

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.15.004

# 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计

刘梦璇<sup>1</sup>, 郭力<sup>1</sup>, 王成山<sup>1</sup>, 赵波<sup>2</sup>, 张雪松<sup>2</sup>, 刘云<sup>3</sup>

(1. 智能电网教育部重点实验室, 天津大学, 天津市 300072;

2. 浙江省电力试验研究院, 浙江省杭州市 310014; 3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京市 100085)

**摘要:** 在考虑典型风光柴储孤立微电网主要设备运行约束条件的基础上, 提出了一种风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略。该策略以保证孤立系统的长期稳定运行、提高系统全寿命周期的经济性为主要设计目标, 利用自主研发的微电网准稳态仿真工具对典型实际孤立微电网进行仿真计算, 并与美国国家能源实验室(NERL)开发的微电网仿真软件 Hybrid2 中的相关控制策略进行比较, 验证了文中所提出控制策略的正确性和有效性。

**关键词:** 孤岛运行; 微电网; 协调运行; 控制策略; 能量管理系统; 电池寿命

## 0 引言

微电网是指将一定区域内分散的小型发电单元(分布式电源)、储能装置以及当地负荷组织起来形成的配用电系统。它可以与常规电网并网运行, 也可以独立运行<sup>[1]</sup>。孤立微电网是指仅具备独立运行功能的微电网, 例如对偏远地区或者海岛供电的微电网。

围绕着孤立微电网, 国内外学术界和工程界开展了大量研究工作, 并建设了许多具有代表性的示范工程<sup>[2-7]</sup>。孤立微电网中常用的典型电源有常规发电机组(如柴油发电机、微型燃气轮机等)和可再生能源发电机组(如光伏和风力发电系统等); 当后者容量较大时, 一般需要安装储能系统(如安装蓄电池用于稳定系统运行电压和频率)。就目前而言, 电池储能系统一般投资较大, 且使用寿命较短(如铅酸电池的满充放电循环次数仅为 600~1 000 次<sup>[8]</sup>), 合理利用储能电池以保证其使用寿命是微电网运行控制策略选择的关键。

本文针对包含海水淡化负荷的风光柴储孤立微电网, 设计了一套实用化的协调运行控制策略。该策略以保证孤立系统的长期稳定运行, 提高系统全寿命周期经济性为运行目标, 同时计及了各种设备的运行约束条件。为了验证策略的有效性, 利用自主研发的长时间尺度的微电网准稳态仿真工具

(quasi-steady simulation and optimization tool for microgrid, QSOT-MG), 针对典型的风光柴储孤立微电网进行了仿真计算, 通过与美国国家能源实验室(NERL)开发的微电网仿真软件 Hybrid2<sup>[9]</sup>中的控制策略进行比较, 验证了本文所提出控制策略的有效性。

## 1 系统结构

本文研究用孤立微电网系统结构如图 1 所示。光伏阵列、风力发电机、蓄电池等通过各自的变流器接入交流母线, 这种方案具有变流器容量要求较小, 负荷和分布式电源扩容较为便利的优势。微电网内的可控负载, 如海水淡化负荷, 可用于辅助功率调节<sup>[4]</sup>。

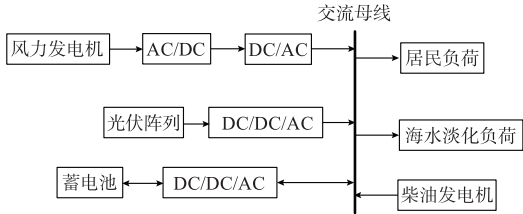


图 1 孤立微电网系统拓扑结构  
Fig. 1 Topology of an isolated microgrid

## 2 系统运行控制策略

对图 1 所示系统进行运行控制的目的是借助于对储能系统的充放电管理、对分布式电源的出力调度以及负荷的控制等, 确保微电网内发电与负荷需求的实时功率平衡, 在防止电池过充与过放等约束条件下, 实现对其他分布式电源的优化调度, 保证微电网的长期稳定、经济运行。也就是说, 控制策略制

收稿日期: 2011-12-22; 修回日期: 2012-04-10。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB219700); 国家自然科学基金资助项目(50625722); 天津大学自主创新基金资助项目。

定的目的就是在保证系统稳定供电的前提下,综合考虑各种分布式电源和储能设备的运行约束,提高系统全寿命周期的经济性。

在 NERL 开发的 Hybrid2 仿真软件中,针对类似图 1 所示系统,包含了十几种控制策略,较为全面地概括了这种孤立微电网系统的控制模式。这些控制模式可以归纳为两大类:①柴油发电机主要扮演净负荷跟随(load following)的角色;②蓄电池主要发挥净负荷跟随作用(即循环充放电(cycle charge))。所谓净负荷  $P_{\text{net}}$ ,本文指由实际负荷减去可再生能源发电系统功率输出后的负荷值,可看做是柴油发电机和蓄电池共同需要满足的净负荷。在第 1 类控制策略中,柴油发电机几乎一直处于运行状态,补偿净负荷的波动,而蓄电池则用于补偿超出柴油发电机额定功率的负荷需求,蓄电池基本处于浮充状态,作为系统备用,此类策略由于柴油发电机组一直保持运行,耗油量较大。在第 2 类控制策略中,柴油发电机与蓄电池可轮流作为主电源满足净负荷需求。本文所提出控制策略原则上讲属于第 2 类,但也吸收了第 1 类控制策略的一些思想,在控制策略制定时更加充分地考虑了蓄电池投资成本对运行经济性的影响。

