

微电网的黑启动研究

牟龙华, 夏明栋, 刘仲

(同济大学电气工程系, 上海 201804)

摘要: 为了提高微电网供电可靠性, 提出一种针对全黑的孤立微电网的黑启动方案。结合微源特性及其控制方式, 对微源的黑启动能力进行比较, 确定了黑启动微源的选取原则, 给出了黑启动过程中有黑启动能力和无黑启动能力微源的控制方式要求。分析了微电网黑启动的并行/串行网架恢复策略, 指出应采用启动速度更快的并行恢复策略, 并制定了详细的黑启动操作流程。利用 Matlab/Simulink 建立各微源控制模型以及微电网仿真模型, 仿真结果验证了微电网黑启动方案及其操作流程的可行性。

关键词: 微电网; 黑启动; 策略; 并行恢复; 串行恢复

Research on black-start for microgrid

MU Long-hua, XIA Ming-dong, LIU Zhong

(Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to improve the reliability of microgrid power supply, this paper proposes a set of black-start scheme for the isolated microgrid. Based on the analysis of the characteristics and control of microsourses, and the comparison of black-start capabilities of them, the selection principle of microsourses in the process of black-start is established and the control requirements of them with and without black-start capabilities are expressed. Moreover, this paper analyzes the serial and parallel restoration strategy of the microgrid black-start and presents that the parallel strategy with high speed is more appropriate for the process. At the same time, the detailed operation procedure of black-start is formulated. The control models of microsourses and the simulation model of microgrid are built with Matlab/Simulink, and the simulation results verify the feasibility of the microgrid black-start scheme and the operation procedure.

Key words: microgrid; black-start; strategy; parallel restoration; serial restoration

中图分类号: TM619 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0032-06

0 引言

近年来, 分布式发电技术以其能源利用率高、污染小、可靠性高等特点受到了广泛关注, 其中分布式发电技术可充分利用多种可再生能源, 为人类解决日益严重的能源和环境危机带来新的方向^[1]。随着分布式发电技术的发展, 多种分布式电源、储能装置、负荷及控制装置组合成独立的供电系统, 以微网的形式接入大电网, 利用控制的灵活性可实现其对大电网供电能力和电能质量的支撑作用^[2]。为提高供电可靠性, 当主电网发生意外故障或运行维护时, 微网可运行于孤立运行状态, 从而实现对

局部电网的稳定供电^[3-4]。

考虑到微网系统孤立运行时, 可能由于某些故障而导致系统失电, 为进一步提高系统的供电可靠性, 微网系统应具有孤立运行状态下的黑启动功能^[5]。所谓微网黑启动(Black Start), 指在整个微网因外部或内部故障停运进入全黑状态后, 不依靠大电网或其他微网的帮助, 仅通过启动微网内部具有黑启动能力的微源, 进而带动微网内无黑启动能力的微源, 逐步扩大系统的恢复范围, 最终实现整个微网的重新启动。

对于电力系统的黑启动问题, 目前国内外已有多篇论文对其加以介绍^[6-8], 但这些研究成果大多针对传统电网黑启动, 而很少涉及微网系统黑启动。传统黑启动方案主要针对大型电网, 与之相比, 微网系统多集中在中/低压配电网, 其内部包含大量逆

基金项目: 上海市科学技术委员会资助(12ZR1451300); 浙江省重大科技专项(2013C01063)

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发电容量均远小于传统旋转机械类电源^[9], 因此, 微网系统很难直接沿用传统电网的黑启动方案^[10]。鉴于用户对于分布式能源可靠性要求的不断提高, 微网系统黑启动研究是推进微网系统应用亟需解决的问题。

为提高微电网黑启动可靠性, 本文对黑启动中的微源种类、控制方式、黑启动网架恢复策略以及黑启动操作步骤进行了研究。参照已经搭建的微网实验平台, 在Matlab/Simulink平台搭建了由柴油发电机、光伏和蓄电池组成的低压微网仿真模型, 验证了所提出的黑启动策略有效性和可行性。

