Vol.37 No.9 Sept. 2017

a

# 应对脱离配电网情况的单三相多微网组合 分析及切换控制

许志荣1,杨 苹2,彭嘉俊1,张育嘉1,宋嗣博1,赵卓立3

(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;

3. 华南理工大学 风电控制与并网技术国家地方联合工程实验室,广东 广州 511458)

摘要:考虑单相及三相微网两者在地域上接入较为相近,互联而形成单三相多微网系统。由于其复杂的运行 方式,亟待解决如何实现多微网灵活无缝切换的问题。介绍了单三相多微网系统拓扑结构;当多微网系统为 应对脱离配电网情况时,即常规主动并转离,通过互联方案预筛选得到初始方案后,基于模糊多目标决策得 到多微网互联方案;通过给定的互联方案目标进行系统状态平滑切换。所提策略经算例验证可行,为多微网 切换控制技术提供建议性方案。

关键词: 多微网; 单三相; 并/离网切换; 组合分析 中图分类号: TM 727 文献标识码: A

## 0 引言

近年来,随着分布式发电技术的迅猛发展,越来 越多可再生能源接入中低压配电网<sup>[1-2]</sup>。微网作为解 决高渗透率可再生能源接入配电网的有效方案,是 一种将分布式发电装置、变流器、负荷、储能装置以 及监控保护控制装置有机整合在一起的发配电系 统,具有自治运行、多能互补、优化管理和协调控制 等优势,是能源互联网发展过程中不可或缺的重要 部分<sup>[3-6]</sup>。

随着微网工程的规模化应用,多个地域邻近的单 微网因某种需求而互联形成多微网<sup>[79]</sup>。相比于单微 网,多微网系统拓扑结构复杂,可根据各子微网组合 方案而运行于多种模式<sup>[10-12]</sup>。由于家庭侧单相微网 的接入,含单三相混合供电模式的多微网系统将成为 低压侧主流多微网电气拓扑的研究对象<sup>[13-14]</sup>。

多微网在并/离网 2 种运行模式之间的切换将 直接影响微网系统的安全稳定,因此如何保证并/离 网切换过程的暂态稳定以及满足电能质量的要求是 多微网运行控制技术的关键<sup>[15-18]</sup>。文献[19]基于三 层控制设计含 2 个微网的多微网多并网点结构,详 细阐述该多微网的 24 个运行方式的切换策略及切 换流程,并结合鹿西岛微网示范工程进行策略验 证。文献[20]考虑线路等效阻抗对微网控制的影响

收稿日期:2016-09-08;修回日期:2017-05-26

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.001

提出一种改进 V/δ 下垂控制方案,并制定适用于双 微网系统的并/离网切换控制策略。

多微网中各子微网电源类型及其装机容量、负荷重要程度及其用电量和运行目标等往往不一致。 另外,不同组合模式下的多微网特性各异,如何制定 多微网系统在多种运行组合情况下的评价指标成为 多系统互联方案决策的关键。文献[21]指出各子微 网之间出现合作运营模式的3个必要条件:存在多 个非均质子微网、子微网之间存在合作意愿以及各 子微网能够通过合作达到共同目标。文献[22]提出 基于频率稳定和备用容量调节能力的2个互联判 据,用以评估配电网故障情况下多微网的互联能力。 文献[23]提出基于全景理论的多微网聚合决策方 案,并建立了并网状态下考虑联络线功率波动的微 网能量优化模型。上述文献均基于纯三相多微网系 统进行组合分析研究,并未针对同时含单、三相的多 微网系统进行互联组合分析。

本文介绍了单三相多微网系统的拓扑结构及其 监控系统,以便于分析模式切换;当多微网系统为应 对脱离配电网情况时,即常规主动并转离,通过互联 方案预筛选得到初始方案后,基于模糊多目标决策 得到多微网互联方案;最后,考虑了系统不平衡度需 要,通过给定目标的多微网切换控制策略实现系统 的状态切换。

# 1 多微网结构

分布式光伏发电具有发电方式灵活、投资成本小、 安装维护方便、可直接安装在家庭或楼宇屋顶而不占 用额外空间等优点。将储能技术与光伏发电结合,利 用储能系统的功率调节作用,可平抑功率波动、提高

基金项目:国家科技支撑计划(2015BAA06B02);广东省科技计 划项目(2012B040303005);广东省绿色能源技术重点实验室项 目(2008A060301002)

Project supported by the National Science and Technology Support Program of China (2015BAA06B02), the Technology Planning Program of Guangdong Province (2012B040303005) and Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology (2008A060301002)

系统能效和供电可靠性。因此,以光储微网为基本单位的多微网系统可弥补光伏发电随机波动性的缺点,其系统供电可靠性和能源利用率较高。

光储型单微网由分布式光伏电源、储能、负荷、 双向计量、监控和能效管理一体化终端构成,通过控 制断路器与其他单微网串联或并联。光储型多微网 由多个邻近的光储型单微网互联互供组成,通过区 域型微电网中央控制器(RMGCC)实现各个单微网 之间的需求互补和利益最大化。

