

DOI: 10.7667/PSPC161569

## 串联结构多微网并离网模式切换控制策略

袁昊哲<sup>1</sup>, 杨苹<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516003; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 相邻区域内的微电网因互联互通所需可组成多微网系统。在研究单微网的锁相环控制、联络线功率和相位调节的基础上, 针对串联结构多微网的结构特点, 提出一种多微网并/离网模式切换控制策略。对于离转并模式切换, 在不同初始相角和储能频率参考值的情况下, 计算相应的离转并切换时间。对于并转离模式切换, 根据主动和被动并转离两种情况, 对于微网储能输出功率和联络线功率进行调节。仿真结果验证了该控制策略可实现串联结构多微网并/离网模式快速切换。

**关键词:** 多微网; 串联结构; 模式切换; 初始相角; 联络线功率

### Grid-connected and off-grid mode switching control strategies of multi-microgrid with series structure

YUAN Haozhe<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>2</sup>

(1. Huizhou Electric Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Huizhou 516003, China;  
2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Due to interconnection and power supply, multi-microgrid system can be composed of multiple microgrids in adjacent area. Based on researches of single microgrid phase-locked loop control, tie-line power and phase adjustment, this paper presents grid-connected and off-grid mode switching control strategies of multi-microgrid with series structure characteristic. For off-grid to grid-connected mode switching, the control strategies calculate mode switching time of off-grid to grid-connected in different cases of initial phase and energy storage frequency reference value. For grid-connected to off-grid mode switching, based on the active and passive mode switching, the control strategies adjust energy storage output power and tie-line power of the sub-microgrid. Simulation results verify that the control strategies can realize grid-connected and off-grid mode fast switching of multi-microgrid with series structure.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA052001) and Science and Technology Program of Guangdong Province (No. 2012B040303005).

**Key words:** multi-microgrid; series structure; mode switching; initial phase; tie-line power

## 0 引言

可再生能源发电通过微电网进行并网, 可有效地降低其发电波动性对大电网的影响<sup>[1-2]</sup>。微电网具有自治运行, 多能互补, 优化管理和协调控制等优势, 已成为现代智能电网发展的重要组成部分<sup>[3]</sup>。近年来, 微电网发展逐渐规模化, 形式多样并具有地域特点, 将众多微电网延伸至中压网络将形成多微网(Muti-microgrid)系统<sup>[4-6]</sup>。

基于电压矢量法和调节储能频率、电压控制环,

国内外针对单微网并/离网切换控制和并网同期方法已进行了大量研究工作<sup>[7-10]</sup>。如何实现多微网在并/离网两种模式之间的平滑稳定切换, 确保内部重要负荷的供电不间断, 是存在多微网控制领域一个关键技术难点。文献[11]提出了多微网的联络线功率和并网同步协调控制策略, 实现离网型多微网与配电网的重新连接。文献[12]提出了多个微网切换组合策略, 通过灵活的多微网接线结构和完整的运行方式控制策略集, 提高海岛型多微网供电可靠性。文献[13]设计了两个微网的同步并网协调控制策略, 制定同步并网方案, 实现串联结构并网或并联结构并网。以上文献的多微网并/离网切换控制目的在于改变多微网的拓扑结构, 提高供电可靠性, 未

根据串联结构多微网的结构特点对并/离网切换过程进行深入研究。

针对串联结构多微网的结构特点, 本文提出一种串联结构多微网并/离网模式切换控制策略。在不同初始相角和储能频率参考值的情况下, 计算相应离转并切换时间。考虑主动和被动并转离两种情况, 对子微网联络线功率和储能输出功率进行调节。通过该控制策略实现多微网并/离网快速切换。

## 1 串联结构多微网

本文研究的串联结构多微网如图 1 所示。子微网内含储能装置进行功率调节, 并内接多个负荷。子微网 1~子微网  $n$  分别通过其对应的并离网开关  $L_1 \sim L_n$  与上一层子微网相连接, 实现相应层子微网并网和离网两种运行模式的切换。各层子微网的微电网中央控制器(MGCC), 对本层子微网进行协调控制。由于串联结构的电气连接特点, 上一层子微网对于本层子微网近似于“配网”, 为本层子微网提供电能和频率电压参考值, 下一层子微网对于本层子微网近似于“负荷”, 当某层子微网由并网转入离网运行时, 该层及以下子微网组成的整个多微网系统进入离网运行模式。本文对该特点加以运用。

