

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.06.015

# 基于微型燃气轮机的多微源直流微网主从协调控制

于海, 孙亮, 岳云凯, 赵冀冠

(国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**多微源直流微网系统母线电压稳定性是其电能质量的重要指标,也是限制其大规模应用的关键因素之一。针对直流微网母线电压波动较大的问题,提出一种以微型燃气轮机为主协调单元的主从协调控制策略。该控制策略充分利用微型燃气轮机的功率调节作用,在有效减小微网母线电压波动范围、使其输出电压更加稳定的同时,一定程度上减少了蓄电池单元投入数量和充放电次数,减少蓄电池的后期维护成本,并在 Matlab/Simulink 中分别搭建分级控制、变功率控制以及主从协调控制模型,通过对比仿真分析的方法,验证了文中所提控制策略在稳定电压及减少蓄电池充放电次数等方面存在的优势。

**关键词:**分级控制;变功率控制;微型燃气轮机;主从协调控制;直流微网

中图分类号:TM761

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)06-0107-08

## 0 引言

随着化石能源的燃烧,人类面临着日益严重的能源问题和环境问题。风能和太阳能等新能源凭借其可再生性和无污染性受到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>。然而新能源发电受环境因素限制明显,有很强的不确定性和间歇性。为了保证供电可靠性和良好的电能质量,直流微网控制策略成为微网研究的重点之一<sup>[4-7]</sup>。

微型燃气轮机作为一种典型的分布式电源,不但可以发出电能和热能,而且具有排放少、效率高、安装方便、维修简单等特点,成为热电联供微网中最有发展前景的分布式电源之一<sup>[8-9]</sup>。

在直流微网的各种控制策略中,分级控制是最常用的控制策略。然而分级控制不能将直流母线电压维持恒定,只能保证微网电压在一定范围内平衡<sup>[10-15]</sup>,而且直流母线电压的变化还会影响直流微网中各个微源、负荷、蓄电池的运行方式,加大直流母线电压的波动范围。文献[16]提出变功率控制策略,该控制策略是以各个微源、负荷、蓄电池的输出功率为参考量,一定程度上减小母线电压的波动,但是该控制策略需要大容量的蓄电池才能保证直流微网的正常运行,且蓄电池还要频繁充放电工作,这就造成了蓄电池投入成本和后期维护费用的增加。

文中首先分析了分级控制与变功率控制存在的问题:电压波动大,需要大量蓄电池单元平衡微网电压,造成了蓄电池投入与维护成本的增加。然后构建一个由风电、光伏、微型燃气轮机、以及蓄电

池等组成的多微源直流微网,在分析了各微源控制策略基础上,提出了以微型燃气轮机为主要协调单元的主从协调控制策略。该策略充分利用微型燃气轮机功率调节特性,降低蓄电池投入成本和维护成本,同时减小微网电压波动范围。最后,分别建立分级控制、变功率控制以及主从协调控制模型,对比仿真分析,验证了文中所提控制策略的优点。

## 1 直流微网主从协调控制

针对直流微网分级控制和变功率控制电压波动大、蓄电池投入与维护成本高等问题,在深入研究直流微网变功率控制与交流微网主从控制的基础上,提出了风光储燃直流微网主从协调控制策略。

### 1.1 直流微网的拓扑结构

文中研究的是风光储微直流微网,其拓扑结构如图1所示。该直流微网主要由微型燃气轮机、蓄电池、光伏、风电及负荷组成<sup>[17-19]</sup>。在该直流微网中,光伏、风电、微型燃气轮机组组成微网微源,作为能量输出单元,负荷作为微网的电能消耗单元,而蓄电池作为协调单元,用于平衡直流微网中功率的波动<sup>[20-24]</sup>。

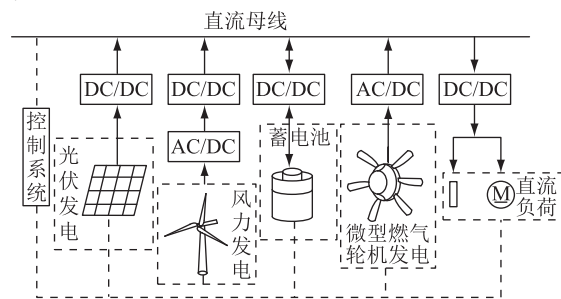


图1 直流微网拓扑结构

Fig.1 Topology of the DC microgrid

### 1.2 微型燃气轮机发电系统的控制策略

#### 1.2.1 微型燃气轮机发电系统

微型燃气轮机发电系统如图 2 所示,由微型燃气轮机、永磁同步发电机(permanent magnetic synchronous generator, PMSG)、整流器和控制系统组成<sup>[25-28]</sup>。文中所采用的微型燃气轮机的控制策略以 Rowen 所提出的单轴微型燃气轮机控制策略为基本控制模型<sup>[29-33]</sup>。

