

单三相光储型多微网黑启动恢复策略

许志荣^{1†}, 杨 苹², 曾智基¹, 彭嘉俊¹, 郑成立¹

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 511458)

摘要: 近年来微电网大力发展, 由其作为子单元的多微网(multi-microgrids, MMGs)渐成为一种新型电网. 作为结构及控制模式更加复杂的微电网群落, 研究安全有效地黑启动以进入正常运行状态对提高供电可靠性具有重要意义. 在分析含单三相复合混联的多微网结构及控制系统基础上, 为使主电源高效运行, 提出一种考虑三相不平衡度约束的多微电网黑启动策略, 考虑源荷网条件选择最优的储能系统作为黑启动主电源, 以先独立分散恢复再集中协调恢复的方式实现多微网的源荷网恢复. 所提策略经验证有效可靠, 可为多微网黑启动恢复提供一定的借鉴意义.

关键词: 多微网; 单三相; 黑启动; 三相不平衡

中图分类号: TM721

文献标识码: A

Black start strategy for photovoltaic energy storage system multi-microgrids with three-phase/single-phase

XU Zhi-rong^{1†}, YANG Ping², ZENG Zhi-ji¹, PENG Jia-jun¹, ZHENG Cheng-li¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou Guangdong 511458, China)

Abstract: In recent years, with the development of microgrids, multi-microgrids (MMGs) have become a new type of power grids. As the community of microgrids with more complex structure and control mode, studies on safe and effective black start strategies for multi-microgrids are of great significance to improve the reliability of power supply. Based on the analysis of the network structure and the control system of the multi-microgrids with three-phase/single-phase architecture, to achieve the efficient operation of the main power supply, a black start strategy is proposed under the consideration of three-phase unbalance degree constraints. The energy storage system that meets the sources-loads-network conditions is selected as the main power supply of the MMGs, and after all sub-microgrids finish independent decentralized restoration, the centralized restoration is carried out to complete the MMGs black start procedure. The proposed method is demonstrated to be effective and reliable, which can provide some reference for the restoration of the multi-microgrids.

Key words: multi-microgrids; three-phase/single-phase; black start; three-phase unbalance

1 引言(Introduction)

随着世界经济快速发展, 人类社会对电力供应的依赖度不断提高, 大停电事故造成的后果日趋严重. 为减少停电时间及停电引起的经济损失, 研究快速、高效、可靠的黑启动策略对电力系统的安全稳定运行具有重要意义^[1]. 黑启动是指电力系统在因故障停运后, 不依赖于其他的网络, 通过启动系统内具有自启动能力的电源, 带动无自启动能力的电源启动, 并逐步扩大系统恢复范围, 最终实现整个系统恢复的过程^[2].

传统电网的黑启动恢复过程时间较长且较为复杂, 可划分为3个阶段: 准备阶段、网架恢复阶段、负荷恢

复阶段. 准备阶段中, 需确定系统分区、选择网架恢复策略、选择恢复路径、确定黑启动电源等; 网架恢复阶段需完成输电线路的充电、启动相应的黑启动机组、同步子系统、维持有功无功平衡等; 负荷恢复阶段, 需尽快恢复重要负荷^[3-5].

近年来, 分布式发电系统具有经济性、环保性和灵活性等优点得到大规模应用, 但由于不稳定性给电网运行和控制带来新的挑战^[6-7]. 为解决大规模分布式发电系统并网问题, 微电网将分布式发电系统、储能元件和负载组成一个整体, 其具有高度的灵活性和供电可靠性^[8-9]. 与传统电网类似, 单微网黑启动恢复主要过程为主电源选取, 网架恢复和源荷恢复, 主电源

收稿日期: 2016-04-06; 录用日期: 2016-07-20.

[†]通信作者. E-mail: 407849739@qq.com; Tel.: +86 15099963487.

本文责任编辑: 梅生伟.

国家高技术研究发展计划项目(2014AA052001), 广东省科技计划项目(2012B040303005)资助.

Supported by National High-tech RD Program ("863" Program) of China (2014AA052001) and Technologies Planning Program of Guangdong Province (2012B040303005).

通常选取能源供给稳定且微电源动态性能及抗扰动态性能较好的储能单元、柴油发电机等; 网架及负荷恢复策略可分为并行恢复(bottom-up)和串行恢复(top-down). 文献[10–12]引入了传统电网并行恢复的策略, 提出基于并行恢复的黑启动方案, 其具有快速恢复供电的优点, 但是有小系统并联组网困难、并联冲击电流大、软件和硬件设计更为复杂化的问题. 文献[13–14]指出在单微网中串行恢复策略有利于降低系统复杂程度, 提高稳定性, 提出一种基于串行恢复的黑启动方案. 尽管串行恢复相对于并行恢复速度较慢, 但其具有易操作性, 可有效简化微网系统硬件设计以及控制系统的软件设计复杂程度, 成为当前单微网黑启动的主流方式.

随着微网规模化接入, 地域相近且因互联互通而形成了能满足特定功能和控制目标的多微网系统, 其考虑了子微网独立运行和系统协调运行要求, 既满足各微网内部稳定运行, 又可实现各微网间能量互济^[15–17]. 由于多微网网架结构及控制系统的复杂性, 传统的单微网黑启动策略无法直接应用于多微网, 其黑启动过程需考虑各子微网内不同的源荷特性, 更多关注各子微网间的协调配合, 以更平稳地完成黑启动过程. 文献[18–19]基于分层控制的思想提出多微网并行恢复策略, 但都只给出定性的恢复策略.

