

孤立微电网的黑启动策略

孟强,牟龙华,许旭锋,朱国锋

(同济大学电气工程系,上海 201804)

摘要:利用多代理(Agent)系统,提出了一种针对全黑的孤立微电网的黑启动策略。参考电源及其他具有黑启动能力的微电源首先由微电网中心控制(MGCC)Agent以电压控制模式启动,再根据参考微电源的电压进行预同步后进行并联。接着,具有黑启动能力的微电源切换至PQ控制模式,其输出功率和电流被功率锁存功能锁定以避免切换振荡。最后,无黑启动能力的微电源被MGCC Agent以PQ控制模式启动,在与参考电源进行同步后并入微电网。MGCC Agent通过协调微电源的输出功率,使微电网可以高效、稳定地运行。微电网稳定运行后,由主网-微电网控制(GMGC)Agent恢复微电网与大电网的连接。利用MATLAB/Simulink建立微电网仿真模型,仿真结果验证了所提策略是高效、可行的。

关键词:微电网; 光伏电池; 储能; 黑启动; 策略; 模式切换; 功率锁存; 预同步

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.010

0 引言

随着世界经济的迅速发展,对能源的需求急剧增加,微电网作为可再生能源利用方式之一受到了广泛关注^[1-2]。微电网既可与大电网联网运行,又可以孤岛方式运行,在满足本地用户对电能质量和供电安全要求的同时,可减少大量分布式电源渗入对电力系统的影响,具有较高的灵活性和可调度性^[3-4]。

微电网的双向潮流特性使得微电网保护的选择性较难做到,微电网的并网和独立运行则面临着差异较大的短路故障电流,因此传统配网保护策略不适用于微电网保护^[5];同时,微电网如何根据运行控制需要平滑地进行联网和孤岛运行模式切换,也给微电网的连续稳定运行带来挑战^[6]。所以,当微电网或者大电网一方发生故障时,保护元件未能正确动作,或者微电网运行模式切换失败,将会导致整个微电网的瘫痪。倘若此时微电网能及时地进行黑启动,再次恢复负荷供电时,将会大幅提升微电网供电可靠性,减少停电带来的经济损失。

微电网黑启动,就是指在整个微电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电网的帮助,仅通过启动微电网内部具有黑启动能力的微电源,进而带动微电网内无黑启动能力的微电源,逐步扩大系统的恢复范围,最终实现整个微电网

的重新启动^[7]。传统大电网在发生系统瘫痪全黑时,由于大电网系统复杂,在黑启动过程中的发电机自励磁、空载线路充电过电压和恢复初期小系统并列运行稳定性等问题,多采用1个黑启动电源启动1台被启动机组的简单黑启动方案^[8]。因此,传统大电网黑启动的研究多着重于黑启动策略的评估方法,引入新的方法开发黑启动决策支持系统,提高黑启动方案的适应性等^[9-10]。但是,微电网系统相对较小,结构简单,再加上微电源的多样性和多元性,使得微电网的黑启动在黑启动源的选择、黑启动方案的制定等方面有着很大的区别。随着分布式电源的接入对传统电网结构的改变,电网黑启动的研究也逐步涉及到有分布式电源的电网的黑启动研究,利用分布式电源的优良特性,对大电网黑启动提供相应的支持^[11-12]。但是,对单独的微电网的黑启动研究还很少,所以本文从单个微电网出发,研究微电网黑启动策略及黑启动过程中的问题。

本文首先分析了微电源的黑启动能力、参考源的选取及黑启动过程中微电源控制方式的问题,提出一种基于3层多代理(Agent)系统的微电网黑启动策略;然后,就黑启动过程中的并联波动问题,给出通过预同步和基于功率锁定的模式切换方法进行优化;最后,参照本课题组已投运的微电网实验平台,在MATLAB/Simulink平台搭建由光伏、柴油发电机和蓄电池3种微电源组成的低压微电网,通过3个黑启动仿真实验的对比,验证所提出的黑启动策略及优化方案的有效性和可行性。