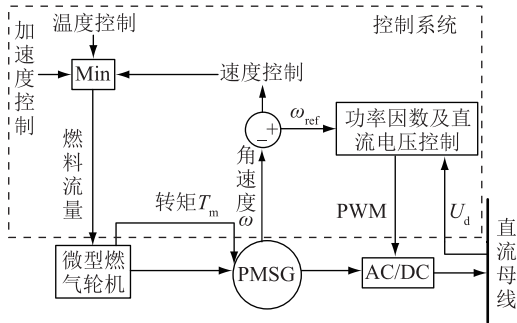


图 2 微型燃气轮机系统结构  
Fig.2 Simplified structure of micro turbine

由图 2 可知,微型燃气轮机输出功率由燃料输入量决定,而燃料流量主要受到 3 个方面的限制:(1) 温度限制,保护燃气轮机进口温度在额定的范围内;(2) 加速限制,避免轮机启、停中对燃料需求过大造成管道热冲击;(3) 速度限制,维持燃气轮机在额定转速附近运行。

微型燃气轮机通过输出转矩  $T_m$  控制永磁同步发电机输出电功率。直流母线电压  $U_d$  通过 PI 整定等控制环节输出参考角速度  $\omega_{ref}$ ,再与永磁同步发电机角速度  $\omega$  做差,输出速度信号,进而控制燃气轮机燃料输入量,控制燃气轮机输出功率。因此,可以通过调节  $\omega_{ref}$  的大小来调节微型燃气轮机输出功率。

当微型燃气轮机输出功率过高时,燃烧室的温度会超过其额定允许值,此时微型燃气轮机的温度控制模块起作用,减少微型燃气轮机的输出功率;当微型燃气轮机输出功率过低时,其微型燃气轮机的发电效率就比较低,造成了燃料的浪费。因此规定了微型燃气轮机输出功率最大值  $P_{MT\_max}$  和最小值  $P_{MT\_min}$ ,既保证了发电安全,又保证了发电效率。

#### 1.2.2 微型燃气轮机发电系统控制方式

燃气轮机控制策略如图 3 所示,其中  $U_{d\_rat}$  为直流微网母线电压额定值; $P_{MT}$  为微型燃气轮机的输出功率。微型燃气轮机的控制策略分为恒功率控制和恒压控制 2 种。

(1) 恒功率控制。当  $P_{MT} \geq P_{MT\_max}$  或  $P_{MT} \leq P_{MT\_min}$  时,微型燃气轮机输出功率最大或者最小,通

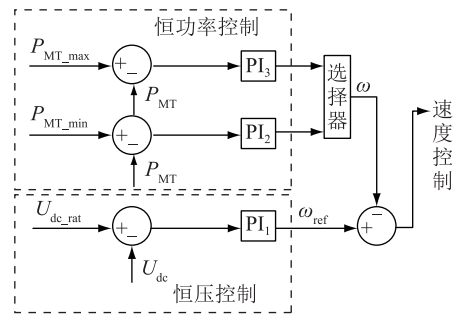


图 3 微型燃气轮机的控制策略  
Fig.3 Control strategy of micro turbine

过 PI 整定环节,调整  $\omega$ ,再与  $\omega_{ref}$  作差,使得速度信号保持不变(最大或者最小),进而控制燃料量,使得微型燃气轮机保持在  $P_{MT\_max}$  ( $P_{MT} \geq P_{MT\_max}$ ) 或者  $P_{MT\_min}$  ( $P_{MT} \leq P_{MT\_min}$ ) 不变。由于此时微型燃气轮机输出功率恒定,因此称此时为恒功率控制或者恒速度控制。

(2) 恒压控制。当  $P_{MT\_max} > P_{MT} > P_{MT\_min}$  时,  $U_d$  与其额定值  $U_{d\_rat}$  作差,然后经 PI 调节后得出  $\omega_{ref}$  的值,再与  $\omega$  作差,得出速度控制信号调节微型燃气轮机燃料进量,调节微型燃气轮机输出功率,控制发电量,保持微网电压恒定。由于直流微网母线电压恒定并保持在其额定值,因此微型燃气轮机此时处于恒压控制模式。

### 1.3 蓄电池的控制策略

其中蓄电池的控制策略如图 4 所示。  $P_c$  为蓄电池的极限功率;  $P_{wind}$  为风电输出功率;  $P_{pv}$  为光伏输出功率;  $P_{battery}$  为蓄电池输出功率;  $P_{load}$  为负荷消耗功率;  $a_c$  为蓄电池充电时 buck 电路占空比;  $a_d$  为蓄电池放电时 boost 电路占空比,令  $\Delta P = P_{pv} + P_{wind} + P_{MT} - P_{load}$ 。

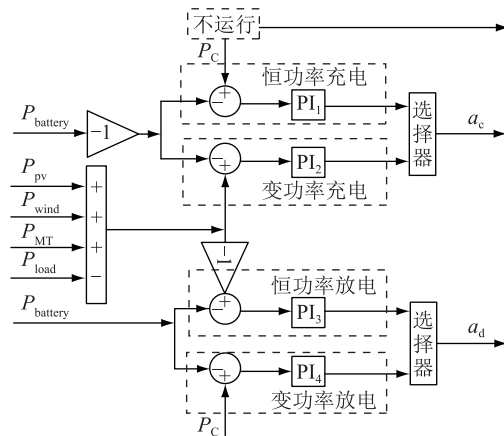


图 4 蓄电池控制策略  
Fig.4 Control strategy of the battery

当微网功率波动在微型燃气轮机的调节范围内时,采用微型燃气轮机来调节微网功率的波动,

此时,蓄电池不运行。当微网功率波动在微型燃气轮机的调节范围外时,燃气轮机输出功率保持  $P_{MT\_max}$  或者  $P_{MT\_min}$ ,通过减法器计算蓄电池极限功率  $P_C$  与  $\Delta P$  比值,当  $|\Delta P| \geq P_C$  时,说明系统功率超出蓄电池功率极限,此时选择相应的恒功率充、放电;当  $0 < |\Delta P| \leq P_C$  时,说明系统功率在蓄电池功率调节范围内,选择变功率充、放电。