随着单相微网的接入, 与邻近三相微网所形成单相三相多微网混联的复杂结构系统, 国外鲜有文章介绍, 而国内基本处于空白. 本文在分析含单相三相复合混联的多微网结构及控制系统基础上, 为使主电源高效运行, 提出一种考虑三相不平衡度约束的多微电网黑启动策略, 通过选择考虑源荷网条件的储能系统作为黑启动主电源, 以先独立分散恢复再集中协调恢复的方式实现多微网的源荷网恢复. 所提策略经验证有效可靠, 可为多微网黑启动恢复提供一定的借鉴意义.

2 单相三相多微网(Three-phase/single-phase multi-microgrids)

如图1所示为多微网一次、二次系统架构, 在每一个用户配电柜附近安装子微网控制器(microgrid central controller, MGCC), 主要进行源荷储及开关等设备实时监控和能效管理. 在低压配电柜附近安装多微网控制器(regional microgrid central controller, RMGCC), 实现多微网整体优化运行和稳定控制.

基于分层控制思想, 本文提出一种适用于单相光储型微电网的控制结构. 第1层控制由多微网控制器担任; 第2层控制由子微网控制器担任; 第3层控制由底层控制器组成, 包括负荷控制器(load controller, LC)和微源控制器(microsource controller, MC).

3 黑启动策略(Black start strategy)

单相三相微电网的网架结构相对复杂, 传统单微网的黑启动策略无法直接应用于单相三相微电网, 其黑启

动过程需考虑各子微网内不同的源荷特性, 更多关注各子微网间的协调配合, 以平稳完成黑启动过程. 单相三相多微网黑启动主流流程如图2所示.

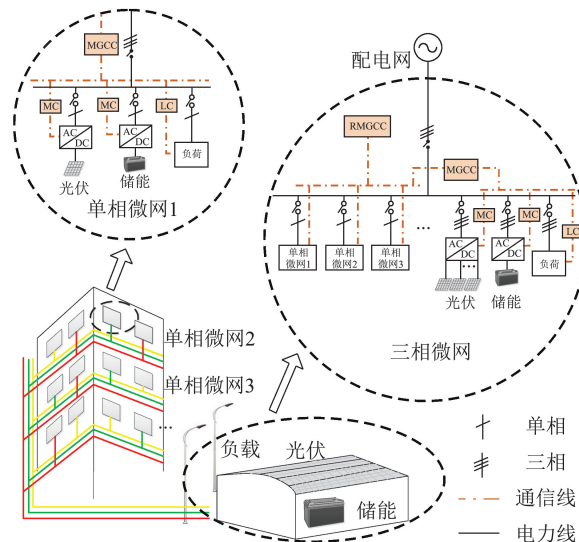


图1 多微网拓扑图

Fig. 1 Multi-microgrids topology

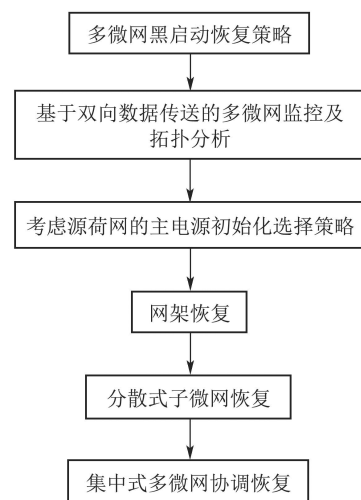


图2 单相三相多微网黑启动主流流程

Fig. 2 Main flow of black start strategy of SP/TP multi-microgrids

- 1) 根据多微网内各源荷储开关信息进行基于双向数据传输的单三相多微网状态监视和拓扑识别;
- 2) 主电源选择: 根据源荷储网信息进行多目标决策, 设定主电源运行在电压频率 (voltage frequency, VF) 控制模式, 并规定主电源所在子微网作为主微网, 其余子微网为从微网;
- 3) 网架恢复: 以主微网为中心辐射状投入各子微网并离网开关;
- 4) 分散式子微网恢复阶段, 从微网控制器设置为并网模式, 且设置联络线功率值为0, 主微网运行在离网模式以进行多微网内部功率平衡调节;
- 5) 集中式恢复: 通过协调各子微网源荷储资源, 以实现互联源荷最大化恢复.

3.1 基于双向数据传送的多微网监控及拓扑分析 (Monitor and topology analysis of multi-micro-grid based on bi-directional data transfer)

多微网监控及拓扑分析通过MGCC和RMGCC之间的数据格式的读取和识别实现. 子微网内部数据格式为[T W B P Q E U], 具体如表1所示. 表中MPPT为最大功率点跟踪(maximum power point tracking).