为了进行不同控制策略的比较,本文将在 Hybrid2 仿真软件所提供算法中选择一种属于上述第 1 类控制策略的算法和所有第 2 类控制策略进行分析比较。

### 2.1 第 1 类策略:平滑功率策略

平滑功率(traditional power smoothing, TPS)策略的控制原则如下:柴油发电机用于满足净负荷需求,当净负荷超过柴油发电机额定输出功率时,蓄电池参与满足净负荷需求。此种情况下,柴油发电机在净负荷大于 0 时开启,在净负荷小于 0 时关闭;当净负荷小于 0 时,可再生能源给蓄电池充电。

这种策略适用于可再生能源渗透率较低的情况,对蓄电池组容量要求较低,需要配置相对较大容量的柴油发电机组,蓄电池主要用于满足柴油发电机组不能满足的那部分负荷,并吸收多余的可再生能源能量。

### 2.2 第 2 类策略:柴油发电机最短运行时间策略

柴油发电机最短运行时间(minimum run time for intermediate diesel, MRTID)策略的控制原则如下:蓄电池主要用于满足净负荷需求,若净负荷超过蓄电池最大放电功率限制或者蓄电池荷电状态(SOC)低于放电下限时,柴油发电机开启,在满足净负荷需求的同时以柴油发电机所能提供的最大充电功率给蓄电池充电;若净负荷为负,即可再生能源输

出功率大于系统内负荷功率时,利用可再生能源为蓄电池充电,若充电功率超过蓄电池最大充电功率限制,则需弃掉部分可再生能源功率,这部分功率对应的能量可计为系统浪费能量,并作为策略优劣的评价指标之一。

这种策略的目的是尽量减少柴油发电机的运行时间,一般适用于因环境或能源约束对柴油发电机组运行时间有限制的场合。

### 2.3 第 2 类策略:软充电策略

软充电(soft cycle charge, SCC)策略的控制原则如下:SCC 策略与 MRTID 策略类似。在这种策略下,柴油发电机的开启条件与 MRTID 策略相同,但柴油发电机退出运行的条件不同。一旦柴油发电机启动,则柴油发电机将一直开启,直到系统中净负荷小于 0 时才可关闭。这种策略有可能引起蓄电池接近满充而净负荷又较小时,柴油发电机组较长时间工作在不经经济的低负载状态。

这种策略的目的是尽量减少柴油发电机的启停次数,一般适用于配置较大容量蓄电池组的系统。

### 2.4 第 2 类策略:硬充电策略

硬充电(hard cycle charge, HCC)策略的控制原则如下:HCC 策略同样与 MRTID 策略类似,主要区别在于柴油发电机退出运行的条件。在此种策略下,当电池的 SOC 达到充电上限,并且柴油发电机满足最小运行时间限制时,柴油发电机停止运行。

这种策略实际上是对 SCC 策略的一种改进,可以避免在蓄电池充满且净负荷较低条件下,柴油发电机组较长时间运行在低负载状态。

### 2.5 第 2 类策略:修正硬充电策略

修正硬充电(revised hard cycle charge, RHCC)策略的控制原则如下:RHCC 策略是本文提出的控制策略,也是本文的分析重点。该策略在 HCC 策略基础上进一步增加了电池的充放电管理。为了尽可能减少蓄电池的充放电次数,一旦蓄电池进入充电状态,就需要可再生能源或者柴油发电机组一直保持充电直到达到设定的 SOC 充电上限,而一旦蓄电池进入放电状态,就需保证其处于持续放电状态,直到达到 SOC 放电下限。在充电期间,可以利用可再生能源充电,一旦其不能满足充电要求,则柴油发电机启动继续保持充电;在放电期间,一旦净负荷小于 0,即可再生能源有多余能量,则需投入可控负载,甚至舍弃多余部分能量。总之,尽量减少蓄电池的充放电循环次数,进而提高蓄电池的使用寿命。

对于上述几种策略,值得注意的是,柴油发电机组在任何情况下都应满足其自身的最小运行时间和最小运行功率限制。如果实际运行需求时间小于柴

油发电机组最小运行时间,则柴油发电机组应该满足连续工作时间不小于最小运行时间限制值;如果实际负荷需求功率低于其最小运行功率限制值,此时柴油发电机组也应按照最小运行功率限制值运行,这种情况下,柴油发电机组多发出的功率实际上是一种浪费,需要额外的负荷进行消耗,这时所浪费的能量也计入评价策略优劣的指标。当然,如果系统中有时间可平移负荷,这部分能量也可以加以利用,但本文不作考虑。有关上述几种控制策略的总结如附录 A 表 A1 所示。

### 3 设备运行约束条件

针对图 1 所示微电网,每一个设备都必须满足一定的运行约束条件,其中,一些约束是设备本身运行安全性或经济性所要求的,而另一些约束则与运行控制策略相关。值得指出的是,有些运行约束也属于相应控制策略的一部分。

#### 3.1 蓄电池

在蓄电池工作过程中,应保持 SOC 在一定范围内。较大的充放电电流、蓄电池过充或过放等都会对蓄电池造成伤害。因此,需要蓄电池的充放电电流、电压以及 SOC 这 3 个指标满足一定的约束条件。

##### 3.1.1 蓄电池电流约束

$$I_{\text{charge}} < I_{\text{charge,max}} \quad (1)$$

$$I_{\text{discharge}} < I_{\text{discharge,max}} \quad (2)$$

式中: $I_{\text{charge}}$  和  $I_{\text{discharge}}$  分别为蓄电池的充、放电电流; $I_{\text{charge,max}}$  和  $I_{\text{discharge,max}}$  分别为蓄电池的最大充、放电允许电流。

##### 3.1.2 蓄电池端电压约束

$$V_{\text{battery,min}} < V < V_{\text{battery,max}} \quad (3)$$

式中: $V$  为蓄电池端电压; $V_{\text{battery,min}}$  和  $V_{\text{battery,max}}$  分别为蓄电池端电压上、下限值。