#### 1.4 光伏、风电的控制策略

令风力发电的优先权高于光伏发电。当直流微网中微源输出功率过多时,首先,光伏系统采用恒压控制,当光伏系统输出功率降为零且直流微网微源输出功率依旧过多时,此时风电系统采用恒压控制,降低风电系统的输出功率。

光伏、风电的控制策略如表 1 所示。

(1) 当  $\Delta P < P_C$ ,说明此时蓄电池能够调节微网内功率的波动,此时光伏、风电都采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制。

(2) 当  $\Delta P \geq P_C, P_{pv} > 0$ ,说明微网内功率的冗余超过蓄电池的调节范围,此时光伏电池采用恒压控制,以减小光伏电池的输出功率;而风电采用 MPPT 控制。

(3) 当  $\Delta P \geq P_C, P_{pv} = 0$ ,说明微网内功率的冗余超过蓄电池的调节范围,而且光伏电池的输出功率为零,此时风电系统采用恒压控制,以减小风电系统的输出功率。

表 1 光伏、风电的控制策略

Table 1 Control strategy of photovoltaic power and wind power

模式	$\Delta P$	光伏	风电
1	$\Delta P \geq P_C, P_{pv} = 0$		恒压
2	$\Delta P \geq P_C, P_{pv} > 0$	恒压	MPPT
3	$\Delta P < P_C$	MPPT	MPPT

#### 1.5 微网控制策略

对于直流微网的整体控制采用新型控制策略——主从协调控制。该控制策略示意如图 5 所示。该控制策略以微型燃气轮机为主协调单元,蓄电池为从协调单元。相比只采用蓄电池单元作为协调单元的直流微网,该微网所需蓄电池容量较小。在微型燃气轮机调节范围内,蓄电池单元不进行充放电工作,后期维护成本相对较低。

具体控制策略如表 2 所示。直流微网主从协调控制将直流微网分为 6 个工作模式。

模式 1: 当  $P_{MT} \leq P_{MT\_min}, \Delta P \geq P_C, P_{pv} = 0$  时,说明微型燃气轮机输出功率已为最小值,微网内蓄电池采用恒功率充电,以蓄电池的极限吸收微网内冗

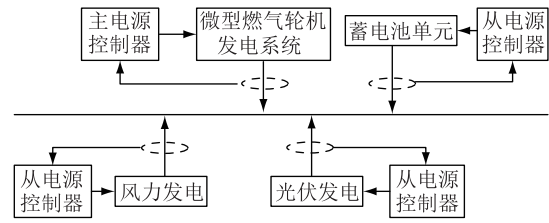


图 5 主从协调控制策略示意

Fig.5 Diagram of master-slave coordinated control strategy

表 2 直流微网主从协调控制

Table 2 Adaptive master-slave coordinated control of DC microgrid

模式	功率	微型燃气轮机	光伏	风电	储能	负载
1	$P_{MT} \leq P_{MT\_min}, \Delta P \geq P_C, P_{pv} = 0$	恒功率			恒压 功率 充电	正常
2	$P_{MT} \leq P_{MT\_min}, \Delta P \geq P_C, P_{pv} > 0$	恒功率	恒压	MPPT	功率 充电	正常
3	$P_{MT} \leq P_{MT\_min}, 0 < \Delta P < P_C$	恒功率	MPPT	MPPT	变功率 充电	正常
4	$P_{MT\_min} \leq P_{MT} \leq P_{MT\_max}$	恒压	MPPT	MPPT		正常
5	$P_{MT} \geq P_{MT\_max}, 0 > \Delta P > -P_C$	恒功率	MPPT	MPPT	变功率 放电	正常
6	$P_{MT} \geq P_{MT\_max}, \Delta P \leq -P_C$	恒功率	MPPT	MPPT	功率 放电	切除

余的功率。此时需要减少微源的输出功率,但由于光伏电池的输出功率已经降为零,所以风电系统采用恒压控制,减小风电系统的输出功率。

模式 2: 当  $P_{MT} \leq P_{MT\_min}, \Delta P \geq P_C, P_{pv} > 0$  时,说明微型燃气轮机输出功率已为最小值,微网内蓄电池采用恒功率充电,以蓄电池的极限吸收微网内冗余的功率。此时需要减少微源的输出功率,所以光伏系统采用恒压控制,以减小风电系统的输出功率。