表1 微网内部数据传递格式
Table 1 Internal communication data format

T	对象类型	0	联络线
		1	储能变流器
		2	光伏逆变器
		3	负荷
		4	从属子微网
W	对象序号	W	第W个
B	开关状态	0	断开
		1	闭合
P	有功输出	P_a	A相有功
		P_b	B相有功
		P_c	C相有功
Q	无功输出	Q_a	A相无功
		Q_b	B相无功
		Q_c	C相无功
E	对象状态	1	储能处于P-Q模式
		2	储能处于VF模式
		0	储能系统停机
		1	光伏处于P-Q模式
		2	光伏处于MPPT模式
		0	光伏系统停机
		1	重要负荷
		2	可调节负荷
		3	可中断负荷
		1	从属子微网并网
		0	从属子微网离网
		1	并网开关关闭
		0	并网开关断开
U	对象特性	SOC	储能系统SOC
		P_{pvf}	光伏预测值/15 min
		P_{ldf}	负荷预测值/15 min
		P_{mgf}	子微网预测值/15 min

通过对各子微网设定位置坐标, 使各MGCC向RMGCC传送其微网内部数据信息, 以实现多微网拓扑识别. 坐标由多微网配置表集成, 以 $[i, j, k]$ 的数据形式表达. 其中: i 指多微网层数, $i \geq 1$, i 越小优先级越高; j 指多微网某层的第 j 个子微网, $j \geq 1$, j 越小优先级越高; k 表示子微网相数, 0为三相微电网, 1, 2, 3分别表示连接至A相、B相、C相的单相微电网. 拓扑

分析由含多微网拓扑参数的配置表及必要的实时数据联合完成, 配置表包括微网元件参数信息, 比如储能、负荷和可再生能源等, 实时数据包含开关状态和元件的实时出力功率. 拓扑分析数据结构见图3所示.

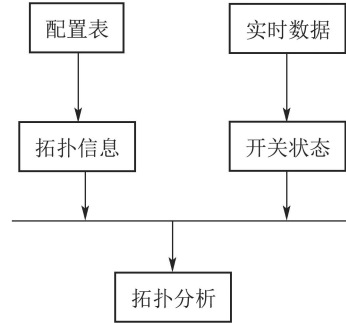


图3 拓扑分析数据结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of topological analysis data structure

为实现黑启动恢复决策, 需要系统源储荷关键参数, 因此配置表包含信息: 储能系统额定功率 P_{pcs} 、储能系统电池原始电量 S 、光伏系统额定功率 P_{pv} 、负荷额定功率 P_{ld} .

3.2 考虑源荷网的主电源选取(Selection of main power supply considering source-load-net)

单微网主电源具体的选择依据是:

- 具备足够备用容量;
- 具备充足发电容量;
- 具有调压调频能力, 以保证微电网在离网情况下母线电压频率保持稳定.

与单微网选主电源不同的是, 多微网需要考虑该主电源所在的子微网的其他情况, 如其所处的层数等级、网内负荷情况以及网际间联络关系等, 另外可以考虑工程实际经验作为模糊因素. 因此, 从如下4个方面进行考虑:

- ① 电源影响因素: 储能变流器额定功率; 实时电量: 储能电量与荷电状态之积;
- ② 网内影响因素: 重要负荷与网内总负荷之比;
- ③ 网际影响因素: 储能所处层数;
- ④ 模糊因素: 主电源适合程度分为非常适合、适合、不适合.

1) 列出决策矩阵:

$$F = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & \cdots & x_b \\ \begin{matrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ \vdots \\ f_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} & \cdots & f_{1b} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} & \cdots & f_{2b} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} & \cdots & f_{3b} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} & \cdots & f_{4b} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} & f_{n4} & \cdots & f_{nb} \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (1)$$

其中: x_j 代表储能变流器序号; f_n 表示影响因素。

2) 转换为目标相对优属度矩阵:

$$\mu = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & \cdots & x_b \\ \begin{matrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ \vdots \\ f_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} & \cdots & \mu_{1b} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \mu_{24} & \cdots & \mu_{2b} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} & \mu_{34} & \cdots & \mu_{3b} \\ \mu_{41} & \mu_{42} & \mu_{43} & \mu_{44} & \cdots & \mu_{4b} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \mu_{n3} & \mu_{n4} & \cdots & \mu_{nb} \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (2)$$

其中 f_1, f_2, f_3 属于效益型目标, 目标优属度可用下式计算:

$$u_{ij} = (f_{ij}/f_{i\max}). \quad (3)$$

f_4 属于成本型目标, 目标优属度可用下式计算:

$$u_{ij} = 1 - [f_{ij}/(f_{i\max} + f_{i\min})]. \quad (4)$$

3) 通过不完全偏好信息模糊多目标决策方法, 采用隶属度线性加权规划法, 可得其综合值为

$$\rho_j(\bar{\omega}) = \sum_{i=1}^n \omega_i \mu_{ij}, \quad j = 1, 2, \cdots, b, \quad (5)$$

其中:

$$\omega_i = \sum_{j=1}^b \mu_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^b \mu_{ij}, \quad (6)$$

$\rho_j(\bar{\omega})$ 越大, 则 x_j 越优。

3.3 源荷网恢复策略(Recovery strategy of source-load-net)

网架恢复阶段, 以主微网为中心辐射状依次投入相近子微网并离网开关。当线路完成充电后, 首先进行各子微网分散式恢复, 待所有子微网完成分散式恢复后, 进行集中式协调恢复以实现互联源荷的最大化恢复。

3.3.1 分散式源荷恢复 (Distributed recovery of source-load)

在分散式源荷恢复阶段, 子微网联络线功率限值为 0, 只考虑本地子微网内部功率平衡进行源荷恢复。

文献[20]提出孤岛稳定裕度指标用于评估孤岛运行状态, 根据稳定裕度指标制定孤岛内部电源和负荷的启动顺序。基于此思想, 单三相多微网中各子微网源荷恢复次序通过微网运行裕度及稳定裕度决定。

