

A Survey of the Stability of the Micro-Grid Switched to the Solitary Network

Jian Wang, Dunxin Bian, Hui Shan, Meng Liu

College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong
Email: 603780354@qq.com

Received: Jul. 20th, 2015; accepted: Aug. 8th, 2015; published: Aug. 11th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

For micro-grid in grid connected turn isolated network, there is unstable problem. After the switch with classical U/f control mode on the basis of the control strategy when switching instantaneously, adding the energy storage device and load control strategy by means of MATLAB/Simulink simulation software, setting up the model of various components of the simulation of micro-grid isolated operation mode, also by the dropping of power supply voltage to analog changes of voltage of isolated network. Through the control method of the stability of the various micro network switching, we then find the best way by reasonable collocation. The actual system has a certain significance.

Keywords

Micro-Grid, Isolated Network, Energy Storage Device, Load Shedding, Matlab Modeling and Simulation

微网并网转孤网切换的稳定性研究综述

王 建, 边敦新, 单 辉, 刘 萌

山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博
Email: 603780354@qq.com

收稿日期: 2015年7月20日; 录用日期: 2015年8月8日; 发布日期: 2015年8月11日

摘 要

本文针对微网在并网转孤网的情况下出现的不稳定问题, 在切换后采用U/f控制等经典方式的控制策略基

基础上, 切换瞬间加入了储能装置和负荷控制策略相结合的控制方法, 借助Matlab/Simulink仿真软件, 建立了各种元件的模型, 仿真了微电网孤网运行方式, 同时通过电源电压跌落工况模拟切换到孤网电压变化。通过对各种微网切换稳定性的控制方法, 进行合理的搭配找到最佳方案, 对实际系统具有一定的指导意义。

关键词

微电网, 孤网, 储能装置, 甩负荷, Matlab建模与仿真

1. 引言

当今关于能源问题越来越严重, 分布式发电技术依托可再生能源已经慢慢开始引领未来能源发展的主要方向。但是分布式发电技术电压和频率不稳定的特点, 导致易对大电网造成严重冲击, 因此电网采用限制分布式发电并网的管理方式。这就造成了分布式发电商业化程度较低的结果, 大大限制了该项技术的发展, 阻碍了其形成规模化运行的进程。微网在并网运行和孤岛运行模式之间的平滑切换是提高微网系统供电可靠性的核心手段。

本文借助 Matlab/Simulink 仿真软件, 建立了各种元件的模型, 仿真了微电网孤网运行方式, 孤网运行部分的仿真中, 为了获得微网并网运行转孤岛运行间的平滑切换[1], 在孤网运行方式下采用 U/f 控制方式的策略的基础上, 加入了储能装置, 孤网切换过程中储能装置可以储存多余的能量, 必要时储能装置可以放电, 实现二次调频, 使孤网频率恢复到额定频率。在遇到无论对分布式微型电源采用何种控制方式都无法使电压或频率的波动在可接受范围内, 此时再添加甩负荷控制策略, 使孤网电压或频率恢复稳定。同时通过电源电压跌落工况模拟切换到孤网电压变化, 并进行仿真。

2. 微电网并网转孤网切换的稳定性介绍

2.1. 微网切换的稳定性界定

微电网的稳定性也就是微电网的电压与频率的稳定性以及供电的持续性。现在工业尤其是精密仪器等的生产对电力的稳定性要求极高, 如果这三点电网不能保证, 那么微电网的意义也就基本失去, 保证微电网的稳定性既能给用户提高质量的电能又能减少对大电网的依赖, 因为微电网能在与主网断开时独立的对重要负荷供电。主电网故障或电能质量不能满足要求或检修时, 微电网与主配网断开、孤立运行; 当主配网故障切除或电能质量恢复后, 微电网接入主配网, 重新并列运行。在并网与孤网相互切换的动态过程和孤网运行时, 为了保证平滑过渡和稳定运行, 需要进行电压、频率、相角控制[2]。