模式 3: 当  $P_{MT} \leq P_{MT\_min}, 0 < \Delta P < P_C$  时,说明微型燃气轮机输出功率已为最小值,且蓄电池能够调节微网功率的冗余而不需要减小微源的发电功率,所以此时蓄电池采用变功率充电,而光伏、风电系统采用 MPPT 控制。

模式 4: 当  $P_{MT\_min} \leq P_{MT} \leq P_{MT\_max}$  时,说明微型燃气轮机能够调节直流微网功率的波动,此时蓄电池不工作,而光伏、风电系统采用 MPPT 控制。

模式 5: 当  $P_{MT} \geq P_{MT\_max}, 0 > \Delta P > -P_C$  时,说明微型燃气轮机输出功率已为最大值,但蓄电池能够调节微网功率的缺额,所以此时蓄电池采用变功率放电。

模式 6: 当  $P_{MT} \geq P_{MT\_max}, \Delta P \leq -P_C$  时,说明微型燃气轮机输出功率已为最大值,微网内蓄电池采用

恒功率放电,以蓄电池的极限吸收补充微网内缺额的功率,此时需要减少负荷的消耗,所以需要逐步切除一部分不重要的负荷,以维持微网功率的平衡与电压的稳定。

## 2 仿真验证

### 2.1 微网输出随风速变化的仿真分析

为了验证文中所提主从协调控制的可行性,按照图1搭建了仿真平台,具体仿真结果如下。

#### 2.1.1 风速上升对微网输出影响的仿真分析

假设,当 $t < 5$  s时,直流微网中微型燃气轮机、光伏电池、风力发电、负荷等单元全部运行于其额定值,蓄电池不工作;而当 $t \geq 5$  s,随着风速逐渐上升,直流微网各种参数变化曲线如图6所示。

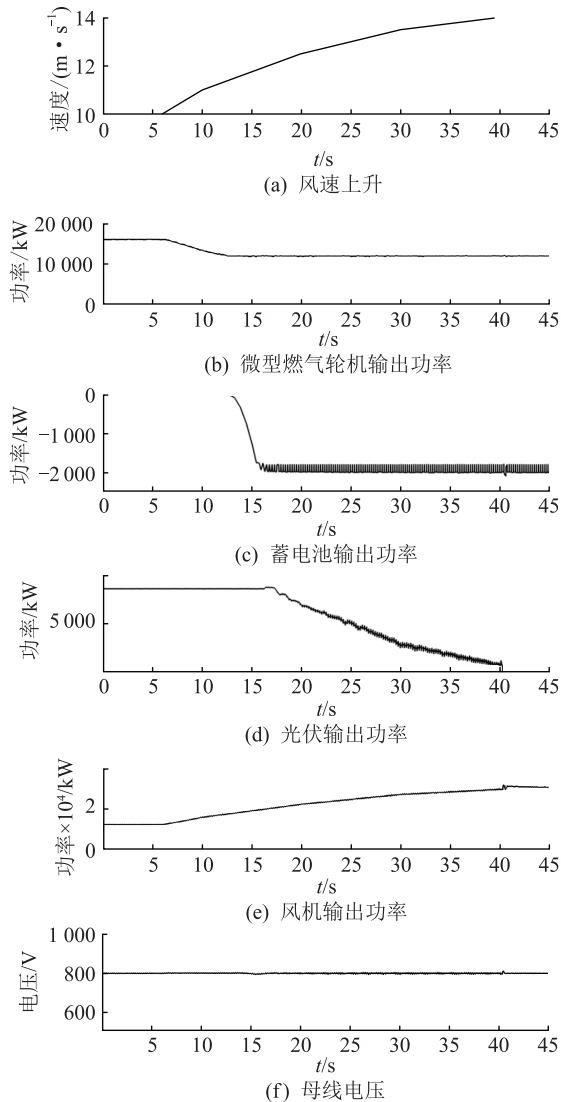


图6 风速上升微网输出变化曲线

Fig.6 Variation curves of DC microgrid with the increasing wind speed

当 $0 \leq t < 5$  s,风速恒定在 $v = 10$  m/s时,直流微网各分布式单元输出功率维持在额定值附近波动。

当 $5 \text{ s} \leq t < 13$  s,风速逐渐升高时,风力发电系统采用MPPT控制,其输出功率逐渐增加;此时为了维持直流微网功率的平衡,微型燃气轮机采用恒压控制,其输出功率逐渐减少,直至减少到其最小输出功率 $P_{MT\_min} = 12$  kW,此时直流微网内蓄电池、光伏的输出功率恒定,直流微网工作于模式4。

当 $13 \text{ s} \leq t < 14$  s,随着风速逐渐升高,风力发电系统输出功率逐渐增加,由于微型燃气轮机的功率达到极小值,采用恒功率控制,使其输出功率维持在最小值。由于微型燃气轮机的功率调节作用达到极限,因此蓄电池开始运行,采用变功率充电控制,随着风电输出功率的增加,逐渐增加蓄电池的充电功率,直至达到其极限充电功率,以维持直流微网功率的平衡。此时光伏的输出功率恒定,直流微网工作于模式3。

