

某海岛微电网的孤岛协调控制策略研究

现有的大多数孤岛运行控制策略仅针对微电网的频率稳定控制，为此提出了一种基于两级分层控制结构的孤岛协调控制策略。首先由微电网管理系统（MMS）决定微电网采用单主控或多主控运行方式；然后当孤岛能量发生变化时，由MMS的一次控制通过本地控制器使采用 v/f 控制的主控储能单元迅速完成系统内能量的供需平衡；最后通过MMS的二次控制使得主控单元的输出功率尽可能小。所提出的控制策略不仅能够实现孤岛运行时频率的无差调节和电压的稳定控制，而且相比于无二次控制，能够为主控单元预留足够的备用容量。仿真分析表明了所提出的孤岛协调控制策略的有效性。

吴玫蓉 陶 顺 肖湘宁/新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学）



吴玫蓉/硕士研究生

关键词/Keywords

微电网管理系统 ·
一次控制 ·
二次控制 ·
孤岛运行 ·

微电网是由分布式电源（Distributed Generation, DG）、储能装置、电力电子变换装置、负荷、保护和监控装置等组成，能够实现自我控制、保护和管理的小型电网^[1]，具有并网和孤岛两种典型运行方式^[2]。并网运行时，由大电网为微电网提供电压和频率的支撑；孤岛运行时，由于能量供需不平衡会引起系统电压和频率的波动^[3]。因此如何维持孤岛下系统的稳定性是微电网控制中所需解决的关键问题。文献[4-5]中当微电网孤岛运行时，采用Droop控制的主控单元为系统提供电压和频率的支撑，然后采用二次频率控制以实现频率的无差调节；文献[6]采用虚拟同步发电机技术实现了集中式和分散式的二次调频控制。上述文献中的孤岛运行控制策略均只针对微电网的频率稳定控制。

本文以国内某海岛微电网为研究对象，提出了一种基于两级分层控制结构的孤岛协调控制策略。首先由微

电网管理系统（Microgrid Management System, MMS）决定孤岛时微电网所采用的运行方式，然后通过MMS的一次控制和二次控制，不仅实现了孤岛运行时电压和频率的稳定控制，而且为主控单元预留了足够的备用容量以动态保持系统内能量的供需平衡。通过仿真分析验证了所提出的协调控制策略的正确性和可行性。

微电网结构

某海岛微电网结构如图1所示。在充分考虑海岛上实际可利用资源、负荷需求以及满足工程建设原则的情况下，该海岛微电网中微源和储能装置的容量配置为：1台500 kW的光伏发电系统（DG₁），2台容量均为750 kW的永磁直驱风力发电系统（DG₂、DG₃），5组容量相同的电池储能系统（Battery Energy Storage System, BESS），其中BESS₁~BESS₅的电池系统容量均为400 kW·h，储能变流器（Power Conversion System, PCS）的功率均为500 kW。该微电网包括两个子微电网，它们的运行方式通过S₈和S₉控制：并网时两子微电网联合并网运行；孤岛时两子微电网既可以单独运行，亦可以联合运行。负荷均为等效负荷，其中load₁和load₄为重要负荷，load₂和load₃为可分组投切的普通负荷；Z_{1n}~Z_{5n}分别代表线路1~5的等效阻抗。DG_s和BESS_s分别通过变压器接入10 kV的微电网中，系统通过静态开关（Static Transfer Switch, STS）和主变压器与35 kV配电网相连。

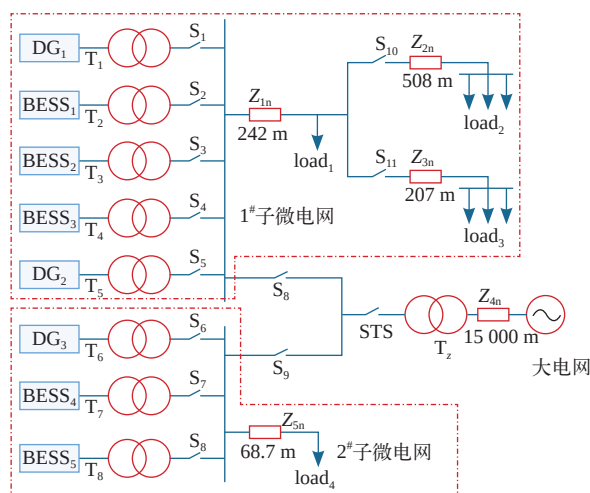


图1 微电网结构

为了减小传输损耗,该海岛微电网优先采用孤岛运行方式,在充分利用可再生微源发电的前提下,综合考虑BESS具有快速功率吞吐和IV象限运行的能力^[7]以及系统中所有BESS_s的容量和控制参数均相同的特点,使得对该海岛微电网孤岛协调控制策略的研究具有特殊性和重要性。