目前,多微网基本结构主要分为串联型与并联型。若所有子微网均连接在同一条联络线上,再通过公共连接点(PCC)与电网相连,即串联结构微网; 若所有子微网以并联形式与电网相连,即并联结构 微网。

本文采用的光储型多微网拓扑结构如图 1 所示。子微网 1 为三相微网,用以模拟公共负荷构成的 或者工业厂区内包括 10 kV/0.4 kV 电压等级接入的 用户侧微网;子微网 2、3、4 为单相微网,用以模拟商 业住宅楼宇与家庭小区/园区型应用场景中由各住 户构成的用户侧微网。



图 1 光储型多微网拓扑图 Fig.1 Topology of multiple PV-ESS microgrids

采用基于分层架构的微电网控制系统,按照响应速度、时间尺度和通信需求将多微网控制系统分为3层:第一层控制由 RMGCC 组成,负责调控整个多微网,保障多微网内部安全稳定运行和功率平衡; 第二层控制由微电网中央控制器(MGCC)组成,负责 子微网内控制功能的实现;第三层控制为底部控制 层,由负荷控制器、微源控制器组成。

# 2 主动并/离网切换

基于上述多微网结构拓扑,提出应对脱离配电 网情况的单三相多微网组合分析及切换控制,其总 体流程图如图2所示。多微网主动并网转离网时,联 络线功率提前调节为0,储能系统切换至恒压恒频控 制方式,能够实时适配系统对无功功率的需求,保持



0

暂态过程中系统的电压稳定。因此,本文侧重于研究 并/离网的孤岛组合以及上层切换控制策略,即有功 功率的协调控制问题,不对切换过程的电压稳定性 问题进行深入研究。

#### 2.1 多微网组合分析

单三相多微网计划性脱离配电网后,各子微网通 过互联形成组合孤岛,通过共享备用容量支援供电 能力不足的子微网,从而使得主动离网的整个多微 网系统内负荷的供电可靠性达到最大。

若某一互联组合多微网或孤立微网备用容量不 足甚至存在缺额,脱离配电网后将会对多微网的安 全稳定运行造成不利影响。由于子微网组合后整个 互联多微网系统间歇性能源容量增大,主储能将面 临着无法平抑更多间歇性能源瞬时骤降功率的风 险,此时只能采取切除次要负荷的措施以保证系统 持续稳定运行。同时,由于单三相多微网中存在多个 单相微网,有必要考虑单相子微网与三相子微网互联 时导致的三相不平衡问题。

基于此,本文以系统功率盈余指标作为预判据, 初步筛选出满足备用容量要求的互联方案,再应用 储能调节能力指标、区域主储能稳定裕度指标、最小 不平衡度指标、分区开关动作量指标进行多目标决 策,求解得到最优方案。

2.1.1 互联方案预筛选

设单三相多微网系统内有n个子微网,其中有 $n_a$ 个A相子微网、 $n_b$ 个B相子微网、 $n_c$ 个C相子微网 和 $n_3$ 个三相子微网。

根据多微网实际拓扑,共有 w 种互联组合方案。 假设第 r 种互联方案为:

{r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>, ..., r<sub>i</sub>, ..., r<sub>p</sub>, r<sub>1</sub><sup>2</sup>, r<sub>2</sub><sup>2</sup>, ..., r<sub>j</sub><sup>2</sup>, ..., r<sub>q</sub><sup>2</sup>}
 (1)
 该多微网互联组合中有 c = p + q 个区域网。其
 中, r<sub>i</sub><sup>1</sup> 为多个子微网组成的多微网互联系统; r<sub>j</sub><sup>2</sup> 为多
 微网系统中的孤立微网系统。

系统功率盈余指标既可用于描述孤立微网系统 的功率盈余情况,也可用于描述多微网互联系统的功 率盈余情况。系统功率盈余指标定义如式(2)所示。

 $p_y = (\sum P_{Gm} - \sum P_{Lm}) / \sum P_{Lm}$  (2) 其中,  $\sum P_{Gm}$  为系统内各储能额定功率与各间歇性能 源实时功率之和;  $\sum P_{Lm}$  为系统内各重要负荷与次要 负荷容量之和。 $p_y > 0$  表示该微网系统在当前条件下 发电容量大于总负荷容量,  $p_y$  越大, 备用容量越大;  $p_y < 0$  表示当前条件下发电容量小于总负荷容量。设 定  $p_{\zeta}$  作为判据阈值, 以达到互联方案预筛选的目的。 2.1.2 分区方案多目标决策

多目标决策是指在具有相互冲突、不可公度的 多个目标情况下进行的决策。通过计算不同方案下 的各个指标,形成决策矩阵,对成本型指标、效益型 指标进行归一化处理后得到相对优属度矩阵,最后 通过最优解的求解方法对各个方案进行优劣排序。 对于需要模糊处理的指标,需先建立对某个指标的 模糊集合,通过相关运算和变换,将指标值转换为自 然语言去评判某方案优劣性,融入决策矩阵的对应 位置;然后通过定义各个模糊评价对应的相对优属 度数值,与归一化处理后的非模糊指标共同形成相 对优属度矩阵。