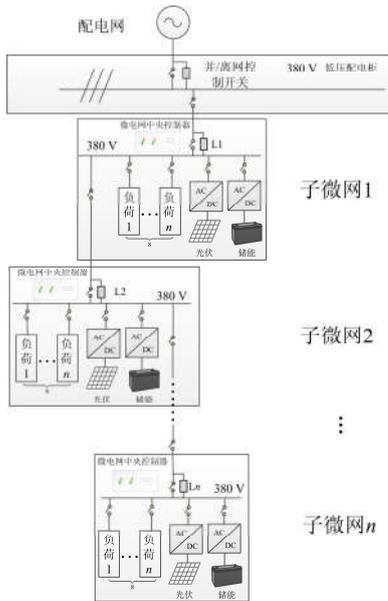


图 1 串联结构多微网拓扑图

Fig. 1 Series structure multi-microgrid topology

## 2 考虑初始相角的多微网并网切换控制

### 2.1 微电网并网切换原理

多微网由离网向并网模式切换前, 多微网和配网三相电压波形不完全重合, MGCC 根据配网三相电压调节恒压恒频控制(V/f)下主电源储能出口端的

频率和电压, 完成多微网与配网三相电压同期<sup>[14]</sup>。当多微网满足并网条件时, 合闸并网。多微网储能由 V/f 控制转为恒功率(PQ)控制, 维持多微网功率平衡<sup>[15]</sup>。

根据三相电压对称性, 选择多微网和配网同一单相电压做调节参考, 其余两相电压也会相应调整。本文选多微网和配网 A 相电压作为调节对象。

$$U_a = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \theta_A) \quad (1)$$

$$E_a = \sqrt{2}E \sin(\omega_e t + \theta_{eA}) \quad (2)$$

式中:  $U_a$  和  $E_a$  分别为多微网和配网 A 相电压;  $U$  和  $E$  分别为多微网和配网电压有效值;  $\omega$  和  $\omega_e$  分别为多微网和配网角频率;  $\theta_A$  和  $\theta_{eA}$  分别为多微网和配网 A 相电压的初始相位。

#### (1) 切换过程的电压幅值调节

微电网三相电压经过 Clark 变换得到旋转  $dq0$  坐标下的电压向量为

$$\begin{bmatrix} U_d & U_q & U_0 \end{bmatrix}^T = T_{abc/dq0} U_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3}U & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$T_{abc/dq0}$  为 Clark 变换公式。 $dq0$  坐标下的电压向量数值与  $T_{abc/dq0}$  的选择有关。同理, 配网电压向量为

$$\begin{bmatrix} E_d & E_q & E_0 \end{bmatrix}^T = T_{abc/dq0} E_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3}E & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

以  $E_d$ 、 $E_q$  代替多微网储能装置 V/f 控制中电压参考值  $U_{dref}$  和  $U_{qref}$ , 调节多微网相电压幅值。

#### (2) 切换过程的相位调节

根据锁相环原理, 通过改变储能装置锁相环频率参考值  $f_{ref}$ , 可调节储能输出端相电压的相位变化量  $\omega t$ ,  $\omega = 2\pi f$ 。然而, 当多微网和配网的电压波形初始相位不同时, 存在电压初始相位差, A 相的初始相位差为  $\Delta\theta_A = \theta_A - \theta_{eA}$ 。此时, 即使多微网与配网电压相位变化量  $\omega t$  和  $\omega_e t$  相等, 且  $U=E$ , 多微网与配网的 A 相电压仍不等。

$$U_a = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \theta_A) \neq \sqrt{2}E \sin(\omega_e t + \theta_{eA}) = E_a \quad (5)$$

此刻, 合上并离网开关, 对多微网产生较大的电压冲击。仅考虑锁相环相位变化量  $\omega t$  的相位调节方法无法保证多微网并网平滑切换。本文采用考虑初始相位差的实时相位调节方法。

### 2.2 串联结构多微网并网切换控制

对于串联结构多微网, 由于每一层微电网的储能容量有限, 储能对频率和电压的调节范围较小, 为减小本层子微网并网切换控制时该子微网储能对频率和电压的调节压力, 当子微网  $m$  的 MGCC 收到并网切换控制指令后, 向下层子微网  $m+1$  发送功