微电网的孤岛协调控制策略

1. 微电网分层控制结构

孤岛协调控制策略是基于图2所示的两级分层控制结构:上层控制器为MMS,其利用所采集的负荷信息、微源和储能装置的运行状态以及综合考虑海岛上风光资源储量和经济性运行原则等,根据已制定的协调控制策略向底层控制器发出操作指令;底层控制器包括微源控制器(Microsource Controller, MC)、储能装置控制器(Storage Device Controller, SDC)、负荷控制器(Load Controller, LC)和静态开关控制器(Static Switch Controller, SSC),是执行MMS

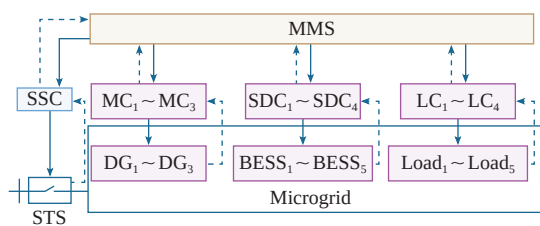


图2 微电网分层控制结构

具体操作指令的本地控制单元^[8-9]。

并网运行时, MMS通过MC_s和SDC_s控制DG_s和BESS_s(采用PQ控制)输出给定的功率,此处不再赘述。

孤岛协调控制策略如图3所示。首先由MMS决定孤岛运行时微电网采用单主控运行(Single Master Operation, SMO)方式(1台BESS作为主控单元)或多主控运行(Multi Master Operation, MMO)方式(2台及以上BESS_s作为主控单元);然后当孤岛能量变化时, MMS的一次控制通过主控SDC使采用v/f控制的主控单元为系统提供电压和频率支撑;最后MMS的二次控制使得主控单元的输出功率尽可能小。

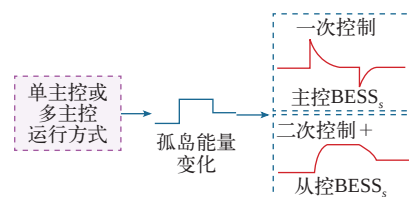


图3 孤岛协调控制策略的概念

2. 主控单元的选择

根据DG_s和BESS_s的输出功率、负荷水平以及各组BESS中电池系统的荷电状态(State of Charge, SOC), MMS确定微电网孤岛时采用SMO方式或多主控运行MMO方式(2台及以上BESS_s作为主控单元)。在MMO方式下优先选择具有相同或接近SOC的2组或2组以上BESS作为主控单元以保证具有相同的充/放电时间。由于海岛微电网中所有BESS_s的容量和控制参数相同,因此采用MMO方式时多台BESS_s能够平均承担孤岛能量的变化而不会出现争抢出力的情况。

3. 一次控制

MMS的一次控制是指当微电网孤岛能量变化(引起的因素包括:由并网切换到孤岛运行模式、负荷投切以及DG_s根据MMS的指令增/减发功率)时,采用v/f控制的主控BESS_s快速地注入或吸收功率,为系统提供电压和频率的支撑。一次控制的响应时间为毫秒级,它主要取决于电流内环的响应特性。

海岛微电网中所有BESS_s的结构均相同,如图4所示,其包括电池系统^[10]和储能PCS。BESS的

SDC控制结构框图如图5所示,根据MMS发出的指令进行PQ和v/f两种控制策略的切换,得到电流控制器的参考值。电流控制器以瞬时电感电流反馈控制作为内环,不仅使滤波电感电流成为可控的电流源,而且对电流环内的扰动有一定的抑制作用^[11]。

