



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Xiao, Zhao xia; Zhu, Mingke; Guerrero, Josep M.

Published in:
2017

Publication date:
2017

Document Version
Early version, also known as pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Xiao, Z. X., Zhu, M., & Guerrero, J. M. (2017). . In 2017 China Electrotechnical Society.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

含不对称负荷的微电网黑启动控制策略研究

肖朝霞¹ 朱明科¹ Josep M. Guerrero²

(1.天津工业大学电工电能新技术天津市重点实验室 天津西青区 300387

2. Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark)

joz@et.aau.dk www.microgrids.et.aau.dk

摘要 微电网在离网运行过程中,存在因故障而发生失电重启的情况,为了提高对负荷的供电可靠性,微电网应具有黑启动能力,由于微电网一般为低压电网,负荷多以单相接入,在失电解列情况下,研究含不对称负荷的微电网黑启动控制策略是必要的。本文将研究采用下垂控制带不对称负荷的微电源并行启动,采用预同步的方法实现多微电源并联。同时分析不同黑启动顺序对供电可靠性的影响。利用 Matlab/Simulink 建立微电网的模型,验证含不对称负荷的微电网黑启动并网控制策略的正确性,并对不同黑启动顺序进行了比较。

关键词: 微电网 黑启动 下垂控制 不对称负荷 供电可靠性

中图分类号: TM72

A Black Start Control Strategy Applied to Islanded Microgrids Including Unbalanced Loads

Xiao Zhaoxia¹ Zhu Mingke¹ Josep M. Guerrero²

(1.Tianjin Key Laboratory of Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,

Tianjin Polytechnic University, Tianjin, 300387, P.R.China

2. Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark)

Abstract Islanded microgrids need for proper black start to ensure their operation after a black out or shoot down of the system. Nevertheless, since major part of microgrids operate in three-phase supporting three-phase and single-phase loads, current unbalances may appear, which may produce voltage unbalances. This fact may difficult the black start process, specially connecting inverters to voltage unbalanced microgrids. Consequently, it worth to study microgrid black start strategy including unbalanced loads. This paper will study the use of droop controlled inverters supplying unbalanced loads, by using a synchronization method with the aim of achieving their parallel operation after a general failure. Further, the black-start sequence is an essential part of this study, which imposes the order of recovery in order to achieve microgrid to be successfully restored. The microgrid model is

established by using Matlab/Simulink in order to verify the correctness of the black-start strategy under unbalanced load conditions. Finally, the comparison among the re-connection order of the different inverters in the microgrid is presented.

Keywords: Microgrid, black-start, droop control, unbalanced load, supply reliability

0 引言

在全球气候变化与环境变化的压力下,我国能源消费结构正逐步向清洁化转型,以光伏、风电为代表的新能源成为发展重点,以分布式新能源为主要电源的微电网成为重要组成部分。微电网可联网和独立运行^[1-2]。独立微电网为保障负荷的可靠供电,其故障情况下应具备黑启动能力^[3]。所谓黑启动(black start),是指供电系统因故障停运后,不依赖于其他电网,仅由系统中具备自启动能力的机组带动无自启动能力的机组,逐渐扩大供电恢复范围,最终实现整个系统的恢复^[4]。

微电网系统多集中在中/低压配电网,其内部包含大量逆变器型电源,这些电力电子装置控制灵活、响应速度快,但过载能力、故障穿越能力和单机容量小^[5],并且微电网通常带有不对称负荷,这些都为故障解列后微电网的黑启动带来了困难。

目前,微电网中微电源的控制方式主要有电压控制方式和电流控制方式^[6-9]。采用功率(PQ)控制的微电源,其接口逆变器可以等效为一个受控电流源,采用电压频率(V/F)控制或下垂(Droop)控制的接口逆变器可等效为可控电压源。