2.2. 微网切换稳定性判定依据

在主电网断电的瞬间, 有功和无功不匹配的情况下, 微电网输出的电压和频率特性可以通过解析的方法计算。将微电网孤网运行时的供电系统看作一个电流源, 可得孤网运行时系统频率特征方程:

$$\omega_i^2 + \frac{R}{q^2 L} \frac{Q}{P} \omega_i - \left(\frac{R}{qL} \right)^2 = 0 \quad (1)$$

ω_i ——孤网系统的频率; R ——孤网系统负荷等效电阻; L ——孤网系统负荷等效电感; C ——孤网系统负荷等效电容; q ——孤网系统负荷品质因数; P ——孤网系统电源有功出力; Q ——孤网系统电源无功出力。

可得孤网系统频率公示:

$$\omega_i \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(\frac{1}{2} \frac{Q}{qP} + 1 \right) \quad (2)$$

而根据电网断开前、后瞬时的有功功率关系, 可得出系统孤网运行时系统电压:

$$U_i = \sqrt{\frac{P}{P_{load}}} U_N \quad (3)$$

式(3)中: U_i ——孤网后系统电压幅值;

U_N ——孤网前系统电压幅值;

P_{load} ——孤网系统有功负荷。

如果系统所需要的有功功率和微电网提供的有功功率不匹配, 即相对差值较大时, 在断网时微电网频率幅值将会有较大幅度变化: $|\omega_i - \omega_N| > \varepsilon_\omega$ 式中: ω_N ——孤网前系统频率; ε_ω ——系统电压频率偏差允许值。

如果系统所需要的无功功率和微电网提供的无功功率不匹配, 即相对差值较大时, 在断网时微电网的电压将会发生较大幅度的变化: $|U_i - U_N| > \varepsilon_\mu$ 式中: ε_μ ——系统电压幅值偏差允许值。

微网电压、频率出现以上两种情况时, 我们判定微网处于不稳定状态, 则需要我们根据不同情况出现的故障采取特定的控制策略[3][4]。

3. 并网转孤网稳定性常规控制策略

3.1. 微网离网切换的介绍

基于微电网的基本控制方法[5], 结合山东理工大学微电网仿真平台实际情况, 本文设计了如下并网转孤网控制策略: 当系统检测到外部电网停电、故障现象, 或并网母线电压、频率超出正常范围, 或接受到上层能量管理系统发出的孤网命令时, 微电网孤网模式程序被启动, 公共连接点 PCC 开关会快速响应并断开, 微电网切换至孤网运行状态。由于微电网系统自身的惯性不大, 当微电网从并网状态转入孤网状态, 此时系统失去大电网系统支撑, 对分布式电源产生一定的冲击。微电网与大电网分离后, 大电网不再为微电网运行保驾护航。

3.2. 微网切换的稳定性常规控制策略

3.2.1. 多主或单主控制

在微电网并网转孤网运行的切换过程和孤网运行都需要频率和电压参考, 仅有一个参考电源时称为单主运行, 两个或多个参考电源时称为多主运行。文献[6]提出的无论单主运行还是多主运行, 都可以保证微电网切换过程和孤网运行过程的稳定性。

3.2.2. 微网 U/f 控制

U/f 控制策略采用电流内环和电压外环的双环控制, 文献[7]-[9]其是利用逆变器反馈电压, 通过调节交流侧电压来保证输出电压的稳定。电流内环能大大加快抵御扰动的动态过程, 通过构成的电流随动系统, 而电压外环能保证输出电压的稳定。电流内环使得逆变器动态响应加快、增大了逆变器控制系统的带宽、输出电压的谐波含量减小, 同时对非线性负载扰动的适应能力加强。电流内环和电压外环双环控制充分利用了系统的状态信息, 不仅稳态精度高而且动态性能好。