1 微网结构

一种微网结构如图1所示, 该微网系统包含柴油发电机、光伏发电和蓄电池三个微源。微网和主网通过公共连接点PCC连接, 在该处设置断路器, 通过PCC处断路器的开闭实现微网孤岛和并网两种运行模式的切换。微网内有四个负荷, 在负荷2、3、4处分别接入柴油发电机、蓄电池和光伏三个微源。

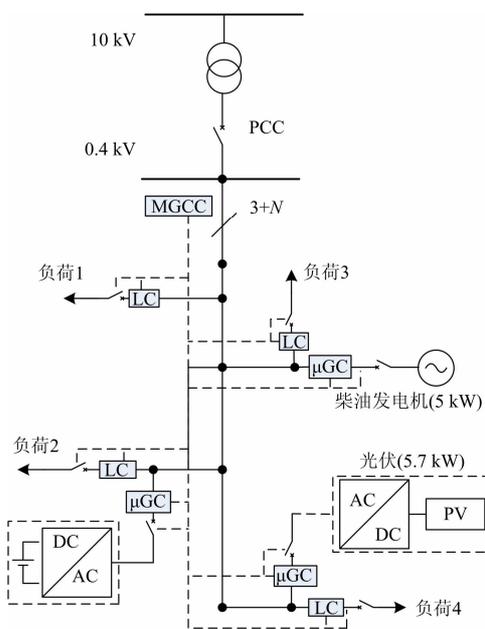


图1 一种微网结构图

Fig. 1 Structure of microgrid

2 微源黑启动能力与控制

2.1 微源黑启动能力

在微网联网运行时, 系统电压与频率支撑由大电网提供^[11], 而本文主要研究微网在孤岛运行状态下的黑启动。在没有外部电网支持情况下, 黑启动

电源的自启动能力是系统顺利完成黑启动的关键^[12]。所谓黑启动微源, 是指其在输出端电压为零的情况下, 能够自动启动建立微网系统电压, 并带动微网系统中其他无黑启动功能的电源启动, 逐步扩大微网系统发电容量, 以期最终实现微网系统在孤岛运行状态下的黑启动操作^[13]。在传统电力系统中通常使用水轮发电机组或大型燃气轮机作为黑启动电源^[14]。通过类比, 可以得出微网系统在黑启动电源选择上的原则:

1) 具有调压调频能力。为保证微网系统在孤岛运行状态下的电压和频率稳定, 黑启动电源在具有电压源输出特性的同时, 还应具有调压和调频功能。

2) 具有充足发电容量。能够保证较小的配电变压器激磁损耗和微网系统交流母线空载损耗, 并能够承受其他非黑启动电源启动时的短时功率冲击。

3) 具有足够备用容量。必须留有足够容量作为事故备用。

根据以上原则, 柴油发电机由于其燃料适应性好、控制灵活以及可靠性高的优点满足黑启动微源的基本原则, 是具有黑启动能力的微源。同时, 柴油发电机在黑启动源组网过程中作为主参考源, 而其他微源以柴发的电压幅值、频率以及相角为参考进行组网。蓄电池具有快速调节特性和充放电状态快速切换的优点, 这使其能够快速自启动且减缓其他微源带来的冲击, 因而也是具有黑启动能力的微源。光伏发电则由于受外界天气影响较大, 其有功率输出特性的随机性很大, 很容易造成电网频率波动, 是不具有黑启动能力的微源。

2.2 微源的控制方式

在微网黑启动中, 具有黑启动能力的微源在自启动过程中采用V/f控制, 目的是不管分布式电源输出功率如何变化, 其输出电压的幅值和频率一直维持不变, 为微网系统提供稳定的电压幅值和频率参考。不具有黑启动能力的微源采用PQ控制, 控制目的是使分布式电源输出的有功功率和无功功率等于其参考功率。分布式发电单元的示意图^[15]如图2所示。

