

微电网并网与孤岛运行方式转换方法

王鹤^{1,2}, 李国庆², 李鸿鹏², 王波^{1,2}

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 东北电力大学, 吉林 132012)

摘要: 微电网的并网和孤岛2种运行方式的正确运用对提高重要负荷的供电可靠性至关重要。研究微电网的并网与孤岛运行方式之间的转换, 提出一种通过连续监测大电网侧与微电网侧的电压相角和幅值的变化判断微电网运行状况进而自动转换运行方式的方法。采用PSCAD/EMTDC软件对以微型燃气轮机和燃料电池作为分布式电源的微电网进行仿真研究。仿真实验结果表明, 在计划或者故障引起的切换情况下, 所提微电网运行方式自动转换方法能够实现微电网运行方式的平稳过渡。

关键词: 微电网; 微型燃气轮机; 燃料电池; 运行方式转换

中图分类号: TM 727

文献标志码: A

文章编号: 1004-9649(2012)01-0059-05

0 引言

微电网是一个由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发电系统。微电网构成了一个可控单元, 能够实现自控、保护和管理, 可以有效地协调分布式电源与大电网之间的矛盾, 在薄弱的网架结构基础上实现电网的快速发展^[1-3]。微电网有并网和孤岛2种运行方式^[3]。

微电网中分布式电源的特性决定了它们通常不能和电网直接相连, 需要电力电子设备的支持, 为维持微电网的稳定运行, 需要对分布式电源和相应的电力电子设备进行有效地控制。近年来, 大量文献对微电网的建模、控制、优化运行以及稳定性进行了广泛的研究^[4-9]。文献[7]对微电网的并网及孤岛运行方式进行研究, 详细介绍了在不同运行方式下逆变器的控制方法。文献[8-9]主要研究微电网中逆变器的下垂控制方法, 通过模拟高压电力系统中发电机的频率和端电压与所输出的有功功率和无功功率之间的下垂特性来控制逆变器, 该方法不需要建立实时的通信连接就能够协调微电网中的多个分布式电源, 具有较好的应用前景。

在不同的运行方式下, 微电网中逆变器的控制方法有很大区别, 在运行方式发生变化的同时, 采用的控制方法也需要及时地自动调整。现有大多文献只是分别研究微电网的并网及孤岛运行方式, 并提出了相应的控制方法, 对2种运行方式之间的转换没有进行深入研究。本文主要研究微电网运行方式

的转换。通过连续监测大电网侧和微电网侧的电压相角和幅值, 对微电网的实际运行状态进行判断, 提出了一种微电网并网与孤岛运行方式的自动转换方法。本文选择微型燃气轮机和燃料电池作为微电网中的分布式电源, 并选择合适的电力电子设备, 利用PSCAD/EMTDC软件搭建微电网仿真实验平台。仿真实验结果表明, 本文提出的微电网并网与孤岛运行方式自动转换方法能够连续监测微电网的实际运行状态, 并实时地对微电网中电力电子设备的控制方法进行调整, 能够实现微电网运行方式的平稳过渡。

1 微电网的结构与组成

本文选择微型燃气轮机和燃料电池作为微电网中的分布式电源, 结合相应的电力电子设备、负荷、储能和控制装置构成微电网, 如图1所示。

微型燃气轮机具有高燃料利用效率、低废气排放水平和设备小型化等优点, 能够提供25~500 kW的稳定功率输出。微型燃气轮机有2种类型: 分轴结构的微型燃气轮机速度较低, 可以通过齿轮箱驱动传统的小型发电机; 高速的单轴微型燃气轮机(single-shaft microturbine, SSMT)是目前的主流产品, 具有结构紧凑、可靠性高等优点。SSMT直接驱动永磁同步电机发电, 发出的高频交流电经过整流和逆变之后向电网或者负荷供电。如图1所示, 本文选择SSMT, 整流器采用直接电流控制策略, 具体采用固定开关频率脉宽调制(pulse width modulation, PWM)