当  $V$  高于  $V_{\text{battery,max}}$  或低于  $V_{\text{battery,min}}$  时,会影响蓄电池的使用寿命。

##### 3.1.3 蓄电池 SOC 约束

$$E_{\text{SOC,min}} < E_{\text{SOC}} < E_{\text{SOC,max}} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{SOC}}$  为蓄电池 SOC; $E_{\text{SOC,min}}$  和  $E_{\text{SOC,max}}$  分别为蓄电池 SOC 上、下限值。

蓄电池的 SOC 必须处于允许的最小 SOC 和最大 SOC 之间。

#### 3.2 柴油发电机组

柴油发电机组的最大允许输出功率  $P_{\text{d,max}}$  应能够满足在可再生能源出力为 0 且电池容量不能满足放电要求时的负荷需求,即

$$P_{\text{d,max}} \geq P_{\text{load,max}} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{load,max}}$  为最大负荷功率。

为保证柴油发电机能够经济可靠地运行,并尽可能减少频繁启停对其运行寿命的影响,一般要求满足:

$$P_{\text{d,min}} < P_{\text{d}} < P_{\text{d,max}} \quad (6)$$

$$T_{\text{d}} \geq T_{\text{d,min}} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{d}}$  为柴油发电机组实际输出功率; $P_{\text{d,min}}$  为柴油发电机组输出功率下限值; $T_{\text{d}}$  为柴油发电机组运行时间; $T_{\text{d,min}}$  为柴油发电机组最小允许运行时间。

由于柴油发电机低载运行时,发电效率下降,且燃油消耗量接近满载,因此需要设定柴油发电机最小发电功率约束。同时,为了减少频繁启停对柴油发电机寿命的影响,应尽可能设置最小运行时间约束。

上述约束条件并非强制性硬约束条件,对于某些控制策略,上述条件允许放宽。

#### 3.3 风力发电机组

考虑到风力发电机组的频繁启停也会影响其使用寿命,因此可设定下述启动条件:

$$P_{\text{less}} \geq P_{\text{wN}} \quad (8)$$

$$\Delta t_{\text{ws}} \geq t_{\text{ws,min}} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{less}}$  为系统缺额功率; $P_{\text{wN}}$  为单台风电机组的额定功率; $\Delta t_{\text{ws}}$  为风电机组停机时间; $t_{\text{ws,min}}$  为风电机组最小停机时间。

当式(8)满足时,投入风电机组,这样可以避免小功率波动造成的风电机组频繁投切;风电机组停机时间需要满足最小停机时间要求,可优先投入已切除时间较长的风电机组;同理,需要切除风电机组时,应优先切除已投入时间  $\Delta t_{\text{wo}}$  较大的风电机组。

#### 3.4 光伏电池组

附录 B 图 B1 给出了某一温度和光照强度下的光伏电池  $P$ - $V$  特性曲线。在一定的光照强度和环境温度下,光伏电池可以工作在不同的输出电压下,通过控制光伏电池阵列的输出电压,就可以调节光伏发电系统的输出功率。光伏并网逆变器直流侧存在最小电压约束,当光伏电池组的电压低于下限  $V_{\text{PV,min}}$  时,逆变器无法正常工作, $V_{\text{PV,min}}$  对应光伏电池组最小输出功率。利用光伏并网逆变器控制光伏阵列的工作点电压,使其既可以工作在最大功率点处,也可以工作在低于最大功率点的某一设定功率值处。其运行约束条件为:

$$P_{\text{PVN}} \geq P_{\text{PV,max}} \geq P_{\text{PV}} \geq P_{\text{PV,min}} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{PV}}$ ,  $P_{\text{PV,max}}$ ,  $P_{\text{PV,min}}$ ,  $P_{\text{PVN}}$  分别为当前光伏电池组的输出功率、最大输出功率、最小输出功率及额定功率。

### 3.5 海水淡化系统

目前,海水淡化装置的类型有多种,这里采用反渗透海水淡化(reverse osmosis, RO)装置。该装置可作为可调负荷进行控制,在系统有多余可再生能源能量时启动运行,其工艺流程和特点如附录 C 所述。

海水淡化系统的运行功率为:

$$P_{RO} = P_{desalination} \quad (11)$$

海水淡化系统开启条件可设定为:

$$P_{net} < 0 \text{ 或 } H_w = 0 \quad (12)$$

式中:  $P_{RO}$ ,  $P_{desalination}$ ,  $P_{net}$  分别为当前海水淡化系统的消耗功率、额定功率、净负荷;  $H_w$  为当前淡水蓄水池的蓄水量。

### 3.6 蓄电池并网变流器

与柴油发电机类似,蓄电池并网变流器的额定功率  $P_{converter}$  应能够在可再生能源出力为 0 时,利用蓄电池独立满足最大负荷功率需求,即

$$P_{converter} \geq P_{load, max} \quad (13)$$

## 4 RHCC 运行控制策略分析

本文提出的 RHCC 控制策略,其关键是一旦  $E_{SOC}$  小于放电下限  $E_{SOC, low}$  ( $E_{SOC, low} > E_{SOC, min}$ ), 蓄电池即进入充电状态,直到其  $E_{SOC}$  大于充电上限  $E_{SOC, high}$  ( $E_{SOC, high} < E_{SOC, max}$ )。反之也是一样,一旦开始放电,则保持持续放电到小于  $E_{SOC, low}$ 。在充电过程中,如果是利用柴油发电机组充电,则需满足式(7)。

