DRA 形态切换

为验证动态电边界闭合控制策略的可行性, 分别针对 SSW₁ 和 SSW₂ 闭合的场景进行仿真。

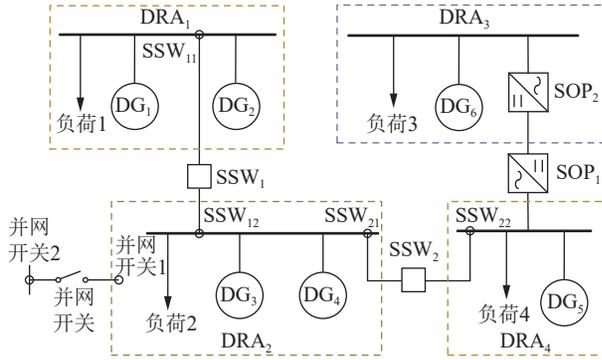


图4 算例拓扑

Fig.4 Case topology

表1 额定参数

Table 1 Rated parameters

额定参数	数值
DG额定直流侧电压/V	700
DG额定交流侧电压/V	380
额定频率/Hz	50
DG ₁ 、DG ₂ 、DG ₃ 额定容量/(kV·A)	150
DG ₄ 、DG ₅ 、DG ₆ 额定容量/(kV·A)	100

表2 DG参数

Table 2 DG parameters

DG参数	DG ₁ 、DG ₂ 、DG ₃	DG ₅	DG ₄ 、DG ₆
逆变器侧电感/mH	1.0	1.5	1.5
逆变器侧电阻/ Ω	0.10	0.15	0.15
滤波电容/mF	0.038	0.038	0.038
并网侧电感/mH	0.10	0.15	0.15
并网侧电阻/ Ω	0.050	0.075	0.075
电压外环比例、积分参数	0.2173、452.09	0.2173、452.09	—
电流内环比例、积分参数	15.708、1570.8	15.708、1570.8	15.708、1570.8
有功下垂系数	1.57×10^{-5}	2.36×10^{-5}	—
无功下垂系数	7.78×10^{-4}	1.17×10^{-3}	—
有功倒下垂系数	—	—	$1/(2.36 \times 10^{-5})$
无功倒下垂系数	—	—	$1/(1.17 \times 10^{-3})$

表3 负荷参数

Table 3 Load parameters

负荷	有功负荷/kW	无功负荷/kvar
负荷1	80	30
负荷2	60	20
负荷3	50	10
负荷4	31	15

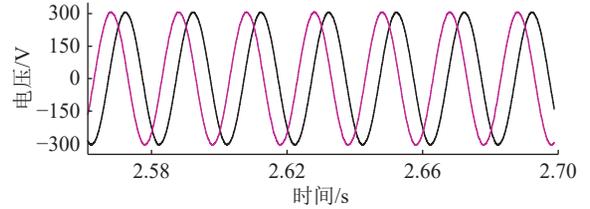
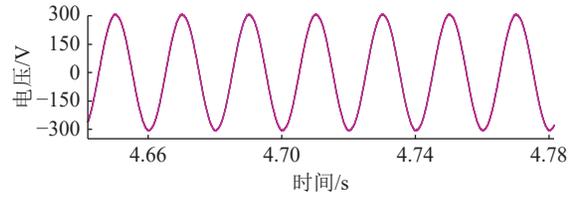
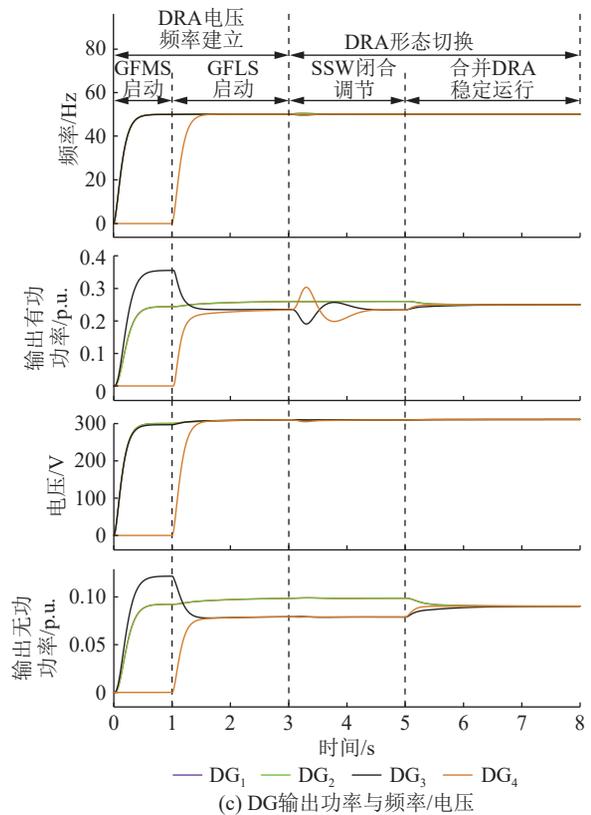
SSW₁ 闭合指令响应如图5所示。

