

配网故障情况下单三相多微网平滑切换控制

杨 苹^{1,2}, 彭嘉俊¹, 许志荣², 曾智基², 张育嘉², 郑群儒²

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

Mode Transition Strategy for Three-phase/Single-phase Multi-microgrids Under Fault Condition of Distribution Network

YANG Ping^{1,2}, PENG Jiajun¹, XU Zhirong², ZENG Zhiji², ZHANG Yujia², ZHENG Qunru²

(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)

摘 要: 配网故障情况下, 多微网平滑切换至区域自治状态是多微网稳定运行的关键技术之一。提出一种基于集散式的非计划并网转离网切换策略: 首先各子微网在多微网并网开关切断的同时, 采用分散自治控制策略以减轻主电源出力负担; 接着, 在考虑单三相多微网不平衡度约束的情况下, 通过基于改进型快速粒子群算法对光伏及负荷出力及接入情况进行混合整数规划, 以实现负荷和光伏的集中式恢复。仿真结果表明, 所提的集散式控制策略可有效实现单三相多微网在配网故障情况下由并网状态切换至离网状态的无缝平滑过渡。

关键词: 多微网; 单三相; 集散式控制; 三相不平衡

Abstract: When the fault occurs in distribution network, it is critical for stability operation of multi-microgrids (MMGs) to transit seamlessly to regional autonomy state. In this paper, the passive-to-islanding transition strategy is proposed based on centralized-distributed control. At first, when the static switcher of multi-microgrid switches off, the decentralized autonomous control is executed in each sub-microgrid immediately to reduce the power delivered by main power sources. Then, the power output of loads and photovoltaic sources are allocated based on mixed integer programming obtained by using fast particle swarm algorithm, and are recovered centrally. In the end, the simulation result indicates that the proposed strategy can achieve the seamless switching for three-phase/single-phase MMGs under the fault condition of distribution network.

Keywords: multi-microgrids; three-phase/single-phase; centralized-distributed control; three-phase unbalance

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2014AA052001); 国家科技支撑计划(2015BAA06B02); 广东省科技计划项目(2013B090200010)

0 引 言

多微网是指由多个在电气距离上彼此邻近的单微电网互联形成的复杂智能发配电系统, 是微电网发展的必然产物^[1-4]。随着微电网的推广与应用, 含单、三相混合供电制式的多微网逐渐进入研究视野^[5-7]。

公共连接点 (point of common coupling, PCC) 是多微网与上级配电网系统联系的纽带^[8-9]。由于多微网内电力负荷种类繁多且负荷容量大, 因此相对于单微网而言, 多微网与配电网间的联络线功率更大。一旦配电网发生严重故障或 PCC 处的静态开关直接跳闸, 网内功率不平衡将导致多微网中主电源负担过重, 而使母线电压和频率失控。因而, 多微网 PCC 处的静态开关非计划断开将直接打破系统的稳定性, 如何确保单三相多微网在该过程的暂态稳定以及重要负荷可持续运行是关键问题。

针对微电网非计划性孤岛切换控制, 国内外学者展开了相应的研究^[8-15]。针对单微电网, 文献 [8] 提出一种基于主从控制的微电网并网切换至离网的切换策略, 并采用分区域控制策略减小非计划离网造成的功率缺额。文献 [9] 提出一种无缝切换混合控制策略和相应的控制逻辑, 通过变换控制参数, 使得主储能在下垂控制或 V/f 控制之间完成切换。文献 [10] 针对并网静态开关切换的时滞问题, 提出一种改进的并网下垂单模式切换方法, 实现切换前后控制指令的平滑过渡。文献 [11] 将虚拟同步发电机技术应用于微电网, 提出逆变器的