规定微网 i 运行裕度 $[P_{MGi}^+, P_{MGi}^-]$ 用于描述子微网 i 黑启动过程中的运行裕度。当微网稳定时, $P_{MGi}^+ \geq 0$, 表示微网 i 具有正值的有功出力调整裕度以应对负荷增加和电源出力减少的情况; $P_{MGi}^- \leq 0$, 表示微网 i 具有负值的有功出力调整裕度以应对负荷减少和电源出力增加的情况。

规定微网稳定裕度指标 K_{pMGi} , 如式 (7) 所示。 K_{pMGi} 表示微网 i 的功率调整裕度, 可衡量微网的稳定性, K_{pMGi} 越大, 其稳定性越好。

$$K_{pMGi} = \min(|P_{MGi}^+|, |P_{MGi}^-|). \quad (7)$$

基于微网运行裕度及稳定裕度, 制定如图 4 所示的分散式源荷恢复流程。

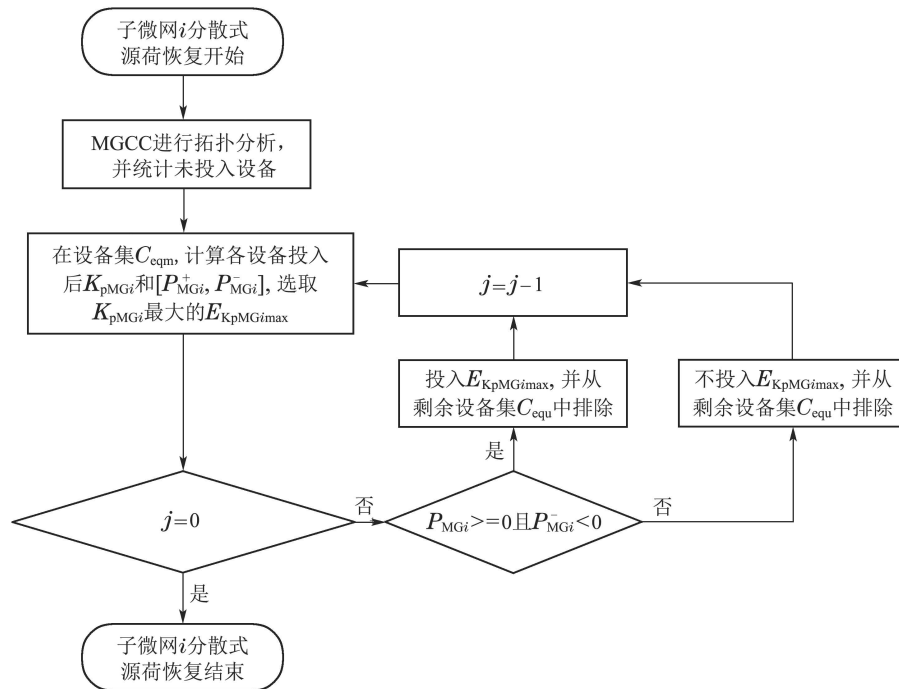


图 4 分散式源荷恢复阶段控制流程图

Fig. 4 Control flow chart of distributed restoration

步骤1 MGCC进行拓扑分析,并统计未投入设备,并形成未投入设备集 C_{eqm} . 其中: 未投入设备数目为 $j = j_{pv} + j_{bs} + j_{ld}$, $j, j_{pv}, j_{bs}, j_{ld}$ 分别表示未投入设备数目、未投入光伏数目、未投入储能数目和未投入负荷数目.

步骤2 计算设备集 C_{eqm} 中每个设备单独投入后的微网运行裕度 $[P_{MGi}^+, P_{MGi}^-]$ 和微网稳定裕度 K_{pMGi} , 取设备 $E_{KpMGi \max}$ 进入步骤3判断. 其中: $E_{KpMGi \max}$ 表示 K_{pMGi} 最大时对应的设备, $E_{KpMGi \max} \in C_{eqm}$.

步骤3 判断循环结束条件, 即 $j = 0$, 若满足则子微网分散式源荷恢复流程结束, 否则进入步骤4判断.

步骤4 判断 $[P_{MGi}^+, P_{MGi}^-]$ 是否满足式(8), 满足则进入步骤5, 否则进入步骤6.

$$\begin{cases} P_{MGi}^+ \geq 0, \\ P_{MGi}^- \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

步骤5 投入 $E_{KpMGi \max}$, 并将其从设备集 C_{eqm} 排除, $j = j - 1$, 返回步骤2.

步骤6 不投入 $E_{KpMGi \max}$, 并将 $E_{KpMGi \max}$ 从设备集 C_{eqm} 排除, $j = j - 1$, 返回步骤2.

3.3.2 集中式源荷恢复 (Centralized recovery of source-load)

在满足不平衡度约束的前提下, RMGCC通过集中式决策以实现对各子微网的源荷储功率集中分配, 以实现源荷最大化投入.

根据文献[20], 三相电流不平衡度不应超过15%, 因此有不平衡约束条件:

$$\varepsilon = \frac{I_2}{I_1} \leq 15\%, \quad (9)$$

其中: I_1 为三相电流的正序分量方均根值, I_2 为三相电流的负序分量方均根值. 经推导[22], 可得到如式(10)负荷功率表示的三相不平衡度(three-phase unbalance, TPU)公式:

$$\varepsilon = \frac{I_2}{I_1} = \frac{S_{L2}}{S_L}, \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} S_L = \sqrt{(P_A + P_B + P_C)^2 + (Q_A + Q_B + Q_C)^2}, \\ S_{L2} = \sqrt{P_{L2}^2 + Q_{L2}^2}, \\ P_{L2} = \frac{1}{2}(2P_A - P_B + \sqrt{3}Q_B - P_C - \sqrt{3}Q_C), \\ Q_{L2} = -\frac{1}{2}(2Q_A - Q_B - \sqrt{3}P_B + \sqrt{3}P_C - Q_C). \end{cases} \quad (11)$$

如图5所示是集中式恢复阶段控制流程图.