收稿日期: 2011-09-09

作者简介: 王鹤(1983—), 男, 吉林市人, 讲师, 博士研究生, 从事微电网仿真与控制方面的研究。E-mail: wang_he12@yahoo.com.cn

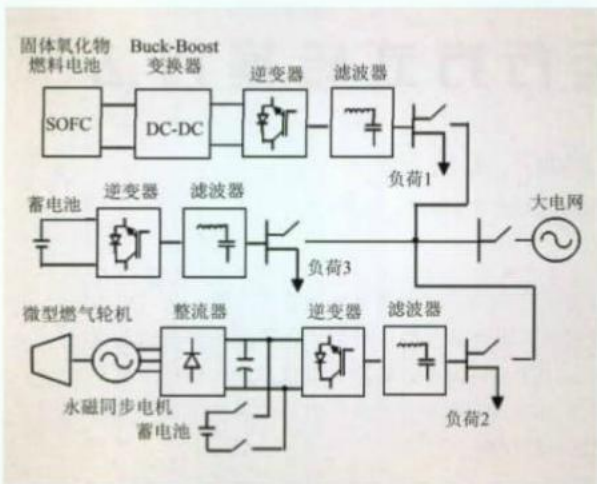


图1 微电网结构
Fig.1 Structure of a microgrid

电流控制方法,SSMT的动态数学模型和控制器的详细设计参考文献[10-11]。为了提高微型燃气轮机发电系统的响应速度,本文在整流器和逆变器之间并联安装了蓄电池。

燃料电池是另一种应用广泛的分布式电源,能够直接将燃料中的化学能转化成电能,具有能量转换效率高、零污染、低噪声等优点。固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell,SOFC)属于第3代燃料电池技术,采用全固体组件,具有燃料适用性广,能够工作在较高的温度,可靠性高等优点。本文采用文献[12]中的SOFC动态数学模型,为了升高电池组的输出电压,并提高其动态响应速度,在SOFC电池组输出端接入Buck-Boost变换电路并采用PWM技术进行控制。

本文使用蓄电池作为储能装置,采用三阶动态数学模型^[13];负荷模型假设为三相对称的恒功率负荷;此外,微电网中滤波器的详细设计方法可参考文献[7]。

经过整流或者直流电压变换后,SSMT和SOFC发出的电能被转换成较稳定的直流电压输出,要经过逆变器才能向微电网或者负荷供电。逆变器的控制方法直接影响到分布式电源或者储能装置的动态性能,是微电网控制的核心问题之一。微电网并网运行时,电压和频率由大电网来支持和调节,SSMT和SOFC的逆变器都可以采用恒功率控制(P-Q控制)方法,采用P-Q控制方法的分布式电源逆变器可以按照设定值提供固定的有功功率和无功功率输出。微电网孤岛运行时,与大电网的连接断开,本文选择SSMT发电系统来调节微电网的电压和频率,此时,SSMT的逆变器采用恒压恒频控制(V-f控制)方法,SOFC的逆变器仍然采用P-Q控制方法。P-Q控制方法和V-f控制方法详见文献[14]。

2 微电网运行方式转换

当微电网的实际运行方式发生变化时,需要迅速判断并调整相应的控制方法,本文提出的微电网并网与孤岛运行方式自动转换方法原理如图2所示。当并网运行时,微电网与大电网的电压相角和幅值是一致的。此时连续监测大电网侧和微电网侧电压相角之间的差值 $\Delta\theta$,若大于设定的阈值 $\Delta\theta_{max}$,则表明微电网已经由于故障或者计划的原因实际处于孤岛运行状态,需要立刻将控制方法转换为孤岛运行控制;若 $\Delta\theta < \Delta\theta_{max}$,则微电网继续执行并网运行控制。