模式切换策略,并通过实例仿真验证所提方法。文献[12]提出一种考虑并网开关动作时间与控制指令的时序配合的多微网并离网切换策略。

目前,以多微网作为研究对象的非计划并离网切换控制技术仍处于起步阶段。文献[13]为量化评估配电网故障情况下的多微网互联能力,提出了结合频率稳定和备用容量调节能力的互联判据指标。文献[14]详细介绍了鹿西岛微网示范工程的结构设计以及运行策略,并提出该多微网具备24种运行方式,提出相应的模式切换流程。上述文献均是以三相多微网作为研究对象对非计划孤岛切换控制策略进行研究,而随着单相微电网的介入,策略必将考虑单三相多微网的独特特征。文献[15]提出便于工程实现的单三相多微网切换策略,多微网被动离网后立刻切除多微网内所有次要负荷且不考虑三相不平衡度,负荷切除后对储能进行调节,对光伏进行限制,侧重于工程实现,未涉及智能算法。

为应对配网故障,本文提出一种基于集散式的单三相多微网平滑切换控制策略:首先各子微网在多微网并离网开关切断的同时,采用分散自治控制策略以减轻主电源出力负担;接着,在考虑单三相多微网不平衡度约束的情况下,通过基于改进型快速粒子群算法对光伏及负荷出力及接入情况进行混合整数规划,以实现集中式恢复。

1 基于混联结构的单三相多微网

本文所研究的单三相多微网由4个子微网组成,如图1所示。其中子微网1为三相子微网,子微网2、3、4分别为A相子微网、B相子微网和C相子微网。各单相子微网通过其PCC处的单相静态开关接入三相子微网的各相母线,三相子微网通过PCC处的三相静态开关接入配电网。因此,三相子微网与各个单相子微网之间属于串联结构,各单相子微网之间属于并联结构关系。

采用三层控制架构:集中控制层、子微网控制层以及就地控制层。其中集中控制层由区域性微电网中央控制器(regional microgrid central controller, RMGCC)组成;子微网控制层由各个微电网中央控制器(microgrid central controller, MGCC)组成,就地控制层由微源控制器(micro-source controller, MC)、负荷控制器(load controller, LC)等组成。

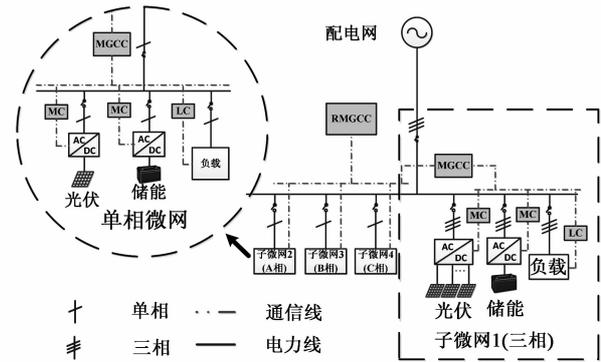


图1 基于混联结构的单三相多微网拓扑

2 微网运行裕度

文献[16]提出孤岛稳定裕度指标用于评估孤岛运行状态。基于此思想,规定微网 i 备用裕度(P_{MGi}^+ , P_{MGi}^-),用于描述子微网 i 并离网过程中的有功备用裕度。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。 P_{MGi}^+ 与 P_{MGi}^- 的计算公式如下所示:

$$\begin{cases} P_{MGi}^+ = P_{Ndisc, MG_i, BS} - P_{MG_i, BS} \\ P_{MGi}^- = P_{MG_i, BS} - P_{Nchar, MG_i, BS} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{Ndisc, MG_i, BS}$ 、 $P_{Nchar, MG_i, BS}$ 分别为子微网 i 储能的额定放电功率和额定充电功率; $P_{MG_i, BS}$ 为微网 i 储能的实时功率。