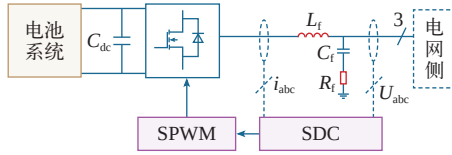


图4 电池储能单元的结构

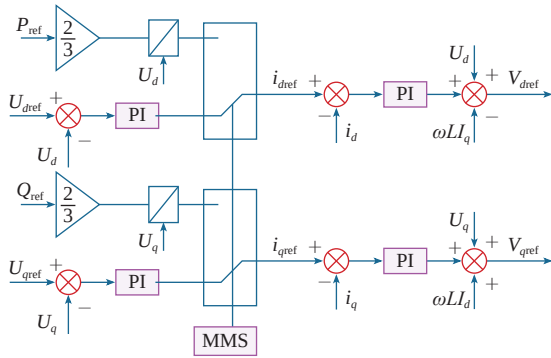


图5 电池储能单元的SDC控制结构框图

4. 二次控制

MMS的二次控制通过功率分配的方法实时地设置各个从控BESS_s的功率参考值,以减小主控单元的输出功率,为主控单元留有足够的备用容量。

二次控制的具体方法如下。首先计算主控单元的总输出有功功率参考值 P_{bzref} 和无功功率参考值 Q_{bzref} :结合主控单元选择的分析,在并网运行时MMS通过选择合适的方法预测孤岛运行过程中的负荷功率和可再生分布式电源(DG₁、DG₂和DG₃)的输出功率,并且合理地设置各个从控BESS_s的有功功率参考值和无功功率参考值,根据孤岛运行时微电网系统内部的功率守恒定理,可通过式(1)计算 P_{bzref} 和 Q_{bzref} ;其次计算孤岛运行时主控单元的总输出有功功率 P_{bz} 和无功功率 Q_{bz} :根据所采集的各个主控单元的实时输出功率,由式(2)分别计算 P_{bz} 和 Q_{bz} ;然后按照图6计算出二次控制所需要分配的总功率:将 P_{bzref} 、 Q_{bzref} 和 P_{bz} 、 Q_{bz} 分别相比较得到误差,并且通过积分环节和限幅环节得到需要分配给各个从控BESS_s的功率

总量(P_z 、 Q_z),选取积分时间时应考虑不超过主控单元和从控BESS_s的放电深度,引入限幅环节是为了避免功率分配值超过各个从控BESS_s的允许输出功率范围;最后实时地设置各个从控BESS_s的有功功率参考值和无功功率参考值:将 P_z 、 Q_z 通过式(3)得到各个从控BESS_s所需分配的功率增量,此后通过式(4)重新确定采用PQ控制的从控BESS_s的有功功率和无功功率参考值。

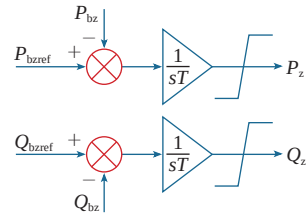


图6 二次控制的总功率计算

$$\begin{cases} P_{bzref} = \sum P_L - \sum P_{DG} - \sum P_{bref} \\ Q_{bzref} = \sum Q_L - \sum Q_{DG} - \sum Q_{bref} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{bz} = P_{b1} + P_{b2} + \dots + P_{bi} \\ Q_{bz} = Q_{b1} + Q_{b2} + \dots + Q_{bi} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta P_j = k_j P_z \\ \Delta Q_j = k_j Q_z \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{jref}^* = P_{jref} + \Delta P_j \\ Q_{jref}^* = Q_{jref} + \Delta Q_j \end{cases} \quad (4)$$

式(1)中, $\sum P_L$ 、 $\sum Q_L$ 分别为预测所得的有功功率负荷总和、无功功率负荷总和; $\sum P_{DG}$ 、 $\sum Q_{DG}$ 分别为预测所得的3台可再生分布式电源输出的有功功率总和和无功功率总和; $\sum P_{bref}$ 、 $\sum Q_{bref}$ 分别为从控BESS_s的有功功率参考值总和、无功功率参考值总和。式(2)中, P_{bi} 、 Q_{bi} 为主控BESS_i输出的有功功率和无功功率。式(3)中, ΔP_j 、 ΔQ_j 为分配到从控BESS_j($j \neq i$)的功率增量; k_j ($0 < k_j < 1$)为分配系数,它由从控BESS_j的容量决定(容量越大, k_j 越大);其中从控BESS的个数应大于或等于主控BESS的个数,以保证有足够的容量承担所分配的功率。式(4)中, P_{jref} 、 Q_{jref} 、 P_{jref}^* 和 Q_{jref}^* 分别为第j个从控BESS在二次控制前、后的有功功率和无功功率参考值;规定当主控单元向系统注入功率时, P_{bi} 、 Q_{bi} 、 P_{bzref} 、 Q_{bzref} 、 ΔP_j 和 ΔQ_j 为正,反之当吸收功率时其为负。