### 4.1 电池充电

当电池工作在充电状态时,在不超过电池最大充电功率限制的条件下,应尽可能利用可再生能源为电池充电,此时,可以依据蓄电池充电功率需求,适当决定可再生能源的投入容量。在这一状态下,为避免因海水淡化而消耗柴油,除淡水蓄水池无水情况外,海水淡化系统不运行。即使柴油发电机没有启动,且有多余可再生能源也应尽量避免海水淡化装置运行,这是由于一旦海水淡化装置启动,其负荷就将基本保持恒定,有可能由于可再生能源的波动性导致电源输出功率不足,影响蓄电池的充电。

如果可再生能源的出力小于负荷,即  $P_{net} > 0$ , 且此前蓄电池一直处于充电状态,则应启动柴油发电机为负荷供电,同时给蓄电池充电。此时,应在保证柴油发电机满足净负荷需求的条件下,尽可能以蓄电池允许的最大功率为蓄电池充电,柴油发电机功率  $P_d$  可设定为:

$$P_d = P_{net} + P_{charge, max} \quad (14)$$

值得指出的是,在蓄电池未达到设定的 SOC 充

电上限时,一旦柴油发电机组启动,即使净负荷为负值,柴油发电机组也不退出运行,而是继续为蓄电池充电。当净负荷比较小(甚至小于 0)时,可能会出现  $P_d < P_{d, min}$ , 为保证柴油发电机组工作在允许的功率输出范围内,需要切除部分可再生能源;反之,如果出现  $P_d > P_{d, high}$ , 则可以进一步投入可再生能源。其中,  $P_{d, high}$  为允许投入可再生能源的柴油发电机输出功率阈值,  $P_{d, high} < P_{d, max}$ 。

如果由于系统净负荷比较大而使柴油发电机组的充电功率不能满足式(14)的要求,则可按下式调整蓄电池充电功率:

$$P_{charge} = P_{d, max} - P_{net} \quad (15)$$

### 4.2 电池放电

无论是通过可再生能源还是柴油发电机组为蓄电池充电,一旦其达到 SOC 的充电上限值,即转入放电状态。此时,蓄电池将作为系统主电源用于满足负荷需求。若此前柴油发电机组处于启动状态,且满足了其最小运行时间限制,则应停止运行;若未满足最小运行时间限制,则继续运行,直到满足最小运行时间后停止运行。

蓄电池一旦进入放电状态,则需保证持续放电。当净负荷大于 0 时,蓄电池给负荷供电,为尽量利用可再生能源,设置阈值  $P_{bup}$ , 如果  $P_{net} > P_{bup}$ , 则需要投入部分可再生能源,以减小电池放电功率;当净负荷小于 0 时,即存在多余可再生能源时,优先投入海水淡化系统,如仍有多余,则需要切除部分可再生能源。

如果电池放电功率达到最大放电功率限制且还不能满足负荷需求,则应切除部分负荷,负荷切除量将成为评价控制策略优劣的指标之一,亦即负荷不满足量。

值得注意的是,为了防止由于  $P_{bup}$  设置较低而造成风电机组的频繁投切,可令  $P_{bup}$  大于等于单台风电机组的额定功率。

### 4.3 可再生能源的投切策略

为了满足蓄电池的运行约束条件,需要对部分可再生能源发电装置采取投切操作。风电机组频繁启停会造成机械磨损,影响寿命,而光伏电池不同于风力发电机组,不存在机械磨损问题,可以方便地实现功率变化。

在 RHCC 策略中,一旦需要投入可再生能源,则优先投入光伏系统,若光伏系统全部投入后还可以进一步投入可再生能源,则投入风电机组。在投入风电机组时,需考虑风电机组的分组投切问题;检测满足风电机组开启条件式(9)的风电机组台数  $S$ , 如果  $S \geq 1$ , 则根据投切需要将  $S$  台风电机组依次启动。

在 RHCC 策略中,一旦需要切除可再生能源,需优先切除光伏系统,直到逐步切除全部光伏系统后,再考虑切除风电机组。切除风电机组时也应依次进行,直到按需要全部切除或保持部分风电机组持续运行。

## 5 仿真结果比较

选取中国东部沿海某岛屿(东经 122.40°、北纬 30.10°)上的风光柴储孤立微电网作为研究对象,系统中配置有 1 台单机容量为 30 kW 的风电机组,90 kW 的光伏发电系统,1 台额定容量为 100 kW 的柴油发电机,1 组 1 300 A·h/480 V 的铅酸蓄电池组,1 台额定功率为 12 kW、制水能力为 1.2 m<sup>3</sup>/h 的海水淡化系统,1 个蓄水量为 50 m<sup>3</sup> 的淡水蓄水池。居民负荷峰值为 100 kW。

算例选用全年负荷数据,为了方便观察,这里选取典型一周数据进行分析。

仿真步长取为 1 h,取  $P_{\text{bup}}=30$  kW,控制策略中的部分参数设置如附录 D 表 D1 所示。

为了更直观地评估多种策略的经济性指标,本文引入了全寿命周期内的净现值费用(net present cost, NPC)评价不同控制策略的优劣<sup>[9]</sup>。NPC 的成本部分包括初始投资、设备更新费用、运行维护费用、燃料费用,收入部分包括售电收益和设备残值,数学表达式为:

$$M_{\text{NPC}} = \sum_{k=1}^K \frac{C(k) - B(k)}{(1+r)^k} \quad (16)$$

式中: $K$  为整个系统的工程寿命; $r$  为贴现率; $C(k)$  和  $B(k)$  分别为第  $k$  年的成本和收入。

参考实际孤立海岛系统的工程费用,光伏电池、风力发电机、柴油发电机和铅酸电池的设备和维护费用等参数如附录 D 表 D2 所示。选取 20 a 作为工程寿命周期,贴现率  $r$  取为 5%。当地电价按照 1.78 元/(kW·h)收取。