1 微电网及多代理系统组网结构

根据欧盟微电网项目提出的典型低压微电网系

收稿日期:2013-07-01;修回日期:2014-02-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207110);上海市科学技术委员会资助项目(12ZR1451300);上海市教育委员会科研创新项目(11CX12)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207110),the Project of Science & Technology Commission of Shanghai(12ZR1451300) and the Project of Shanghai Municipal Education Commission(11CX12)

统(Benchmark 0.4 kV)^[13],并结合本课题组的光/柴/储微电网实验平台,设计了 0.4 kV 低压微电网,如图 1 所示;微电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 处断路器的开闭控制微电网孤岛运行和并网运行 2 种模式的切换。微电网内有 4 个负荷,在负荷 2、3、4 处分别接入蓄电池、柴油发电机和光伏 3 种微电源。

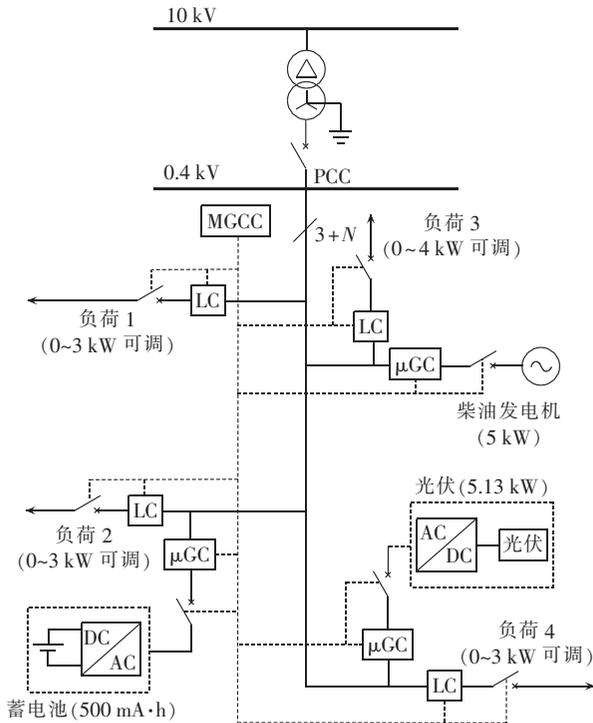


图 1 微电网结构

Fig.1 Structure of microgrid

微电网的控制主要包括主从控制、对等控制和分层控制 3 种类型^[14],其中基于多 Agent 技术的分层控制从微电网全局出发,是解决微电网各单元协调运行的有效途径,如图 1 中虚线部分所示。本文采用 3 层控制结构,整个分层通过多 Agent 技术实现,通过独立通信网络进行信息交互,如图 2 所示。

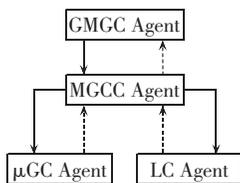


图 2 多代理结构

Fig.2 Structure of multi-Agent

a. 主网-微电网控制 GMGC (Grid-MicroGrid Control)层:主要负责根据主网与微电网的运行状态需求控制微电网的孤岛与并网运行切换及能量管理。

b. 微电网中心控制 MGCC (MicroGrid Central Control)层:主要负责根据上层指令优化微电网中各

单元的运行状态,并实时与下层控制器通信联系,下发相应指令控制微电网各单元的运行。

c. 微电源控制 μGC (micro-Generator Control)层和负荷控制 LC (Load Control)层:主要负责直接控制微电源的运行、负荷的投切,实时上传微电源及负荷的信息至上层。

2 微电网的黑启动策略

2.1 微电源的黑启动能力及参考源的选取

微电网的黑启动主要就是依靠具有黑启动能力的微电源进行黑启动,进而带动整个微电网的黑启动,所以具有黑启动能力的微电源有着举足轻重的作用。在微电网中,各种微电源的能量由风力、太阳能、燃气等清洁能源供给,其中直流微电源(如光伏)通过 DC/AC(或 DC/DC/AC)转换为工频交流电,交流微电源(如燃气轮机)通过 AC/DC/AC 转换为工频交流电。理论上,在微电源电能转换的直流侧加装适当的储能设备,就能使该微电源具备黑启动能力。但是,考虑到黑启动微电源需要在一段时间内能独立、稳定带负荷运行,一些能源供给具有较大波动或受较多因素影响的微电源是不适合作为黑启动微电源的,如光伏微电源、风力发电微电源;而能源供给稳定且微电源动态性能及抗扰动性能好的微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池及大容量储能单元是黑启动微电源的首选。