计算各预筛选分区方案,列出决策矩阵:

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

其中,  $\{x_1, x_2, \dots, x_b\}$ 为筛选后多微网互联方案序号;  $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 为多目标决策指标。各决策指标阐述 如下。

a. 储能调节能力指标。

该指标衡量的是当系统内所有微源退出运行后 储能对重要负荷可支撑的最大运行时间。由于互联 系统中配置有多台储能,各储能系统在额定功率、额 定容量、荷电状态等参数上有所差别,因此当孤网运 行时每个储能系统的持续运行时间不同。借鉴文献 [22]所提方法计算储能系统的持续运行时间。

第*i*个多微网互联系统中,储能单元按所分配的 功率的持续运行时间为:

$$=\min(t_{ja}) \tag{4}$$

其中,*t<sub>ja</sub>为第 j* 组储能单元按所分配的功率的持续运行的时间。

每个区域微网系统均有各自的储能单元持续运行时间,列为矩阵形式为 $t_a = [t_1, t_2, \cdots, t_c]$ ,取运行时间的最小值作为分区方案的储能调节能力指标 $f_{10}$ 。

b. 区域主储能稳定裕度指标。

可再生能源的间歇性和随机性对单三相多微网 系统孤网运行能力有显著影响:由于失去外电网的 支撑作用,若可再生能源功率瞬时骤降超过区域网 内主储能的瞬时响应能力,会导致区域网电压、频率 大范围骤降。为描述区域主储能响应能力,提出区 域主储能稳定裕度指标,表达式如下:

$$f_2 = \frac{P_{\text{BS\_VF}} - 0.1 \sum P_{\text{Lm}}}{\sum P_{\text{PVn}} + \lambda}$$
(5)

其中,P<sub>IS\_VF</sub>为主储能额定功率;∑P<sub>IVn</sub>为光伏总实时 出力。该指标可描述在考虑负荷波动 10%的情况下 区域主储能能瞬时承受的网内光伏功率骤降的程 度。为避免光伏出力为0导致指标分母为0,实际计 算过程中在分母中引入一个小正数 $\lambda$ ,本文 $\lambda$ 取 0.1。

每个区域微网系统均有各自的区域主储能稳定 裕度,取其最小值作为分区方案的区域主储能稳定 裕度指标。

c. 最小不平衡度指标。

对于采用主从控制结构的单三相多微网系统, 系统内三相不平衡严重时会对系统运行造成不利影 响,因此有必要对该指标做出一定限制<sup>[24]</sup>。根据文献 [25],三相不平衡度计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{I_2}{I_1} = \frac{S_{L2}}{S_L}$$
(6)  

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

其中, $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 和 $Q_A$ 、 $Q_B$ 、 $Q_C$ 分别为A、B、C相的有功 功率和无功功率; $I_1$ 为三相电流的正序分量均方根 值; $I_2$ 为三相电流的负序分量均方根值。

计算该指标时,需通过考量各单相储能对其不平 衡度的最大贡献值,以使其不平衡度最小,在此,通 过具有较强避免局部极值的快速自适应权重粒子群 优化(APSO)算法<sup>[26]</sup>计算最小不平衡度。

每个区域微网系统均有各自的最小不平衡度, 取其最大值作为分区方案的最小不平衡度指标 f<sub>3</sub>。

d. 分区开关动作量指标。

对于不同分区方案,多微网系统所需操作的并/离 网切换开关数量有所不同,为降低操作失误风险及减 少切换时间,分区方案中所需操作的开关动作数量 应尽量少。定义分区方案所需开关动作数指标如式 (8)所示。

$$f_4 = \frac{\omega_1}{\omega} \tag{8}$$

其中,ω<sub>1</sub>为分区方案所需开关动作数;ω为各子微网 均离网运行时需要操作的开关动作数。

对决策矩阵进行归一化,形成目标相对优属度矩阵。储能调节能力指标和区域主储能稳定裕度指标 属于效益型指标,采用式(9)确定目标相对优属度。

$$\mu_{ij} = \left[ f_{ij} / (f_{imax} + f_{imin}) \right]^{p_i}$$

$$f_{imax} = \max_{j=1,2,\cdots,n} (f_{ij})$$

$$f_{imin} = \min_{i=1,2,\cdots,n} (f_{ij})$$
(9)

其中, $\mu_{ij}$ 为相对优属度; $p_i$ 为决策者设定的参数,取  $p_i=1; f_{imax}$ 和 $f_{imax}$ 分别为指标 $f_i$ 的最大值和最小值。

为凸显各方案最小不平衡度指标在相对优属度 矩阵中的差异性,选用模糊方法进行处理。模糊评判 为:最小不平衡度指标小于 0.05 为极好,大于 0.05 且小于 0.15 为好,大于 0.15 且小于 0.5 为中,大于 0.5 为差。其对应相对优属度分别为 1、0.9、0.6、0.4。