率调度指令, 调节子微网  $m+1$  的储能输出功率  $P_{BS(m+1)}$ , 使得子微网  $m+1$  与子微网  $m$  的联络线功率  $P_{grid(m+1)}$  趋近于 0。

以上层子微网  $m-1$  的  $dq0$  坐标电压  $U_{(m-1)d}$ 、 $U_{(m-1)q}$  代替子微网  $m$  储能装置 V/f 控制中的  $dq0$  坐标电压参考值  $U_{mdref}$  和  $U_{mqref}$ , 调节子微网  $m$  相电压幅值, 使其趋近于子微网  $m-1$  相电压幅值。

子微网  $m$  实时相位  $\varphi_m$  与上层子微网  $m-1$  实时相位  $\varphi_{m-1}$  变化方向相同时, MGCC 检测子微网  $m$  与其上层子微网  $m-1$  的频率差  $\Delta f$ 、电压幅值差  $\Delta U_m$ 、相位差  $\Delta\varphi$  是否满足并网条件, 如果满足, 子微网  $m$  储能装置 V/f 控制的频率参考值  $f_{mref}$  设为上层子微网  $m-1$  的频率  $f_{m-1}$ , MGCC 向并离网开关发送合闸信号, 实现该层子微网并网。

$$\Delta U_m = \frac{(\sqrt{2}U_m - \sqrt{2}U_{m-1})}{\sqrt{2}U_{m-1}} \quad (6)$$

$$\Delta f = f_m - f_{m-1} \quad (7)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_m - \varphi_{m-1} \quad (8)$$

式中:  $U_m$  和  $U_{m-1}$  分别为子微网  $m$  与上层子微网  $m-1$  的电压有效值;  $f_m$  为子微网  $m$  频率。

并网切换过程中, MGCC 发并网信号时刻至并离网开关合闸所经历时间为切换控制完成所需时间  $T_{on}$ , 忽略设备信号传输处理时间。由于对多微网频率和电压的调节是通过储能装置 V/f 控制实现的, 其电压调节速度比相位调节较快。因此,  $T_{on}$  等于相位调节完成时间。要求相位差  $\Delta\varphi$  趋近于 0, 由  $\varphi_{m-1} = \omega_{m-1}t + \theta_{A(m-1)}$ ,  $\varphi_m = \omega_m t + \theta_{Am}$  和式(8)得式(9)。

$$\Delta\varphi = (\omega_m - \omega_{m-1})t + (\theta_{Am} - \theta_{A(m-1)}) = 2\pi(f_m - f_{m-1})t + \Delta\theta_A = 0 \quad (9)$$

式中:  $\omega_m$  和  $\omega_{m-1}$  分别为子微网  $m$  和上层子微网  $m-1$  的角速度;  $\theta_{Am}$  和  $\theta_{A(m-1)}$  分别为子微网  $m$  和子微网  $m-1$  的 A 相电压的初始相位;  $f_m$  和  $f_{m-1}$  分别为子微网  $m$  和子微网  $m-1$  的频率;  $\Delta\theta_A = \theta_{Am} - \theta_{A(m-1)}$ , 为子微网  $m$  和子微网  $m-1$  的 A 相电压初始相位差。

根据式(9), 则  $\Delta f$ 、 $\Delta\theta_A$  与  $T_{on}$  关系如式(10)。

$$2\pi\Delta f T_{on} + \Delta\theta_A = 0 \quad (10)$$

根据图 2 所示, 当  $\Delta\theta_A$  大于 0 时, 下调本层子微网频率, 使得  $\Delta f$  为负; 当  $\Delta\theta_A$  小于 0 时, 上调本层子微网频率, 使得  $\Delta f$  为正。当  $\Delta f$  调节方向与以上相反时, 由式(10)可知需增加相位调节量  $2\pi$ , 即相位需调节  $|\Delta\theta_A| + 2\pi$ 。多微网并网控制根据

$\Delta\theta_A$  选择  $\Delta f$ , 确定相应的  $f_{mref}$ , 实现相位  $\varphi_m$  的快速调节。串联结构多微网并网切换控制策略如图 3 所示。