基于上述参数,针对不同控制策略获得的仿真结果和经济性评价比较结果如附录 E 所示。表 E1 给出了 TPS, MRTID, SCC, HCC, 不考虑海水淡化负荷的 RHCC 和考虑海水淡化负荷的 RHCC 几种控制策略的仿真结果。从表中可以看出,几种策略都可以满足系统负荷需求,同时可以得出下述结论。

1) 在 TPS 策略中,柴油发电机的开启时间最长,油耗最大,虽然电池寿命很长,但是电池基本处于浮充状态,并未给负荷供电,同时在低负载情况下,浪费了很多柴油发电机出力, NPC 很大。

2) 在 MRTID 策略中,柴油发电机的运行时间和油耗最少,但是由于频繁充放电,使得电池的寿命

最短, NPC 最大。

3) 在 SCC 策略中,一旦柴油发电机启动,则将一直运行,此时有可能电池已经接近满充状态,但净负荷还是大于 0,柴油发电机需要延长运行时间直到净负荷小于 0 的时刻才关闭。因此,柴油发电机的运行时间和油耗都较 HCC 策略多,但电池寿命比 HCC 策略长, NPC 较大。

4) 就算例系统而言, HCC 策略相对于上述 3 种控制策略最为经济。

5) 采用不考虑海水淡化负荷的 RHCC 策略时,电池寿命比 HCC 策略有了明显提高,但比 SCC 策略小;柴油发电机的发电量比 SCC 策略大,但是运行时间和油耗却较小,说明使用本文策略柴油发电机的运行效率比 SCC 策略高,虽然油耗比 HCC 策略大,但是系统 NPC 比前 4 种策略显著减小。采用考虑海水淡化负荷的 RHCC 策略时,虽然油耗略有增加,但是系统浪费能量明显减少,同时满足了居民用水需求, NPC 相对于不考虑海水淡化负荷的情况有所增加,但仍比前 4 种策略小。因此,相对前 4 种策略而言,计算数据表明, RHCC 策略可以达到较好的全寿命周期经济性,综合而言, RHCC 策略较好。

为了进一步深入分析 RHCC 策略的控制效果,特选取 3 月某一周的典型负荷数据,如附录 E 图 E1 所示。分别对 Hybrid2 中的 HCC 策略和 QSOT-MG 中的 RHCC 策略进行比较,仿真结果如附录 E 图 E2—图 E7 所示。图 E2 和 E3 分别为 RHCC 和 HCC 策略的光伏、风电机组出力曲线。图 E2 的仿真结果表明, RHCC 相对于 HCC, 切除了少量的光伏功率(小图所示)。这是由于在 RHCC 策略中,当电池工作在放电状态时,不允许多余的可再生能源给电池充电,因此需要切除部分可再生能源发电功率。从图 E3 可看出,对于此算例, 2 种策略的风电机组投入情况相同。

图 E4 和 E5 分别为采用 HCC 和 RHCC 策略时获得的电池充放电功率、柴油发电机输出功率及海水淡化消耗功率(HCC 策略未考虑)情况。

图 E6 为 RHCC 策略中居民用水量和淡水蓄水池容量的仿真结果,表明 RHCC 策略满足了居民用水需求。图 E7 为电池 SOC 比较,结果显示, HCC 策略电池充放电轨迹有多处抖动,如圆圈所指位置,表明 HCC 策略电池充放电次数(18 次)明显多于 RHCC 策略(8 次)。根据电池使用寿命评估指标计算公式<sup>[9]</sup>,按照所选取的一周典型负荷数据计算, HCC 策略下的电池使用寿命仅为 RHCC 策略的 72%,大大提高了电池的可用寿命。

## 6 结语

本文围绕风光柴储孤立微电网,在综合考虑微电网内各设备运行约束条件的基础上,制定了以保证微电网长期可靠运行,提高系统全寿命周期经济性为目标的多能源的协调控制策略。利用自主研发的微电网准稳态仿真工具 QSOT-MG 对典型实际孤立微电网进行仿真计算,并与 Hybrid2 的控制策略计算结果进行比较。从仿真计算结果可以看出,本文所提出的控制策略兼顾了各种设备的运行约束限制,在延长电池寿命上具有较大优势,运行策略可使整个系统的全寿命周期的运行经济性获得提高。本文研究成果可为孤岛微电网的运行策略制定提供参考。

附录见本刊网络版(<http://aeaps.sgepri.sgcc.com.cn/aeaps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 王成山,杨占刚,王守相,等.微网实验系统结构特征及控制模式分析[J].电力系统自动化,2010,34(1):99-105.  
WANG Chengshan, YANG Zhangang, WANG Shouxiang, et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 99-105.
- [2] MANOLAKOS D, PAPADAKIS G, PAPANTONIS D, et al. A simulation-optimisation programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water through desalination to remote areas: case study: the Meressini village, Donoussa island, Aegean Sea, Greece [J]. Energy, 2001, 26(7): 679-704.
- [3] MORAIS H, KADAR P, CARDOSO M, et al. VPP operating in the isolated grid[C]// Proceedings of 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, New York, NY, USA: 896-901.
- [4] VANDENBERGH M, GEIPEL R, LANDAU M, et al. Performance evaluation of the Gaidoroumandra mini-grid with distributed PV generators[C]// Proceedings of the 4th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, May 29-30, 2008, Athens, Greece.
- [5] KIM J Y, JEON J H, KIM S K. Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(12): 3037-3038.
- [6] de RIBEIRO S L A, SAAVEDRA O R, de MATOS J G, et al. Small renewable hybrid systems for stand alone applications [C]// Proceedings of IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, June 24-26, 2009, Lincoln, NE, USA:1-7.
- [7] 王坤林,游亚戈,张亚群.海岛可再生独立能源电站能量管理系统[J].电力系统自动化,2010,34(14):13-17.  
WANG Kunlin, YOU Yage, ZHANG Yaquin. Energy management system of renewable stand-alone energy power generation system in an island[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 13-17.
- [8] RYDH C J, SANDEN B A. Energy analysis of batteries in photovoltaic system: Part I performance and energy requirements[J]. Energy Conversion and Management, 2005(46): 1957-1979.
- [9] MANWELL J, ROGERS A, HAYMAN G, et al. Hybrid2—a hybrid system simulation model: theory manual[D]. Massachusetts, USA: University of Massachusetts, 2006.