0 s—3 s 时段为混合 DRA 电压频率建立阶段, DRA₁ 内的 GFMS 黑启动, 同时 DRA₂ 内的 GFMS

表4 调节变量增益

Table 4 Adjust variable gain

调节变量增益	数值
c_f 、 c_p 、 c_v 、 c_q	0.9、0.7、0.5、15.5
c_{fg} 、 c_{pg} 、 c_{vg} 、 c_{qg}	0.005、3.5、0.001、13
c_t 、 c_{sp} 、 c_o 、 c_{sq}	0.08、10.4、0.16、12.5
c_{fg} 、 c_{spg} 、 c_{og} 、 c_{sqg}	1.2、6.2、1.8、8.4
c_θ 、 c_z 、 $c_{\theta g}$ 、 c_{zg}	0.06、0.12、1.2、1.6

(a) 调节前SSW₁两端电压(b) 调节后SSW₁两端电压

(c) DG输出功率与频率/电压

图5 SSW₁ 闭合指令响应Fig.5 SSW₁ closure command response

黑启动带动内部的 GFLS 在 1 s 时启动。由图5(c)可看出, DRA₁ 与 DRA₂ 的运行频率和电压均恢复

到额定值, DG 输出实现有功与无功功率均分。3 s 时下发 SSW₁ 闭合指令, 由图 5(a) 可知, 2 个 DRA 的电压均恢复到参考值, SSW₁ 两端的电压幅值几乎不存在偏差, 但是两端的电压相位存在较大偏差, 不满足闭合条件。在 3 s—5 s 时段, 启用 SSW₁ 闭合对应的二次控制变量, 可以观察到其两端电压逐渐趋于一致; 跟网型 DG 不具备自主支撑电网频率的能力, 依赖于对输出电压相位的测量, 因此在调节过程中输出功率会产生一定波动, 但并不影响系统稳定运行。在 5 s—8 s 时段, SSW₁ 闭合, DRA 合并, 合并后区域的频率和电压均运行于额定值, 内部的 DG 实现有功与无功功率均分, SSW₁ 闭合指令成功响应。

SSW₂ 闭合指令响应如图 6 所示。

0 s—4.5 s 时段为混合 DRA 电压频率建立阶段, DRA₂ 内的 GFMS 黑启动并带动内部的 GFLS 在 1.5 s 时启动; DRA₄ 内的 GFMS 黑启动, 通过 SOP 传输功率带动 DRA₃ 内的 GFLS 启动, DRA₂、DRA₃、DRA₄ 的运行频率和电压均恢复到额定值, 内部的 DG 实现有功均分。由于 SOP 无法传输无功功率, DRA₂ 内的 DG 实现无功均分, DRA₃ 内的 DG 与 SOP 充当 GFMS 的端口实现无功均分。类似于 SSW₁ 闭合情况, 由图 6(a) 同样可以观察到 SSW₂ 两端的电压相位存在一定偏差, 无法第一时间响应闭合指令。在 4.5 s—7 s 时段启用 SSW₂ 闭合对应的二次控制变量后, SSW₂ 两端电压在互连的 DRA 内部 DG 调节下逐渐趋于一致。由图 6(c) 可以看出, 在 7 s—10 s 时段, SSW₂ 闭合后, 互连的两个区域合并, 频率和电压维持在额定值, DG 输出的有功和无功功率达到新的均分值, SOP 传输的有功功率也发生相应变化。由于 SOP 两端无功功率可调, 其作为 GFMS 的端口与并联的 GFLS 输出的无功功率没有变化。

为验证动态电边界断开控制策略的可行性, 分别针对 SSW₁ 和 SSW₂ 断开的场景进行仿真。

SSW₁ 断开指令响应如图 7 所示。从图 7(c) 中可以观察到, 0 s—3 s 时段, 在 DRA₁ 与 DRA₂ 合并的区域建立稳定电压频率。由图 7(a) 可知, 3 s 下达断开指令时, SSW₁ 上有较大电流流过, 不满足断开条件; 3 s—5 s 时段, 合并区域内部所有 DG 协同调节开关状态, SSW₁ 上流过的电流趋于 0。在 5 s—8 s 时段, SSW₁ 断开, 独立运行的 DRA₁ 与 DRA₂ 电压和频率均稳定在额定值, 各自内部的 DG 恢复相应 DRA 的失电负荷, 输出的有功和无功功率达到新的均分值, 成功响应了 SSW₁ 的断开指令。