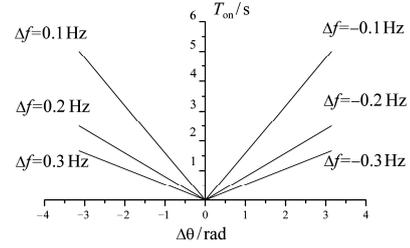


图 2  $\Delta f$ 、 $\Delta\theta_A$  与  $T_{on}$  关系示意图

Fig. 2 Relationship diagram of  $\Delta f$ ,  $\Delta\theta_A$  and  $T_{on}$

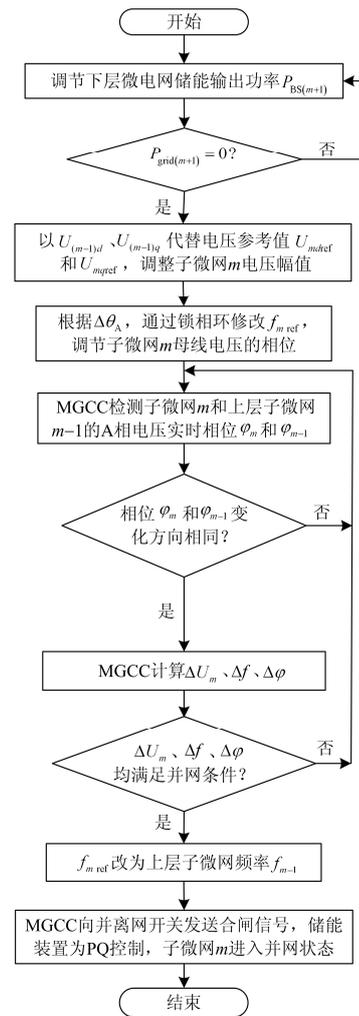


图 3 串联结构多微网并网切换控制图

Fig. 3 Off-grid to grid-connected mode switching control of multi-microgrid with series structure

根据 GB12325-90 《电能质量供电电压允许偏差》、GB/T 15945-1995 《电能质量电力系统频率允许偏差》和 GB/T 13729-2002 《远动终端设备》确定并网条件为:  $|\Delta U_m| < 0.05 \text{ p.u.}$ ,  $|\Delta f| < 0.3 \text{ Hz}$ ,

$|\Delta\varphi| < 0.03 \text{ rad}$ , 频率标准值为 50 Hz。考虑离网型多微网稳定性, 使多微网频率波动较小, 本文确定频率参考值的调节范围为 49.8~50.2 Hz, 即  $-0.2 \text{ Hz} \leq \Delta f \leq 0.2 \text{ Hz}$ 。根据本层子微网和上层子微网初始相位差以及实际工程要求的离转并切换完成时间, 确定储能装置频率参考值, 实现串联结构多微网离转并的快速切换。

### 3 主被动并转离控制

微电网在某些工况下需要断开并离网开关, 切换至离网模式, 分主动和被动两种并转离控制。

1) 计划内的并网转为离网称为主动并转离, 发生在配网设备需检修、电能质量不满足要求或计划内停电等情况下。2) 计划外的并网转为离网称为被动并转离, 发生在大电网发生停电事故且故障较为严重或微电网内设备故障等情况下, 并离网开关快速切断。

串联结构多微网并网转离网切换控制策略如图 4 所示。多微网主动并转离控制时, 为减小本层子微网储能对联络线功率的调节压力, 先调节下层子微网储能, 先使本层子微网与下层子微网之间的联络线功率  $P_{\text{grid}(m+1)}$  趋近于 0。进而调节本层子微网储能输出功率, 使本层子微网联络线功率  $P_{\text{grid}m}$  接近于 0, 以减小并离网开关断开时多微网内部功率失衡导致的电压和频率波动, 并快速切断并离网开关。该层子微网及以下的整个多微网进入离网模式。根据图 1 上、下层子微网的“配网—微网—负荷”电气连接特点, 应选择离网模式多微网的最上层子微网储能作为主电源, 采用 V/f 控制, 为多微网提供电压和频率参考。其余子微网储能采用 PQ 控制, 维持多微网内功率平衡。进行主动并转离控制的本层子微网即为最上层子微网。