3.2.3. 下垂控制

下垂(Droop)控制也叫调差率控制, 就是分别通过 Q/U 下垂控制和 P/f 下垂控制来获取稳定的电压和频率, 选择与传统发电机相类似频率一次下垂特性(Droop Character)曲线作为微电源的控制方式。文献

[10]-[12]提出的下垂控制对微网中的微电源输出无功和有功功率分别控制,即分别采用 Q/U 下垂控制和 P/f 下垂控制来获取稳定的电压和频率[13],而无需机组间的通信协调,保证了孤岛下微电网内电力平衡和频率的统一实现了微电源对等控制和即插即用的目标,同时有可靠简单的优点[14]。

3.2.4. 各种常规控制策略的比较分析

U/f 控制在微网切换过程中属于电压频率类控制,是恒压恒频的无差调节。只采集逆变器端口信息,通过调节逆变器调制系数进行电压调节;下垂控制作为电压相角类控制是一种有差调节[15]。通过对各个分布式电源反馈过来的电压和频率与参考值之间的差值,在比例积分调节器作用下作为调差率控制输出。类似于传统的同步发电机的一次调频功能。多主或单主控制在切换过程中为 U/f 控制和下垂控制提供了不同的电压频率的参考方法。

4. 并网转孤网的稳定性控制策略的优化

4.1. 微网并网转孤网出现的较大不稳定性故障

当负荷与分布式电源额定容量相差较大时,微电网孤网运行时无无论分布式微型电源采取何种控制措施控制,都无法使电压或频率的波动在可接受范围内[16]。当出现上述情况时,可以采用两种非常规方法辅助控制:首先可以外加储能装置。由于微电网的惯量小,为了获得从并网到孤网状态的切换平滑过渡需要采用储能装置,孤网切换过程中储能装置可以储存多余的能量,必要时储能装置可以通过放电来实现二次调频,使孤岛频率恢复到稳定。由于储能装置储存能量有限,在仍无法达到稳定目的时,此时对可控制负荷或非重要负荷采用甩负荷的策略,可以达到快速简单的对电压或频率作出大幅度的调整额效果[17]。

4.2. 较大故障下稳定性控制策略分析

4.2.1. 储能调节运行分析

微网从大电网切下后,孤网运行方式下采用 U/f 控制方式的策略的基础上,加入了储能调节装置[18] [19],必要时甩负荷控制,这就需要对负荷进行分级,将一些用电大且不重要的负荷切掉,来满足其余负荷和分布式电源的发出功率平衡,电压和频率的标准值将重新选择,本控制系统中选择蓄电器储能单元充当主控电源角色,因为其供能较稳定而且容易模拟电压和频率的改变。储能调节装置在特定情况下的动作模式:

条件 1: 当供电电源的功率大于网络负载所需的功率值,系统将对储能进行恒流充电。

条件 2: 条件 1 启动工作到一定程度,判断蓄电池两端的电压达到浮充电值 U,且系统的供电功率大于负载且大于启动值电压,系统将对储能系统进行恒压限流充电,只到蓄电池的容量 C 已经满了不需要充电,蓄电池就进入不充电不放电状态,储能系统切出。

条件 3: 当供电的功率小于网络负载所需的功率时,蓄电池的容量满足可以放电的要求时,储能系统进入蓄电池恒流放电状态,只到蓄电池无法继续放电系统进入不充电不放电状态。

4.2.2. 新型储能装置在智能电网下的优化分析

有统计表明在某一时刻至少 88%的电动汽车 EV(Electric vehicle)是处于闲置状态的。此时可将 EV 通过智能装置连接于微网,由微网控制其充电或放电,此时我们可以把 EV 看作是一个储能单元。当 EV 充电、V2G(Vehicle-to-grid)功能可控时。微网可充分利用 EV 分散式储能的潜力,提高经济性[20]。

如图 1 所示, EV 用户与微网签订协议, EV 接入充放电装置后,其充放电过程可由微网调度。车主可以通过人机接 VI(VI 即(Visual Identity),通译为视觉识别系统,是 CIS(Contact Image Sensor)系统最具传播力和感染力的部分)。对充放电过程提出要求,比如保留足够的电量满足临时出行,下一次出行时间、行驶里程等[21]。