在微电网的黑启动过程中,具备自启动能力的微电源存在自启动过程和同期并联的过程。因此,此类微电源需要具备与微电网并联和独立运行两种模式间平滑切换的能力。文献[5-10]中提出独立微电网中具有自启动能力的微电源在不同运行模式下采用不同的控制方式,以满足不同运行时期的需求。微电源带负荷

在自启动过程中采用电压频率控制,自启动完成后非主参考电源切换成功率控制完成与主参考电源的并联。该控制方式存在切换失败的风险。因此从微电源运行模式可靠平滑切换的角度出发,下垂控制成为具有自启动能力微电源的一种较好选择^[11]。此外微电网正常运行时,采用下垂控制的微电源能够实现无通信负载功率共享。

因此,本文研究带不对称负荷的微电网黑启动控制策略。首先研究具有自启动能力微电源的序分量下垂控制,正序为常规下垂控制,负序和零序电压加在正序输出上进行电压电流控制。然后研究并联开关控制,通过调节非主参考电源的电压幅值、频率和相角与主参考电源一致,实现具有自启动能力的微电源并联。最后研究不同的黑启动顺序对微电网供电可靠性的影响。

1 微电网黑启动系统的总体结构

微电网系统结构如图1所示,包括两个具有自启动能力的微电源和一个不具有自启动能力的微电源,具有自启动能力的微电源采用序分量下垂控制,不具有自启动能力的微电源采用功率控制。具有自启动能力的微电源分别带有不对称负荷。并联开关通过采集开关两侧电压,计算电压交叉项进行并联控制,并将输出的电压幅值偏差和频率偏差输入到非主参考微电源的序分量下垂控制中,进行电压和频率调整,当两个逆变器的电压幅值、相角、频率满足并联条件时,并联开关闭合。

