

基于电能质量等级的孤岛微电网 分层控制策略

于会群¹, 张晓丹¹, 李增峰¹, 谈震旻²

(1. 上海电力大学上海发电过程智能管控工程技术研究中心, 上海 200090; 2. 上海电力新能源发展有限公司, 上海 200001)

摘要:为了解决分布式电源出力变化和负荷投切带来的孤岛微电网的不稳定问题, 提出基于电压、频率电能质量等级的分层控制策略。将电压、频率电能质量分为优等、中等和差等3个等级, 当微电网的电能质量为优等时, 采用混合储能系统来维持微电网的电压和频率稳定; 当微电网的电能质量为中等时, 采用混合储能系统和下垂控制相协调来维持微电网的电压和频率稳定; 当微电网的电能质量为差等时, 借鉴电力系统的二次调频理论, 调整微电源下垂特性曲线, 将系统的电压和频率维持在额定值附近。仿真结果验证了该分层控制策略的可行性, 与传统的控制方法相比, 该分层控制策略能够在微电源出力变化与负荷投切时, 提高孤岛微电网的运行稳定性。

关键词:分布式电源; 孤岛微电网; 电能质量等级; 分层控制; 模糊控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.009 中图分类号:TM712 文章编号:1673-9140(2020)06-0068-08

Research on hierarchical control strategy of island micro-grid based on power quality grades

YU Huiqun¹, ZHANG Xiaodan¹, LI Zengfeng¹, TAN Zhenmin²

(1. Shanghai Power Generation Process Intelligent Control Engineering Research Center, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Electric Power New Energy Development Co., Ltd., Shanghai 200001, China)

Abstract: In order to solve the instability problem caused by the changing output of distributed generation and load switching in the island micro-grid, this paper puts forward a hierarchical control strategy based on the voltage and frequency power quality level. The voltage and frequency power quality are divided into three grades: superior, medium and poor. For the case that the power quality of the micro-grid is excellent, the hybrid energy storage system is used to maintain the voltage and frequency stability of the micro-grid. When the power quality of the micro-grid is medium, the hybrid energy storage system and the drooping control are employed to maintain the voltage and frequency stability of the micro-grid. If the power quality of the micro-grid is poor, the droop characteristic of distributed generation curve is adjusted by the secondary frequency modulation theory similar with it in the power system, so that the voltage and frequency are keeping around the rated values. The simulation results verify the feasibility of the proposed hierarchical control strategy. Compared with the traditional control method, the hierarchical control strategy can improve the operating stability of the island micro-grid when the distributed generation output is changing and load switching.

Key words: distributed generation; island micro-grid; power quality grade; hierarchical control; fuzzy control

收稿日期:2018-05-02; 修回日期:2018-07-17

基金项目:上海市电站自动化技术重点实验室资助(13DZ2273800)

通信作者:于会群(1978-),女,博士,副教授,主要从事电站自动化与新能源发电技术的研究;E-mail: yuhuiqun@shiep.edu.cn

分布式电源在微电网分层控制策略中充当着重要的角色^[1]。分布式电源主要包括:微型燃气轮机、光伏、风力发电机和燃料电池。在孤岛运行时,微电网通常采用 Droop 或 V/f 控制方法,但对于不同的分布式电源,应根据实际的模型采用相应的控制策略^[2]。在孤岛运行时,微电网的电压和频率没有大电网的支撑,要求微电网本身必须将电压和频率控制在一定的范围内^[3-4]。分层控制策略能够促使微电网更高效地运行,减少下层设备控制器的工作量,使整个系统分工更加明确,提高运行效率^[5]。

文献[6]根据分布式电源自身的不确定性,给微电网的稳定运行带来困难,将控制系统分为3层,其中,第1层是对分布式电源和负荷的控制,第2层是在第1层控制信号的基础上对电压幅值和频率的控制,第3层是对微电网功率和主网功率的控制;文献[7]针对混合储能的功率容量进行了优化配置,通过低通滤波器对波动的功率进行分解,并根据储能自身的特性分配需要平抑的波动功率;文献[8]针对微电网采用下垂控制策略时,线路阻抗和负荷分布所带来的无功功率分配不均的问题,提出了一种基于不同时间尺度的分层控制策略,即在短时间内增大下垂系数提高控制精度,而在长时间内则改变下垂特性曲线的空载电压和频率值,提高系统的电能质量;文献[9]提出一种改进的有功电压下垂控制策略,通过在控制回路中加入对电压和频率控制的前馈单元,提高逆变器的稳定性,从而提高整个系统的稳定性;文献[10]建立了考虑微电网用户负荷特性的双层优化模型,模型的上层计及用户满意度,对用户负荷进行调整,下层考虑微电网的经济优化调度;文献[11]将自适应虚拟电阻引入电压电流双闭环控制中,不仅抑制了有功功率和无功功率间的耦合作用对系统稳定性产生的影响,还提高了系统的输出电能质量。