4.2.3. 甩负荷控制分析

图 2 所示含可控负荷微网。固定负荷与可控负荷经不同配电线路与微网相连，便于分别控制；微网与中压配电网经 PCC 相连，分布式电源经电力电子变换装置与微网母线相连。

如上述 2.2 所示，当出现 $|\omega_i - \omega_N| > \varepsilon_\omega$ 、 $|U_i - U_N| > \varepsilon_\mu$ ，微网电压、频率满足这种情况时，微网处于较大不稳定状态，由于储能装置储存能量有限，在仍无法达到稳定目的时，此时对可控制负荷或非重要负荷采用甩负荷的策略，可以快速简单的作出大幅度的调整效果[22]。

根据可控负荷对用电量和用电时间的不同需求，将可控负荷分为 3 类。第 1 类负荷指那些在一个运行周期内总电能需求恒定，但具体用电时间可根据电网运行需要灵活改变的负荷；第 2 类负荷，类似于第 1 类负荷，不同点在于具体用电时间有一定的运行时间约束；区别于第 1 类负荷和第 2 类负荷，第 3 类负荷在运行时有多个工作状态，且一个运行周期内总电能需求具有一定的弹性。这类负荷的典型代表是热水器负荷。

例如 EV (Electric vehicle)、SC (Super capacitor)等工作方式灵活的负荷作为可控负荷，通过控制可控负荷消耗的有功无功进行控制，从而维持微网内有功无功的平衡。其中太阳能电力互补加热系统主要消耗有功功率，主要用来调节负荷端消耗的有功功率[23]。对 EV 自带的电池以及微网内的少量储能设备的充放电的控制，不仅可以调节其有功输入，还可以利用其无功输出调节能力调节微网的无功平衡，进而维持微网的电压稳定。

4.2.4. 基于负荷控制的微网切换仿真模型的建立

在文献[24] [25]提出的微网仿真的基础上进行改进，(如图 3 所示)该仿真模型有一个模拟分布式电源 (Source1)提供电能，通过改变 Source1 电压模拟人工负荷切换和线路突发故障负荷切换过程中的微网电