仿真验证

为了验证上述孤岛协调控制策略的正确性,在PSCAD/EMTDC中搭建图1所示的微电网平台,系统参数如下。

1) 负荷容量。 load_1 : $0.799\ 88\ \text{MW} + \text{j}0.260\ 06\ \text{Mvar}$; load_2 : $0.992\ 68\ \text{MW} + \text{j}0.326\ 27\ \text{Mvar}$; load_3 : $0.703\ 6\ \text{MW} + \text{j}0.348\ 35\ \text{Mvar}$; load_4 : $0.251\ 24\ \text{MW} + \text{j}0.082\ 61\ \text{Mvar}$ (负荷的额定电压和额定频率分别为10 kV和50 Hz)。

2) 线路参数。 $R=0.187\ 8\ \Omega/\text{km}$, $X=0.096\ 8\ \Omega/\text{km}$ 。

变压器参数。主变压器 T_z : $8\ \text{MV}\cdot\text{A}$, $35\ \text{kV}/10\ \text{kV}$, Y/D联结; T_1 为 $500\ \text{kV}\cdot\text{A}$, $0.4/10\ \text{kV}$, D/Y联结; $T_2\sim T_4$ 、 T_7 和 T_8 均为 $500\ \text{kV}\cdot\text{A}$, $0.4/10\ \text{kV}$, Y/D联结; T_5 、 T_6 均为 $800\ \text{kV}\cdot\text{A}$, $0.4/10\ \text{kV}$, Y/D联结。

仿真条件。仿真时间设置为20 s, 2 s前微电网并网运行, DG_s 和 BESS_s 均采用PQ控制, 设每台 BESS 均处于充电完毕状态, 其有功功率和无功功率参考值均为0; $t=2\ \text{s}$ 时切换到孤岛运行且切除 load_2 、 load_3 , $t=5\ \text{s}$ 时投入 load_2 、 load_3 的部分负荷(load_c); 10 s后切除 load_c 。

(1) 例1: 两子微电网单独孤岛运行且无二次控制

MMS决定微电网孤岛时采用SMO方式, 并选择 BESS_1 、 BESS_4 分别作为1#、2#子微电网的主控单元。MMS设置 DG_s 的有功功率和无功功率参考值分别如下。 DG_1 : $0.2\ \text{MW}$, $0.1\ \text{MVar}$; DG_2 : $0.4\ \text{MW}$, $0\ \text{Mvar}$; DG_3 : $0.1\ \text{MW}$, $0\ \text{Mvar}$; $\text{load}_c = 0.315\ \text{MW} + \text{j}0.094\ \text{Mvar}$ 。

限于篇幅, 只针对1#子微电网进行分析。由图7、图8可知, 2 s后切换到孤岛运行, 主控 BESS_1 发出约 $0.2\ \text{MW}$ 、 $0.17\ \text{Mvar}$ 的功率以满足微电网的能量供需平衡, 其余 DG_s 和 BESS_s 均输出给定的功率。当 $t=5\ \text{s}$ 时投入 load_c , 由于 $0.315\ \text{MW}$ 已经超过了主控 BESS_1 的有功备用容量($0.3\ \text{MW}$), 故会引起电压标幺值的明显下降(约为 $0.85\ (\text{pu})$), 频率的暂态波动亦较大(为 $-0.18\sim 0.1\ \text{Hz}$)。其造成了微电网的电能质量下降, 若负荷波动较大,

甚至会造成系统的崩溃^[13]。在 $t=10\ \text{s}$ 时切除 load_c , 主控 BESS_1 吸收功率快速跟踪负荷的变化, 其输出功率与 $t=5\ \text{s}$ 前的输出功率几乎相同, 电压标幺值和频率经过短暂的暂态过程后稳定在标准值。综上所述, 证明了 BESS 作为主控能够快速跟踪负荷变化的能力。