规定微网运行裕度指标 K_{pMGi} ,如式(2)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。当 $P_{MGi}^+ \geq 0$ 且 $P_{MGi}^- \leq 0$ 不满足时, P_{MGi}^- 的符号取负,其余情况取正。

$$K_{pMGi} = \min(P_{MGi}^+, \pm |P_{MGi}^-|) \quad (2)$$

3 被动离网切换策略

针对单三相多微网,为尽可能削弱其非计划并网转离网切换过程的暂态冲击,维持网内重要负荷的不间断供电,本文提出一种基于集散式的单三相多微网非计划并转离切换控制策略,总体控制流程如图2所示。考虑并网运行状态下多微网指定上层微网的三相储能系统通过充放电保持其荷电状态处于正常范围,这使得发生并转离时直接将该三相储

能系统作为应急主电源进行模式切换成为可能。

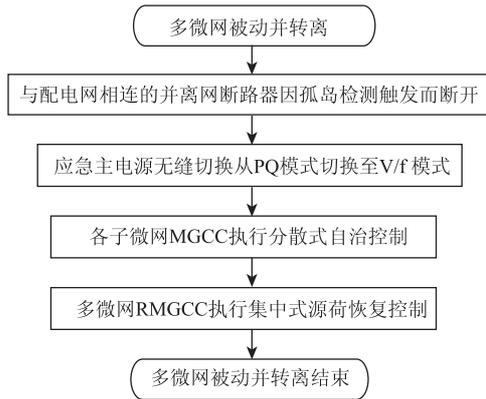


图 2 基于集散式的单三相多微网非计划并转离切换控制策略算法流程图

在理想状态下，当单三相多微网 PCC 处的静态开关跳闸瞬间，应将应急三相主电源从并网状态下的 PQ 控制模式切换至 V/f 控制模式，以快速平衡被动离网造成的多微网功率缺额。然后 RMGCC 执行各子微网分别进行分散式自治控制，限制子微网联络线功率为零，以减少主电源的切换负担。各子微网自治控制可能切出次要负荷或限制光伏出力，在满足各种约束条件下通过集中式源荷恢复控制算法进行源荷的最大化恢复，最终进入离网运行模式。以下将详细阐述分散式自治控制算法以及集中式源荷恢复控制算法。

3.1 分散式自治控制

为快速减轻多微网被动离网后主电源的切换负担，提出各子微网分散式自治控制算法。该算法以控制子微网联络线功率至零作为控制目标，以微网运行裕度作为负荷切出的判据，辅助子微网发电侧功率调节控制。该算法在各个子微网 MGCC 中并行计算，简单快速，并尽可能降低了主电源出口三相电流不平衡程度。子微网分散式自治控制流程如图 3 所示。

由于微网 i 的稳定裕度 K_{pMGi} 考虑了储能可调节容量，因此通过判断 K_{pMGi} 的正负可判断当前源荷配置情况下微网 i 是否具备调节联络线功率至零的能力，若微网 i 当前运行状态允许调节联络线功率置零，则可通过调节发电侧功率使该微网联络线功率至零；若微网 i 当前运行状态不允许调节联络线功率置零，则通过切负荷操作使微网 i 满足上述条件，进而调节发电侧功率使该微网联络线功率至零。各子微网分散自治控制的具体实现步骤如下。