综上所述,该文提出以电压、频率电能质量等级为依据的孤岛微电网分层控制策略。

1)对于由超级电容器和磷酸铁锂电池组的混合储能系统,采用上、下层协调控制,实现对混合储能系统的充放电控制和优化运行^[12-14]。其中,上层中央控制器利用模糊控制算法优化混合储能系统的充放电功率指令,下层控制系统在低通滤波算法分配

储能单元的充放电功率指令的基础上,根据各储能单元自身荷电状态对充放功率做出修正,避免储能单元的过充或过放。

2)采用基于虚拟阻抗的改进下垂控制策略,实现微源有功功率和无功功率的解耦。针对下垂控制的有差调节,对微源进行二次调压调频,增加系统的稳定性。然后在微电网孤岛运行状态下,提出基于电压、频率电能质量等级的微电网分层控制策略。

3)采用 Matlab/Simulink 进行仿真验证分析与研究。

1 微电网分层控制依据

GB/T 34930—2017《微电网接入配电网运行控制规范》要求微电网电能质量需满足电力系统电能质量的相关标准^[15-18]。参考《电力系统电能质量国家标准》的相关标准,根据系统中检测到的电压、频率值相对于额定值的偏差,对微电网的电能质量进行分级,分为优等、中等和差等3个等级。

电压偏差是实际运行电压对系统额定电压偏差的相对值,用百分数表示。GB/T 12325—2008《电能质量供电电压偏差》规定:35 kV 及以上供电电压正、负偏差的绝对值之和不超过额定电压的10%;20 kV 及以下的三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$;220 V 单相供电电压偏差为标称电压的 $+7\%$ 、 -10% 。电压偏差的计算公式为

$$\text{电压偏差}(\%) = \frac{\text{电压测量值} - \text{系统标称电压}}{\text{系统标称电压}} \times 100\% \quad (1)$$

频率偏差是系统运行频率的实际值和额定值之差。GB/T 15945—2008《电能质量电力系统频率偏差》规定:在正常运行条件下,电力系统频率偏差的允许值为 ± 0.2 Hz,当系统的容量较小时,偏差允许值为 ± 0.5 Hz。

根据以上标准和中国电力系统的实际运行情况,该文将微电网的电压、频率电能质量等级分为3个等级:①当电压偏差为 $\pm 1\%$ 、频率偏差为 ± 0.1 Hz时,规定微电网系统的电能质量为优等;②当电压偏差为 $\pm 1\% \sim \pm 5\%$ 、频率偏差为 $\pm 0.1 \sim \pm 0.2$ Hz时,规定系统的电能质量为中等;③当电压偏差超出 $\pm 5\%$ 、频率偏差超出 ± 0.2 Hz时,规定系统的电能

质量为差等。只要电压或频率满足其中一个偏差指标即对应相应的等级。根据对微电网电压、频率电能质量等级的划分对微电网进行分层控制。

2 微电网分层控制策略

2.1 微电网分层结构介绍

一般认为微电网分层控制结构为欧盟“More Micro-grids”项目提出的微电网分层控制结构,分为3个层级^[19]:最上层为配电网管理系统(distribution management system, DMS),包括调度控制和市场交易的功能,负责多个微电网的互动运行;中间层为微电网管理层,主控单元微电网中央控制器(micro-grid central controller, MGCC)根据经济和安全因素对微电网的底层微电源控制器(micro-source controller, MC)和负荷控制器(load controller, LC)进行集中控制,使微电网形成微源和负荷协调的控制架构;底层为设备层,主要包括 MC 和 LC。MC 对各分布式电源(distribution generation, DG)进行本地控制,维持 DG 的正常运行;LC 主要控制可中断负荷,以保证微电网内部的功率平衡。最上层、中间层和底层之间通过慢速通信总线相连,进行信息交流。