图中: V_{dc} 为等效的直流源; L_{fi} 为滤波电感; C_{fi} 为滤波电容; R_{fi} 为滤波电阻; Z_{li} 为线路阻抗; Z_l 为恒阻抗负载; V_1 和 I_1 分别为逆变桥输出的电压和电流; V_{ld} 为逆变器输出的电压即电容电压; I_{li} 为流向线路中的电流; I_{Ci} 为流向滤波电容中的电流; V_1 和 V_2 分别为开关两侧的电压。

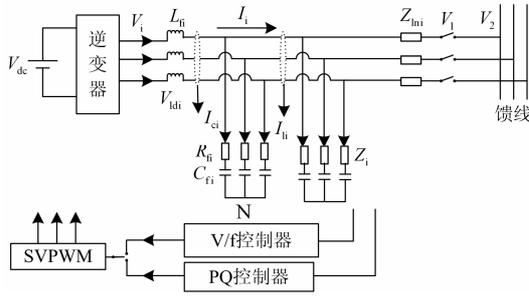


图2 分布式发电控制模型

Fig. 2 Control model of distributed generation

2.2.1 V/f控制

在低压微网下逆变电源输出功率为

$$\begin{cases} P = \frac{E(V-E)}{R} \\ Q = -\frac{VE}{R} \delta \end{cases} \quad (1)$$

式中： V 和 E 分别为逆变器的输出电压和公共母线电压幅值； δ 为输出电压相位。由式（1）可得微源输出的有功功率主要与输出电压幅值有关，而无功功率主要与输出电压相角有关。因而，控制方程可写为

$$\begin{cases} V = V_n + \frac{P_n - P}{a} \\ f = f_n + \frac{Q}{b} \end{cases} \quad (2)$$

式中： V_n 为微源输出额定功率下的电压； P_n 为微源的额定输出功率； f_n 为电网的额定频率。利用上述低压下垂特性的V/f控制来实现低压微网孤岛模式下不同微源间变化功率的共享，同时为系统提供电压和频率支撑。其控制器主要包括两个部分：功率控制器（如图3）和电压电流双环控制器（如图4）。

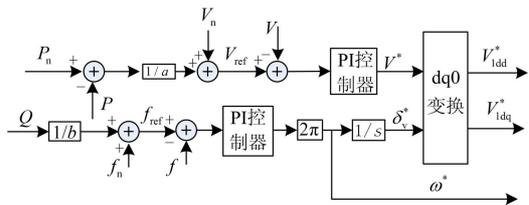


图3 功率控制器结构框图

Fig. 3 Structure of the power control

控制环中的功率为微源输出的瞬时功率，以提高整个系统的实时性，同时加入PI控制器以稳定输出电压的精度，功率控制器的输出将作为双环控制的参考电压。

图4所示的控制结构采用电压外环电流内环的双环控制方案，电压外环能够保证输出电压的稳定，

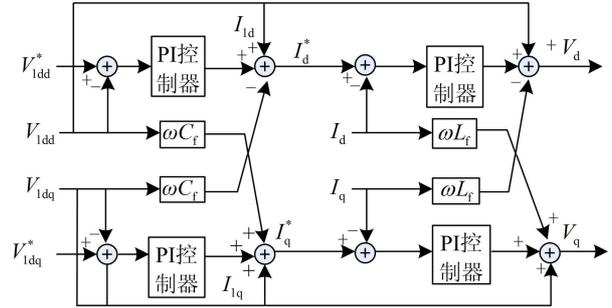


图4 电压电流双环控制结构框图

Fig. 4 Structure of the voltage-current loop controller

电流内环所构成的电流随动系统能大大加快抵御扰动的动态过程。图中， V_{1dd}^* 、 V_{1dq}^* 分别为功率控制器输出的参考电压d轴分量和q轴分量； V_{1dd} 、 V_{1dq} 分别为微源输出电压的d轴分量和q轴分量； I_d^* 、 I_q^* 分别为电流内环参考信号的d轴分量和q轴分量； I_d 、 I_q 分别为逆变桥输出的滤波电感电流的d轴分量和q轴分量。