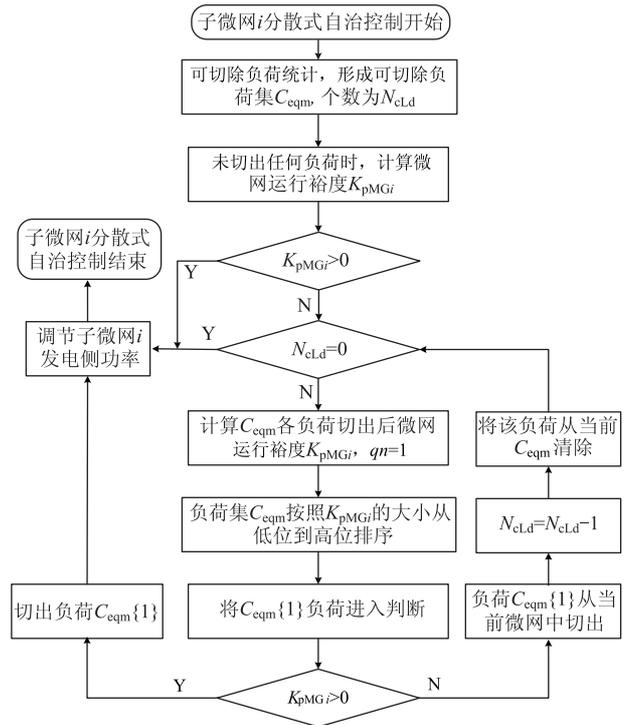


图 3 子微网分散式自治控制算法流程图

步骤 1：RMGCC 从各个子微网 MGCC 中获取多微网内的负荷信息，将各个接入微网的非重要负荷作为可切出负荷汇总形成可切出负荷集 C_{eqm} 。假定每个子微网均有接入非重要负荷，即可切出负荷集 C_{eqm} 的元素个数 $N_{cLd} \geq 1$ 。

步骤 2：计算未切出任何负荷时，微网运行裕度 K_{pMGi} 。若此时 K_{pMGi} 大于零，则表示微网只需要通过调节发电侧功率即可将联络线功率下降至零；若 K_{pMGi} 小于零，则表示在不切负荷的情况下，仅通过调节发电侧功率无法将联络线功率调节为零。

步骤 3：若 K_{pMGi} 小于零，且目前仍有负荷可切出，则进入切出负荷判断。

步骤 4：计算 C_{eqm} 各负荷 $C_{eqm} \{j\}$ 分别切出后微网运行裕度 $K_{pMGi,j}$ 。

步骤 5：负荷集 C_{eqm} 中的元素按照对应 $K_{pMGi,j}$ 的大小从低位到高位重新排列。

步骤 6：将重排后的负荷 $C_{eqm} \{1\}$ 进入判断，则切出负荷 $C_{eqm} \{1\}$ 。若对应的 K_{pMGi} 大于零，通过调节微网发电侧功率使联络线功率下降至零，完成微网 i 的自治控制；若对应的 K_{pMGi} 小于零，则继续进行切负荷判断，进入步骤 7。

步骤 7： $N_{cLd} = N_{cLd} - 1$ ，将该负荷从当前负荷集 C_{eqm} 清除，以便后续继续进行切负荷判断。

步骤8: 判断 N_{cld} 是否等于零。若等于零表示当前无负荷可切出, 调节微网 i 发电侧功率, 使其联络线功率尽可能接近零; 若不等于零则表示当前仍有负荷可切出, 返回步骤4, 直至完成自治控制。

微网 i 发电侧功率调节遵循先调节储能再调节光伏的原则。即若只调节储能能使联络线功率下降至零, 则储能功率设置值如式(3)所示; 若调节量过大, 超出储能调节范围的部分, 需要通过限制光伏功率使联络线功率下降至零(适用于微网 i 往外送电功率大的情况)。

$$P_{\text{BS}i} = \sum P_{\text{Ldi}} - \sum P_{\text{PVi}} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{BS}i}$ 为子微网 i 储能设备功率的设置值; $\sum P_{\text{Ldi}}$ 为子微网 i 未切出负荷功率之和; $\sum P_{\text{PVi}}$ 为子微网 i 光伏功率之和。

3.2 集中式源荷恢复控制

经过各子微网独立进行自治控制后, 需要对多微网内潜在可恢复负荷和光伏进行集中恢复。负荷恢复涉及离散变量的0-1整数规划, 光伏恢复涉及连续变量的规划问题。上述问题可转化为混合整数规划优化问题。集中式源荷恢复控制流程如图4所示。