分区开关动作量属于成本型指标,采用式(10)确 定目标相对优属度。

 $\mu_{ij} = \left[ 1 - f_{ij} / (f_{imax} + f_{imin}) \right]^{p_i} \tag{10}$ 

其中, $p_i$ 为决策者设定的参数,分区开关动作量指标中取 $p_i=0.5$ 。

最终可得相对优属度矩阵如下:

 $x_1$   $x_2$   $x_3$   $x_4$   $\cdots$   $x_b$  $\mu_{11} \ \mu_{12} \ \mu_{13} \ \mu_{14} \ \cdots \ \mu_{1b}$  $f_1$  $\mu_{21} \ \mu_{22} \ \mu_{23} \ \mu_{24} \ \cdots \ \mu_{2b}$  $f_2$  $f_3$  $\mu_{31} \ \mu_{32} \ \mu_{33} \ \mu_{34} \ \cdots \ \mu_{3b}$ **µ** = (11) $\mu_{41}$   $\mu_{42}$   $\mu_{43}$   $\mu_{44}$   $\cdots$   $\mu_{4b}$  $f_4$ : : : : ÷ ÷  $\mu_{n1}$   $\mu_{n2}$   $\mu_{n3}$   $\mu_{n4}$   $\cdots$   $\mu_{nb}$  $\int f_n$ 

其中,0≤µ<sub>ii</sub>≤1。

最后,将多目标决策问题变换为单目标数学规 划问题。权重 $A = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$ 与目标相对优属度矩 阵 $\mu$ 进行加权求值,得出微网互联能力评价系数:  $M_j = \alpha_1 \mu_{1j} + \alpha_2 \mu_{2j} + \dots + \alpha_n \mu_{nj}$ 。取微网互联能力评价系 数最高的方案作为最终决策方案。

#### 2.2 切换控制过程

针对给定目标状态的互联方案,在主动离网过程中,为保证各区域微网的等效并/离网切换开关有序 开断,需预先制定区域微网系统切换顺序方案。根据 切换顺序依次执行区域微网联络线功率调节算法, 当联络线功率小于设定值时断开对应的并/离网切 换开关,同时使该区域主储能系统切换至 V/f 控制 模式。确认该区域微网系统进入离网运行模式后,再 进行下一个区域微网系统的并/离网切换,直至所有 区域微网系统完成并转离切换。

2.2.1 区域微网系统切换顺序方案

切换顺序优先级按以下2个原则安排。

**a.** 越靠近多微网系统末端的区域微网系统切换 优先级越高。

区域微网与配电网之间的并/离网切换开关数 越多,则认为该区域微网越靠近末端。主动并网转离 网切换之前,需要进行多微网内部的源荷功率调节 使得源荷功率平衡,以保证开关切换时通过开关的 联络线功率接近于0。一般而言,相比于联结配电网 的主联络线,多微网末端联络线功率较小,参与联络 线功率调节的源荷数量也较少。

**b.** 若多个区域微网靠近末端的程度相同时,区 域微网容量越小的优先级越高。

区域微网靠近末端的程度相同是指该区域微网 与配电网之间的并/离网切换开关数量相同。该情况 下应用原则 a 无法判断开关切换顺序。

4

其中.s.为

基于以上2个原则,根据具体多微网系统拓扑及 分区方案,可制定并离网开关切换顺序为:

$$\{s_1, s_2, \cdots, s_k, \cdots, s_b\}$$
 (12)  
第  $k$  个并离网开关。

2.2.2 区域微网系统联络线功率调节

对于每个区域微网系统主动离网的联络线功率 调节,其算法目标包括保证所有单相子微网的联络 线功率不平衡度在可接受范围内,以及切换瞬间联 络线功率接近于0。

三相微网联络线功率调节的目的是将区域微网 系统的联络线功率调至接近 0,以减少并网转离网瞬 间时系统功率失衡导致的电压和频率波动。若区域 微网系统内有多个三相微电网,由于单个储能的容 量有限,在调节联络线功率时,需要协调多个三相储 能进行联络线控制。区域微网系统联络线功率调节 的算法流程图如图 3 所示。



#### 图 3 区域微网系统联络线功率调节算法流程图 Fig.3 Flowchart of tie-line power regulation for regional microgrid system

## 2.3 各层控制器之间的配合

本文所提的单三相多微网主动并网转离网切换 控制包括组合分析、切换过程控制两大模块。其中组 合分析模块在 RMGCC 中完成,切换过程控制则由 RMGCC 和各个 MGCC 协调完成。