2.2.2 PQ控制

PQ控制的目标就是使对应微源输出恒定的功率，控制器输入为参考有功 P_{ref} 和参考无功 Q_{ref} ，所以PQ控制器的性能的衡量也就是输入信号 P_{ref} 、 Q_{ref} 与系统输出功率的比较。PQ控制器结构如图5所示，控制器分为功率控制环和电流控制环。

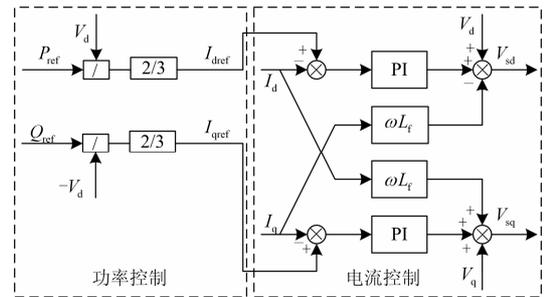


图5 PQ控制器结构框图

Fig. 5 Schematic diagram of the PQ controller

功率控制环中，输入参考功率，输出电流控制环的参考电流 I_{dref}^* 和 I_{qref}^* ，最后由电流控制环输出PWM产生器的输入信号 V_{sd}^* 和 V_{sq}^* 。

PQ控制时，参考电压及系统频率由其他微源或系统提供，控制性能主要与电流控制环中PI控制环的参数有关。PQ控制器的参数比V/f控制器中的少，只有两个参数，但这两个参数对系统的特性影响都很大。所以，在实际配置参数时，应根据具体情况和两参数对系统的影响进行调试。

3 黑启动网架恢复策略对比

微网网架恢复是微网黑启动的重要内容，主要

目标是通过选取一定的网架恢复路径恢复主要的微源和重要的负荷。合理的恢复路径应使黑启动微源充分利用启动功率, 迅速、安全地完成微网黑启动。微网黑启动方案中的网架恢复策略可分为并行恢复(又称向上恢复)和串行恢复(又称向下恢复)^[16-17]。

由表1可以看出串行恢复因为无需准同期并列装置, 系统简单, 即在黑启动初期由一个具有黑启动能力的微源建立电压后, 其他微源同步于该黑启动微源启动, 并以该黑启动微源为参考逐个并入微网系统, 无需同期并列装置。但在应用中的最大问题是没有充分利用各个微源的黑启动能力, 仅以单一的微源作为黑启动源, 无法进一步提升微网对负荷供电的可靠性。除此之外, 由于串行恢复需要依次启动每个微源然后并网, 消耗时间过长, 这就与黑启动要求快速启动的特点产生了矛盾。然而并行恢复允许多个具有黑启动能力的微源同时启动, 建立多个小的子系统, 恢复速度快, 运行灵活, 更符合微网的结构特性, 能够快速恢复整个微网的供电, 因而将会得到较多的应用。

表1 两种恢复策略对比

Table 1 Comparison of two restoration schemes

	并行恢复	串行恢复
恢复过程	多个黑启动源同时启动	单个黑启动源率先启动
特点	黑启动初期会形成多个子系统, 运行稳定后并网	电源依次启动, 逐步组网
优点	微网恢复速度快	无需同期并列装置, 结构简单
缺点	系统复杂	微网恢复速度慢

4 微网黑启动操作流程

根据前文所述, 本文采用基于并行恢复策略的微网黑启动方案。以图1所示的微网系统拓扑为例, 柴油发电机作为主参考源, 在黑启动过程中一直采用V/f控制。蓄电池在并网前作为黑启动源采用V/f控制, 并网时切换为PQ控制, 输出固定值的功率。光伏发电因不具有黑启动能力而一直采用PQ控制。在微网发生故障或停电检修时, 其具体的黑启动操作流程如下:

1) 切除微网系统负荷。为避免在黑启动初期微源因负荷过大而出现故障停机现象, 应首先切除系统内所有用电设备, 断开所有开关, 保证黑启动微源在空载状态下启动, 建立微网系统交流母线电压。

2) 启动黑启动微源。黑启动微源在启动过程中应当兼具下垂特性和黑启动功能, 能够实现快速稳定的自启动, 并具有调频和调压能力, 保证微网孤

岛运行时的电压和频率稳定。

3) 同期并列与模式切换。黑启动微源完成稳定自启动后, 通过预同步完成同期并列使柴油发电机与蓄电池的电压幅值、频率与相角同步。预同步方法的基本思路是: 在并联前, 待同步微源的参考值根据自身V/f控制提供, 在需要进行并联时, 参考值转换为自主参考源实时提供, 以此来实现与主参考源的同步运行。然后将蓄电池控制模式切换为PQ控制, 完成黑启动源的组网。

4) 启动非黑启动微源并入系统。黑启动微源组网后, 扩大了系统的发电容量, 能够有效地防止因非黑启动微源造成的启动功率冲击, 并维持系统电压与频率的稳定。具有多个非黑启动微源的微网启动应确保

$$\sum_{i=1}^n S_{imax} > \sum_{i=1}^{m_1} S_{ei} + \sum_{j=1}^{m_2} S_{Lj} + \sum_{k=1}^{m_3} S_{sk} \quad (3)$$

式中: S_{imax} 为系统已启动微源(共 n 台)的最大输出功率; S_{ei} 为配电变压器励磁损耗; S_{Lj} 为微网系统交流母线空载损耗; S_{sk} 为即将同时启动的非黑启动微源(共 m_3 台)的启动冲击功率。

5) 增加微网系统负荷。根据微源带负载情况, 加入部分负荷, 从而使微网带尽可能多的负载。根据电力系统功率平衡约束以及潮流约束, 投入微网系统的部分负荷应满足

$$\sum_{i=1} S_{loadi} \leq \sum_{i=1} S_{generationi} \quad (4)$$

$$U_{Gi\min} \leq U_{Gi} \leq U_{Gi\max} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (5)$$

$$|P_{ij}| \leq \bar{P}_{ij} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad i \neq j \quad (6)$$

$$|\Delta f| \leq 0.5 \text{ Hz} \quad (7)$$

式中: S_{loadi} 和 $S_{generationi}$ 分别为微网系统负荷和电源额定容量; N_G 为微网系统电源数目; U_{imax} 和 U_{imin} 分别为节点电压幅值 U_{Gi} 的上、下限; n 为微网系统内节点数目; P_{ij} 为线路有功功率; \bar{P}_{ij} 为线路有功功率限制值; Δf 为系统的频率偏差。

5 黑启动过程的仿真验证

为验证所提出的微网黑启动方案与微源黑启动策略, 在Matlab/Simulink中搭建如图1所示微网系统仿真实验平台。微网中有柴油发电机($\mu G1$)、蓄电池($\mu G2$)、光伏($\mu G3$)三个微源。

实验一: 对微源进行仿真实验。按照图1所示的微网结构图, 验证微源在不同控制模式下的运行特性。柴油发电机($\mu G1$)作为主参考源, 采用V/f控制运行负荷, 额定线电压380 V, 输出功率为5 kW,

负载为4 kW。蓄电池(μG2)因具有黑启动能力,前期采用V/f控制,负载为4 kW,后期模式切换为PQ控制,设定该控制模式下的参考输出功率为3 kW。蓄电池模型容量为500 Ah,额定电压380 V。光伏发电(μG3)则一直采用PQ控制,光伏发电模型参数:参考温度 $T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$,光照强度 $S_{ref}=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,光伏阵列最大输出功率为5.7 kW,参考输出功率为3.5 kW。各微源运行特性如图6~图8所示。