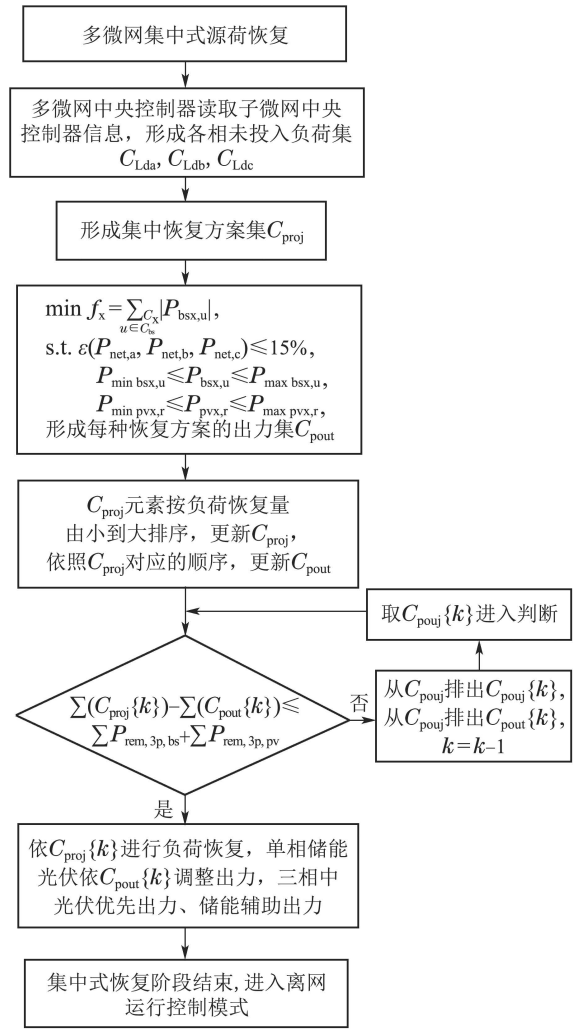


图5 集中式恢复阶段控制流程图

Fig. 5 Control flow chart of centralized restoration

步骤1 多微网中央控制器读取各子微网中央控制器信息, 形成各相未投入负荷集 $C_{Lda}, C_{Ldb}, C_{Ldc}$. 其中 $C_{Lda}, C_{Ldb}, C_{Ldc}$ 分别表示A, B, C各相子微网未投入负荷集.

步骤2 基于各相未投入负荷集 $C_{Lda}, C_{Ldb}, C_{Ldc}$ 形成集中恢复方案集 C_{proj} . 其中: $projx$ 表示 C_{proj} 中的一种负荷投入方案, $x = 1, 2, \dots, k$, k 表示 C_{proj} 包含的方案个数.

步骤3 针对某种负荷恢复方案 $projx$, 以储能的出力总量最小为目标, 以源储出力作为待求变量, 以三相不平衡度、光伏出力上下限和储能出力上下限作为约束, 建立如式(12)所示数学模型, 并将求解量形成 $projx$ 对应的出力增量方案 $poutx$. 自 $x = 1, 2, \dots, k$ 演算, 形成光伏储能出力增量集 C_{pout} :

$$\begin{cases} \min f_x = \sum_{u \in U} |P_{bsx,u}|, \\ \text{s.t. } \varepsilon(P_{net,a}, P_{net,b}, P_{net,c}) \leq 15\%, \\ P_{\min bsx,u} \leq P_{bsx,u} \leq P_{\max bsx,u}, \\ P_{\min pvx,r} \leq P_{pvx,r} \leq P_{\max pvx,r}, \end{cases} \quad (12)$$

其中: C_{pout} 是光伏和储能的出力增量方案集, $\text{pout } x \in C_{\text{pout}}$; $P_{\text{net,a}}, P_{\text{net,b}}, P_{\text{net,c}}$ 分别是各相微网的联络线功率; $P_{\text{bsx},u}$ 表示储能 u 的出力增量, 其中: $u \in U$, U 表示已投入储能集合(含各相); $P_{\text{max bsx},u}, P_{\text{min bsx},u}$ 分别表示储能 u 的出力增量上下限值; $P_{\text{pvx},r}$ 表示光伏 r 的出力增量, 其中 $r \in \mathbb{R}$, 表示已投入光伏集合(含各相); $P_{\text{max pvx},r}, P_{\text{min pvx},r}$ 分别表示光伏 r 的出力增量上下限值。

步骤4 C_{proj} 内元素按负荷恢复量由小到大排序, 更新 C_{proj} , 依照 C_{proj} 对应的顺序, 更新 C_{pout} 。

步骤5 $C_{\text{proj}}\{k\}$ 的负荷投入情况, 判断主微网出力裕量是否满足, 见式(13)。若式(13)成立, 则根据 $C_{\text{proj}}\{k\}$ 进行负荷恢复, 单相微网内源储根据 $C_{\text{pout}}\{k\}$ 增加出力, 三相微网则遵从光伏优先出力、主储能辅助出力的原则调整出力, 完成后进入步骤7; 反之则进入步骤6。

$$\sum(C_{\text{proj}}\{k\}) - \sum(C_{\text{pout}}\{k\}) \leq$$

$$\sum P_{\text{rem},3\text{p},\text{bs}} + \sum P_{\text{rem},3\text{p},\text{pv}}, \quad (13)$$