当发生计划外的被动并转离控制时, 本层子微网并离网开关快速断开。若开关断开前, 本层子微网联络线功率较大时, 断开后储能输出功率无法及时补偿联络线功率缺额, 电压波形畸变, 对多微网冲击较大。本层子微网储能作为主电源, 采用 V/f 控制, 快速恢复多微网电压和频率稳定。其余子微网储能采用 PQ 控制, 快速恢复多微网功率平衡。

### 4 仿真实验

根据图 1 所示, 本文以两层串联结构多微网为例子进行分析, 对提出的串联结构多微网并/离网模式切换控制策略进行分析验证, 同理该控制策略可运用到多层子微网串联的多微网。该系统由两个子微网(上层子微网 1 和下层子微网 2)通过并离网开

关 L2 串联构成, 并离网开关 L1 能实现多微网与配网并网或离网。其中子微网 1 包括 30 kW 可再生能源发电、66.7 kWh 储能系统和负荷, 子微网 2 包括 30 kW 可再生能源发电、30 kWh 储能系统和负荷。

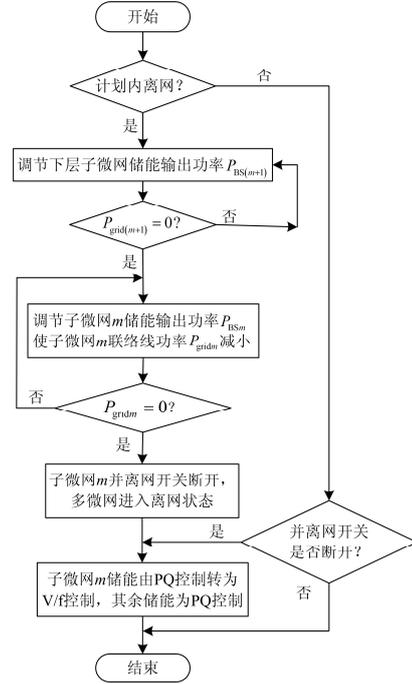


图 4 串联结构多微网并网转离网切换控制图

Fig. 4 Grid-connected to off-grid mode switching control of multi-microgrid with series structure

#### 4.1 多微网并网切换控制仿真

初始时刻, 并离网开关 L1 断开, 并离网开关 L2 合闸, 子微网 1 和子微网 2 组成的多微网处于离网模式。多微网电压幅值为 311V, 频率为 50 Hz; 配电网电压幅值为 318 V, 频率为 50 Hz; 两者初始相位差  $\Delta\theta = \pi/6$ ; 在 1.1 s 处, MGCC 接收到并网调节信号, 进入同期过程。调节下层子微网 2 储能输出有功功率  $P_{\text{BS}2}$  和无功功率  $Q_{\text{BS}2}$ , 使得子微网 2 的联络线有功功率  $P_{\text{grid}2}$  和无功功率  $Q_{\text{grid}2}$  趋近于 0, 减少上层子微网 1 储能的调节压力, 如图 5 所示。子微网 1 储能装置以配网 dq0 坐标电压  $E_d$ 、 $E_q$  代替 V/f 控制电压参考值  $U_{1d\text{ref}}$  和  $U_{1q\text{ref}}$ , 储能调节输出端电压幅值, 使多微网与配网的电压幅值相互趋近, 如图 6 所示。根据图 3, 本文选择下调储能参考频率至 49.8 Hz, 调节多微网电压相位。当多微网实时相位  $\varphi$  与配网实时相位  $\varphi_c$  变化方向相同时, MGCC 检测微电网与配电网的频率差  $\Delta f$ 、相位差  $\Delta\varphi$ 、电压幅值差  $\Delta U$  是否满足并网规定的条件。如果满足, 储能装置 V/f 控制频率参考值  $f_{\text{ref}}$  调节为配网频率  $f_c$ , MGCC 向并离网开关发送合闸信号, 实现多微网并网切换。如图 7 所示, 切换过程历时 0.417 s。