该文主要研究单个微电网系统的稳定运行,不考虑经济调度问题,故将配电网调度中心的部分功能分配给微电网中央控制系统。将微电网控制结构分为2层,结构如图1所示。

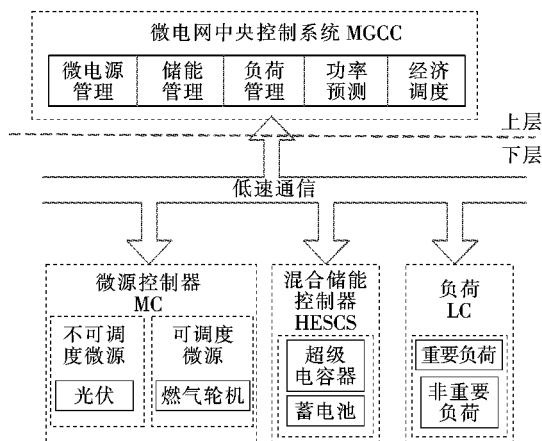


图1 微电网2层控制结构

Figure 1 Structure of micro-grid in two layers

在图1中,上层为微电网中央控制系统,下层由微源控制器、混合储能控制器和负荷构成。上层主要对微电源管理、储能管理和负荷管理进行研究;在下层中,为方便中央控制器对微源和负荷的控制,将微源分为可调和不可调度微源,将负荷分为重要和非重要负荷。MGCC根据采集到的微电网信息,采取相应的控制策略,如:转变微源的控制方法,控制微源、储能装置和负荷的投切等。MC通过通信线路接收上层MGCC发送的工作指令,并将自身的工作信息反馈给MGCC。

2.2 微电网分层控制策略

为了解决在孤岛状态下微电源出力与负载不平衡的问题,提出通过电压、频率的不同电能质量等级来实现微电网的分层控制策略,其流程如图2所示。

在图2中,为了区分上、下层控制器在分层控制时完成的不同任务,使用虚框代表上层控制,实框代表下层控制。整体控制流程:

1)微电网中央控制器检测微电网的孤岛行状态;

2)判断混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)、不可调度微源(光伏)和可调度微源(微型燃气轮机)的控制策略是否分别为V/f、PQ和Droop;

3)MGCC检测电压、频率的电能质量等级。当检测到电能质量等级为优等时,下垂控制单元自动动作;检测到电能质量等级为中等时,先判断HESS是否满足充放电需求,若满足则直接进行充放电,若不满足则经过修正后再进行充放电,同时剩余功率缺额由下垂控制单元自动补偿;检测到电能质量等级为差等时,经过Droop单元的二次调频调压控制,让系统的电能质量变为中等或优等^[20-21]。

对微电网进行分层控制后,部分由下层设备执行的功能可以转为上层控制,能够降低下层设备的复杂度,有利于微电网控制的标准化。另外,对微电网进行分层控制后,系统结构的灵活性增加,容易在系统中增加分布式电源和其他控制功能。