RMGCC 接收到主动并网转离网指令后,根据从 各个 MGCC 收集到的子微网源荷储实时信息以及配 置信息,进行互联决策及切换顺序决策。根据互联决 策结果,RMGCC 指定各个区域微网中的最上层子微 网 MGCC 管控相应区域微网,并按切换顺序向各个区 域微网的最上层子微网 MGCC 发送离网指令。若 本轮为区域微网 h 进行联络线功率调节,则对应的 MGCC 接收到 RMGCC 发送的离网指令后,以 RMGCC 作为中继站,收集区域微网 h 中子微网的源荷储实时 信息和配置信息,并计算各个分布式电源的出力设置 值,将计算结果上传至 RMGCC 进行统一分发,区域 微网 h 中各个 MGCC 接收到 RMGCC 的遥调指令 后,向底部控制层的控制器发送调节指令。当 RMGCC 检测到区域微网出口联络线功率值接近于 0 时,向 联络线开关发送分闸命令,该联络线开关断开后,区 域微网 h 主电源切换至 V/f 控制模式,区域微网 h 进 入孤岛运行模式。

#### 3 仿真验证

#### 3.1 工况数据

以某家庭小区型多微网为例,针对2种典型工况 对单三相多微网组合分区以及切换控制进行验证分 析,其拓扑如图1所示。

工况1模拟的是家庭小区型单三相多微网间歇 性可再生能源出力正常的情况,源荷基本情况如表 1所示。工况2模拟的是间歇性可生能源出力为0 而网内负荷较大的极端情况。该工况下光伏实时出 力为0,源荷基本情况如表2所示。实际工程中,三 相负荷可能存在不平衡的情况,三相负荷功率不平 衡与各单相子微网联络线功率不平衡对系统的影响 叠加后,会集中体现在主电源三相功率不平衡上,但 这不影响最小不平衡度指标的计算方法。这种情况 与3个单相子微网造成的不平衡是相近等效的.因 此不考虑三相子微网中的三相负荷不平衡的情况。 另外,由于主动并网转离网为计划性离网,联络线开 关断开前联络线功率已调整为0,在开关断开的同时 主电源切换至 V/f 控制,因此相对于被动离网而言, 主动离网的切换过程中各联络线电压、频率基本无 波动,因此可不必考虑系统内部多种负荷的不同特 性对系统暂态稳定的影响。

表1 工况1各子微网基本情况

1	able I Pa	rameters o	1 microgrie	is for Cas	e i
子微网	光伏实时 出力/kW	负荷实时 功率/kW	储能额定 功率/kW	储能荷电 状态/%	储能容量/ (A•h)
1	30	15.6	[-30,30]	80	70
2	9	3.6	[-10,10]	75	20
3	5	1.8	[-4,4]	70	15

表 2 .	工况 2	各子微网	基本情况
-------	------	------	------

[-5.5]

30

15

Table 2	Parameters	of	microgrids	for	Case	2
						_

3.0

			-		
子微网	光伏实时 出力/kW	负荷实时 功率/kW	储能额定 功率/kW	储能荷电 状态/%	储能容量/ (A·h)
1	0	20	[-30,30]	70	70
2	0	5	[-10,10]	75	20
3	0	3	[-4,4]	70	15
4	0	8	[-5,5]	75	15

#### 3.2 结果分析

4

7

基于 MATLAB2012a 进行编程验证,表 3 为 2 种

#### 表 3 多微网分区方案计算结果

Table 3 Calculative results of partition schemes

士安	分区			工ど	ቲ 1					工改	七 2		
刀杀	情况	$p_y$	$f_1 / h$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$M_j$	$p_y$	$f_1 / h$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$M_j$
1	1,2,3,4	1.9500	1.2080	0.8889	0	0.2500	0.7463	0.3722	0.9950	113.5000	0.0003	0.2500	0.6016
2	1,3,4	1.6194	1.3260	0.8507	0	0.500.0	0.7339	0.2677	1.1570	119.6667	0.1030	0.500.0	0.6020
Z	2	5.3667	3.7300	1.0659	0	0.3000		1.0200	2.2370	95.0000	0	0.3000	0.0029
2	1,2,4	2.0433	1.3700	0.9071	0	0.500.0	0.7035	0.3727	1.0860	139.0000	0.1030	0.500.0	0 562 4
5	3	1.2500	1.9590	0.7200	0	0.5000		0.3667	2.6130	37.0000	0	0.3000	0.3034
4	1,2,3	2.2667	1.5240	0.9344	0	0.500.0	0 622 2	0.5821		—	—		
	4	0.7286	0.4760	0.6056	0	0.3000	0.6333	-0.3625		—	—	_	_
	1,4	1.6741	1.5240	0.8683	0	0.7500	0.6951	0.2571	1.2820	161.0000	0.1272		
5	2	5.3667	3.7300	1.0659	0			1.0200	2.2370	95.0000	0	0.7500	0.5883
	3	1.2500	1.9590	0.7200	0			0.3667	2.6130	37.0000	0		
	1,3	1.8792	1.7150	0.9003	0	0.7500	0.5978	0.4870		—	—		
6	2	5.3667	3.7300	1.0659	0			1.0200		—	—	—	—
	4	0.7286	0.4760	0.6056	0			-0.3625		—	—		
	1,2	2.4435	1.7900	0.9617	0			0.6080		—	—		
7	3	1.2500	1.9590	0.7200	0	0.7500	.7500 0.5978	0.3667		—	—	—	—
	4	0.7286	0.4760	0.6056	0			-0.3625	—	—	_		
	1	2.0050	2.0610	0.9302	0			0.5050		—	—		
0	2	5.3667	3.7300	1.0659	0	1 000 0	1.0000 0.5514	1.0200		—	—		
0	3	1.2500	1.9590	0.7200	0	1.0000		0.3667	—	—	_	_	_
	4	0.7286	0.4760	0.6056	0			-0.3625	_	_	_		