其中: $\sum(C_{\text{proj}}\{k\})$ 表示 $C_{\text{proj}}\{k\}$ 出力情况下投入的总负荷量, $\sum(C_{\text{pout}}\{k\})$ 各单相光伏、储能总出力增量, $\sum P_{\text{rem},3\text{p},\text{bs}}$ 表示三相微网储能剩余可投入容量, $\sum P_{\text{rem},3\text{p},\text{pv}}$ 表示三相微网光伏剩余可投入容量。

步骤6 从 C_{proj} 排除方案 $C_{\text{proj}}\{k\}$, 从 C_{pout} 排除方案 $C_{\text{pout}}\{k\}$, $k = k - 1$, 并返回步骤5。

步骤7 集中式恢复阶段结束, 多微网中央控制器进入离网运行控制模式。

4 实例验证及分析(Experimental verification and analysis)

为验证本文所提出的黑启动恢复策略, 在 MATLAB R2012a/Simulink 平台搭建如图6所示的单三相混联型多微网系统。

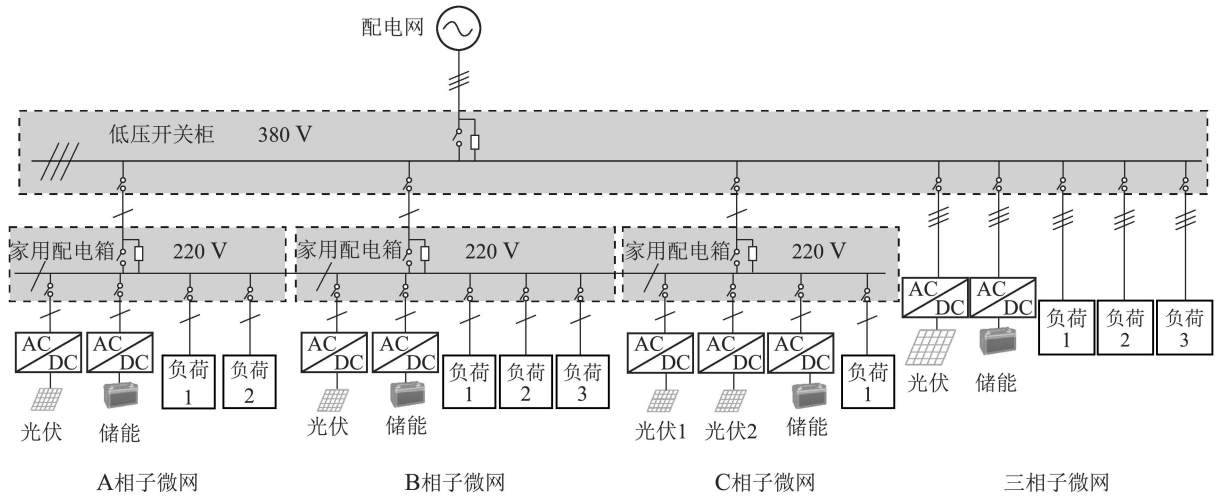


图6 多微网仿真拓扑

Fig. 6 Simulation topology of multi-microgrids

其中, 三相微网包含储能30 kW(30 kWh)、光伏20 kW、负荷分别为10 kW, 5 kW(重要)和15 kW;

A相子微网包含储能5 kW(5 kWh)、光伏3 kW、负荷分别为4 kW(重要)和5 kW;

B相子微网包含储能5 kW(5 kWh)、光伏3 kW、负荷分别为2 kW, 3 kW(重要)和4 kW;

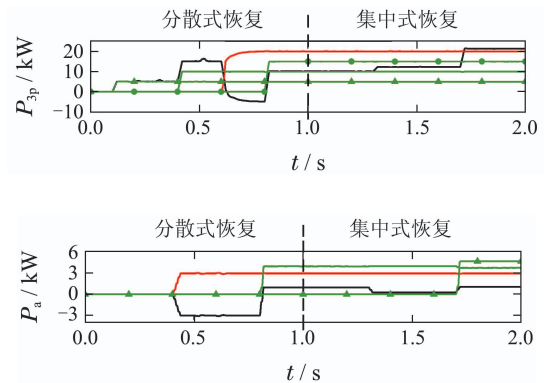
C相子微网包含储能5 kW(5 kWh)、光伏分别为3 kW, 4 kW、负荷1 kW。

经主电源选取策略所判断出A, B, C相储能和三相储能综合值为[0.2603 0.2331 0.3963 0.7261], 因为判断三相微网中储能为黑启动电源, 以VF模式启动, 支撑多微网电压及频率。