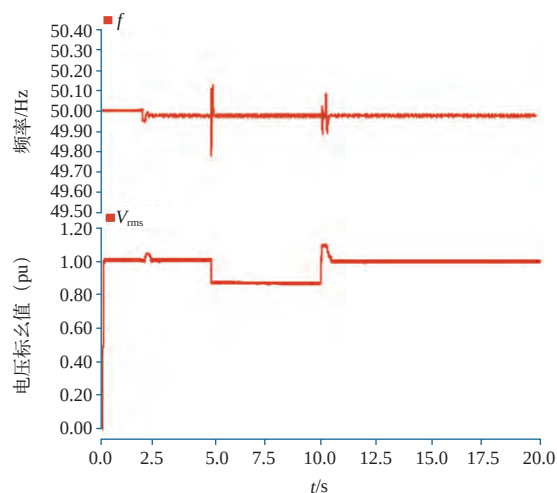


图7 1#子微电网电池储能单元的结构(例1)

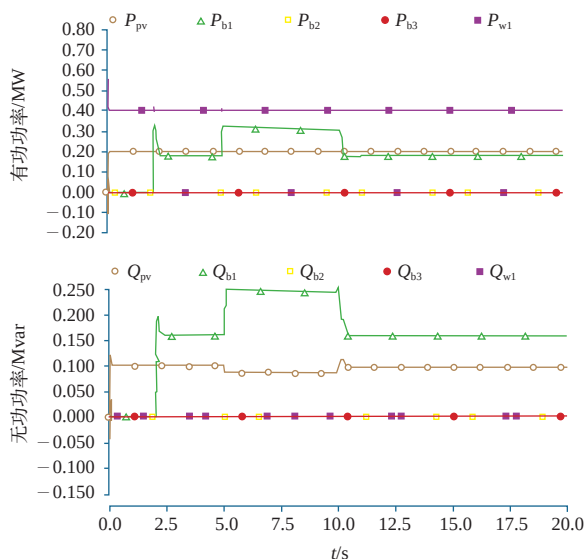


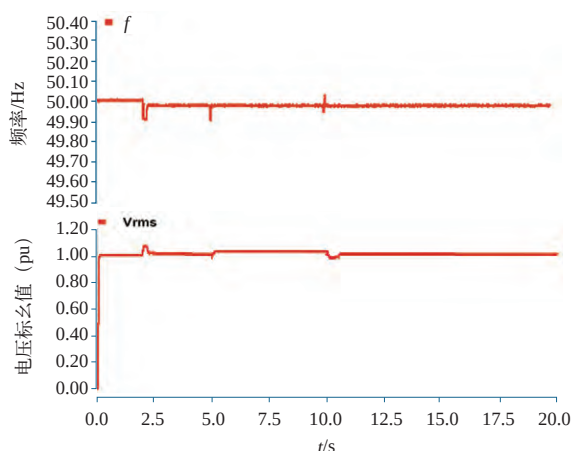
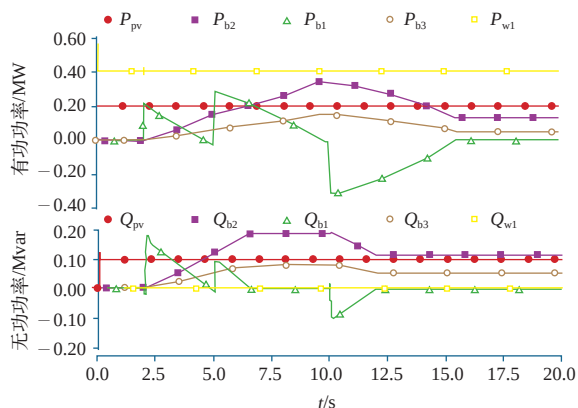
图8 1#子微电网的微源输出功率(例1)

(2) 例2: 两子微电网单独孤岛运行且加二次控制

在例1的基础上加二次控制, 且式(3)中的 $k_2 = 0.7$, $k_3 = 0.3$ (k_2 、 k_3 分别为 BESS_2 、 BESS_3 的分配系数)。