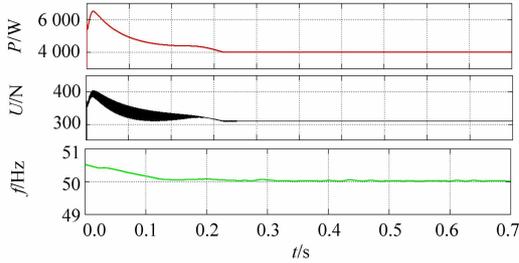


图6 柴油发电机有功功率、电压幅值与频率

Fig. 6 Active power output, voltage amplitude and frequency of diesel generator

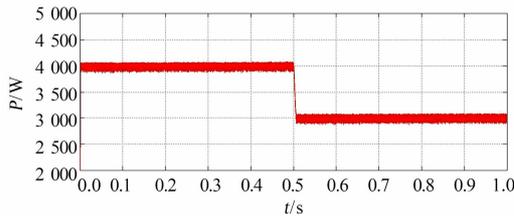


图7 蓄电池有功功率

Fig. 7 Active power output of storage unit

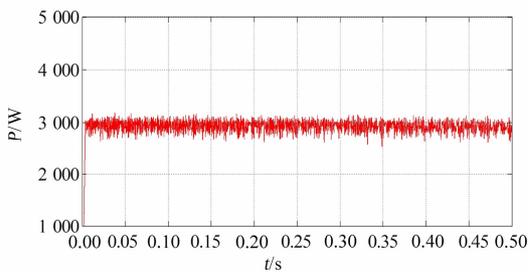


图8 光伏发电有功功率

Fig. 8 Active power output of photovoltaic power generation

由图6所示的柴油发电机输出功率与电压幅值、频率可以看出,柴油发电机不仅具有良好的自启动能力,而且能够为微网黑启动提供稳定地电压与频率支撑,是良好的主参考源。图7中的蓄电池前期采用V/f控制能稳定地自启动,并能够实现控制模式的平滑切换,不会引起系统较大的功率与电压波动。图8所示光伏发电的输出功率,在采用PQ控制模式下能够输出稳定的指定输出功率。本实验验证了微

源采取的控制方式的有效性与其可行性。

实验二:微网黑启动仿真实验。根据前文选取的微源控制方式以及恢复方式,假设系统发生意外故障进入全黑状态,进行微网黑启动实验。根据微网结构,微网黑启动流程如表2所示。

表2 微网黑启动流程

时间节点	过程描述
黑启动准备阶段	切除系统中所有负荷,打开所有开关
$t=0\ \text{s}$	柴油发电机与蓄电池都采用V/f控制,带负荷自启动
$t=0.4\ \text{s}$	蓄电池转换为PQ控制,并参考柴油发电机,调整相角、频率与幅值后与柴油发电机组网
$t=1\ \text{s}$	光伏采用PQ控制,与微网系统完成组网,黑启动完成

微网系统黑启动仿真结果如图9、图10所示。

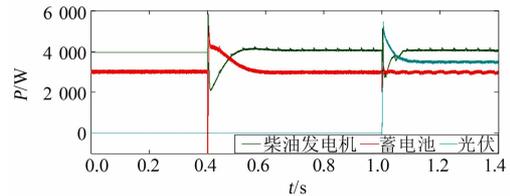


图9 微源有功功率

Fig. 9 Active power output of micro-generators

由图9可以看出按照上文提出的黑启动控制以及恢复策略,柴发与蓄电池可稳定并行自启动,建立起两个子系统,能够加快微网黑启动速度。由图9与图10中 $t=1\ \text{s}$ 时波动可看出黑启动源组网后,系统供电容量增加,有效地减小了光伏发电并网时造成的冲击,建立了稳定的微网系统,使微网恢复供电,实现了微网的快速稳定黑启动,验证了本文所提出的微网黑启动策略的有效性。