根据式(11), 当  $\Delta\theta = \pi/6$  时,  $T_{on} = 0.416\text{ s}$ , 有效验证了策略的正确性。

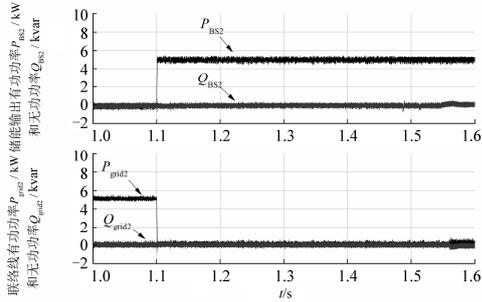


图 5 并网切换控制子微网 2 功率调节仿真波形

Fig. 5 Sub-microgrid 2 power regulation simulation waveform of off-grid to grid-connected mode switching control

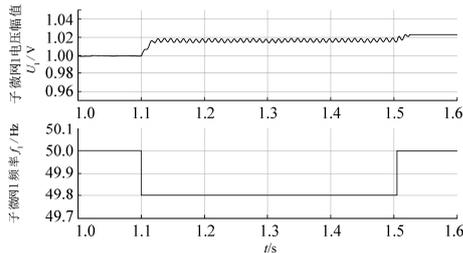


图 6 子微网 1 电压幅值和频率调节仿真波形

Fig. 6 Voltage and frequency regulation simulation waveform of sub-microgrid 1

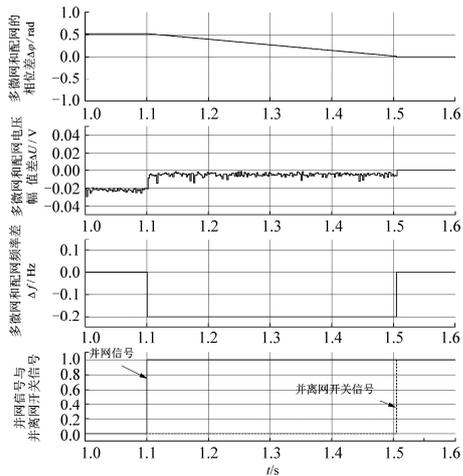


图 7 多微网并网条件仿真波形

Fig. 7 Grid-connected conditions simulation waveform of multi-microgrid

#### 4.2 多微网主动并转离控制仿真

初始时刻, 子微网 1 储能输出有功功率  $P_{BS1}$  为 15 kW, 无功功率  $Q_{BS1}$  较小, 并网点联络线有功功率  $P_{grid1}$  为 12 kW, 无功功率  $Q_{grid1}$  较小。2.1 s 时刻, MGCC 接收到离网信号, 多微网需进行主动并转离。此时, 系统调节下层子微网 2 储能输出功率,

使得子微网 2 的联络线功率为 0, 减少上层子微网 1 储能的调节压力, 如图 8 所示。调节储能  $P_{BS1}$  上升至 22 kW,  $P_{grid1}$  下降,  $P_{grid1}$  和  $Q_{grid1}$  均接近于零, 如图 9 所示。2.3 s 时刻, MGCC 向并离网开关发送信号, 并离网开关断开, 多微网进入离网模式。如图 10 所示, 切换过程中多微网三相电压发生畸变, 但畸变较小, 多微网电压有效值  $U_{rms}$  波动较小, 根据 GB12325-90《电能质量 供电电压允许偏差》, 电压有效值应满足  $0.95\text{ p.u.} < U_{rms} < 1.05\text{ p.u.}$ , 由图 10 可知  $U_{rms}$  满足要求。多微网频率波动也较小, 满足 GB/T 15945-1995《电能质量 电力系统频率允许偏差》要求。

#### 4.3 多微网被动并转离控制仿真

子微网 1 并网状态下, 其联络线有功功率  $P_{grid1}$  为 2 kW, 无功功率  $Q_{grid1}$  为 0.5 kvar, 如图 11 所示。2.3 s 时刻, 子微网 1 的并离网开关 L1 突然断开, 多微网被动进入离网模式, 子微网 1 联络线产生较大的有功和无功功率冲击, 有功冲击最小值  $P_{grid1min}$  为 -44 kW, 最大值  $P_{grid1max}$  为 222 kW, 无功冲击最