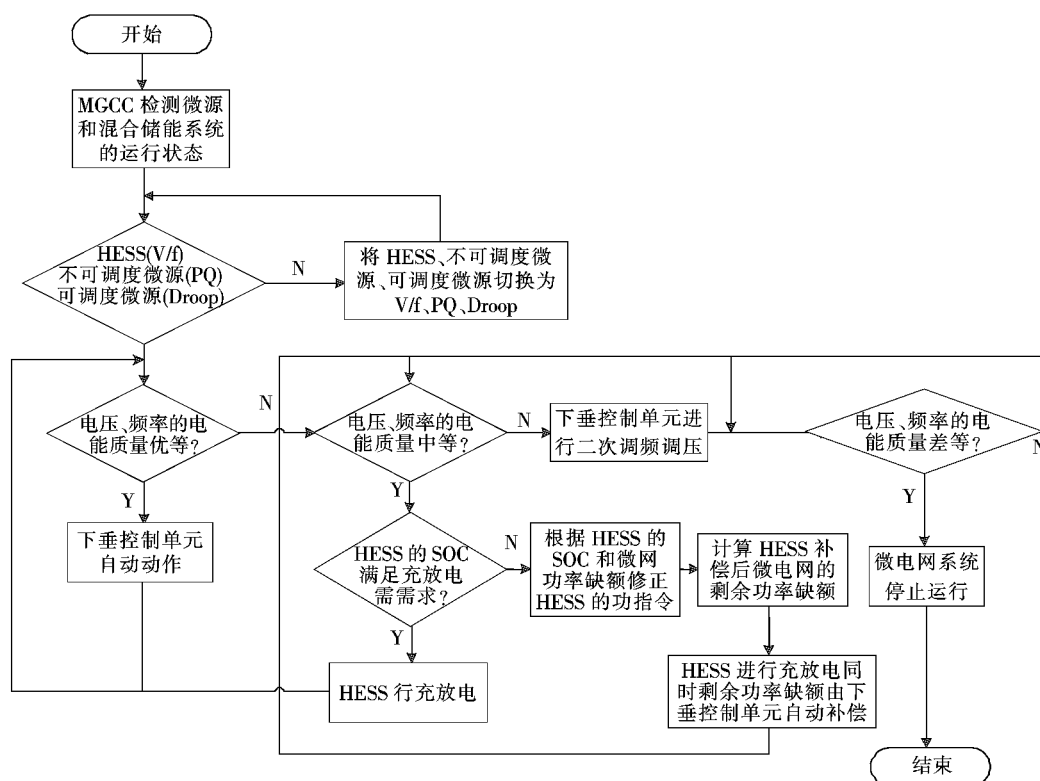


图 2 孤岛微电网分层控制策略流程

Figure 2 Data flow chart of hierarchical control strategy for island micro-grid

2.2.1 上层控制

上层控制是 MGCC 对微源管理、储能管理、负荷管理、功率分配和经济调度进行检测控制,制定运行计划,根据采集到的电压、电流和功率等信息,对运行计划进行实时调整,控制 DG、LC 和 HESS 的启停,保证微电网电压、频率的稳定运行。当孤岛运行时,通过调节各分布式电源出力和各负荷用电情况,实现微电网的稳定运行。

微型燃气轮机是可调度微源,可以根据微电网的功率需要改变其自身出力,在微电网孤岛运行时适合采用 Droop 控制方法;为了最大限度的利用可再生能源,像光伏这种不可调度微源一般都按其最大输出功率并入微电网,适合采用 PQ 控制方法;混合储能系统具有充放电速度快、容量大等优点,适合采用 V/f 控制方法。MGCC 检测 HESS、光伏和微型燃气轮机的控制策略是否符合要求,不符合要求时控制其切换到相应的控制策略。

在确定了下层设备的控制方法后, MGCC 根据系统电压、频率的电能质量等级,协调控制各底层设备的运行。

2.2.2 下层控制

下层控制负责执行微电网各分布式电源的调节、储能、充放电控制以及各负荷的运行,通过

MGCC 发送的电能质量等级的指令做出相应的控制策略,具体的协调控制策略如下。

1) 当孤岛微电网电压、频率电能质量为优等时,造成电压和频率微小波动的原因可能是微电网中光伏系统受到外界环境影响,导致出力出现小幅度波动或系统中小容量发电机组或负荷的投切。由于这 2 种情况的出现造成系统中微电源出力与负载需求不匹配,使得孤岛微电网内存在小容量的功率缺额。因为此时系统内的功率缺额较小,只需系统内采用 Droop 控制的微电源根据 Droop 控制特性,增加或减小出力,就可以保证系统能量平衡。

2) 当孤岛微电网电压、频率电能质量为中等时,造成电压和频率波动的原因可能是微电网中微电源出力出现较大幅度的波动,甚至是个别的微电源退出运行;容量较大的发电机组或负荷的投切。如果仍然采用单一的 Droop 控制,系统的电能质量就很难达到优等,而混合储能系统具有快速充放电的能力,通过采用 V/f 控制方法快速地进行充放电,恢复系统的电压和频率,有效地避免了系统采用单一 Droop 控制方法的不足。在此过程中, MGCC 需要对混合储能系统的 SOC 状态和微电网功率缺额进行判断,确定是否需要修正混合储能系统的功率指令,防止 HESS 的过充或过放。若 SOC 满

足微电网的功率缺额,则 MGCC 不对混合储能系统下达功率修正指令;若 SOC 不能满足微电网的功率缺额,则 MGCC 通过模糊逻辑控制方法对混合储能装置下达功率修正指令。

3)当微电网电压、频率电能质量为差等时,造成电压和频率较大波动的原因可能是微电网中光伏系统受到外界环境的影响,导致出力发生很大幅度的波动,或是出现了很大容量的发电机组或负荷的投切,导致微电网内出现很大的功率缺额。此时,依然采用微电网电能质量为中等时的协调控制策略已经不能将微电网电能质量恢复到优等或中等等级。因此, MGCC 给 Droop 控制单元下达二次调频调压指令,使微电网的电压、频率恢复到额定值附近。经过二次调频调压后,微电网电压、频率值恢复到优等, MGCC 重新采用电压、频率质量为优等时的协调控制策略。