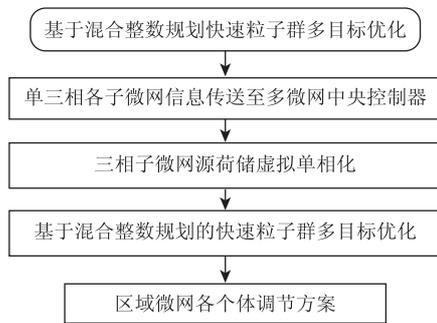


图4 集中式源荷恢复控制流程图

以负荷恢复量最大、光伏恢复量最大、主电源出力总量最小、PQ型储能出力变化量最小、离网三相不平衡度最小为目标, 通过简单加权将多目标问题转化为单目标问题, 以负荷投切开关量、源储出力(包括PQ型储能出力和光伏出力)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。如式(4)与式(5)所示。

$$\min f = -\alpha_{11} \sum \Delta P_{\text{Ld}} - \alpha_{12} \sum \Delta P_{\text{pv}} + \alpha_{13} |P_{\text{BS_VF}}| + \alpha_{14} \sum |\Delta P_{\text{BS_PQ}}| + \alpha_{15} \epsilon \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \epsilon(P_{\text{BS_v/f,a}}, P_{\text{BS_v/f,b}}, P_{\text{BS_v/f,c}}) \leq 15\% \\ & \text{SOC}_{\text{minbs},i} \leq \text{SOC}_i \leq \text{SOC}_{\text{maxbs},i} \\ & P_{\text{minbs},i} \leq P_{\text{bs},i} \leq P_{\text{maxbs},i} \\ & P_{\text{minpv},i} \leq P_{\text{pv},i} \leq P_{\text{maxpv},i} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\sum \Delta P_{\text{Ld}}$ 为负荷增量之和; $\sum \Delta P_{\text{pv}}$ 为光伏增量之和; $|P_{\text{BS_VF}}|$ 为离网主电源出力绝对值; $\sum |\Delta P_{\text{BS_PQ}}|$ 为PQ型储能功率绝对值的增量之和; ϵ 为三相电流不平衡度; α_{11} 、 α_{12} 、 α_{13} 、 α_{14} 、 α_{15} 为各个目标的权重; SOC_i 为微网 i 储能荷电状态, 其上下限为 $[\text{SOC}_{\text{minbs},i}, \text{SOC}_{\text{maxbs},i}]$; $P_{\text{bs},i}$ 为第 i 个微电网储能功率, 充放电额定功率为 $[P_{\text{minbs},i}, P_{\text{maxbs},i}]$ 。

其中, 电流三相不平衡度计算公式采用文献[17]的方法进行计算, 公式如下所示。

$$\epsilon = \frac{I_2}{I_1} = \frac{S_{\text{L2}}}{S_{\text{L}}} \quad (6)$$

$$\begin{cases} S_{\text{L}} = \sqrt{(P_{\text{A}} + P_{\text{B}} + P_{\text{C}})^2 + (Q_{\text{A}} + Q_{\text{B}} + Q_{\text{C}})^2} \\ S_{\text{L2}} = \sqrt{P_{\text{L2}}^2 + Q_{\text{L2}}^2} \\ P_{\text{L2}} = \frac{1}{2}(2P_{\text{A}} - P_{\text{B}} + \sqrt{3}Q_{\text{B}} - P_{\text{C}} - \sqrt{3}Q_{\text{C}}) \\ Q_{\text{L2}} = -\frac{1}{2}(2Q_{\text{A}} - Q_{\text{B}} - \sqrt{3}P_{\text{B}} - Q_{\text{C}} + \sqrt{3}P_{\text{C}}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: 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。

4 仿真分析

基于 MATLAB 2012a/Simulink 搭建单三相多微网仿真平台, 验证所提出的单三相多微网并网切换策略。按照如图1的多微网拓扑搭建多微网仿真模型, 该模型包含4个子微网, 各子微网源荷储配置如表1所示。

表1 各子微网源荷储配置信息

配置	子微网			
	1	2	3	4
相序	三相	A相	B相	C相
光伏额定功率/kWp	30	5	5	5
储能额定功率/kW	[30, -30]	[5, -5]	[5, -5]	[5, -5]
储能电池容量/kWh	30	5	5	5
负荷额定	10*+10+4	2*+3	1*+2+2	2+2