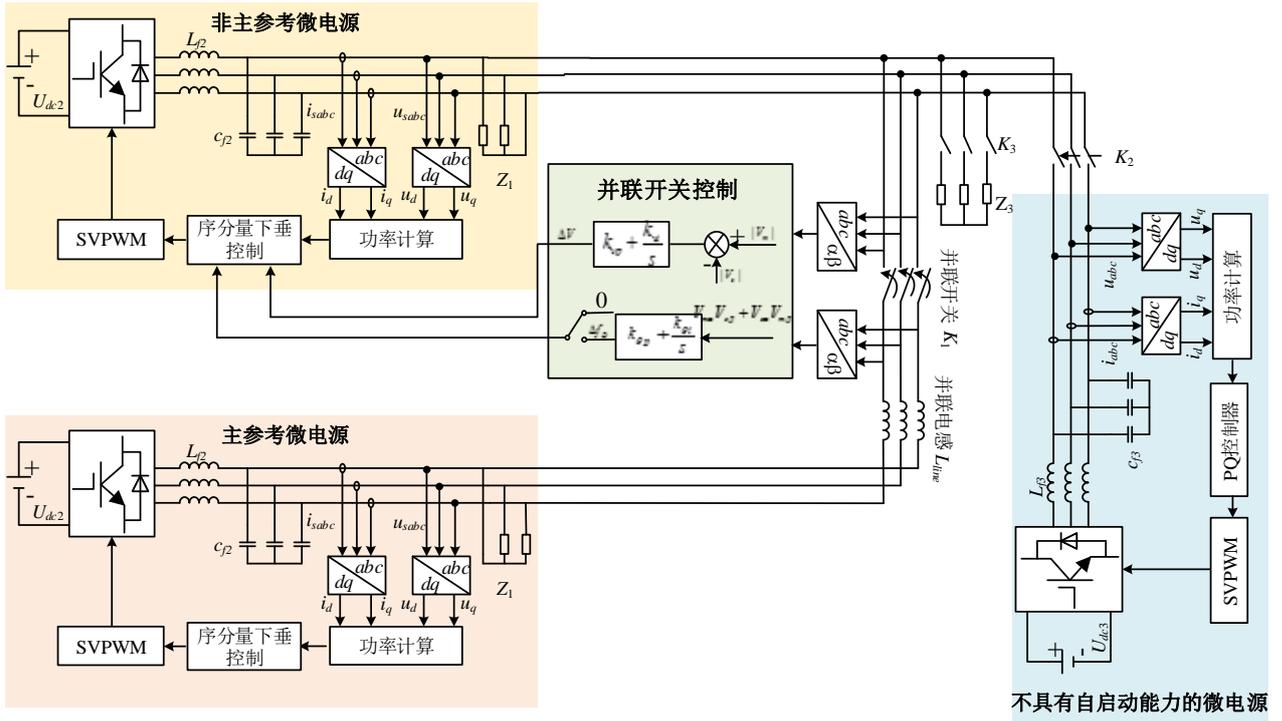


图1 微电网总体结构

Fig.1 Structure of a Microgrid

2 微电网黑启动策略

2.1 具有黑启动能力的微电源序分量下垂控制

当具有黑启动能力的微电源带有三相不对称负荷时，所采用序分量下垂控制如图2所示。根据对称分量法将不对称的三相电压分解为正序、负序和零序分量之和，正序分量采用下垂控制。负序分量和零序分量加在正序输出上进行电压电流控制。

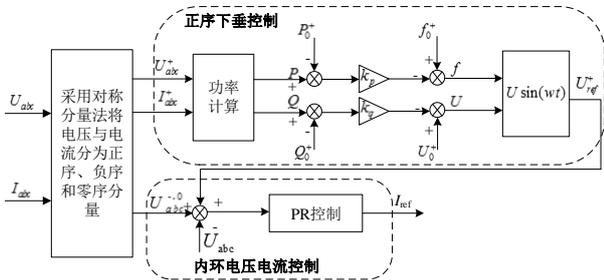


图2 序分量下垂控制

Fig.2 Droop control with unbalanced loads

2.2 不具有自启动能力的微电源功率控制

不具有自启动能力的微电源功率控制如图3所示，控制器包括外环功率控制和内环电流控制。

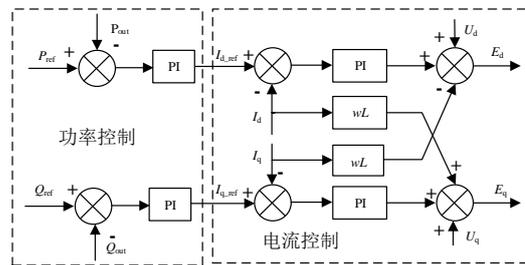


图3 PQ控制

Fig.3 PQ control

3 微电网黑启动的预同步过程

并联条件为两个并联逆变器输出的三相电压频率、幅值与相角差在允许范围内。因此具有自启动能力微电源并联需要一个预同步的过程。

3.1 预同步原理

两个具有自启动能力的微电源在并联的过程中，并网控制系统需要检测并联开关 K_1 两端电压 V_{mabc} 和 V_{sabc} ，以其中一个微电源为主参考源，另一个微电源为非主参考源，根据两端电压的幅值差、频率差和相角差分别进行调节，并将调节输出指令输送给非主参考源。非主参考源及时响应并联开关控制系统调节指

令，调节其电压幅值和频率，待并联开关控制系统检测到开关 K_1 两端电压满足并联要求后控制开关 K_1 闭合，两个微电源系统准同期并联过程结束，切除并联开关控制系统。频率和相角统一调节方法如图 4 所示，该方法能实现频率和相角统一调节，降低了并联控制的难度。

图 4 分别检测主参考源电压 V_{mabc} 和非主参考源电压 V_{sabc} 并计算相应幅值 ($|V_m|, |V_s|$)、频率 (f_m, f_s) 和相角 (θ_m, θ_s)，计算交叉项 $-V_{m\alpha}V_{s\beta} + V_{s\alpha}V_{m\beta}$ ，当交叉