在微电网的黑启动过程中,微电网一定是脱离大电网运行在孤岛模式下的,因此在分层控制的微电网中需要一个主参考源来提供系统的参考电压及频率。文献[15]总结了主参考源应具备的特征,其中最重要的有:能快速实现自身的黑启动;能够提供稳定的电压及频率;能快速跟踪负荷变化以免产生大幅波动。考虑到微型燃气轮机、燃料电池及柴油发电机良好的负荷跟随及抗扰动特性^[16-17],它们无疑是微电网黑启动主参考源的最佳选择。

2.2 微电源的控制方式

微电源的逆变器有多种的控制方式,本文主要采用 U/f 控制和 PQ 控制。 U/f 控制使微电源输出恒定的电压及频率,本文采用文献[18]所述电压外环电流内环控制方式。基于 dq 变换的 PQ 控制通过电压电流的解耦,得到 dq 坐标系下功率与电压电流的关系,如式(1)所示。文献[19]由式(1)设计了输出恒定功率的 PQ 控制器,本文不再赘述。

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} u_d i_d \\ Q = -\frac{3}{2} u_d i_q \end{cases} \quad (1)$$

由于微电源具有多样性和多元性,微电网中可

以包含多个具有黑启动能力的微电源,在黑启动过程中,可同时启动这些微电源,建立多个小的网络,再将这些网络并联组网,从而实现微电网的快速恢复供电。所以,各微电源在自启动过程和并联组网后并不是运行在某一控制方式下一成不变,而是会在不同的时期采用不同的控制方式,以满足各个时期不同的需求。

a. 有黑启动能力的主参考源:在微电网黑启动整个过程中始终运行在电压控制方式下,为整个微电网提供稳定的参考电压和频率,如柴油发电机、微型燃气轮机。

b. 有黑启动能力的其他微电源:在自身带一定负荷自启动时,运行在电压控制方式下,在自启动后与主参考源并联运行时切换至 PQ 控制方式,如蓄电池储能设备、飞轮储能。

c. 没有黑启动能力的微电源:在黑启动的最后阶段,以主参考源提供的电压和频率为参考,以 PQ 控制方式启动,并联至微电网,例如光伏和风电微电源。

2.3 黑启动策略

在传统大电网中,电力恢复和黑启动都是人工按照既定的程序进行手动操作的;然而,在微电网中,考虑到其系统规模小及其将来的大量应用,人工操作实施黑启动是不合时宜的,此时,多 Agent 系统为解决组织实施黑启动方案提供了有效的方法^[20]。将设计好的黑启动策略相应程序预先导入到多 Agent 系统中,当系统因为模式切换失败或故障问题进入全黑状态时,由 MGCC Agent 调用该程序,按照所设计的策略控制各 Agent 实施微电网黑启动相应操作。黑启动有串行恢复和并行恢复 2 种方法,其中同时启动多个黑启动微电源的并行恢复方法,恢复速度快,运行灵活,更符合微电网的结构特性。为快速恢复负荷供电,设计微电网黑启动策略如图 3 所示。

在按照图 3 所示策略完成微电网黑启动并稳定运行之后,根据大电网的运行状态及需要,由 GMGCC Agent 协调控制微电网的并网运行,恢复微电网与大电网的正常运行状态。

3 微电源模式切换及预同步

并行恢复的黑启动方式能快速灵活地恢复负荷的供电,但是其最大的问题是黑启动微电源的同期并列问题,若微电网在此过程中产生大幅波动,可能会直接导致黑启动的失败。非主参考源的模式切换问题和两微电源并联时的同步问题是该过程中的 2 个主要问题。