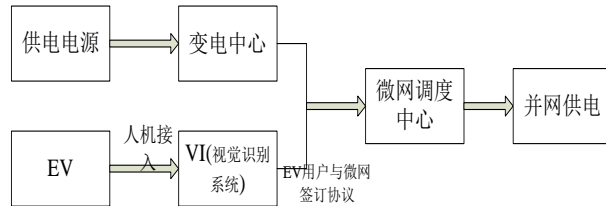


Figure 1. Block diagram of a new energy storage system
图 1. 新型储能系统智能调度系统框图

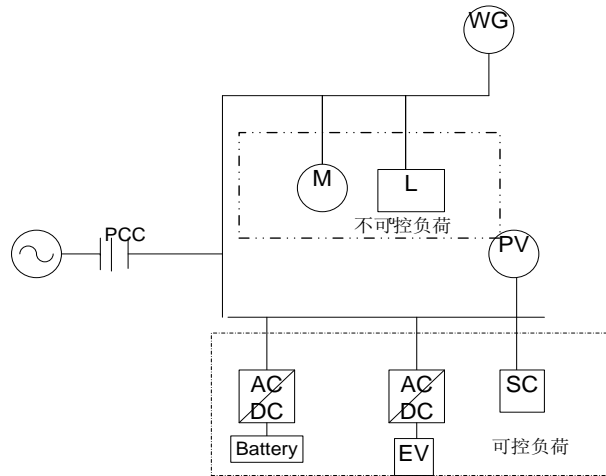


Figure 2. A micro-grid model with controllable load
图 2. 含可控负荷微网模型

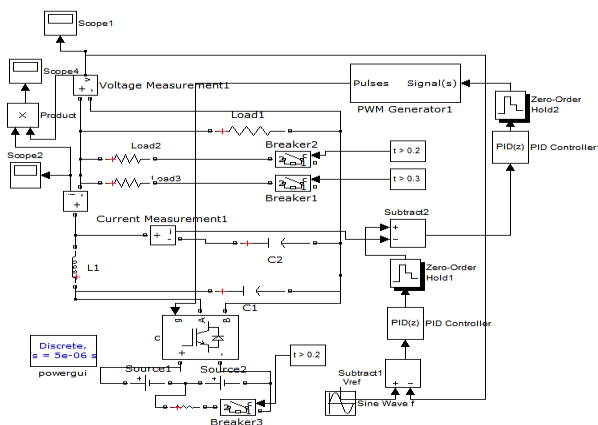


Figure 3. Simulation model of micro-grid switching based on load control

图 3. 基于负荷控制的微网切换仿真模型

压跃变[26],一个蓄电池(Source2)模拟微网辅助储能装置,这两个电源都是直流电压源,系统母线上的负载1、负载2和负载3部分均为纯电阻,电阻值为100欧姆。Subsystem模块是控制逆变器的部分(双环控制)[27][28],并产生PWM波[29],端子1和端子2分别连接负载的两侧,负载的电压信号与需要跟踪的正弦信号(幅值为220,频率50Hz)进行比较,然后经过PI控制器实现实时跟踪的目的。进而达到逆变器出口侧输出电压为220V,频率50Hz的电能[30]。逆变器出口侧的滤波部分都采用两个电容($C = 100 \mu\text{f}$)和一个电感(10mH)组成的 π 滤波器[31][32]。时钟控制的开关自动控制负载和电源的投切。

5. 总结

本文针对微网切换做了全面的介绍,在不同故障中对于维持系统的稳态和暂态稳定提出了不同控制策略,搭建的微电网实验平台基本能够实现了微电网孤网、并网转孤网2种运行模式的实验[33],通过上述控制方法,微电网在孤网稳态运行状况下能够保证运行过程中发出、消耗功率的平衡,电压稳定,从而说明微电网能够实现运行状态的稳定运行[34],但针对并网转孤网等暂态运行情况下的实时切换、运行稳定问题还不能很好的解决。同时本文在内容有如下创新:

- 1) 提出了运用稳定控制器、调节储能、分级切断负荷相结合的控制思想;
- 2) 综合经济便捷的原则充分利用智能控制对闲置EV纳入储能调控单元;
- 3) 仿真过程中借助 Matlab/Simulink 中可控电压源的电压变化模拟了微网故障的变化,简化实验操作,方便结果分析。

参考文献 (References)

- [1] 王志琦 (2013) 微电网无缝切换控制策略研究. 硕士论文, 浙江工业大学, 杭州.
- [2] 张卫红, 于吉庆, 王坤 (2011) 新能源发电并网标准比较. *黑龙江电力*, 6, 403-408.
- [3] 卢芸, 白钦予, 路昱, 邵宝珠, 李家珏 (2014) 一种微网静态电压稳定判别指标研究. *东北电力技术*, 5, 1-6.
- [4] 王碧芳, 曹艳 (2014) 直流微网孤岛运行状态电压稳定性分析. *通信电源技术*, 3, 7-10, 13.
- [5] 高晓芝 (2012) 微网控制策略与电能质量改善研究. 天津大学, 天津.
- [6] 张振良, 李秀锦 (2012) 基于主从控制策略的微网稳定性研究. *河北电力技术*, 2, 14-17, 20.
- [7] 张纯 (2011) 微网双模式运行的控制策略研究. 硕士论文, 重庆大学, 重庆.
- [8] 孙云岭 (2013) 微网运行控制策略及并网标准研究. 华北电力大学, 北京.
- [9] 黄杏 (2013) 微网系统并/离网特性与控制策略研究. 北京交通大学, 北京.