当 $14 \text{ s} \leq t < 40$  s,风电输出功率继续增加时,既微型燃气轮机功率调节作用达到极限值后,蓄电池的功率调节作用也达到极限值,其充电功率达到极限充电功率,此时蓄电池采用恒功率充电控制,使蓄电池充电功率维持在其极限充电功率上。由于微型燃气轮机、蓄电池的功率调节作用都达到极限值,为了维持直流微网功率的平衡,此时光伏电池采用恒压控制,逐渐减少光伏电池的输出功率,直至减少到0,此时直流微网工作于模式2。

当 $40 \text{ s} \leq t < 45$  s时,由于由于微型燃气轮机、蓄电池的功率调节作用都达到极限值,且光伏电池输出功率也减少到0,随着风速的继续增加,为了维持直流微网功率的平衡,此时风电系统采用恒压控制。由于直流微网其他微源、负荷的功率保持恒定,因此虽然风速的继续增加,而风电系统输出功率保持恒定,此时直流微网工作于模式1。

由图6(f)可知,在上述变化过程中,直流微网母线电压基本维持在其额定值 $U_{dc\_rat} = 800$  V。

#### 2.1.2 风速下降对微网输出变化的仿真分析

假设,当 $t < 5$  s时,直流微网中微型燃气轮机、光伏电池、风力发电、负荷等单元全部运行于其额定值,蓄电池不工作;而当 $t \geq 5$  s,随着风速逐渐下降直流微网各种参数变化曲线如图7所示。

当 $0 \leq t < 5$  s,风速恒定在 $v = 10$  m/s时,直流微网各分布式单元输出功率维持在额定值附近波动。

当 $5 \text{ s} \leq t < 28$  s,风速逐渐降低时,风力发电系统采用MPPT控制,其输出功率逐渐减少。此时为了维持直流微网功率的平衡,微型燃气轮机采用恒压控制,其输出功率逐渐增加,直至增加到其最大输出功率 $P_{MT\_max} = 20$  kW,此时直流微网内蓄电池、光

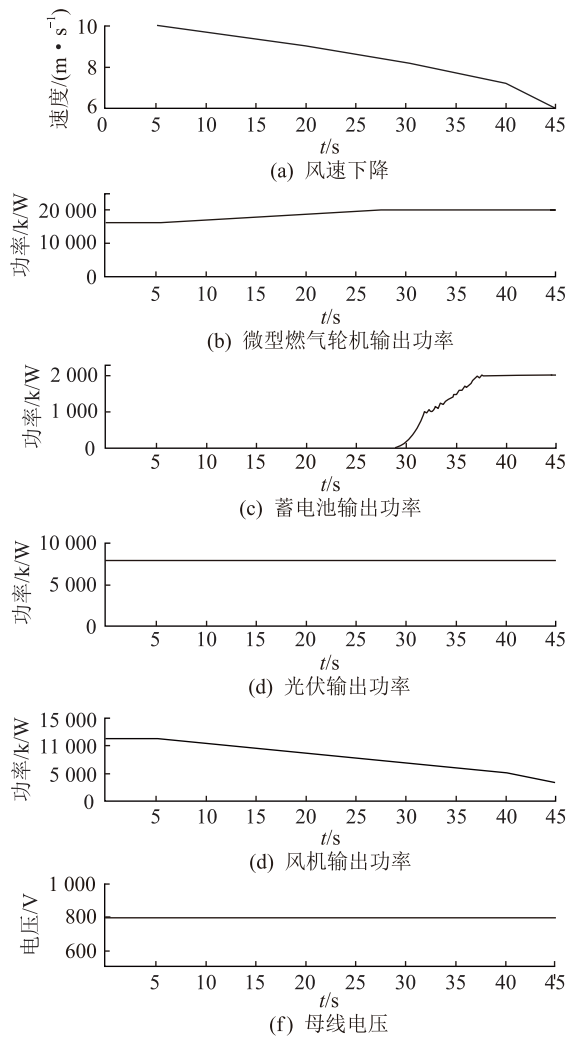


图7 风速下降微网输出变化曲线

Fig.7 Variation curves of DC microgrid with the decreasing wind speed

伏的输出功率恒定,直流微网工作于模式4。

当  $28\text{ s} \leq t < 37\text{ s}$ , 随着风速逐渐降低、风力发电系统输出功率逐渐减少,由于微型燃气轮机的功率达到极大值,采用恒功率控制,使其输出功率维持在最大值恒定。由于微型燃气轮机的功率调节作用达到极限,因此蓄电池开始运行,采用变功率放电控制,随着风电输出功率的减少,逐渐增加蓄电池的放电功率,直至达到其极限放电功率,以维持直流微网功率的平衡。此时光伏的输出功率恒定,直流微网工作于模式5。

当  $37\text{ s} \leq t < 45\text{ s}$ , 风电输出功率继续减少时,既微型燃气轮机功率调节作用达到极限值后,蓄电池的功率调节作用达到也极限值,其放电功率达到极限充电功率,此时蓄电池采用恒功率充电控制,使蓄电池充电功率维持在其极限放电功率上。由于微型燃气轮机、蓄电池的功率调节作用都达到极限值,为了维持直流微网母线电压的稳定与功率的平