3.1 模式切换

有黑启动能力的非主参考微电源并联至主参考

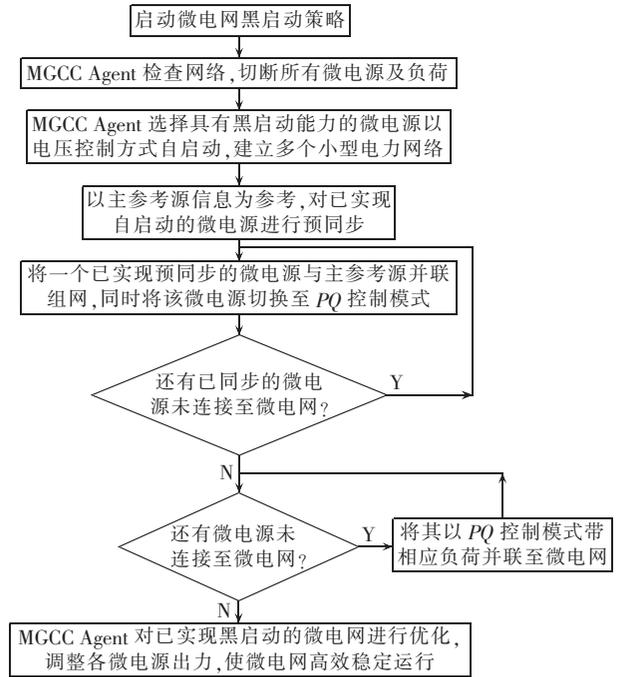


图 3 微电网黑启动策略流程图
Fig.3 Flowchart of microgrid black-start strategy

源时,要从 U/f 控制模式切换至 PQ 控制模式,以主参考源提供的电压及频率为参考,运行在输出恒定功率模式下。在并联运行前,主参考源(如柴油发电机)多未满负荷运行,留有一定裕度,用来缓冲因并联产生的冲击。在系统完成黑启动恢复供电后,要求主参考源运行在额定负荷附近,在保证风力、光伏等输出最大功率的情况下,使储能设备尽量少地输出功率或者转换为充电模式。因此要求储能微电源在并联前后的输出功率有较大变化,由式(1)可知,当电压不变的情况下,若要使功率发生较大变化,输出电流就要发生较大变化。

模式切换主要是通过切换 2 个不同的控制器来实现,如图 4 所示,通过打开 K_1 、合上 K_2 实现 U/f 到 PQ 控制模式的转换。然而,模式切换时较易产生振荡,严重时会导致切换失败。分析产生振荡的原因,发现是由切换前后两控制器状态不匹配造成的。而功率变化引起的电流突变会使控制器的输入值发生突变,导致两控制器的状态不匹配,从而在控制器切换过程中产生很大振荡。

为解决控制器状态不匹配导致模式切换振荡大的问题,本文提出基于功率锁存的模式切换方法,如

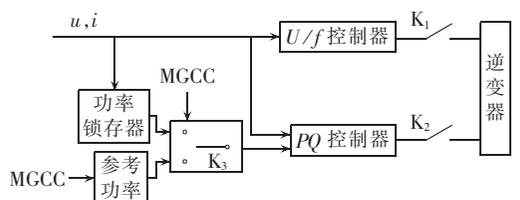


图 4 基于功率锁存的模式切换
Fig.4 Mode switching based on power latch

图 4 所示。将采集的电压、电流信号同时输入到两控制器,以及输入到功率锁存器中计算实时的功率值,作为 PQ 控制的参考功率,2 种模式工作原理如下:

a. U/f 控制模式时,开关 K_1 闭合、 K_2 打开,由功率锁存器计算的功率提供参考,同时运行 PQ 控制器,以保证控制器状态一致;

b. 切换至 PQ 控制模式时,开关 K_1 打开、 K_2 闭合,由功率锁存器计算切换前微电源的输出功率并锁存,为切换后的 PQ 控制提供参考功率,使模式切换前后微电源输出功率、输出电流不变,控制器的状态在切换前后保持一致。

这样便保证了黑启动中微电源并联组网的顺利进行。同时,为解决储能微电源的输出功率问题,在黑启动完成后再根据微电网整体最优进行功率调整,由 MGCC Agent 给出参考功率值,并控制 K_3 转换选择该参考值,完成微电源输出功率的调整。