刘梦璇(1985—),女,通信作者,博士研究生,主要研究方向:微电网高级能量管理系统。E-mail: mengxuanliu@tju.edu.cn

郭力(1981—),男,副教授,主要研究方向:分布式发电、微电网系统。E-mail: liguo@tju.edu.cn

王成山(1962—),男,长江学者特聘教授,主要研究方向:电力系统安全性分析、城市电网规划和分布式发电系统。E-mail: cswang@tju.edu.cn

## A Coordinated Operating Control Strategy for Hybrid Isolated Microgrid Including Wind Power, Photovoltaic System, Diesel Generator, and Battery Storage

LIU Mengxuan<sup>1</sup>, GUO Li<sup>1</sup>, WANG Chengshan<sup>1</sup>, ZHAO Bo<sup>2</sup>, ZHANG Xuesong<sup>2</sup>, LIU Yun<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Zhejiang Electric Power Test and Research Institute, Hangzhou 310014, China;

3. Beijing Sifang Automation Co., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Considering the operating constraints of typical equipments in a hybrid isolated microgrid consisting of wind power, photovoltaic system, diesel generator, and battery storage, a coordinated control strategy is proposed. The control strategy aims at ensuring a long-term stable operation of the isolated microgrid and reducing the system cost over lifetime. A typical and practical isolated microgrid is simulated via a self-developed simulation tool named quasi-steady simulation and optimization tool for microgrid (QSOT-MG). The simulation results are compared with those of Hybrid2, a simulation tool developed by National Renewable Energy Laboratory (NERL) of USA. The effectiveness and correctness of the control strategy proposed are verified by comparison.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2009CB219700) and National Natural Science Foundation of China (No. 50625722).

**Key words:** isolated operation; microgrid; coordinated operation; control strategy; energy management system; battery lifetime

附录 A

表 A1 多种控制策略描述  
Table A1 Comparison of various control strategies

| 策略描述  | 柴油机开启                                                 | 柴油机停止                        | 柴油机运行范围               | 柴油机运行功率                 | 电池充电                           | 电池放电                   |
|-------|-------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|
| TPS   | $P_{net}>0$                                           | $P_{net}<0$                  | $MinP_{DG}-MaxP_{DG}$ | $P_{net}$               | $P_{net}<0$                    | $P_{net}>MaxP_{DG}$    |
| MRTID | $P_{net}-MaxP_{discharge}>0$<br>Or $SOC<LowSOC_{bat}$ | $P_{net}-MaxP_{discharge}<0$ | $MinP_{DG}-MaxP_{DG}$ | $P_{net}+MaxP_{charge}$ | $P_{net}<0$ 或<br>柴油机开启         | 柴油机关闭<br>且 $P_{net}>0$ |
| SCC   | $P_{net}-MaxP_{discharge}>0$<br>Or $SOC<LowSOC_{bat}$ | $P_{net}<0$                  | $MinP_{DG}-MaxP_{DG}$ | $P_{net}+MaxP_{charge}$ | $P_{net}<0$ 或<br>柴油机开启         | 柴油机关闭<br>且 $P_{net}>0$ |
| HCC   | $P_{net}-MaxP_{discharge}>0$<br>Or $SOC<LowSOC_{bat}$ | $SOC>HighSOC_{bat}$          | $MinP_{DG}-MaxP_{DG}$ | $P_{net}+MaxP_{charge}$ | $P_{net}<0$ 或<br>柴油机开启         | 柴油机关闭<br>且 $P_{net}>0$ |
| RHCC  | $P_{net}-MaxP_{discharge}>0$<br>Or $SOC<LowSOC_{bat}$ | $SOC>HighSOC_{bat}$          | $MinP_{DG}-MaxP_{DG}$ | $P_{net}+MaxP_{charge}$ | 充电初期<br>$P_{net}<0$ 或<br>柴油机开启 | 柴油机关闭<br>且 $P_{net}>0$ |

附录 B 光伏电池的 P-V 特性

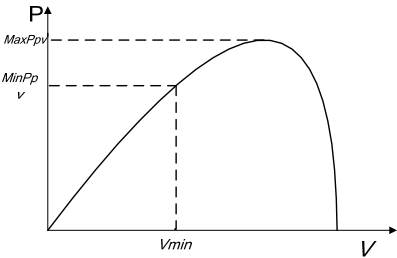


图 B1 某一温度和太阳辐射强度下的光伏电池 P-V 特性曲线  
Fig.B1 P-V characteristic of PV cell under certain temperature and intensity

附录 C 海水淡化装置的工艺流程和特点

海水淡化装置的工艺流程图 C1 所示，进料海水经预处理，去除悬浮固体及其他有害物,然后经高压泵增压后,进入膜脱盐设备,产出的中间淡水产品进入后处理设施，精制成产品淡水，浓盐水自膜脱盐设备排出。其电能能耗主要消耗在抽水和提供反渗透过程所需的压力上，即高压泵、取水泵和辅助设备用电，其功率不可连续变化<sup>[2]</sup>。