SSW₂ 断开指令响应如图 8 所示。从图 8(c) 中

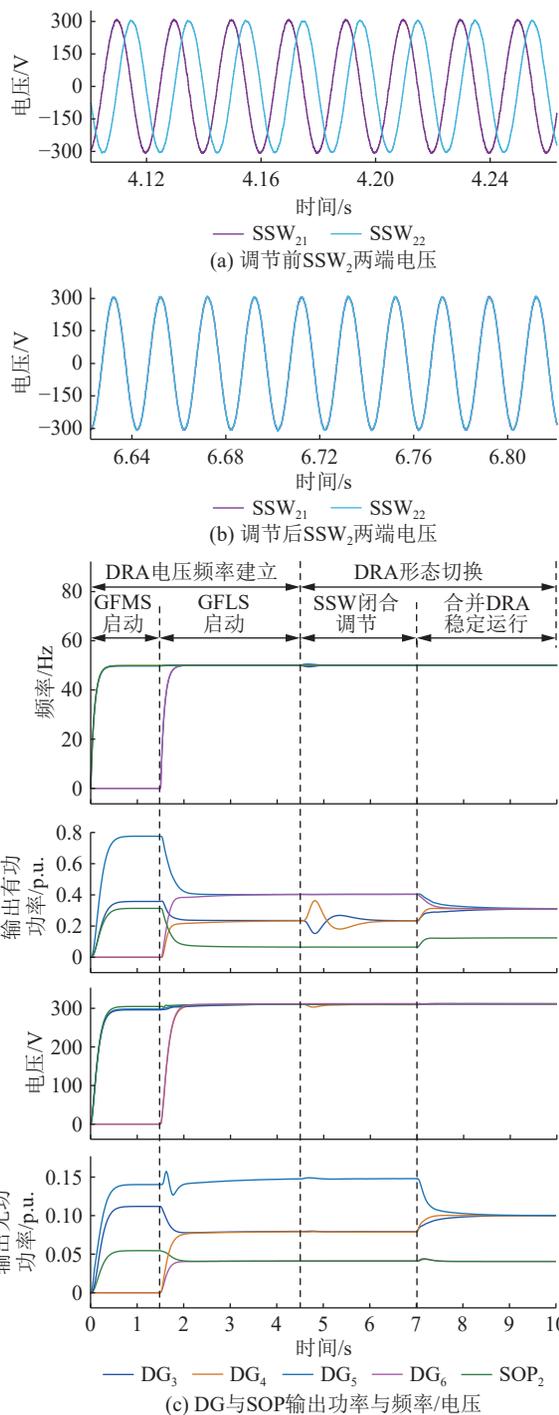


图 6 SSW₂ 闭合指令响应

Fig.6 SSW₂ closure command response

可以观察到, 0 s—4.5 s 时段, 合并组成的构跟混合型 DRA 稳定运行。从图 8(a) 可以观察到, 0 s—4.5 s 时段内 SSW₂ 上流过的电流不为 0 且较大。在 4.5 s—7 s 时段, 合并 DRA 内部所有 DG 协同调节使 SSW₂ 满足断开条件, 其流过的电流逐渐趋于 0。从图 8(c) 可以看出, 在 7 s—10 s 时段, SSW₂ 断开后, DRA₂、DRA₃ 和 DRA₄ 稳定运行, 满足电压和频率无差恢复与功率均分要求, 成功实现 SSW₂ 无缝断开。与 SSW₂ 闭合相似, 在整个过程中, 作为