典型工况下单三相多微网组合分析计算结果。表中,  $p_y, f_2, f_3, f_4, M_j$ 为标幺值。

工况 1:当多微网 MGCC 接受到主动离网指令后,进行分区方案决策。通过判定各区域微网的系统 盈余指标进行分区方案预筛选,计算得所有分区系 统功率盈余指标均大于 0,即预选分区方案为 1、2、3、 4、5、6、7、8。

计算 8 种预选分区方案各互联指标,得到优属度 矩阵如下:

	0.5150	0.5759	1.0000	0.8944	Т
μ=	0.6066	0.5545	1.0000	0.7746	
	0.5571	0.4825	1.0000	0.7746	
	0.3345	0.4241	1.0000	0.7746	(12)
	0.6655	0.4825	1.0000	0.6325	(13)
	0.3345	0.4241	1.0000	0.6325	
	0.3345	0.4241	1.0000	0.6325	
	0.3345	0.4241	1.0000	0.4472	

该工况下目标相对优属度权重为 0.25:0.25: 0.25:0.25,由目标相对优属度矩阵可得分区方案评价 系数。决策结果是方案 1>方案 2>方案 3>方案 5>方 案 4>方案 6=方案 7>方案 8,因此该工况下选择方 案 1,子微网 1,2,3,4 互联作为分区组合。

该工况下,给定分区决策目标后的主动并网转离 网切换过程的仿真波形如图 4 所示。图中, $p_{1,\text{ls}}$ , $p_{2,\text{ls}}$ ,  $p_{3,\text{ls}}$ , $p_{4,\text{ls}}$ 分别为子微网 1、2、3、4 的储能功率; $p_{1,\text{net}}$ 、  $p_{2,\text{net}}$ , $p_{3,\text{net}}$ , $p_{4,\text{net}}$ 和 TPU 分别为子微网 1、2、3、4 的联 络线功率和系统的三相不平衡度。

t∈[0,0.7]s时,单三相多微网系统并网运行,各



子微网均向外送电,其中单相子微网2、3、4联络线

功率分别为 1.1 kW、1.2 kW、2.0 kW, 三相子微网 1 的 联络线功率为 8.9 kW。通过组合分析确定多微网系 统离网后子微网 1、2、3、4 组合成大孤岛系统运行, 因此本次主动并网转离网所需操作的开关为子微网 1 并/离网切换开关。

t € [0.7,0.9] s 时,各单相子微网通过限制储能出 力以减小三相不平衡度,调节子微网 2、3、4 储能充电 功率至 5.05 kW、3.2 kW、4.0 kW,使各单相子微网联 络线功率均为 0 左右。调节单相子微网联络线功率 后,子微网 1 联络线向配电网供电功率为 4.4 kW 左 右,多微网系统与配电网之间仍存在较大的联络功率。

t € [0.9,1.25] s 时,子微网 1 三相储能系统开始 调节充电功率至 14.4 kW,使子微网 1 联络线功率下 降至接近于 0。

*t*=1.25 s 时操作对应并/离网切换开关断开,同时三相主储能系统由原并网状态时的 PQ 控制模式 切换至 V/f 控制模式,主动并转离网切换结束。

工况 2:当多微网 MGCC 接受到主动离网指令 后,进行分区方案决策。通过判定各区域微网的系统 盈余指标进行分区方案预筛选,计算得子微网 4 单 独作为分区时的系统功率盈余指标为 -0.3625,即 该分区方案下电源无法满足负荷供电需求,因而在预 筛选步骤中排除分区方案 4、6、7、8,预选分区方案为 1、2、3、5。

计算预选4种预选分区方案各互联指标,得相对 优属度矩阵如式(14)所示。

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} 0.4370 & 0.5081 & 0.4769 & 0.5630 \\ 0.7542 & 0.6312 & 0.2458 & 0.2458 \\ 1.0000 & 0.9000 & 0.9000 & 0.9000 \\ 0.8660 & 0.7071 & 0.7071 & 0.5000 \end{bmatrix}$$
(14)

该工况下目标相对优属度权重为 0.65:0.05: 0.15:0.15,由目标相对优属度矩阵可得分区方案评价 系数,得出方案 2>方案 1>方案 5>方案 3 的结论, 因此该工况下选择方案 2,子微网 1、3、4 互联,子微 网 2 独立运行作为最终的分区组合。