与例1相比, 由图9、图10可知, 当 $t=2\ \text{s}$ 切换到孤岛时, 主控 BESS_1 发出的功率由MMS的二次

控制分配给从控BESS₂和BESS₃,在 $t=5$ s时BESS₁的功率约为0。故当 $t=5$ s时投入load_c,主控BESS₁有足够的备用容量向系统注入约0.32 MW、0.09 Mvar的功率,能快速地跟踪负荷的变化,并且系统的电压和频率经过短暂的暂态过程后稳定在1.02 (pu)和49.98 Hz左右;通过MMS的二次控制使主控BESS₁的有功功率和无功功率分别在 $t=10$ s和 $t=7$ s时约为0。当 $t=10$ s切除load_c,主控BESS₁从系统吸收约0.32 MW、0.09 Mvar的功率,并且在短暂的暂态过程后系统电压和频率稳定在1.0 (pu)、49.98 Hz左右,然后亦通过MMS的二次控制使得主控BESS₁的输出功率为0。

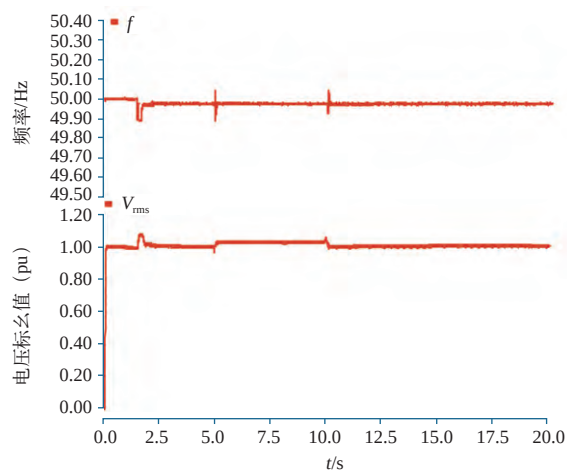
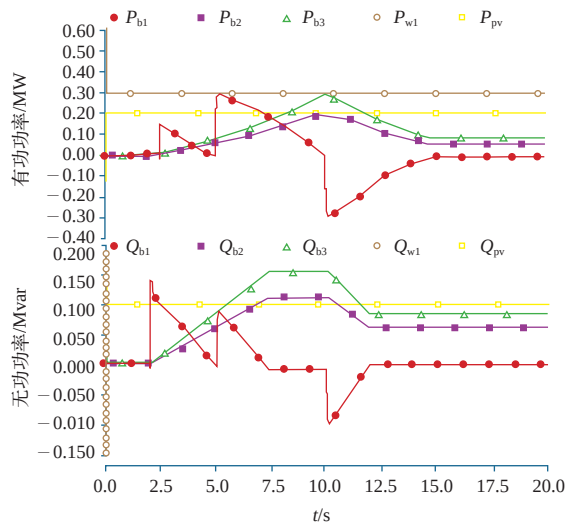
图9 1[#]子微电网的电压和频率 (例2)图10 1[#]子微电网的微源输出功率 (例2)

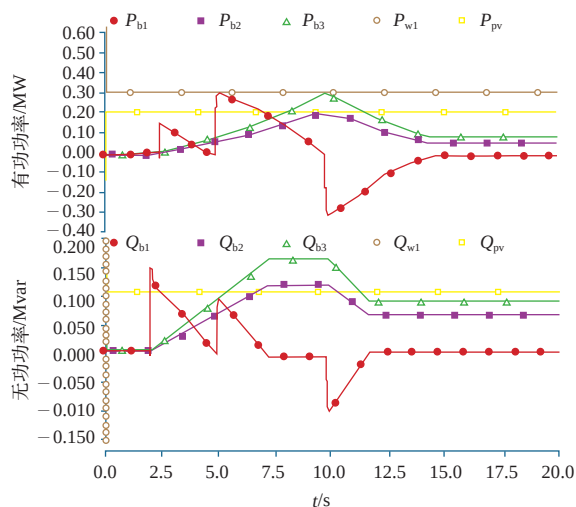
(3) 例3: 两子微电网联合孤岛运行且加二次控制

MMS决定微电网孤岛时采用MMO方式,并选择BESS₁和BESS₄作为微电网的主控单元。2 s后两子微电网联合孤岛运行且加二次控制,且式 (3)