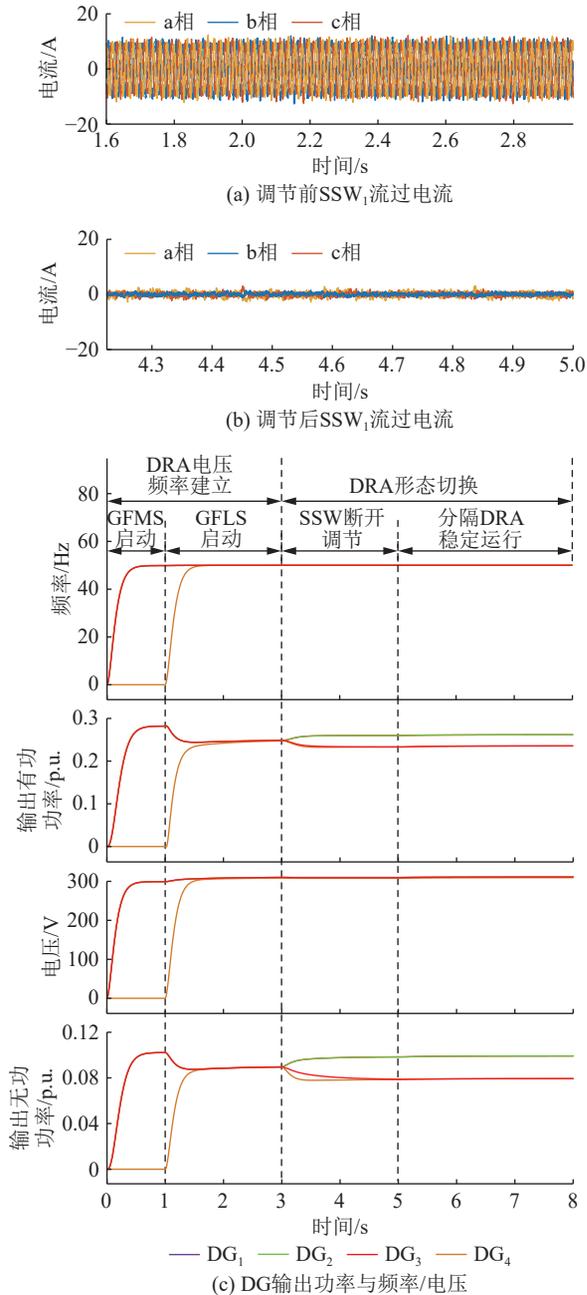


图7 SSW₁ 断开指令响应

Fig.7 SSW₁ open command response

GFMS 的 SOP 端口与并联运行的 GFLS 维持无功均分, SOP 传输功率随合并区域的断开发生相应变化。

SSW 调节前后相应调节量变化如图 9 所示。从图 9 可看出, SSW 动作指令下达后, 该 SSW 互联分区的 DG 协同调节相应的动作量。在闭合指令下达后, SSW₁、SSW₂ 的两端电压幅值和相位差逐渐趋于 0, 如图 9(a)、(b)所示; 在断开指令下达后, SSW₁、SSW₂ 上流过的有功和无功功率逐渐趋于 0, 如图 9(c)、(d)所示, 均可以在调节后满足无缝闭合或断开的条件, 响应系统重构指令。

文中针对 SSW 闭合与断开调节时间的仿真

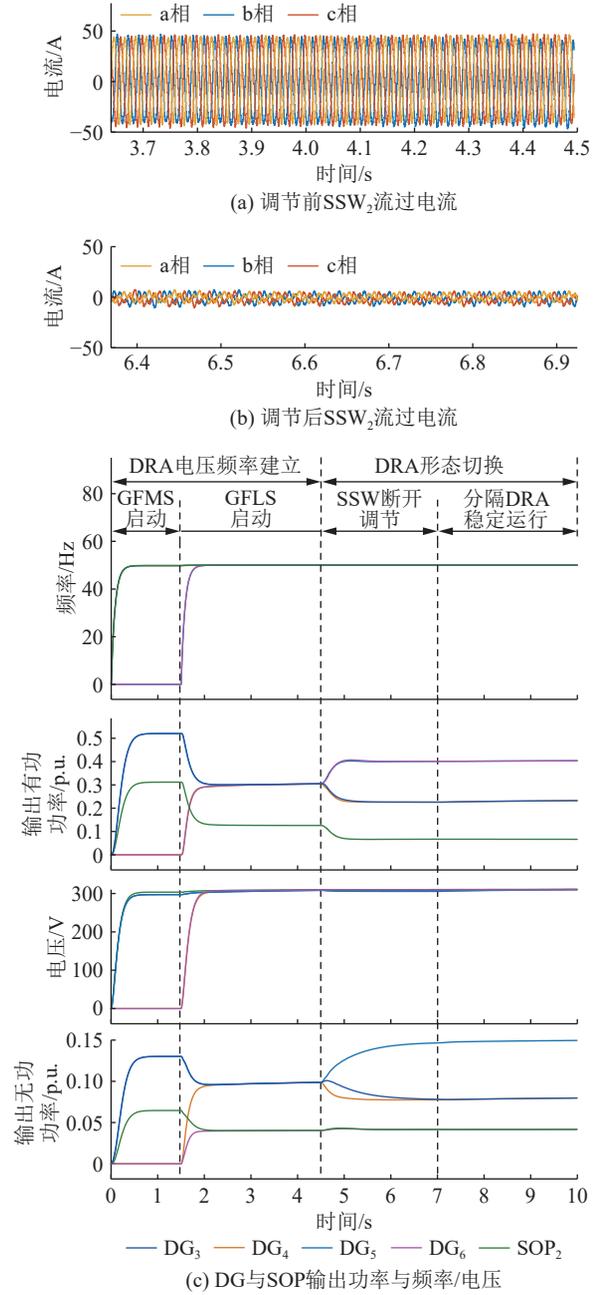


图8 SSW₂ 断开指令响应

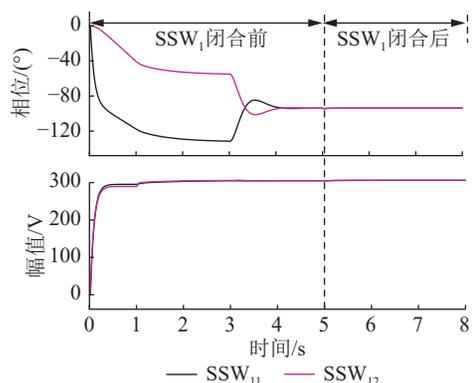
Fig.8 SSW₂ open command response

参照了文献[16-17]与文献[40]的硬件实验和仿真算例中 SSW 闭合与断开所用的调节时间。根据 GB/T 33589—2017, 开关闭合前两端电压幅值差通常不超过额定电压的 5%, 相位差通常在 $\pm 10^\circ$ 以内, 因此文中 SSW₁、SSW₂ 调节后均满足闭合条件。