工况 2 下并转离网切换控制过程的仿真波形如 图 5 所示。

 $t \in [0,0.7] s$ 时,单三相多微网系统并网运行,系统内光伏均不出力,各子微网对外呈现为受端负荷,其中各单相子微网联络线功率分别为 6 kW、5 kW、6 kW。通过所确定的互联方案可确定离网所需操作的开关为子微网 1 和子微网 2 的并/离网切换开关。  $t \in [0.7,0.95] s$ 时,子微网 2 单相储能系统开始调节 其发电功率从原来的 -1 kW 至 5 kW,使子微网 2 联 络线功率下降至接近于 0。t = 0.95 s 时操作对应的 并/离网切换开关至断开状态,同时单相主储能系统由 PQ 模式切换至 V/f 模式。



 $t \in [0.95, 1.1]$ s时,子微网3和4通过调节储能 出力以减小三相不平衡度,子微网3、4的储能功率 分别调节至0、5kW。单相储能调节后子微网3、4的 联络线功率均为3kW左右,此时配电网流向多微网 系统的功率为16kW,多微网系统与配电网之间仍 存在强联络。

t € [1.3,1.5] s 时,子微网1三相储能系统调节 发电功率至26 kW,使三相子微网1联络线功率下 降至接近于0。

*t*=1.5 s 时操作对应并/离网切换开关至断开状态,同时三相主储能系统由原并网状态时的 PQ 控制模式切换至 V/f 控制模式,主动并网转离网切换结束。

# 4 结语

随着各类微网规模化应用,互联而形成单三相 多微网系统,运行方式灵活,针对其应对脱离配电 网情况的互联方案决策及状态切换,本文开展了相 关的研究工作。介绍了单三相多微网系统拓扑结构; 当多微网系统为应对脱离配电网情况时,即常规主 动并转离,通过互联方案预筛选得到初始方案后,基 于模糊多目标决策得到多微网互联方案;最后,通过 给定目标的多微网切换控制策略以实现系统状态切 换。所提策略经算例验证可行,为多微网切换控制 技术提供建议性方案。

#### 参考文献:

- [1] HARTONO B S, BUDIYANTO Y, SETIABUDY R. Review of microgrid technology[C]//International Conference on QiR(Quality in Research). Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2013:127-132.
- [2] 赵卓立,杨苹,蔡泽祥,等. 含风电孤立中压微电网暂态电压稳定 协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):1-9.
  ZHAO Zhuoli,YANG Ping,CAI Zexiang,et al. Cooperative control of transient voltage stability for islanded medium-voltage microgrid with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(10):1-9.
- [3] 支娜,肖曦,田培根,等. 微网群控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):107-115.
   ZHI Na,XIAO Xi,TIAN Peigen, et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation
- Equipment,2016,36(4):107-115. [4] 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.

WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

[5] 马艺玮,杨苹,吴捷. 含多分布式电源独立微电网的混合控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(11):103-109.
 MA Yiwei,YANG Ping,WU Jie. Hybrid control strategy of

islanded microgrid with numerous distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11):103-109.

- [6] HE M,GIESSELMANN M. Reliability-constrained self-organization and energy mangement towards a resilient microgrid cluster[C]// Innovative Smart Grid Technologies Conference(ISGT). Washington DC,USA:IEEE,2015:1-5.
- [7] 马艺玮,杨苹,王月武,等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):168-175.

MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8):168-175.

- [8] 周永智,吴浩,李怡宁,等. 基于 MCS-PSO 算法的邻近海岛多微 网动态调度[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):204-210.
  ZHOU Yongzhi,WU Hao,LI Yining,et al. Dynamic dispatch of multi-microgrid for neighboring islands based on MCS-PSO algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(9): 204-210.
- [9] 徐俊,邹媛媛,牛玉刚. 基于递阶预测控制的多微电网系统能量 管理[J]. 系统仿真学报,2014,26(4):910-914.
   XU Jun,ZOU Yuanyuan,NIU Yugang. Hierarchical model predictive control for energy management optimization of multi-microgrids

system[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(4):910-914. [10] 江润洲,邱晓燕,李丹. 基于多代理的多微网智能配电网动态博

弈模型[J]. 电网技术,2014,38(12):3321-3327. JIANG Runzhou,QIU Xiaoyan,LI Dan. Multi-agent system based dynamic game model of smart distribution network containing multi-microgrid[J]. Power System Technology,2014,38(12): 3321-3327.

[11] 丛伟,荀堂生,肖静,等. 包含多微网的配电系统故障检测算法 [J]. 电力自动化设备,2010,30(7):50-53.

CONG Wei,XUN Tangsheng,XIAO Jing, et al. Faulty section detection algorithm for distribution system with multi microgrids [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7): 50-53.

[12] 何祥兴. 含多微网的配电网优化调度研究[D]. 长沙:湖南大学, 2014.

HE Xiangxing. Study on the optimal dispatching for distribution network with multi-microgrids[D]. Changsha;Hunan University, 2014.