中的 $k_2=0.25$, $k_3=0.35$, $k_4=0.4$ (k_2 、 k_3 和 k_4 分别为从控BESS₂、BESS₃和BESS₅的分配系数)。MMS设置DG_s的有功功率和无功功率参考值如下。DG₁: 0.2 MW, 0.1 Mvar; DG₂: 0.3 MW, 0 Mvar; DG₃: 0.3 MW, 0 Mvar; load_c=0.603 6 MW+j0.196 4 Mvar。

由图11~图13可知, $t=2$ s时切换到孤岛运行,主控BESS₁和BESS₄均发出约0.12 MW、0.14 Mvar的功率,由MMS的二次控制将其分配给从控BESS₂、BESS₃和BESS₅,在 $t=5$ s时,BESS₁和BESS₄的输出功率均约为0。故当 $t=5$ s时投入load_c,主控单元有足够的备用容量,即主控BESS₁和BESS₄均向系统注入约0.3 MW、0.09 Mvar的功率,然后由二次控制将其分配给从控BESS₂、BESS₃

图11 1[#]子微电网的电压和频率 (例3)图12 1[#]子微电网的微源输出功率 (例3)

图13 2nd子微电网的微源输出功率(例3)

和BESS₅, 此时系统的频率和电压标幺值经过短暂的过渡后均稳定在49.98 Hz和1.02 (pu)左右。在 $t=10$ s和 $t=7.2$ s时, BESS₁和BESS₄的有功功率和无功功率分别为0。当 $t=10$ s时切除load_c, 主控BESS₁和BESS₄均从系统吸收约0.3 MW、0.09 Mvar的功率, 在短暂的过渡过程后电压和频率均稳定在1.0 (pu)和49.98 Hz左右, 然后通过MMS的二次控制使得主控BESS₁和BESS₄的输出功率为0。

由上述仿真分析可知, 采用MMO方式时, 由于主控BESS₅的容量、控制参数以及电池SOC均相同, 故两台或两台以上采用v/f控制的BESS₅能够平均承担孤岛能量的变化而不会发生争抢出力并且充/放电时间相同; 采用该孤岛运行控制策略不仅能使系统的电压和频率稳定, 并且相比于无二次控制时, 能够为主控单元提供足够的备用容量, 以保证在孤岛能量变化时, 亦能时刻保持孤岛内能量的动态供需平衡。

结束语

以国内某海岛微电网作为研究对象, 针对现有大多数孤岛运行控制策略仅针对系统的频率稳定控制, 在分层控制结构的基础上, 提出了一种新的孤岛运行控制策略。仿真结果表明, 该控制策略不仅能够维持孤岛运行时系统电压和频率的稳定, 而且解决了无二次控制时主控单元备用容量不足所造成的系统电能质量下降甚至崩溃的问题。

为微电网孤岛运行控制策略研究提供了新思路。

参考文献

- [1] Mohammad E Khodayar, Masoud Barati, Mohammad shahidehpour. Integration of high reliability distribution system in microgrid operation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 12 (3): 1997-2006.
- [2] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 100-107.
- [3] Colson C M, Nehrir M H. Comprehensive real-time mi-crogrid power management and control with distributed agents [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4 (1): 617-627.
- [4] Peças Lopes J A, Moreira C L, Madureira A G. Define control strategies for microgrids islanded operation [J]. IEEE Transactions on Power System, 2006, 21 (2): 916-922.
- [5] LI Yunwei, Mahinda Vilathgamuwa, Poh Chiang Loh. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1195-1204.
- [6] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略 [J]. 电网技术, 2010, 34 (1): 164-168.
- [7] 姚勇, 朱桂萍, 刘秀成. 电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (1): 85-89.
- [8] 陶银正. 微电网运行控制策略的研究及中央控制器的设计 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [9] 李司光, 张承宇. 锂离子荷电状态预测研究 [J]. 北京理工大学学报, 2012, 3 (2): 125-129.
- [10] 牟晓春, 毕大强, 任先文. 低压微电网综合控制策略设计 [J]. 电力系统及自动化, 2010, 34 (19): 91-96.
- [11] 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海, 等. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

(收稿日期: 2014-05-05) EA