衡,此时需要逐渐切除一些次要负荷,以逐渐减少负荷功率,此时直流微网工作于模式6。

由图7(f)可知,在上述变化过程中,直流微网母线电压维持在其额定值  $U_{dc\_rat} = 800\text{ V}$ 。

## 2.2 蓄电池充放电及母线电压对比仿真分析

### 2.2.1 蓄电池充放电对比

假设由于云的运动,光伏电池所接受的光照强度发生变化时,直流微网采用主从协调控制、分级控制、变功率控制蓄电池荷电状态(SOC)变化曲线如图8所示。

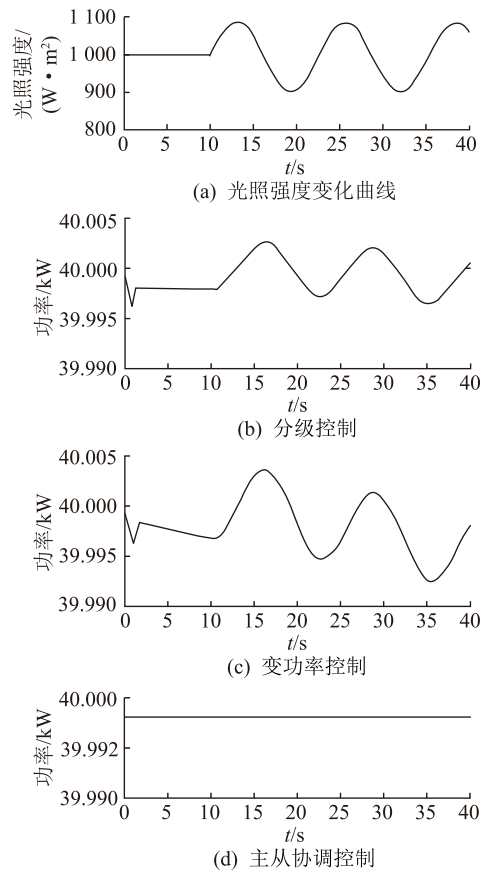


图8 蓄电池 SOC 变化曲线

Fig.8 Simulation curve of battery's SOC

当光照强度依据图8(a)所示的曲线变化时,如果直流微网采用变功率控制或者分级控制,则蓄电池会在充电与放电之间频繁切换,严重影响了蓄电池的使用寿命,且造成蓄电池后期维修成本的增加。如果采用文中所提出的控制策略,微型燃气轮机在一定范围内协调功率变化,减少了蓄电池投入数量,同时当光伏的输出功率变化在微型燃气轮机的功率调节范围时,此时蓄电池不工作,蓄电池后期维修成本相应降低。

### 2.2.2 母线电压对比

当风速依据图7(a)所示的曲线变化时,直流微网分别采用主从协调控制、分级控制、变功率控制

时,其母线变化曲线如图9所示。

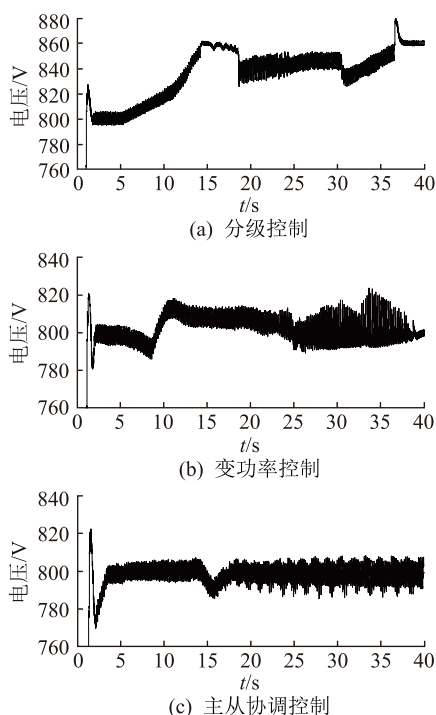


图9 直流母线变化曲线

Fig.9 Simulation curve of bus voltage

直流微网分别采用主从协调控制、分级控制、变功率控制时,其直流母线电压波动幅值大小对比如表3所示。

表3 母线电压变化大小

Table 3 Amplitude variation of bus voltage

控制策略	$U_{dc\_min}$	$U_{dc\_max}$	$\Delta U_{dc}$
主从协调控制	790	805	15
分级控制	800	880	80
变功率控制	790	820	30

由图9和表3知,当直流微网采用文中所提的主从协调控制时,由于微型燃气轮机的支撑作用,直流母线电压不存在大幅波动,且波动范围最小。当采用分级控制时直流母线电压波动大,幅值变化范围最大;当采用变功率控制时,直流母线电压的波动情况相对于采用分层控制的直流微网较好,变化幅度居中。

从仿真结果来看,由于引入了燃气轮机,能有效的减少蓄电池投入数量以及充放电频率,减少后期维修投入,同时电压波动范围更小,电能质量更高。

#### 4 结语

文中在变功率控制与主从控制的基础上创新性地提出了以微型燃气轮机为核心的主从协调控

制策略。该控制策略充分利用了燃气轮机发电系统的调节作用,减少了蓄电池的投入费用,同时有效解决分级控制母线电压波动大,变功率控制蓄电池频繁充放电增加后期蓄电池维护成本等问题。为未来偏远地区热电联供的直流微网建设提供了一种思路。