当微电网孤岛运行转换为并网运行时,需要微电网侧和大电网侧的电压幅值和相角近似一致,否则将会产生严重的暂态过程,导致设备损坏。此时,首先判断大电网侧的正序电压幅值是否在合理的范围之内,排除故障状态的干扰。然后监测大电网侧和微电网侧的正序电压幅值差 ΔU ,如果满足 $\Delta U < \Delta U_{max}$ 条件,则启动锁相环(phase locked loop, PLL),以大电网侧的电压相角为目标调整微电网中SSMT的逆变器输出电压相角。当检测到电压相角差满足 $\Delta\theta < \Delta\theta_{max}$ 条件时,说明微电网已经满足并网条件,可以执行由孤岛运行向并网运行的转换,需要同时闭合断路器并将控制方法转换为并网运行控制。在这一过程中,若监测到有并网条件不满足,则继续执行孤岛运行控制。

下面对图2所示转换过程的具体实现方法进行介绍。首先分析电压相角和幅值的测量,为了避免三相不平衡的影响,需要提取测量电压的正序分量。正序电压可以按下式进行提取:

$$\begin{bmatrix} u_a^+ \\ u_b^+ \\ u_c^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

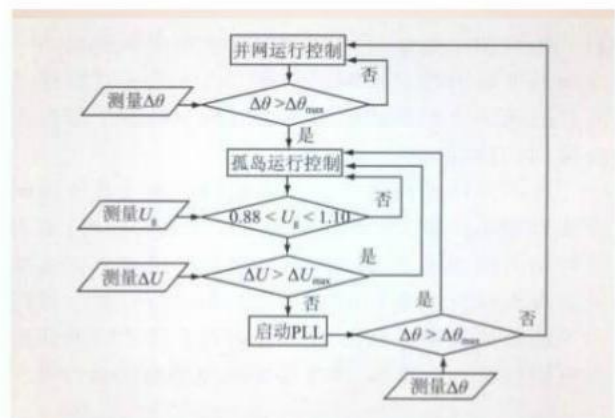


图2 运行方式转换方法原理
Fig.2 Transfer method between operation modes

式中：上标+表示电压的正序分量， $a=e^{j120^\circ}$ 是 120° 的相移因子。

为了简化正序分量提取的实现复杂度，引入 90° 的相移因子将正序电压表示为：

$$\begin{cases} u_a^+ = \frac{u_a}{3} - \frac{(u_b+u_c)}{6} - \frac{(u_b-u_c)}{2\sqrt{3}} e^{j90^\circ} \\ u_b^+ = -u_a^+ - u_c^+ \\ u_c^+ = \frac{u_c}{3} - \frac{(u_a+u_b)}{6} - \frac{(u_a-u_b)}{2\sqrt{3}} e^{j90^\circ} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知，可以通过 90° 相移的全通滤波器实现相移，并结合简单的加法、乘法运算实现正序电压的提取。

测量到的电压经正序分量提取之后，先经过克拉克变换由三相坐标系变换到两相坐标系下得到 (u_α, u_β) ，最后经过直角坐标到极坐标的转换，就能够得到正序电压的幅值 U_g 和相角 θ_g 。图 3 中给出了大电网侧电压相角和幅值的测量原理，微电网侧电压相角和幅值的测量与大电网相同。此外，图 3 中还结合实现了微电网并网时使用的 PLL 功能。PLL 利用测量环节得到的大电网侧电压相角 θ_g ，通过比例积分 (proportional integral, PI) 控制器控制 SSMT 逆变器的输出电压相角，使其与测得的大电网侧电压相角之间的差值 $\Delta\theta$ 趋近于零。因为 $\Delta\theta$ 一般较小，本文使用其正弦值近似地表示相角差，令误差信号：

$$u_e = \sin(\theta_g - \theta) \approx \theta_g - \theta = \Delta\theta \quad (3)$$