项大于设定值(设定值由 u_0 表示)，输出频率指令为 0；当交叉项小于设定值时，输出频率指令 Δf_D [14]。

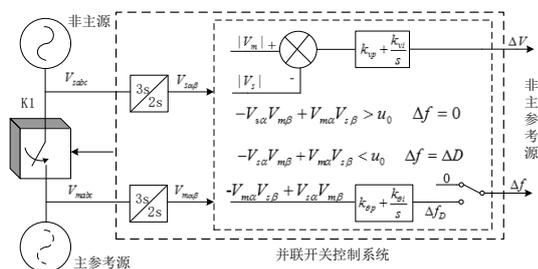


图 4 微电源并联开关电压同步控制方法

Fig.4 Control method of parallel switching voltage of micro - source

3.2 相角频率统一调节原理

由图 4 可知，其相角闭环调节如图 5 所示

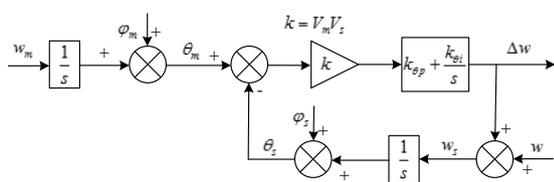


图 5 相角闭环传递函数

Fig.6 Phase angle closed - loop transfer function

图 5 中 w 为非主参考微电源的角频率， Δw 为并网角频率调节指令。由图 5 可得：

$$\frac{\theta_s}{\theta_m} = \frac{V_m V_s k_{\theta p} s + V_m V_s k_{\theta i}}{s^2 + V_m V_s k_{\theta p} s + V_m V_s k_{\theta i}} \quad (1)$$

由图 5 亦可得：

$$\frac{w_s}{w_m} = \frac{V_m V_s k_{\theta p} s + V_m V_s k_{\theta i}}{s^2 + V_m V_s k_{\theta p} s + V_m V_s k_{\theta i}} \quad (2)$$

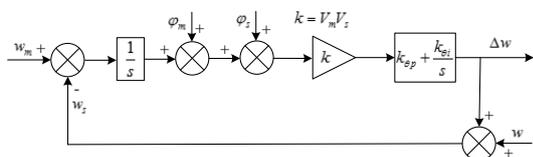


图 6 频率闭环调节

Fig.6 Frequency closed loop regulation

比较式 (1) 和式 (2) 可知，相角闭环调节和频率闭环调节传递函数具有相同的特征方程。由式 (2) 可知，当交叉计算项通过调节为 0 时，即微电源间频率的差值随时间的积分的值正好与两微电源电压相位差的值相等时，即交叉计算项为 0 时，此时两微电源电压的频率与相位满足逆变器并联条件。调频指令调节非主参考微电源的频率，选择合适的闭环调节参数 ($k_{\theta p}$ 、 $k_{\theta i}$) 可以同时满足频率和相角的稳定跟踪。

3.3 黑启动的启动顺序

微电网黑启动的恢复策略可分为串行恢复和并行恢复，不同的启动顺序对微电网供电可靠性的影响不同。并行恢复是在黑启动初期同时启动多个黑启动微电源，形成多个子系统，运行稳定后并网，相对于串行恢复，能够快速地恢复微电网供电[15]，本系统采用串行与并行恢复结合完成微电网黑启动。微电网的黑启动恢复过程如图 7 所示。

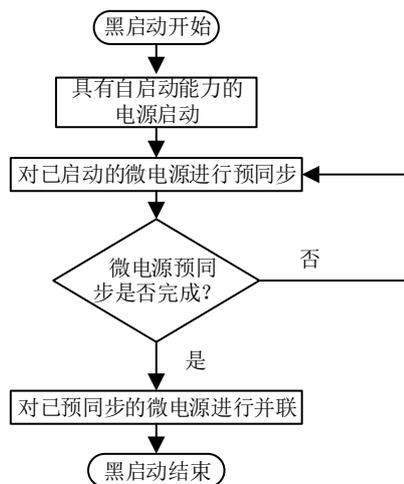


图 7 微电网黑启动策略流程图

Fig.7 Microgrid black start strategy flow chart

4 黑启动过程的仿真验证

使用 Matlab/Simulink 独立微电网的黑启动过程进行仿真，仿真参数如下表所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值
自带启动能力的主参考微电源、非主参考微电源	
微电源 1、2 额定容量/kw	50