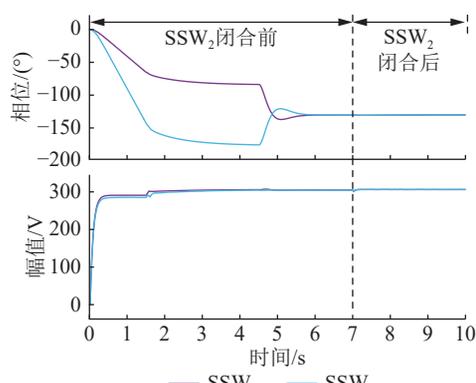
3.2 并网同步

现有研究已对 GFMS 的控制策略进行验证^[41], 因此选取 DRA₂、DRA₃ 与 DRA₄ 组成的混合 DRA 对并网开关调节策略进行仿真验证。

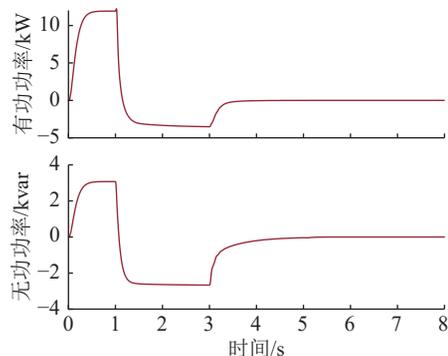
并网开关闭合指令响应如图 10 所示。从图 10(a)中可以观察到, 在 0 s—4.5 s 时段, 故障后



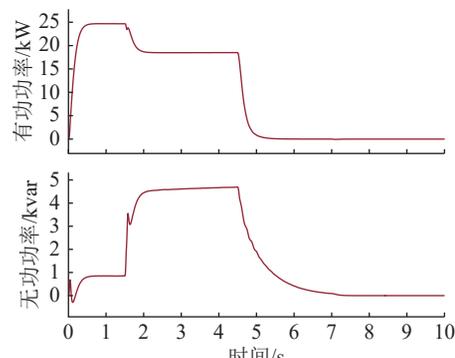
(a) SSW₁ 闭合前后两端电压相位和幅值



(b) SSW₂ 闭合前后两端电压相位和幅值



(c) SSW₁ 断开前后流过有功与无功功率



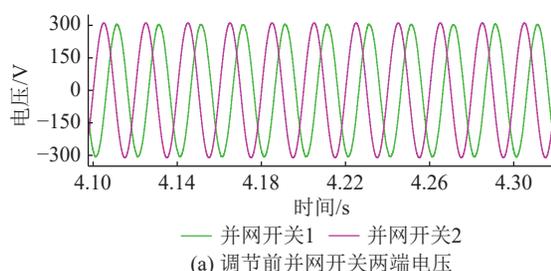
(d) SSW₂ 断开前后流过有功与无功功率

图9 SSW 调节前后相应调节量变化

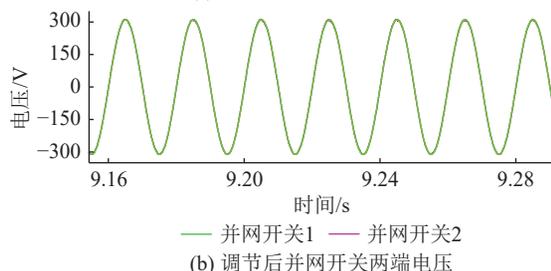
Fig.9 The corresponding adjustment quantity changes before and after the SSW adjustment

的配电网恢复稳定运行后, 并网开关两端的电压幅值由于失电负荷得到恢复, 故差异不大, 但两端的

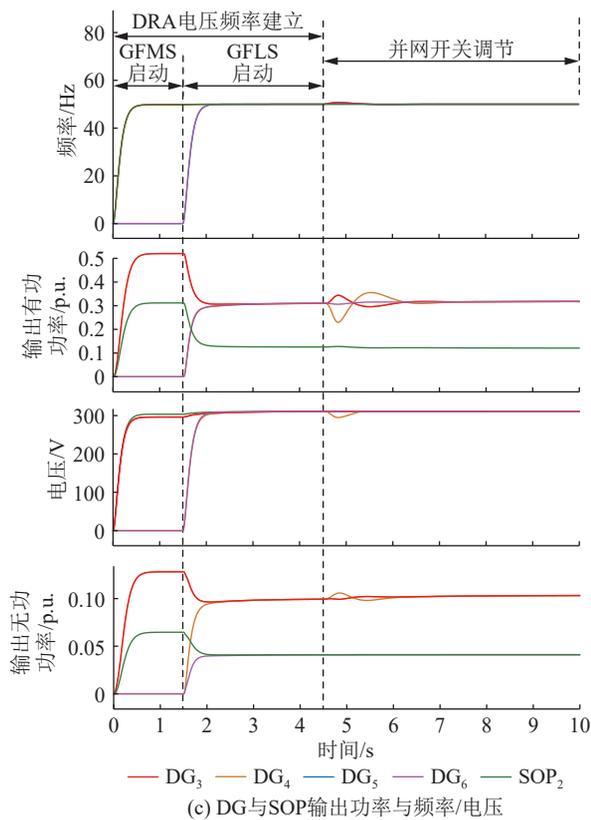
电压相位存在显著差异, 不满足闭合条件。4.5 s 下达并网开关闭合指令后, 整个配电网内的 DG 协同调节并网开关状态以满足闭合条件, 其两端电压逐渐趋于一致, 同时从图 10(c) 可以看出, DG 输出的有功与无功功率保持均分。从图 10(d) 可以看出, 在并网开关闭合指令下达后, 两端的电压幅值和相位差逐渐趋于 0, 成功响应并网同步指令。10 s 时刻检测到并网开关满足闭合条件, 开关闭合, 配电网重新接入大电网, 所有 DG 切换为并网运行模式, 有功和无功功率参考值由新一轮优化决策给出, 该部分内容属于并网稳定运行下的控制, 不在文中讨论范围内。