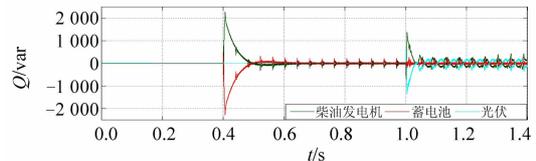


图10 微源输出无功功率

Fig. 10 Reactive power output of micro-generators

6 总结

本文从微源控制方式和黑启动恢复策略出发,研究并分析了微源的黑启动能力、控制方式以及并行恢复和串行恢复的优缺点。最终选用了启动速度

更快的并行恢复策略进行微网黑启动, 并制定了微网黑启动流程。仿真实验验证了本文所论述的微源黑启动操作的可行性。下一步将在实验平台上继续进行微网黑启动研究, 为微网的稳定快速恢复提供理论依据。

参考文献

- [1] LASSETER R H, ETO J H, SCHENKMAN B, et al. CERTS microgrid laboratory test bed[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(1): 325-332.
- [2] 张纯, 陈民铀, 王振存. 微网运行模式平滑切换的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 1-10.
ZHANG Chun, CHEN Min-you, WANG Zhen-cun. Study on control scheme for smooth transition of micro-grid operation modes[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 1-10.
- [3] 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.
- [4] 周念成, 邓浩, 王强钢, 等. 光伏与微型燃气轮机混合微网能量管理研究[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.
- [5] 孟强, 牟龙华, 许旭锋, 等. 孤立微网的黑启动研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 24(2): 92-99.
MENG Qiang, MU Long-hua, XU Xu-feng, et al. Research on isolated microgrid black-start[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 24(2): 92-99.
- [6] 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.
- [7] 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 Wei-jian, FANG Xin-yan. 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.
- [8] 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 Shi-ying, LI Sheng, et al. Design of microgrid operation model and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 267-273.
- [9] ROBERT H L, PIAGI P. Control and design of microgrid components (final project report)[R]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2006.
- [10] 黄杏, 金新民. 微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 micro-grid black-start control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 1892-1904.
- [11] 朱博, 陈民铀, 徐瑞林, 等. 孤岛模式下的微网优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 35-40.
ZHU Bo, CHEN Min-you, XU Rui-lin, et al. An optimal operation strategy of island microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 35-40.
- [12] CAI N, XU X, MITRA J. A hierarchical multi-agent control scheme for a black start-capable microgrid[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-7.
- [13] MOREIRA C L, RESENDE F O, LOPES J A P. Using low voltage microgrids for service restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 395-403.
- [14] 林振智, 文福拴, 薛禹胜, 等. 基于多属性群决策特征根法的智能电网黑启动决策[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 18-23.
LIN Zhen-zhi, WEN Fu-shuan, XUE Yu-sheng, et al. Black-start decision-making in smart grid using multi-attribute group eigenvalue method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 18-23.
- [15] 牟晓春, 毕大强, 任先文. 低压微网综合控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 91-96.
MOU Xiao-chun, BI Da-qiang, REN Xian-wen. Study on control strategies of a low voltage microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 91-96.
- [16] THALE S, AGARWAL V. A smart control strategy for the black start of a microgrid based on PV and other auxiliary sources under islanded condition[C] // 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2011: 2454-2459.
- [17] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Control strategies for microgrids emergency operation[C] // Proceedings of 2005 International Conference on Future Power Systems, 2005: 1-6.

收稿日期: 2014-06-07

作者简介:

牟龙华(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网、电能质量;
E-mail: lhmu@tongji.edu.cn

夏明栋(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网黑启动策略研究;

刘仲(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网保护、黑启动控制。