有功下垂系数 K_{p1} 、 K_{p2}	1E-5
无功下垂系数 K_{q1} 、 K_{q2}	3E-4
并联电感	0.4E-3
三相不平衡负载 Z1 各相功率/kw	15、10、25
三相不平衡负载 Z2 各相功率/kw	10、3、7
三相不平衡负载 Z3 各相功率/kw	10、10、10
无自启动能力的微电源参数	数值
P_{ref}/kw	30
$Q_{ref}/kvar$	0
PQ 控制有功外环 k_{p3} 、 k_{i1}	0.003、1.5
PQ 控制无功外环 k_{p4} 、 k_{i2}	0.003、1.5
PQ 控制电流内环 k_{p5} 、 k_{i3}	21、440
并联开关控制系统参数	数值
电压调节环节比例系数 k_v	0.1
电压调节环节积分系数 k_{vi}	5
频率与相角调节环节比例系数 $k_{\theta p}$	1E-5
频率与相角调节环节积分系数 $k_{\theta i}$	2E-5
交叉计算项触发值	10000

表 2 黑启动过程算例 1

Tab.2 Black start process 1

T=0s	有自启动能力的微电源自启动
T=0.3s	启动非黑启动微电源，并入自启动微电源
T=0.5s	恢复部分负荷
交叉计算项符合条件	启动并联开关控制系统
交叉计算项符合条件 5s 后	并联开关闭合,切除控制系统

表 3 黑启动过程算例 2

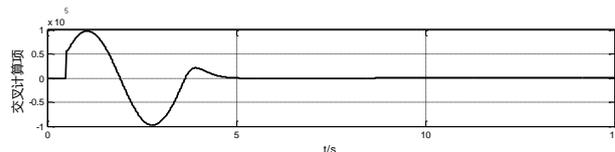
Tab.3 Black start process 2

T=0s	有自启动能力的微电源带负荷自启动
交叉计算项符合条件	启动并联开关控制系统
交叉计算项符合条件 5s 后	并联开关闭合,切除控制系统
10s 后	启动非黑启动微电源，并入主参考微电源，并恢复负荷

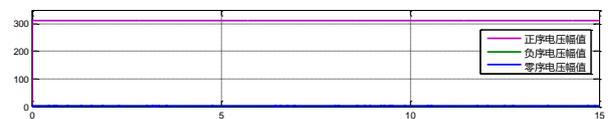
这两种黑启动过程的主要区别为 PQ 控制的非自启动微电源启动是在黑启动微电源的并联之前还是在并联之后。