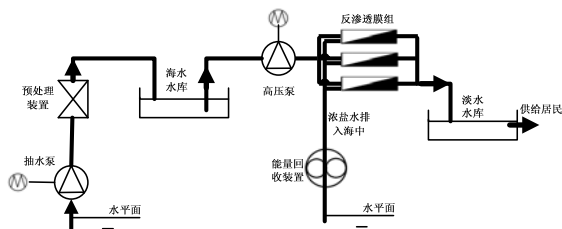


图 C1 反渗透海水淡化装置  
Fig.C1 RO desalination system

## 附录 D

表 D1 RHCC 控制策略主要参数  
Table D1 Parameters of main equipments

| 设备名称 | 条件描述          | 参数              | 设定值             |
|------|---------------|-----------------|-----------------|
| 蓄电池  | 充电约束:         |                 |                 |
|      | SOC 达到充电上限    | $HighSOC_{bat}$ | 85%             |
|      | SOC 上限        | $MaxSOC_{bat}$  | 100%            |
|      | 电压上限          | $MaxV_{bat}$    | 2.7V            |
|      | 放电约束:         |                 |                 |
|      | SOC 达到放电下限    | $LowSOC_{bat}$  | 50%             |
| 柴油机  | SOC 下限        | $MinSOC_{bat}$  | 40%             |
|      | 电压下限          | $MinV_{bat}$    | 1.8V            |
|      | 运行约束:         |                 |                 |
|      | 最小运行功率        | $MinP_{DG}$     | 30kW            |
|      | 较大运行功率        | $HighP_{DG}$    | 70kW            |
| 风机   | 最大运行功率        | $MaxP_{DG}$     | 100kW           |
|      | 最小运行时间        | $MinT_{DG}$     | 1h              |
| 光伏   | 最短停机时间        | $MinT_{ws}$     | 1h              |
| 海水淡化 | 光伏最小输出功率      | $MinP_{pv}$     | 5kW             |
|      | 启动条件: 净负荷达到下限 | $P_{net}$       | 0kW             |
|      | 淡水水库容量下限      | $H_w$           | 0m <sup>3</sup> |
|      | 运行功率          | $P_{RO}$        | 12kW            |

注：蓄电池单节额定电压 2V。

表 D2 设备投资及维护费用  
Table D2 Investment & OM fee of equipments

|       | 容量       | 设备费用(¥) | 运行维护费用(¥)    | 寿命       |
|-------|----------|---------|--------------|----------|
| 光伏    | 1kWp     | 6195    | 230/年        | 20 年     |
| 风机    | 30kW/台   | 837017  | 1200/年       | 15 年     |
| 柴油发电机 | 100kW/台  | 55000   | 5000/5000 小时 | 20000 小时 |
| 铅酸电池  | 1300Ah/节 | 2470    | 0            | /        |
| 变流器   | 1kW      | 5000    | 0            | 20 年     |
| 主控系统  | /        | 400000  | 0            | 20 年     |

附录 E 部分仿真结果

表 E1 结果对比表(全年)  
Table E1 Comparison of results throughout one year

| 名称              | 柴油机<br>发电量<br>(kWh) | 柴油机<br>油耗<br>(L) | 柴油机<br>运行时间<br>(h) | 电池<br>寿命<br>(yr) | 充放电<br>次数<br>(times) | 系统浪<br>费能量<br>(kWh) | 未满足负荷<br>(kW) | 供水量<br>(m <sup>3</sup> ) | NPC<br>(元) |
|-----------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|----------------------|---------------------|---------------|--------------------------|------------|
| TPS             | 258843              | 142789           | 7980               | 5                | 509                  | 140718              | 0             | /                        | 12880619   |
| MRTID           | 134700              | 45933            | 1347               | 0.5              | 1892                 | 5322                | 0             | /                        | 15507199   |
| SCC             | 151464              | 68502            | 3195               | 2.5              | 630                  | 22338               | 0             | /                        | 7136843    |
| HCC             | 135275              | 47544            | 1501               | 1.7              | 836                  | 10377               | 0             | /                        | 6607287    |
| RHCC<br>(无海水淡化) | 158870              | 58192            | 2275               | 2.4              | 456                  | 32033               | 0             | /                        | 5371581    |
| RHCC            | 167646              | 60981            | 2350               | 2.4              | 442                  | 11069               | 0             | 2923.2                   | 6524090    |