当微电网电能质量为优等、中等和差等时,下层控制器做出了相应的控制策略,并将相应的控制信息反馈给上层,使整个系统在切换负荷时可以稳定运行。

3 仿真分析

3.1 仿真分析

在 Matlab/Simulink 软件平台上搭建 380 V/50 Hz 微电网的仿真模型,验证该文提出的分层控制策略的有效性。该微电网模型由微型燃气轮机、光伏 (photovoltaic, PV) 和混合储能系统及负荷 Load 1~Load 6 组成,如图 3 所示。在仿真结果中,微电网均运行在孤岛状态下。系统的仿真参数如表 1 所示。

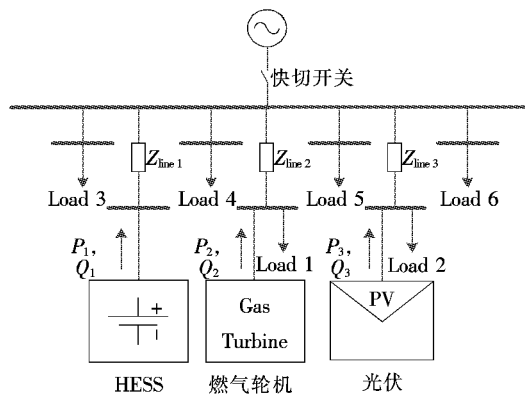


图 3 微电网仿真系统

Figure 3 Micro-grid simulation system diagram

表 1 微电网仿真模型参数

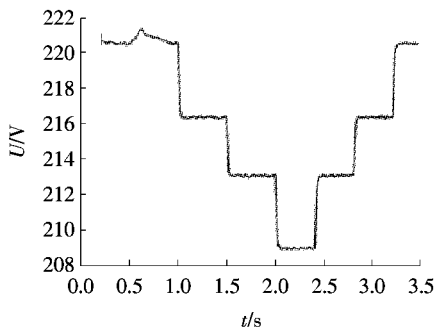
参数名称	数值	参数名称	数值
P_1, Q_1	12 kW, 5 kVar	Load 1	10 kW, 5 kVar
P_2, Q_2	20 kW, 10 kVar	Load 2	15 kW, 2 kVar
P_3	20 kW, 4 kVar	Load 3	10 kW, 5 kVar
$Z_{line 1}$	$(0.12+j0.158) \Omega$	Load 4	12 kW, 5 kVar
$Z_{line 2}$	$(0.12+j0.158) \Omega$	Load 5	10 kW, 4 kVar
$Z_{line 3}$	$(0.06+j0.079) \Omega$	Load 6	15 kW, 4 kVar

3.2 仿真模型

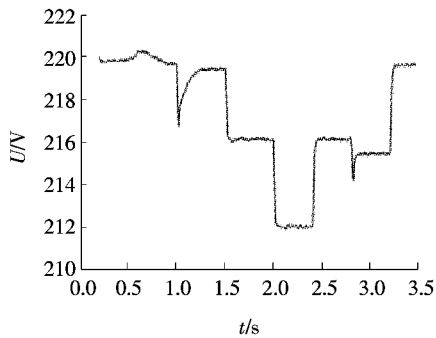
仿真模型分为 2 种:不含混合储能系统和含有混合储能系统。2 种仿真模型的仿真时间均为 3.5 s。仿真过程:0~0.5 s 时微电网中微型燃气轮机按额定功率输出, PV 在正常光照情况下输出功率为 16 kW, 此时负荷 Load 1、Load 2 和 Load 3 接入微电网中, 整个系统功率平衡;0.5 s 时 PV 受光照变化, 出力增加;0.6 s 时 PV 出力达到最大值 20 kW, 此后光照强度减弱;0.75 s 时 PV 出力恢复为 16 kW, 在 1、1.5 和 2 s 时, 负荷 Load 4、Load 5 和 Load 6 分别接入微电网中, 在 3.2、2.8 和 2.4 s 时, 分别从微电网中切出。不含分层控制策略的仿真结果如图 4(a)~7(a)所示, 加入分层控制策略的仿真结果如图 4(b)~8 所示。

1)当不含混合储能系统时, 仿真过程中 PV 出力变化和负荷投切造成的微电网功率不平衡都由微型燃气轮机通过下垂控制策略进行调节, 如图 6(a)所示。从图 4(a)、5(a)中看出, 1 s 后, 随着负荷 Load 4、Load 5 和 Load 6 的依次并网, 系统的频率分别降为 49.89、49.8 和 49.68 Hz, 系统的电压分别降为 215.6、212.5 和 208.2 V。根据微电网电压频率电能质量分类, 负荷 Load 4 投入微电网后, 系统电能质量降为中等, 在负荷 Load 5、Load 6 投入后, 系统的电能质量降为差等, 系统只能在较低的电能质量水平下运行, 直到负荷 Load 6、Load 5 和 Load 4 依次从微电网中切出, 系统的电能质量才逐步恢复到优等等级。