- [13] 丁明,马凯,毕锐. 基于多代理系统的多微网能量协调控制[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(24):1-8.
  DING Ming,MA Kai,BI Rui. Energy coordination control of multi-microgrid based on multi-agent system[J]. Power System Protection and Control,2013,41(24):1-8.
- [14] 赵敏,沈沉,刘锋,等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(4):848-857.
  ZHAO Min,SHEN Chen,LIU Feng,et al. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(4):848-857.
- [15] 陈杰,陈新,冯志阳,等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换 控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3089-3097. CHEN Jie,CHEN Xin,FENG Zhiyang,et al. A control strategy of seamless transfer between grid-connected and islanding operation for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34 (19):3089-3097.
- [16] 刘志文,夏文波,刘明波. 基于复合储能的微电网运行模式平滑 切换控制[J]. 电网技术,2013,37(4):906-913.
  LIU Zhiwen,XIA Wenbo,LIU Mingbo. Control method and strategy for smooth switching of microgrid operation modes based on complex energy storage[J]. Power System Technology, 2013,37(4):906-913.
- [17] 张雪松,赵波,李鹏,等. 基于多层控制的微电网运行模式无缝 切换策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):179-199.
  ZHANG Xuesong,ZHAO Bo,LI Peng,et al. Seamless switching strategies for microgrid based on multi-layer control architecture
  [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):179-199.
- [18] 郑竞宏,王燕廷,李兴旺,等. 微电网平滑切换控制方法及策略
  [J]. 电力系统自动化,2011,35(18):17-24.
  ZHENG Jinghong,WANG Yanting,LI Xingwang,et al. Control methods and strategies of microgrid smooth switchover[J].
  Automation of Electric Power Systems,2011,35(18):17-24.
- [19] 李鹏,张雪松,赵波,等. 多微网多并网点结构微网设计和模式 切换控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):172-178.
  LI Peng,ZHANG Xuesong,ZHAO Bo, et al. Structural design and mode switching control strategies of multi-microgrid with several PCCs[J]. Automation of Electric Power Systems,2015, 39(9):172-178.
- [20] 杨刚,杨奇逊,张涛,等. 基于分层控制的多微网并网/解列运行 控制策略[J]. 电力系统自动化,2016,40(5):96-101. YANG Gang,YANG Qixun,ZHANG Tao,et al. A control strategy for multi-microgrid connection /disconnection operation based on hierarchical control[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(5):96-101.

8

[21] 赵敏,陈颖,沈沉,等. 微电网群特征分析及示范工程设计[J].
 电网技术,2015,39(6):1469-1476.
 ZHAO Min,CHEN Ying,SHEN Chen, et al. Characteristic

ZHAO Min, CHEN Ying, SHEN Chen, et al. Characteristic analysis of multi-microgrids and a pilot project design[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1469-1476.

[22]于雷,陈奇芳,段力铭,等.配电网故障情况下多微网互联能力 分析[J].电网技术,2015,39(3):682-689.

YU Lei, CHEN Qifang, DUAN Liming, et al. Analysis on interconnectivity of multi-microgrids under fault condition of distribution network [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 682-689.

[23] 徐意婷,艾芊. 基于全景理论的多微网聚合优化运行[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(16):50-56.
 XU Yiting,AI Qian. Optimal operation of multi-microgrid aggregation based on landscape theory[J]. Power System Protection

and Control,2015,43(16):50-56. [24] 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]// 第七届电能质量研讨会论文集. 成都.中国,全国电压电流等

级和频率标准化技术委员会,2014:409-414.

[25] 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. 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.

 [26] 刘世成,张建华,刘宗岐.并行自适应粒子群算法在电力系统无 功优化中的应用[J].电网技术,2012,36(1):108-112.
 LIU Shicheng,ZHANG Jianhua,LIU Zongqi. Application of

parallel adaptive particle swarm optimization algorithm in reactive power optimization of power system[J]. Power System Technology,2012,36(1):108-112.

#### 作者简介:



许志荣(1989—),男,广东汕头人,博士 研究生,研究方向为多微电网控制(E-mail: 407849739@qq.com);

杨 苹(1967—),女,广西钦州人,教 授,博士研究生导师,博士,研究方向为新能 源发电及并网控制技术(E-mail:eppyang@ gmail.com)。

# Combination analysis and switching control of multiple single/three phase microgrids for active separation from distribution network

XU Zhirong<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>2</sup>, PENG Jiajun<sup>1</sup>, ZHANG Yujia<sup>1</sup>, SONG Sibo<sup>1</sup>, ZHAO Zhuoli<sup>3</sup>

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

2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology,

Guangzhou 511458, China; 3. National-Local Joint Engineering Laboratory for Wind Power Control

and Integration Technology, South China University of Technology, Guangzhou 511458, China)

**Abstract**: Because of being close to each other, multiple single-phase and three-phase microgrids are interconnected to form a combination of single/three phase microgrids, and the flexible seamless switching of its microgrids becomes more urgent due to its complicated operating modes. Its topology is introduced. The preliminary partition schemes are selected for its active separation from the distribution network, and the fuzzy multi-objective decision-making is applied to obtain the optimal partition scheme, according to which, the seamless switching of system states is conducted. Case study indicates that, the proposed method is feasible, which provides a suggestive scheme for the switching control of multiple single-phase and three-phase microgrids.

Key words: multi-microgrids; single/three phase; grid connection/disconnection switching; combination analysis