注: *表示重要负荷, 未标注*表示次要负荷

并网时多微网源荷储实时信息如表2。

表 2 被动并网转离网前各子微网源荷储实时信息

配置	子微网			
	1	2	3	4
光伏实时功率/kW	18	2	4	1
储能实时功率/kW	0	3	-1	2
储能 SOC 状态/%	50	65	50	80
负荷	10*+10+4	4*+6	3*+4+5	5.5+3.5
联络线功率/kW	26	5	9	6

注：* 表示重要负荷，未标注 * 表示次要负荷

单三相多微网被动并网转离网过程如图 5 所示。 $t=0.4\text{s}$ 时配网与多微网之间的联络线并离网开关突然断开，多微网发生被动并网转离网事故。子微电网 1 三相储能作为应急主电源迅速切换至 V/f 控制模式，三相储能功率从原来 0kW 上升至 26kW 左右，瞬时响应被动离网造成的功率缺额。为尽快减小主电源负担，各子微网中央控制器采用分散式自治控制，快速决策出：切除子微电网 2 次要负荷 6kW ，同时调节储能功率为 2kW ；切除子微电网 3 次要负荷 4kW ，同时调节储能功率为 4kW ；切除子微电网 4 次要负荷 3.5kW ，同时调节储能功率为 4.5kW 。经过各子微电网自治控制，各个子微电网的联络线功率为零，主电源只需要维持本微网内负荷的电力供应，有效减轻其负担。如图 6 所示为被动离网切换发生瞬间时多微网三相母线电压和频率的波形图。

$t=1\text{s}$ 时，通过区域微网多目标多个体决策来尽可能恢复各个子微电网的次要负荷和光伏功率。各个子目标权值 α_{11} 、 α_{12} 、 α_{13} 、 α_{14} 、 α_{15} 分别为 $0.699\ 7$ 、 $0.174\ 9$ 、 $0.014\ 6$ 、 $0.087\ 5$ 、 $0.023\ 3$ 。决策结果：恢复子微电网 2 次要负荷 6kW ，恢复子微电网 3 次要负荷 4kW ，恢复子微电网 4 次要负荷 3.5kW ；设置子微电网 2 的光伏功率为 2kW ，其他子微电网光伏出力不变；设置子微电网 2 储能出力为 4.74kW ，子微电网 3 储能出力为 4.72kW ，子微电网 4 储能出力为 4.67kW 。经过区域微网多目标多个体决策后，有效恢复负荷 13.5kW ，有效恢复光伏功率 1kW ，且微电网的三相不平衡度为 11.808% ，满足约束条件的要求。