(a) 调节前并网开关两端电压



(b) 调节后并网开关两端电压



(c) DG 与 SOP 输出功率与频率/电压

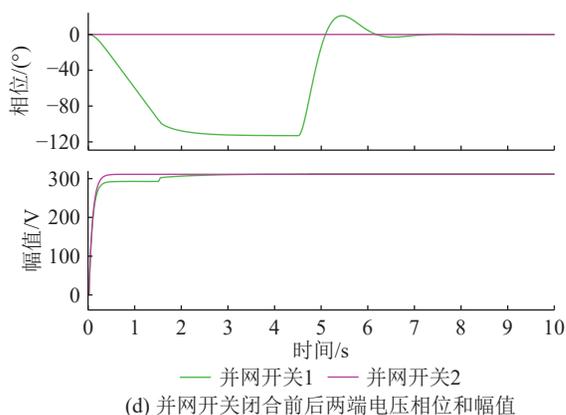


图 10 并网开关闭合指令响应

Fig.10 Grid connection switch closure command response

4 结论

文中提出了一种分布式弹性配电网异构 DRA 动态协同控制方法, 定义故障后配电网内不同属性的 DRA, 提出了故障恢复过程中的多个关键动作阶段, 根据不同阶段的目标设计了多种类型资源的协同控制方法, 实现了离网后完全失电的配电系统自下而上的恢复。具体结论如下:

(1) 文中提出了故障后分布式弹性配电网的异构 DRA 动态协同运行框架, 结合配电网内重要恢复资源的空间分布与控制特性, 定义了故障后的 DRA 属性, 同时考虑分区的必要性以及分区电边界因调度指令变化的可能性, 提出了故障恢复过程中的多个关键动作阶段, 保证恢复过程平稳有序进行, 增强配电网运行弹性。

(2) 文中设计了故障恢复过程中异构 DRA 区域内和跨区间多种类型资源的协同控制方法, 将 GFLS 和 SOP 纳入故障恢复, 通过设计的分布式二次控制器实现区域内多种类型资源的功率均分和电压/频率无差恢复, 以及区域间 SSW 的无缝闭合或断开, 并且仿真验证了控制策略在不同恢复阶段均可以完成相应目标, 维持系统的稳定运行。

文中所提协同控制方法依赖各资源通信实时性和准确性, 但配电网故障后存在通信延时、传输数据加密、信号冗余等问题, 后续可将配电网故障后 DG 通信网络与物理网络的协同配合纳入考虑。

参考文献:

[1] 娄奇鹤, 李彦斌, 赵宇尘, 等. 适应极端事件的配电网弹性规划和投资策略研究综述[J]. 电力建设, 2024, 45(5): 37-47.
LOU Qihe, LI Yanbin, ZHAO Yuchen, et al. A review of research on resilience planning and investment strategies for distribution networks adapted to extreme events[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 37-47.

[2] 吴在军, 徐东亮, 徐俊俊, 等. 信息物理多重攻击下配电网状态估计关键技术评述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 127-138.
WU Zaijun, XU Dongliang, XU Junjun, et al. Review on key technologies for distribution network state estimation under cyber-physical multiple attacks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 127-138.

[3] ALJOHANI T M. Cyberattacks on energy infrastructures as modern war weapons: part I: analysis and motives[J]. IEEE Technology and Society Magazine, 2024, 43(2): 59-69.

[4] 陈春, 万金金, 曹一家, 等. 极端条件下多源配电网主动孤岛研究综述与展望[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 1-11.
CHEN Chun, WAN Jinjin, CAO Yijia, et al. Review and outlook on active islanding of multi-source distribution networks under extreme conditions[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 1-11.

[5] 赵晶晶, 刘帅, 李梓博, 等. 考虑 SMESS 的多阶段配电网弹性提升策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 103-110.
ZHAO Jingjing, LIU Shuai, LI Zibo, et al. Resilience improvement strategy of multi-stage distribution system considering separable mobile energy storage system[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 103-110.

[6] 谭清波, 陈春, 曹一家, 等. 多源配电网主动孤岛恢复策略与动态组网潮流分析方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 142-151.
TAN Qingbo, CHEN Chun, CAO Yijia, et al. Intentional islanding recovery strategy and dynamic network power flow analysis for distribution networks with multi-source[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 142-151.