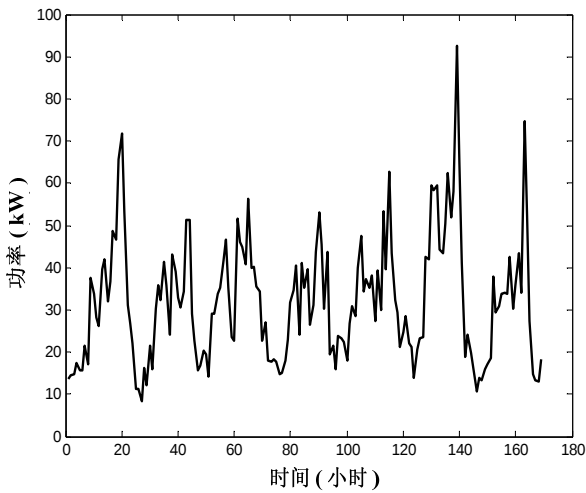


图 E1 一周居民日负荷曲线  
Fig.E1 Residential daily load profile for one week

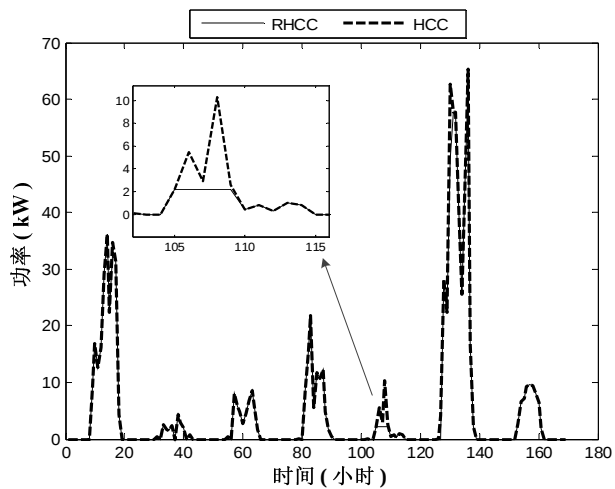


图 E2 两种控制策略光伏出力比较

Fig. E2 Comparison of PV system output based on two different control strategies

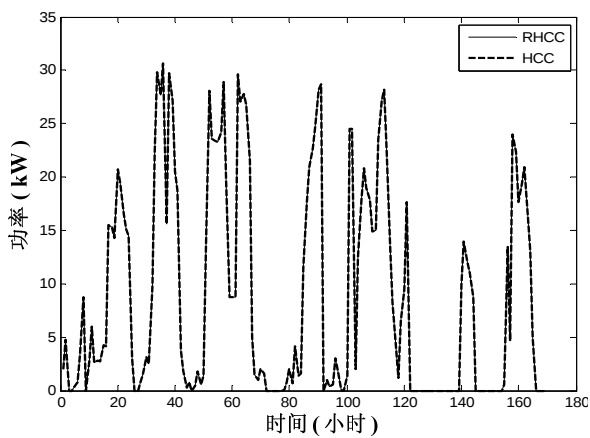


图 E3 两种控制策略风机出力比较

Fig. E3 Comparison of wind turbines output based on two different control strategies

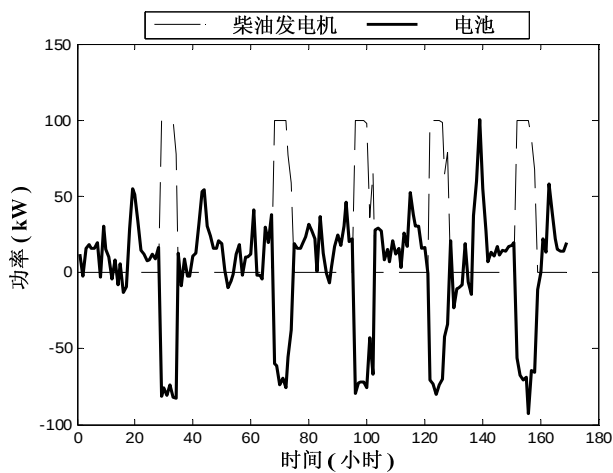


图 E4 HCC 主要仿真结果

Fig. E4 Main simulation results of HCC

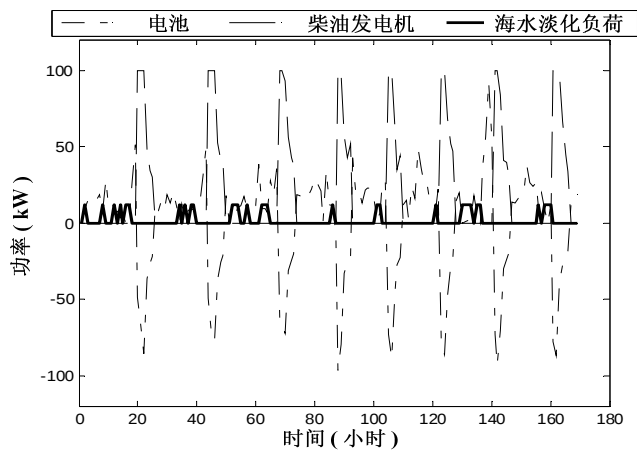


图 E5 RHCC 主要仿真结果  
Fig. E5 Main results of RHCC simulation

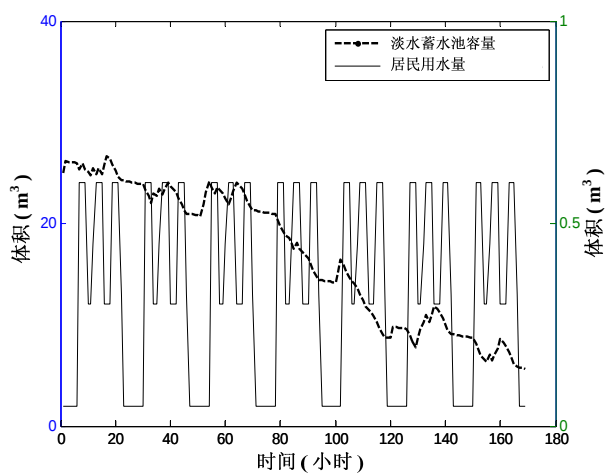


图 E6 RHCC 策略用水量仿真结果  
Fig.E6 Water consumption results of RHCC

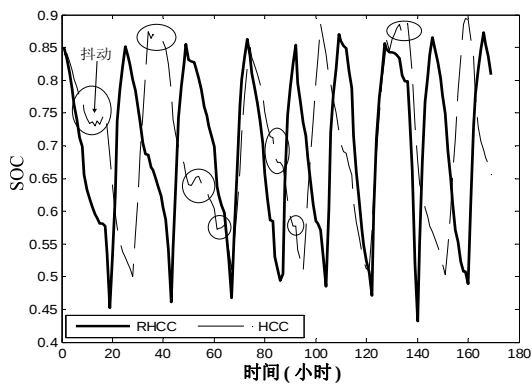


图 E7 电池 SOC 比较  
Fig.E7 SOC of battery