5 结束语

针对单三相多微网，提出一种分散与集中相结合的非计划并转离切换控制策略。其中分散式自

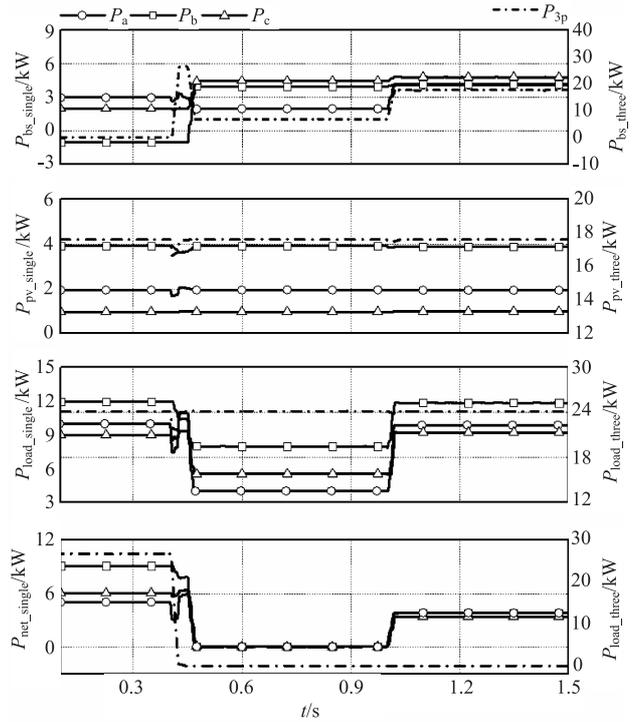


图 5 被动并网转离网切换过程

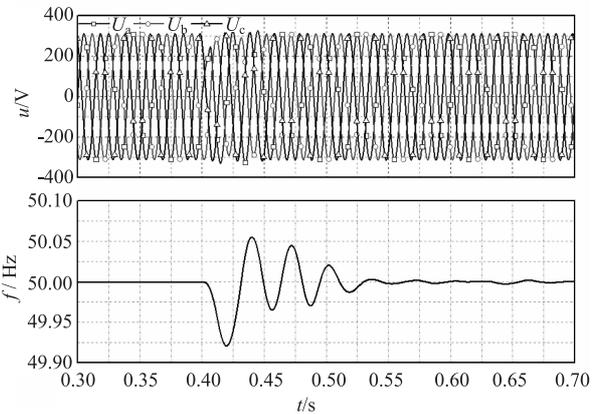


图 6 切换瞬间多微网三相母线电压及频率

治控制能有效解决多微网联络线功率过大情况下非计划离网的无缝切换，保证多微网母线电压频率处于正常范围内，并有效减轻主电源负担；集中式源荷恢复控制则通过混合整数规划解决了离网初期光伏和负荷的恢复问题，实现了次要负荷和光伏的最大化恢复。后续研究将从引入可控负荷、细化负荷等级分类、客观选择多目标权值等方面进一步深入。

参 考 文 献

[1] He M, Giesselmann M. Reliability-constrained self-

- organization and energy management towards a resilient microgrid cluster [C] //Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC: IEEE, 2014: 1-5.
- [2] 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.
- [3] 江润洲, 邱晓燕, 李丹. 基于多代理的多微网智能配网动态博弈模型 [J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3321-3327.
- [4] 郭晓斌, 李鹏, 许爱东, 等. 基于预测控制的分布式多微网协调控制策略 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(4): 22-28.
- [5] 马永红, 王申, 崔丹丹. 多微网系统的安全能量路由机制 [J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1-7.
- [6] 周小平, 陈燕东, 罗安, 等. 一种单相-三相混合微电网结构及其能量协调控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 1-10.
- [7] Sun Qiuye, Zhou Jianguo, Josep M Guerrero, et al. Hybrid Three-Phase/Single-Phase Microgrid Architecture With Power Management Capabilities [J]. IEEE Transactions On Power Electronics, 2015, 30(10): 5964-5977.
- [8] 吴玫蓉, 陶顺, 肖湘宁. 基于主从控制微网的平滑切换控制方法研究 [J]. 现代电力, 2015, 32(1): 1-7.
- [9] 陈杰, 钮博文, 张俊文, 等. 微电网运行模式平滑转换的混合控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2015(17): 4379-4387.
- [10] 聂志强, 梁晖, 罗浩, 金渊. 基于非线性下垂控制的单模式微网并/离网无缝切换技术 [J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1371-1378.
- [11] 唐酿, 盛超, 赵天扬, 袁敞. 虚拟同步发电机并离网无缝切换控制策略研究 [J]. 可再生能源, 2016(11): 1665-1673.
- [12] 张雪松, 赵波, 李鹏, 等. 基于多层控制的微电网运行模拟无缝切换策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 179-199.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 许志荣, 杨苹, 彭嘉俊, 等. 单/三相光储型多微网并离网切换策略 [J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3459-3466.
- [16] 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): 37-75.
- [17] 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.

收稿日期: 2016-08-06

作者简介:

杨苹(1967—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源发电并网与控制技术, E-mail: eppyang@scut.edu.cn;

彭嘉俊(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源发电并网与控制技术, E-mail: 243542588@qq.com.

(责任编辑: 杨秋霞)