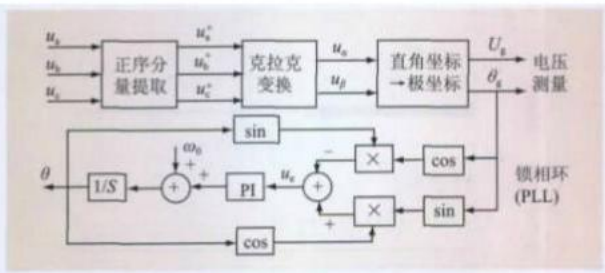


图 3 电压测量及锁相环原理

Fig.3 Voltage measurement and PLL

锁相环中误差信号的近似求取可以通过三角函数展开来实现。图 3 中，误差信号 u_e 通过 PI 控制器后，得到角频率 ω ， ω 与基准频率相加后经积分环节得到所需的相角 θ 。将 θ 作为 SSMT 逆变器控制的参考相角，就能够逐渐减小微电网与大电网之间的相角差，直至满足微电网的并网运行条件。

需要注意的是，当微电网的运行方式发生变化时，在一个很短的时间内电压会产生振荡。若只根据一次的测量值作为判断微电网实际运行状态并调整其控制方法的依据，则会造成微电网控制方法的不断反复变化，进一步加剧电压的振荡，导致系统崩溃。在上述方法的基础上，本文采用 3 阶巴特

沃斯低通滤波器对测得的电压差 ΔU 和相角差 $\Delta\theta$ 信号进行滤波。此外，当微电网孤岛运行时，本文提出的方法只有在检测到满足并网条件并持续一段时间后，才进行并网操作。

3 仿真实验与分析

本文采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建了微电网仿真实验平台，对以 SSMT 和 SOFC 作为分布式电源的微电网进行仿真研究。本文共有 2 个算例，采用图 1 中的微电网结构，SOFC、SSMT 和蓄电池 3 条线路都是 380 V 线路，参数为 $R=0.641 \Omega/\text{km}$ ， $X=0.101 \Omega/\text{km}$ ，3 条线路长度分别为 200 m、400 m 和 200 m。大电网侧线路为 10 kV 线路，参数为 $R=0.347 \Omega/\text{km}$ ， $X=0.2345 \Omega/\text{km}$ ，线路长度为 1 000 m。此外，本文选择氢气作为 SOFC 的燃料，SSMT 和 SOFC 的主要参数详见文献 [10] 和 [12]。

算例 1：仿真开始时微电网并网运行，3 个负荷参数分别为 $P_1=10 \text{ kW}$ ， $Q_1=5 \text{ kvar}$ ， $P_2=5 \text{ kW}$ ， $Q_2=0 \text{ kvar}$ ， $P_3=15 \text{ kW}$ ， $Q_3=5 \text{ kvar}$ ，均由大电网供电。从 0 s 时刻开始，SOFC 和 SSMT 启动开始并网发电，逆变器都采用 $P-Q$ 控制方式，功率参考值设置为 $P_{ref1}=10 \text{ kW}$ ， $Q_{ref1}=0 \text{ kvar}$ ， $P_{ref2}=15 \text{ kW}$ ， $Q_{ref2}=0 \text{ kvar}$ 。8 s 时刻增加 SOFC 的功率输出，修改 SOFC 逆变器的 $P-Q$ 控制参考值为 $P_{ref1}=15 \text{ kW}$ ， $Q_{ref1}=10 \text{ kvar}$ 。在 10 s 时刻，由于计划或者故障的原因微电网由并网运行转变成孤岛运行，控制器检测到孤岛状态后将 SSMT 逆变器由 $P-Q$ 控制转变成 $V-f$ 控制，维持微电网的电压和频率稳定，SOFC 逆变器仍保持 $P-Q$ 控制。微电网孤岛运行之后，在 15 s 时刻负荷 3 突然增加，变化为 $P_3=20 \text{ kW}$ ， $Q_3=10 \text{ kvar}$ 。图 4—图 5 给出了仿真实验结果。