3.2 预同步

传统发电机并联时要求幅值相同、相位相同、频率相同,2 个微电源的并联也是如此,而其中以相位相同尤为重要。在传统旋转发电机的并联中,由于发电机的旋转特性,在相位相差较小时,可以通过自身的调节达到并联同步运行。但是在微电源中,主要是通过电力电子装置,经过整流逆变得得到工频交流电,所以相位差对于 2 台微电源的并联成败影响较大。因此,在微电源并联之前,进行预同步显得尤为重要。

为使 2 个微电源能顺利实施并联,可对待同步微电源进行预同步操作,如图 5 所示。在并联前,待同步微电源的参考值根据自身 U/f 控制提供,在需要进行并联时,先由 MGCC Agent 控制开关 K 将参考值转换为由主参考源实时提供,以此来实现与主参考源的同步运行,然后在两微电源稳定运行后再实施合闸并联,这样大幅降低了并联运行时带来的冲击,增加了并联的成功率。

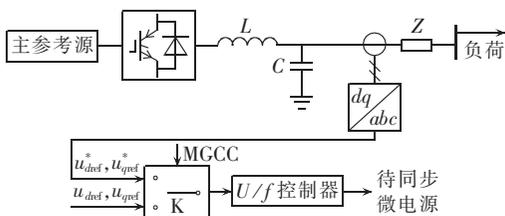


图 5 预同步结构
Fig.5 Structure of pre-synchronization

4 仿真分析

为验证本文所提出的微电网黑启动策略的可行性和优化方案的有效性,在 MATLAB/Simulink 平台

搭建图 1 所示微电网模型。微电网中有柴油发电机 (μG_1)、蓄电池 (μG_2)、光伏 (μG_3) 3 个微电源,其中 μG_1 和 μG_2 都具有黑启动能力,且 μG_1 作为微电网黑启动的主参考源, μG_3 不具有黑启动能力。负荷 1、2、3、4 分别为 1 kW、3 kW、4 kW、2 kW。

假设系统因故障或其他原因进入全黑状态,在 0 s 时刻启动预先设计好的黑启动策略:

a. 使具有黑启动能力的 μG_1 和 μG_2 分别带负荷 3 和负荷 2 自启动,建立 2 个网络;

b. 将 2 个网络并联组网,同时 μG_2 切换至 PQ 运行模式;

c. 将 μG_3 及相应负荷 4 和负荷 1 以 PQ 运行模式并联至微电网;

d. 对微电网整体进行优化,调整各微电源的输出功率。

为验证本文所提出的优化方案,设计 3 个对比实验如下。

实验 1: 初始时刻 μG_1 和 μG_2 自启动,相位差为 30° ,不对 μG_2 进行预同步,0.2 s 时直接与 μG_1 并联组网,2 个微电源输出的有功功率如图 6 所示。可以看出,在 μG_2 未进行预同步就直接并联的情况下,功率波动非常大,相应的电压、电流波动也会较大,过大的暂态冲击可能会引起微电源的保护动作,关闭微电源,从而导致并联失败,黑启动无法进行。同时,在稳定后,系统功率依然有较大的波动,不利于系统的稳定运行。

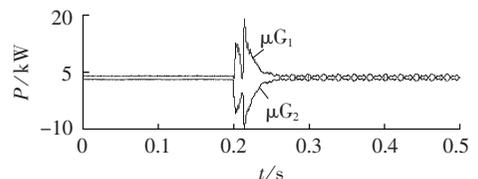


图 6 μG_1 和 μG_2 的输出有功功率
Fig.6 Active power outputs of μG_1 and μG_2

实验 2: 0.1 s 时对 μG_2 进行预同步,但是未进行功率锁存,且将 μG_2 的 PQ 控制参考功率设为 2 kW,两微电源的输出有功功率如图 7 所示。在 0.2 s 之前两微电源稳定运行,由图可以看出在 0.2 s 进行并联时,系统产生很大的暂态波动,这一过程中极易引起保护动作,从而导致并联失败,黑启动无法进行; 0.3 s 后趋于稳定,但 μG_1 、 μG_2 输出功率分别在 5 kW、