算例 1

PQ 控制的非自启动能力的微电源首先与其中一个带自启动能力的微电源并联，扩容后，恢复部分负荷，再与其它带具有自启动能力的微电源并联。



(a)交叉计算项的变化



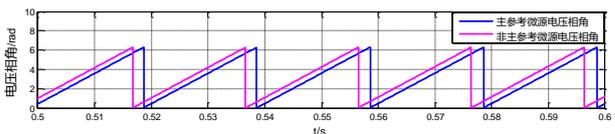
(b)带不对称负荷的主参考微电源各相序电压幅值



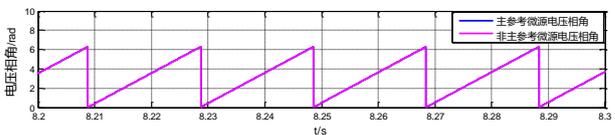
(c)带不对称负荷的非主参考微电源各相序电压幅值



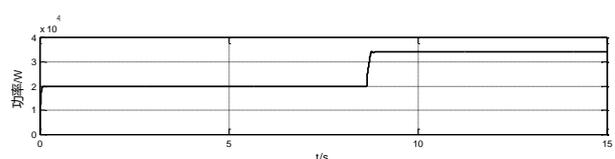
(d)主参考微电源与非主参考微电源的正序电压幅值



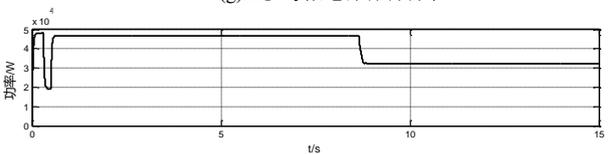
(e)主参考微电源与非主参考微电源之间初始的相角



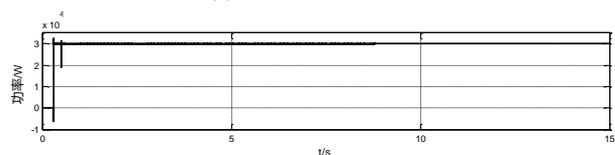
(f)主参考微电源与非主参考微电源达到并联要求的相角



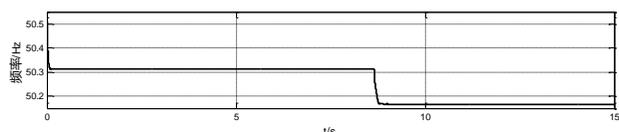
(g)主参考微电源有功功率



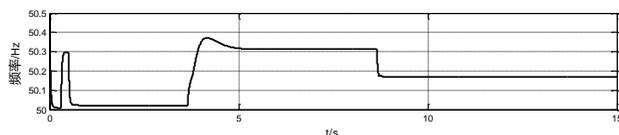
(h)非主参考微电源有功功率



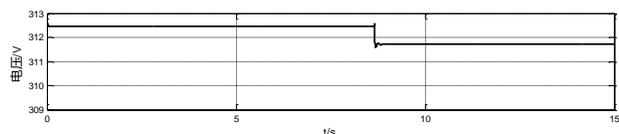
(i) PQ 控制微电源有功功率



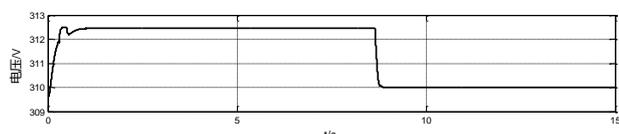
(j)主参考微电源频率



(k)非主参考微电源频率



(l)主参考微电源电压

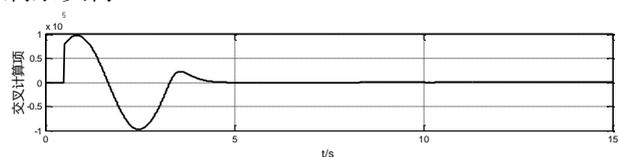


(m)非主参考微电源电压

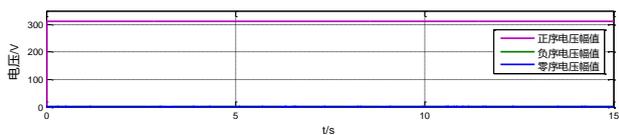
图 8 黑启动过程算例 1
Fig.8 Black start process 1

算例 2

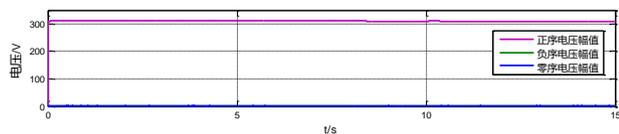
具有自启动能力的微电源并联之后再与 PQ 控制的非自启动能力的微电源并联，最后恢复所有的剩余负荷。