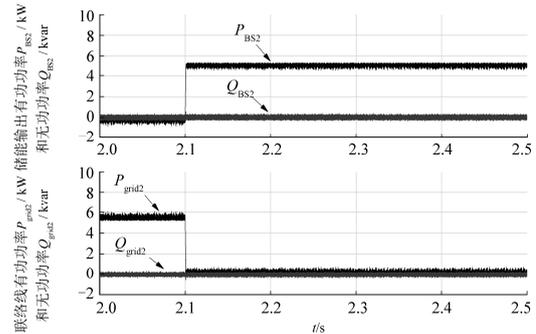


图 8 主动并转离控制子微网 2 功率调节仿真波形

Fig. 8 Sub-microgrid 2 power regulation simulation waveform of active grid-connected to off-grid mode switching control

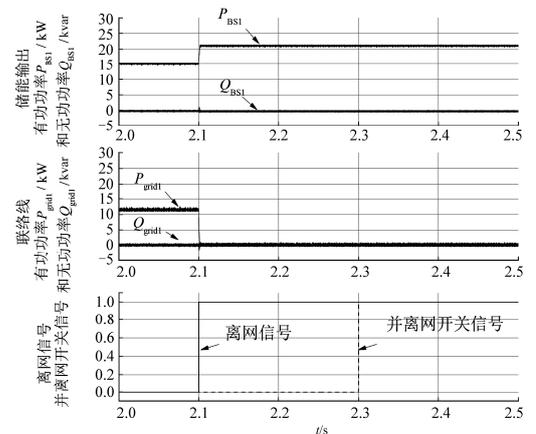


图 9 主动并转离控制子微网 1 功率调节仿真波形

Fig. 9 Sub-microgrid 1 power regulation simulation waveform of active grid-connected to off-grid mode switching control

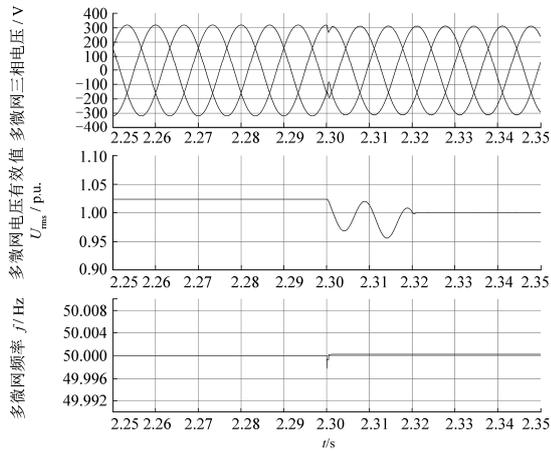


图 10 主动并转离切换过程电压和频率波形

Fig. 10 Voltage and frequency waveform of active grid-connected to off-grid mode switching control

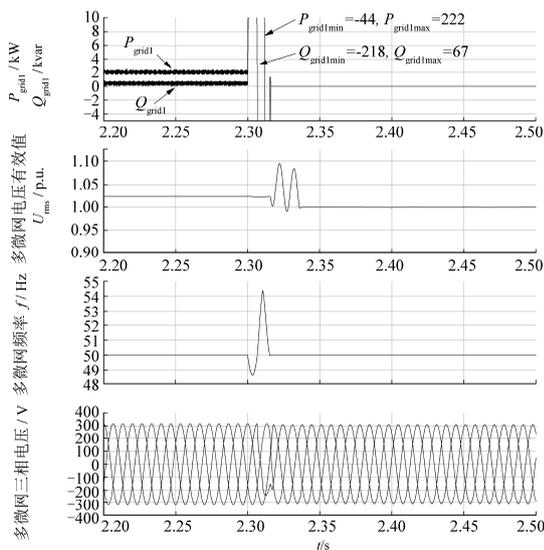


图 11 被动并转离切换过程仿真波形

Fig. 11 Simulation waveform of passive grid-connected to off-grid mode switching control

小值  $Q_{\text{grid1min}}$  为  $-218 \text{ kvar}$ , 最大值  $Q_{\text{grid1max}}$  为  $67 \text{ kvar}$ , 电压有效值和频率波动较大, 电压波形发生畸变, 系统经过  $0.04 \text{ s}$  恢复稳定。对于一个架构已确定的多微网系统, 并网模式下的联络线功率绝对值越大, 此时执行被动并转离断开并离网开关, 多微网内部频率和电压波动就越大, 容易超过系统的频率电压调控范围, 造成多微网设备故障。