[7] SANAULLAH K, XIA M C, HUSSAIN M, et al. Optimal islanding for restoration of power distribution systems using prim's MST algorithm[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(2): 599-608.

[8] CHEN B, WANG J H, LU X N, et al. Networked microgrids for grid resilience, robustness, and efficiency: a review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 18-32.

[9] 钟剑, 陈晨, 别朝红. 基于 SDN 的配电网信息-物理协同恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4193-4210.
ZHONG Jian, CHEN Chen, BIE Zhaohong. A SDN based cyber-physical integrated restoration scheme for distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4193-4210.

[10] ABU SAAKLAYEN M, LIANG X D, FARIED S O, et al. Soft open point-based service restoration coordinated with distributed generation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(2): 2554-2566.

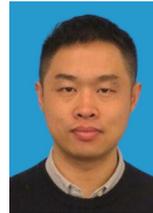
[11] 张新宇, 姚方, 文福拴, 等. 基于最优路径的配电网弹性恢复力提升策略[J]. 分布式能源, 2023, 8(6): 20-26.
ZHANG Xinyu, YAO Fang, WEN Fushuan, et al. A strategy for enhancing the elastic resilience of distribution networks based on optimal path[J]. Distributed Energy, 2023, 8(6): 20-26.

[12] 田浩, 黄文焘, 余墨多, 等. 交直流混合独立微网互联变换器

- 自适应双向下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7063-7074.
- TIAN Hao, HUANG Wentao, YU Moduo, et al. Adaptive bidirectional droop control strategy for the interlinking converter in the islanding hybrid AC/DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7063-7074.
- [13] WU X Y, XU Y, WU X Y, et al. A two-layer distributed cooperative control method for islanded networked microgrid systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 942-957.
- [14] KIM Y J, WANG J H, LU X N. A framework for load service restoration using dynamic change in boundaries of advanced microgrids with synchronous-machine DGs[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 3676-3690.
- [15] NASSAR M E, SALAMA M M A. Adaptive self-adequate microgrids using dynamic boundaries[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(1): 105-113.
- [16] DU Y H, LU X N, WANG J H, et al. Distributed secondary control strategy for microgrid operation with dynamic boundaries[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 5269-5282.
- [17] MEN Y X, DING L Z, ZHANG J H, et al. Secondary control fusion in inverter intensive dynamic microgrids for distribution system resiliency enhancement[J]. *iEnergy*, 2023, 2(1): 9-13.
- [18] DU Y H, LU X N, WANG J H, et al. Dynamic microgrids in resilient distribution systems with reconfigurable cyber-physical networks[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(5): 5192-5205.
- [19] JIANG X, ZHOU Y, MING W L, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(3): 1899-1910.
- [20] 李天麟, 郭祺, 王鑫, 等. 基于四桥臂智能软开关的柔性互联配电台区三相不平衡与轻重载综合调控策略[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4358-4367.
- LI Tianlin, GUO Qi, WANG Xin, et al. A comprehensive control strategy for three phase unbalance and light and heavy load in flexible interconnected distribution stations based on F-SOP[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(10): 4358-4367.
- [21] 夏周武, 马文祚, 杨德昌. 考虑三端智能软开关与孤岛划分结合的主动配电网故障恢复研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 124-133.
- XIA Zhouwu, MA Wenzuo, YANG Dechang. Fault recovery strategy of active distribution network considering the coordination between islanding partition and three-terminal intelligent soft open point[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(2): 124-133.
- [22] 赵晶晶, 李梓博, 刘帅, 等. 考虑智能软开关电压支撑的城市配电网弹性提升方法[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 77-86.
- ZHAO Jingjing, LI Zibo, LIU Shuai, et al. Resilience lifting method of urban distribution network considering soft open point voltage support[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(7): 77-86.
- [23] 潘御钦, 耿光超, 江全元. 基于一致性算法的柔性多状态开关集群控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 101-109.
- PAN Yuqin, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Consistency algorithm based control strategy for soft open point cluster[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 101-109.
- [24] DU Y H, LU X N, CHEN B, et al. Resiliency augmented hybrid AC and DC distribution systems with inverter-dominated dynamic microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(5): 4088-4101.
- [25] ZOU Z X, TANG J, WANG X F, et al. Modeling and control of a two-bus system with grid-forming and grid-following converters[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(6): 7133-7149.
- [26] JOHNSON J, NEELY J C, DELHOTAL J J, et al. Photovoltaic frequency-watt curve design for frequency regulation and fast contingency reserves[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2016, 6(6): 1611-1618.
- [27] SINGHAL A, VU T L, DU W. Consensus control for coordinating grid-forming and grid-following inverters in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(5): 4123-4133.
- [28] 孟潇潇, 邵冰冰, 韩平平, 等. 基于背靠背变流器柔性互联的微电网分层协同恢复控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20): 7812-7827.
- MENG Xiaoxiao, SHAO Bingbing, HAN Pingping, et al. Hierarchical cooperative recovery control strategy for flexible interconnected microgrid cluster based on back-to-back converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 7812-7827.
- [29] 孟潇潇, 尤泽豪, 张茂凡, 等. 基于背靠背变流器柔性互联微电网的分层分布式协同控制及其稳定分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7917-7932.
- MENG Xiaoxiao, YOU Zehao, ZHANG Maofan, et al. Distributed hierarchical cooperative control and stability analysis of flexible interconnected microgrid cluster via back-to-back converters[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(24): 7917-7932.
- [30] GUO F H, LIAN Z J, ZHENG X K, et al. Decentralized cluster-based distributed secondary control of large-scale DC microgrid cluster system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(3): 1652-1662.
- [31] ZHANG C Y, ZHAO J F, DOU X B, et al. Containment-based distributed cooperative control of microgrid clusters: accurately constraining the bus states of loads and microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(4): 5741-5754.
- [32] 顾雪平, 白岩松, 李少岩, 等. 电力系统黑启动恢复问题的研究评述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3183-3200.
- GU Xueping, BAI Yansong, LI Shaoyan, et al. Research review of power system black-start restoration[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(13): 3183-3200.
- [33] DENG Y F, JIANG W, HU F T, et al. Resilience-oriented dynamic distribution network with considering recovery ability