经过如图4所示的分散式源荷恢复决策, 针对三相子微网和3个单相子微网, 形成如表2所示的分散式恢

复方案。

在图6所示的多微网拓扑中, 以表1确定的分散式源荷恢复方案作为恢复路径。如图7所示是各子微网设备的功率曲线。



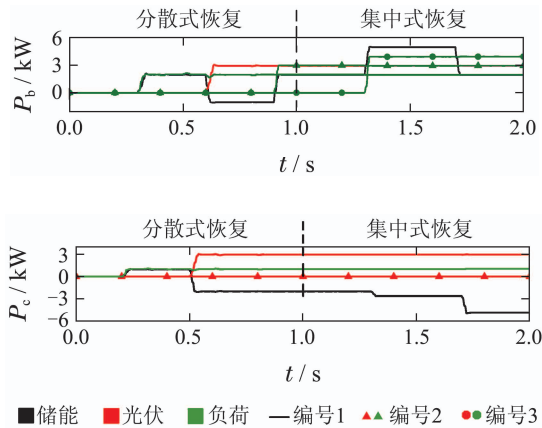


图7 子微网功率曲线

Fig. 7 Power curves of sub-microgrids

表2 分散式源荷恢复方案

Table 2 Disperse restoration scheme

对象	最优裕度	源荷恢复方案	运行裕度
三相微网	30	投入储能 (VF控制)	[30, -30]
	25	投入负荷2	[25, -35]
	15	投入负荷1	[15, -45]
	25	投入光伏	[35, -25]
A相微网	20	投入负荷3	[20, -40]
	5	投入储能 (PQ控制) 设置为0	[5, -5]
	2	投入光伏	[8, -2]
	4	投入负荷1	[4, -6]
B相微网	5	投入储能 (PQ控制) 设置为0	[5, -5]
	3	投入负荷1	[3, -7]
	4	投入光伏	[6, -4]
	4	投入负荷2	[3, -7]
C相微网	5	投入储能 (PQ控制) 设置为0	[5, -5]
	4	投入负荷1	[4, -6]
	3	投入光伏1	[7, -3]

在三相微网, 首先投入储能装置, 以V/f控制方式运行以建立稳定的电压和频率, 在 $t = 0.1$ s时投入负荷2, $t = 0.4$ s时投入负荷, $t = 0.6$ s时投入光伏。

在A相子微网, $t = 0$ s时投入储能, 以PQ控制方式运行, 有功和无功出力设置为0; $t = 0.4$ s时投入光伏; $t = 0.8$ s时投入负荷1。期间, A相储能根据恢复设备的出力情况调节自身出力, 以维持子微网联络线功率为0。

在B相子微网, $t = 0$ s时投入储能, 以PQ控制方式运行, 有功和无功出力设置为0; $t = 0.3$ s时投入负荷1; $t = 0.6$ s时投入光伏; $t = 0.9$ s时投入负荷2。期间, B相储能根据恢复设备的出力情况调节自身出力, 以维持子微网联络线功率为0。

在C相子微网, $t = 0$ s时投入储能, 以PQ控制方式运行, 有功和无功出力设置为0; $t = 0.2$ s时投入负荷1; $t = 0.5$ s时投入光伏1。期间, B相储能根据恢复设备的出力情况调节自身出力, 以维持子微网联络线功率为0。

经表2所示恢复方案进行分散式恢复后, 各子微网未投入光伏、负荷和储能剩余可调裕度如表3所示。

表3 未投入光伏、负荷和储能剩余可调裕度

Table 3 Remaining PV, loads and remaining

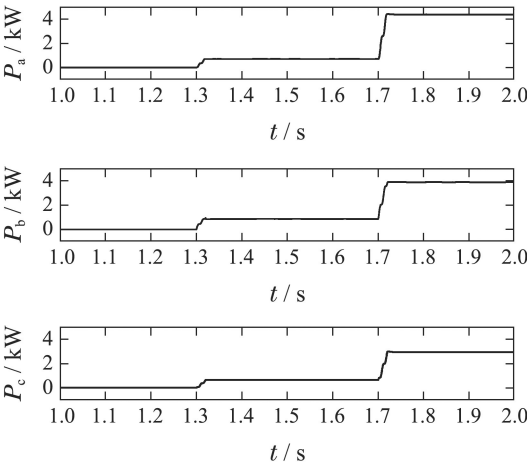
adjustable margin of energy storage systems

	未投入光伏	未投入负荷	储能剩余可调裕度
三相微网			[20, -40]
A相微网		负荷2	[4, -6]
B相微网		负荷3	[3, -7]
C相微网	光伏2		[7, -3]

经图5所示的集中式恢复决策, A相负荷2和B相负荷3能在满足式(9)三相不平衡约束下恢复, 只需在B相负荷3投入时, A相储能、B相储能和C相储能分别设置为0.31 kW, 5 kW和-2.63 kW; A相负荷2投入时, A相储能、B相储能和C相储能分别设置为1.08 kW, 1.97 kW和-4.89 kW; C相光伏2不投入。

如图6, $t = 1.3$ s时投入B相负荷3, 同时A相储能、B相储能和C相储能分别调整为0.31 kW, 5 kW和-2.63 kW以调节三相不平衡度; $t = 1.7$ s时, A相负荷2投入, 同时A相储能、B相储能和C相储能分别调整为1.08 kW, 1.97 kW和-4.89 kW。

如图8所示是各单相子微网联络线功率及三相不平衡度曲线。经过集中式恢复, 各相子微网联络线功率较为接近, 而在B相负荷3和A相负荷2投入的瞬间有较大的不平衡冲击, 但经集中控制调整各相储能出力, 三相不平衡度回落到正常范围。



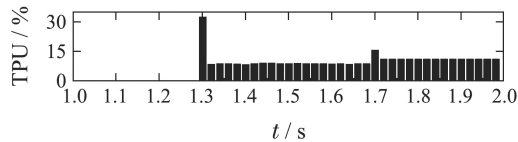


图8 单相子微网联络线功率及三相不平衡度

Fig. 8 Line power of sub-microgrids and TPU

5 结论(Conclusions)