图 4 中给出了微电网中交流电压幅值和频率、SSMT 和 SOFC 发电系统的输出功率以及 SSMT 的直流侧电压的仿真实验结果。从图 4 可以看出，初始时刻微电网并网运行，SSMT 和 SOFC 启动开始并网发电，交流电压和频率为 380 V、50 Hz。经过短暂的波动，SSMT 和 SOFC 开始按照 $P-Q$ 控制设定的参考值输出固定的有功和无功功率，并且 SSMT 直流侧电压稳定在 1 kV。在 8 s 时刻，调整 SOFC 的 $P-Q$ 控制设定参考值后，其输出功率按新的参考值增加。调整后微电网内部分布式电源发出的功率和本地负荷消耗的功率基本平衡，线路上的损耗由大电网提供。微电网在 10 s 时刻与大电网断开连接，经过大约 0.1 s 控制器检测到微电网的实际孤岛运行状态，转化为孤岛运行控制。从图中可以看出，微电网孤岛运行后交流电压和频率保持稳定，但和并网运行时相比略有抖动，这说明在没有大电网支持的情况下，

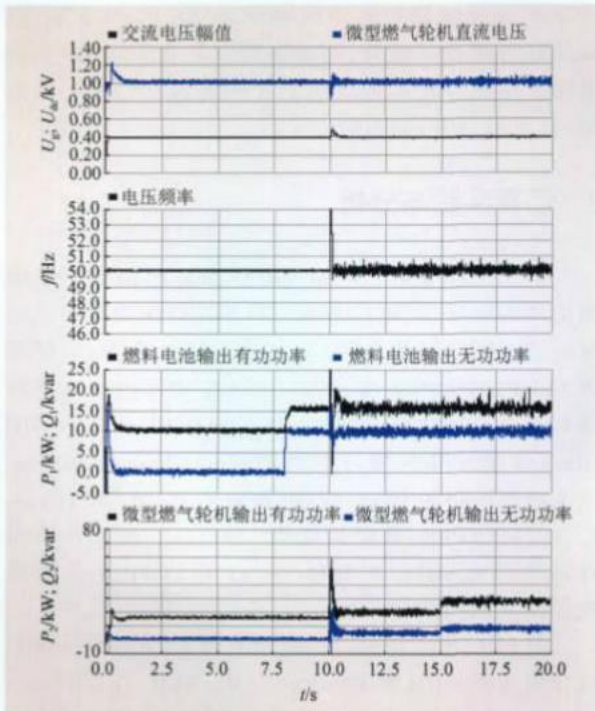


图4 微电网电压和功率

Fig.4 Voltage and frequency of the microgrid

微电网中的电能质量略有下降,但保持在可接受的范围之内。此外,SSMT 转化为 $V-f$ 控制后输出的有功和无功功率都略有增加,是因为 SSMT 开始负责维持微电网的电压和频率稳定,并且提供线路上的损耗。在 15 s 时刻负荷 3 突然增加后,SSMT 在蓄电池的支持下能够快速调整输出功率,继续维持微电网的稳定运行。

图 5 是 SSMT 和 SOFC 的一些非电参数的动态响应过程。从图 5 可以看出,在 10 s 和 15 s 时刻,SSMT 输出功率增加的同时,其转矩 T 也相应增加,转速 ω_r 出现短时的波动。此外,SOFC 中氢气和氧气的流速也与其输出功率的变化一致,但燃料和氧气流速的变化相对较慢,输出功率需要在 Buck-Boost 变换器的支持下才能够达到较快的动态响应速度。