与蓄电池比较,微型燃气轮机发电系统响应速度相对较慢(秒级),如何提高微型燃气轮机的响应速度,更好的实现微网稳定运行和良好的电能质量是未来研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] 李武华,徐驰,禹洪斌,等. 直流微网系统中混合储能分频协调控制策略[J]. 电工技术学报,2016,31(14):84-92.  
LI Wuhua, XU Chi, YU Hongbin, et al. Frequency dividing coordinated control strategy for hybrid energy storage system of DC micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14):84-92.
- [2] 李欣民. 清洁能源发电技术及市场现状研究[J]. 电力需求侧管理,2017,19(6):29-32.  
LI Xinmin. Research on clean energy power generation technology and market status [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6): 29-32.
- [3] JIAN H, JIE D, HAO M, et al. Distributed adaptive droop control for optimal power dispatch in DC-microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 778-789.
- [4] 李玉梅,查晓明,刘飞,等. 带恒功率负荷的直流微电网母线电压稳定控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):57-64.  
LI Yumei, ZHA Xiaoming, LIU Fei, et al. Stability control strategy for DC microgrid with constant power load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 57-64.
- [5] HATZIARGYRIOU N, ASAND H, IRAVAN I, et al. Microgrids management [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [6] BRACALE A, CARAMIA P, CARPINELLI G, et al. Optimal control strategy of a DC micro grid [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 67(3): 25-38.
- [7] 宋惠忠,程慧,韦安强,等. 新能源光伏对售电市场影响分析[J]. 浙江电力,2018,37(6):42-46.  
SONG Huizhong, CHENG Hui, WEI Anqiang, et al. Effect analysis of photovoltaics on electricity sales market [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(6): 42-46.
- [8] LIU X, WANG P, LOH P C. A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 278-286.
- [9] 郭力,王成山,王守相,等. 微型燃气轮机微网技术方案[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):81-85.  
GUO Li, WANG Chengshan, WANG Shouxiang, et al. A Technical scheme of microgrid system with micro turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 81-85.

- [10] 薛贵挺,张焰,祝达康. 孤立直流微电网运行控制策[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):112-117.  
XUE Guiting,ZHANG Yan,ZHU Dakang. Operational control strategy of stand-alone DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):112-117.
- [11] 王毅,张丽荣,李和明,等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):16-24.  
WANG Yi,ZHANG Lirong,LI Heming,et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):16-24.
- [12] 周焯,汪可友,李国杰,等. 基于多智能体一致性算法的微电网分布式分层控制策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(11):142-149.  
ZHOU Ye,WANG Keyou,LI Guojie, et al. Distributed hierarchical control for microgrid based on multi-agent consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(11):142-149.
- [13] 何英静,李帆,沈舒仪,等. 新能源及分布式电源接入浙江配电网适应性研究[J]. 浙江电力,2018,37(1):32-36.  
HE Yingjing,LI Fan,SHEN Shuyi,et al. Adaptability research on integration of new energy and distributed generation into Zhejiang distribution networks[J]. Zhejiang Electric Power,2018,37(1):32-36.
- [14] 朱翰超,马蕊,孙聪,等. 计及直接负荷控制的商业建筑型微电网优化运行方法[J]. 电力需求侧管理,2019,21(1):32-36.  
ZHU Hanchao,MA Rui,SUN Cong, et al. Optimal operation method of commercial building microgrid considering direct load control[J]. Power Demand Side Management,2019,21(1):32-36.
- [15] 江晨,曾国宏,吴学智,等. 双极性直流微网的分层控制策略[J]. 电网技术,2015,39(8):2217-2222.  
JIANG Chen,ZENG Guohong,WU Xuezhi, et al. Hierarchical control strategy of bipolar-type DC microgrid [J]. Power System Technology,2015,39(8):2217-2222.
- [16] 杨小龙,程启明,褚思远,等. 孤岛模式下光储直流微电网变功率控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):67-74.  
YANG Xiaolong,CHENG Qiming,CHU Siyuan,et al. Variable power control of photovoltaic-battery DC microgrid in islanding mode [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):67-74.
- [17] 朱启扬,徐杰彦,许雯旻,等. 中低压配电网节能改造方案经济效益评估[J]. 电力需求侧管理,2019,21(2):30-35.  
ZHU Qiyang,XU Jieyan,XU Wenyang,et al. Economic benefit evaluation of energy saving modification scheme for medium and low voltage distribution network[J]. Power Demand Side Management,2019,21(2):30-35.
- [18] 袁晓玲,程淋伟,鲁丽娟,等. 基于万有引力搜索算法的微电网风光储容量优化配置[J]. 电力需求侧管理,2017,19(6):14-18.  
YUAN Xiaoling,CHENG Linwei,LU Lijuan,et al. Optimal al-
- location of micro grid wind and solar energy storage capacity based on universal gravitation search algorithm [J]. Power Demand Side Management,2017,19(6):14-18.
- [19] 刘健,魏昊焜,张志华,等. 未来配电网的主要形态——基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(18):11-16.  
LIU Jian,WEI Haokun,ZHANG Zhihua, et al. Future architecture of power distribution network——low-voltage direct current micro-grids based on energy storage[J]. Power System Protection and Control,2018,46(18):11-16.
- [20] 钱军,李欣然,马亚辉,等. 面向负荷建模的微型燃气轮机建模及其等效描述[J]. 电力系统自动化,2010,34(19):81-85.  
QIAN Jun,LI Xinran,MA Yahui, et al. Modeling and equivalent description of micro turbine for load modeling[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(19):81-85.
- [21] 程启明,徐聪,程尹曼,等. 基于混合储能技术的光储式充电站直流微电网系统协调控制[J]. 高电压技术,2016,42(7):2073-2083.  
CHENG Qiming,XU Cong,CHENG Yinman, et al. Coordination control of PV charging station DC microgrid system based on hybrid energy storage technology [J]. High Voltage Engineering,2016,42(7):2073-2083.
- [22] 赵娟娟,王建平,孙伟,等. 基于分布式两级控制的孤岛微电网网络化控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):32-39.  
ZHAO Chanjuan,WANG Jianping,SUN Wei, et al. Networked control strategy of islanded microgrid based on distributed secondary control [J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(3):32-39.
- [23] 邓诗蕾,王明渝. 直流微电网潮流控制器与分布式储能协同控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(24):40-46.  
DENG Shilei,WANG Mingyu. Cooperative control strategy of DC microgrid power flow controller and distributed energy storage system[J]. Power System Protection and Control,2018,46(24):40-46.
- [24] 刘宁宇,曹炜,赵晋斌. 直流微电网的一种增量式下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(8):24-30.  
LIU Ningning,CAO Wei,ZHAO Jinbin. An incremental droop control method for DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control,2018,46(8):24-30.
- [25] 毕大强,范柱烽,解东光,等. 海岛光储直流微电网自治控制策略[J]. 电网技术,2015,39(4):886-891.  
BI Daqiang,FAN Zhufeng,XIE Dongguang,et al. Autonomous control strategy of island DC microgrid with photovoltaic and storage system[J]. Power System Technology,2015,39(4):886-891.
- [26] 施永,杨向真,苏建徽,等. 微网系统不平衡电压补偿控制策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(23):96-102.  
SHI Yong,YANG Xiangzhen,SU Jianhui, et al. Compensation control strategy of unbalanced voltage for microgrid[J]. Auto-