2)当含有混合储能系统时, 采用了分层控制策略以及基于虚拟阻抗的改进下垂控制策略, 从图 6(b)、8 可见, 0.5~0.75 s 时 PV 出力增加, 因为此时微电网的电能质量为优等, 依据分层控制策略, 微型燃气轮机根据下垂控制策略动作, 适当的增加微电网的频率, 降低燃气轮机的出力, 维持系统的功率平衡。此时系统的电压、频率变为 220.2 V 和 50.02 Hz, 系统稳定运行。

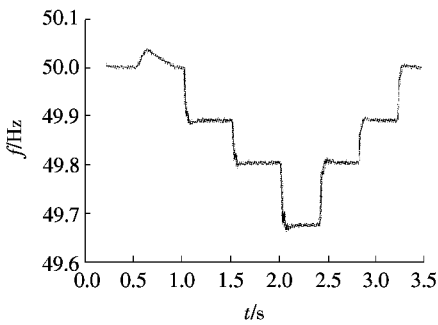


(a)不含混合储能系统时母线电压

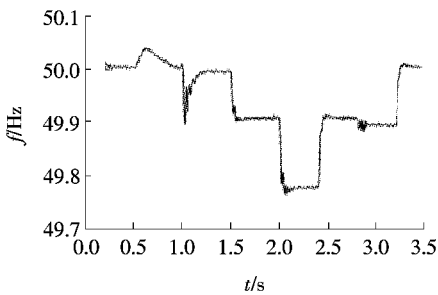


(b)含混合储能系统时母线电压

图 4 微电网系统母线电压
Figure 4 Micro-grid system bus voltage

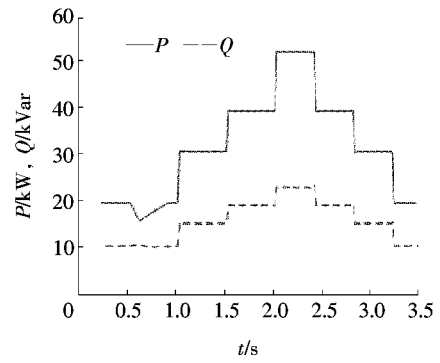


(a)不含混合储能系统时系统频率

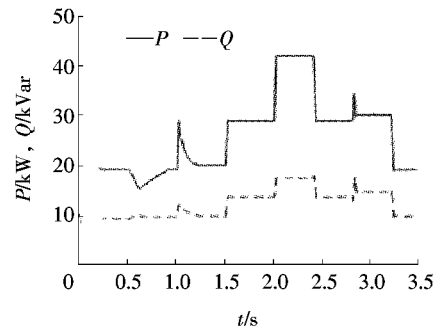


(b)含混合储能系统时系统频率

图 5 微电网系统频率
Figure 5 Micro-grid system frequency

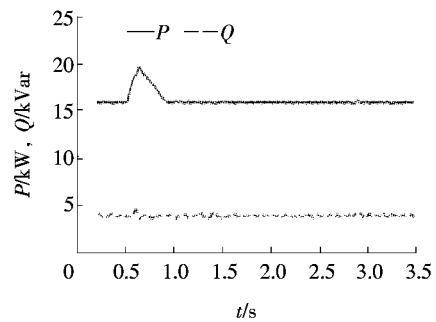


(a)不含混合储能系统时燃气轮机输出功率

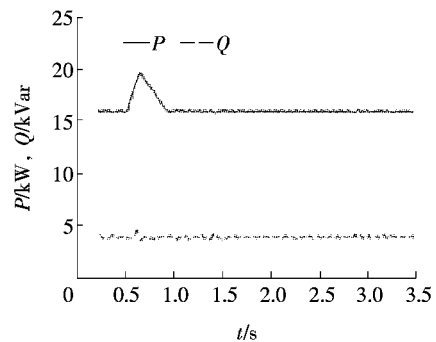


(b)含混合储能系统时燃气轮机输出功率

图 6 微型燃气轮机输出功率曲线
Figure 6 Output power curve of micro-power gas turbine



(a)不含混合储能系统时光伏输出功率



(b)含混合储能系统时光伏输出功率

图 7 光伏输出功率曲线
Figure 7 Output power curve of PV

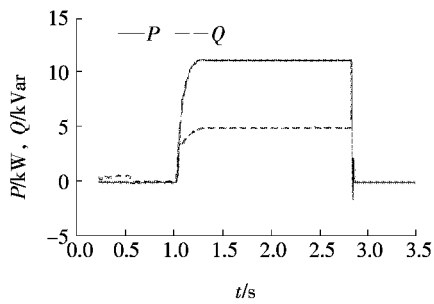


图8 HESS输出功率曲线

Figure 8 Output power curve of HESS

①1 s时 Load 4 接入微电网中,电能质量为中等,HESS 向微电网输入功率,同时,微型燃气轮机为了维持系统的功率平衡,其有功和无功功率出现短暂的增加,如图 6(b)、8 所示。此时,系统的电压最低降为 216.9 V,频率最低降为 49.89 Hz。

②1.5 s时 Load 5 接入微电网中,HESS 继续增加出力直至达到 12 kW、5 kVar,但是此时系统中仍然存在功率缺额。根据分层控制策略,下垂控制的微型燃气轮机动作,降低系统的电压、频率值,如图 6(b)所示,微型燃气轮机的有功和无功功率分别增加为 29.2 kW 和 14 kVar,系统的电压和频率分别降为 216.3 V 和 49.9 Hz。

③2 s时 Load 6 接入微电网中,电能质量变为差等,根据分层控制策略,此时需要对下垂控制的燃气轮机进行二次调频调压,在仿真过程中,因只检测到频率的电能质量等级为差等,故只对燃气轮机进行二次调频,期间最低降为 49.76 Hz。由于没有进行二次调压,系统的电压随着燃气轮机输出无功的增加进一步降为 212.2 V。

④2.4 s时 Load 6 切出微电网,HESS 出力不变,燃气轮机的出力减小,但是由于 Load6 的容量较大,在切出电网的瞬间造成系统功率不平衡,这时控制系统对微型燃气轮机再次进行二次调频,使得系统的频率有所升高,此时电压、频率值为 216.3 V 和 49.91 Hz。