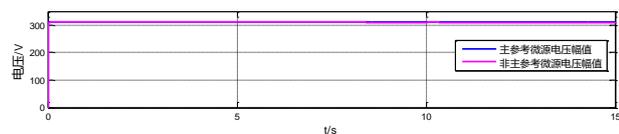
(a)交叉计算项的变化



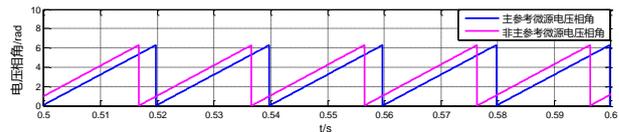
(b)带不对称负荷的主参考微电源各相序电压幅值



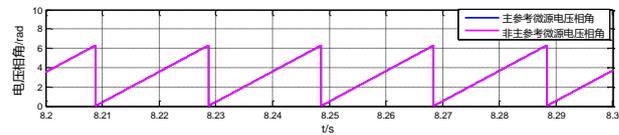
(c)带不对称负荷的非主参考微电源各相序电压幅值



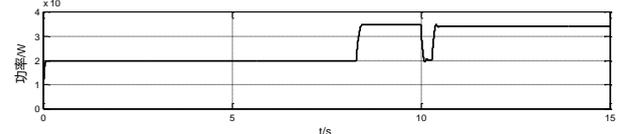
(d)主参考微电源与非主参考微电源的电压幅值



(e)主参考微电源与非主参考微电源之间初始的相角



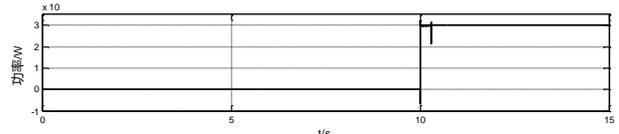
(f)主参考微电源与非主参考微电源达到并联要求的相角



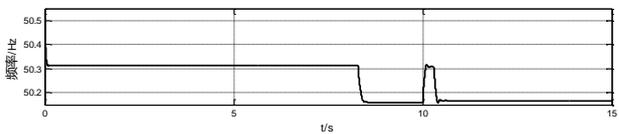
(g)主参考微电源有功功率



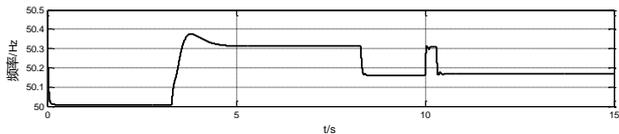
(h)非主参考微电源有功功率



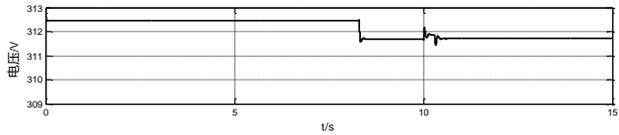
(i) PQ 控制微电源有功功率



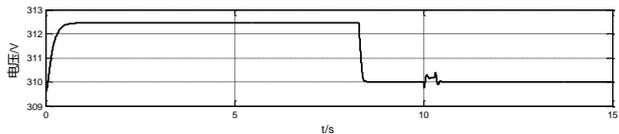
(j)主参考微电源频率



(k)非主参考微电源频率



(l)主参考微电源电压



(m)非主参考微电源电压

图 9 黑启动过程算例 2
Fig.9 Black start process 2

通过比较两种黑启动顺序可知，两种黑启动都能顺利完成，黑启动过程算例 1 由于先并联 PQ 控制的非自启动

电源, 可以扩容后先恢复负荷, 所以黑启动过程算例 1 在恢复负荷的速率会相对快一些。但是如果 PQ 控制的非自启动电源容量较大或功率波动, 可能无法先启动。

5 结论

本文研究了带不对称负荷的微电网黑启动控制策略, 提出了对带不对称负荷具有自启动能力微电源的序分量下垂控制。并研究并联开关控制策略, 分析了并联开关控制策略中频率与相角同时达到同步并网的原理。最后研究了不同的黑启动顺序对微电网供电可靠性的影响, 提出可行的黑启动顺序。