算例 2: 对孤岛运行微电网的并网进行仿真,仿真开始时微电网孤岛运行,3 个负荷参数分别为 $P_1=10 \text{ kW}$, $Q_1=5 \text{ kvar}$, $P_2=5 \text{ kW}$, $Q_2=0 \text{ kvar}$, $P_3=15 \text{ kW}$, $Q_3=5 \text{ kvar}$ 。SSMT 逆变器采用 $V-f$ 控制,维持微电网的电压和频率稳定,SOFC 逆变器采用 $P-Q$ 控制,控制参考值为 $P_{ref1}=10 \text{ kW}$, $Q_{ref1}=0 \text{ kvar}$ 。微电网在 4 s 时刻开始启动并网,并网成功后 SSMT 逆变器转变成 $P-Q$ 控制,控制参考值为 $P_{ref2}=15 \text{ kW}$, $Q_{ref2}=0 \text{ kvar}$,仿真实验结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,微电网在并网过程中交流电压和频率保持稳定,并网后在大电网的支持下电能质量略有提高。图 6 中,控制器在 4 s 时刻启动并网

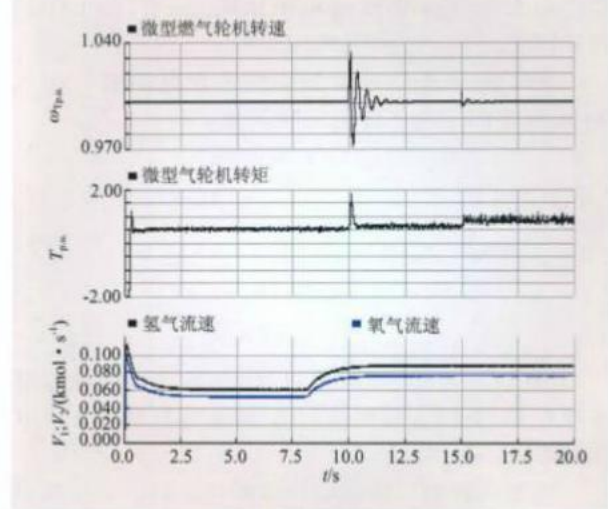


图5 分布式电源非电参数

Fig.5 Non-electrical parameters of distribution sources

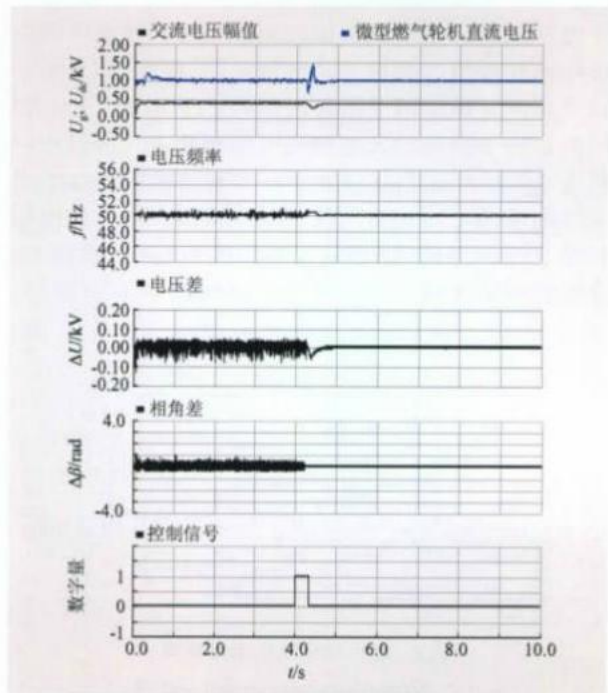


图6 微电网电压及控制量

Fig.6 Microgrid voltage and control parameters

过程,首先判断大电网侧电压幅值在合理范围之内,然后计算大电网侧和微电网侧电压幅值之间的差值。由于 SSMT 的 $V-f$ 控制参考电压和频率与大电网电压频率相同,在稳定运行情况下,启动并网过程的同时就能够满足电压幅值条件,图中控制信号由 0 变成 1 表示电压幅值条件满足。随后控制器启动锁相环,以大电网侧电压相角为目标调整微电网中 SSMT 逆变器的输出电压相角,大约经过 0.3 s 相角条件满足,控制信号由 1 再次变成 0,微电网转化为并网运行控制,同时闭合断路器与大电网连接,