⑤2.8 s时 Load 5 切出微电网,微型燃气轮机的出力小于其额定功率,HESS 的出力为最大值,为了节约 HESS 的使用寿命,控制系统会对 HESS 下达停止输出功率的命令,由图 8 所示,2.8 s 后 HESS 的出力变为 0,而微型燃气轮机出力不降反升,上升为 30.4 kW 和 15.1 kVar。系统在二次调频调压的作用下,系统的频率变为 49.9 Hz,而系统的电压由于受微型燃气轮机下垂调节的影响,下降

为 215.6 V。

⑥3.2 s时 Load 4 切出微电网,这时系统中的能量再次恢复平衡,微型燃气轮机的出力也达到额定值,此时,微电网的电压和频率都恢复为 220 V 和 50 Hz。

综上,当微电网在孤岛运行、微电源出力变化和负荷投切时,采用分层协调控制策略能够保证微电网的电能质量等级为中等以上,有效地提高了微电网的电压和频率的电能质量。

4 结语

针对微电源出力变化和负荷投切带来的微电网的不稳定问题,该文提出了基于电能质量等级划分的分层控制策略。从仿真结果的对比图可以看出,采用分层控制策略可以在微源出力变化和负荷变化时,将系统的电能质量等级控制在中等以上,有效地提高了电能质量的水平,增强了微电网系统的稳定性。仿真结果表明,该文提出的分层控制策略是有效的,可以较好地控制微电网系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 黎金英,艾欣. 含多种分布式电源的微电网分层控制策略[J]. 宁夏电力,2016(3):16-21.
LI Jinying, AI Xin. Hierarchical control strategy of micro-grid with different distributed generation types[J]. Ningxia Electric Power, 2016(3):16-21.
- [2] 葛晓慧,周金辉,张雪松,等. 含可再生能源的独立微电网优化配置研究[J]. 浙江电力,2012,31(12):1-4.
GE Xiaohui, ZHOU Jinhui, ZHANG Xuesong, et al. Research on optimal configuration of isolated microgrid with renewable energy [J]. Zhejiang Electric Power, 2012, 31(12):1-4.
- [3] 赵宪,周力行,熊家伟,等. 含分布式电源配电网电压质量综合评估[J]. 电力科学与技术学报,2013,28(4):49-53.
ZHAO Xian, ZHOU Lixing, XIONG Jiawei, et al. Voltage quality comprehensive assessment for distribution systems with distributed generations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(4):49-53.
- [4] 王杨,万凌云,胡博,等. 基于孤岛运行特性的微电网可靠性分析[J]. 电网技术,2014,38(9):2379-2385.
WANG Yang, WAN Lingyun, HU Bo, et al. Isolated island operating characteristics based analysis on reliability of microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2379-2385.