## 5 结论

在分析锁相环控制和多微网结构特点的基础上, 本文提出一种串联结构多微网并/离网模式切换

控制策略。根据国家标准的电能质量要求确定并网切换条件。在不同初始相角和储能频率参考值的情况下, 计算相应的离转并切换时间。考虑主动和被动并转离两种情况, 对于微网联络线功率和储能输出功率进行调节。经过仿真验证了该控制策略可实现串联结构多微网并/离网模式快速切换。

## 参考文献

- [1] 吴云亮, 肖峥, 沈阳武, 等. 微电网并网模式下的协调经济调度策略研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 6-11, 16. WU Yunliang, XIAO Zheng, SHEN Yangwu, et al. Coordinated economic dispatch strategy under microgrid connected mode[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 6-11, 16.
- [2] 陈丽丽, 牟龙华, 刘仲. 光储柴微电网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 86-91. CHEN Lili, MU Longhua, LIU Zhong. Analysis of the operating characteristics of a PV-Diesel-BESS microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 86-91.
- [3] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 基于微电网的电网需求响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 20-26. ZHANG Ying, RONG Zhanpeng, ZHANG Yuxiong, et al. Study of grid demand response based on micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 20-26.
- [4] 杨苹, 许志荣, 郑群儒, 等. 复杂拓扑结构光储型微电网黑启动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 142-149. YANG Ping, XU Zhirong, ZHENG Qunru, et al. Black start strategy of PV-ESS microgrid with complicated topology structure[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 142-149.
- [5] 邹妍茜, 戴晓东, 邹阳. 基于双层优化理论的多微网协调优化调度研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(12): 1-5, 28. ZOU Yanxi, DAI Xiaodong, ZOU Yang. Research on optimally coordinating dispatching of multi microgrid based on bi-level optimization theory[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(12): 1-5, 28.
- [6] 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.
- [7] 唐西胜, 邓卫, 齐智平. 基于储能微网并/离网快速切换技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 279-284.

- TANG Xisheng, DENG Wei, QI Zhiping. Research on grid-connected/islanded seamless transition of microgrid based on energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 279-284.
- [8] 李光辉, 鲍薇, 何国庆, 等. 基于电压矢量定向控制的微电网同期方法[J]. 现代电力, 2013, 30(5): 7-12.  
LI Guanghui, BAO Wei, HE Guoqing, et al. Microgrid Synchronization method based on voltage-vector directional control technology[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(5): 7-12.
- [9] 王静, 李光辉, 汪婷婷. 微电网并网/独立模式自动无缝切换控制策略[J]. 科技与创新, 2014(10): 1-4.  
WANG Jing, LI Guanghui, WANG Tingting. The strategy of auto-seamless on/off-grid switching of micro-grid[J]. Science and Technology & Innovation, 2014(10): 1-4.
- [10] 梁建钢, 金新民, 荆龙, 等. 微电网系统准同期并网改进控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3071-3078.  
LIANG Jiangan, JIN Xinmin, JING Long, et al. An improved control strategy for quasi-synchronous grid-connection of microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3071-3078.
- [11] 周念成, 金明, 王强钢, 等. 串联和并联结构的多微电网系统分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 13-18.  
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.
- [12] 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.
- [13] 金明. 串联和并联结构的多微电网系统分层主从协调控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.  
JIN Ming. Hierarchical coordination and master-slave control strategy of multi-microgrids system with series and parallel structure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [14] 桑丙玉, 杨波, 李官军, 等. 分布式发电与微电网应用的锂电池储能系统研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(10): 57-59, 99.  
SANG Bingyu, YANG Bo, LI Guanjun, et al. Distributed generation and microgrid application of lithium battery energy storage system[J]. Power Electronics, 2012, 46(10): 57-59, 99.
- [15] 许爱东, 黄焘, 魏文潇, 等. 基于储能变流器的微电网稳定控制策略[J]. 南方电网技术, 2015, 9(4): 29-34.  
XU Aidong, HUANG Tao, WEI Wenxiao, et al. Stability control strategy for microgrid based on converter control of energy storage devices[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(4): 29-34.

收稿日期: 2016-09-21; 修回日期: 2016-10-28

作者简介:

袁昊哲(1991—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统和微电网的稳定与控制; E-mail: 931136550@qq.com

杨 苹(1967—), 女, 博士, 教授, 研究方向为新能源并网发电控制。

(编辑 张爱琴)