- mation of Electric Power Systems, 2017, 41(23):96-102.
- [27] JOSEP M G, JUAN C V, JOS M, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-ageneral approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1):158-172.
- [28] 李斌, 宝海龙, 郭力. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3):8-15.  
LI Bin, BAO Hailong, GUO Li. Strategy of energy storage control for islanded gicrogrid with photovoltaic and energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3):8-15.
- [29] ROWEN W I. Simplified mathematical representations of heavy duty gas turbines[J]. Journal of Engineering for Power, 1983, 105(4):865-869.
- [30] 刘君, 穆世霞, 李岩松, 等. 微电网中微型燃气轮机发电系统整体建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7):85-89.  
LIU Jun, MU Shixia, LI Yansong, et al. Overall modeling and simulation of microturbine generation systems in microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7):85-89.
- [31] GUDA S R, WAGN C, NEHRIR M H. A simulink-based micro-turbine model for distributed generation studies[C]//Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium. Piscataway, NJ, USA; IEEE Computer Society, 2005: 269-274.
- [32] AHN J B, JEONG Y H, KANG D H, et al. Development of high speed PMSM for distributed generation using microturbine[C]// Industrial Electronics Society 30th Annual Conference. Busan, Korea; IEEE, 2004:2879-2882.
- [33] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16):8-18.  
ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical / thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16):8-18.

作者简介:



于海

于海(1987),男,硕士,工程师,从事直流输电与直流断路器相关工作(E-mail: yuyuhai110@sina.com);

孙亮(1993),男,学士,从事高电压技术相关工作;

岳云凯(1990),男,硕士,从事电力电子技术相关工作。

## Master-slave coordinated control of multi-micro-source DC microgrid based on micro turbine

YU Hai, SUN Liang, YUE Yunkai, ZHAO Mingguan

(State Grid Xinjiang Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Wulumuqi 830011, China)

**Abstract:** DC-bus voltage stability of multi-micro-source DC microgrid system is an important index of power quality and one of the key factors that confine large-scale application. Aiming to solving the large fluctuation of the bus voltage, a master-slave coordinating control strategy based on the micro turbine as the main coordination unit is proposed. This control strategy making full use of the power regulation function of micro turbine, effectively reduces the fluctuation range of micro grid bus voltage and makes the output voltage more stable. At the same time, it reduces the number of batteries and the number of charges and discharges, and reduces the later maintenance cost of batteries. In this paper, hierarchical control, variable power control and master-slave coordinated control models are built in Matlab/Simulink respectively. By comparing the simulation analysis methods, the advantages of the proposed control strategy in reducing the battery input cost, maintenance cost and stable voltage are verified.

**Keywords:** hierarchical control; variable power control; micro turbine; master-slave coordinate control; DC microgrid

(编辑 钱悦)