参考文献

- [1] 童荣斌, 牟龙华, 庄伟. 新型微电网外部短路故障保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 78-84.
TONG Rong-bin, MU Long-hua, ZHUANG Wei. New protection scheme for external short-circuit fault of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 78-84.
- [2] 周念成, 邓浩, 王强钢, 等. 光伏与微型燃气轮机混合微电网能量管理研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 74-84.
ZHOU Nian-cheng, DENG Hao, WANG Qiang-gang, et al. Energy management strategy of PV and micro-turbine hybrid microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 74-84.
- [3] 裴玮, 李澍森, 李惠宇, 等. 微电网运行控制的关键技术及其测试平台[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 94-98, 111.
Pei Wei, Li Shusen, Li Huiyu, et al. Testbed and information integration of EMS for a microgrid with multi-energy generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 94-98, 111.
- [4] 熊思敏, 房鑫炎, 郁惟铺, 等. 电力系统全网停电后的恢复—黑启动综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 12-17.
Xiong Simin, Fang Xinyan, Yu Weipu, et al. The summary of black-start restoration of electrical power system after blackout[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(3): 12-17.
- [5] 杨琦, 马世英, 李胜, 等. 微型电网运行及控制设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊): 267-273.
Yang Qi, Ma Shiyong, Li Sheng, et al. Design of microgrid operation model and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 267-273 (in Chinese).
- [6] 区伟健, 房鑫炎. 基于熵值法和主成分分析法的黑启动模式评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 22-27.
Ou Weijian, Fang Xinyan. Assessment of black-start modes based on entropy value method and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 22-27.
- [7] 钟慧荣, 顾雪平, 朱玲欣. 黑启动恢复中网架重构阶段的负荷恢复优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 26-32.
ZHONG Hui-rong, GU Xue-ping, ZHU Ling-xin. Optimization of load restoration during network reconfiguring process of black-start restoration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 26-32.
- [8] 牟龙华, 夏明栋, 刘仲. 微电网的黑启动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, (22): 32-37.
Mu Longhua, Xia Mingdong, Liu Zhong. Research on black-start for microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 32-37.
- [9] 黄杏, 金新民. 微电网离网黑启动优化控制方案[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 1892-1904.
HUANG Xing, JIN Xin-min. An optimized island microgrid black-start control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 1892-1904.
- [10] 郭力, 富晓鹏, 李霞林, 等. 独立交流微电网中电池储能与柴油发电机的协调控制 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 70-78.
GUO Li, FU Xiaopeng, LI Xialin, et al. Coordinated control of battery storage and diesel generators in isolated AC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 70-78.
- [11] 胡雯, 孙云莲. 逆变型微电源孤岛模式下的控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 107-113.
HU Wen, SUN Yunlian. Control strategy of inverter-based micro-sources in island mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 107-113.
- [12] 王成山. 微电网分析与仿真实论[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 134-135.
Wang Chengshan. Analysis and Simulation Theory of Microgrids[M]. Beijing: Science Press, 2013: 134-135.

- [13] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20.
Wang Chengshan, Li Yan, Peng Ke. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(2): 12-20.
- [14] 梁建钢, 金新民, 荆龙, 吴学智. 微电网系统准同期并网改进控制策略[J]. 电网技术, 2014, (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.
- [15] 李胜, 张建华, 李春叶, 等. 微电网 (Microgrid) 的并网运行方式探讨[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(2): 184-187.
Li Sheng, Zhang Jianhua, Li Chunye, et al. A discussion on the integrated operation mode of microgrids[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(2): 184-187.

作者简介

肖朝霞 女, 1981 年生, 博士, 副教授, 研究方向为研究方向分布式发电系统及其控制。

E-mail: xiaozhaoxia@tjpu.edu.cn (通信作者)

朱明科 男, 1992 年生, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电控制。

E-mail: dowson1992@hotmail.com

Josep M. Guerrero 男, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电与微电网。

E-mail: joz@et.aau.dk