- of distributed resources[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2022, 12(1): 149-160.
- [34] 陶文嘉, 冯亮, 彭克, 等. 极端灾害下基于光储优化配置的配电网供电恢复方法[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(7): 189-197.
TAO Wenjia, FENG Liang, PENG Ke, et al. Power restoration method for distribution network based on optimal configuration of photovoltaic and energy storage in extreme disaster scenarios[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(7): 189-197.
- [35] 陈鸿鑫, 惠恒宇, 包铭磊, 等. 考虑动态分区可靠性约束的新能源电力系统备用优化模型[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(23): 65-75.
CHEN Hongxin, HUI Hengyu, BAO Minglei, et al. Optimization model for reserve of power system with renewable energy considering reliability constraints of dynamic partitioning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(23): 65-75.
- [36] DENG Y F, JIANG W, XU J J, et al. Multi-area-multi-stage based self-healing distribution network planning and operation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2025, 16(2): 1206-1224.
- [37] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(1): 277-297.
LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(1): 277-297.
- [38] GAO X, ZHOU D, ANVARI-MOGHADDAM A, et al. Seamless switching method between grid-following and grid-forming control for renewable energy conversion systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2025, 61(1): 597-606.
- [39] CAO W Y, WU J Z, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 245-257.
- [40] HUANG H Q, DING L Z, LIN Y Z, et al. A seamless transition between grid-forming and grid-following controls of inverter-based resources[C]//2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Phoenix, AZ, USA. IEEE, 2024: 3692-3699.
- [41] AMIN M, ZHONG Q C. Resynchronization of distributed generation based on the universal droop controller for seamless transfer between operation modes[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(9): 7574-7582.

作者简介:



蒋玮

蒋玮(1982),男,博士,教授,研究方向为电力电子化分布式智能配电网/城市电网灾后重构(E-mail: jiangwei@seu.edu.cn);

江宇(2000),男,硕士在读,研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

林加顺(1998),男,博士在读,研究方向为分布式智能配电网灾后恢复。

Dynamic collaborative methods for heterogeneous partitioning of distributed resilient distribution network

JIANG Wei¹, JIANG Yu¹, LIN Jiashun¹, DENG Yifan¹, YUAN Xiaodong², ZHANG Chenyu²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In recent years, extreme natural disasters and potential geopolitical conflicts have seriously threatened the stable and reliable operation of distribution networks. Traditional dynamic recovery areas (DRA) overlook the recovery potential of vast grid following resources and fail to clarify the multi-action stages of multi-inverter coordinated operation. A heterogeneous DRA partitioned dynamic coordinated operation framework is proposed. Firstly, grid-forming, grid-following, and hybrid grid-forming and following DRAs are defined. Multi-key action stages for fault recovery, including partition establishment, mode switching, and grid synchronization, are introduced. Then, based on the operational requirements of each stage, a dynamic collaborative control method for distributed converters and soft open point is designed. In secondary control, voltage/frequency-free recovery and power sharing variables are introduced to achieve stable operation within the partition, while seamless interaction variables for smart switch (SSW) and grid-connection switches are introduced to ensure smooth cross-partition interaction. Finally, a simulation model is built in MATLAB/Simulink to verify the feasibility and effectiveness of the proposed framework and control design. The results show that the proposed method can establish DRA voltage and frequency, equally distribute internal resource power, flexibly respond to commands from SSW and grid-connection switch, fully exploit the coordinated recovery potential of heterogeneous resources, and enhance the operational resilience of the distribution network.

Keywords: dynamic recovery area (DRA); grid-following resource; multi-key action stages; distributed converter; soft open point; dynamic collaborative control

(编辑 陆海霞)