本文在分析含单相复合混联的多微网结构及控制系统基础上,为使主电源高效运行,提出一种考虑三相不平衡度约束的多微电网黑启动策略,考虑源荷网条件选择最优的储能系统作为黑启动主电源,以先独立分散恢复再集中协调恢复的方式实现多微网的源荷网恢复。所提策略经验证有效可靠,可为多微网黑启动恢复提供一定的借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] CHOU Y T, LIU C W, WANG Y J, et al. Development of a black start decision supporting system for isolated power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 2202 – 2210.
- [2] FANG Xinyan, YU Weiyong, XIONG Huimin, et al. Study on power systems black start [J]. *Electric Power*, 2000, 33(1): 40 – 43. (房鑫炎, 郁惟镛, 熊惠敏, 等. 电力系统黑启动的研究 [J]. 中国电力, 2000, 33(1): 40 – 43.)
- [3] ZHONG Huirong, GU Xueping, ZHU Lingxin. Optimization of load restoration during network reconfiguring process of black-start restoration [J]. *Power System Protection and Control*, 2011(17): 26 – 32. (钟慧荣, 顾雪平, 朱玲欣. 黑启动恢复中网架重构阶段的负荷恢复优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2011(17): 26 – 32.)
- [4] CHEN Jun, ZENG Yonggang, YANG Jinbai, et al. Black-start scheme for China southern power grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(9): 80 – 83. (湛军, 曾勇刚, 杨晋柏, 等. 南方电网黑启动方案 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 80 – 83.)
- [5] CAI Shutao, ZHANG Yao, JING Zhaoxia. Discussion on the black start scheme of regional power systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(12): 73 – 76. (蔡述涛, 张尧, 荆朝霞. 地方电网黑启动方案的制定 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 73 – 76.)
- [6] WANG He, LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(5): 19 – 23. (王鹤, 李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 19 – 23.)
- [7] WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 1 – 12. (王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1 – 12.)
- [8] LASSETER R H. Microgrids [C] // *Power Engineering Society Winter Meeting*. New York: IEEE, 2002, 1: 305 – 308.
- [9] LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Over-view on microgrid research [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(19): 100 – 107. (鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100 – 107.)
- [10] MU Longhua, XIA Mingdong, LIU Zhong. Research on black-start for microgrid [J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(22): 32 – 37. (牟龙华, 夏明栋, 刘仲. 微电网的黑启动研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 32 – 37.)
- [11] MENG Qiang, MU Longhua, XU Xufeng, et al. Black-start strategy of isolated microgrid [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(3): 59 – 64. (孟强, 牟龙华, 许旭峰, 等. 孤立微电网的黑启动策略 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 59 – 64.)
- [12] PEAS J A, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(2): 916 – 924.
- [13] HUANG Xing, JIN Xinmin, MA Lin. An optimized island micro-grid black-start control method [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(4): 1821 – 190. (黄杏, 金新民, 马琳. 微网离网黑启动优化控制方案 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 1821 – 190.)
- [14] HUANG Xing. *Grid-connected/islanding characteristics and control strategies of microgrid* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [15] *European Research Project More Microgrids* [Online]. Available: <http://microgrids.power.ece.ntua.gr>. April 3, 2016.
- [16] GIL N J, PEAS J A. Hierarchical frequency control scheme for islanded multi-microgrids operation [C] // *Power Technology*. Lausanne: [s.n.] 2007: 473 – 478.
- [17] ZHOU Niancheng, JIN Ming, WANG Qianggang, et al. Hierarchical coordination control strategy for multi-microgrid system with series and parallel structure [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(12): 13 – 18. (周念成, 金明, 王强钢, 等. 串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 13 – 18.)
- [18] RESENDE F O, GIL N J, PECAS J A. Service restoration on distribution systems using multi-microgrids [J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2011, 21(2): 1327 – 1342.
- [19] LOPES J A P, MADUREIRA A, GIL N, et al. *Operation of Multi-Microgrids* [M]. Hoboken: Wiley, 2014: 165 – 205.
- [20] LI Zhenkun, ZHOU Weijie, QIAN Xiao, et al. Distribution network restoration and black start based on distributed generators [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(21): 67 – 75. (李振坤, 周伟杰, 钱啸, 等. 有源配电网孤岛恢复供电及黑启动策略研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 67 – 75.)
- [21] NIU Yingshui, CUI Suyuan. Influence of low-voltage three-phase current unbalance influence on line loss and its governance [C] // *Proceedings of the 5th Symposium on Power Quality*. Guangzhou: [s.n.], 2014: 195 – 199. (牛迎水, 崔素媛. 低压三相电流不平衡对线损的影响与治理 [C] // 第5届电能质量及柔性输电技术研讨会. 广州: [s.n.], 2014: 195 – 199.)
- [22] TONG Xiangqian, WANG Haiyan, YIN Jun. Calculation method of three-phase unbalance factor based on load power [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2011, 23(2): 24 – 30. (同向前, 王海燕, 尹军. 基于负荷功率的三相不平衡度的计算方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 24 – 30.)

作者简介:

许志荣 (1989–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为多微网运行控制, E-mail: 407849739@qq.com;

杨苹 (1967–), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为新能源发电及并网控制技术, E-mail: eppyang@scut.edu.cn;

曾智基 (1993–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为多微网运行控制, E-mail: 948926865@qq.com;

彭嘉俊 (1993–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为多微网运行控制, E-mail: 243542588@qq.com;

郑成立 (1993–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为微电网运行控制, E-mail: 1594496644@qq.com.