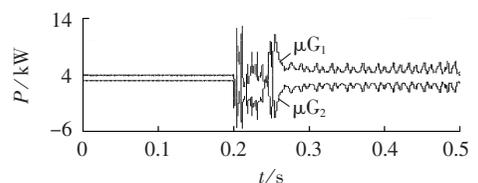


图 7 μG_1 和 μG_2 的输出有功功率
Fig.7 Active power outputs of μG_1 and μG_2

2 kW 附近波动,波动幅度也较大,系统运行稳定性较差。

实验 3:0.1 s 时对 μG_2 进行预同步,0.2 s 时将其与 μG_1 并联并采用功率锁存切换至 PQ 控制模式;系统稳定后,在 0.5 s 将 μG_3 并联至微电网,参考功率为 3 kW;系统稳定后,在 0.8 s 对系统进行优化,将 μG_2 输出功率降为 2 kW。实验所得 3 个微电源的输出功率如图 8、9 所示。在模式切换进行功率锁存和预同步后,很好地减小了 μG_1 与 μG_2 的并联暂态冲击,且响应速度快,系统稳定后的输出平稳。在最后阶段对系统进行优化时,各微电源功率转换响应快,而且稳定。图 9 所示为 3 个微电源的输出无功功率,由于系统无功为 0,稳定时,3 个微电源输出无功在 0 附近波动,幅值小于 200 var,系统稳定运行。

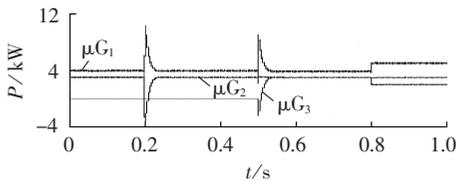


图 8 3 个微电源的输出有功功率

Fig.8 Active power outputs of three microsources

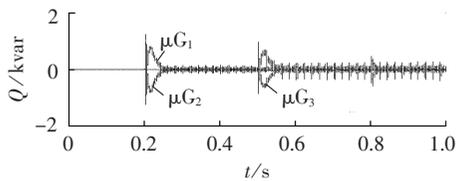


图 9 3 个微电源的输出无功功率

Fig.9 Reactive power outputs of three microsources

由以上 3 个实验可以看出,在采用了功率锁存和预同步后, μG_2 的模式切换更加顺利,暂态冲击明显减小,从而保证了本文所提微电网黑启动策略的有效性。

5 结论

本文提出了一种基于多 Agent 的微电网黑启动策略,通过分析该策略中微电源并联组网可能产生较大波动,对此提出了控制策略优化方案。仿真分析结果表明,该控制策略能够快速稳定地实现微电网的黑启动,通过模式切换和预同步的优化,黑启动过程中系统的稳定性得到了大幅提高。下一阶段,将在实验室 0.4 kV 光/柴/储低压微电网实验平台上,以柴油发电机为主参考源、蓄电池储能设备为具有黑启动能力的微电源、光伏为不具有黑启动能力的微电源进行黑启动实验,进一步验证本文所提的微电网黑启动策略,并通过实验完善该黑启动策略,使之切实可行。

参考文献:

- [1] 唐西胜,邓卫,李宁宁,等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):99-103.
TANG Xisheng,DENG Wei,LI Ningning, et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):99-103.
- [2] 王鹤,李国庆. 含多种分布式电源的微网控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
WANG He,LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):19-23.
- [3] 赵冬梅,张楠,刘燕华,等. 基于储能的微网并网和孤岛运行模式平滑切换综合控制策略[J]. 电网技术,2013,37(2):301-306.
ZHAO Dongmei,ZHANG Nan,LIU Yanhua, et al. Synthetical control strategy for smooth switching between grid-connected and islanded operation modes of microgrid based on energy storage system[J]. Power System Technology,2013,37(2):301-306.
- [4] 刘汉宇,牟龙华. 微电网 CPS 体系架构及其物理端研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):34-37.
LIU Hanyu,MU Longhua. Architecture of microgrid CPS and research of its physical side[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):34-37.
- [5] 吴在军,赵上林,胡敏强,等. 交流微网边方向变化量保护[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):158-166.
WU Zaijun,ZHAO Shanglin,HU Minqiang, et al. Branch directional variation protection of AC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):158-166.
- [6] 李军,黄学良,陈小虎,等. 基于双重判据的微电网快速孤岛检测技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):38-42.
LI Jun,HUANG Xueliang,CHEN Xiaohu, et al. Detection of islanded microgrid based on double criterions[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):38-42.
- [7] MOREIRA C L,RESENDE F O,LOPES J A P. Using low voltage microgrids for service restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(1):395-403.
- [8] 杨可,刘俊勇,贺星棋,等. 四川电网黑启动恢复控制研究及试验(一)——指导原则及电压控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):100-104.
YANG Ke,LIU Junyong,HE Xingqi, et al. Research and experiment of restoration control during Sichuan Power Grid black-start (1): guiding principles and voltage control [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):100-104.
- [9] 林振智,文福拴,薛禹胜,等. 智能电网黑启动群体决策的可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(9):17-21.
LIN Zhenzhi,WEN Fushuan,XUE Yusheng, et al. Reliability analysis on the group decision-making results of black-start strategies in smart grids[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(9):17-21.
- [10] 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 Zhenzhi,WEN Fushuan,XUE Yusheng, 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.
- [11] PIPATTANASOMPORN M, FEROUZE H, RAHMAN S. Multi-agent systems in a distributed smart grid; design and implementation [C]//IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. [S.l.]:IEEE, 2009:1-8.
- [12] SOLANKI J M, SOLANKI S K, SCHULZ N. Multi-agent-based reconfiguration for restoration of distribution systems with distributed generators [J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2010, 17(4):331-346.
- [13] ROBERT H L, PIAGI P. Control and design of microgrid components (final project report) [R]. Madison, USA: University of Wisconsin-Madison, 2006.
- [14] 詹昕, 向铁元, 曾爽, 等. 基于拟态物理学优化算法的微电网功率优化 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4):44-48.
- ZHAN Xin, XIANG Tiejuan, ZENG Shuang, et al. Microgrid power optimization based on artificial physics optimization algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4):44-48.
- [15] 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. [S.l.]:IEEE, 2011:2454-2459.
- [16] KALANTAR M, MOUSAVI G S M. Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage [J]. Applied Energy, 2010, 87(10):3051-3064.
- [17] ZHU Y, TOMSOVIC K. Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells [J]. Electric Power Systems Research, 2002, 62(1):1-11.
- [18] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4):1821-1831.
- [19] GALDI V, PICCOLO A, SIANO P. Dynamic performances and control of dispersed generators connected through inverter [C]// Proceedings of 2005 International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce. [S.l.]:IEEE, 2005:1060-1065.
- [20] 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. [S.l.]:IEEE, 2011:1-7.

作者简介:



孟强(1989-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为微电网黑启动(E-mail: haihanmq@163.com);

车龙华(1963-),男,江苏宜兴人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统微机保护与电能质量、分布式发电与微电网(E-mail: lhm@tongji.edu.cn);

许旭锋(1981-),男,浙江绍兴人,讲师,博士,主要研究方向为微电网可靠性评估(E-mail: xfxu@tongji.edu.cn);

朱国锋(1987-),男,江苏扬州人,博士研究生,主要研究方向为智能电网的电能质量评估(E-mail: justaway@163.com)。

Black-start strategy of isolated microgrid

MENG Qiang, MU Longhua, XU Xufeng, ZHU Guofeng

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

Abstract: A strategy of black-start based on multi-Agent system is proposed for isolated microgrid, which starts up in voltage control mode the reference microsources and microsources capable of black-start by MGCC (MicroGrid Central Control) Agent first, carries out then the pre-synchronization and grid-connection for the reference microsource according to its voltage, switches then the microsource capable of black-start into *PQ* control mode while blocks its power and current outputs with the power latch function to avoid switching oscillation, and at last, starts up in *PQ* control the microsources incapable of black-start by MGCC Agent, synchronizes them with the reference microsource and connects them to microgrid. MGCC Agent coordinates the power output among microsources to make the microgrid operate efficiently and stably, and then GMGC (Grid-MicroGrid Control) Agent connects the microgrid to power grid. A simulation microgrid is built with MATLAB/Simulink and the simulative results verify the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

Key words: microgrid; photovoltaic cells; energy storage; black-start; strategy; mode switching; power latch; pre-synchronization