实现了微电网由孤岛到并网运行方式的平稳过渡。

4 结语

微电网需要具有在并网及孤岛 2 种运行方式下平稳切换的能力,本文提出了一种微电网运行方式转换方法,该方法通过连续检测大电网侧和微电网侧的电压相角和幅值,对微电网的实际运行状态进行判断,并且结合正序电压提取、锁相环和低通滤波等环节对微电网的运行进行监控。仿真实验结果表明,该方法能够实现微电网运行方式的平稳过渡。进一步的研究将采用更多的分布式电源和更复杂的网络结构,并结合其他先进的微电网孤岛检测和制方法,提高微电网运行方式切换的快速性和平稳程度。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zong-xiang, WANG Cai-xia, MIN Yong, *et al.* Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [2] LASSETER R H. Microgrids[C]// 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York, NY, USA, 2002: 305-308.
- [3] CHOWDHURY S, CHOWDHURY S P, CROSSLEY P. Microgrids and active distribution networks[M]. London, U.K.: IET, 2009: 122-127.
- [4] POGAKU N, PRODANOVIC N, GREEN T. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Trans Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [5] 李福东,吴敏.微网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略[J].中国电机工程学报,2011,31(13):18-25.
LI Fu-dong, WU Min. An improved control strategy of load distribution in an autonomous microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 18-25.

- [6] 别朝红,李更丰,王锡凡.含微网的新型配电系统可靠性评估综述[J].电力自动化设备,2011,31(1):1-6.
BIE Zhao-hong, LI Geng-feng, WANG Xi-fan. Review on reliability evaluation of new distribution system with micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 1-6.
- [7] 王成山,肖朝霞,王守相.微网综合控制与分析[J].电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Synthesized control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [8] MOHAMED Y, SAADANY E. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids[J]. IEEE Trans Power Electronics, 2008, 23(6): 2806-2816.
- [9] BARKLUND E, POGAKU N, PRODANOVIC M, *et al.* Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters[J]. IEEE Trans Power Electronics, 2008, 23(5): 2346-2352.
- [10] GAONKAR D N, PILLAI G N, PATEL R N. Dynamic performance of microturbine generation system connected to grid[J]. Journal of Electric Power Components Systems, 2008, 36(10): 1031-1047.
- [11] 王成山,马力,王守相.基于双PWM换流器的微型燃气轮机系统仿真[J].电力系统自动化,2008,32(1):56-60.
WANG Cheng-shan, MA Li, WANG Shou-xiang. Simulation of a microturbine system based on double PWM converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 56-60.
- [12] HATZIADONIU C J, LOBO A A, POURBOGHRAT F, *et al.* A simplified dynamic model of grid-connected fuel-cell generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2):467-473.
- [13] KAISER R. Optimized battery-management system to improve storage lifetime in renewable energy systems[C]// European Lead Battery Conference. Athens, Greece, 2007, 168(1): 58-65.
- [14] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for analyzing microgrids islanded operation[J]. IEEE Trans Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.

(责任编辑 李新捷)

Transfer method of micro-grid operation between grid-connected and islanding modes

WANG He^{1,2}, LI Guo-qing², LI Hong-peng², WANG Bo-yi²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: The proper implementation of grid-connected and islanding modes for a micro-grid can effectively improve the power supply reliability of important loads. The transfer method between the two operation modes was investigated. An automatic transfer method was proposed, which can give the identification of the micro-grid condition by monitoring the voltage phase angle and amplitude on both utility and micro-grid sides continuously. The simulation results of the micro-grid with a micro-turbine and fuel cells as distributed sources were analyzed by using the PSCAD/EMTDC software package. The results demonstrate that the proposed automation transfer method has the ability to transfer between the two operation modes seamlessly in planned or faulted conditions.

Key words: micro-grid; micro-turbine; fuel cell; operation mode transfer