- [5] 刘东, 陈云辉, 黄玉辉, 等. 主动配电网的分层能量管理与协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5500-5506.
LIU Dong, CHEN Yunhui, HUANG Yuhui, et al. Hierarchical energy management and coordination control of active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5500-5506.
- [6] 郝雨辰, 窦晓波, 吴在军, 等. 微电网分层分布式能量优化管理[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 154-162.
HAO Yuchen, DOU Xiaobo, WU Zaijun, et al. Hierarchical and distributed optimization of energy management for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 154-162.
- [7] 王帅, 王承一, 赵兴勇, 等. 微电网复合储能的功率容量优化配置[J]. 自动化技术与应用, 2017, 36(6): 90-93.
WANG Shuai, WANG Chengyi, ZHAO Xingyong, et al. Optimal configuration of the power and capacity of hybrid energy storage in micro grid[J]. Techniques of Automation and Applications, 2017, 36(6): 90-93.
- [8] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 提高负荷功率均分和电能质量的微电网分层控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 106-114.
BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. Hierarchical control of microgrid to improve power sharing and power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 106-114.
- [9] 梁帅奇, 牟晓春, 赵雪, 等. 含有储能单元的微电网运行控制技术[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(4): 74-79+87.
LIANG Shuaiqi, MO Xiaochun, ZHAO Xue, et al. Operation and control techniques of Micro-Grids with energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(4): 74-79+87.
- [10] 陈宏, 冷华, 唐海国, 等. 含可再生能源的微电网经济运行双层优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 93-98.
CHEN Hong, LENG Hua, TANG Haiguo, et al. Two-stage optimization method on micro-grid economic operation with renewable energy resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 93-98.
- [11] 王二永, 王帅. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 144-149.
WANG Eryong, WANG Shuai. Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 144-149.
- [12] 温镇, 张勇, 潘晓纯, 等. 独立光伏系统的超级电容和蓄电池混合储能系统研究[J]. 浙江电力, 2013, 32(11): 57-62.
WEN Zhen, ZHANG Yong, PAN Xiaochun, et al. Study on hybrid storage system based on supercapacitor and battery in stand-alone PV system[J]. Zhejiang Electric Power, 2013, 32(11): 57-62.
- [13] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 77-84.
SUN Xiaofeng, LV Qingqiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 77-84.
- [14] 张祥, 周博文. 微网储能系统的模糊控制策略研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 16-21.
ZHANG Xiang, ZHOU Bowen. Study on fuzzy control strategy based on of micro-grid energy storage system [J]. Smart Power, 2018, 46(4): 16-21.
- [15] 林雪海. 电能质量标准的新进展[J]. 供用电, 2009, 26(5): 4-7+15.
LIN Xuehai. New progress on power quality standards [J]. Distribution & Utilization, 2009, 26(5): 4-7+15.
- [16] 林雪海. 电能质量国家标准系列讲座 第1讲 供电电压偏差标准[J]. 建筑电气, 2011, 30(4): 3-9.
LIN Xuehai. Lecture one standard of supply voltage deviation[J]. Building Electricity, 2011, 30(4): 3-9.
- [17] 林雪海. 第2讲电力系统频率偏差标准[J]. 建筑电气, 2011, 30(5): 10-14.
LIN Xuehai. Lecture two standard for frequency deviation of power systems[J]. Building Electricity, 2011, 30(5): 10-14.
- [18] 何国庆, 王伟胜, 刘纯, 等. 分布式电源并网技术标准研究[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 1-12+176.
HE Guoqing, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Study on technical standard of distributed resources grid integration[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 1-12+176.
- [19] Tsikalakis A G, Hatziargyriou N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Transactions On Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.
- [20] Han Y, Shen P, Zhao X, et al. Control strategies for islanded microgrid using enhanced hierarchical control structure with multiple current-loop damping schemes [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3): 1139-1153.
- [21] 郭通, 李燕青, 全年, 等. 基于自调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 77-82+91.
GUO Tong, LI Yanqing, TONG Nian, et al. Control strategy of micro-grid on self-adjustable droop coefficient[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 77-82+91.