- [10] 龚根平 (2014) 微电网下垂控制及新型微网的研究. 硕士论文, 华东交通大学, 南昌.
- [11] 王永刚 (2012) 基于下垂控制的微网频率稳定性分析. 硕士论文, 华北电力大学, 北京.
- [12] 汤翔, 玉素娇, 郭海平 (2013) 一种新的微网稳定性分析方法. *电气应用*, **17**, 30-33.
- [13] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G. and Vitelli, M. (2005) Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **20**, 963-973. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2005.850975>
- [14] Barklund, E., Pogaku, N. and Prodanovic, M. (2008) Energy management in autonomous micro-grid using stability-constrained droop control of inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **23**, 2346-2352. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2008.2001910>
- [15] 范元亮, 苗逸群 (2012) 基于下垂控制结构微网小扰动稳定性分析. *电力系统保护与控制*, **4**, 1-7, 13.
- [16] 肖朝霞, 方红伟 (2011) 含多分布式电源的微网暂态稳定分析. *电工技术学报*, **S1**, 253-261.
- [17] Kroposki, B., Lasseter, R., Ise, T., Morozumi, S., Papatlianassiou, S. and Hatziaargyriou, N.D. (2008) Making micro-grids work. *IEEE Power and Energy Magazine*, **6**, 41-53.
- [18] 林莉 (2013) 微网中储能系统管理与控制研究. 硕士论文, 西华大学, 成都.
- [19] 王中秋 (2011) 分布式储能对微网运行特性的作用研究. 硕士论文, 华北电力大学, 北京.
- [20] 苗轶群, 江全元, 曹一家 (2013) 考虑电动汽车随机接入的微网优化调度. *电力自动化设备*, **12**, 1-7.
- [21] Nagothu, K., Kelley, B., Jamshidi, M. and Rajae, A. (2012) Persistent Net-AMI for micro-grid infrastructure using cognitive radio on cloud data centers. *IEEE Systems Journal*, **6**, 4-15. <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2011.2162794>
- [22] 江岳春, 王志刚, 杨春月 (2013) 可控负荷在微网孤岛运行时的调频作用研究. *陕西电力*, **4**, 31-36.
- [23] Rajeev, T. and Ashok, S. (2011) A cloud computing approach for power management of micro-grids. *Innovative Smart Grid Technologies*, **9**, 49-52.
- [24] 刘志勇 (2010) 微电网建模仿真研究及平台开发. 硕士论文, 湖南大学, 长沙.
- [25] 李娟 (2014) 并网光伏发电系统建模及其对配电网的影响研究. 硕士论文, 山东大学, 济南.
- [26] Mohamed, F.A. (2008) Micro-grid modelling and online management. Helsinki University, Helsinki, 14-15.
- [27] 刘飞, 段善旭, 查晓明 (2009) 基于 LCL 滤波器的并网逆变器双环控制设计. *中国电机工程学报*, **S1**, 234-240.
- [28] Guerrero, J.M. and Matas, J. (2006) Wireless control strategy for parallel operation of distributed generation inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **53**, 1461-1470. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2006.882015>
- [29] 张兴, 张崇巍, 编著 (2012) PWM 整流器及其控制. 机械工业出版社, 北京, 2.
- [30] Wang, C.S., Xiao, Z.X. and Wu, S.X. (2009) Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in micro grids. *Transactions of China Electrotechnical Society*, **24**, 100-107.
- [31] 刘凤君 (2006) 现代逆变技术及应用. 电子工业出版社, 北京, 1-171.
- [32] Gow, J.A. and Manning, C.D. (2000) Photovoltaic converter system suitable for use in small scale stand-alone or grid-connected applications. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, **147**, 535-543. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-epa:20000789>
- [33] 欧阳翠, 牛铭 (2011) 基于不同控制策略的微网仿真. *电网与清洁能源*, **3**, 19-24.
- [34] 张小珍 (2014) 含不同微源接口的微网建模及稳定性分析. 硕士论文, 华北电力大学, 北京.